

L'impermeabilizzazione delle dighe in terra con conglomerato bituminoso: l'esperienza della diga di Chabrouh (Libano) nell'estate 2007

Waterproofing of earthfill dams with bituminous concrete facing: the experience of Chabrouh dam (Lebanon) in summer 2007

LEONARDO SARTI, MICHAEL KOURIS, OTTAVIA IERNA

Ing. Sarti Giuseppe & C Spa

DANIELE CAZZUFFI, CARLO VILLA

ISMES - Divisione Ambiente e Territorio di CESI Spa

Riassunto

La tecnica dell'impermeabilizzazione con paramento in conglomerato bituminoso è la più affidabile ed efficace per le dighe in materiali sciolti. Le conoscenze, le tecniche ed i macchinari sono mutuati principalmente dai lavori stradali ma adattati alla costruzione sul paramento in pendenza della diga di una sovrastruttura che deve garantire una assoluta impermeabilità.

Sono descritte generalmente le principali attività connesse all'esecuzione di questi lavori, e presentata nello specifico una commessa recentemente eseguita in Libano dalla Ing. Sarti Giuseppe & C. Spa, società italiana specializzata in queste opere.

Summary

Bituminous concrete facing is the most efficient and reliable waterproofing system for embankment dams. Know-how, technologies and equipment are mainly derived from road building but are adapted to the construction on a dam facing slope of an absolutely waterproof seal.

The activities connected to the execution of such works are described, and a specific application is presented of a work recently carried out in Lebanon by Ing. Sarti Giuseppe & C. Spa, an Italian company specialized in these works.

1. Premessa

Il problema della impermeabilizzazione delle dighe non è certo nuovo e le diverse soluzioni adottate, in tempi sia recenti che lontani, testimoniano della costante ricerca per la sua soluzione ottimale. Come avviene nella gran parte delle questioni tecniche la soluzione ottimale non è unica, poiché i fattori che la determinano (le caratteristiche fisiche e geometriche della diga, il luogo in cui si trova, i materiali disponibili) sono svariati. Fra le varie

opzioni tecnologiche disponibili nei progetti di costruzione di dighe formate da rilevati terrosi e/o rocciosi con materiali uniformi è possibile proporre diverse soluzioni:

- ▶ nucleo centrale in argilla, se il materiale argilloso è disponibile in loco;
- ▶ nucleo centrale in conglomerato bituminoso;
- ▶ rivestimento in conglomerato cementizio;
- ▶ rivestimento in lamiera di acciaio;
- ▶ utilizzo di geosintetici;
- ▶ rivestimento in conglomerato bituminoso.



La tecnologia del rivestimento del paramento con strati di conglomerato bituminoso risulta combinare moltissimi vantaggi rispetto ad altre applicazioni; tra questi vantaggi elenchiamo i principali:

- ▶ la tenuta del manto è validata da moltissime esperienze nel passato e da studi che rivelano questa tecnologia come avere il più basso tasso di infiltrazione di acqua fra le impermeabilizzazioni in uso per le dighe in terra;
- ▶ gli strati multipli di conglomerato bituminoso costituiscono una spessa e solida barriera di protezione, con elevata resistenza al danneggiamento, agli agenti atmosferici e chimici, al calore ed al fuoco;
- ▶ l'impermeabilizzazione è ottenuta mediante un rivestimento di superficie piuttosto che tramite un nucleo centrale, per cui eventuali danni al manto di tenuta sono individuabili molto più facilmente e le riparazioni sono molto più agevoli;
- ▶ la natura flessibile e plastica del conglomerato bituminoso conferisce allo strato una notevolissima capacità di adattamento ai cedimenti del corpo di diga stesso, al contrario di soluzioni con conglomerato cementizio che rispondono con inevitabili crepe a spostamenti verticali anche piccoli;
- ▶ per lo stesso motivo la risposta di questo tipo di rivestimento agli eventi sismici è notevolmente migliore che quella di rivestimenti più rigidi;
- ▶ nel caso di sifonamento dei materiali inerti sottostanti, al contrario, in cui non vi è un vero e proprio cedimento ma una asportazione di materiale con creazione di cavità all'interno del corpo diga, i rivestimenti in conglomerato cementizio non presentano deformazioni se non in uno stadio molto avanzato del fenomeno, mentre i rivestimenti in conglomerato bituminoso presentano una deformazione evidente che può mettere in allarme con maggiore anticipo;
- ▶ i tempi utili di vita dell'opera sono di parecchie decine di anni e la manutenzione richiesta è minima: quando poi il manto risulta eccessivamente invecchiato si possono compiere le operazioni di fresatura e ripristino dell'ultimo strato di tenuta, proprio come si fa per una pavimentazione stradale.

Tutto questo ovviamente a patto che il lavoro venga eseguito a regola d'arte, in quanto la preparazione della corretta miscela di conglomerato bituminoso e gli

accorgimenti necessari alla corretta preparazione della superficie, stesa, trattamento dei giunti e protezione del rivestimento costituiscono un lavoro delicato ed altamente specializzato.

Per eseguire il lavoro correttamente occorrono conoscenze specifiche sulla composizione delle miscele di conglomerato bituminoso, macchinari particolari per poter eseguire i lavori sulle pendenze della diga e strumenti di controllo adeguati alla alta qualità richiesta per l'esecuzione dell'intervento.

I diversi strati di conglomerato che formano la sovrastruttura impermeabilizzante stesa sopra il corpo diga possono avere diversi spessori e composizioni: sopra un primo strato di binder/livellamento ci possono essere pacchetti completamente chiusi formati solo da strati impermeabili, oppure livelli alternati di strati chiusi e strati drenanti/filtranti in modo da permettere la canalizzazione di eventuali perdite. Spessori e composizione dipendono naturalmente dalle dimensioni e dalle caratteristiche della diga e dell'invaso risultante.

I fattori che maggiormente caratterizzano il lavoro sono essenzialmente la necessità di realizzare un pacchetto perfettamente impermeabile su strutture in cui la perdita di permeabilità può causare danni economici (e non solo) estremamente rilevanti ed il dover eseguire tale delicato lavoro su pendenze che possono arrivare a 1,65B/1H corrispondenti, nella terminologia usualmente utilizzata in ambito stradale, a circa il 61%!

2. L'esperienza della diga di Chabrouh (Libano)

In Libano, come del resto in Medio Oriente e nel Continente africano che si affaccia sul Mediterraneo, la costruzione degli invasi è strategica per l'approvvigionamento idrico, in quanto il Paese si trova in una zona del mondo dove l'acqua è alquanto scarsa.

In realtà il Libano riceve un notevole quantitativo di precipitazioni sulle alte catene montuose che ne costituiscono gran parte del territorio; tuttavia la prossimità al mare di questi rilievi fa sì che gran parte dell'acqua sia perduta in corsi dal regime torrentizio. Per sfruttare le sue notevoli risorse idriche il Libano ha recentemente deciso di costruire una serie di invasi e la

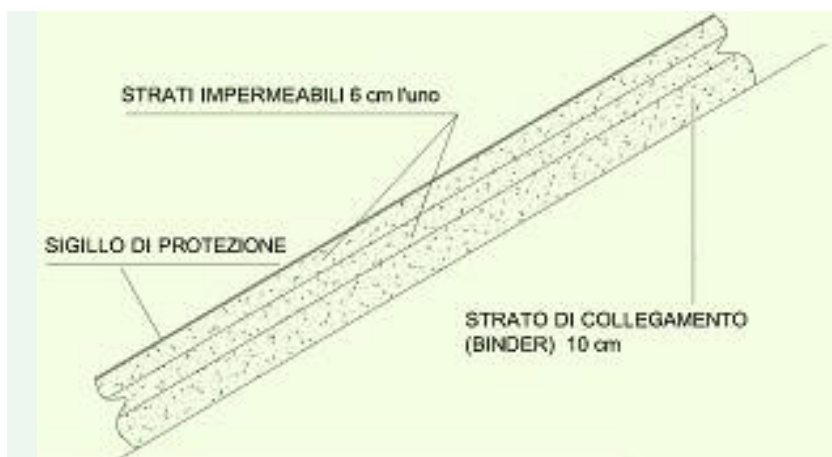


Fig. 1 Sezione della sovrastruttura impermeabilizzante della diga di Chabrouh

diga di Chabrouh è il primo di essi portato a termine. La diga è stata costruita ad un'altitudine di circa 1600 m s.l.m., è alta circa 100 m e presenta una pendenza sul paramento di monte di 1,7B/1H (59%).

L'invaso che ne risulta è di 10 milioni di metri cubi, mentre la superficie complessiva del paramento di monte da impermeabilizzare è di circa 35.000 m².

Originariamente, il rivestimento del paramento di monte dello sbarramento doveva essere eseguito in conglomerato cementizio. In un secondo tempo, spinta da considerazioni qualitative, quali quelle sopra elencate, la scelta dei progettisti è cambiata a favore di un rivestimento in conglomerato bituminoso.

È stato quindi deciso di impermeabilizzare il paramento di monte con tre strati sovrapposti di conglomerato bituminoso:

uno strato di *binder* di 10 cm di spessore che funge da livellamento e base degli strati successivi e due strati di chiusura di 6 cm l'uno che costituiscono la vera e propria barriera impermeabile (**Fig. 1**).



Fig. 2 Stesa del *binder*



La scelta di stendere due pacchetti da 6 cm l'uno invece che un unico strato è comune in queste lavorazioni, ed è dettata da una combinazione di esigenze ed in particolare:

- ▶ il fatto che a causa del lavoro su pendenze elevate non si possono utilizzare rulli di grandi dimensioni e peso;
- ▶ su pendenze elevate, ove l'azione del rullo non è perpendicolare al piano di posa, è preferibile compattare un numero superiore di strati piccoli piuttosto che uno inferiore di strati più consistenti;
- ▶ facendo più strati di conglomerato chiuso è possibile sfalsare i giunti, con doppio effetto benefico: infatti in questo modo il giunto, che è una possibile via di filtrazione, non attraversa tutta la sezione impermeabile; inoltre ogni giunto ha spessore dimezzato ed il suo trattamento è dunque molto più agevole.

La diga doveva essere ultimata nell'estate del 2006 ma, a causa della guerra che ha coinvolto il Paese in quel periodo, il tutto è stato rimandato di un anno. I lavori di impermeabilizzazione sono stati eseguiti fra maggio e ottobre del 2007.

3. La preparazione della miscela

Una fase cruciale e molto delicata del lavoro è naturalmente l'affinamento e la preparazione della miscela del conglomerato, il cosiddetto *mix design*.

Il fuso granulometrico, il tenore del bitume, i coefficienti di permeabilità, l'indice dei vuoti e le altre caratteristiche del conglomerato sono stabilite dal Capitolato, così come le caratteristiche degli inerti e del bitume. All'esecutore sono lasciati tutti quegli accorgimenti per l'affinamento della miscela a partire dai materiali effettivamente disponibili in sito.

Di seguito sono riassunte le caratteristiche principali

Tab. 1 Caratteristiche principali degli strati di conglomerato bituminoso nella diga di Chabrouh

Tab. 1	Strato di collegamento (binder)		Strato impermeabile	
Numero strati	1		2	
Spessore	10 cm		6 cm	
Permeabilità	$k < 10^{-7}$ m/s		$k < 10^{-9}$ m/s	
Indice dei vuoti	da 10% a 15%		" 3%	
Tenore in bitume	da 4% a 7%		da 6% a 10%	
Granulometria	2 - 20 mm	40 - 50%	6 - 12,5 mm	25 - 35%
	0,075 - 2 mm	35 - 45%	2 - 6 mm	20 - 30%
	< 0,075 mm	5 - 12%	0,075 - 2 mm	25 - 35%
			< 0,075 mm	10 - 15%

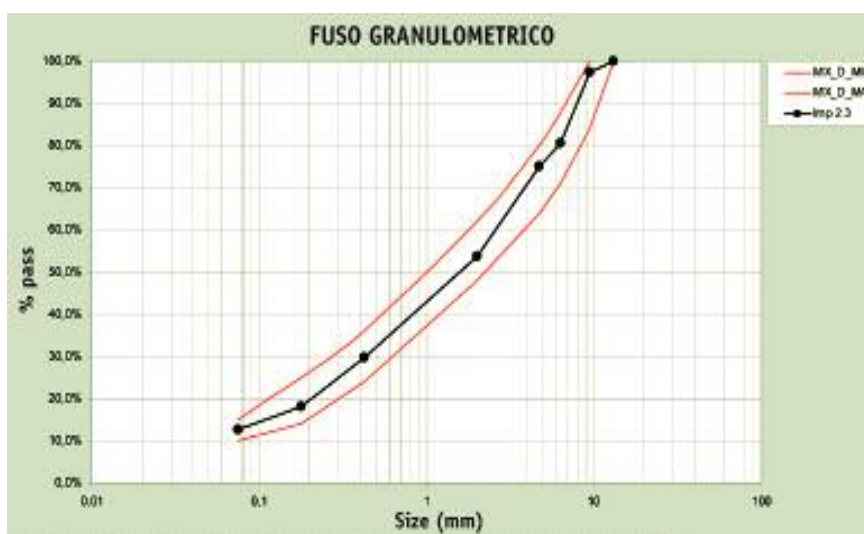


Fig. 3 Fuso di progetto e miscela ottenuta per gli strati impermeabili da 6 cm

delle miscele del *binder* e del "chiuso" per la diga di Chabrouh (**Tab. 1**), mentre il diagramma successivo rappresenta il fuso di progetto e la miscela ottenuta per gli strati impermeabili da 6 cm (**Fig. 3**).

Come è intuibile, a seconda della natura dei materiali disponibili e delle altre condizioni al contorno, l'affinamento della miscela può durare da pochi giorni fino a svariate settimane; è importantissimo arrivare ad una definizione pienamente soddisfacente prima di effettuare le operazioni di stesa in quanto un errore in questa fase può pregiudicare l'intero lavoro.

3.1 Gli inerti

Non essendo il rivestimento soggetto ad azioni usuranti si possono impiegare inerti di natura calcarea, con i relativi vantaggi di adesione del bitume, sia per gli stra-

Tab. 2 Prove preliminari sui materiali inerti

ZONA DI PRELIEVO	PROVA	NORMATIVA
INERTI	Analisi granulometrica	ASTM C 136
GROSSO	Classificazione	UNI 10006
FINE	Peso specifico	ASTM C 127/128-BU 64
	Peso specifico prova CNR	CNR BU 63
	Massa volumica e percentuale di vuoti	ASTM C 29
	Grado di compattezza	ASTM C 88
	Abrasione (Los Angeles)	ASTM C 131
	Indice di plasticità	ASTM D 4318
	Flakiness & forma	BS 812 parte 105,1
	Adesione	ASTM D 1664 - CNR138/92
	Free from unfavourable amounts of clay	ASTM D 1073
	Equivalente in sabbia	AFNOR NF-P-18 598
FILLER	Analisi granulometrica	ASTM D546
	Peso specifico	ASTM 128-CNR BU 63
	Indice di plasticità	ASTM 4318 Metodo B
	Misura del contenuto di sostanze organiche	ASTM D 2974
	Impurità organiche	ASTM C 40
	Fineness	ASTM C 204
	Stiffening power	CNR 122

Tab. 3 Prove preliminari sul bitume

ZONA DI PRELIEVO	PROVA	NORMATIVA
BITUME	Peso specifico	ASTM D 70
	Penetrazione	ASTM D 5
	Punto di rammollimento	ASTM D 36

ti di *binder* che per quelli di chiuso superficiale. Le prove preliminari sui materiali inerti sono riassunti in **Tab. 2**. Per garantire l'impermeabilità la miscela degli strati di chiusura è dimensionata in modo da avere una percentuale di vuoti molto bassa, sotto il 3%. Il filler può essere recuperato dagli altri inerti o, se non sufficiente, integrato con cemento.

3.2 Il bitume

La classe di penetrazione del bitume è determinata dalle condizioni al contorno, in particolare dalla pendenza del paramento e dalle condizioni climatiche dell'ubicazione della struttura.

Dighe con pendenze maggiori avranno necessità di bitumi con valori di penetrazione meno elevati, per evitare il fenomeno di scorrimento del conglomerato lungo il pendio.

Tuttavia la forte dipendenza dei valori di scorrimento dalla temperatura fa poi sì che debba essere tenuta molto in considerazione l'ubicazione della diga. Una diga costruita in paesi freddi, o in alta montagna, necessiterà di bitumi meno rigidi poiché, se da un lato il conglomerato non deve essere troppo scorrevole, dall'altro non deve essere troppo rigido, pena la formazione di crepe nel manto.

Lo sbarramento di Chabrouh si trova a latitudini calde, ma è ubicato a 1600 m slm; si è pertanto optato per un bitume di classe 60-70 (disponibile in loco), che perveniva in cantiere in cisterne riscaldate.

Affinata la miscela, si effettua una stesa di prova su piano orizzontale, per effettuare delle prove di permeabilità in situ mediante vacuometro e per prelevare carote per le varie prove da effettuare prima di approvare definitivamente la miscela che sarà impiegata sul paramento (**Tab. 3** e **Tab. 4** a pagine successive).

4. Nota sui macchinari

I macchinari che operano sul paramento sono derivati da quelli che eseguono lavori stradali, ma modificati in modo da poter operare in pendenza. Essi sono assicurati a dei cavi operati da specifici carri argani che si muovono sulla cresta della diga. Anche gli operatori devono essere particolarmente addestrati ad operare in queste difficili condizioni.

I principali macchinari, specifici per i lavori in pendenza, utilizzati per le lavorazioni di impermeabilizzazione sono i seguenti:

- ▶ 1 carro argano principale;
- ▶ 2 carri argani secondari;
- ▶ 1 vibrofinitrice a cingoli gommati;
- ▶ 1 dumper ribaltabile;
- ▶ 1 rullo metallico vibrante trainato da 6 t;

Tab. 4 Prove finali prima dell'inizio dei lavori di impermeabilizzazione

ZONA DI PRELIEVO	PROVA		NORMATIVA
TRIAL TEST	Densità	3 prelievi durante trial test	ASTM D 1188
	% vuoti	3 prelievi durante trial test	V A
	Tenore di bitume	1 prelievo + 1 carotaggio durante trial test	ASTM 2172
	Analisi granulometrica	3 prelievi + 1 carotaggio durante trial test	ASTM C136
	Stabilità e scorrimento Marshall	3 prelievi durante trial test	ASTM D 1559
	Permeabilità	3 prelievi + 1 carotaggio durante trial test	Shell V A
TUTTI GLI STRATI	Resistenza a scorrimento su piano inclinato (stabilità)	3 prelievi durante trial test	VA
	Flessibilità del conglomerato	1 prelievo durante trial test	VA
	Tipologia miscela		SPT cliente
	Contenuto in bitume		ASTM D 2172 B U n° 38
	Analisi granulometrica		ASTM C 136
	Stabilità e scorrimento Marshall		ASTM D 1559
	Peso specifico		ASTM C 127/128-BU 64
	% vuoti		V A CNR BU 39
	Permeabilità		Shell V A
	Resistenza a scorrimento su piano inclinato (stabilità)		VA
	Effetto dell'acqua su coesione del conglomerato		ASTM D 1075
	Densità		ASTM D1188

- ▶ 1 rullo metallico vibrante da 2,5 t;
- ▶ 1 rullo metallico vibrante da 4,0 t;
- ▶ 1 macchina ribattigiunti.

5. Fasi tipiche della lavorazione

Le fasi lavorative rientrano nelle procedure *standard* consolidate ed affinate in anni di esperienza ed innumerevoli progetti eseguiti con successo.

5.1 Preparazione del sottofondo

Il sottofondo su cui si va a stendere il pacchetto formante la sovrastruttura impermeabilizzante è l'ultimo strato terroso o roccioso del corpo diga.

Esso non solo costituisce il confine fra l'opera di base e quella di tenuta idraulica, ma anche un confine strutturale e di



Fig. 4 Visione d'insieme dei macchinari in operazione durante una stesa



Fig. 5 Il carro argani principale assicura la finitrice, il dumper ed un rullo



Fig. 6 Operare su forti pendenze richiede particolare cautela ed esperienza





Fig. 7 Rullatura preliminare su sottofondo grosso

metodologia costruttiva. Infatti tutti gli strati della sovrastruttura impermeabile, realizzata dopo il termine della costruzione del corpo diga, devono essere stesi e compattati in pendenza, sul piano inclinato del paramento.

Al contrario, il rilevato della diga è realizzato procedendo man mano in altezza, a strati di 50 cm alla volta; come per i rilevati stradali è rullato in orizzontale e la rifilatura che serve a dare una inclinazione uniforme alla diga viene effettuata dopo la compattazione.

Tutto ciò comporta una compattazione non perfetta dello strato inclinato della diga su cui si va poi a realizzare la sovrastruttura impermeabile che, come ricordato, dovrà essere stesa e compattata in pendenza.

Per questo motivo la prima operazione da fare è una rullatura preventiva dello strato di base, realizzata solitamente con un rullo vibrante trainato da 6 t, azionato da un argano operante sulla cresta della diga. Questa operazione permette di realizzare quella continuità strutturale necessaria alla successiva realizzazione della sovrastruttura.

5.2 Emulsione per mano di attacco e fra gli strati di conglomerato

Viene spruzzata sullo strato di base come sopra preparato una emulsione bituminosa, atta a favorire l'incollaggio dello strato di *binder*.

La tipologia dell'emulsione viene scelta in modo da favorire una sua penetrazione ottimale nello strato di base. La rottura dell'emulsione non deve essere troppo veloce per non creare una patina di bitume che costituirebbe un possibile strato di scorrimento fra gli strati e che si attaccherebbe inoltre ai mezzi operanti in scarpata. Tuttavia, la rottura non deve nemmeno essere lenta, in quanto le pendenze molto elevate provocherebbero lo scorrimento verso il piede della diga anche di una miscela molto viscosa.

La tipologia migliore dell'emulsione, per questo tipo di lavoro, si è visto essere quella acida a rapida rottura. I quantitativi dipendono sostanzialmente dalla tipologia dello strato di base: possono arrivare a 1,5-2,0 kg/m² per sottofondi rocciosi aperti, mentre per



Fig. 8 Emulsione spruzzata sul sottofondo roccioso aperto

materiali più fini come quelli del sottofondo in Libano si utilizzano quantitativi più modesti, nel caso di circa $0,3-0,5 \text{ kg/m}^2$.

Le mani di attacco fra gli strati di conglomerato sono anch'esse di tipologia a rapida rottura e in quantitativi minimi, sempre per evitarne lo scorrimento verso valle.

5.3 Stesa e compattazione del conglomerato

Il conglomerato bituminoso è scaricato in un cassone posto sulla cresta della diga (in climi freddi tale artificio non può essere effettuato perché il materiale si raffredderebbe troppo e sono necessari altri accorgimenti come contenitori chiusi o inventati *ad hoc*). Effettuate le prove di temperatura e controllato visivamente il materiale, esso viene prelevato da un escavatore che lo deposita su un *dumper* ribaltabile. Quest'ultimo, assicurato a cavi come del resto tutte le attrezzature operanti in scarpata, discende il paramento della diga e va ad alimentare la finitrice.

La stesa è effettuata da una vibrofinitrice modificata per lavorare in pendenza. I controlli alla partenza della stesa e durante tutto il suo corso sono frequenti in modo da assicurare il corretto spessore dello strato posato.

La successiva rullatura viene effettuata da una coppia di rulli metallici vibranti, uno dei quali, sfruttando il brandeggio del cavo di traino, riesce a discendere in diagonale lungo la scarpata e a compattare il conglomerato dietro la finitrice, immediatamente dopo la sua stesa (esiste anche la possibilità di collegare un piccolo rullo dietro la finitrice).

I rulli sono rispettivamente da 2,5 t (prima rullatura) e 4 t. Il numero dei passaggi è solitamente più elevato che sulle strade in quanto, operando in pendenza, la componente di forza compattante non è perpendicolare al paramento e inoltre negli strati chiusi bisogna raggiungere livelli di compattazione del materiale che porti ad avere un valore di vuoti residui molto basso. »



Fig. 9 Il dumper alimenta la finitrice



Fig. 10 Il rullo usa il brandeggio del cavo per operare dietro la finitrice subito dopo la stesa



Fig. 11 Prima compattazione con rullo vibrante da 2,5 t



Fig. 12 Riscaldamento e ribattitura dei giunti

5.4 Trattamento dei giunti

Particolare attenzione va data al trattamento dei giunti. Oltre alla già ricordata accortezza progettuale di sfalsare i giunti fra i vari strati, esistono accorgimenti operativi ben precisi per realizzare questi elementi così delicati. Il giunto più classico è quello dovuto all'interruzione del lavoro per tempo sufficiente a far raffreddare una stesa (riprese di giornata, maltempo, imprevisti). Alla ripresa del lavoro il bordo della stesa raffreddata viene riscaldato prima della stesa successiva e il giunto viene poi controllato con il vacuometro per rilevarne l'eventuale mancanza di tenuta stagna. Se il controllo non dà risultati soddisfacenti allora il giunto stesso viene ribattuto da una macchina speciale la quale lo percorre per tutta la lunghezza, pre-riscaldandolo mediante irraggiamento da piastra

(*replaster*) e ricompattandolo mediante un pestello basculante. Il controllo col vacuometro viene quindi ripetuto. Tale tipo di controllo è inoltre effettuato di *routine* anche in corrispondenza dei giunti realizzati "a caldo" e, più in generale, su punti casuali del paramento.

5.5 Collegamento al muro perimetrale

Parte finale del lavoro di stesa è il collegamento tra gli strati di conglomerato bituminoso ed il bordo inferiore della diga (diaframmi e/o *muro di cutoff* in calcestruzzo). Tale collegamento viene realizzato utilizzando mastice bituminoso nello strato di contatto tra i due materiali e posizionando tra gli ultimi due strati di conglomerato una geotessile solitamente tessuta con apprettatura a base bituminosa, avente la funzio-



Fig. 13 Applicazione e intasamento della geotessile e successiva compattazione

ne di assorbire le tensioni tangenziali che potrebbero scollare il rivestimento dal *muro di cutoff*. La rete stessa deve essere a maglie larghe in modo da non costituire essa stessa un piano di distacco.

5.6 Sigillo di protezione

L'ultima operazione consiste nell'applicare uno strato di sigillo protettivo sull'ultimo strato impermeabile. La funzione del sigillo è di proteggere la superficie del conglomerato dalle radiazioni ultraviolette, dalle elevate escursioni termiche, dall'attacco di agenti chimici e da fenomeni erosivi.

Si tratta sostanzialmente di una speciale emulsione bituminosa, prodotta industrialmente con additivi appositi in modo da ottimizzarne l'impiego su superfici inclinate e per elevati sbalzi di temperatura. A seconda della tipologia può essere da miscelare in sito con boiaccia cementizia oppure premiscelata industrialmente.

La funzione protettiva del sigillo è molto importante, e rinnovandolo regolarmente (in media ogni 5 anni) si ottiene, con una operazione di manutenzione ordinaria semplice e veloce, un notevole allungamento della vita operativa del manto bituminoso.



Fig. 14 Prova col vacuometro

5.7 Prove in corso d'opera

Le prove in corso d'opera riguardano, come per i lavori stradali, i materiali di base, il conglomerato e carotaggi del paramento. Una prova frequente peculiare di questi

Tab. 5 Prove in corso d'opera

ZONA DI PRELIEVO	PROVA	FREQUENZA	NORMATIVA
CUMULO INERTI	Analisi granulometrica	settimanale	ASTM C136
	Peso specifico	settimanale	ASTM C 127/128
CUMULO FILLER	Analisi granulometrica	bisettimanale	ASTM D546
	Peso specifico	bisettimanale	ASTM C 127/128
CISTERNA BITUME	Penetrazione	ad ogni fornitura	ASTM D 5
	Punto di rammollimento	ad ogni fornitura	ASTM D 36
IMPIANTO DI PRODUZIONE	Densità	giornaliera	ASTM D 1188
	% vuoti	giornaliera	V A
	Tenore di bitume	giornaliera	ASTM 2172
	Analisi granulometrica	giornaliera	ASTM C136
	Stabilità e scorrimento Marshall	giornaliera	ASTM D 1559
	Permeabilità	settimanale	Shell V A
PARAMENTO FINITO	Resistenza a scorrimento su piano inclinato (stabilità)	settimanale	V A
	Controllo in opera con vacuometro	giornaliera	
STESA CONGLOMERATO	Carotaggio	5 estrazioni sopra il livello di massimo invaso	
	Controllo temperatura conglomerato su camion	ogni carico	
	Controllo temperatura conglomerato su finitrice	ogni carico	
	Controllo spessore strato steso	più volte durante ogni striscia stesa	

lavori è il già ricordato controllo della permeabilità in situ mediante vacuometro. Durante le operazioni di stesa devono essere implementati severi controlli sui materiali di base, sulla miscela e sul conglomerato steso (Tab. 5).

6. Manutenzione e riparazione dei rivestimenti in conglomerato bituminoso

Come descritto nel paragrafo precedente, la principale operazione di manutenzione ordinaria consiste nel rinnovo periodico dello strato di sigillatura superficiale. Solitamente la vita di queste opere, se ben fatte, supera i 50 anni. Si inizia a parlare adesso di riabilitazione dei primi lavori eseguiti in Germania negli anni 50. Può accadere tuttavia che ci siano danni allo strato impermeabile di chiusura sottostante, ad esempio per una mancata manutenzione, per carenze costruttive, per cedimenti o eventi sismici di particolare rilievo o per semplice deterioramento, quasi inevitabile dopo varie decine di anni di vita dell'opera.

In questo caso si può procedere a riparazioni di natura localizzata se i danni sono di lieve entità, utilizzando generalmente mastice bituminoso; in alternativa si può operare come in ambito stradale, fresando tutto o una porzione dell'ultimo strato impermeabile e procedendo al suo ripristino mediante stesa sovrapposta. Particolarmente significativa è stata un'esperienza nel 2006, quando si è fresato e ripristinato lo strato impermeabile di una diga nella Sierra Leone, in Africa occidentale; la diga era stata abbandonata per molti anni a seguito dello scoppio della guerra civile e presentava un manto di impermeabilizzazione incompleto e notevolmente deteriorato. Le operazioni sono state eseguite con successo, contribuendo alla messa in attività della diga (prevista nel 2008), che costituisce una importante risorsa energetica per la Sierra Leone.

7. Conclusioni

La tecnica di impermeabilizzazione delle dighe in terra mediante rivestimento in conglomerato bituminoso continua ad essere la preferita per i tipi di diga ai quali è applicabile, e questo, per la sua comprovata efficacia, affidabilità e durabilità. Ancora una volta quindi una tecnologia basata su un largo impiego di bitume nelle sue varie applicazioni (emulsioni, conglomerati, mastici) dimostra, mediante il suo perdurare quasi invariato, nonostante l'enorme progresso tecnologico avvenuto nel frattempo, la sua validità.

Queste grandi applicazioni dimostrano ancora anche l'estrema sicurezza legata all'impiego di materiali bituminosi, spesso vituperati ingiustamente e che sono invece largamente impiegati proprio in lavori che coinvolgono l'uso di una risorsa delicata quale è l'acqua: dagli acquedotti alle grandi dighe, appunto.

L'impermeabilizzazione della diga di Chabrouh è stata completata con pieno successo nel mese di ottobre 2007; la diga stessa potrà iniziare ad operare nel 2008. ■



Fig. 15 La fresatura di un manto ammalorato