

Comitato Nazionale Italiano
delle Grandi Dighe

5

Getto continuo e calcestruzzo rullato nella costruzione delle dighe



Roma 1991

INDICE

<i>Presentazione</i>	5
1. GENERALITÀ	7
1.1 <i>Cenno sullo sviluppo storico della tecnologia del calcestruzzo rullato nella costruzione delle dighe</i>	10
1.2 <i>Vantaggi connessi all'impiego del calcestruzzo rullato nella costruzione delle dighe</i>	12
2. IL MATERIALE	16
2.1 <i>Generalità</i>	16
2.2 <i>Cemento</i>	17
2.3 <i>Cenere leggera</i>	18
2.4 <i>Aggregati</i>	20
2.5 <i>Studio della composizione del calcestruzzo</i>	22
2.5.1 <i>Proporzionamento del calcestruzzo basato su prove di consistenza</i>	22
2.5.2 <i>Proporzionamento del calcestruzzo con elevato contenuto in cenere</i>	25
2.5.3 <i>Proporzionamento del calcestruzzo basato su metodi di compattazione dei suoli</i>	26
2.6 <i>Tipologie di calcestruzzi per dighe</i>	28
2.6.1 <i>Dighe in calcestruzzo magro</i>	29
2.6.2 <i>Dighe in calcestruzzo con un contenuto medio di pasta cementizia</i>	30
2.6.3 <i>Dighe in calcestruzzo con un elevato contenuto di pasta cementizia</i>	31
2.6.4 <i>Considerazioni generali</i>	32
2.7 <i>Proprietà del calcestruzzo rullato</i>	33
2.7.1 <i>Resistenze meccaniche</i>	34
2.7.2 <i>Caratteristiche deformative</i>	35
2.7.3 <i>Permeabilità</i>	36
2.7.4 <i>Caratteristiche di aderenza ai giunti tra gli strati</i>	36

2.7.5	<i>Proprietà termiche</i>	37
2.7.6	<i>Durabilità</i>	38
2.7.7	<i>Considerazioni generali</i>	39
3.	<i>METODOLOGIE COSTRUTTIVE</i>	40
3.1	<i>Produzione degli aggregati e dell'impasto</i>	40
3.2	<i>Trasporto del calcestruzzo</i>	41
3.3	<i>Distribuzione e stesa del calcestruzzo (vedasi Figg. 44 e 45)</i>	41
3.4	<i>Compattazione del calcestruzzo (v.fig. 46)</i>	42
3.5	<i>Operazioni di getto</i>	43
3.6	<i>Confinamento delle superficie di getto</i>	44
3.6.1	<i>Paramenti</i>	44
3.6.2	<i>Giunti trasversali</i>	45
3.7	<i>Interventi particolari</i>	46
3.7.1	<i>Getto ai paramenti</i>	47
3.7.1.1	<i>Paramento di monte</i>	47
3.7.1.2	<i>Paramento di valle</i>	48
3.7.2	<i>Getto all'impasta</i>	49
3.7.3	<i>Scarichi in corpo diga</i>	49
3.7.4	<i>Cunicoli e pozzi</i>	50
3.7.5	<i>Raffreddamento del calcestruzzo</i>	50
4.	<i>PROVE DI LABORATORIO E CONTROLLO DI QUALITÀ SUL CALCESTRUZZO</i>	52
4.1	<i>Studi preliminari</i>	52
4.2	<i>Controllo di qualità durante la costruzione</i>	52
4.3	<i>Valutazione del calcestruzzo a posteriori</i>	55
5.	<i>L'IMPIEGO DEL CALCESTRUZZO RULLATO NELLA COSTRUZIONE DELLE DIGHE IN RIFERIMENTO ALLA VIGENTE NORMATIVA ITALIANA</i>	56
6.	<i>CONCLUSIONI</i>	58
	<i>FIGURE</i>	61
	<i>BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE</i>	103

PRESENTAZIONE

Credo che il volumetto (il quinto della serie) che ho il piacere di presentare ai Soci del Comitato Italiano delle Grandi Dighe susciterà senz'altro il vivo interesse della più parte di essi.

Questa mia convinzione deriva dalla considerazione del successo del Convegno "La tecnologia del calcestruzzo rullato per la costruzione di dighe a gravità" tenuto nel settembre 1989 a Cagliari ed organizzato congiuntamente dall'ITCOLD e dalla Associazione Idrotecnica Italiana.

Coordinati dai colleghi Dott. Ing. Sergio Morpurgo, Dott. Ing. Paolo Bertacchi e Dott. Ing. Aldo Marcello un gruppo di soci, anche attingendo a quanto messo in evidenza nel Convegno in questione, ha esaminato le tecnologie del getto continuo e della rullatura dei calcestruzzi per dighe nei più vari aspetti (qualità dei materiali, modalità di trasporto, di stesa e di compattazione, problemi termici, distanziamento dei giunti ecc.) sviluppando infine le considerazioni economiche che hanno portato ormai tali tecnologie alla più vasta diffusione.

Ho al riguardo notizia che sono attualmente in costruzione nel mondo o stanno per essere costruite più di una cinquantina di dighe in calcestruzzo rullato. Per la maggior parte esse sono del tipo a gravità, ma vi sono anche grandi opere ad arco-gravità come previsto in Sud Africa ed in Cina.

Molte dighe in Italia, principalmente nel Sud e nelle Isole, potrebbero avvalersi delle tecnologie in questione e mi auguro pertanto che il volumetto ITCOLD possa essere di giovamento al riguardo.

Morando Dolcetta

Vice Presidente del Comitato Nazionale Italiano delle Grandi Dighe

Roma, luglio 1991

Questo volume nasce, nell'ambito del Comitato Nazionale Italiano delle Grandi Dighe, dalla collaborazione fra il gruppo di lavoro "Tecnologie di costruzione delle dighe", coordinato dal Dott. Ing. Sergio Morpurgo, e il gruppo di lavoro "Materiali per dighe in calcestruzzo" coordinato dal Dott. Ing. Paolo Bertacchi.

A alla redazione del volume hanno contribuito con il coordinamento del Dott. Ing. Aldo Marcello:

- il Dott. Ing. Saverio Baccini*
- il Dott. Ing. Mario Berra*
- il Dott. Ing. Gennaro Caporaso*
- il Dott. Ing. Paolo Di Berardino*
- il Dott. Ing. Giorgio Eusepi*
- il Dott. Ing. Silvano Morelli*

Getto continuo e calcestruzzo rullato nella costruzione delle dighe

1. GENERALITÀ

Fino al 1960 la percentuale delle dighe costruite in calcestruzzo nel mondo era costantemente in crescita e passava dal 33% nel 1930 al 37% nel 1960. Successivamente questa percentuale è scesa a circa il 23% nel decennio '60 - '70 per raggiungere valori ancora più bassi negli anni '70 - '80 (17,1% 1983 - *World Register of Dams*).

Questa tendenza negativa nella costruzione degli sbarramenti in calcestruzzo è senz'altro anche legata allo sviluppo delle macchine per il movimento di terra che ha reso altamente competitiva sul piano economico la realizzazione delle dighe in materiali sciolti, nelle loro diverse tipologie.

La competitività economica degli sbarramenti in calcestruzzo è stata in un primo tempo ricercata con il loro affinamento strutturale, in ottemperanza al principio che ad un minor volume corrisponde un minor costo; principio sufficientemente valido negli anni '50 - '60.

È in questo periodo che vengono disegnate le dighe a gravità alleggierite, quelle a speroni, le volte sottili, ecc.

Il forte incremento nel costo della mano d'opera allo scadere degli anni '60 ha dimostrato però che non era questa la strada per ottimizzare i costi delle dighe in calcestruzzo. Infatti, le strutture più sottili richiedevano da un lato un maggior impiego di mano d'opera (fino a 5 - 6 ore uomo per metro cubo di calcestruzzo contro le 1 - 2 ore

delle strutture a gravità tradizionali) e dall'altro delle fondazioni di miglior qualità e quindi sempre più difficilmente reperibili.

È quindi risultato opportuno cambiare strategia, orientandosi verso quegli obiettivi che lo sviluppo della struttura in materiali sciolti aveva indicato come vincenti: semplicità strutturale e costruttiva e massimo incremento della produttività di cantiere.

In questa linea si sono fatte, ed ancora si stanno facendo, scelte innovative che semplificano le varie fasi costruttive, permettendo significativi risparmi nei tempi e nei costi di costruzione.

Per il conseguimento di questi obiettivi è indispensabile che la miglior operatività del cantiere trovi applicazione in un progetto semplice e sicuro nelle scelte di tutte le componenti costituenti l'opera.

Con queste premesse l'obiettivo principale e primario nella costruzione di una diga in calcestruzzo è oggi quello di cambiare la metodologia di getto passando da una costruzione per conci isolati (e quindi con piccole superfici di lavoro) ad una messa in opera del calcestruzzo in strati continui, al limite su tutto il corpo della diga, avendo così a disposizione ampie aree di lavoro su cui possono trovare impiego mezzi d'opera di grande produttività.

A questo riguardo fa piacere menzionare l'ing. Giulio Gentile, tecnico italiano oggi scomparso, che nei primi anni '60 ha concepito e diretto la costruzione della diga di Alpe Gera, applicando per la prima volta la tecnologia del getto continuo, diga universalmente riconosciuta antesignana delle più sviluppate tendenze attuali.

Il getto continuo, dal punto di vista tecnico e strutturale, presenta essenzialmente due problemi:

- il problema termico, esaltato dal fatto che l'innalzamento rapido e continuo della struttura riduce la dispersione di calore verso l'esterno;
- il problema dei giunti orizzontali di ripresa, connesso all'allungamento dei tempi di ricoprimento per effetto dell'accresciuta superficie interessata dal getto ed all'incremento del loro numero.

Ad entrambi questi problemi si è ovviato agendo sulle caratteristiche dell'impasto e sulle tecnologie operative.

L'impulso fondamentale alla realizzazione mediante getto con-

tinuo delle dighe di ritenuta è venuto dall'impiego delle ceneri leggere nell'impasto del calcestruzzo.

Questo materiale è il prodotto di "scarto" proveniente dalla combustione del carbone, che si ottiene in grandi quantità nelle centrali termoelettriche. Aggiunto agli altri componenti del calcestruzzo, esplica i suoi benefici effetti sia a breve termine, aumentando i tempi di presa e migliorando la lavorabilità dell'impasto, sia a lungo termine, sviluppando un comportamento pozzolanico e contribuendo ad abbassare il calore di idratazione.

Fra le qualità delle ceneri leggere non si può certo tralasciare quella economica: il loro costo è praticamente nullo, in quanto elemento di scarto di un processo produttivo. Inoltre la possibilità di utilizzarle in grande quantità nella confezione dei calcestruzzi ne evita l'accumulo nelle vicinanze delle centrali termoelettriche, risolvendo così gravi problemi di ordine ambientale ed ecologico.

La soluzione del problema termico e di quello dei giunti di ripresa è stata in un certo senso pregiudiziale allo sviluppo della metodologia del getto continuo nella costruzione delle dighe in calcestruzzo; sono seguite innovazioni di metodologia operativa quali la compattezza mediante rullatura (dove la definizione ormai internazionale di R.C.C. (*Roller Compacted Concrete*), il taglio dei giunti trasversali, l'impiego di elementi preconfezionati per il confinamento dei getti, ecc.

Realmente impressionanti sono i risultati ottenuti con queste nuove metodologie costruttive in termini di risparmio sui tempi e sui costi di costruzione.

Si riportano a titolo di esempio i dati relativi alla diga di Willow Creek, una diga realizzata nel 1982 negli Stati Uniti (Oregon), con un volume di calcestruzzo rullato di 331.000 m³ (H = 52 m; L = 518 m).

Il progetto iniziale di Willow Creek prevedeva uno sbarramento in materiali sciolti con scarichi profondi e superficiali sulle sponde, per costi complessivi stimati in 25 milioni di dollari USA e 3 anni di costruzione: la soluzione in calcestruzzo rullato ha comportato un costo di 16 milioni di dollari USA ed è stata realizzata in 1 anno.

Meno sorprendenti, ma altrettanto positivi, sono i dati relativi alle realizzazioni giapponesi. I tecnici di questo Paese, infatti, hanno messo

a punto e codificato una metodologia costruttiva (R.C.D. - Rolled Concrete for Dams) per le dighe in calcestruzzo basata su specifiche molto più rigide di quelle adottate nelle realizzazioni americane.

1.1 CENNO SULLO SVILUPPO STORICO DELLA TECNOLOGIA DEL CALCESTRUZZO RULLATO NELLA COSTRUZIONE DELLE DIGHE

L'impiego del calcestruzzo rullato nel campo della costruzione delle dighe ha suscitato un notevole interesse soprattutto in quanto consente una importante riduzione dei costi e dei tempi di costruzione, non solo rispetto alle dighe tradizionali in calcestruzzo, ma anche rispetto a quelle in materiali sciolti.

Si è già accennato come pietra miliare, universalmente riconosciuta nello sviluppo dell'applicazione di un simile calcestruzzo, sia stata la costruzione della diga di Alpe Gera tra il 1961 ed il 1964 ove alla stesa per strati seguiva la compattazione del calcestruzzo con i classici vibrator ad immersione. Una simile metodologia ha trovato ancora applicazione in Italia, tra il 1966 ed il 1967, nella costruzione della diga di Quaira della Miniera.

Le prime applicazioni del calcestruzzo rullato si erano avute fin dagli anni '40 in Gran Bretagna, ove, sotto il nome di "*lean concrete*" o di "*dry lean concrete*", un tale tipo di calcestruzzo era stato largamente impiegato per sottofondi stradali ed aeroportuali.

Nel campo delle dighe, il calcestruzzo rullato è stato usato, in principio, per opere complementari: il suo primo impiego, in un progetto riguardante una diga, può essere considerato quello relativo alla costruzione di un contrafforte, alto 18 m e lungo 150 m circa, realizzato nel 1952 a tergo della centrale idroelettrica di Yale, nello stato di Washington, a protezione di una scarpata subverticale di tufo tenero, sottostante una parete di basalto alta circa 120 m, mentre il suo primo impiego proprio nel corpo di una diga può essere considerato quello eseguito nel 1960-61, per la realizzazione del nucleo di tenuta del *cofferdam* in terra, alto 65 m, della diga di Shihmen, a Taiwan.

Le prime idee, tuttavia, relative all'adozione di questa nuova tecnica per la costruzione di dighe, cominciarono a prendere forma agli inizi degli anni '70, quando M. Raphael pubblicò una memoria intitolata "*The Optimum Gravity Dam*", nella quale proponeva l'impiego di materiale sciolto "*tout-venant*", stabilizzato con cemento e compattato, per realizzare una diga, con paramenti più ripidi di una normale diga in materiali sciolti, che avrebbe potuto rappresentare l'ottimo economico tra la classica diga in terra e la diga a gravità, in calcestruzzo convenzionale.

In quegli stessi anni, J. Paton, A. Moffat presentarono al X ed XI Congresso delle Grandi Dighe degli studi sui vantaggi connessi all'impiego di calcestruzzo a consistenza secca, rullato, nella costruzione delle dighe a gravità, ed ancora, tra il 1972 ed il 1974, R. Cannon, della Tennessee Valley Authority, pubblicò i risultati di una serie di prove condotte dalla T.V.A., in grande scala, sul calcestruzzo compattato mediante rulli.

Tra il 1978 ed il 1982, una grande impresa italiana mise in opera oltre 2 milioni di metri cubi di calcestruzzo rullato, per ragguardevoli lavori di ripristino delle vasche di dissipazione degli sfioratori della diga di Tarbela, in Pakistan. Si trattò di una tappa tra le più significative nello sviluppo della tecnica del calcestruzzo rullato, tanto che per il calcestruzzo colà utilizzato (aggregati alluvionali assortiti e cemento per 110-130 kg/m³) fu coniato il nome di "*Rollcrete*".

La tecnica del calcestruzzo rullato nella costruzione delle dighe si è andata sviluppando attraverso varie esperienze, condotte soprattutto negli U.S.A. ed in Giappone, dove si sono avute le prime e più importanti esperienze.

Le prime dighe vere e proprie, realizzate con la tecnica del calcestruzzo rullato, si ebbero a partire dall'inizio degli anni '80. Alla fine del 1980 fu completata, infatti, in Giappone la diga di Shimajigawa e nel 1982 fu realizzata, negli U.S.A., la diga di Willow Creek.

A queste due prime realizzazioni ne fecero seguito, ben presto, diverse altre, soprattutto in Giappone e negli Stati Uniti d'America.

In questi due Paesi la tecnica di costruzione delle dighe in calcestruzzo rullato è andata sviluppandosi sempre più, anche se secon-

do metodologie ed approcci concettuali che differiscono alquanto fra loro, tanto che oggi, per le dighe in calcestruzzo rullato, si può parlare di dighe concepite e realizzate secondo la tecnica americana (per la quale si è adottata la sigla R.C.C. (*Roller Compacted Concrete*) o secondo la tecnica giapponese R.C.D. (*Rolled Concrete for Dams*), sebbene il processo evolutivo tenda oggi a far convergere le due tecniche.

Nella tabella della pagina seguente, sono riportate le principali dighe realizzate nel mondo (completate entro il 1987) con la metodologia del calcestruzzo rullato.

Nelle Figg. 1 - 13 si possono vedere fotografie e disegni schematici di alcune realizzazioni americane e giapponesi, con dettagli relativi alle metodologie costruttive impiegate.

1.2 VANTAGGI CONNESSI ALL'IMPIEGO DEL CALCESTRUZZO RULLATO NELLA COSTRUZIONE DELLE DIGHE

Come visto, l'impiego del calcestruzzo rullato ha trovato negli ultimi anni ampia diffusione nella costruzione delle dighe. Il sistema, che assume diverse denominazioni a seconda dei Paesi in cui viene impiegato, si caratterizza sostanzialmente per l'uso del calcestruzzo come materiale da costruzione, ma impiegando le tecniche di stesa per strati uniformi orizzontali e di compattazione mediante rulli, tipiche della realizzazione delle dighe in materiali sciolti.

Proprio dalla combinazione di questi due aspetti (materiali e tecniche esecutive) derivano i principali vantaggi del sistema che sono di natura sia tecnica che economica. Si unisce infatti il vantaggio dell'utilizzazione di un ottimo materiale da costruzione quale il calcestruzzo, all'impiego dei metodi costruttivi di alta produzione e rendimento delle dighe in materiali sciolti. Se si considera inoltre che il calcestruzzo utilizzato è a basso contenuto di cemento, il vantaggio economico risulta doppiamente sensibile sia per il minor costo dei materiali, sia per la migliore resa produttiva. Anche nei confronti diretti con le dighe in materiali sciolti le realizzazioni in cal-

PRINCIPALI DIGHE REALIZZATE CON LA METODOLOGIA DEL CALCESTRUZZO RULLATO
(di altezza superiore ai 15 m - completate entro il 1987) - Parte I

Anno di completam.	Progetto	Ubicazione	Altezza (m)	Cemento + cen. legg. (kg/m ³)	Inclinazione paramento valle	Volume cls. (m ³)
1980	Shimajigawa	Yamaguchi Giappone	89	84 + 36	0.8 : 1.0	170.000
1982	Willow Creek	Oregon U.S.A.	52	47 + 19	0.8 : 1.0	331.000
1984	Winchester	Kentucky U.S.A.	21	104 + 0	1.0 : 1.0	24.500
1984	Middle Fork	Colorado U.S.A.	38	66 + 0	0.8 : 1.0	42.100
1984	Kidston Copperfield	Queensland Australia	40	80 + 30	0.8 : 1.0	138.000
1985	Galesville	Oregon U.S.A.	51	54 + 52	0.8 + 1.0	160.300
1986	Monksville	New Jersey U.S.A.	46	64 + 0	0.78 : 1.0	221.200
1986	Craigbourne	Tasmania Australia	25	70 + 60	1.1 : 1.0	22.000
1986	De Mist Kraal Weir	Cape Sud Africa	30	58 + 58	0.6 : 1.0	35.000
1986	Arabie	Lebowa Sud Africa	35	34 + 74	0.8 : 1.0	110.000
1986	Keng Kou	Fujian Cina	57	60 + 80	0.75 : 1.0	43.000

PRINCIPALI DIGHE REALIZZATE CON LA METODOLOGIA DEL CALCESTRUZZO RULLATO
(di altezza superiore ai 15 m - completate entro il 1987) - Parte II

Anno di completam.	Progetto	Ubicazione	Altezza (m)	Cemento + cen. legg. (kg/m ³)	Inclinazione paramento valle	Volume els. (m ³)
1986	Grindstone Canyon	New Mexico U.S.A.	42	74 + 30	0.75 : 1.0	87.500
1986	Zaailoek	Natal Sud Africa	50	36 + 84	0.6 : 1.0	120.000
1986	Saco de Nova Olinda	Paraiba Brasile	57	65 + 0	0.8 : 1.0	130.000
1987	Tamagawa	Akita Giappone	103	91 + 39	0.81 + 1.0	1.150.000
1987	Upper Stillwater	Utah U.S.A.	87	77 + 171	0.60 : 1.0	1.070.000
1987	Les Olivettes	Basso Rodano (Francia)	36	88 + 47	0.75 : 1.0	80.000
1987	Lower Chase Creek	Arizona U.S.A.	18	64 + 40	0.7 : 1.0	13.800
1986	Erizana (traversa)	Spagna	15	90 + 90		12.000
1985	Castilblanco de los Arrayos	Spagna	25	87 + 94	0.75 : 1.0	14.000
1987	Los Morales	Spagna	28	69 + 153	0.75 : 1.0	22.000
1987	Pirika	Giappone	40	84 + 36	0.8 : 1.0	360.000
1987	Elk Creek	U.S.A.	76	70 + 33	0.8 : 1.0	795.000

cestruzzo rullato possono condurre a vantaggi economici. I minori volumi in gioco diminuiscono i problemi di ricerca e di disponibilità delle cave, mentre la possibilità di inserire scarichi di fondo e di superficie nel corpo diga consente di evitare opere in galleria e sfioratori sempre molto costosi e spesso di difficile inserzione morfologica e ambientale.

Sotto l'aspetto della sicurezza, la diga in calcestruzzo rullato, essendo in tutto e per tutto assimilabile a una diga in calcestruzzo tradizionale, presenta vantaggi soprattutto in quanto può essere trascinata, in caso di eventi eccezionali, senza pregiudicare la sua stabilità.

Sempre agli effetti della sicurezza la riduzione del tempo di esecuzione può consentire la costruzione dell'opera in periodi meteorologicamente più sicuri (esistono esempi di dighe realizzate in una sola stagione): e questo porta ovviamente anche al vantaggio dello sfruttamento anticipato dell'impianto.

Per quanto attiene all'aspetto progettuale della struttura non si presentano problemi per il rispetto delle normative in vigore per le tradizionali dighe in calcestruzzo. Come risulta dall'esempio delle opere realizzate, il progettista, salvaguardando i criteri base di stesa per strati e compattazione con rulli del calcestruzzo, può decidere sulla opportunità di inserire o non inserire i giunti trasversali, di prevedere calcestruzzo più ricco in pasta di cemento in corrispondenza dei paramenti di monte e di valle, di inserire o meno cunicoli di ispezione e controllo, di ricorrere a manti impermeabili esterni alla struttura, ecc.

Dal punto di vista ambientale si sottolinea ancora la riduzione dei volumi in gioco (rispetto ad una soluzione in materiali sciolti), con conseguenze positive sulle cave e sulle discariche. Altrettanto positivo è poi l'effetto dell'eliminazione delle opere fuori diga, in particolare gli scarichi di superficie, spesso causa di ampie "ferite" sulle sponde della valle per l'inserimento della soglia e soprattutto del canale di scarico.

2. *IL MATERIALE*

2.1 *GENERALITÀ*

Per essere idoneo alla realizzazione di dighe in calcestruzzo rullato, un calcestruzzo dovrebbe essere caratterizzato da numerose proprietà, sia allo stato fresco che indurito. In particolare sono richieste:

- elevata consistenza
- stabilità dimensionale
- buona omogeneità
- contenuto sviluppo di calore
- elevata densità
- buona aderenza al calcestruzzo di altri strati
- contenuto ritiro igrometrico
- buona durabilità.

Inoltre è importante che i criteri di progettazione delle miscele di calcestruzzo, le prove per il loro controllo di qualità e le modalità di posa in opera siano le più semplici possibili, in modo da assicurare a questo materiale la massima versatilità ed economicità. Da questo punto di vista sarebbe auspicabile:

- far ricorso a strumentazioni di laboratorio ed a modalità di prova usuali;
- utilizzare tecniche ed attrezzature costruttive di dominio comune;
- usare normali procedure per il controllo di qualità.

Naturalmente, con i materiali di volta in volta a disposizione e con il livello di tecnologia a tutt'oggi disponibile, è praticamente impossibile soddisfare sempre a tutte queste condizioni ideali. L'approccio più realistico è dunque quello di adeguare opportunamente il materiale alla tecnica del calcestruzzo rullato in modo da garantire le migliori prestazioni tecniche con la massima economicità. Ad esempio, non essendo richieste elevate prestazioni a livello di resistenza a compressione, possono essere utilmente impiegate numerose varianti di miscele di calcestruzzo, in funzione delle caratteristiche dei materiali disponibili localmente e del tipo di filosofia progettuale adottato per la diga.

La caratteristica indispensabile per una corretta posa in opera e compattazione del calcestruzzo è comunque la sua consistenza che deve essere tale da non causare eccessivi cedimenti del materiale sotto il peso dei rulli e al contempo da permettere una completa compattazione del calcestruzzo sotto l'azione dei rulli. Per questo si deve ricorrere ad una miscela con un basso contenuto d'acqua e con una lavorabilità definita a *slump* nullo o, meglio, a consistenza secca, in contrapposizione alla consistenza plastica del calcestruzzo tradizionale. Il completo riempimento dei vuoti tra gli aggregati con della pasta cementizia richiede peraltro un adeguato quantitativo di parti fini e di umidità.

Inoltre la contemporanea esigenza di un calcestruzzo con un basso calore di idratazione impone, compatibilmente con le resistenze da ottenere, la scelta di bassi contenuti di cemento e rende quindi indispensabile il ricorso a ulteriori contributi di parti fini di natura non cementizia.

Un altro aspetto fondamentale per la scelta ed il proporzionamento del calcestruzzo da rullare riguarda la riduzione del rischio di segregazione. La scelta di una ridotta dimensione massima dell'aggregato costituisce in genere una possibile soluzione, ma ciò comporta, visti i bassi dosaggi di cemento della miscela, ancora una notevole presenza di parti fini in grado di svolgere una adeguata azione lubrificante tra gli aggregati.

Un sufficiente contenuto di cenere leggera o materiale pozzolanico nel calcestruzzo ed un elevato rapporto sabbia/aggregato consentono, nella maggior parte dei casi, di dare un'adeguata risposta ai problemi accennati.

2.2 CEMENTO

Qualsiasi tipo di cemento che soddisfi ai normali requisiti di resistenza e durabilità può essere utilizzato per la confezione del calcestruzzo da rullare. Tuttavia, trattandosi di getti massivi sono fortemente consigliati cementi a basso calore di idratazione. Inoltre, poiché la quantità totale di calore sviluppato durante il processo di

idratazione dipende anche dalla presenza di eventuali aggiunte minerali, è indispensabile una valutazione globale dell'incremento di temperatura sull'intera miscela cementizia.

I dosaggi di cemento impiegati sono estremamente bassi, grazie alla contemporanea presenza di materiali pozzolanici ed in particolare della cenere leggera. Generalmente essi variano dai 60 ai 100 kg/m³.

2.3 CENERE LEGGERA

La cenere leggera è un sottoprodotto della combustione del carbone polverizzato nelle centrali termoelettriche ed è costituita da particelle di forma sferica, di natura silico- alluminosa, di cui gran parte inferiore ai 45 micron (Fig. 14).

Con riferimento al suo impiego nel calcestruzzo essa può essere distinta in cenere a basso e ad alto contenuto di calcio. Questa suddivisione è generalmente associata al tipo di carbone e coincide essenzialmente con le classi F e C della normativa americana ASTM. La produzione italiana, tuttavia, riguarda principalmente quella a basso contenuto di calcio. Entrambe le ceneri sono caratterizzate da proprietà pozzolaniche, cioè reagiscono chimicamente con la calce che si sviluppa durante l'idratazione del cemento formando composti stabili con proprietà leganti. Quella ad alto contenuto di calcio, in aggiunta, possiede di per se proprietà leganti.

Nei calcestruzzi da diga la cenere può essere utilizzata, oltre che come materiale pozzolanico, in parziale sostituzione o in aggiunta al cemento, anche come *filler*, in sostituzione o ad integrazione del finissimo degli aggregati. Per i calcestruzzi rullati essa è particolarmente efficace sia per il miglioramento della consistenza e compatibilità che per la riduzione dello sviluppo del calore.

Infatti, grazie alla forma sferica delle sue particelle, la cenere consente di ottenere la stessa densità e compattazione di un analogo calcestruzzo senza cenere, con minori quantitativi d'acqua. (Figg. 15 e 16).

Essa funziona da disperdente nei riguardi dei granuli di cemento che, altrimenti, tenderebbero a coagularsi rendendo la pasta idra-

tata poco omogenea ed uniforme. Si tratta di un effetto analogo a quello prodotto dagli additivi fluidificanti con il vantaggio di una più stabile dispersione delle particelle. La pozzolana naturale, caratterizzata generalmente da particelle irregolari e di frantumazione, e, a maggior ragione, la sabbia naturale, non produrrebbero lo stesso effetto sulla lavorabilità.

Inoltre con la presenza di cenere, si rende disponibile un maggior quantitativo di pasta cementizia che va ad occupare lo spazio tra gli aggregati e migliora la lavorabilità dell'impasto. In sua assenza, questo spazio verrebbe occupato da acqua o cemento. Nel primo caso si avrebbe una minor resistenza e nel secondo un maggior sviluppo di calore.

La frazione di cenere che sviluppa la reazione pozzolanica partecipa, infatti, alla generazione di calore in misura pari al ~50% di quello di una equivalente massa di cemento Portland. Un consistente impiego di cenere e la possibilità di dissipare efficacemente una notevole quantità di calore, grazie alla messa in opera del calcestruzzo in strati sottili, consentono di limitare gli effetti dell'innalzamento termico, da sempre uno dei principali problemi nella costruzione di dighe.

Il dosaggio di cenere nella miscela dei calcestruzzi rullati deve essere determinato anche in base alle richieste di resistenza, impermeabilità e durabilità dell'opera. I valori generalmente impiegati sono dell'ordine di $0,20 \div 0,30$, come rapporto ponderale tra la cenere e l'insieme di cemento e cenere, ma possono raggiungere perfino $0,60 \div 0,70$. Il primo caso corrisponde ai classici criteri di proporzionamento di un calcestruzzo con cenere in cui essa è considerata esclusivamente per il suo effetto pozzolanico. Il secondo caso, invece, riflette criteri ed esigenze di progettazione completamente innovativi, in cui la cenere viene considerata anche nella funzione di *filler* come ausilio alle caratteristiche del calcestruzzo fresco (consistenza e compattazione). Nel calcestruzzo ad alto tenore di cenere si possono ottenere ragionevoli resistenze con bassi rapporti acqua/cemento, corrispondenti a lavorabilità troppo basse per i normali metodi di posa in opera, ma perfettamente adattabili al metodo del calcestruzzo rullato. Con elevati quantitativi di cenere è del resto possibile ridurre notevolmente

l'acqua, a pari lavorabilità dell'impasto. (Fig. 17). In ogni caso, qualunque sia la modalità di impiego della cenere nel calcestruzzo, essa va considerata non come un semplice materiale di aggiunta in sostituzione del cemento, bensì come un ulteriore componente del calcestruzzo alla stessa stregua di cemento, aggregato ed acqua. Naturalmente, come ogni altro componente, anch'essa deve essere sempre opportunamente caratterizzata e sottoposta ad un controllo di qualità.

2.4 AGGREGATI

Nel calcestruzzo rullato può essere utilizzata un'ampia gamma di aggregati con caratteristiche granulometriche differenti, soprattutto per le parti fini, da quelle dei tradizionali aggregati per calcestruzzo: ci sono esempi di calcestruzzi realizzati con aggregati "tout venant" solo parzialmente corretti. Per quanto riguarda le caratteristiche petrografiche, mineralogiche, chimiche, fisiche e meccaniche è tuttavia sempre opportuno rispettare scrupolosamente i requisiti fissati dalle normative.

La scelta dell'aggregato gioca perciò, ancor più che per i tradizionali calcestruzzi vibrati, un ruolo fondamentale nella progettazione del calcestruzzo, condizionandone notevolmente le prestazioni.

Contenuti di parti fini eccedenti gli usuali valori possono essere necessari soprattutto in miscele magre, per sopperire allo scarso contenuto di cemento e cenere e consentire una completa consolidazione del calcestruzzo con un minimo numero di passaggi dei rulli. In considerazione della consistenza secca del calcestruzzo rullato, è sempre necessario uno stretto controllo dell'umidità dell'aggregato fine.

Per quanto riguarda la massima dimensione dell'aggregato grosso, la tendenza generale è quella di non superare i 75-80 mm, anche se in alcuni casi si è arrivati a 150 mm (Diga di Tamagawa e altre dighe giapponesi) e persino a 230 mm (aggregato *tout-venant* per il calcestruzzo rullato impiegato nel ripristino delle vasche di dissipazione della diga di Tarbela in Pakistan).

Infatti durante la fase di scarico e di stesa del calcestruzzo, si può manifestare la segregazione dell'aggregato con formazione di grossi vespai e la conseguente penalizzazione di resistenza, impermeabilità e aderenza ai giunti tra i vari strati (Fig. 18). Questo fenomeno è tanto più accentuato quanto più alti sono gli strati di calcestruzzo steso. Proprio per questo anche i Giapponesi, che normalmente compattano strati di ~70 cm di altezza, procedono alla stesura del calcestruzzo per strati non più alti di 25 cm. L'impiego di nastri trasportatori attenua sensibilmente il rischio di segregazione.

D'altra parte è evidente che una elevata dimensione massima dell'aggregato consentirebbe di ridurre il contenuto di cemento e cenere, con non trascurabili vantaggi dal punto di vista termico. Tuttavia gli oneri per evitare il formarsi di zone non completamente compattate a causa della segregazione dell'aggregato grosso (ad esempio ricorrendo a nastri trasportatori) possono risultare superiori ai risparmi che derivano dal minor contenuto di cemento e dai vantaggi di un più basso calore di idratazione.

Anche la compattazione del calcestruzzo è influenzata dalla massima dimensione dell'aggregato, ma questa gioca un ruolo trascurabile quando lo spessore degli strati da compattare è superiore a tre volte detto valore.

L'uso di aggregato a granulometria discontinua (*gap-graded aggregate*) è a volte suggerito per minimizzare i problemi di segregazione, di filtrazione lungo i giunti orizzontali e di fessurazione di origine termica e da ritiro. Si tratta di usare un aggregato con una dimensione uniforme intorno agli 80 mm i cui vuoti devono essere riempiti con cemento, cenere e sabbia fine. Per quest'ultima è consigliata una granulometria ben studiata ed una dimensione massima di circa 1/8 del più piccolo aggregato grosso.

Dal momento che la superficie specifica dell'aggregato con granulometria discontinua è inferiore a quella di un aggregato con granulometria continua, la quantità di pasta cementizia richiesta per una data consistenza e compattezza del calcestruzzo sarà corrispondentemente inferiore.

2.5 STUDIO DELLA COMPOSIZIONE DEL CALCESTRUZZO

Il proporzionamento del calcestruzzo rullato può essere condotto in modo diverso a seconda che esso tragga origine dalla teoria del calcestruzzo (proporzionamento delle miscele di base a prove di consistenza) o da quella della meccanica dei suoli (proporzionamento delle miscele basato su metodi di compattazione dei suoli). La presenza di notevoli quantitativi di cenere comporta inoltre un nuovo approccio che tenga conto delle peculiari caratteristiche di questo materiale.

2.5.1 PROPORZIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO BASATO SU PROVE DI CONSISTENZA

I rulli vibranti non possono operare se il calcestruzzo è troppo plastico. Tuttavia anche una consistenza troppo asciutta renderebbe estremamente difficile una adeguata compattazione con la conseguenza di scarse resistenze ed insufficiente durabilità.

Un calcestruzzo adatto alla compattazione con rulli vibranti presenta un aspetto assai diverso da un tradizionale calcestruzzo plastico; al momento della messa in opera non è evidente la pasta di cemento che affiora solo quando il calcestruzzo è sufficientemente compattato. L'energia richiesta è comunque molto maggiore che per un calcestruzzo tradizionale.

È perciò indispensabile scegliere con estrema cautela la giusta consistenza attraverso opportune prove.

Per questo tipo di valutazione i Giapponesi hanno messo a punto un misuratore di consistenza del calcestruzzo rullato di dimensioni adatte al calcestruzzo da diga in cui, applicando una vibrazione di 50 Hz con una ampiezza di 1 mm, si misura il valore VC (*Vibrating Compacting Value*), cioè il tempo in secondi necessario alla malta per riempire i vuoti tra gli aggregati grossi e risalire in superficie (Fig. 19). Si tratta di un dispositivo ottenuto modificando il classico VEBE con l'applicazione di una maggiore energia e di un opportu-

no sovraccarico, in modo da simulare al meglio l'azione dei rulli vibranti sul calcestruzzo.

Si è trovato che valori variabili tra 10 e 30 secondi offrono le più elevate densità e le migliori garanzie di compattazione *in situ*. Per valori inferiori a 10 s i rulli rischiano di affondare eccessivamente nella miscela, mentre per valori superiori a 60 s la compattazione risulta estremamente difficoltosa. Il livello di compattazione ottimale è influenzato dal tipo di miscela ed in particolare dal contenuto d'acqua (Fig. 20), dalla dimensione massima dell'aggregato, dal contenuto della sabbia e delle parti fini (Fig. 21).

Negli Stati Uniti si utilizzano generalmente apparati analoghi nella concezione a quello giapponese, ma di dimensioni inferiori e perciò in grado di fornire minori energie di compattazione. Per miscele con uno scarso contenuto di pasta cementizia, essi si sono dimostrati di difficile applicazione. Infatti, per ottenere risultati significativi occorrerebbe aggiungere ulteriori quantitativi d'acqua rispetto a quelli contenuti nella miscela del calcestruzzo in opera. Ed in questo caso la prova di laboratorio potrebbe fornire errate indicazioni, richiedendo aggiunte non necessarie di pasta cementizia. Per questi calcestruzzi si è reso indispensabile effettuare più realistiche stese sperimentali.

Sulla base dei risultati delle prove di consistenza si è trovato che i contenuti d'acqua ottimali variano a seconda del tipo di calcestruzzo tra 70 e 100 kg/m³. Nel caso di miscele contenenti cenere, i contenuti ottimali variano invece tra 70 e 85 kg/m³. Se l'acqua scende al di sotto di un valore limite, le proprietà di resistenza non migliorano, bensì peggiorano, a causa del fatto che la pasta non è più sufficiente a riempire i vuoti tra gli aggregati. Analogamente succede all'aumentare del contenuto d'acqua a causa dei più elevati rapporti acqua/cemento (Fig. 22).

È naturalmente indispensabile una valutazione preliminare del contenuto d'acqua che rende massimo il peso specifico e minima la percentuale dei vuoti della malta (fissato il rapporto sabbia/cemento+cenere) (Fig. 23).

Fatto salvo l'ottenimento di un quantitativo minimo di pasta cementizia che garantisca il riempimento dei vuoti tra gli aggregati e la massima densità al calcestruzzo, il contenuto di cemento e cene-

re e i dosaggi della sabbia possono essere ottimizzati in relazione alle caratteristiche richieste per la resistenza (Fig. 24), per l'aderenza e per la permeabilità tra gli strati, e a considerazioni di tipo termico e possono essere determinati con prove sia su calcestruzzo che su malta.

La scelta dei dosaggi di aggregato grosso è correlata essenzialmente ai vuoti tra i singoli ciottoli e alla loro superficie specifica. Il contenuto dei vuoti, a pari densità dell'aggregato, diminuisce al crescere delle dimensioni dell'aggregato. La superficie specifica, a sua volta, diminuisce all'aumentare, in un dato volume, della presenza di aggregato grosso. Pertanto, maggiori sono le dimensioni dell'aggregato grosso e più elevati i suoi dosaggi, minori risultano i quantitativi di malta necessari a riempire i vuoti e ad avvolgere completamente le particelle. Orientativamente, per dimensioni massime degli aggregati di 150, 120, 80 e 40 mm i relativi volumi assoluti ottimali, in % sul volume totale del calcestruzzo, risultano essere rispettivamente di 63-64%, 61-63%, 57-61% e 52-56%.

Per valori superiori a quelli indicati, le esperienze dimostrano nette diminuzioni delle densità ottenibili con una data energia di compattazione (Fig. 25).

Comunque, qualunque sia la granulometria e la dimensione massima dell'aggregato, il volume dell'aggregato grosso deve essere scelto in funzione delle prestazioni del calcestruzzo, in primo luogo la consistenza a *slump* nullo e l'energia di compattazione.

Una schematizzazione della fase di proporzionamento del calcestruzzo da rullare è mostrata in Fig. 26.

Naturalmente lo studio del calcestruzzo può essere condotto per vie più empiriche, usando ad esempio aggregati con una prefissata granulometria e variando i contenuti di acqua, cemento e cenere in opportuni studi sperimentali. Con una appropriata valutazione dei risultati si arriva ugualmente a individuare la miscela di calcestruzzo con le proprietà desiderate.

2.5.2 PROPORZIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO CON ELEVATO CONTENUTO IN CENERE

Nel caso di elevati contenuti di cenere (60-80% in peso sulla somma di cemento e cenere), può risultare più idoneo un nuovo approccio al proporzionamento del calcestruzzo, basato sempre su prove di consistenza, che tenga però conto anche dello specifico contributo della cenere.

Sperimentazioni condotte in Inghilterra dal CIRIA (*Construction Industry Research and Information Association*) agli inizi degli anni '80 sui calcestruzzi da diga, hanno mostrato che è possibile separare i contributi di cemento e cenere alla resistenza del calcestruzzo e che così come esiste una relazione tra resistenza e rapporto acqua/cemento, ne esiste una anche tra resistenza e rapporto acqua/cenere.

In Fig. 27 è illustrata la separazione dei contributi dei due materiali alla resistenza di un calcestruzzo rullato con elevato contenuto di cenere (60% in volume sul totale cemento+cenere), a diverse età di stagionatura. Con l'aumentare della maturazione il contributo della cenere va via via crescendo, raggiungendo e superando quello del cemento e in modo analogo cresce anche il rapporto acqua/cemento+cenere per il quale il contributo della cenere è nullo. È importante sottolineare che il contributo alla resistenza della cenere è più sensibile di quello del cemento al contenuto d'acqua e che con bassi contenuti d'acqua (tipici del calcestruzzo rullato) il contributo della cenere viene esaltato. In quest'ultimo caso, infatti, la cenere sembra lavorare nelle condizioni migliori: le particelle sono più vicine e i prodotti di reazione si intersecano più facilmente dando luogo a resistenze superiori. Nei normali calcestruzzi con bassi dosaggi di cenere e con rapporti acqua/cemento+cenere più alti il contributo della cenere è meno significativo.

Per ottenere una certa resistenza del calcestruzzo ad alto contenuto di cenere, più che ricorrere alle classiche curve tra resistenza e rapporto acqua/cemento, bisognerebbe utilizzare delle superfici di resistenza in cui compare anche la correlazione tra resistenza e contenuto di cenere (Fig. 28). Una intersezione di queste superfici con

un piano può offrire tutte le possibili combinazioni che offrono le stesse resistenze e tra queste scegliere quella che meglio soddisfa anche ad altre esigenze, non ultima quella economica.

2.5.3 PROPORZIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO BASATO SU METODI DI COMPATTAZIONE DEI SUOLI

La progettazione del calcestruzzo rullato può essere condotta, in alternativa ai metodi più o meno convenzionali per calcestruzzo, facendo ricorso ai metodi della meccanica dei suoli. Questo nuovo approccio consiste nel considerare il calcestruzzo come un aggregato stabilizzato e nel trattarlo come tale, almeno nella fase di progettazione, posa in opera e controllo. In quest'ottica, il parametro fondamentale nella fase di progettazione non è più la densità totale, come nella classica teoria del calcestruzzo, bensì la densità secca dei materiali solidi.

Per un dato aggregato e fissata l'energia di compattazione, la massima densità è ottenibile in presenza di un certo contenuto ottimale d'acqua. A energie di compattazione crescenti corrispondono valori di densità secca più elevati e corrispondentemente contenuti ottimali d'acqua inferiori.

Nella teoria della compattazione dei suoli la funzione dell'acqua in una miscela granulare è solo quella di lubrificante delle particelle, in modo da assicurare maggiori densità. Cioè, contrariamente alle teorie del calcestruzzo, per ottenere più elevate densità e resistenze risulta necessario fornire all'impasto quantitativi d'acqua ben definiti, quelli ottimali, che possono risultare anche superiori a quelli richiesti dall'idratazione del cemento.

Per determinare la massima densità secca del calcestruzzo si possono utilizzare metodi e procedure normalmente impiegati per la compattazione dei suoli, principalmente il metodo Proctor Standard (ASTM D 698) e il Proctor Modificato (ASTM D 1557): la differenza fondamentale è l'energia di compattazione trasmessa, inferiore nel Proctor Standard rispetto al Proctor Modificato.

Si può far ricorso però anche ad altre metodologie di prova, da quella denominata *California Bearing-Ratio* (CBR) a nuove procedure appositamente messe a punto in America da varie organizzazioni, quali ad esempio, l'*American Association of State Highways Officials* (AASHO) e il *Texas State Department of Highways and Public Transportation*.

Generalmente la prova consiste nella caduta di un martello con un certo peso, da una certa distanza e per un predeterminato numero di volte, su un volume di materiale che viene così ad essere sottoposto ad una precisa energia di compattazione. Un problema è quello della dimensione dei contenitori, non sempre idonea per un calcestruzzo da diga. Da questo punto di vista la prova del *Texas State Department* (TEX-113-E) è quella che offre maggiori garanzie, facendo riferimento a un contenitore da 4 dm^3 con la possibilità di impiegare aggregati fino a 45 mm. Con le procedure ASTM si dovrebbero rimuovere dal calcestruzzo gli aggregati con dimensione maggiore di 20 mm sostituendoli con aggregati più piccoli. Seguendo queste procedure si tracciano le curve che esprimono la densità secca in funzione del contenuto di cemento+cenere, l'energia di compattazione, in funzione della modalità di rullatura del calcestruzzo in opera, e il contenuto di parti fini, mentre la curva granulometrica dell'aggregato grosso dovrebbe essere mantenuta nei limiti di specifica.

Il picco della curva indica il contenuto d'acqua ottimale, cui corrisponde la massima densità dei materiali secchi e il minimo volume della pasta di cemento necessario a riempire i vuoti tra gli aggregati (Fig. 29).

Contenuti d'acqua superiori od anche inferiori al valore ottimale conducono a resistenze meccaniche inferiori. Normalmente essi sono espressi in percentuali sul peso secco dei materiali e perciò possono variare in relazione ai pesi specifici ed ai coefficienti di assorbimento degli aggregati. Ciò rende difficoltoso il confronto tra i valori di resistenza di diverse miscele.

I contenuti di cemento+cenere variano generalmente dal 5 al 15% sul peso secco dei materiali solidi aventi densità variabili tra 1920 e 2240 kg/m^3 . Normalmente si preferisce tenere bassa la dimensione

massima dell'aggregato onde evitare problemi di segregazione ed è consigliabile la presenza di un contenuto di parti fini (inferiori a 75 micron) sufficiente per una buona compattazione. Generalmente si fa riferimento al 10-12% in peso della totalità dell'aggregato (Fig. 30).

Gli stessi campioni ottenuti con le prove di compattazione, una volta scasserati e maturati come normali campioni di calcestruzzo, possono essere utilizzati per le valutazioni delle resistenze. La Fig. 31 mostra che tra densità secca dei campioni e la loro resistenza a compressione esiste una sia pur grossolana relazione di proporzionalità, mentre la Fig. 32 illustra lo sviluppo delle resistenze nel tempo al variare dei contenuti di cemento e cenere.

2.6 TIPOLOGIE DI CALCESTRUZZI PER DIGHE

In relazione alla filosofia generale di progetto della diga in calcestruzzo rullato si possono utilizzare diverse varianti per la miscela di calcestruzzo. Se ad esempio la filosofia progettuale è essenzialmente quella di una diga in calcestruzzo convenzionale, come ad esempio propongono i Giapponesi, il proporzionamento del calcestruzzo ricalcherà, con le opportune varianti legate alla diversa consistenza del materiale, quello di un calcestruzzo tradizionale.

Soluzioni completamente diverse potrebbero essere adottate, invece, pensando a dighe in calcestruzzo rullato che presentino distinte le due funzioni di supporto strutturale e impermeabilizzazione.

Schematizzando, si possono individuare tre possibili categorie di miscele di calcestruzzo adatto alla rullatura:

- Calcestruzzo magro o con uno scarso contenuto di pasta cementizia
- Calcestruzzo con un contenuto medio di pasta cementizia
- Calcestruzzo con un elevato contenuto di pasta cementizia.

2.6.1 DIGHE IN CALCESTRUZZO MAGRO

Le dighe realizzate con un calcestruzzo magro o per usare il più usuale termine inglese le “*lean roller compacted concrete dams*”, sono caratterizzate da un corpo diga con un calcestruzzo piuttosto permeabile avente uno scarso contenuto di cemento e cenere (inferiore ai 100-110 kg/m³ di cui 30-40% di cenere) e da paramenti di monte con opportuni sistemi di impermeabilizzazione. Questi possono essere costituiti o da un normale calcestruzzo vibrato, posto in opera con casseforme convenzionali, o da pannelli di calcestruzzo pre-confezionato con o senza membrane in PVC.

Il calcestruzzo, con aggregati generalmente ricchi in parti fini, è posto in opera in strati con spessori di ~30 cm senza regolari trattamenti all’interfaccia dei vari strati. Solo in alcuni casi si ricorre alla stesa di miscele cementizie per la ripresa di getto, in una ristretta fascia vicino al paramento.

Il primo esempio è costituito dalla diga di Willow Creek, realizzata nel 1982 a Heppner-Oregon (USA), con lo scopo di regolazione delle piene. (Vedasi Figg. 1 e 2).

Il calcestruzzo del corpo diga è stato confezionato con 47 kg/m³ di cemento, 19 kg/m³ di cenere ed un quantitativo d’acqua pari a 107 kg/m³. L’aggregato aveva una dimensione massima di 76 mm. Il paramento di monte è stato realizzato con dei pannelli prefabbricati simili a quelli impiegati per la terra armata, mentre quello di valle è stato realizzato senza casseforme.

Agli inconvenienti manifestatisi soprattutto per la scarsa aderenza tra gli strati e l’elevata permeabilità, si è rimediato con iniezioni. L’esperienza acquisita ha in seguito consigliato l’uso di dosaggi di cemento e cenere un po’ più elevati (104 kg/m³ per la diga di Grindstone e 103 kg/m³ per la diga di Elk Creek).

2.6.2 DIGHE IN CALCESTRUZZO CON UN CONTENUTO MEDIO DI PASTA CEMENTIZIA

Sotto questa denominazione possono essere classificate tutte quelle dighe con calcestruzzi aventi dosaggio di cemento e cenere leggermente più elevato (tra 100 e 150 kg/m³) rispetto a quella dei calcestruzzi magri, e quindi con una maggiore presenza di pasta cementizia.

Essi assicurano maggiori impermeabilità al corpo diga, garantiscono migliori condizioni di aderenza tra gli strati ed il loro comportamento complessivo è meno dipendente dalla soluzione scelta per l'impermeabilizzazione del paramento e per la riduzione delle filtrazioni d'acqua.

In questa categoria si possono far rientrare le dighe in calcestruzzo rullato realizzate in Giappone secondo il metodo del RCD (*Rolled Concrete for Dams*) che in sostanza si presenta come una modifica del metodo sviluppato in Italia agli inizi degli anni '60 per la diga di Alpe Gera. In base a questo metodo, la composizione ponderale base utilizzata per i calcestruzzi di molte dighe a gravità costruite sotto la direzione del Ministero della Costruzione giapponese è circa la seguente: rapporto sabbia/aggregato = 0,32; contenuto d'acqua = 100 kg/m³; contenuto di cemento+cenere = 120 kg/m³; percentuale di cenere sul totale cemento+cenere = 30%; dimensione massima dell'aggregato = 80 mm. Inoltre su ciascuno strato di calcestruzzo compattato (oltre 70 cm) viene regolarmente stesa una malta per le riprese di getto.

Nonostante queste precauzioni, nelle dighe giapponesi i paramenti di monte e di valle sono realizzati, per uno spessore di 2-3 m, con un calcestruzzo più ricco in cemento e cenere, posto in opera con normali casseforme e vibrato tradizionalmente. È sempre previsto il taglio dei giunti trasversali con lame vibranti.

2.6.3 DIGHE IN CALCESTRUZZO CON UN ELEVATO CONTENUTO DI PASTA CEMENTIZIA

L'indirizzo filosofico che sta alla base di questo tipo di diga è frutto di una scelta tra due possibili vie percorribili per assicurare prestazioni più elevate al calcestruzzo della diga:

- Migliorare decisamente le proprietà del calcestruzzo su tutta la massa della diga e quindi optare per un calcestruzzo ad elevato contenuto di pasta cementizia.
- Migliorare queste proprietà soprattutto là dove servono (sulle riprese di getto) e quindi optare per calcestruzzi con minori contenuti di pasta cementizia, ma ricorrere all'impiego di malte che favoriscono l'aderenza fra i vari strati di calcestruzzo.

Alcuni ritengono che la prima soluzione sia preferibile alla seconda perché, in base alle esperienze finora maturate, risulta più semplice, pratica ed economica.

In questo caso il concetto è quello di affidare la funzione di impermeabilità completamente alla massa del corpo diga, lasciando ai paramenti il solo compito di pelle protettiva.

Poiché nel corpo diga non è possibile aumentare oltre certi valori i dosaggi di cemento, per i conseguenti problemi legati al calore di idratazione, l'aggiunta di cenere leggera, anche in forte quantità, è risultata la via più pratica per ottenere elevati contenuti di pasta cementizia nel calcestruzzo. La malta dovrebbe essere sufficiente a riempire i vuoti tra gli aggregati grossi, mentre la pasta cementizia dovrebbe essere sufficiente a riempire i vuoti tra gli aggregati fini, in modo da rendere minimi i vuoti d'aria e massima la densità. La Fig. 33 mostra la densità del calcestruzzo (come % della densità teorica senz'aria) in funzione del rapporto tra la pasta e la malta cementizia (P). Al di sotto di $P = 0,35$ è riscontrabile una rapida diminuzione della densità, correlabile al fatto che la porosità (cioè il contenuto d'aria del materiale compattato) di un aggregato fine varia tra 0,35 a 0,40.

Per le dighe con calcestruzzo ad alto contenuto di pasta la somma

di cemento e cenere è generalmente superiore a 150 kg/m^3 , con contenuti di cenere dell'ordine del 70-80%. Ciò consente di mantenere il dosaggio del cemento ancora basso.

Esempi di questo tipo di diga sono: tra le altre, la diga di Upper Stillwater negli USA, la diga di Zaaihook in Sud Africa e la diga di Kengkov in Cina. La diga di Upper Stillwater, alta 87 m, è stata completata nel 1987 utilizzando $1.070.000 \text{ m}^3$ di calcestruzzo rullato. Il calcestruzzo del corpo diga contiene 77 kg/m^3 di cemento, 170 kg/m^3 di cenere e 107 kg/m^3 di acqua. La dimensione massima dell'aggregato utilizzato è stata di 50 mm e gli strati di calcestruzzo (30 cm di altezza) sono stati messi in opera senza alcuna miscela di ripresa.

I paramenti di monte e di valle, realizzati con casseforme rampanti, hanno costituito gli elementi di facciata contro cui è stato rullato il calcestruzzo del corpo diga. Come per la diga di Willow Creek non è stato previsto alcun giunto di contrazione trasversale.

2.6.4 CONSIDERAZIONI GENERALI

In tabella sono riportati i dati essenziali di tre tipici esempi di composizioni di calcestruzzo, rispettivamente per dighe con calcestruzzo magro (a), con un contenuto di pasta cementizia medio (b) ed elevato (c).

Tab. I - Tipiche composizioni di calcestruzzi rullati

DIGA	H m	Vol. cls rullato m^3	Dim. max aggregato mm	C cemento kg/m^3	F cenere kg/m^3	C+F kg/m^3	F C+F	A acqua l/m^3
Willow Creek	52	331.000	76	47	19	66	28,8	107
Shimajigawa	89	170.000	80	84	36	120	30,0	105
Upper Stillwater	87	1.070.000	50	77	170	247	68,8	107

L'attuale tendenza è quella di orientarsi verso calcestruzzi con maggiori contenuti di pasta cementizia rispetto a quelli di alcune realizzazioni iniziali e le dighe degli ultimi anni hanno visto un prevalere di calcestruzzi con dosaggi di cemento e cenere superiore ai 100 kg/m^3 (Fig. 34). Sono sempre più numerose le dighe con un elevato contenuto di pasta cementizia e in particolare con elevato contenuto di cenere.

In Italia per ora esiste un solo caso di diga in calcestruzzo rullato, il cui progetto è stato approvato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Si tratta della diga di Rio Monti Nieddu, in Sardegna, il cui progetto prevede la realizzazione di una diga a gravità alta 87 m e con una lunghezza al coronamento di 345 m. Il calcestruzzo rullato interessa solo il nucleo della diga, mentre i paramenti di monte e valle (per uno spessore di 3 m), la fondazione, il coronamento ed il contorno dei cunicoli sono previsti in calcestruzzo tradizionale, dosato con 220 kg/m^3 di cemento pozzolanico. Per il calcestruzzo rullato è prevista una composizione orientativa di $100\text{-}110 \text{ kg/m}^3$ di cemento pozzolanico, $100\text{-}100 \text{ kg/m}^3$ di cenere, $110\text{-}130 \text{ kg/m}^3$ di acqua ed un aggregato di dimensione massima pari a 80 mm, con una corretta curva granulometrica.

Ulteriori studi di laboratorio ed una sperimentazione su scala reale potranno definire la composizione nel dettaglio.

L'orientamento è però quello di un calcestruzzo con un elevato contenuto di pasta ottenuto con forti dosaggi di cenere.

Il ricorso al calcestruzzo tradizionale per i paramenti e alla stesura di una malta tra due strati successivi (ciascuno di ~30 cm di spessore) costituiscono una più che sufficiente garanzia per un prudente approccio a questa tecnica in Italia. È previsto, come per le analoghe dighe giapponesi, il taglio dei giunti con lame vibranti.

2.7 PROPRIETÀ DEL CALCESTRUZZO RULLATO

Le notevoli differenze nelle composizioni del calcestruzzo rullato, ancor più che nel calcestruzzo normale, rendono estremamente difficile quantificarne le proprietà sia pure per valori medi.

In particolare giocano un considerevole ruolo sia il tipo e la qualità dell'aggregato che il contenuto di pasta cementizia. Inoltre una variabile estremamente importante per tutte le proprietà del calcestruzzo è l'energia di compattazione messa in gioco e la conseguente densità raggiunta dopo la rullatura. La Fig. 35 mostra ad esempio i rapporti tra la densità reale e quella teorica trovati sui calcestruzzi di alcune dighe giapponesi in funzione del numero di passaggio dei rulli e della corrispondente energia di vibrazione. In generale i valori di densità del calcestruzzo rullato sono uguali se non maggiori di quelli di un normale calcestruzzo vibrato. Ciò risulta tanto più vero quanto maggiore è il contenuto di pasta cementizia nel calcestruzzo.

2.7.1 RESISTENZE MECCANICHE

Per quanto riguarda la resistenza a compressione, le variazioni in funzione del rapporto acqua/cemento possono essere simili o diverse da quelle classiche di un normale calcestruzzo, a seconda che si considerino calcestruzzi molto magri o calcestruzzi con un sufficiente contenuto di pasta cementizia. Questi ultimi in generale garantiscono valori di resistenza per lo meno uguali a quelli dei calcestruzzi tradizionali. Ma anche a pari contenuto di pasta cementizia ed a pari dosaggio di aggregato la situazione cambia considerevolmente in funzione della qualità dell'aggregato, come è chiaramente illustrato dalla Fig. 36.

L'esperienza ha dimostrato che, soprattutto per calcestruzzi con un basso contenuto di pasta cementizia, il metodo di confezionamento dei provini ha una notevole influenza sia sulla densità che sulla resistenza e che spesso la correlazione tra valori ottenuti su provini preparati in laboratorio e carotati in situ è scarsa. La situazione è migliore quando si usano sufficienti quantitativi di pasta cementizia, ma occorre in ogni caso porre la massima cura nel definire le modalità di prova.

Se lo strato del getto è elevato (maggiore di 30 -40 cm) è possibile trovare una differenza dei valori di densità e resistenza tra la parte superiore e quella inferiore. Ad esempio, dai provini carotati della diga di Shimajigawa è emerso che la resistenza a compressione del-

la parte superiore dello strato di calcestruzzo di 70 cm era più bassa del 20-30% rispetto a quella dello strato inferiore. Questa variazione può essere attribuibile all'incremento di aria trattenuta negli strati superiori del calcestruzzo durante la compattazione.

La presenza nei calcestruzzi di elevati contenuti di cenere dà luogo a resistenze iniziali sensibilmente più basse, che non nei calcestruzzi di solo cemento, ma col progredire dell'età di maturazione si nota un netto incremento di resistenza, particolarmente ai più bassi rapporti acqua/cemento+cenere (Fig. 37), raggiungendo quasi gli stessi valori di un normale calcestruzzo. In ogni caso l'ottenimento degli usuali valori di resistenza per calcestruzzi da dighe non costituisce normalmente un problema.

La resistenza a trazione varia anch'essa notevolmente in funzione del tipo di calcestruzzo: tuttavia solo nel caso di bassi contenuti di pasta cementizia si sono trovati valori decisamente più bassi di quelli di un calcestruzzo tradizionale.

2.7.2 CARATTERISTICHE DEFORMATIVE

Il modulo elastico del calcestruzzo rullato è strettamente dipendente dal tipo di aggregato impiegato, dal contenuto di cemento e cenere e dalla resistenza del calcestruzzo stesso. I dati sperimentali disponibili fanno registrare sia valori simili a quelli di un calcestruzzo convenzionale che valori estremamente bassi, sotto i 10.000 MPa. A questi ultimi valori, tipici dei calcestruzzi con uno scarso contenuto di pasta, sono generalmente associate elevate deformazioni da *creep*, e ciò consente di ridurre l'entità delle deformazioni e quindi il potenziale pericolo di fessurazione nel calcestruzzo, particolarmente di origine termica (Fig. 38).

Il ritiro risulta generalmente basso, in relazione ai bassi contenuti d'acqua e di cemento.

Proprio a causa dei bassi dosaggi di cemento, la capacità deformativa del calcestruzzo rullato, cioè la capacità di sopportare deformazioni dovute a variazioni di volume senza fessurarsi, è inferiore rispetto a quelle di un calcestruzzo tradizionale. Tuttavia ciò può essere ampiamente compensato dalle minori variazioni di volume, sia di origine termica che da ritiro.

2.7.3 PERMEABILITÀ

Per il calcestruzzo rullato la permeabilità è probabilmente la caratteristica più significativa, soprattutto nella zona di interfaccia tra uno strato e l'altro. Infatti, se anche la permeabilità della massa del calcestruzzo può raggiungere valori sufficientemente bassi, per lo meno simili a quelli del calcestruzzo tradizionale, può risultare difficoltoso garantire la tenuta ai giunti orizzontali.

Le prime esperienze a Willow Creek, caratterizzate da consistenti perdite d'acqua subito dopo la fase di invaso del bacino, sono state a questo proposito particolarmente significative.

Sulle loro dighe i Giapponesi, oltre a realizzare dei paramenti con calcestruzzo normalmente vibrato, hanno sempre fatto ricorso alla stesa di una malta molto ricca di cemento su tutta la superficie di interfaccia tra uno strato e l'altro.

In base ad altre esperienze, l'esecuzione di un tale intervento può essere condizionato dalle caratteristiche di maturazione dei getti e in alcuni casi può risultare sufficiente limitare l'operazione ad una fascia ristretta in prossimità dei paramenti.

Comunque, indipendentemente da queste considerazioni, sembra che la permeabilità sia legata essenzialmente al contenuto di pasta di cemento del calcestruzzo. La Fig. 39 raccoglie i risultati della permeabilità in situ di 24 dighe in calcestruzzo rullato di 11 Paesi diversi, a confronto con i valori ottenuti da dighe in calcestruzzo tradizionale. È evidente che la differenza tra i due tipi di calcestruzzo è significativa solo per dosaggi inferiori a 150 kg/m^3 . Con elevati contenuti di pasta cementizia si possono avere addirittura permeabilità più basse nei calcestruzzi rullati con valori dell'ordine di 10-13 m/s.

2.7.4 CARATTERISTICHE DI ADERENZA AI GIUNTI TRA GLI STRATI

I diversi parametri che possono caratterizzare l'adesione tra i vari strati di calcestruzzo (resistenza a trazione - da prove di trazione diretta - coesione di picco e coesione residua - da prove di taglio diretto su

campioni integri o su campioni con giunto aperto) sono influenzati essenzialmente dall'età del giunto al momento della ripresa di getto e dal contenuto di cemento e cenere della miscela. Al diminuire dell'età del giunto e al crescere dei dosaggi di cemento e cenere si ha un miglioramento generale di tutte le caratteristiche.

Prove sperimentali condotte su calcestruzzi con contenuti di pasta cementizia bassi ($\sim 90 \text{ kg/m}^3$), medi ($\sim 120 \text{ kg/m}^3$) ed alti ($\sim 180 \text{ kg/m}^3$), con intervalli di tempo tra i getti di 8, 24 e 72 ore, hanno mostrato che le migliori condizioni di adesione si hanno dopo 8 ore dal getto e che il miglioramento è particolarmente apprezzabile in presenza di bassi dosaggi di cemento e cenere.

Anche per le proprietà di adesione ai giunti è stata ipotizzata una possibile correlazione con il contenuto di pasta cementizia. La Fig. 40 mostra a questo proposito la variazione della resistenza a trazione sul giunto per diverse condizioni di maturazione del calcestruzzo. Si è assunto che la resistenza a trazione di un giunto plastico sia il 100% di quella del materiale integro in corrispondenza ad un contenuto di pasta cementizia $P = 0,43$.

Pur con lo stesso contenuto di pasta, la resistenza a trazione sui giunti di 1 giorno e di 3 giorni (miscela del lunedì) scende rispettivamente al 60 ed al 40%.

Particolarmente efficaci risultano, a questo proposito, i trattamenti superficiali di pulitura e l'uso di malte ricche in cemento.

2.7.5 PROPRIETÀ TERMICHE

Il principale fattore che incide sulla fessurazione del calcestruzzo di una diga è il picco di temperatura interno al calcestruzzo, dovuto alla reazione di idratazione del cemento, che si raggiunge subito dopo la posa in opera. Determinanti sono naturalmente anche la temperatura ambientale, le caratteristiche deformative del calcestruzzo e le sue condizioni di vincolo. Da questo punto di vista il calcestruzzo rullato, caratterizzato da bassi contenuti di cemento e dall'aggiunta di cenere, si presenta avvantaggiato rispetto a un tradizionale calcestruzzo. Infatti, a confronto con quest'ultimo, si possono registrare riduzioni dell'incremento di temperatura nella massa del calcestruzzo

perfino dell'ordine del 50%. In Fig. 41 è mostrato l'incremento adiabatico di temperatura per alcune miscele di calcestruzzo adottate nella realizzazione della diga di Willow Creek. La Fig. 42 riporta, invece, l'incremento adiabatico di temperature per tre miscele di calcestruzzo con contenuti di cenere variabili.

Questi risultati sono estremamente importanti anche in relazione all'impossibilità di adottare, proprio per la sequenza di getto in continuo, tecniche di post-raffreddamento. Naturalmente possono essere invece adottate tutte le usuali misure di preraffreddamento dei materiali componenti il calcestruzzo.

Il reale incremento di temperatura del calcestruzzo della diga è infine funzione anche dell'altezza degli strati di calcestruzzo e delle sequenze operative adottate nel getto.

Le proprietà termiche quali il coefficiente di dilatazione, la conducibilità e la diffusività dipendono principalmente dal tipo di aggregato e dal grado di saturazione del calcestruzzo indurito. I valori riscontrati sul calcestruzzo rullato non sono dissimili da quelli di un calcestruzzo tradizionale.

2.7.6 DURABILITÀ

Come visto, la tendenza alla fessurazione di origine termica del calcestruzzo rullato è generalmente inferiore a quella di un normale calcestruzzo. Tuttavia notevoli quantità di parti fini argillose potrebbero portare a un aumento delle fessure in presenza di cicli alternati di umido e secco.

Per quanto riguarda la resistenza all'erosione, i dati finora a disposizione, provenienti dalle osservazioni condotte essenzialmente su dighe americane, mostrano un eccellente comportamento, per lo meno uguale a quello del normale calcestruzzo. Anche il calcestruzzo di Tarbela, soggetto ad azioni erosive particolarmente gravose, non ha mostrato, a distanza di anni, danni apprezzabili.

Per quanto riguarda il gelo e disgelo, invece, è stata osservata una certa difficoltà nell'inglobare l'aria, soprattutto nelle miscele di calcestruzzo molto povero in cemento. Occorre però ricordare che solo il calcestruzzo dei paramenti della diga è soggetto ai cicli di

gelo e disgelo. Prove di laboratorio condotte in condizioni estremamente severe, secondo la normativa Americana ASTM C 666 (procedura A), hanno mostrato una scarsa resistenza al gelo e disgelo, nonostante il comportamento *in situ* delle dighe finora realizzate con paramento in calcestruzzo rullato appaia per ora del tutto accettabile. Bassa appare anche la resistenza al gelo di calcestruzzi con elevato contenuto di cenere (Fig. 43).

2.7.7 CONSIDERAZIONI GENERALI

Data la grande varietà di miscele che è possibile utilizzare nella realizzazione di dighe in calcestruzzo rullato, in relazione sia ai materiali a disposizione che all'approccio progettuale scelto, è del tutto naturale la grande dispersione dei risultati a livello di prestazione del calcestruzzo.

Ugualmente si può tentare una grossolana classificazione delle principali caratteristiche in funzione del contenuto di pasta cementizia, come è indicato in tabella II.

Tab. II
Risultati di alcune proprietà del calcestruzzo rullato di dighe
(91 giorni di stagionatura)

Proprietà	Calcestruzzo magro	Calcestruzzo con un contenuto medio di pasta cementizia	Calcestruzzo con un contenuto elevato di pasta cementizia
Densità (% della densità teorica senz'aria)	95-98	96-98,5	98,5-99,5
Resistenza a compressione (MPa)	8-10	12-20	20-40
Resistenza a trazione diretta (MPa)	0,5	-	1,4+2,1
Resistenza a trazione diretta sul giunto (MPa)	0,2	-	1,4+1,7
Resistenza al taglio coesione ai giunti (MPa)	0,5+1,0	1,0+3,0	2,2
Permeabilità (m/s)	$10^{-4}+10^{-8}$	$10^{-6}+10^{-9}$	$10^{-9}+10^{-13}$

3. METODOLOGIE COSTRUTTIVE

Come si è detto, uno dei più significativi vantaggi derivanti dalla adozione del calcestruzzo rullato rispetto a quello convenzionale, consiste nella riduzione del periodo di costruzione dell'opera conseguente alla maggiore facilità e velocità di esecuzione dei getti. L'incremento della velocità di innalzamento dei getti richiede un adeguamento delle caratteristiche del materiale (vedasi = 2) ed è strettamente legato ad una serie di semplificazioni nelle tradizionali operazioni di getto. L'obiettivo ottimale è quello di conseguire l'innalzamento dei getti per strati orizzontali continui su campi delle più ampie dimensioni, compatibili con la produttività del Cantiere e le caratteristiche del materiale (in particolare sviluppo del calore di idratazione e aderenza fra gli strati di calcestruzzo).

Le diverse tipologie progettuali ed esecutive delle dighe in calcestruzzo rullato (con o senza giunti trasversali, con i diversi criteri per la costruzione dei paramenti di monte e di valle, con le diverse altezze degli strati di getto, con i diversi trattamenti di ripresa dei giunti orizzontali, ecc.) condizionano i metodi costruttivi e le corrispondenti velocità operative.

In questo capitolo si analizzano le varie operazioni relative al getto del calcestruzzo per la realizzazione di una diga, e come possano o debbano essere adeguate alla metodologia del getto continuo.

3.1 PRODUZIONE DEGLI AGGREGATI E DELL'IMPASTO

Tecnologicamente la produzione degli aggregati e la confezione dell'impasto è del tutto tradizionale, a meno dell'incremento di produttività necessario data l'alta velocità di messa in opera dovuta alla tecnologia. L'impiego di cenere leggera comporta ovviamente il dosaggio indipendente di questo materiale che viene immesso in betoniera e miscelato insieme agli altri componenti.

Come visto al = 2.4, particolare attenzione deve essere posta nella definizione della dimensione massima degli aggregati che, nel caso

della compattazione mediante rullatura per strati, deve essere commisurata alla altezza degli strati nell'ordine del 1/4 del suo spessore.

Una tendenza tecnologica senz'altro meritevole di sviluppo in sintonia con il getto continuo della diga, è quella dell'impianto di betonaggio ad alimentazione continua, il cui impiego è auspicabile per l'alta ed ininterrotta capacità produttiva.

3.2 TRASPORTO DEL CALCESTRUZZO

Per il trasporto del calcestruzzo alla zona di utilizzo, sono da preferire installazioni che privilegino la continuità delle operazioni minimizzando i travasi: impianti e metodologie tradizionali non trovano incompatibilità assoluta con l'esecuzione continua del getto in diga, pur non rappresentandone la soluzione ottimale.

L'impiego del calcestruzzo rullato consente una ampia gamma di mezzi di trasporto fra i quali i più congeniali appaiono i nastri trasportatori ed i veicoli gommati.

I primi, più validi per la continuità del trasporto ed ai fini della minor segregazione, presentano una maggior rigidità del sistema, specie per l'innalzamento. I veicoli gommati costituiscono un sistema senz'altro più flessibile: fra questi sono da consigliare i mezzi con scarico sul fondo (*bottom-dumper*) per diminuire la segregazione dei materiali e migliorarne la stesa.

3.3 DISTRIBUZIONE E STESA DEL CALCESTRUZZO (con riferimento alle figure 44 e 45)

Le operazioni di distribuzione nella zona di getto sono ovviamente legate a quelle di trasporto. Specie quando per queste ultime vengono impiegati mezzi discontinui, si dovranno curare particolarmente le scelte dei mezzi d'opera e le loro metodologie di impiego per assicurare la miglior omogeneizzazione del getto per il rispetto in opera delle caratteristiche di impasto previste.

La stesa deve avvenire per strati sottili (30 -40 cm) prima di ricevere la compattazione. Strati ancora di minor spessore sono previsti dalle metodologie giapponesi (RCD) che prevedono la successiva compattazione su più strati (3 o 4).

Nel caso di trasporto continuo è comunque auspicabile anche una distribuzione di tipo continuo.

3.4 COMPATTAZIONE DEL CALCESTRUZZO (con riferimento alla figura 46)

Come in tutte le strutture in calcestruzzo le operazioni di compattazione del getto debbono conseguire il duplice obiettivo di assicurare densità ed omogeneità al getto finito e la migliore qualità delle riprese fra strato e strato di posa.

Nel caso specifico delle dighe realizzate a getto continuo, nel prevedere attrezzature e metodologie di compattazione, bisogna tener conto in particolare dell'incremento della velocità di innalzamento della struttura e della minore altezza degli strati di getto che vengono compattati, con conseguente incremento del numero delle riprese.

Entrambe queste considerazioni non privilegiano la compattazione con vibrator ad immersione per la loro azione puntiforme, per la minor efficacia nel trattamento del contatto con lo strato sottostante, per il caratteristico effetto di provocare la risalita alla superficie dello strato dell'acqua e delle componenti più fini dell'impasto, per la loro produzione specifica.

È anche per questi motivi che al getto continuo per strati è oggi associato l'uso di rulli per la compattazione, che soprattutto danno le migliori garanzie riguardo al trattamento delle riprese di getto. Per inciso si osserva che proprio la compattazione con rulli ha dato il nome alla metodologia: calcestruzzo rullato (Roller Compacted Concrete - Beton Compacté au rouleau).

La compattazione coi rulli deve avvenire al più presto dopo che il calcestruzzo (che ovviamente deve avere *slump* nullo) è stato steso e livellato. Una buona regola è che la compattazione avvenga

entro dieci minuti dalla stesa ed entro 30 minuti dalla confezione dell'impasto. Normalmente vengono usati rulli vibranti semoventi con doppio tamburo liscio del peso di ~10 t. Solo in alcune applicazioni si sono usati rulli di peso maggiore o combinazioni di rulli vibranti e rulli gommati. Comunque la scelta del rullo ed il numero di passate sono strettamente legate allo spessore degli strati da vibrare ed alla qualità dell'impasto (aggregati e leganti). A titolo puramente informativo strati di 70 cm in dighe realizzate in RCD sono stati compattati con due passate senza vibrazione, seguite da un minimo di 6 passate vibranti (rulli da 7 t).

3.5 OPERAZIONI DI GETTO

I tempi di ripresa sono ovviamente da determinare in relazione alle caratteristiche del calcestruzzo impiegato ed a quelle del giunto orizzontale di ripresa. La produttività del Cantiere, la dimensione dei campi di getto, l'altezza dello strato sono definiti in modo da rispettare i tempi di ripresa stabiliti.

È evidente che una diga realizzata con il getto per strati, per esempio di 30 cm di altezza, ha un numero di riprese di 6-10 volte superiore a quello di una diga gettata con metodologie tradizionali. Segue che l'onere derivante dall'eventuale richiesta di trattamento specifico di tutte le riprese, finirebbe con l'incidere sui vantaggi economici connessi alla metodologia del getto continuo.

La metodologia giapponese (RCD) prevede la compattazione di 3 :- 4 strati, anche in quanto questo metodo adotta il trattamento totale (pulizia, ravvivamento, betoncino) della superficie di ripresa, che così operando viene ridotta a 1/3, 1/4. (Vedasi Figg. 47 e 48).

La compattazione per singolo strato (RCC) considera per contro efficace la "giunzione" dei due strati successivi conseguita con la rullatura eseguita nei tempi dovuti e quindi in generale non richiede trattamento specifico delle superfici di ripresa: alcuni progettisti lo richiedono limitatamente alla fascia prossima al paramento di monte.

In caso di formazione del cosiddetto "giunto freddo" o di un particolare danneggiamento superficiale è sempre richiesto il trat-

tamento delle riprese di getto su tutta la superficie. Le condizioni per cui si viene a costituire il “giunto freddo” sono in genere definite nelle “specifiche tecniche”.

Ad esempio per la diga di Upper Stillwater veniva considerato “freddo” un giunto vecchio di 72 ore, mentre in altre specifiche per dighe il giunto freddo è definito da un indice di maturità, espresso in gradi-ore.

Particolare tipo di giunto freddo è da considerarsi il cosiddetto giunto stagionale, il cui trattamento, specie per le opere ad alta quota, richiede interventi particolari necessari ad assicurare la miglior continuità della struttura. La questione dei giunti di ripresa rappresenta, come evidente, uno dei punti qualificanti nelle dighe gettate per strati ed interviene, come visto, anche nella definizione del calcestruzzo da impiegarsi. Essenzialmente due sono gli aspetti del problema connesso alla formazione dei giunti di ripresa: la continuità strutturale- meccanica e la tenuta idraulica. Al primo si assolve soprattutto con il lavaggio post getto, l’umidificazione durante la maturazione (Vedasi Figg. 49 e 50) e la pulizia precedente la nuova stesa.

Per la tenuta, il classico betoncino (totale o parziale) è ora spesso sostituito con sistemi di impermeabilizzazione e drenaggio a monte.

3.6 CONFINAMENTO DELLE SUPERFICI DI GETTO

L’incremento della velocità di innalzamento della struttura diga richiede ovviamente la massima funzionalità e rapidità nella gestione dei sistemi di confinamento del getto. Si preferisce distinguere, nel trattare questo tema, i paramenti dai giunti trasversali.

3.6.1 PARAMENTI

La metodologia tradizionale con casseri rampanti (di 2-3 m di altezza) non trova impedimenti di applicabilità per quanto attiene all’impianto e alla movimentazione, con due considerazioni:

- in una struttura con paramento di valle inclinato, i casseri ri-

ducono l'accessibilità dei mezzi, in particolare di quelli di compattazione, nelle vicinanze del paramento;

- i casseri tradizionali richiedono un tempo lungo per il loro riposizionamento: risulta pertanto opportuno suddividere le aree di getto in zone differenziate, adibite alla posa del calcestruzzo e all'innalzamento della casseratura.

Possibili soluzioni alternative ai casseri sono:

- blocchi prefabbricati - da allineare ai paramenti;
- cordoli in calcestruzzo estruso - pure da allineare ai paramenti.
- pannelli prefabbricati opportunamente sagomati.

Recentemente sono stati adottati anche pannelli con telo impermeabile sul lato interno.

Specificamente per il paramento di valle sono state realizzate opere in cui il getto del calcestruzzo, steso per strati e compattato per rullatura, è stato proseguito fino al paramento di valle senza aver predisposto alcun elemento di confinamento; in questo caso due sono le soluzioni:

- la superficie non viene trattata: la linea di paramento viene traslata verso valle in modo da considerare come sovrappeso aggiuntivo il tratto che non può essere efficacemente compattato;
- la superficie viene compattata a mezzo di placca vibrante, sostenuta da un mezzo d'opera che si muove lungo il bordo di valle della diga.

3.6.2 GIUNTI TRASVERSALI

Premesso che in alcuni casi, essenzialmente negli Stati Uniti (per esempio: Willow Creek, Middle Fork, Upper Stillwater), si sono realizzate dighe senza giunti trasversali, si analizzano qui di seguito alcune metodologie per la formazione dei giunti, compatibili con il getto a strati:

- Taglio del calcestruzzo fresco con lama vibrante: è senz'altro la metodologia di impiego più usuale e sperimentata; viene generalmente eseguita sul calcestruzzo steso e livellato non

compattato; alcuni progettisti richiedono che venga inserito un elemento separatore a perdere che eviti la richiusura del giunto nella successiva fase di compattazione. (Vedasi Fig. 51)

- Taglio del calcestruzzo indurito: l'impiego dei cordoni diamantati permette di eseguire con buona resa il taglio, anche su grandi superfici, del calcestruzzo indurito. Una metodologia di questo tipo trova il maggior vantaggio nella completa indipendenza con le operazioni di getto.
- Elementi prefabbricati di confinamento a perdere: in questa linea ci sono esempi di soluzioni estremamente varie. In linea generale l'altezza dell'elemento adottato è di 2-3 strati, la capacità di resistenza alle spinte del calcestruzzo fresco e dei mezzi d'opera è limitata ad uno strato in quanto l'elevazione continua del getto viene programmata in modo da equilibrarle.
- Un'altra soluzione è quella di prevedere la messa in opera di elementi metallici (lame) sorretti da cavallotti e foderati di fogli di polietilene conformati (*pluriball*). Una volta eseguito il getto, le lame vengono sollevate e messe in posizione per la nuova alzata. La presenza del foglio di polietilene riduce le forze attrittive per il sollevamento della lama.

Come si è visto, considerazioni diverse possono imporre la suddivisione della diga in zone da assoggettare alternativamente alle operazioni di getto: in questi casi la superficie di separazione fra queste zone coinciderà con un giunto trasversale della diga, da realizzarsi tradizionalmente con casseri rampanti.

3.7 INTERVENTI PARTICOLARI

Con la metodologia del getto continuo per strati si presentano, nella formazione del corpo diga, zone e situazioni che richiedono il ricorso a metodologie particolari. Qui di seguito si analizzano le principali.

3.7.1 GETTO AI PARAMENTI

Oltre alle metodologie per il confinamento del getto (vedasi = 3.6), le specifiche riguardanti le zone della struttura della diga nelle immediate vicinanze dei paramenti, dovranno definire caratteristiche e grado di finitura del calcestruzzo, finalizzati soprattutto alla durabilità, tenendo conto delle diverse aggressioni che i due paramenti subiranno negli anni dell'esercizio.

3.7.1.1 PARAMENTO DI MONTE

Alla esecuzione del paramento di monte è demandata anche la funzione di tenuta nel riguardo delle acque di invaso. È frequentemente adottata la soluzione che prevede il getto con metodologie del tutto tradizionali (casseratura, calcestruzzo a maggior dosaggio di cemento, compattazione con vibrator ad immersione, trattamento della ripresa di getto, ecc.) per una fascia al paramento di opportuna larghezza.

In questo caso, solitamente, le opere di impermeabilizzazione dei giunti trasversali (se previsti) sono pure tradizionali (water stop + canna di drenaggio), tutt'al più realizzate per elementi prefabbricati della stessa altezza della casseratura. (Vedasi Fig. 52). Il getto a strati del corpo diga è di norma successivo a quello tradizionale al paramento.

Metodologie che prevedono il paramento realizzato con cordoli, blocchi o lastre prefabbricate, ecc. (vedasi = 3.6.1) richiedono attenzioni particolari progettuali e costruttive per assicurare la tenuta.

In questa linea sono state realizzate impermeabilizzazioni con membrane posate al paramento di monte della diga. Queste sono in genere realizzate a sandwich, con telo impermeabile (spesso in P.V.C.) protetto da un geotessile che ha pure la funzione di garantire il drenaggio fra telo e struttura. L'insieme telo-geotessile viene chiamato geomembrana. Bisogna tenere presente, nella scelta dei materiali e degli spessori, la riduzione di capacità drenante causata dalla compressione indotta dalla spinta idrostatica.

Sistemi di diversa concezione assicurano poi lo scarico di questo “tappeto drenante”, suddividendo il paramento in campi e convogliando le acque in zone ispezionabili che permettono anche la individuazione della parte di telo soggetta a perdite.

Impermeabilizzazioni di questo tipo potrebbero essere utilizzate in dighe realizzate con calcestruzzo rullato, indipendentizzando le funzioni di tenuta e drenaggio da quelle statiche. Si è a conoscenza di un progetto E.D.F. per una diga in *rollcrete* che prevede una soluzione di questo tipo al paramento di monte. L’esperienza italiana, soprattutto legata al ripristino da molti anni, ha permesso di verificare come si possano fronteggiare le azioni del gelo e dell’insolazione (le più temibili) senza grave degrado del telo impermeabile.

Sempre con il fine di indipendentizzare le funzioni di tenuta e drenaggio dalla realizzazione del corpo della diga, si sono sviluppate nuove soluzioni, fra queste:

- Pannelli prefabbricati con membrana in PVC incollata sulla faccia interna del pannello: alla posa del pannello segue la fase di saldatura della membrana assicurante la tenuta fra pannello e pannello. Il getto del corpo diga al paramento prevede un primo tratto (~1 m) in calcestruzzo poroso con effetto drenante.
- Getto tradizionale della parete costituente il paramento di monte (~1 m di spessore) con immediatamente a valle pannelli prefabbricati di calcestruzzo poroso per il drenaggio (vedasi Fig. 53).

3.7.1.2 PARAMENTO DI VALLE

Si è già visto (v. = 3.6.1) come siano state impiegate diverse soluzioni per la realizzazione di questo paramento; si ritiene che il criterio informatore delle scelte metodologiche e delle specifiche costruttive sia la durabilità e la salvaguardia della sezione resistente.

3.7.2 *GETTO ALL'IMPOSTA*

In generale, il getto a contatto con la roccia di fondazione, sia in alveo che lungo le imposte, viene realizzato in forma tradizionale, con calcestruzzo a maggior dosaggio di cemento, costipato con vibrator ad immersione.

In modo del tutto analogo a quanto si realizza nelle dighe in calcestruzzo tradizionali, i getti all'imposta sono preceduti dalle normali operazioni di pulizia, regolarizzazione, eventuale scalpellatura della roccia (ove liscia), trattamento fessure, umidificazione, collegamento.

3.7.3 *SCARICHI IN CORPO DIGA*

La possibilità di realizzare scarichi profondi e superficiali in corpo diga rappresenta uno dei vantaggi degli sbarramenti in calcestruzzo rispetto a quelli in materiali sciolti. L'esecuzione della diga con calcestruzzo gettato per strati permette senz'altro questa vantaggiosa disposizione degli scarichi.

Per gli scarichi profondi le metodologie sono del tutto tradizionali e prevedono getti di seconda fase per la tenuta a monte e l'immorsamento del condotto, parziale o totale lungo lo sviluppo monte-valle.

Per quelli superficiali, al getto con calcestruzzo tradizionale della soglia conformata secondo il profilo idraulico richiesto dal carico massimo, si abbinano varie soluzioni per lo scivolo lungo il paramento di valle. Tra queste, più originali e caratteristiche dell'uso del calcestruzzo rullato sono quelle che prevedono la realizzazione di una gradonatura (con alzata pari all'altezza di uno strato o di un suo multiplo) su cui la corrente, saltando, dissipa parte della propria energia.

È evidente che la soluzione da scegliere sia da mettere in relazione all'entità, alla frequenza ed alla durata degli eventi di piena previsti.

3.7.4 CUNICOLI E POZZI

Osservazione di carattere generale nell'ottica realizzativa della diga costruita per strati, è che il sistema cunicoli-pozzi all'interno della struttura debba essere il più semplice possibile, in quanto la realizzazione di questi percorsi interni interferisce ovviamente con la continuità e la rapidità delle operazioni attinenti al getto della diga.

Per quanto riguarda le metodologie costruttive:

- cunicoli: con la raccomandazione di privilegiare i percorsi orizzontali e di eliminare appena possibile quelli inclinati (specie poi ad inclinazione variabile), vi sono esempi di impiego delle tradizionali casserature, di elementi prefabbricati (completi o parziali), di cordoli in calcestruzzo estruso, di strutture metalliche tipo ARMCO e di combinazioni fra le tipologie ricordate.

Caratteristica del tipo di costruzione per strati è la conformazione del cunicolo orizzontale mediante l'impiego di sabbia, che viene stesa in fase di getto lungo la traccia del cunicolo e per tutta la sua altezza. La chiusura all'estradosso del cunicolo viene di solito eseguita o con una leggera armatura, o con un elemento tipo ARMCO o in calcestruzzo prefabbricato. Completato l'indurimento del calcestruzzo la sabbia viene asportata dall'interno del cunicolo con mezzi meccanici leggeri o anche per via idraulica.

- Pozzi: per quelli di dimensioni maggiori sono applicabili le metodologie ricordate per i cunicoli.

Per quelli di minor diametro: canne di drenaggio, condotti per l'installazione degli strumenti di misura, per il cablaggio necessario alla centralizzazione delle misure, per i cavi elettrici, per ventilazione, ecc., la metodologia esecutiva senz'altro più consona al getto per strati, è quella che prevede la loro perforazione nel calcestruzzo indurito.

3.7.5 RAFFREDDAMENTO DEL CALCESTRUZZO

Il basso dosaggio di cemento che caratterizza il calcestruzzo rullato riduce notevolmente i problemi termici connessi ai getti massicci

(vedasi = 2.7.5). Tuttavia in casi particolari si può rendere necessario il contenimento della temperatura massima: l'obiettivo viene conseguito mediante il pre- raffreddamento dell'impasto. Il post-raffreddamento dei getti tramite circuiti a serpentine annegati nel corpo della struttura è di fatto incompatibile con la posa in opera del calcestruzzo a strati.

4. PROVE DI LABORATORIO E CONTROLLO DI QUALITÀ SUL CALCESTRUZZO

4.1 STUDI PRELIMINARI

Prima dell'inizio della costruzione della diga è opportuno verificare con una stesa sperimentale, ed eventualmente correggere, le miscele di calcestruzzo studiate e provate in laboratorio. Spesso l'occasione ideale può essere costituita dalla realizzazione dell'avandiga. Ciò offre l'opportunità di un adeguato periodo di addestramento degli operatori addetti alla costruzione e al controllo, permette di individuare le più idonee modalità di compattazione del calcestruzzo (peso e tipo dei rulli, numero dei passaggi ed energia di compattazione), i tempi ed i criteri di ripresa ed inoltre consente di trovare delle correlazioni tra le caratteristiche del calcestruzzo determinate su provini confezionati in laboratorio e quelle rilevate dalle carote prelevate in situ.

I tipi e le modalità di prova da eseguire sono illustrate nel paragrafo seguente.

4.2 CONTROLLO DI QUALITÀ DURANTE LA COSTRUZIONE

La sequenza operativa di posa in opera del calcestruzzo a getto continuo, con il ricoprimento dei vari strati nell'arco di ore, comporta un particolare controllo delle proprietà specifiche del calcestruzzo rullato, oltre agli usuali controlli previsti per una diga in calcestruzzo tradizionale.

I valori delle resistenze dei provini alle varie scadenze di maturazione costituiscono solo una fonte di notizie storiche per una verifica a posteriori.

Tra gli usuali controlli dei materiali componenti il calcestruzzo (cemento, cenere, eventuali additivi, aggregati) per la verifica della loro rispondenza ai requisiti di specifica, risultano particolarmente

importanti quelli sugli aggregati fini (granulometria e contenuto di umidità).

Tenendo conto delle modalità di trasporto e scarico del calcestruzzo, che può subire eventuali dannose segregazioni, è in generale opportuno un suo doppio controllo, sia all'uscita dell'impianto di betonaggio che direttamente sulla diga. Sui campioni così prelevati può essere verificata la composizione del calcestruzzo e possono essere eseguite numerose prove tra cui la determinazione del contenuto di umidità, della densità e della lavorabilità, preparando opportunamente anche provini per la resistenza a compressione.

Per quanto riguarda il contenuto di umidità, le indicazioni derivanti da osservazioni visive devono essere integrate con frequenti misure dirette e verificate con occasionali prove su campioni essiccati.

Per il controllo della densità, oltre a ricorrere a misuratori nucleari di densità, con una registrazione continua dei risultati medi e relative variazioni (Fig. 54), è necessario accertare il rispetto rigoroso della sequenza di compattazione (numero di passaggi con i rulli previsti).

Operando in tal modo è possibile controllare in tempo reale la qualità del calcestruzzo posto in opera, identificare zone con eventuali difetti ed intervenire in tempo per rimuovere e sostituire quelle parti del materiale che non soddisfano alle specifiche adottate.

Come già accennato i metodi per la misura della lavorabilità sono numerosi, anche se tutti basati su metodi vibrazionali. I più noti sono i misuratori di consistenza giapponesi, di dimensioni diverse a seconda della dimensione massima dell'aggregato, e quello messo a punto in America dalla TVA (Tennessee Valley Authority), denominato anche "metodo di Cannon". In base all'esperienza della TVA, la massima densità raggiungibile con una completa compattazione del materiale corrisponde a circa il 98% della densità teorica senz'aria della miscela. Il tempo di vibrazione è invece funzione del sovraccarico applicato durante la prova.

Per la preparazione dei campioni di prova per la resistenza a compressione è generalmente indispensabile, a causa delle diverse dimensioni dei contenitori, una energia di compattazione maggiore di quella utilizzata per le prove di lavorabilità. Può essere inoltre necessario, per le miscele meno lavorabili, ricorrere anche all'ap-

plicazione di un sovraccarico. Le modalità di confezione dei provini dovrebbero in ogni caso essere correlate con la reale energia di compattazione del calcestruzzo in opera. In tal modo è possibile ottenere una ottima correlazione tra risultati forniti dai provini di laboratorio e da quelli carotati dalla diga.

In tabella III è riportato l'elenco di alcune prove con la relativa frequenza di esecuzione in funzione del volume di calcestruzzo, così come è suggerito dall'American Concrete Institute (ACI 207.5R).

TAB. III - Frequenza delle prove -

Tipo di prova	Frequenza della prova
Granulometria dell'aggregato fine e grosso	Giornaliera o ogni 2300 m ³ di calcestruzzo
Peso specifico e assorbimento dell'aggregato	Settimanale
Prove sul cemento	Variabile
Densità del calcestruzzo	Ogni 750 m ³
Umidità del calcestruzzo	Ogni 2300 m ³
Temperatura	Due volte per strato
Consistenza	Due volte per strato
Confezionamento dei campioni per la resistenza a compressione a 28, 90 e 365 giorni	Una volta per strato

4.3 VALUTAZIONE DEL CALCESTRUZZO A POSTERIORI

La qualità del calcestruzzo posto in opera viene normalmente valutata, oltre che con osservazioni visive, attraverso la determinazione di densità, resistenze meccaniche, permeabilità e aderenza tra gli strati su provini direttamente carotati dalla diga stessa. Altre utili informazioni possono venire dalle registrazioni di strumenti annegati nella diga: per il calcestruzzo rullato questi devono comunque essere ridotti al minimo per non intralciare la fase di costruzione.

Per quanto riguarda la permeabilità, oltre a ricorrere a prove su carote, possono essere condotte anche prove in situ attraverso la realizzazione di opportuni fori di trivellazione all'interno del calcestruzzo della diga.

5. L'IMPIEGO DEL CALCESTRUZZO RULLATO NELLA COSTRUZIONE DELLE DIGHE IN RIFERIMENTO ALLA VIGENTE NORMATIVA ITALIANA

L'uso del calcestruzzo rullato si basa su due fondamentali aspetti e precisamente:

- 1) - tecnologia operativa semplificata
- 2) - diversa composizione del calcestruzzo rispetto a quelle tradizionali.

Il primo aspetto non trova esplicite controindicazioni nella vigente normativa, ma tuttavia è da essa vincolato in quanto disposto, ad esempio, dall'Art. "C2" della normativa tecnica aggiornata 24.03.1982 ed in particolare:

"L'assortimento granulometrico e la dimensione massima degli aggregati, la dose di cemento, il rapporto acqua-cemento, la specie e la dose di eventuali additivi, il procedimento di confezione, di trasporto, di posa in opera e di costipazione del calcestruzzo dovranno essere tali da conferire a questo i migliori requisiti di omogeneità, compattezza, impermeabilità, resistenza meccanica e durabilità, con particolare riferimento all'azione del gelo, all'azione chimica dell'acqua di invaso ed alle condizioni ambientali atmosferiche".

Alcune delle caratteristiche innanzi richiamate, quali la omogeneità, la impermeabilità e quindi la stessa tenuta e la resistenza meccanica, dipendono essenzialmente dallo spessore degli strati, dall'entità della compattazione e dalle modalità delle riprese di getto: ne consegue la necessità di porre ad essi particolare attenzione.

Per quanto riguarda il secondo aspetto, il D.P.R. 01.11.1959 N. 1363 all'Art. 10 non pone limiti particolari alle diverse possibili composizioni, precisando comunque che "i leganti utilizzati dovranno rientrare nella categoria dei cementi a termini delle vigenti norme per l'accettazione dei leganti idraulici".

Lo stesso regolamento, nonché le Norme Tecniche del 1982, non considerano tuttavia l'impiego delle ceneri leggere, che invece per

quanto sopra esposto rivestono un ruolo essenziale nel calcestruzzo rullato: miglioramento della lavorabilità e della compattabilità e limitazione dello sviluppo del calore di idratazione. Le ceneri, pur non avendo un proprio potere legante, esercitano una azione pozzolanica nei confronti della calce libera e conferiscono in tal modo un ulteriore contributo alla resistenza del calcestruzzo, consentendo un contenimento del dosaggio di cemento.

Sotto questo ultimo aspetto, è necessaria l'emanazione di apposite direttive che consentano l'impiego diretto e controllato delle ceneri leggere nei calcestruzzi per dighe, quale ulteriore componente, accanto a cemento, aggregati, acqua e additivi.

Per i rimanenti aspetti non si stima necessario apportare ulteriori modifiche alla normativa vigente; tuttavia, trattandosi di una tecnologia inconsueta in campo nazionale, è indispensabile che all'atto della presentazione del progetto esecutivo, la relazione particolareggiata sulle caratteristiche e sulla provenienza dei materiali (allegato d - Art. 2 D.P.R. 01.11.1959 N. 1363) dovrà curare con particolare approfondimento lo studio della prescelta composizione del calcestruzzo; in aggiunta, in fase esecutiva, specifiche e dettagliate sperimentazioni andranno effettuate su apposite prescrizioni che, in relazione all'importanza delle opere da realizzare, di volta in volta verranno precisate nell'apposito foglio condizioni.

6. CONCLUSIONI

La ricerca di competitività (soprattutto economica) delle dighe in calcestruzzo con riferimento a quelle in materiali sciolti, ha portato allo sviluppo della tecnologia del getto continuo (di cui gli italiani sono antesignani (Alpe Gera, 1964 - Ing. G. Gentile).

Nello sviluppo di queste nuove metodologie realizzative, si è inserito come elemento qualificante il calcestruzzo rullato, che oggi definisce questa tecnica esecutiva con le sue varie denominazioni RCC, RCD, BCR.

Il sempre maggior interesse suscitato nel mondo da questa metodologia per la costruzione degli sbarramenti in calcestruzzo, è strettamente connesso ai vantaggi temporali ed economici derivanti dalla sua applicazione. A questi se ne aggiungono altri, in particolare per l'utilizzazione (anticipo nella messa in esercizio) e per l'ambiente (cave e discariche di volumi ridotti - scarichi in corpo diga).

Nel mondo sono ormai molte le dighe realizzate con questa tecnica: diverse fra loro per i metodi costruttivi impiegati e per le dimensioni - alcune di queste hanno superato l'altezza di 100 m - mentre sono allo studio sbarramenti in calcestruzzo rullato ancora più alti.

Questo è reso possibile dal fatto che le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo rullato sono in tutto paragonabili a quelle del calcestruzzo tradizionale, mentre i valori di permeabilità conseguibili sono dell'ordine del 10-11 m/s. Naturalmente la ottimizzazione delle qualità è essenzialmente legata, come visto, al dosaggio di pasta cementizia, per la quale risulta praticamente indispensabile l'impiego di cenere leggera che permette ad un tempo la soluzione dei problemi inerenti alla consistenza, lavorabilità e sviluppo di calore.

La definizione del calcestruzzo è senz'altro (se non addirittura a maggior titolo rispetto ad una soluzione tradizionale) legata alle scelte metodologiche e progettuali, particolare fra queste la decisione se mantenere o meno distinte le due funzioni di tenuta e continuità meccanica. Di qui le specifiche relative alle modalità di ripresa dei getti ed alla esecuzione dei paramenti di monte e di valle.

La realizzazione di sperimentazioni *in situ* in grande scala (“rilevato di prova”) è non solo auspicabile, ma addirittura indispensabile in certi casi: le indicazioni ottenibili attengono soprattutto alle modalità di compattazione e di ripresa, anche in funzione dei tempi esecutivi, alla formazione dei giunti, oltre che alla correlazione fra i dati sperimentali di laboratorio e quelli rilevati soprattutto per gli aspetti meccanici e termici.

Lo sviluppo del calcestruzzo rullato per la realizzazione di sbarramenti in Italia (vedasi par. 5) non trova controindicazioni nella vigente normativa per la progettazione e la costruzione delle dighe di ritenuta, mentre l’impiego delle ceneri leggere con miscelazione diretta in opera necessita di una esplicita menzione nella normativa specifica.

FIGURE

Gran parte delle immagini di questo volume è stata ricavata da documentazione a stampa anziché da originali fotografici. Questa circostanza ha avuto come conseguenza un impoverimento nella qualità delle immagini stesse senza peraltro compromettere la loro utilità documentaria.

Fig. 1

WILLOW CREEK DAM

OWNER: UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS
WALLA WALLA DISTRICT

TECHNICAL DATA

GENERAL

Purpose	Flood control and recreation
Location—State/Nearest City	Oregon/Hepburn
River	Confluence of Willow Creek and Balm Fork Creek
Drainage Basin Area	96 mi ² (249 km ²)
Max. Recorded Flow	36,000 cfs (1,020 m ³ /s) [June 14, 1903]
Date of Completion	October 1983

RESERVOIR

Total Storage Capacity	11,250 ac-ft (14 Hm ³)
Active Storage Capacity	1,750 ac-ft (2 Hm ³)
Surface Area (Max.)	269 acres (1.1 km ²)

DAM

Type	Angled axis gravity
Height Above Foundation/Streambed	177 ft (54 m)/169 ft (52 m)
Length of Crest	1,780 ft (543 m)
Volume of Dam	435,000 cy (333,000 m ³)

SPILLWAY

Type	Uncontrolled ogee overflow
Crest Length	380 ft (115 m)
Max. Discharge Capacity	91,700 cfs (2,600 m ³ /s)

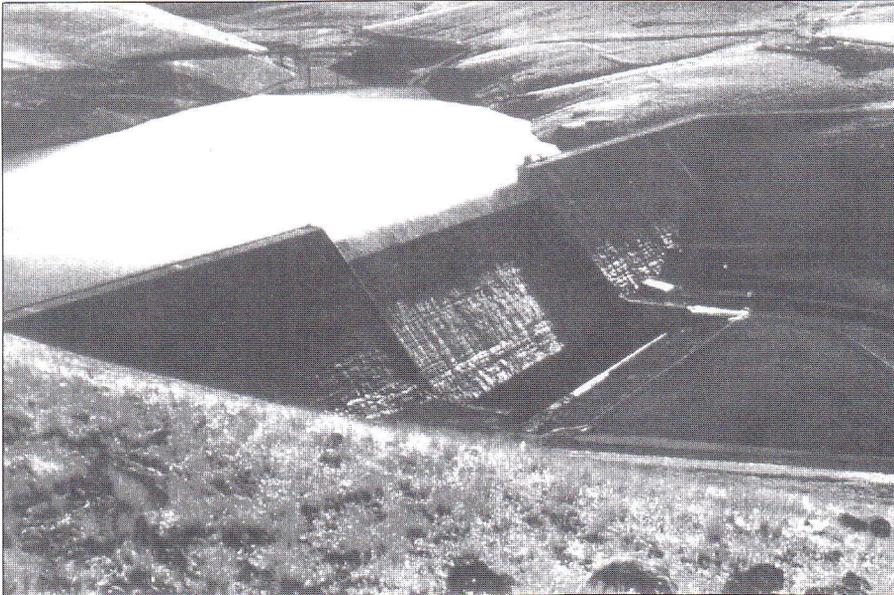
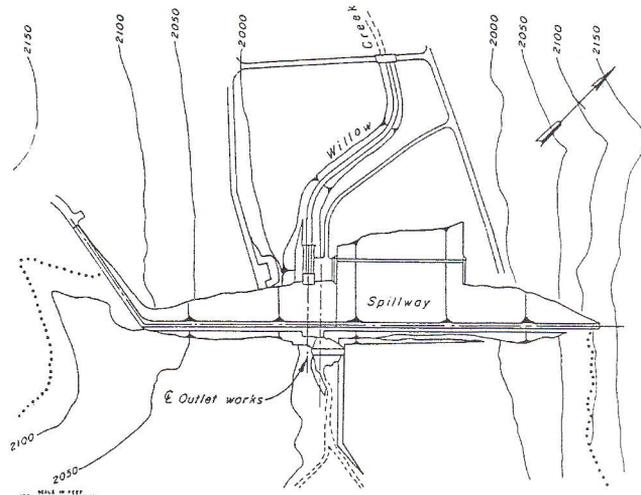
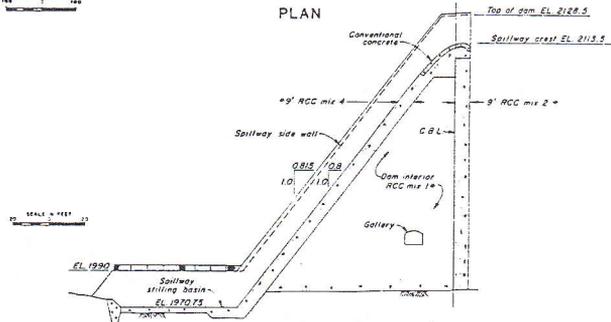


Fig. 2

WILLOW CREEK DAM

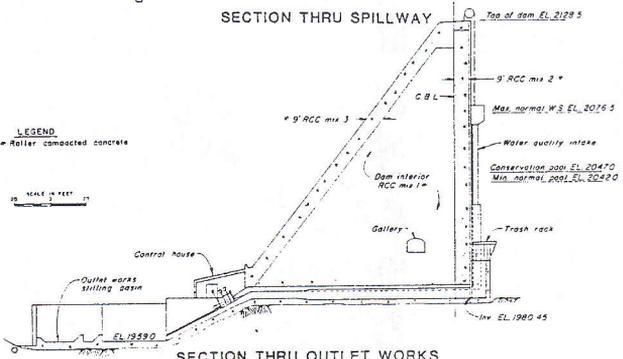


PLAN



SECTION THRU SPILLWAY

LEGEND
 = Roller compacted concrete



SECTION THRU OUTLET WORKS

Fig. 3

MIDDLE FORK DAM

OWNER: EXXON COMPANY, USA

TECHNICAL DATA

GENERAL

Purpose	Flood control, standby process feed water for shale oil plant
Location—State/Nearest City	Colorado/Parachute
River	Middle Fork of Parachute Creek
Drainage Basin Area	6.3 mi ² (16.3 km ²)
Max. Recorded Flow	290 cfs (8.2 m ³ /s)
Date of Completion	November 1984

RESERVOIR

Total Storage Capacity	390 ac-ft (0.5 Hm ³)
Active Storage Capacity	100 ac-ft (0.1 Hm ³)
Surface Area	11 acres (44,517 m ²)

DAM

Type	Roller compacted concrete (RCC) gravity
Height Above Foundation/Streambed	124 ft (37.8 m)
Length of Crest	410 ft (125 m)
Volume of Dam	55,000 cy (42,000 m ³) RCC, 5,000 cy (3,800 m ³) conventional concrete

SPILLWAY

Type	Ungated overflow over crest in PMF; ungated overflow into spillway tower inlets in smaller floods
Tower inlets	4-ft (1.2-m) wide × 8-ft (2.4-m) high openings at two elevations
Max. Discharge Capacity	24,000 cfs over crest 880 cfs (25 m ³ /s) through spillway tower and conduit

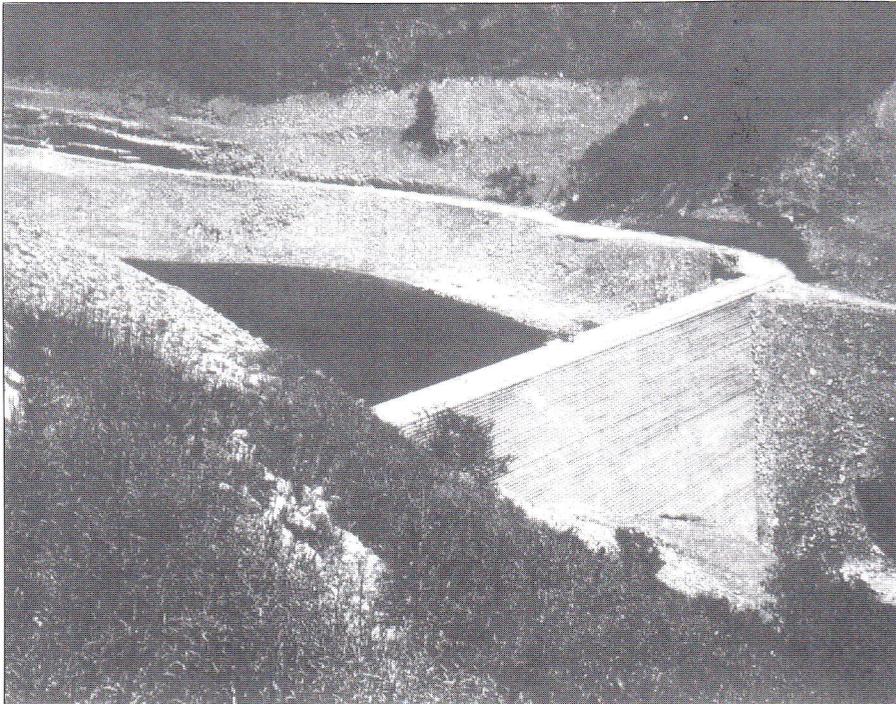
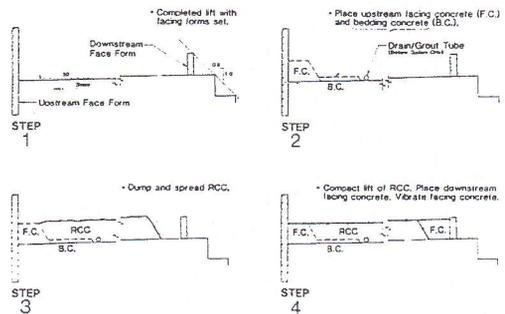
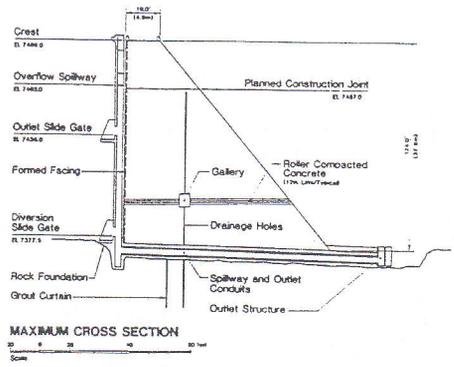
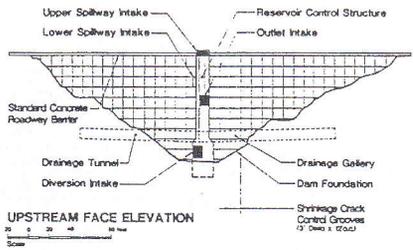
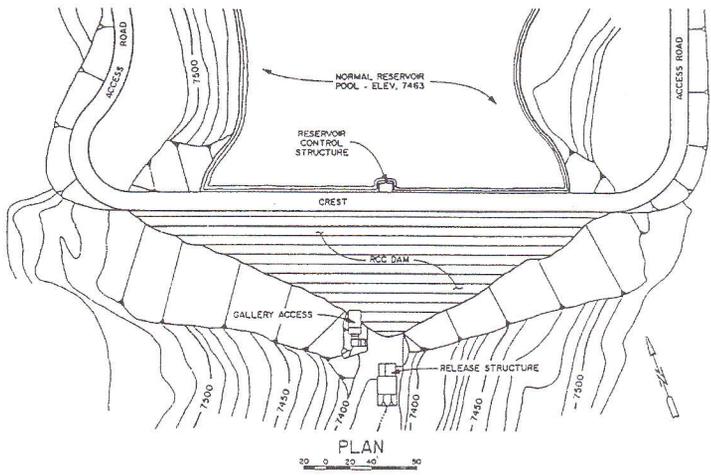


Fig. 4

MIDDLE FORK DAM



PLACEMENT SEQUENCE FOR RCC & FACING CONCRETE

Fig. 5

GALESVILLE DAM

OWNER: DOUGLAS COUNTY, OREGON

TECHNICAL DATA

GENERAL

Purpose	Flood control, municipal and industrial irrigation, power, recreation and fish enhancement
Location—State/Nearest City	Oregon/Azalea
River	Cow Creek
Drainage Basin Area	74.3 mi ² (192 km ²)
Max. Recorded Flow	10,600 cfs (300 m ³ /s) [January 1974]
Date of Completion	October 1986

RESERVOIR

Total Storage Capacity	42,225 ac-ft (52 Hm ³)
Active Storage Capacity	40,425 ac-ft (50 Hm ³)
Surface Area	640 acres (2.6 km ²)

DAM

Type	Gravity dam constructed with roller-compacted concrete
Height Above Foundation/Streambed	167 ft (50.9 m)/157 ft (47.9 m)
Length of Crest	950 ft (290 m)
Volume of Dam	223,000 cy (170,500 m ³)

SPILLWAY

Type	Ungated-overflow shotcreted crest, RCC chute, stilling basin
Crest Length	175 ft (53.3 m)
Max. Discharge Capacity	31,750 cfs (900 m ³ /s)



Fig. 7

UPPER STILLWATER DAM

OWNER: UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION
UPPER COLORADO REGION

TECHNICAL DATA

GENERAL

Purpose	Municipal and industrial water, irrigation
Location—State/Nearest City	Utah/Duchesne, 32 mi (51 km)
River	Rock Creek
Drainage Basin Area	98 mi ² (253 km ²)
Peak Discharge	1,733 cfs (49 m ³ /s) [1952]
Dates of Construction	1985—under construction (estimated date of completion: 1988)

RESERVOIR

Total Storage Capacity	30,000 ac-ft (37 Hm ³)
Active Storage Capacity	30,000 ac-ft (37 Hm ³)
Surface Area	312 acres (1.3 km ²)

DAM

Type	Roller-compacted concrete gravity
Height Above Foundation	290 ft (88.4 m)
Length of Crest	2,690 ft (820 m)
Width Top/Base	30 ft (9.1 m)/180 ft (54.8 m)
Volume of Dam	1,500,000 cy (1,146,840 m ³)

SPILLWAY

Type	Ungated overflow section with flip bucket in center of dam
Crest Length	600 ft (182.9 m)
Max. Discharge Capacity	15,000 cfs (425 m ³ /s)

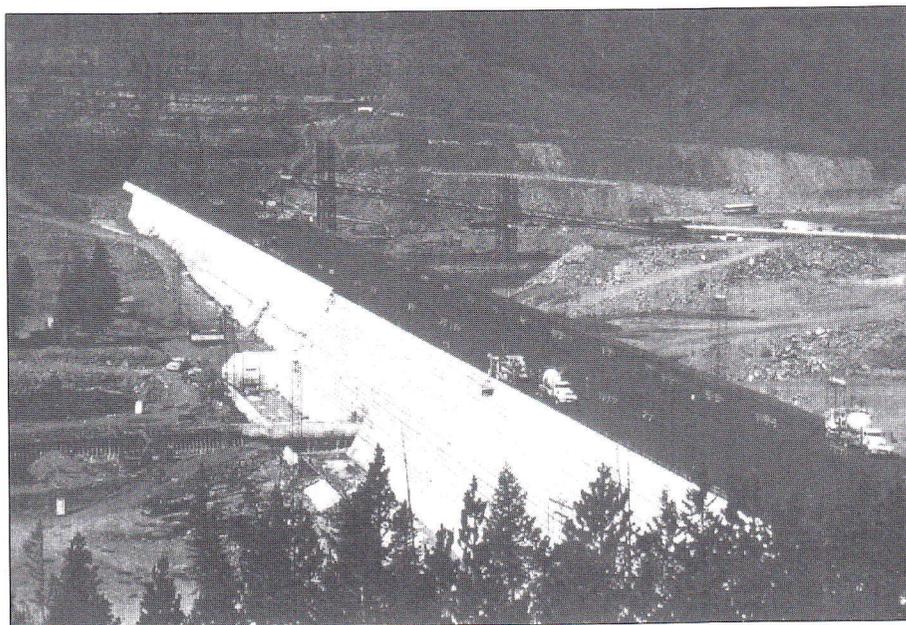
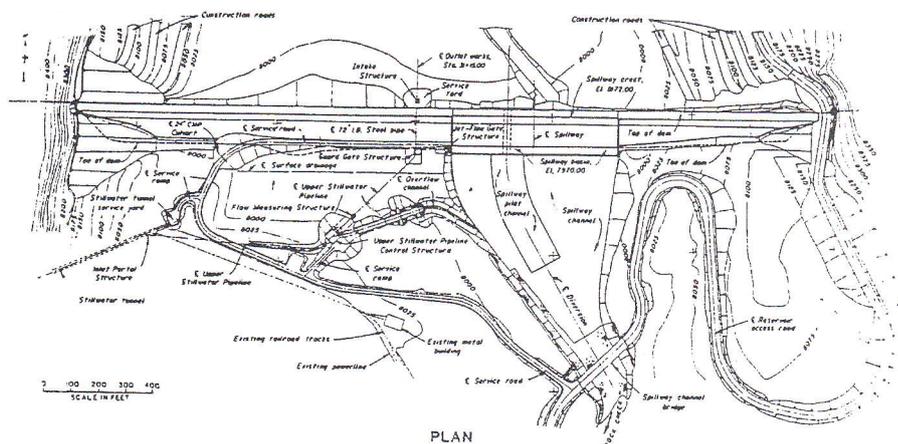
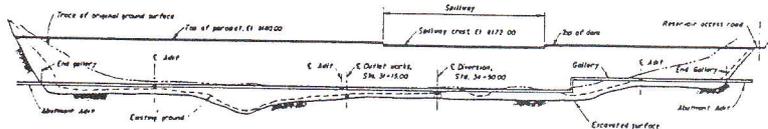


Fig. 8

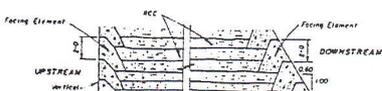
UPPER STILLWATER DAM



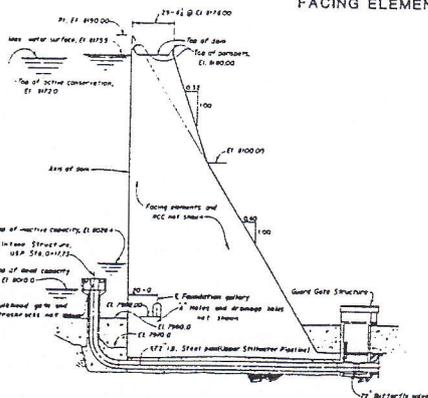
PLAN



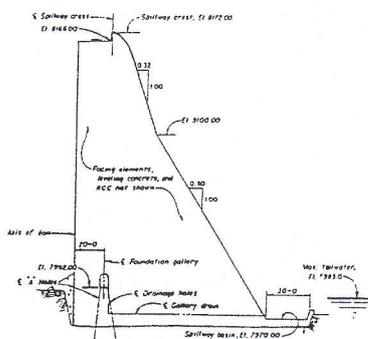
PROFILE ALONG AXIS OF DAM



FACING ELEMENT DETAIL



SECTION THRU OUTLET WORKS



SECTION THRU SPILLWAY

SHIMAJIGAWA DAM

OWNER: MINISTRY OF CONSTRUCTION

TECHNICAL DATA

Location	Shinnanyo-shi, Yamaguchi-ken
Nearest city	Shinnanyo-shi
River	Shimaji
Purpose	Flood control, Water supply and Maintenance of normal function of the river water
Catchment area	32km ²
Mean annual discharge	1.39m ³ /s
Years of construction	1976—1981
Type	Gravity
Foundation	Sandy schist, Green schist and Black schist
Height	89m
Crest length	240m
Volume	317,000m ³
Spillway	
Type	Uncontrolled
Type and number of gate	—
Maximum discharge capacity	750m ³ /s
Reservoir	
Gross capacity	20,600,000m ³
Effective capacity	19,600,000m ³
Area	0.80km ²
Drawdown range	49.6m
Owner	Ministry of Construction
Engineering by	Ditto
Construction by	J.V. of Ohbayashi-Gumi, Ltd. and Omoto-Gumi Co., Ltd.

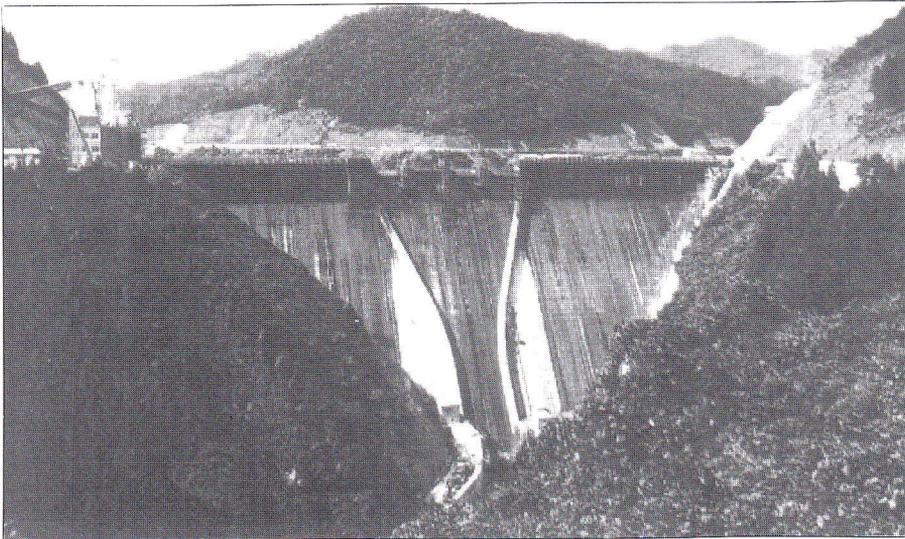


Fig. 10

SHIMAJIGAWA DAM

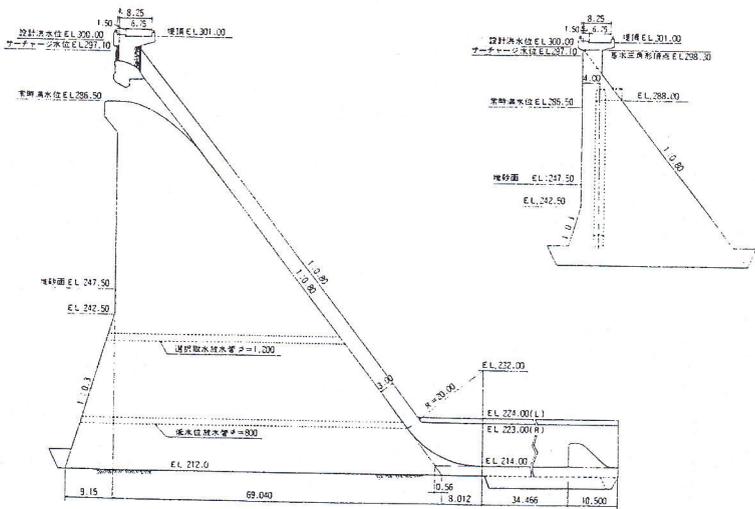
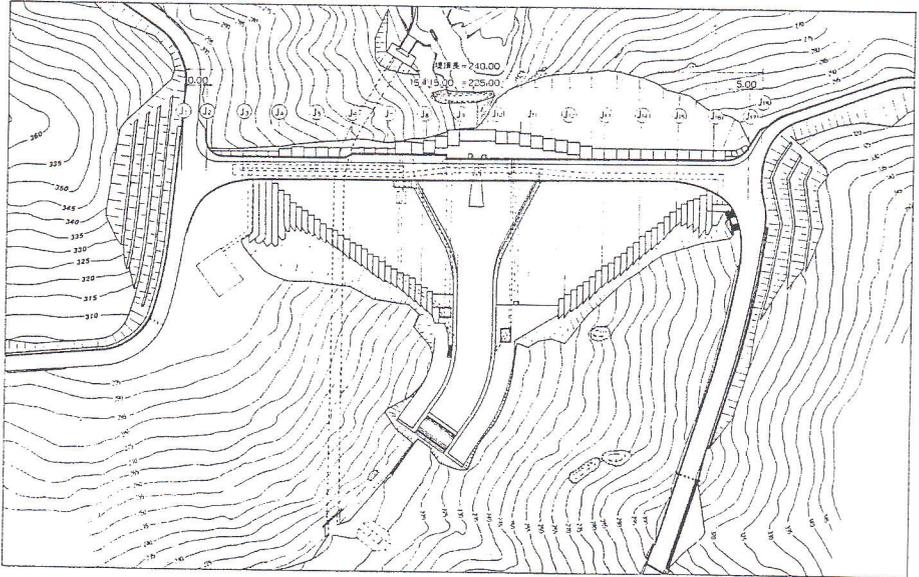


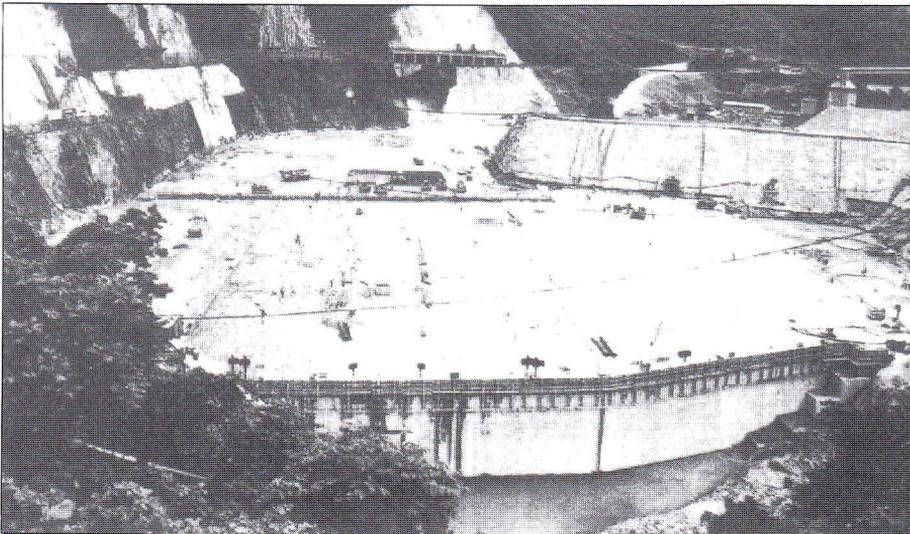
Fig. 11

OKAWA DAM

OWNER: MINISTRY OF CONSTRUCTION

TECHNICAL DATA

Location	Aizuwakamatsu-shi, Fukushima-ken
Nearest city	Aizuwakamatsu-shi
River	Agano
Purpose	Flood control, Hydroelectric, Irrigation, Water supply and Maintenance of normal function of the river water
Catchment area	825.6km ²
Mean annual discharge	32m ³ /s
Years of construction	1973—(1983) under construction
Type	Gravity and Rockfill
Foundation	Sandstone, Mudstone, Dacite, Quartz porphyry, Rhyolite and Hornfels
Height	78m
Crest length	406.5m
Volume	1,000,000m ³ (Gravity: 900,000m ³ , Rockfill: 100,000m ³)
Spillway	
Type	Controlled
Type and number of gate	Crest radial gate x 4 and Orifice radial gate x 5
Maximum discharge capacity	5,230m ³ /s
Reservoir	
Gross capacity	57,500,000m ³
Effective capacity	44,500,000m ³
Area	1.9km ²
Drawdown range	32m
Owner	Ministry of Construction
Engineering by	Ditto
Construction by	J.V. of Kajima Corporation and Ohbayashi-Gumi Ltd.



OKAWA DAM

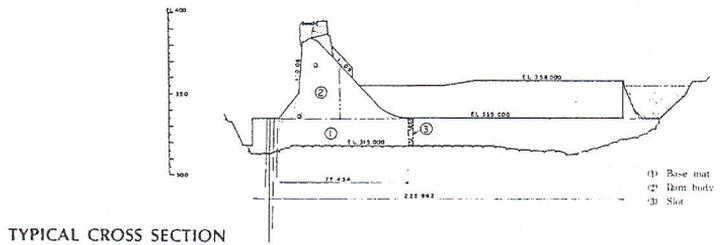
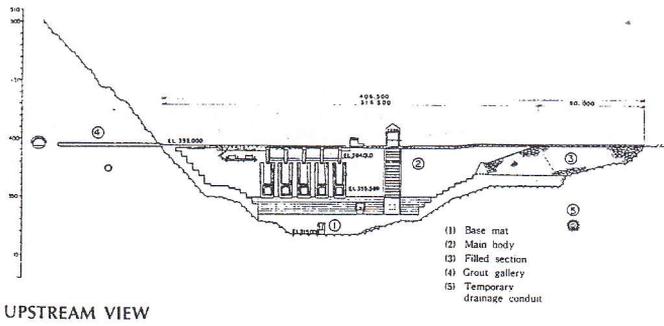
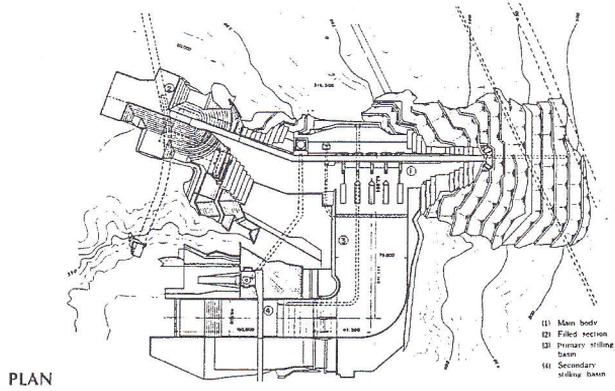
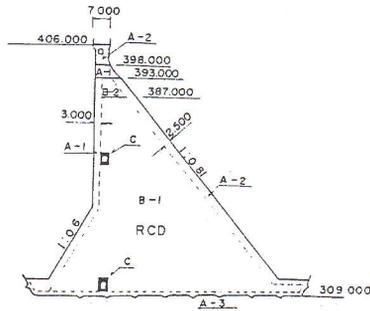
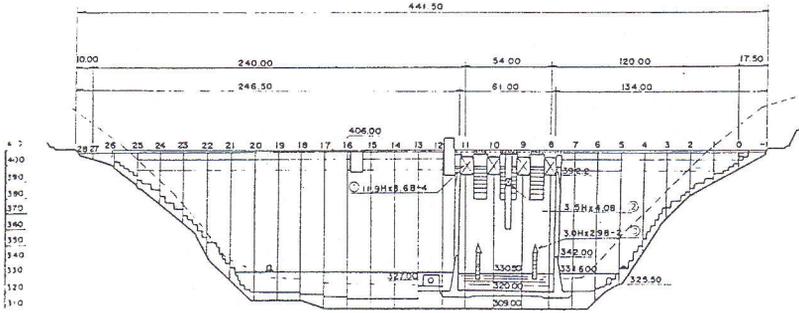


Fig. 13

TAMAGAWA DAM



Standard Mix Designs of Concrete
Composition standard du béton

Mix	Mix Conditions				Unit Content (kg/m ³)							Qty 10 ³ m ³	Portion Where Used	
	Gmax (mm)	Slump (cm)	VC Value (s)	Air (%)	W/C+F	F/C+F (%)	s/a (%)	W	C+F	S	G			Admix
A-1	150	3:1	-	3:1	0.48	30	22	115	240	440	1572	0.600	100	Upstream exterior
A-2	150	3:1	-	3:1	0.51	30	22	112	220	446	1592	0.550	90	Downstream exterior
A-3	150	3:1	-	3:1	0.60	30	24	108	180	497	1587	0.450	40	Near the Foundation rock
B-1	150	-	20:10	1.5:1	0.73	30	30	95	130	657	1544	0.325	750	Interior
B-2	150	3:1	-	3:1	0.66	30	25	106	160	523	1582	0.400	40	Interior
C-1	80	6:1.5	-	3.5:1	0.51	30	27	138	270	513	1397	0.675	90	Reinforced concrete portion
C-2	80	4:1.5	-	3.5:1	0.54	30	27	129	240	527	1436	0.600	30	Reinforced concrete portion

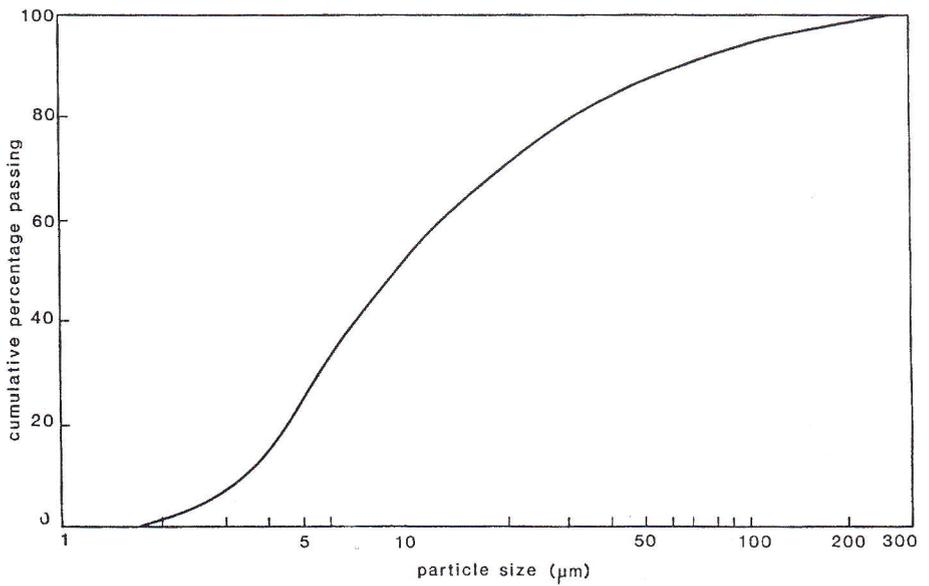
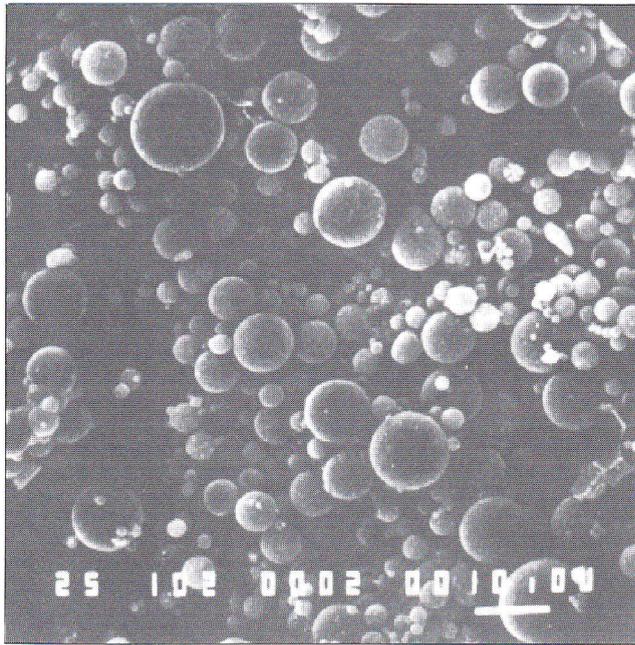
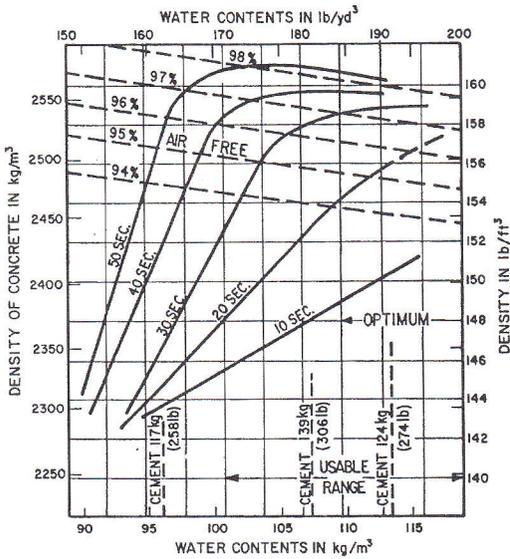


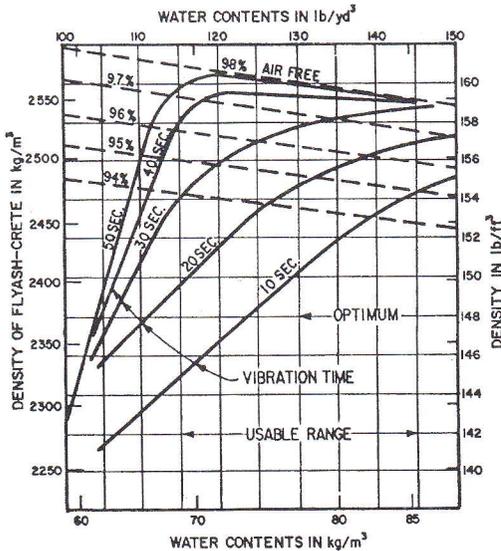
Fig. 14 Particelle di cenere e loro distribuzione granulometrica.



Ingredients	Weight	Volume
	kg (lb)	m ³ (ft ³)
38 mm (1½ in.) MSA	1159 (2556)	0.41 (14.5)
Sand	587 (1293)	0.21 (7.51)

Note: Aggregates are manufactured.

Fig. 15 Influenza del tempo di vibrazione e del contenuto d'acqua sulla densita' di un calcestruzzo senza cenere.



Ingredients	Weight	Volume
	kg (lb)	m ³ (ft ³)
38 mm (1½ in.) MSA	1159 (2556)	0.41 (14.5)
Sand	587 (1360)	0.22 (7.9)
Fly ash	152 (336)	0.066 (2.34)

Note: Aggregates are manufactured.

Fig. 16 Influenza del tempo di vibrazione e del contenuto d'acqua sulla densita' di un calcestruzzo con sola cenere.

Materials:
 Moorcroft limestone
 aggregate,
 Cement C, Flyash Z.
 Workability:
 40 seconds Cannon Time

Coarse aggregate content (a)	• 0.50	◆
	○ 0.53	△
Paste/mortar ratio (P)	□ 0.56	◇
	◆ 0.59	◆
Paste/mortar ratio (P)	○ 0.35	◆
	△ 0.38	◆
	◆ 0.41	◆
Paste/mortar ratio (P)	◆ 0.44	◆
	◆ 0.44	◆
	◆ 0.44	◆

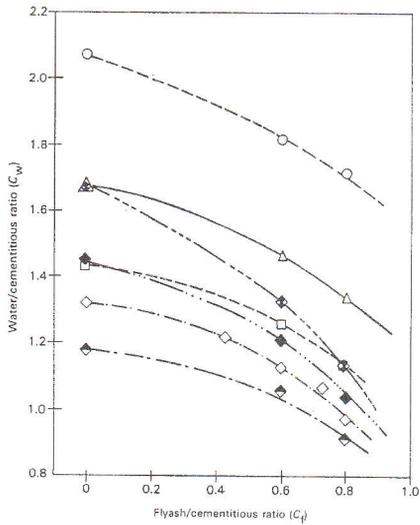


Fig. 17 Influenza del contenuto di cenere sulla richiesta d'acqua di calcestruzzi rullati (a pari consistenza). I rapporti indicati sono in volumi.

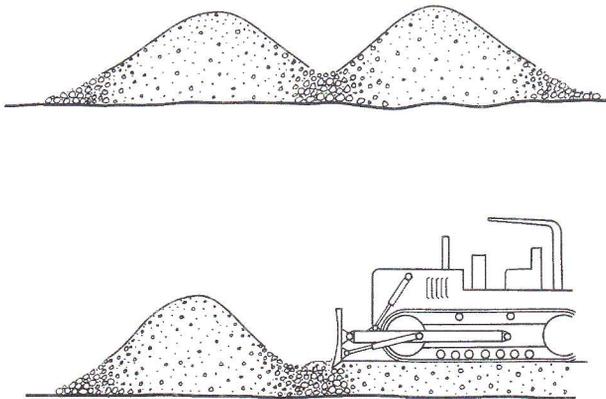


Fig. 18 Effetto schematico della segregazione del calcestruzzo.

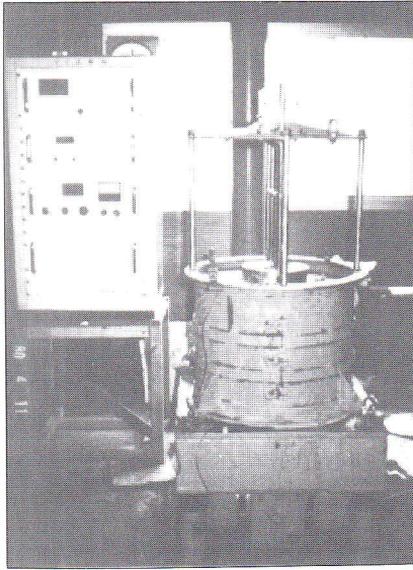


Fig. 19 Speciale dispositivo Giapponese per la misura della consistenza di calcestruzzi da diga a slump nullo, adatti per essere rollati,

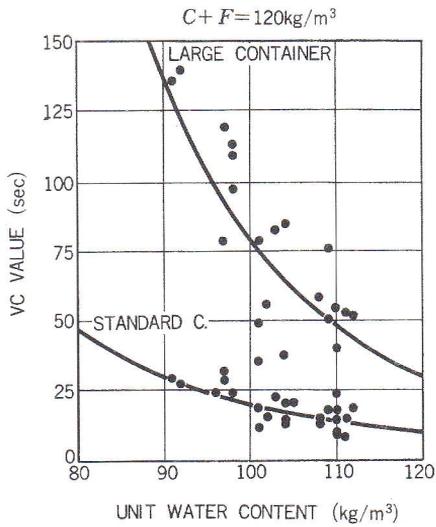


Fig. 20 Influenza del contenuto d'acqua sulla consistenza del calcestruzzo (Vibrating Compacting Value). Le due curve si riferiscono a due dispositivi Giapponesi per la misura della consistenza, uno standard e l'altro speciale per calcestruzzi da diga.

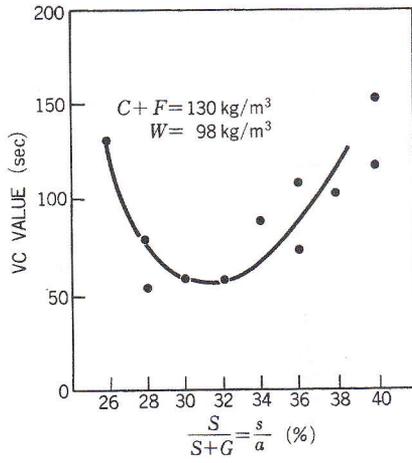


Fig. 21 Influenza del contenuto di sabbia sulla consistenza del calcestruzzo (Vibrating Compacting Value).

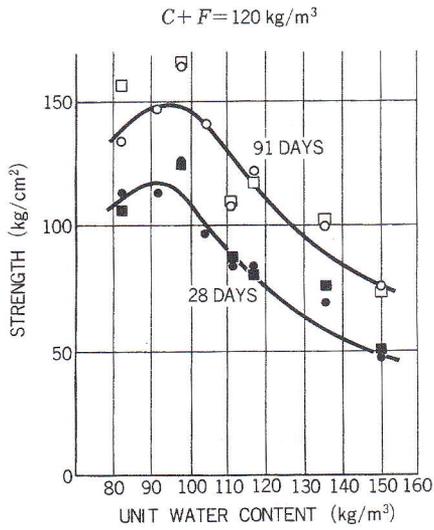


Fig. 22 Correlazione tra la resistenza del calcestruzzo rollato ed il suo contenuto d'acqua.

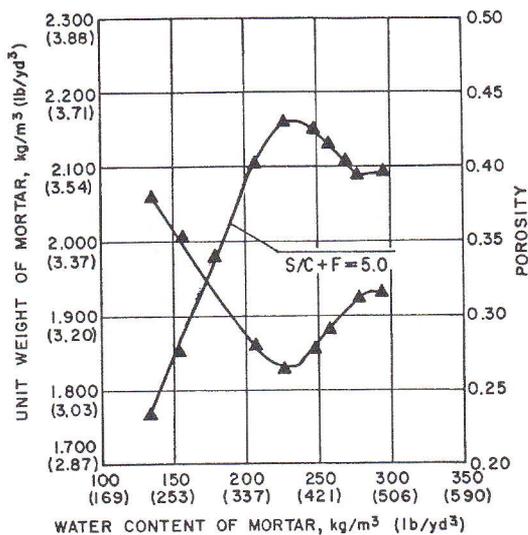


Fig. 23 Correlazione tra la densita' e la porosita' della malta ed il suo contenuto d'acqua.

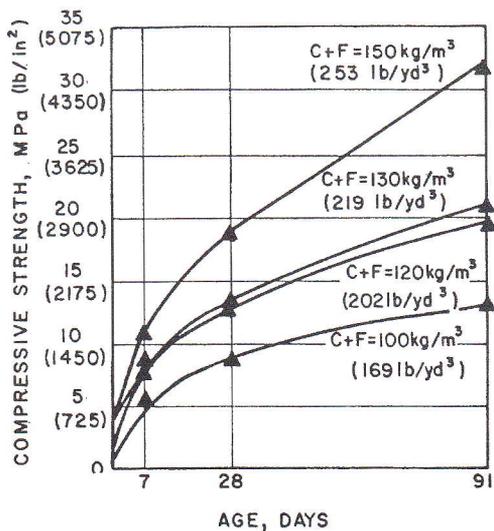
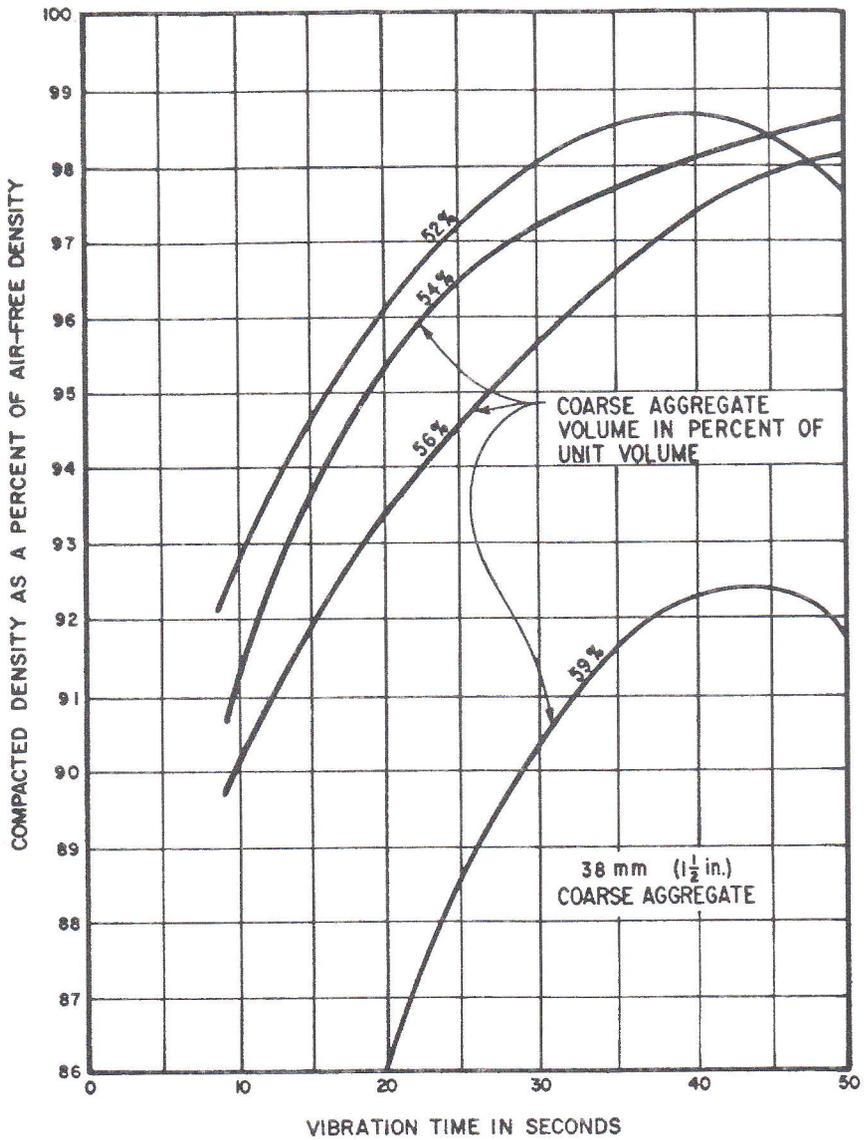


Fig. 24 Andamento della resistenza a compressione di calcestruzzi in funzione del tempo, al variare del contenuto di cemento e cenere.



MORTAR MIX (AIR FREE): SAND =62.8% BY VOLUME
 WATER =16.5% BY VOLUME
 FLY ASH =20.7% BY VOLUME
 CEMENT = 0

Fig. 25 Influenza del volume di aggregato grosso sulla densita' del calcestruzzo rollato.

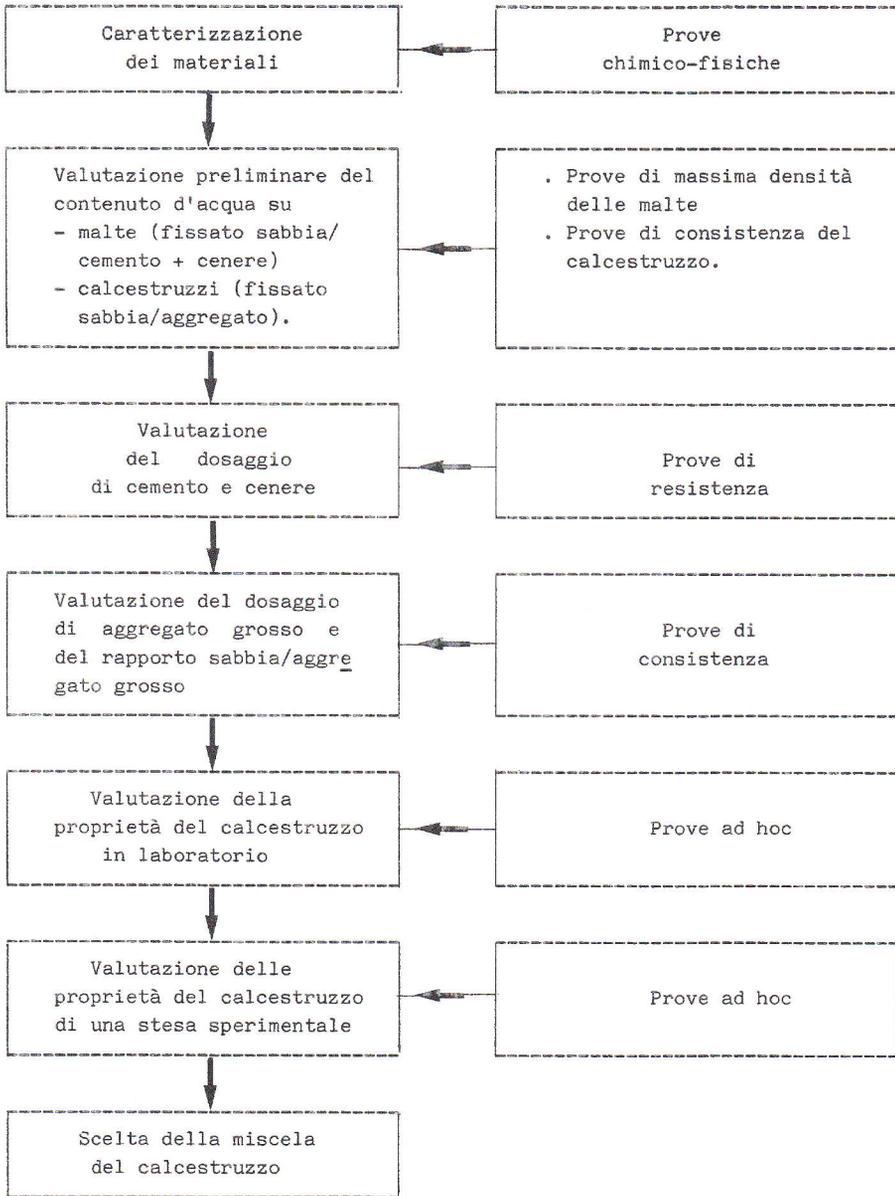


Fig. 26 Schema per il proporzionamento del calcestruzzo rollato in base a prove di consistenza.

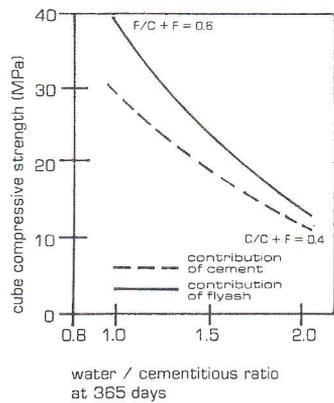
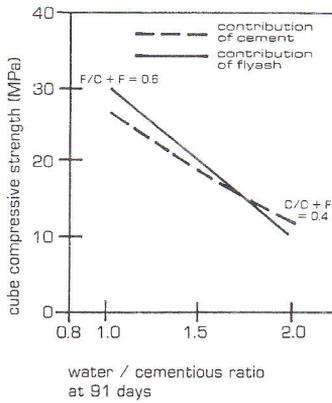
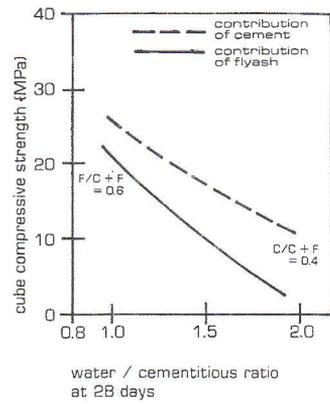
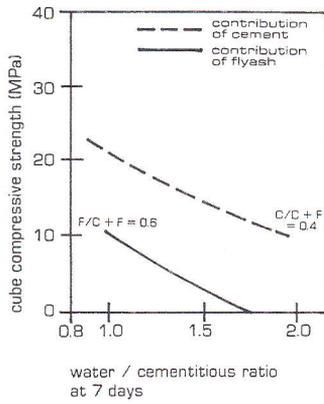


Fig. 27 Contributo di cemento e cenere alla resistenza a compressione di calcestruzzi rullati, in funzione del rapporto acqua/cemento e a varie età di stagionatura. I risultati si riferiscono a rapporti volumetrici cenere / (cemento e cenere) di 0.6.

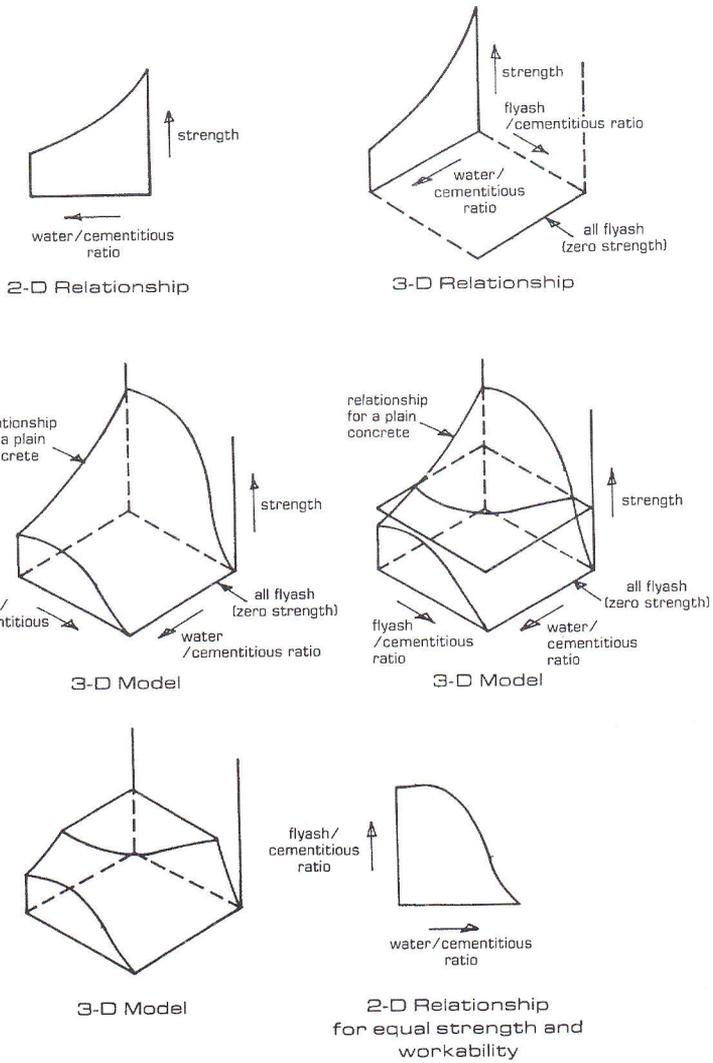


Fig. 28 Andamento della resistenza del calcestruzzo rullato in funzione sia del rapporto acqua/(cemento + cenere) che del rapporto cenere / (cemento + cenere) Modello tridimensionale.

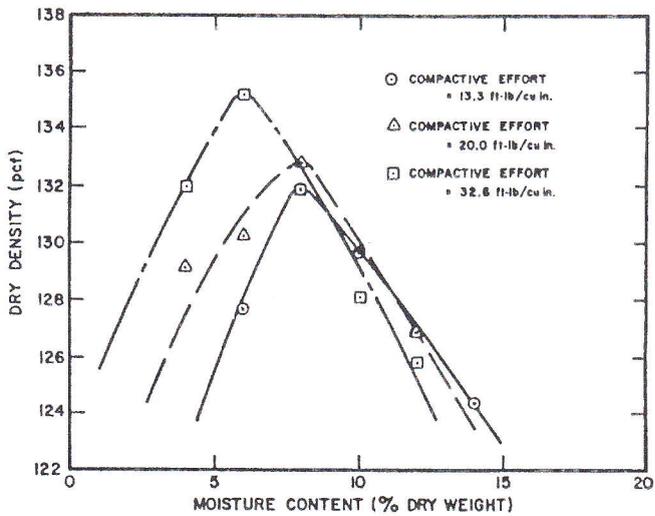


Fig. 29 Risultati di prove di compattazione del calcestruzzo secondo i metodi di compattazione dei suoli. Densita' in funzione del contenuto d'acqua (in % ponderale sui materiali secchi) per diverse energie di compattazione.

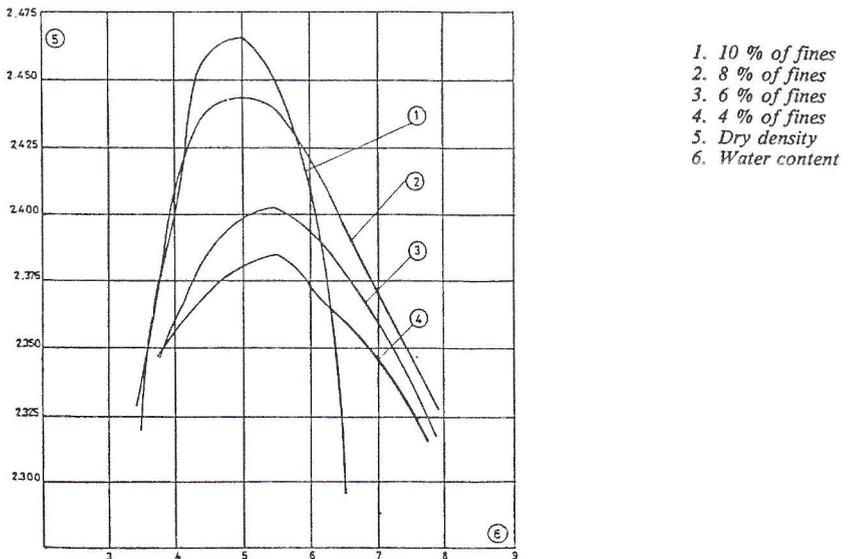


Fig. 30 Risultati delle prove di compattazione di Proctor su calcestruzzi aventi diversi contenuti di parti fini.

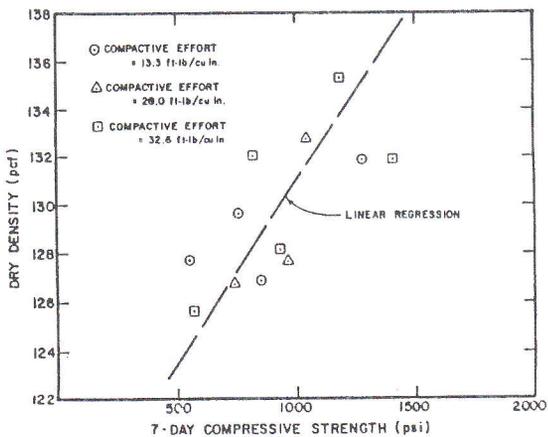


Fig. 31 Resistenza a compressione a 7 giorni di calcestruzzi compattati con i metodi di compattazione dei suoli (con diverse energie di compattazione), in funzione della densita' raggiunta.

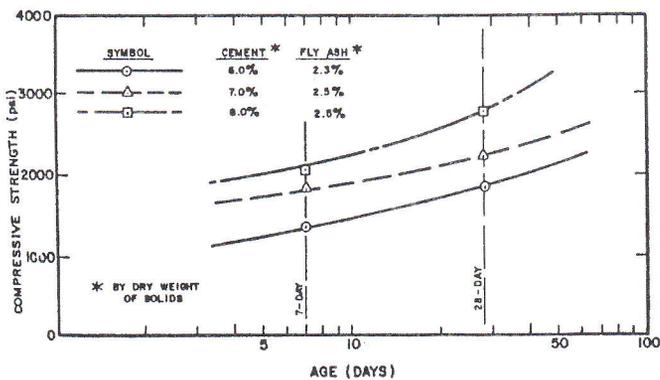


Fig. 32 Sviluppo della resistenza nel tempo di calcestruzzi rollati proporzionati secondo i metodi della meccanica dei suoli.

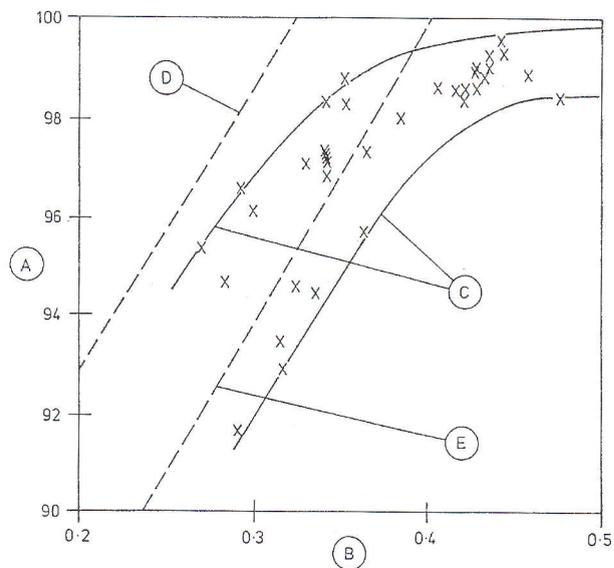


Fig. 33 Relazione tra la densita' e il rapporto pasta/malta cementizia.

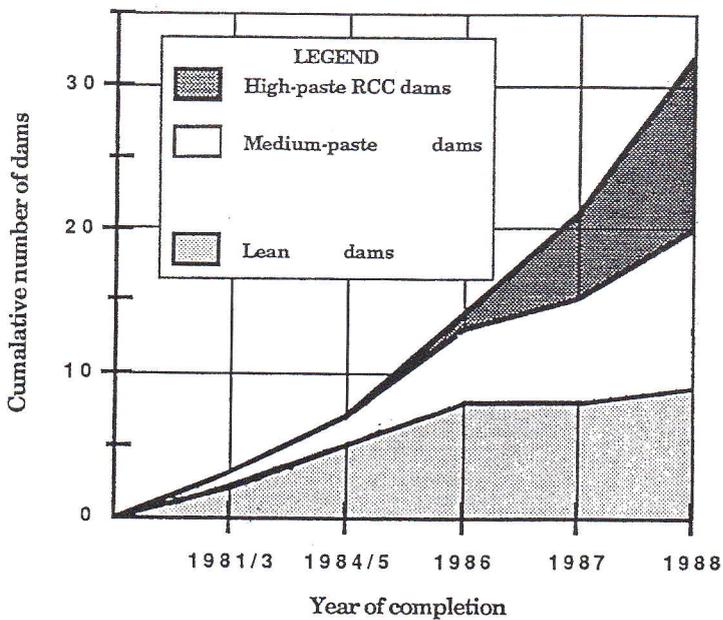


Fig. 34 Andamento della crescita del numero di dighe in calcestruzzo rullato, differenziato per tipologia di calcestruzzo.

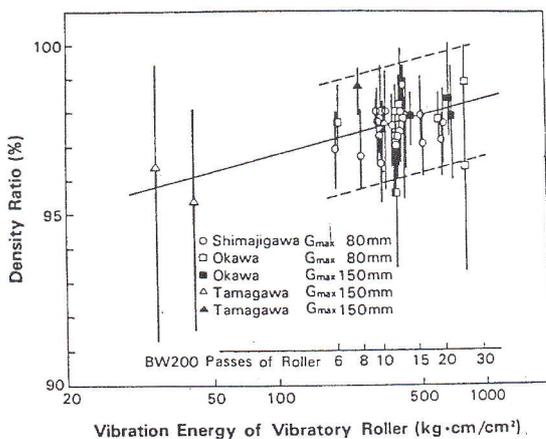


Fig. 35 Correlazione tra la densita' del calcestruzzo rullato e l'energia di vibrazione dei rulli vibranti, per alcune dighe Giapponesi.

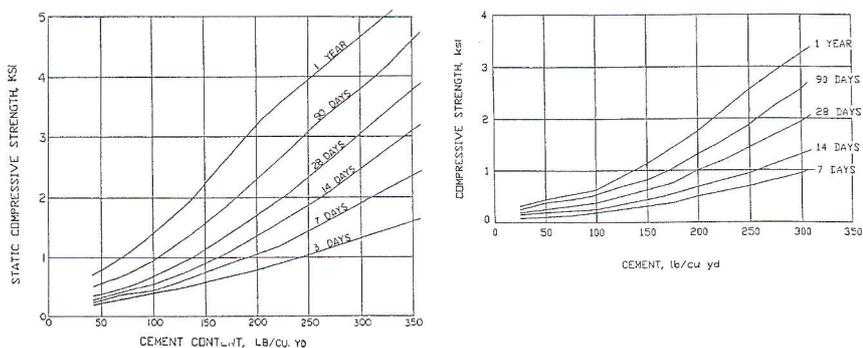
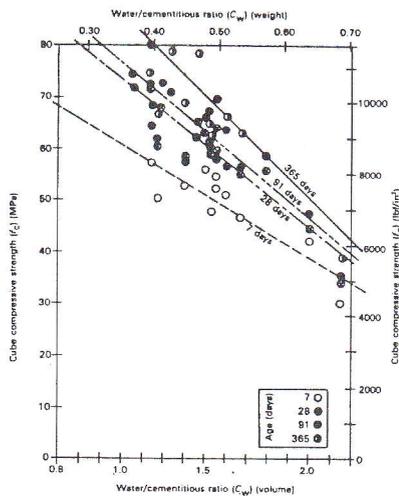
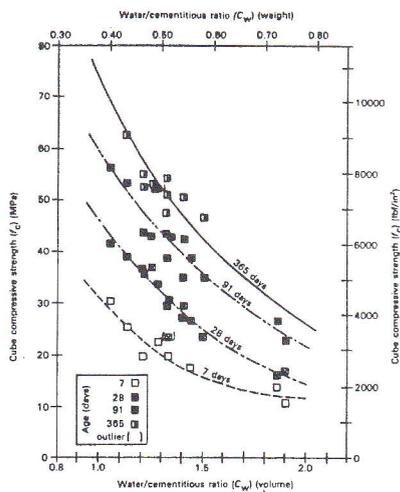


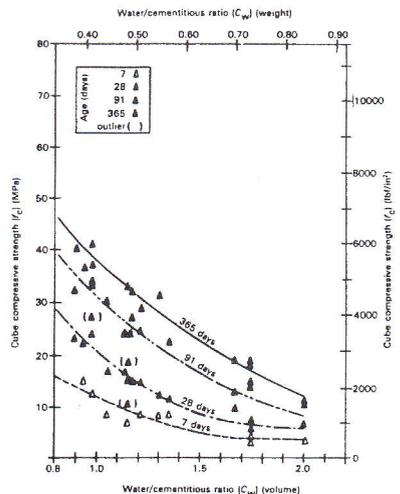
Fig. 36 Andamenti delle resistenze di calcestruzzi rullati in funzione del contenuto di cemento. Sinistra : aggregato di buona qualita'; destra : aggregato di scadente qualita'.



(a) $C_1 = 0$



(b) $C_1 = 0.6$



(c) $C_1 = 0.8$

Fig. 37 Relazione tra la resistenza a compressione di calcestruzzi rullati ed il rapporto acqua / (cemento + cenere) in volume. Sono considerati tre contenuti di cenere: 0 - 0.6 e 0.8 come rapporto volumetrico cenere / (cemento + cenere).

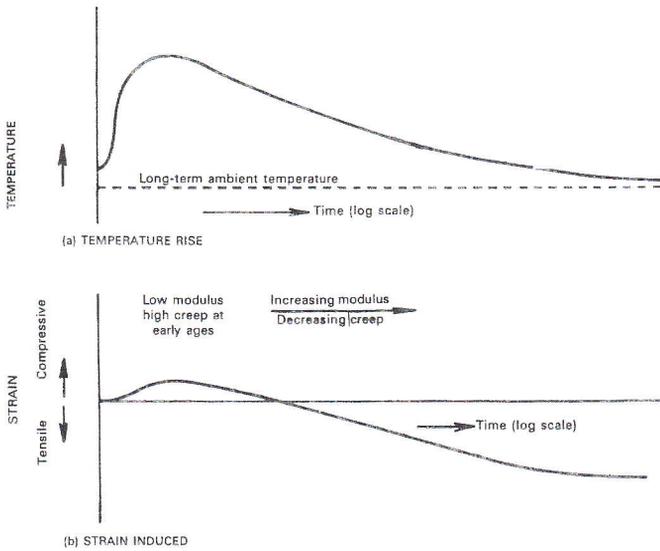


Fig. 38 Tipico incremento di temperatura con relativa deformazione per un calcestruzzo da diga.

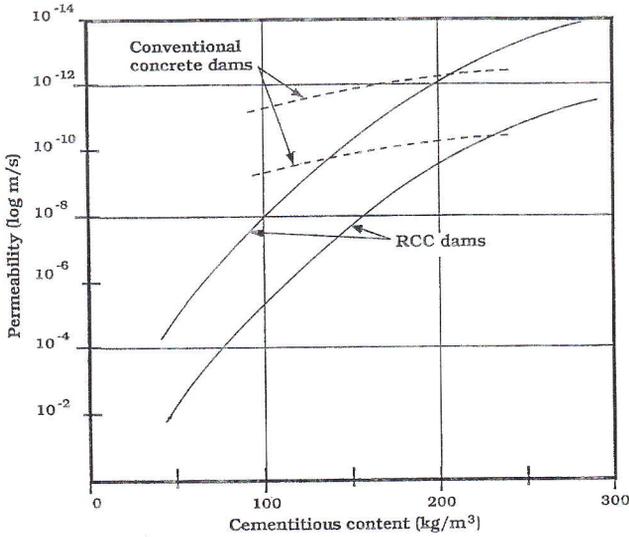


Fig. 39 Relazione tra la permeabilita' dei calcestruzzi rullati di 24 dighe e il loro contenuto di cemento + cenere.

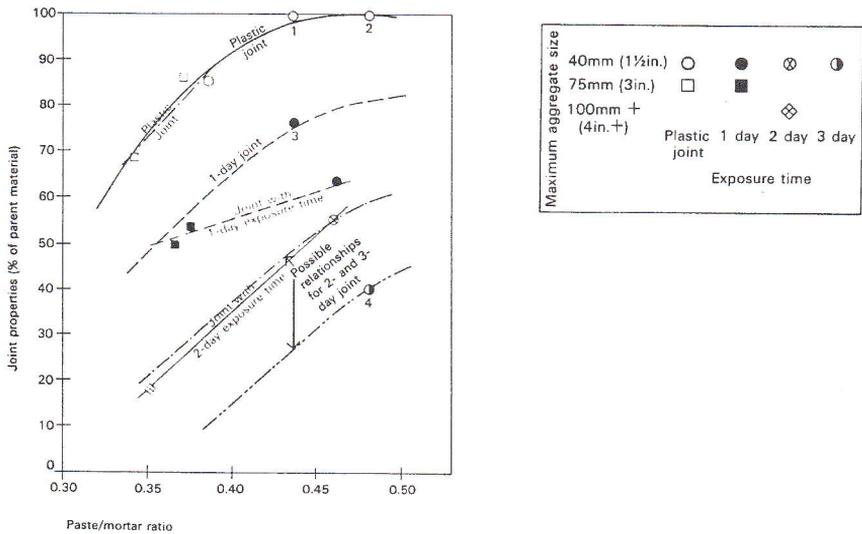


Fig. 40 Aderenza tra due strati di calcestruzzo rollato in funzione del rapporto volumetrico tra pasta e malta cementizia, al variare dell'intervallo di tempo intercorso tra il getto degli strati.

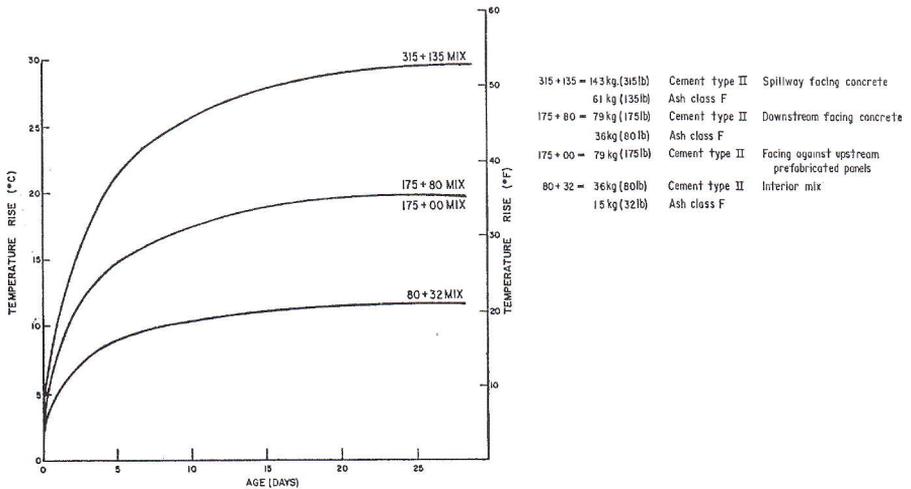


Fig. 41 Incremento adiabatico di temperatura per 3 miscele di calcestruzzo della diga di Willow Creek.

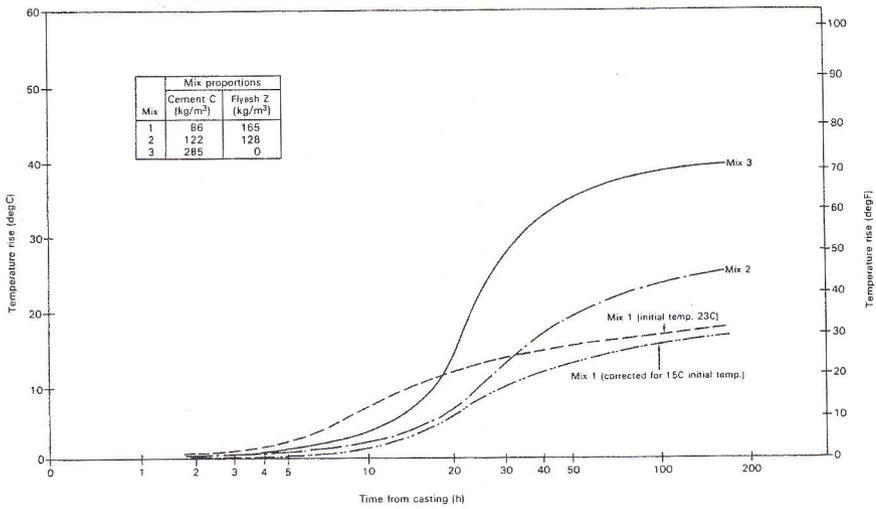


Fig. 42 Incremento adiabatico di temperatura per alcune miscele di calcestruzzo al variare del rapporto tra cemento e cenere.

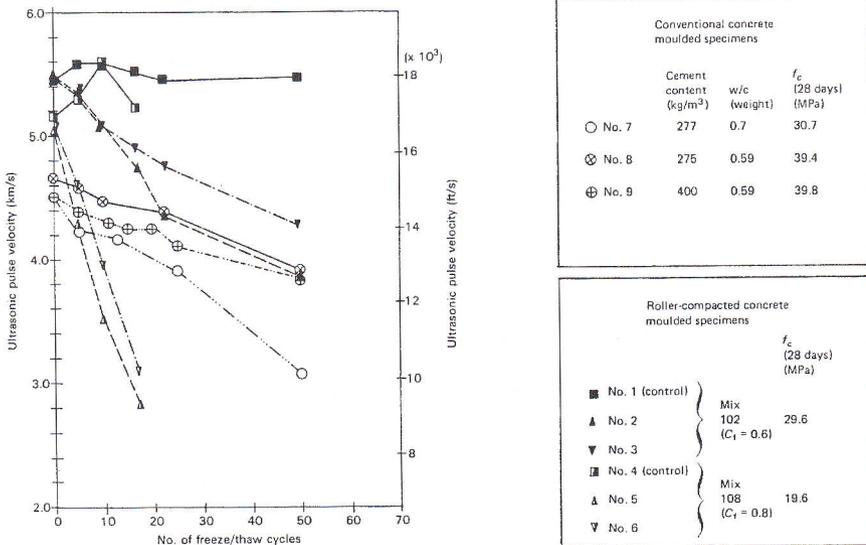


Fig. 43 Variazione della velocità ultrasonica di diversi calcestruzzi rullati soggetti a cicli di gelo e disgelo.

Fig. 44



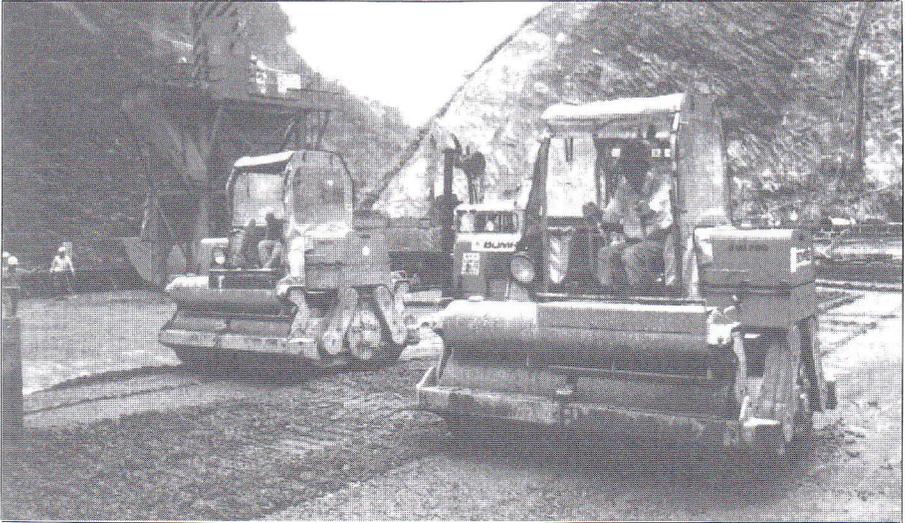
Fig. 45



SHIMAJIGAWA DAM

Distribuzione, stesa e compattazione del calcestruzzo

Fig. 46



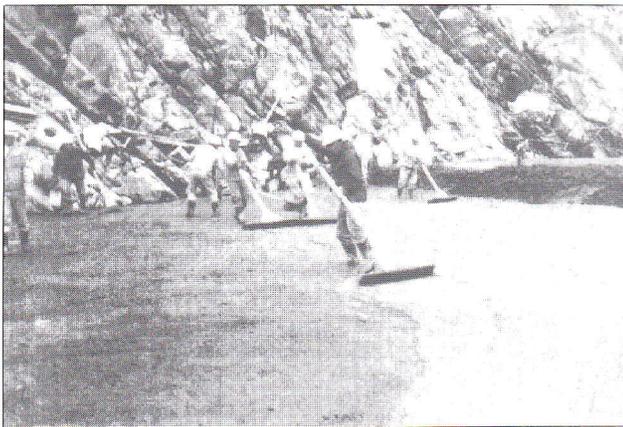
SHIMAJIGAWA DAM
Rullatura del getto

Fig. 47



Pulizia e ravvivamento del getto

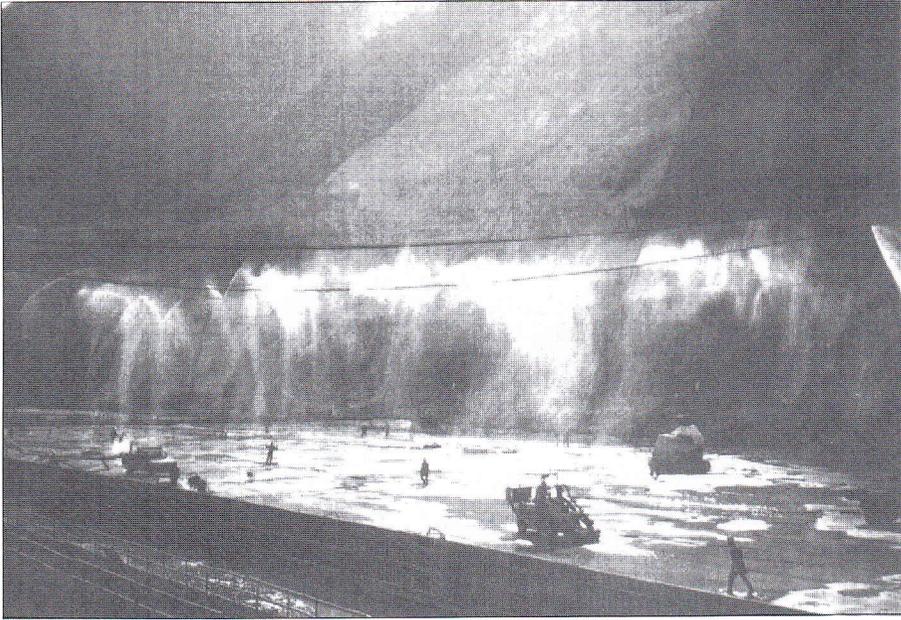
Fig. 48



Stesa del betoncino

SHIMAJIGAWA DAM

Fig. 49



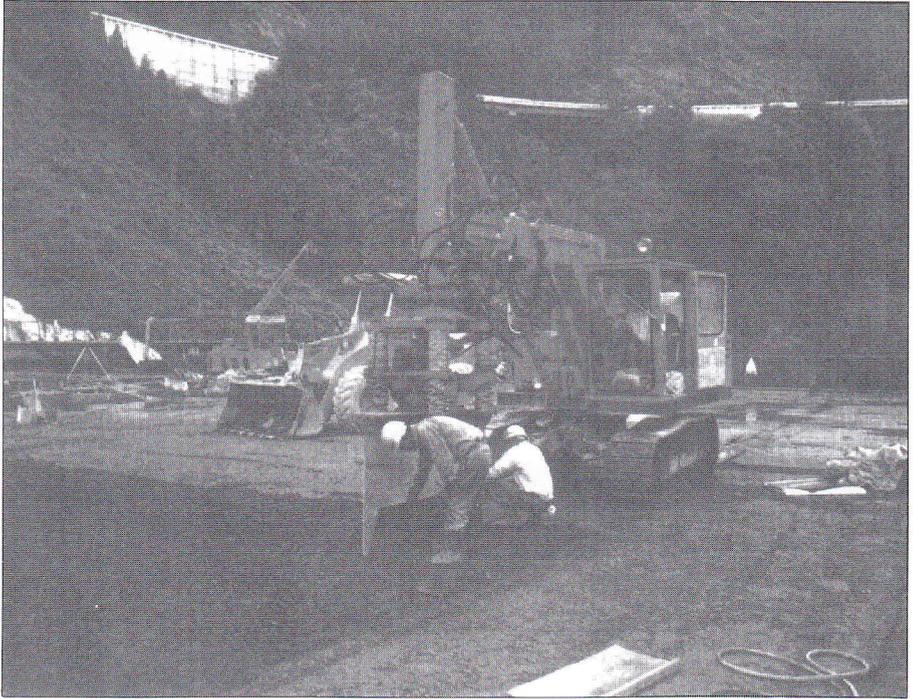
OCAWA DAM
Umidificazione del getto

Fig. 50



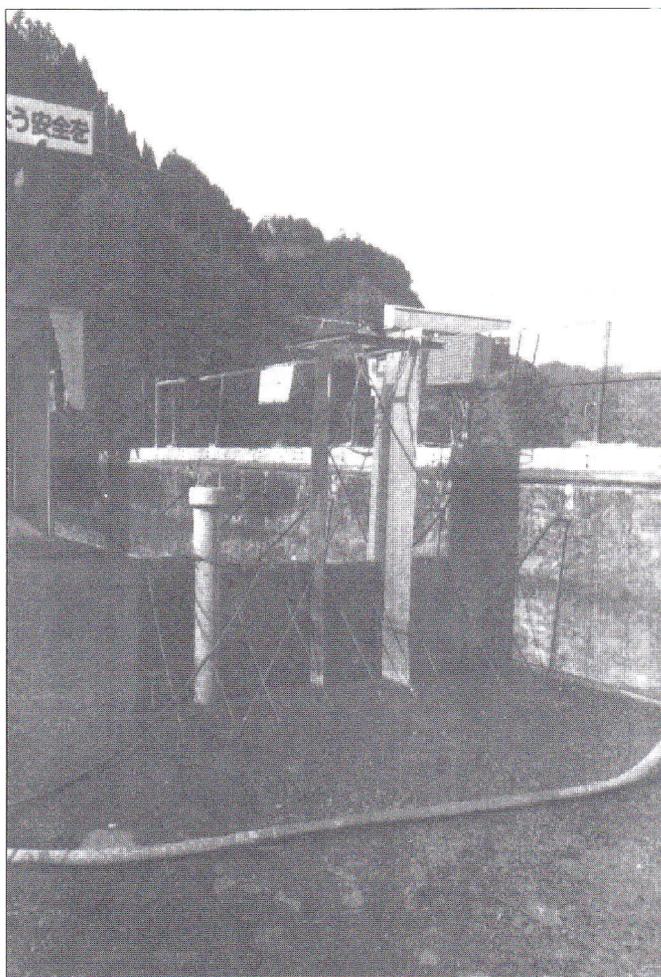
SHIMAJIGAWA DAM
Umidificazione del getto

Fig. 51



SHIMAJIGAWA DAM
Formazione del giunto trasversa-

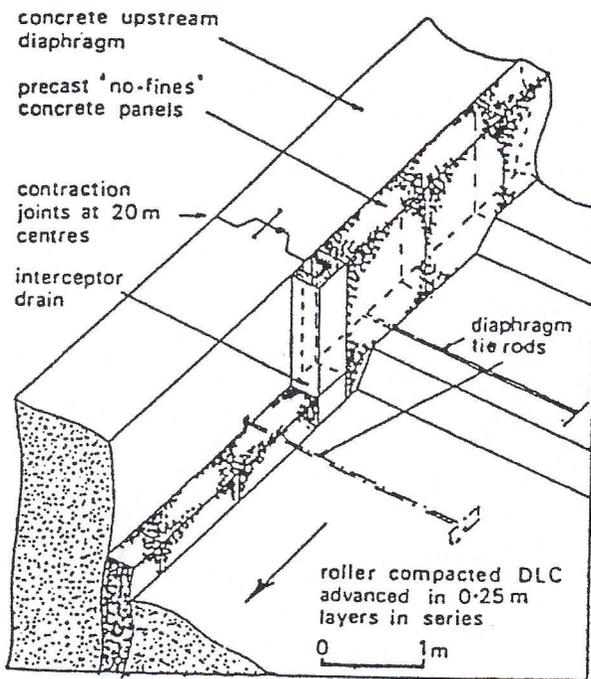
Fig. 52



SHIMAJIGAWA DAM

Impermeabilizzazione e drenaggio del giunto con elementi prefabbricati

Fig. 53



Trattamento del paramento di monte

MONTH July YEAR 1982

DATE

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

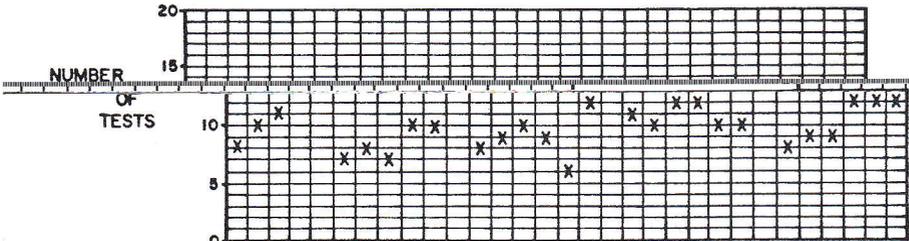
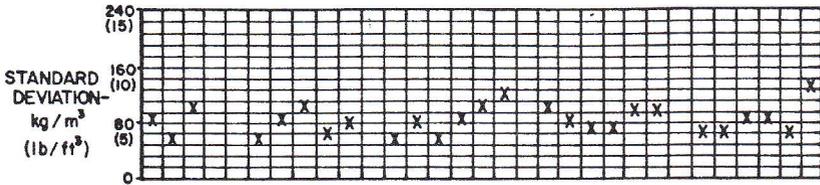
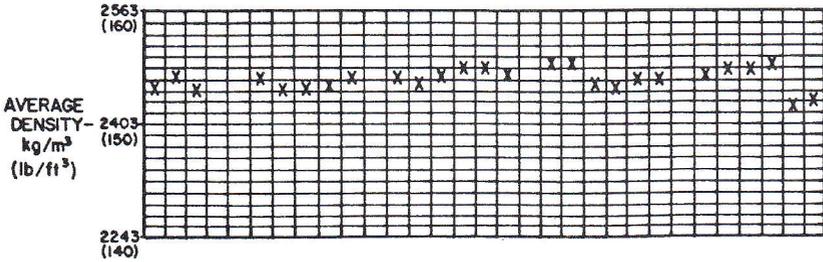


Fig. 54 Esempio di controllo di qualità della densità del calcestruzzo durante la costruzione della diga di Willow Creek.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

Atti di Convegni

Rolled Concrete for Dams - Proceedings of International CIRIA Conference, London, 9/10 Giugno 1981

Roller Compacted Concrete - Proceedings of the Symposium Sponsored by the Colorado Section and Construction Division of Civil Engineers in Conjunction with the ASCE Convention - Denver, Colorado - 1/2 Maggio 1985

Question 57: Concrete Dams - An Old Problem always present: Cracking; a New Technology: Rolled Concrete (Rollcrete) Proceedings 15th International Congress on Large Dams Lausanne, 24/28 Giugno 1985

Roller Compacted Concrete II - Proceedings of the Conference sponsored by the Construction, Geotechnical Engineering and Materials Engineering Divisions of the American Society of Civil Engineers San Diego, California, 28 Febbraio / 2 Marzo 1988

Question 62: New Developments in the Construction of Concrete Dams Proceedings 16th International Congress on Large Dams San Francisco, California 13/17 Giugno 1988

Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete Proceedings Second International Conference Madrid, Aprile 1986

La Tecnologia del calcestruzzo rullato per la costruzione di dighe a gravità Atti del simposio organizzato dall'Associazione Idrotecnica Italiana e dal Comitato Nazionale Italiano delle Grandi Dighe - Cagliari, 21/22 settembre 1989

Memorie e Rapporti

ACI Committee 207: "RollerCompacted Mass Concrete - ACI 207.5R" ACI Materials Journal, Vol. 85, No. 5, September-October 1988 - pp. 400-445

DUNSTAN, M.R.H., "Rolled Concrete for Dams, a Laboratory Study of the Properties of High Fly Ash Content Concrete, CIRIA Technical Note 105, May 1981

DUNSTAN, M.R.H. "Rolled Concrete for Dams, Construction Trials Using High Fly Ash Content Concrete CIRIA Report 90, May 1981

DUNSTAN, M.R.H. "The Growing Acceptance of RCC for Dam Construction", Autumn Conference of BNCOLD, 1988

BERTACCHI P., BERRA M., "L'impiego del Calcestruzzo Rullato e compattato nelle opere idrauliche, Idrotecnica, No. 6 Novembre-Dicembre 1986, pp. 383-394

KOKUBU M., "Development in Japan of Concrete Dam Construction by the RCD Method. Technical lecture given at the 52nd ICOLD Executive Meeting, Tokyo, 1st June 1984

International Water Power and Dam Construction: "Roller Compacted Concrete. Design Considerations and Applications". Special Issue - January 1986

ICOLD Bulletin No. 75: "Roller Compacted Concrete for Gravity Dams" Report of the ICOLD Committee on Materials for Concrete Dams (in stampa)

ICOLD Bulletin No. 63: "New Construction Methods" Report of the ICOLD Committee on Technology of Dam Construction

Concrete International Design and Construction Roller Compacted Concrete" Special Issue May 1984

Quaderno ITCOLD No. 4: "L'impiego delle Ceneri di Carbone nei calcestruzzi per dighe" Rapporto del gruppo di lavoro sui "Materiali per dighe in calcestruzzo" - 1990.

