

33  
201



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

UTILIZACION DEL CONCRETO COMPACTADO CON  
RODILLO, EN LA CONSTRUCCION DE CORTINAS  
DE GRAVEDAD PARA PRESAS

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

**I N G E N I E R O C I V I L**

**P R E S E N T A :**

**JOSE JAVIER FUENTES MONTALVO**

México, D. F.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1990



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## I N D I C E

	<u>Página</u>
I - INTRODUCCION	1
Qué es el concreto rodillado?	
Características	
Ventajas de su uso en la construcción	
II - MATERIALES DEL CCR	10
Agregados	
Cemento	
Puzolanas	
Aditivos	
Agua	
III - MEZCLADO	43
Plantas de mezclado continuo	
Revolvedoras de gran capacidad o dobles	
IV - TRANSPORTE	50
Con equipo convencional de terracerías	
Vagonetas de descarga de fondo	
Motoescrepas	
Bandas	
Camiones de descarga trasera	

V -	COLOCACION	57
	Capas horizontales uniformes	
	Tractores de cuchilla y llantas	
	Motoconformadoras	
	Colocadoras de base y pavimentos	
	Tractores de oruga	
VI -	COMPACTACION	71
	Rodillo liso vibratorio autopulsado	
	Parámetros a considerar	
	Problemas que se presentan en la compactación	
VII -	CURADO	87
	Métodos tradicionales de curado	
VIII -	CONTROL DE CALIDAD	91
	Pruebas de granulometría	
	Control de contenido de agua	
	Evitar la segregación	
	Pruebas de compactación	
	Medidores nucleares de compactación	
	Propiedades del concreto endurecido	

	<u>Página</u>
IX - GENERALIDADES	111
Del método	
De su uso	
Del equipo a usar	
X - CONCLUSIONES	121
EJEMPLO PRACTICO DE APLICACION	
DIAPOSITIVAS DE LA CONSTRUCCION DE LA CORTINA DE LA PRESA TRIGOMIL, JAL.	
BIBLIOGRAFIA	

## I - INTRODUCCION

### Antecedentes

#### Historia del Concreto Compactado con Rodillo (CCR)

El concepto "Concreto Compactado con Rodillo" que ahora está evolucionando rápidamente, tuvo sus inicios en la década de los setentas teniendo reconocimiento de sus estudios y aplicaciones en las Conferencias de la Engineering Foundation, celebradas en Asilomar, California en 1970 y 1972.

Fue en la segunda conferencia titulada "Construcción Económica de Presas de Concreto" donde Robert W. Cannon presentó la ponencia "Construcción de Presas de Concreto usando Métodos de Compactación de Tierra" y en 1972 en el simposio del ACI "Nuevos Métodos de Mezclado y Colocación de Concreto" realizado en Dallas, Texas. Cannon expuso una ponencia titulada "Compactación de Concreto Masivo con Rodillo Vibratorio". En ambas ponencias Cannon mostró los resultados de pruebas aplicadas a concreto transportado por camiones, extendido por un cargador frontal y compactado con rodillo vibratorio.

También el cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de Norteamérica realizó extensos estudios

de factibilidad, así como en el Japón. Sin embargo, no fue sino hasta que se terminó la Presa de Willow Creek en Oregon, U.S.A. una década después en 1982 que comenzó a usarse como material principal con el que se construyó una presa hecha completamente con CCR.

Qué es el CCR?

El Concreto Compactado con Rodillo es un material de concreto seco, que ha sido compactado o consolidado por vibración externa mediante rodillos vibratorios.

Difiere del concreto convencional principalmente en su consistencia. Para una consideración efectiva, el CCR deberá ser lo suficientemente seco para soportar el peso del equipo vibratorio pero suficientemente húmedo para permitir una distribución adecuada del cementante a lo largo de la masa durante el mezclado y proceso de vibrado. La consistencia requerida tiene un efecto directo en la proporción de la mezcla.

Básicamente es un concreto bien dosificado que acepta mayor número de finos con menor consumo de cemento y agua. Su transporte, colocación y compactación se hacen utilizando equipo de construcción para movimiento de tierras.

### Características del CCR

El mundo de las presas de fábrica ha evolucionado desde las presas Romanas hasta nuestros días, buscando siempre tres factores primordiales: Durabilidad, impermeabilidad y economía. En la década de los sesentas de este siglo se produce una nueva tecnología nacida bajo los auspicios de construcción más rápida y más económica de presas de fábrica, culminando en la técnica de "Rollcrete" o concreto compactado con rodillo.

En este trabajo se expone cómo esta nueva forma de concebir las presas de fábrica, no es sino una consecuencia lógica de la evolución de sistemas convencionales hacia materiales y medios constructivos conformes con la técnica actual: Por un lado, movimientos y puesta en obra de volúmenes elevados de concreto con sistemas análogos a los habituales en tierras y escolleras, y por otro lado, empleo extensivo de cenizas volantes procedentes de centrales térmicas de energía.

Con el fin de patentizar esta evolución se revisan, en los dieciséis Congresos Internacionales de Grandes Presas, en los que los concretos ocupan un lugar destacado, las características primordiales de los concretos para comparar con la nueva tecnología del CCR.



En el Congreso ICOLD celebrado en Nueva Delhi, en 1979 un pequeño grupo del Cuerpo de Ingenieros examinó un proyecto que llegaría a ser la primera presa de concreto compactado con rodillos en el mundo. Durante el siguiente Congreso ICOLD celebrado en Río de Janeiro (1982) se presentó un trabajo sobre dicho proyecto (la presa de Willow Creek) mientras se estaba colando CCR. Durante este mismo período, entre el congreso de 1979 y el de 1982, los Japoneses también habían empleado CCR como componente principal en la construcción de la presa Shimijawa.

Para cuando se celebró el siguiente Congreso de Lausana (1985) se había logrado un progreso tan rápido con las presas de CCR que este tema fue uno de los elegidos, con muchos trabajos y discusiones de respuesta. La primera generación de presas de CCR estaba en diversas fases de planeación, diseño y construcción. Sin embargo, casi no había datos de comportamiento disponibles sobre proyectos operacionales. En el 16o. Congreso en San Francisco (1980) estamos en posibilidad de observar por primera vez el comportamiento de estas estructuras. Muchas más presas se encuentran en la fase de construcción o aún no han desarrollado su vaso.

## Ventajas de su uso

Resumidamente, las ventajas más importantes son:

- Rapidez y simplicidad en la construcción.
- Menores requerimientos de mano de obra.
- Menos retracción hidráulica e incrementos de temperatura.
- Simplificación del número total de juntas y de su ejecución.
- Uso de conglomerantes más económicos.
- En comparación con las presas de materiales sueltos:
  - Posibilidad de ubicación del vertedero dentro del cuerpo de la presa.
  - Reducción del coste de las obras de toma.
  - Reducción del coste de las obras de desvío del río y de los riesgos asociados a ellas.
  - Impacto ambiental más reducido.

- Rentabilidad de la inversión a más corto plazo, como consecuencia del acortamiento del periodo de construcción.

A continuación se presenta una relación, por orden alfabético de países, de las presas en que se ha utilizado el rollcrete, ateniéndose a la nomenclatura generalizada y ausente de siglas:

<u>PAIS</u>	<u>NOMBRE DE LA PRESA</u>
Australia	Copperfield
Brasil	Itaipu, Saco de Nova Olinda Tucurui
Canadá	Manicougan I
España	Erizana Castilblanco Los Morales Santa Eugenia
Estados Unidos de Norteamérica	Willow Creek Monksville Middle Fork Upper Stilwater Winchester North Loop Great Hills

PAISNOMBRE DE LA PRESA

	Grinstone Cayon
	Elks Creek
	Lost Creek
	Tims Ford
	Zintel Canyon
Francia	Les Olivettes
Gran Bretaña	Milton Brook
	Holdbeam Wood
Italia	Alpe Vera
	Quavira Minerva
Japón	Okawa
	Shimajigawa
	Shin Nakano
	Tamagawa
	Pirika
Pakistán	Tarbela
Venezuela	Guri

## Comparaciones del CCR con el concreto convencional

	<u>CCR</u>	<u>CONVENCIONAL</u>
F'c	150 Kg/cm <sup>2</sup>	150 Kg/cm <sup>2</sup>
Cemento	104 Kg/M <sup>3</sup>	300 Kg/M <sup>3</sup>
Agregado máximo	6" Dosificado o en greña	1.1/2" Dosificado

	<u>CCR</u>	<u>CONVENCIONAL</u>
Tolerancia finos	4 - 10%	1%
A g u a	110 l.	204 l.
Aire atrapado	1/2 - 1.1/2%	3%
P u z o l a n a	Posibilidad de uso	No usual
Resistencia-Tiempo	Aumenta más	Aumenta menos
Calor específico	Disminuye	M a y o r
Cambios volumétricos	M e n o r	M a y o r
Compactación	M a y o r	M e n o r
Permeabilidad	M e n o r	M a y o r
Agrietamiento	M e n o r (poco apreciable)	M a y o r

Aunque el concreto compactado con rodillo es un método de construcción de presas relativamente moderno, las pocas presas así construídas hasta la fecha han puesto de manifiesto que este método supone unas ventajas económicas considerables, si se compara su construcción con la de las presas de concreto convencional, e incluso con la de las presas de materiales sueltos. Este trabajo examina los diferentes ensayos que se han empleado para dar a conocer las propiedades más importantes del CCR.

TIEMPO DE CONSTRUCCION PARA PRESAS DE CCR

	Altura Máxima (Pies)	Cantidad de RCC (yds)	Días/ Semana	Turnos x hr.	Tiempo total	Cantidad máxima diaria (yds)
1) Willow Creek, OR	169	433,000	6	2 x 8	Menos de 5 meses	5,800
2) Winchester, KY	70	35,000	6	2 x 10	2 meses	--
3) Middle Fork, CO	124	55,000	7	2 x 10	45 días	2,000
4) Galesville, OR	167	223,000	7	2 x 10	10 semanas <sup>1)</sup>	7,500
5) Upper Stillwater, UT	294	1.4 mil	7	2 x 8	10 meses <sup>2)</sup>	11,000
6) Monksville, NJ	150	289,000	6	2 x 10	Menos de 5 meses	7,800
7) Grindstone Canyon, NM	139	114,500	7	2 x 10	55 días <sup>3)</sup>	4,800
8) Elk Creek, OR	294 <sup>4)</sup>	1.1 mil <sup>5)</sup>	7	2 x 10 (1 mo.) (1 x 10 (2.5 mo.)	Menos de 4 meses <sup>3)</sup>	13,000
9) Lower Chase Creek, AZ	64	26,000	7	2 x 10	28 días	--
10) Stagecoach, CO	150	44,000	7	2 x 10	27 días	2,300

- 1 Incluye una interrupción planeada de 10 días.  
 2 Incluye interrupción de 4 días por lluvia intensa.  
 3 No incluye 2 cierres por Invierno.  
 4 Por orden de la Corte se detuvo en 83 Pies de altura  
 y 313,000 yds de CCR.  
 5 Para 11,000 yds no se incluye un periodo de cierre  
 de 5 meses en Verano.

## II - MATERIALES DEL CCR

### Agregados

La selección de agregados y el control de graduación de los agregados son factores importantes que influyen en la calidad y propiedades del CCR. Aunque los requisitos de calidad de los agregados usados en concreto no son directamente influenciados por los requerimientos de fuerza del concreto, la variabilidad del agregado afecta significativamente los requerimientos de cemento y agua de la mezcla que a su vez afecta la fuerza y el rendimiento. En estructuras masivas de concreto la costumbre de usar requisitos de fuerza irrealísticamente altos incrementa innecesariamente el costo de la estructura y es un principal contribuyente a los problemas de agrietamiento asociados con hidratación de calor de los materiales cementosos.

Los agregados, constituyen alrededor del 85% del peso volumétrico del CCR. En algunos casos, las características exigibles según la normativa vigente, pueden reducirse sin detrimento de la calidad final del concreto. Así por ejemplo, existe la posibilidad de aumentar el límite máximo de finos que pasan por el tamiz de 0.080 mm. UNE., así como el límite superior del ensayo de la prueba de desgaste de Los Angeles.

La granulometría de los agregados en conjunto, influye en la compactabilidad del concreto y por lo tanto, en el número mínimo de pasadas del rodillo vibrante. Además, dicha granulometría afecta a la cantidad de agua y material cementante necesario en la mezcla final. Habitualmente, no existe un huso granulométrico preestablecido, siendo la granulometría de los agregados finos, la que mayor influencia tiene en el contenido total de pasta. Con todo ello, se puede afirmar que en general se realiza un mejor aprovechamiento de los agregados disponibles en las inmediaciones de la presa.

El tamaño máximo de los agregados es el máximo compatible, con los riesgos de la segregación del material. Excepcionalmente, éste ha llegado a 150 mm. en Japón siendo el de 80 mm. el más comúnmente empleado. En algunas obras este tamaño máximo se limitó a 50 mm.

#### **Agregados Gruesos**

La práctica habitual sitúa la frontera entre agregados gruesos y arenas en el tamaño de 5 mm.; de modo análogo considera como elementos finos aquellos que pasan por el tamiz 200 de la serie ASTM; en algunos casos, el tamiz 100. Se tratará de los agregados cuya dimensión excede de 5 mm., acerca de los cuales Reinus sintetiza, en el



4o. ICOLD, New Delhi 1951, que cuanto más grande el tamaño máximo, menor la cantidad de cemento necesario.

Como aspecto principal de los agregados gruesos, se hará referencia al número de tamaños y a la granulometría continua o discontinua; según se resume en el 7o. ICOLD, Roma 1961, los agregados gruesos se clasifican en tres, cuatro y hasta cinco tamaños. Se toma como ejemplo la presa de RIAÑO -11o. ICOLD, Madrid 1973- con áridos de machaqueo de calizas paleozoicas, separados en tres tamaños: 120/60, 60/25 y 25/5 mm.; los agregados gruesos de la presa de SANTA EUGENIA, actualmente en construcción con la técnica de concreto compactado, proceden de machaqueo de granito, separándose en cuatro tamaños: 100/70, 70/30, 30/15 y 15/5 mm.

En el referido 7o. ICOLD se preconiza la separación de agregados evitando la mezcla de tamaños, limitando la formación de "colas", bien por deficiencia de cribado, bien por rotura de agregados en el proceso de acopio y transporte, llegando a la medida de un segundo cribado inmediatamente anterior a la entrada en la torre de hormigonado.

El tipo de granulometría es generalmente continua, preferentemente por razones económicas, ya que las

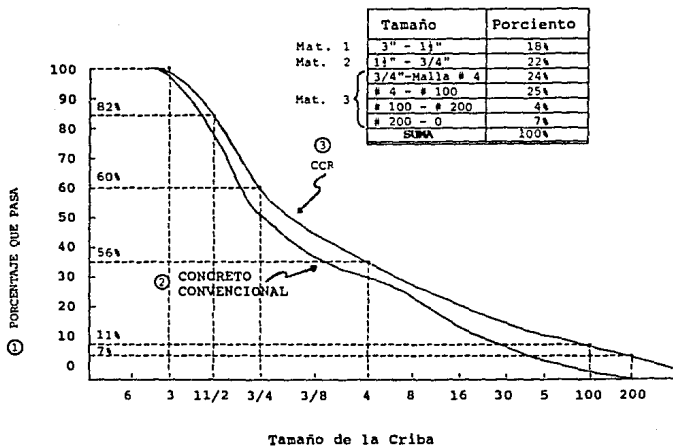
granulometrías discontinuas requieren rechazo de determinados tamaños, o reciclaje. No obstante las ventajas de las granulometrías discontinuas son ostensibles en el sentido de economizar mortero y mejorar la trabajabilidad; así lo exponen Portugueses e Italianos en el 7o. ICOLD, con la consiguiente mejora del producto acabado y de sus características de retracción, térmicas y de durabilidad.

Un caso excepcional de granulometría discontinua lo constituyen la presa Inglesa de ROCHON -Islas Seychelles- y las Alemanas de OKER, ECKER y BARBERINE. A título de ejemplo se presentan algunas características del concreto de OKER: En una masa de concreto con tamaño máximo de 30 mm. y dosificación de 300 Kg/m<sup>3</sup> de conglomerante, se introducen, por vibración, piedras de 200 a 400 mm., pudiendo alcanzar hasta un 60%; la dosificación resultante para la masa de concreto, habida cuenta de los bloques pétreos, es de 165 kg/m<sup>3</sup> de media. (Año 1956).

En los concretos compactados realizados en España, presas de ERIZANA, CASTILBLANCO DE LOS ARROYOS, LOS MORALES Y SANTA EUGENIA, los tamaños máximos son de 100 y 60 mm. con granulometrías continuas de los cuatro casos.

La selección y control de la granulometría de los agregados son factores importantes que influyen en la calidad y propiedades del CCR; aunque los requerimientos de calidad de los agregados utilizados en el concreto no se ven directamente influidos por los requerimientos de resistencia del concreto, la variabilidad del agregado afecta significativamente los requerimientos de cemento y agua de la mezcla, que, a su vez afecta la resistencia y la fluidez. La granulometría ideal para cubrir los requerimientos mínimos de la pasta será la que produzca la máxima densidad variable en seco con la mínima área de la superficie pero además, tomando en cuenta estudios efectuados por la Dirección de Ingeniería Experimental, dependiente de la Dirección General de Irrigación y Drenaje de la S.A.R.H. la granulometría estudiada debe estar complementada con un porcentaje de finos no plásticos que pueden ser cenizas volantes o limos, la proporción de estos materiales tentativamente está entre 5 y 6% en peso, la inclusión de este o estos agregados es requerida para desalojar la mayor cantidad de vacíos que ayudará a contrarrestar la permeabilidad del concreto.

FIGURA 2.2.1 GRANULOMETRIA TIPICA DE LOS AGREGADOS PETREOS PARA CCR



## Arenas

El tema de los agregados menores de 5 mm. se ha tratado, por extenso, en los 5o., 6o., 7o. y 8o. ICOLDS - respectivamente Paris 1955, New York 1958, Roma 1961 y Edimburgo 1964- clasificando en uno, dos y hasta tres tamaños: 5/1, 2 y 1.2/0.08 mm.; en la presa de SANTA EUGENIA, las arenas se clasifican según su tamaño único de 5/0 mm. (Presa de CCR). En términos generales las arenas quedan definidas como 0.074 mm < Arenas ≤ 5 mm.

Es práctica habitual, desde el Congreso de París, desechar todos los finos que pasan el tamiz 200 ASTM (0.074 mm.) y a veces, hasta el No. 100 ASTM (0.15 mm.), bien que se aceptan ventajas al añadir alguna proporción de estos finos; de modo generalizado se habla de cuatro ventajas al suprimir los tamaños inferiores a 0.08 mm.

- . Mejora la durabilidad de los concretos
- . Mejora la impermeabilidad
- . Mejora la resistencia
- . Disminuye la cantidad de agua, para igual docilidad

Sin embargo, tanto Austriacos como Japoneses -presas de YAKUMA y TAGOKURA- mencionan cierto aumento de

resistencia para un contenido de hasta 10% de finos en la arena, incremento tanto más apreciable cuanto más magro es el concreto. Los noruegos preconizan el empleo de finos menores de 0.15 mm. en proporción del 5% de las arenas, con aumento ostensible de la compacidad, aspecto tanto más importante a juicio de los expertos Japoneses que opinan que los finos pueden suponer un aumento de resistencia, perjudicando la durabilidad. El conocido experto ruso Stolnikov sintetiza la necesidad de controlar los finos, sin llegar a eliminarlos totalmente; los Americanos del Army Corps, con sus dosificaciones de concreto notoriamente magros (pobres), preconizan el empleo de finos como adición al conglomerante.

Concretando algunos valores, los Italianos exponen en el 7o. ICOLD, las admisiones siguientes:

Finos menores de 0.10 mm.....	2.3%	de las arenas
Finos menores de 0.25 mm.....	4.6%	

El noruego Groner propone un 5 a un 6% de la arena con tamaño inferior a 0.15 mm. el sueco Sallstrom habla de 2 a 8% menor que 0.08 mm. y 4% menor de 0.02 mm.

Obviamente, todos estos valores están íntimamente condicionados a la naturaleza de los finos y al empleo de aditivos, especialmente aireantes, por lo que no es fácil una mayor precisión generalizada. Con independencia de que, en otros apartados, se insista sobre estos puntos, parece necesario destacar que la cuantía de arena en un concreto viene a ser de 20 a 25% del total del agregado; en la presa de RIAÑO fue del 21%; en la de SANTA EUGENIA es del 19%.

El italiano Arredi preconiza el empleo de arenas artificiales, pese a su elevado coste, con el fin de limitar la cantidad de conglomerante.

#### Cemento y Puzolanas

La actividad de los finos existentes en los agregados de los concretos es un asunto complejo, relacionado con reacciones sólidas o topoquímicas, amén de las reacciones de hidratación de cementos, en todo caso, al tratarse de uniones epitáxicas relacionadas fundamentalmente con la superficie específica, el tema es de importancia para los finos, menor para las arenas y casi ninguna para los agregados gruesos, siempre que éstos no contengan sustancias alterables o en vías de alteración.

El tema se trata en el 4o. ICOLD, Nueva Delhi 1951, y de nuevo en el 6o. ICOLD, Nueva York 1958, para quedar casi olvidado hasta el 15o. ICOLD, Lausana, 1985.

Los materiales más habitualmente considerados, además de las puzolanas, cenizas volantes y escorias, más el surkhi patrocinado en la India, son arcillas, pizarras metamórficas, polvo de caliza y de dolomía, vidrios volcánicos, esquistos opalinos, diatomitas. Las micas más habituales, biotitas en los gneis y moscovitas en los granitos, tienen un comportamiento diferente, sin que se pueda aún establecer un criterio. A modo de meditación, parece que las micas de alta temperatura y las biotitas, son más activas que sus análogas de baja temperatura, lo que no deja de tener cierta lógica.

Uno de los problemas de vigente actualidad es la normativa a aplicar a las cenizas volantes, ya que su empleo en obra, mezclándolas en la propia torre de concreto, se generaliza día a día entre los presistas. En el 8o. ICOLD, Edimburgo 1964, se citan Normas de Recepción de las cenizas volantes en Japón, Reino Unido, U.S.A. y U.R.S.S.

Otro aspecto importante a destacar es el proyecto de concretos y la selección de agregados: ya en el 7o.



ICOLD, Roma 1961, se destaca la importancia de realizar ensayos en condiciones reales y es el propio Stolnikov quien enfatiza su importancia. Se ha visto cómo en la presa Rusa de TOKTOGOUL se construye una bancada de ensayo de varios miles de metros cúbicos y, en los nuevos concretos compactados (por ejemplo, ERIZANA, SANTA EUGENIA, UPPER STILWATER, LES OLIVETTES, etc.) se han construido bancos de prueba previos donde comprobar dosificaciones, puestas en obra, maquinaria auxiliar, tratamientos encofrados, etc..., de dimensiones de 70 m. por 10 m. como término medio de planta y altura de cinco a diez tongadas.

Con este ejemplo se pretende poner de manifiesto el enorme interés de utilizar conglomerantes de bajo calor de hidratación, es decir, con elevado contenido de cenizas volantes y de refrigerar fundamentalmente los agregados, pues aunque su calor específico sea mucho menor que el del agua, los volúmenes relativos son abultadamente mayores: Relación de 1:3 entre calores específicos y de 25:1 en peso de material.

Al proporcionar las mezclas para volúmenes de pasta mínimos, una función principal de la puzolana o agregados finos es el de ocupar espacio que sería de otra forma ocupado por cemento o agua. Ocupar este espacio con agua

obviamente resultaría en una reducción en la fuerza del concreto. El hecho que aun una pequeña cantidad de cal libre liberada del cemento es suficiente para reaccionar con grandes volúmenes de puzolana ha sido demostrado por agencias tales como el TVA que ha usado por muchos años cenizas volantes para reemplazar tanto agregados finos como cemento. Sus pruebas muestran actividad puzolánica continua en edad extendida en años. Por lo tanto las puzolanas no sólo ocupan espacio sino que además contribuyen al desarrollo de la fuerza. Su contribución a la generación de calor varía inversamente con el radio de puzolanas a cemento tal que para un requisito de fuerza dado, la mezcla con el menor contenido de cemento (que llene la fuerza requerida) tendrá la menor alza en temperatura.

Donde hay deficiencia en agregados finos una puzolana no tiene que ser altamente reactiva para ser efectiva. Por lo tanto, muchas cenizas volantes cuya reactividad, debido a insuficiente finura de las partículas, no llenarían las especificaciones actuales del ASTM, serían adecuadas para la mayoría de las aplicaciones de C.C.R. No todas las puzolanas son igualmente defectivas; tanto la forma de la partícula y la reactividad influenciarán los requisitos mínimos de cemento para producir un requisito de fuerza dada. Sin embargo, el uso de una

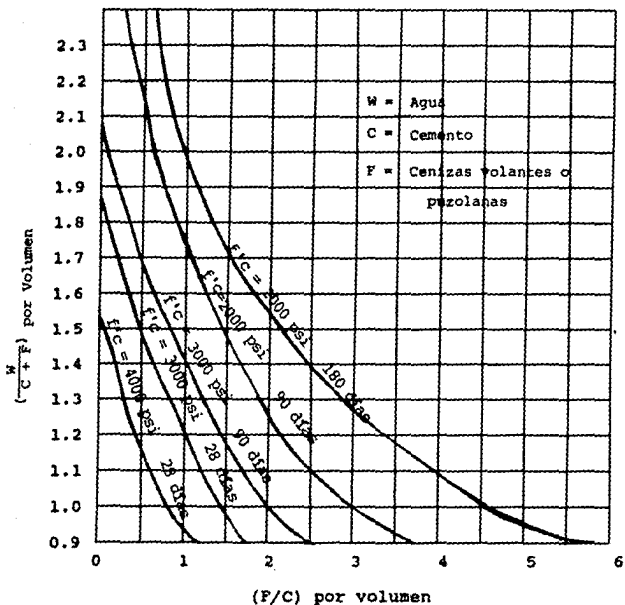
puzolana que produzca menor fuerza y que esté disponible localmente puede tener suficientes ventajas económicas en situaciones donde hay una gran diferencia en el costo de las puzolanas locales contra una puzolana más efectiva que tendría que ser transportada.

La fuerza del concreto depende esencialmente de las proporciones del cemento, puzolanas y agua. El tipo de cemento tiene un efecto significativo en el porcentaje de hidratación y el porcentaje de desarrollo de fuerza y por lo tanto afecta significativamente la fuerza en etapas tempranas. En edades después de los 28 días la diferencia, kilo por kilo, en contribuciones de resistencia para los varios tipos de cemento decrece, con los cementos de desarrollo más lento de fuerza finalmente produciendo las fuerzas más altas. A menudo hay tanta diferencia en fuerza de una presa a otra de un tipo de cemento como lo hay de un tipo a otro. Por esta razón no se puede usar una sólo gráfica o tabla que asegure fuerza, sin ser sobre conservador. Para la mayoría de los cementos Tipo I y II la figura 2.1. puede ser usada para proporcionar concreto de fuerza igual para proporciones variables de cemento y cenizas volantes. También puede ser usada con otras puzolanas además de las cenizas volantes; sin embargo, la forma de la partícula de otras puzolanas generalmente no es conducente a la

cantidad de reducción de agua asociada con cenizas volantes. En tanto, la proporción máxima usable de puzolana a cemento (F/C) estará limitado a un valor máximo de 2 para puzolanas que no sean cenizas volantes. La demanda de agua para un conjunto dado de materiales también limitará la proporción  $W/(C+F)$  mínima usable. Mezclas de cenizas volantes han sido usadas en la proporción máxima FIC y la proporción mínima  $W/(C+F)$  de la figura 2.4.1. Sin embargo, la rigidez incrementada de la mezcla debe ser esperada al decrecer la proporción de cenizas volantes a cemento por la diferencia básica en los requisitos de agua.

Los cementos más adecuados para el empleo en presas de CCR son aquellos con un bajo calor de hidratación y poca retracción, es decir, cementos con elevados contenidos de adiciones activas (cenizas, escorias, puzolanas) como los mixtos tipo V de la Norma UNE 80 301 85. Estos tipos de cementos mejoran la trabajabilidad del concreto teniendo un desarrollo de resistencia más lento, por lo que éstas se especifican a edades superiores a los 90 días.

FIGURA 2.1.- CURVAS PROPORCIONALES PARA CONCRETO DE FUERZAS IGUALES



Cuando este tipo de cemento no ha estado disponible en la obra, se ha recurrido al empleo de una mezcla de cemento y cenizas volantes en la planta de fabricación de cemento. En estas circunstancias, hay que extremar las precauciones en el control de la ceniza volante ya que pueden variar sus características físicas y químicas en el transcurso de la construcción y sobre todo hay que vigilar el que se mantengan las proporciones en la mezcla final.

En cuanto a las dosificaciones, cabría hacer una clasificación geográfica, con cementos ricos en Europa y cementos pobres en América. El sueco Hellstron se escandaliza -4o. ICOLD, New Delhi 1951- con las dosificaciones entre 110 y 140 Kg/m<sup>3</sup> preconizadas por los Americanos; algo parecido le sucede al francés Hupner, aunque en el siguiente Congreso -5o. ICOLD, París 1955- su colega Orth considere normales las dosificaciones de 120 kg/m<sup>3</sup>.

No obstante la opinión del americano Cooper -2o. ICOLD, New York 1936- veinte años más tarde se acusa una tendencia declarada a cementos diferentes para el cuerpo de presa y para los paramentos; así, en las presas de HOUNGRY HORSE, HOOVER, GRANI COULEE, SHASTA,

FRIANT, del Bureau of Reclamation, las dosificaciones son:

Cuerpo de presa: 111 kg/m<sup>3</sup> de cemento y 56 kg/m<sup>3</sup> de cenizas volantes.

Paramento: 167 kg/m<sup>3</sup> y 56 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

En la presa de CANYON FERRY, la dosificación es aún más baja: 106 kg/m<sup>3</sup> de portland y 33 kg/m<sup>3</sup> de cenizas volantes.

El Army Corps en la presa de PINE FLAT no excede los 120 kg/m<sup>3</sup> de conglomerante en el cuerpo de la presa, mientras en 1946 se introduce el empleo de cenizas volantes para sustituir parcialmente el cemento portland. En 1958 el Bureau of Reclamation enuncia cinco ventajas en la sustitución parcial del cemento portland por material puzolánico, cenizas volantes, sílico-aluminosas entre otros:

- . Resistencias algo menores a 28 días e iguales o mayores a 90 días
- . Menor desprendimiento de calor - 60 a 50%
- . Mayor impermeabilidad

- . Mayor expansividad.
- . Mayor facilidad de puesta en obra

Frente a estas ventajas, existe un inconveniente: Menor resistencia a la helada, esta desventaja puede obviarse con el empleo de adiciones aireantes: Aire ocluido.

En el 8o. ICOLD, Edimburgo 1964, el tema de los cementos de bajo calor de hidratación se plantea de forma preferente; el experto ruso Stolnikov sintetiza el problema considerando el exceso de cemento como deletéreo; la sustitución de parte del portland por cenizas volantes se constituye en el motivo a discutir del congreso; merece la pena destacar la comprobación Americana sobre un gran número de concretos, acerca del efecto positivo de sustituir un 25 a un 35% de portland por puzolana (cenizas volantes en muchos casos) con aumento de resistencia a edades próximas a los seis meses, alcanzando valores del 78 al 90% de la resistencia a los veinte años.

La sustitución por material puzolánico incluye muy diversos materiales: Ya en 1951 -4o. ICOLD, New Delhi- se expone la presa francesa de BORT con 30% de portland, 68.5% de escorias granuladas y 1.5% de yeso. Los materiales más abundantes son pues escorias de alto



horno o de central térmica, trass (tierra puzolánica) en Italia y Austria, cenizas volantes, surkhi en la India, esquistos calcinados, etc... Someramente se hará referencia al surkhi indio, arcilla calcinada con carácter puzolánico; ya de antiguo aparece en presas de mampostería, utilizándose en lugar de portland, cal de kankar, en proporción de uno de cal por otros dos de surkhi; posteriormente se emplea el citado surkhi para sustituir 20 ó 30% de cemento portland; así expone Rao, en la presa de METTUR, una dosificación en el cuerpo de la presa de 107 kg/m<sup>3</sup> de cemento y 21 kg/m<sup>3</sup> de surkhi; las presas de BHAKRA y NAGARJUNASAGAR responden a una concepción análoga.

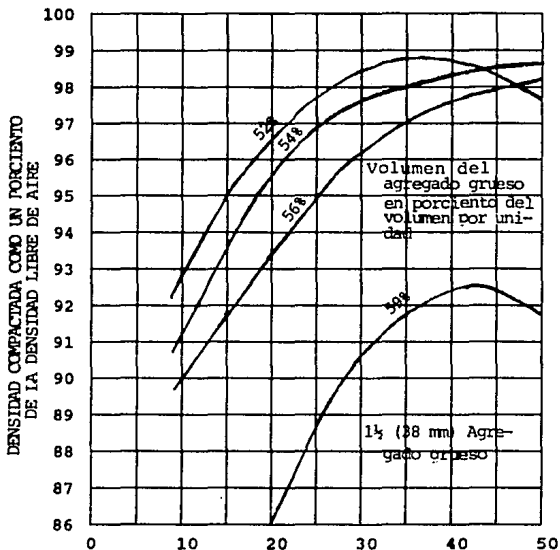
Electricité de France habla de sustituciones del 20% del portland por cenizas volantes, para fijar la cal libre del cemento; la presa alemana de MOOSER, con dosificación de 125 kg/m<sup>3</sup>, utiliza un cemento compuesto por 82% de clinker, 15% de trass renano y 3% de yeso. En el otro extremo, Rhodes, del Army Corps, expone un concreto compuesto por 56 kg/m<sup>3</sup> de portland y 60 kg/m<sup>3</sup> de cenizas volantes.

Se espera que este breve "collage" sobre los conglomerantes en concreto de presas, tomado de diferentes congresos internacionales del ramo, sirva para acreditar

que los nuevos concretos magros, de baja dosificación, concretos pobres, incluso miseros como humorísticamente se han llegado a denominar no son patrimonio de los años ochenta, para poner en obra por medios continuos y compactados por tongadas, sino que gozan de amplia difusión geográfica e histórica y, por ende, de cumplida experiencia.

Cabe destacar que no se ha expuesto una dosificación tipo en concretos en masa para grandes presas, sino únicamente aquellas más afines a las que la nueva tecnología de "Rollcrete" viene imponiendo. Se ha enunciado la trascendencia de los cementos de bajo calor de hidratación, sin entrar en una caracterización que se hará en el capítulo de refrigeración de los concretos. Otro tema que se ha obviado es el de los finos, inertes o activos, frontera con los conglomerantes que no resulta siempre fácil de establecer; al referirnos a las arenas y a la mineralogía de los finos, veremos algunas situaciones de reacciones sólidos o topoquímicas que dan origen a apreciables aumentos de resistencia, con independencia de la mayor capacidad. Finalmente, los aditivos productores de aire ocluido contribuyen a la compacidad, resistencia y durabilidad de los concretos; de ello se hablará en el siguiente subcapítulo.

**FIGURA 2.4.- EFECTO DEL VOLUMEN DEL AGREGADO GRUESO EN LA COMPACTACION**



Tiempo de vibración en segundos  
 Mezcla de mortero (Libre de aire)  
 Arena = 62.8% por volumen  
 Agua = 16.5% por volumen  
 Ceniza volante = 20.7% por volumen  
 Cemento = 0

FIGURA 2.5 VOLUMEN ABSOLUTO DE AGREGADOS GRUESOS  
POR UNIDAD DE VOLUMEN DE CONCRETO CV

Agregado de Tamaño Máximo, plgs.	6	4½	3	1½	¾	⅜
Agregado de Tamaño Máximo, mms.	152	114	76	38	19	9.5
Volumen absoluto, por ciento del volumen por unidad de concreto	63-64	61-63	57-61	52-56	46-52	42-48

FIGURA 2.6 REQUERIMIENTOS APROXIMADOS DE MEZCLADO DE AGUA  
PARA MEZCLAS DE CCR SIN PUZOLANAS-AGREGADOS  
MANUFACTURADOS

Tipo de mezcla	Tamaño Máximo del Agregado Plg. (mm)					
	¾ (9.5)	¾ (19)	1½ (38)	3 (76)	4½ (114)	6 (15)
Masa interior	Contenido de agua por unidad, lb/yd. cu (Kg/m cu)					
	195 (116)	180 (107)	165 (98)	145 (86)	135 (80)	130 (77)
Mezcla Colocada	215 (128)	200 (119)	185 (110)	- -	- -	- -

TABLA 1. PROPORCIONAMIENTO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO UTILIZADAS DURANTE LA PRUEBA FINAL DE CIRIA

	3.8 cm.	1.9 cm.	0.95 cm	Arena	Cemento	Ceniza Volante	Agua	Total
Concreto interno normal								
Peso (Kg/m <sup>3</sup> )	689	409	355	705	95	176	95	2524
Volumen (fracción del total)	0.2542	0.1503	0.1111	0.2629	0.0300	0.0764	0.0949	1.0000
	a=0.536		p=0.434		Cf=0.718		Cv=0.89	
Pasta de concreto mejorada								
Peso (Kg/m <sup>3</sup> )	678	414	355	654	94	225	95	2515
Volumen (fracción del total)	0.2500	0.1523	0.1316	0.2440	0.0298	0.0977	0.0947	1.0000
	a=0.534		p=0.477		Cf=0.766		Cv=0.74	
Concreto del paramento								
Peso (kg/m <sup>3</sup> )	-	661	339	954	203	141	149	2447
Volumen (fracción del total)	-	0.2429	0.1257	0.3561	0.0644	0.0615	0.1494	1.0000
	a=0.369		p=0.436		Cf=0.489		Cv=1.19	

## Aditivos

Las ventajas de usar aditivos que realzan la trabajabilidad y retardan la solidificación para mantener vivas las capas compactadas de concreto y prevenir juntas frías, particularmente durante climas calientes, están bien establecidas. Tanto aditivos aire ocluido, aditivos que reducen el agua y aditivos retardadores han sido usados rutinariamente en proporciones de dosis normales en la mayoría de las aplicaciones del CCR y en colocaciones de prueba hechas a la fecha. Pruebas de laboratorio han indicado que estos aditivos son efectivos en reducir el tiempo requerido de vibración para consolidación total del CCR. Sin embargo, la efectividad de aditivos aire ocluido para durabilidad del CCR durante congelación-descongelación, y los porcentajes apropiados de las dosis de aditivos para usarse en CCR son desconocidos hasta ahora. Programas de pruebas futuros para establecer estos parámetros son necesarios.

Fundamentalmente se emplean dos tipos de aditivos que mejoran las cualidades generales de la mezcla: Los reductores de agua, que posibilitan la obtención de las densidades requeridas con menores contenidos de agua. Lo cual se traduce en un aumento de las resistencias y en una disminución de la retracción y los retardadores de fraguado, que garantizan un periodo amplio de

trabajabilidad de la mezcla ya que si las operaciones de compactación se realizan cuando el fraguado ya se ha iniciado, la resistencia del material puede verse seriamente afectada.

La técnica del aire ocluido se incorpora a los concretos de grandes presas allá por el año 1938, las ventajas son bien reconocidas: Mejora la resistencia a la helada y mejora la reología de los concretos en sus primeras edades. Los aditivos a base de derivados de los ácidos lignosulfónicos constituyen el grupo de aditivos aireantes; existen además otros tipos: Plastificantes, modificadores del fraguado, etc..., todos ellos referidos a la masa del concreto. Aquí se tratará casi exclusivamente de los aditivos aireantes, coadyuvantes a la fluidificación de los concretos jóvenes, efecto que ya se produce por el mero empleo de cenizas volantes. Se trata de algo bien conocido a pie de obra y tanto más ostensible cuanto más generalizada la sustitución parcial de portland por cenizas volantes.

Pese a ser un producto conocido de antaño y empleado con cierta generalidad, existe en determinados países y entre algunos expertos, cierta reluctancia a su empleo. Exclusivamente a título informativo, se darán algunos tipos de empleo:

- En el concreto de la presa alemana de OKER se utilizan aireantes con el doble fin de resistencia al hielo y facilidad de hacer penetrar las grandes piedras.
- En la presa alemana de MOOSER se consigue un 1.5 a un 2.3% de aire ocluido mediante el empleo de aireantes en proporción de 3.4 a 5%.
- Los Indúes, con la experiencia de la presa de RIHAND, afirman que el aire ocluido permite bajar el agua de amasado en un 15% y el volumen de arenas en un 1 a un 4%.
- Los Americanos del Bureau of Reclamation, con la experiencia obtenida en las presas de ELEPHANT BUTTE, FRIANT, DAVIS, HUNGRY HORSE, CANYON FERRY, GLEN CANYON, YELLOWTAIL Y CACHMANN, concluyen que el óptimo de aire ocluido oscila entre el 3 y el 6%, en función del tamaño máximo del agregado: Con 3/4" el 6% de aire ocluido; con 6" el 3%.
- Los constructores de la presa india de HIRAKUD relacionan el aire ocluido con las arenas y no con el agregado grueso.



- Los Noruegos consideran beneficioso hasta un 3 ó un 4% de aire ocluido.
- Los Italianos afirman que el aire ocluido puede rebajar el contenido de arena de un concreto desde el 24 ó 25% del total de árido hasta un 19 ó 20%, disminuyendo la cantidad de conglomerante en un 10 u 11%.
- El ruso Stolnikov concluye que los aditivos aireantes mejoran la resistencia al hielo, la impermeabilidad y la manejabilidad de los concretos y, por consiguiente la durabilidad; de forma aproximada, un 3 a un 4% de aire ocluido reduce la cantidad de agua para igual docilidad.
- La empresa Española CABI, S.A. en su publicación "Recopilación : de Ponencias" a la KATHARINE & BRIANT MATHER INTERNATIONAL CONFERENCE, celebrada en Georgia recientemente concluye, en lo que se refiere al aire ocluido, lo siguiente:

"La resistencia al hielo-deshielo depende de la cantidad de aire ocluido en el concreto. Valores del aire ocluido superiores al 5-6% garantizan una resistencia al hielo-deshielo

suficiente. Los concretos elaborados con cenizas volantes, a igualdad de aire ocluido en el concreto, tienen una resistencia al hielo-deshielo equivalente a los concretos de cemento portland."

No se puede concluir este punto de los aditivos sin hacer referencia al humo de sílice, material poco económico y no abundante; se ha empleado en la presa Noruega de FORREVASS -150. ICOLD, Lausana, 1985-; se trata de concretos de 215 kg/m<sup>3</sup> de conglomerante en paramentos y 160 kg/m<sup>3</sup> en cuerpo de presa; el conglomerante consta de un 70% de portland y un 30% de cenizas volantes con adición de un 7% de sílice. La composición de este humo de sílice es así:

Si O ..... 85-95%

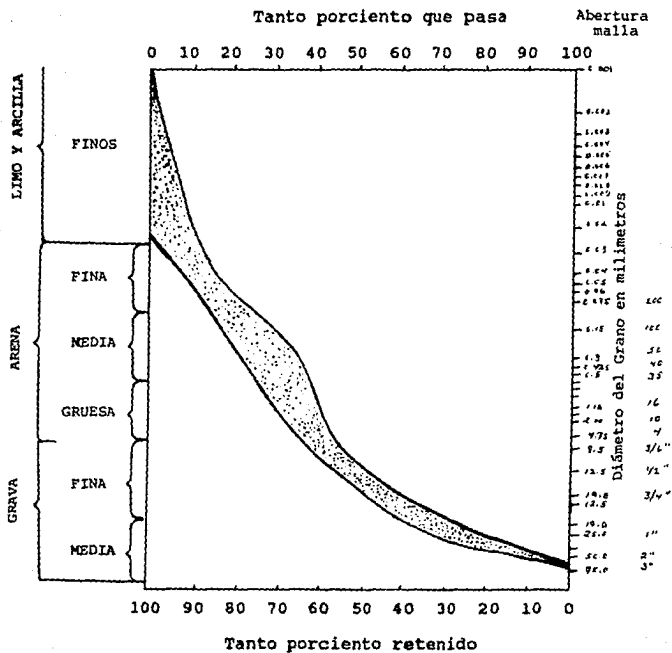
Al O , Fe O , arcillas y álcalis

En cuanto al empleo de aditivos aireantes o de otro tipo también tenso-activo, en concretos compactados, la experiencia es lógicamente reducida en España. En otros países consta su empleo concretamente en la presa Sudafricana de BRAAM RAUBENHEIMER.

## Cenizas volantes Vs. CCR pobre

Algunos Ingenieros han tratado de catalogar los proyectos que no son de CCR en dos categorías solamente: Mezclas húmedas de "ceniza volante elevada" (elevado contenido aglutinante) y mezclas "pobres secas". Esto funcionó durante el temprano desarrollo de CCR cuando Willow Creek estaba en etapa de construcción con una mezcla seca pobre y en la Presa Upper Stillwater se pensaba emplear una mezcla con alto contenido de ceniza volante. En trabajos subsecuentes, las mezclas pobres tendían a ser "secas" en tanto que las mezclas con elevado contenido de cenizas volantes tendían a ser "húmedas".

FIGURA 2.2 ENVOLVENTE DE CURVA GRANULOMETRICA DE LA PRESA WILLOW CREEK



Estas dos categorías describen ambos extremos del espectro del CCR. De hecho, ésto fue parte de la base cooperativa bajo la que el Corps of Engineers y el Bureau of Reclamation concibieron inicialmente las presas de Willow Creek y Upper Stillwater. Cada una de las dependencias demostró un extremo del gran campo de posibilidades para el diseño de mezcla y para el diseño estructural que pueden lograrse con el CCR. Sin embargo, es muy posible tener mezclas pobres húmedas sin cenizas volantes, así como tener mezclas secas con cenizas volantes. Ninguna mezcla o sección de diseño en particular es óptima para todas las condiciones en todas las ubicaciones de los proyectos.

Todavía no existía alguna presa importante terminada, construida con el enfoque "húmedo" o con "elevado contenido aglutinante", aunque algunos proyectos terminados han empleado estas mezclas para parte de la construcción. Las presas terminadas han empleado principalmente mezclas que eran muy "secas" o inclinadas hacia el lado seco en la variedad de humedades posibles en el CCR. La mayoría de estas mezclas han dependido de finos naturales (sedimentos o polvo de roca) como relleno para lo que, de otro modo, sería una deficiencia de la pasta normal (cemento, puzolana y agua).

FIGURA 2.3 COEFICIENTES DE VARIACION PARA PROYECTOS MASIVOS DE CONCRETO USANDO CCR

	WILLOW CREEK	COPPERFIELD	GALESVILLE	MONKSVILLE	UPPER STILLWATER	MIDDLE FORK
Cemento + Ceniza Volante (lb/cu yd)	80-12	115-50	105+00	105+00	134+291	112+00
Cemento + Ceniza Volante (Kg/cu m)	47-19	80-10	53+51	62+00	80+173	66+00
Muestras Frescas						
Precio Unitario de Mortero	2	-	2	1	-	-
Libre de Aire						
Peso Unitario de Toda la Mezcla	1	-	1	1	-	-
Agregado Grueso	8	-	8	14	-	-
Contenido de Cemento	21	-	16	13	-	-
Contenido de Agua	23	-	12			
Coefficiente Promedio de Variación	11.0		8.0	8.2	-	-
Cilindros						
3 días	26	-	-	22	-	-
7 días	29	-	28	28	19	23
14 días	25	-	28	21	-	27
21 días	28	30	24	24	21	33
56 días	-	-	20	21	-	-
90 días	29	25	20 (120 días)	21	19	16
180 días	27	-	-	26	-	-
365 días	31	18	31	-	-	-
Coefficiente Promedio de Variación	28	28	22	23	-	-
Proporciones						
Ccef. V (cilindro/cofv. Muestra fresca)	2.55	-	2.75	2.80	-	-

\* Basado en datos disponibles hasta abril de 1987 para colados de 1985 y 1986

Aunque no existen datos del comportamiento de grandes presas en operación en las que se emplearon mezclas húmedas "(contenido aglutinante) elevado contenido de cenizas volantes", ésto no debe significar que debe evitarse este tipo de presa de CCR. Por el contrario, las presas construidas con este enfoque normalmente es de esperarse que resulten en concreto de calidad más elevada, aunque a costo más elevado. Al menos una presa importante (Upper Stillwater) se está construyendo con este enfoque. Elk Creek es un proyecto importante que se está construyendo con el enfoque de mezclas más húmedas pero sin elevado contenido aglutinante. De manera similar, el hecho de que algunos proyectos nuevos de CCR están considerando el tipo "húmedo" de mezcla con elevado contenido aglutinante elevado no es señal de que el enfoque de mezcla "pobre seca" haya sido insatisfactoria. Se hace hincapié que cada proyecto debe ser evaluado individualmente para determinar cuál es el mejor enfoque global: Húmedo, seco, pobre, de elevado contenido de ceniza volante, de baja resistencia, de resistencia elevada o alguna combinación.

### III - MEZCLADO

El CCR se puede mezclar en varias formas, dependiendo del equipo disponible. Se puede revolver por peso como en el caso del concreto convencional y se puede mezclar en una revolvedora estándar. Se puede revolver volumétricamente y mezclar por mezclado continuo en una malaxadora similar a los sistemas que se usan para concreto asfáltico. O se puede tomar directamente de la fuente de grava sin controlar su carga y se puede mezclar con cemento y agua haciendo que los tres ingredientes caigan verticalmente a través de una serie de deflectores. (Tarbela, Pakistán).

Las técnicas de procesamiento, carga y mezclado de agregados varían considerablemente. Depende, principalmente, de la calidad de los agregados disponibles y de la calidad requerida por el producto final. El diseñador debe saber que se puede obtener un material macizo de buena calidad sin los controles restrictivos del concreto convencional.

#### Plantas de mezclado continuo

Los requisitos de mezcla para el CCR pueden ser tan variados como las posibilidades de aplicación. Si la sección transversa de la estructura es algo entre la



dimensión de un relleno de piedra y una sección de gravedad de concreto, con requisitos de fuerza en algún punto entre relleno de piedra y concreto, entonces puede ser aceptable una operación de mezclado relativamente simple que puede manejar grandes volúmenes. En la presa TARBELA el concreto fue continuamente mezclado usando una serie de escaleras de piedra estratégicamente colocadas para mezclar los ingredientes. La planta tuvo un rendimiento de producción máximo de aproximadamente 1000 yd.cu. (750 m. cu.) por hora. Si la estructura es diseñada como una típica estructura de concreto que requiere concreto de calidad, el equipo de mezclado probablemente deba cumplir las normas para concreto convencional.

En la fabricación con plantas continuas de concreto, se hace necesario generalmente un tiempo de amasado superior al requerido para los concretos convencionales. Deben tomarse precauciones especiales en relación a las posibles variaciones de la humedad de los agregados, dados los bajos requerimientos de agua (80-110 lbs.) de la mezcla pudiendo llevar a posibles "colegoneos" en el tajo de extendido.

Las plantas de fabricación continua, se adaptan muy bien a las grandes producciones, debido a la reducción del

tiempo de amasado, siendo además de un coste generalizado menor. Este tipo de planta ha sido la comúnmente empleada en las realizaciones españolas.

#### Mezcladoras de Bachadas

Las mezcladoras convencionales de bachadas han sido usadas en todas las colocaciones a la fecha excepto en tarbela. Estas mezcladoras son capaces de mezclar agregados de tamaño máximo de 3 pg. (76 mm.) y 6 plg. (152 mm.) no tienen problema de mezclar los volúmenes de consistencia no desplomable y de agregados grandes asociados con el CCR, aunque pueda requerir un tiempo más largo para mezclarse que el concreto convencional. El tiempo de mezclado puede ser efectivamente reducido por el sistema de surtido por cinta de los materiales. Para la ejecución del mezclado la variación de densidad debe probablemente ser restringida a límites razonables en especímenes de prueba totalmente compactados de muestras tomadas del primer y último tercio de la bachada al ser descargada.

Las variaciones de la humedad libre en los agregados pueden ser particularmente problemáticas en las bachadas iniciales, por los bajos requisitos de agua de la mezcla. La mayoría de los operadores hacen el error de sobre calcular la humedad libre y proveer muy poca agua

en las primeras mezclas. Esto es particularmente indeseable porque la mayoría de las bachadas iniciales serán usadas para cubrir juntas de construcción y deberían estar hacia el lado mojado para unir adecuadamente. Es mucho mejor empezar con una bachada mojada y reducir el agua en subsecuentes bachadas para lograr la consistencia adecuada. las dificultades de compactación de una bachada mojada pueden ser reducidas o eliminadas extendiéndola en una capa más delgada. El exceso de agua sube en las colocaciones de capas subsecuentes, así eliminando cualquier preocupación por la fuerza de la bachada mojada. Es tan importante que el operador de la planta vea la bachada en la mezcladora para concreto no desplomable como para concreto desplomable. Un operador puede entrenar el ojo al juzgar la consistencia de este concreto tan fácilmente como juzga el desplome. Para el correcto control de la mezcla su problema es completamente al revés del concreto convencional. La tripulación de colocación se quejará de bachadas mojadas en vez de bachadas secas.

#### Mezcladoras Continuas

Las mezcladoras continuas no han sido ampliamente usadas en los Estados Unidos de Norteamérica, pero han sido y están siendo exitosamente usadas en Inglaterra y otros lugares. Son particularmente adaptadas para producciones

de volúmenes grandes, como la colocación mecánica de losas continuas de pavimento. El principio de utilizar el CCR como un sistema de colocación mecanizado para pavimentos sería similar a colocarlo en capas o lifts durante la construcción de una presa. Las ventajas principales de mezcladoras continuas son la eliminación de tiempo de bachar del ciclo de tiempo de construcción y el costo significativamente más bajo de la planta en relación a la capacidad de producción. Estos son factores importantes cuando se consideran los requisitos de producción de proyectos grandes donde el uso de CCR permitiera la colocación de grandes volúmenes de concreto en periodos de tiempo cortos, tal como en el orden de un millón de yd. cu. en tres meses, etc. CCR mezclado continuamente fue usado por el Consejo Nacional de Puertos de Vancouver, B.C. para las losas de base de cuatro grandes áreas de almacenaje y terminal de contención.

#### Mezcladoras de Camión

Mezcladoras del tipo de tambo inclinable que vayan de acuerdo con ASTM C94 parecer ser adecuadas para CCR usando agregados de tamaño máximo de hasta 1 1/2 plg. (38 mm.) basándose en su uso exitoso en pruebas de relleno recientemente construídas. Lo más probable es que sean usadas para operaciones de pavimentación. Lo lento del descargue de un solo camión puede ser contrapesado

proviendo camiones adicionales. Este tipo de camión puede mezclar y descargar concreto convencional con agregados de 1 a 2 pulg. (2.5 a 5 cm.). Sin embargo, para una colocación de CCR suficientemente grande para justificar el uso de agregados de 3 plg. (76 mm.) parecería más económico usar mezcladoras estacionarias.

Los camiones mezcladores de tambo no inclinable convencionales no son recomendables para el CCR ni para mezclar ni transportar por serios problemas de segregación anticipados durante el ciclo de descarga.

Habitualmente se emplean plantas discontinuas de concreto, si bien también se han utilizado en algunas obras plantas continuas.

En este sentido, hay que tener en cuenta que es necesaria una producción aproximada de 250 m<sup>3</sup>/h para la optimización de la capacidad de compactación de un rodillo vibrante pesado.

Una masa de CCR sin juntas, apropiadamente proporcionada, mezclada y colada tendrá impermeabilidad similar a la del concreto masivo convencional. Si las mezclas más secas con bajo contenido de cemento se hacen sin emplear algo como el polvo de roca, sedimentos no plásticos, o ceniza

volante para rellenar los pequeños espacios vacíos, tendrán una mayor permeabilidad.

Cuando las mezclas pobres son más secas responden a los retardadores o a otros aditivos y se secarán más rápidamente. Consecuentemente, usualmente deben ser entregados, extendidos y compactados más rápidamente; comúnmente dentro de 30 minutos a partir de iniciarse el mezclado. Un aspecto crucial del CCR pobre es el mezclado, que incluye, tanto la introducción de las proporciones correctas de cemento, agregado y agua, como su complemento, uniforme y consistente mezclado. Esto se ha logrado más efectivamente con amasadoras continuas de mezclas, especialmente diseñadas, y alimentadores continuos volumétricos o de peso controlado. Reducir al mínimo el número de apilamientos de agregado (preferiblemente a dos) y premezclando la arena y los finos con agregado de menos de 1 pulgada su producción ha sido muy benéfica. Los problemas de mezclado pueden facilitarse aún más empleando grandes apilamientos de agregado que contienen un nivel uniforme de humedad cercano a la humedad necesaria en la mezcla final. Estos pasos le dejan poco qué hacer a la mezcladora excepto mezclar uno o dos agregados con el cemento y una pequeña cantidad de agua adicionada.

#### IV - TRANSPORTE

En general, la mayoría de los equipos de procedimientos empleados para el transporte y extendido de concreto convencional son válidos para este tipo de mezclas. Sin embargo, dada su consistencia, el espectro de posibilidades en el transporte, se amplía (cintas transportadoras, por ejemplo).

Se debe poner especial atención en las posibilidades de segregación durante el transporte y colocación haciéndose necesario a veces la disposición de elementos especiales de descarga en los camiones bañera.

Por todo lo anterior, es importante realizar las estimaciones del coste del transporte en función a la accesibilidad a la zona de extendido para encontrar la solución idónea.

##### Vagonetas

La mayoría del equipo y procedimientos recomendados para la Transportación y Colocación de Mezclas de Concreto Convencionales también son aplicables para transportar y colocar CCR. Sin embargo, la extremadamente limitada fluidez del CCR hace posible el uso de una más amplia variedad de equipo para la transportación y colocación

de este material que el que puede usarse para concreto convencional. Esta característica de no fluidez también hace necesario instituir procesos especiales de manejo para prevenir que ocurra segregación seria, parece haber posibilidades reales y significativas de ahorros en el costo, particularmente en lo que respecta a transportación y colocación de CCR en estructuras grandes.

#### Guías para la Selección de Equipo

El volumen de material por colocarse y el acceso al lugar de colocación generalmente serán los factores que controlen la selección que se usará para transportar el CCR del lugar de mezclado al área de colocación. Frecuentemente, el mismo equipo ejecutara tanto la función de transportar como la de colocar.

Escencialmente hay dos métodos para la transportación del CCR: Por bachada y continuo. Hasta cierto punto, la selección puede ser influenciada por el tipo de equipo utilizado para mezclar. Sin embargo, con el uso de control y accesorios apropiados, tales como holding hoppers, las mezcladoras continuas pueden ser utilizadas con transportación de bachada y mezcladoras de bachadas con equipo de transportación de flujo continuo.



El tipo de equipo de transportación que será usado para mover el CCR de la planta mezcladora al área de colocación será determinado por el agregado de mayor tamaño especificado en la mezcla. La experiencia indica que concreto de TMA de 1 1/2 plg. (38 mm.) puede ser transportado y colocado en unidades de mano no agitables diseñadas para acarrear agregados y mover tierra sin la inconveniente segregación. El TMA de 3 plg. (76 mm.) y concretos más grandes tienen la tendencia distintiva de segregarse cuando es hechado de este tipo de equipo a superficies duras tales como las condiciones que prevalecen cuando se empieza una capa nueva o cuando se coloca en una superficie previamente compactada.

Hasta la fecha, los problemas de segregación que ocurren durante la transportación y colocación de concreto con TMA de 6 plg. (152 mm.) han sido tan severos que su uso con el equipo de diseño actual no parece ser práctico. El uso de Tamaño Máximo del Agregado de 3 plg. (76 mm.) es menos difícil pero también involucra un riesgo significativo de segregación al transportarlo y colocarlo requiriendo restricciones en el tipo de equipo y procedimientos por usarse. El costo de estas restricciones debe evaluarse en la economía total asociada con la selección del TMA a usarse.

### Transportación de Bachada

El equipo de transportación de bachadas es casi siempre alguna clase de envase montado en algún tipo de carretilla o trailer de llantas de hule. Las más comunes son los camiones de dompeo convencionales, ya sea de dompeo por abajo o por atrás, pero en tamaño van desde los carritos motorizados que llevan varios pies cúbicos de la mezcla a la vez, hasta enormes camiones para uso en campo abierto que pueden cargar hasta 38 yd.cu. (29 m.cu.) por ciclo de carga. La selección del tamaño del equipo debe estar basada en la capacidad de colocación requerida, el tiempo del ciclo (tiempo que se usa para un viaje completo por una unidad), y el total del volumen que se va a colocar. Otras consideraciones adicionales son el costo de la unidad de transporte, la accesibilidad del área de colocación, requisitos de esparcimiento, el costo de la preparación, mantenimiento de los caminos para acarrear y los puntos de acceso.

### Equipo no agitable

El equipo no agitable parece ser el más adecuado para la transportación de bachadas del CCR. Este tipo de transporte ha sido altamente desarrollado para la aplicación de agregados, la minería y movimientos de tierra y puede ser fácilmente usado para el CCR con poca o ninguna mo-

dificación. En su estado no-consolidado este concreto reaccionará casi como agregado en este equipo. El cemento es extremadamente adhesivo y tenderá a empalmarse o pegarse en las partes expuestas a él.

Por esta razón, la mayoría de las unidades están diseñadas para descargarse por abajo o por atrás con poco o nada de control del flujo de los materiales al salir de la unidad. Al seleccionar el equipo de transportación debe ser considerado también el costo de lidiar con la segregación resultante.

#### Equipo agitable

Como hemos señalado, el equipo para acarrear bachadas de tambo inclinable diseñado para agitar o mezclar el material durante la transportación generalmente no debe ser usado para el CCR. Por la consistencia del CCR, el equipo que depende de espadas mecánicas u hojas que se mueven a través del concreto probablemente sea insuficientemente potente y estará suceptible a desgaste extremo y fallas mecánicas. Los camiones mezcladores de tambo inclinable probablemente podrán manejar el CCR, pero requieren un tiempo relativamente largo para descargar la carga. Por esta razón se espera que este tipo de camión para concreto ya mezclado esté limitado a

aplicaciones relativamente pequeñas, a pesar de su amplia disponibilidad actual.

#### Cubetas

Las cubetas cargadas en camión de tarima o en vagones de ferrocarril es otro método de transportación de batchadas que se usa regularmente para concreto convencional. Las cubetas se llenan en la planta de batchadas y se lanzan con algún tipo de grúa cerca del área de colocación que completará la fase de transportación y detendrá la cubeta para la colocación. El uso de grúas para transportar las cubetas de la unidad de transporte al área de colocación hace posible el uso de equipos de ruta fija como los vagones de ferrocarril para acarrear las cubetas.

#### Transportación continua

La transportación continua de CCR parece más aplicable al uso de cintas transportadoras. El contenido extremadamente bajo de agua y alto contenido de agregados gruesos de este concreto no proveen la fluidez adecuada para facilitar bombear la mezcla por tubería.

#### Camiones de Volteo

El CCR se puede transportar en camiones de volteo inferior, como los que comúnmente se usan para colocar grava y terracería. La capacidad de estos camiones es

de 10 a 30 yardas cúbicas. Se han usado con éxito los camiones de volteo trasero, pero requieren un control más cuidadoso debido a la segregación potencial de los materiales cuando se vacían.

## V - COLOCACION

El desarrollo completo del potencial económico del CCR también depende del mantenimiento de existencias adecuadas de la materia prima para sostener las altas proporciones del mezclado y colocación continuos.

El CCR debe ser colocado en capas o lifts suficientemente delgadas para permitir compactación completa por el rodillo vibratorio o plancha compactadora. A la fecha pruebas de campo han indicado que la colocación de capas óptima va de 8 a 12 plg. (20 a 30 cm.). Esto contrasta con las capas normales de concreto en masa convencional de 18 a 24 plg. (46 a 60 cm.). Considerando la proporción mucho más alta de colocación lograda con el CCR en espesores de capas de un tercio a la mitad de los del concreto antes de la compactación es una operación importante en el proceso de producción y debe ser eficiente para mantener paso con las capacidades de compactación.

Varias piezas de equipo de esparcimiento pueden ser necesarias para mantenerse al paso de un rodillo vibratorio grande (10 ton. o más).

### Colocación de bachada

El equipo que deposita bachadas en montones de concreto debe ser suplementado con equipo de tumba y esparcimiento de los montones en capas delgadas de 8 a 12 plg. (20 a 30 cm.) de grosor al mismo ritmo al que se transporte y compacte el concreto. Los esparcidos del tipo bulldozer y niveladoras de caminos parecen ser los más prácticos. Equipo con llantas de hule es preferible porque los materiales del concreto no tienen la tendencia de adherirse en las llantas como lo hace en los rieles, rodillos y sprokets y equipo del tipo que se arrastra. El esparcimiento se facilita por colocación constante y simétrica. El depósito del concreto en configuración de Windrow es deseable para el esparcimiento, ya que ésta consiste en hacer los depósitos seguidos en hileras.

El equipo para acarrear con llantas de hule puede operar en superficies recién compactadas sin ningún efecto adverso en el concreto. Sin embargo, se deben tomar las medidas necesarias para no permitir que el equipo de carga no deposite lodo o tierra, pues tendría efectos adversos en la calidad del concreto y podría causar problemas en la integridad de las juntas y consecuentemente provocar goteo en estructuras sujetas a presión hidrostática.

### Colocación continua

Quando se coloca concreto con bandas o cintas transportadoras en una operación continua, la mejor regla es tener tan poco equipo como sea posible en el área de colocación y minimizar tanto como sea posible el movimiento del equipo, mientras se coloca el concreto. Para lograr ésto, el acto de tender el sistema de bandas transportadoras debe planearse bien anticipadamente para que cada banda tenga su lugar sin detener la operación del rodillo.

### Combinaciones de equipo

No sólo es posible, sino práctico, cambiar transportación por bachadas y continua y equipo. Donde las condiciones del trabajo resulten con la utilización de las ventajas adherentes de ambos sistemas.

### De bachada a banda

Las largas distancias de la planta mezcladora al área de colocación pueden impedir el uso de bandas transportadoras para toda la distancia, pero la habilidad de las bandas de llegar hasta el área de colocación a través de obstáculos puede determinar el uso de equipo de acarreo por bandas y bachadas.



### Equipo auxiliar

El equipo diseñado principalmente para colocación de otros materiales puede ser usado tal como está o bien modificado para esparcir el CCR. Parece que esta área debe ser explorada al presentarse las oportunidades; por ejemplo, aunque los experimentos hechos por el Estado de California indican que pruebas en mezclas secas forman capas para pavimentos no se tuvo éxito debido a que no se logró la fluidez requerida, el equipo para formar capas puede ser usado, con algunas modificaciones, para desparramar concreto asfáltico o aparatos mecánicos, tales como el "desparramador jersey" que maneja sólo agregados; Además, pueden ser adaptables para desparramar CCR en capas delgadas para una compactación eficiente.

### Capas Horizontales

El CCR debe extenderse en capas con un espesor adecuado para evitar la segregación y permitir la acción del equipo de compactación. Habitualmente este espesor suele estar comprendido entre 20 y 30 cm. si bien en Japón, se han compactado varias capas con un espesor total de 100 cm. situadas en la parte superior del cuerpo de la presa. La operación de extendido no debe afectar al proceso inmediato posterior de compactación y en general al ritmo de producción. Normalmente, se emplean bulldozers e

incluso motoniveladoras para el extendido final del material. En este sentido, los equipos sobre neumáticos se presentan más idóneos frente a los de cadenas.

En el caso del empleo de cintas transportadoras es conveniente reducir al mínimo el equipo situado en el área de extendido.

A menudo es ventajoso el utilizar ambos métodos de extendido (continuo o discontinuo), dependiendo de las características singulares del área de trabajo.

#### Juntas Horizontales

Las juntas horizontales entre tongadas pueden haber sido previstas dentro del plan de obra o tratarse de una junta fría (junta de construcción) debido a que ya se haya producido un comienzo del fraguado en la capa subyacente.

En el primer caso, dispondremos de un tiempo máximo entre dos tongadas sucesivas, en el que sólomente será necesario mantener limpia y húmeda la superficie de la junta a la espera de la siguiente tongada. Este tiempo dependerá de la temperatura y humedad ambiente, el tipo de conglomerante, así como del empleo o no de un retardador de fraguado.

Si la superficie se ha contaminado de lodo, barro, polvo, etc. será necesaria la limpieza, mediante el uso de barredoras con bomba de vacío.

Cabe destacar el uso de un "mortero de retoma" que a veces se utiliza para asegurar la buena unión entre capas y que se sitúa en toda la superficie de la junta o bien en las inmediaciones de los paramentos de aguas arriba.

Si la superficie ya ha fraguado y se encuentra seca, entonces debe ser limpiada con chorro de arena u otros métodos aceptables empleados habitualmente en la construcción de presas con concreto en masa, utilizando además el mortero de retoma mencionado anteriormente.

#### Juntas transversales de contracción

Para su construcción, se emplean planchas de poliestireno expandido como iniciadores de fisura que se colocan vertical y perpendicularmente en las inmediaciones de los paramentos de la presa, situándose así mismo, una junta de goma para impermeabilización. El esparcimiento entre estas juntas, dependerá por un lado, de las condiciones de la cimentación y por otro, de los cambios de volumen previstos, si bien éstos pueden reducirse mediante el colado a temperaturas bajas y el enfriamiento del con-

creto. Es importante destacar, que una adecuada secuencia en la colocación de las capas de CCR puede ser beneficiosa para prevenir fisuraciones.

En Japón, este tipo de juntas se realiza en fresco, mediante una cuchilla vibrante que actúa sobre el concreto previamente extendido y antes de su compactación.

En algunas realizaciones, estas juntas son inexistentes.

#### Métodos de Construcción de los Paramentos

##### Uso de encofrados convencionales

En el empleo de este método se deben tomar en cuenta los grandes rendimientos obtenidos con el CCR. Por ello, deben hacerse consideraciones suplementarias en lo que respecta a la elevación y situación de estos cimbrados. Es importante considerar que en los paramentos inclinados dichos cimbrados perturbarían la acción de los compactadores. Por lo tanto, para mejorar la impermeabilidad, se coloca una hilada de concreto convencional a lo largo del paramento, previo al extendido inmediato del CCR, realizándose posteriormente la unión de ambos concretos mediante vibración interna.

### Uso de pequeñas máquinas de cimbra deslizante

Este método resulta muy económico cuando la superficie de los paramentos es importante. Estas pequeñas máquinas (bordilladoras) tienen un avance de 5 m/minuto y deslizan elementos de 60 cm. de altura con una gran precisión entre los que se realiza el extendido del CCR. Permiten además el empleo de aire ocluido en el concreto para una mayor durabilidad del paramento frente a las heladas.

### Uso de paneles prefabricados

Estos paneles prefabricados son de concreto de buena calidad y llevan soportes especiales para su colocación. En los paramentos inclinados, presentan el mismo inconveniente que el primer método e inicialmente se dispusieron como piel de protección de alta durabilidad sobre el CCR.

### Fabricación en Puesta en Obra

En el 11o. ICOLD celebrado en Madrid en 1973, se discute la Q.43, construcción más rápida y más económica de presas de concreto; anteriormente, en la Conferencia ASILOMAR celebrada en California, en 1972, el Ingeniero del Army Corps, Philleo plantea cinco cuestiones trascendentes:

¿Es necesario generar grandes cantidades de calor durante la hidratación del concreto en masa?

¿Puede encontrarse un concreto resistente a la fisuración?

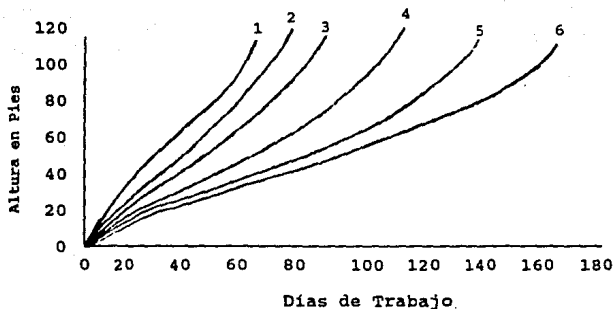
¿Es posible manejar el concreto o manipular el proceso constructivo de forma que pueda eliminarse la costosa limpieza de juntas de construcción?

¿Pueden adaptarse los métodos de compactación de suelos eminentemente económicos, a la construcción de concreto en masa?

¿Esta justificado el elevado coste del curado húmedo del concreto?

Se trata de cinco temas que, desde 1970, van solucionándose por diversos medios, buscando una economía de tiempo y dinero. El coste progresivo y creciente de las presas de concreto se venía tratando de contrapesar mediante simplificación en el proyecto, simplificación en la construcción e introducción de nuevos materiales.

FIGURA 5.1 COMPARACION DE LA PRODUCCION CONTRA DIAS DE TRABAJO DE COLOCACION



PRODUCCION CONTRA DIAS DE TRABAJO DE COLOCACION

- 1 Promedio 300 yd<sup>3</sup>/hr (2400 yd<sup>3</sup>/día).
- 2 Promedio 250 yd<sup>3</sup>/hr (2000 yd<sup>3</sup>/día).
- 3 Promedio 200 yd<sup>3</sup>/hr (1600 yd<sup>3</sup>/día).
- 4 Promedio 150 yd<sup>3</sup>/hr (1200 yd<sup>3</sup>/día).
- 5 Promedio 120 yd<sup>3</sup>/hr (960 yd<sup>3</sup>/día).
- 6 Promedio 100 yd<sup>3</sup>/hr (800 yd<sup>3</sup>/día).

De esta forma se pasó de juntas longitudinales a transversales con bloques de 300 m<sup>2</sup> de superficie y espesores de tongadas entre 1.50 y 2.30 metros a la situación que ofrece ahora el rolcrete de superficies que exceden los 2,000 m<sup>2</sup> -bloques de 32 x 60, 32 x 75 y 18 x 125 en la presa rusa de TOKTOGOUL (1978) en tongadas que oscielan entre 30 y 75 cm-. En la presa de TOKTOGOUL se coló en tongadas de 50 cm. en Verano y de 75 cm. en Invierno, limpiándose cada junta horizontal y refrigerando superficialmente con agua, el paso siguiente podríamos verlo en la técnica actual de colado continuo, extendido por tongadas de 35 cm. de espesor medio, compactando y extendiendo encima una nueva tongada, sin tratamiento superficial previo hasta que se produce una parada superior a doce horas; realmente se exige una madurez mínima al concreto, por encima de la cual, es preciso tratar la junta.

El tratamiento normal de juntas frías consiste, tanto en concretos convencionales como en concretos compactados, en la limpieza con chorro de aire y agua, ayudado o no con escobas mecánicas; lo anterior se completa con extendido de un mortero de "retoma" antes de extender la tongada siguiente.



El aspecto más notable que se persigue con este tratamiento es la impermeabilidad, tanto o más que la condición monolítica, por lo que destacamos únicamente dos aspectos sobre los que no hay acuerdos entre expertos:

1. Incorporación de cenizas volantes. Puede hacerse de tres formas diferentes:

En cementería

En concretera por vía seca

En concretera en forma de papilla

Tratando de dar alguna orientación, en Estados Unidos de Norteamérica y la Unión Soviética se tiende a incorporar las cenizas volantes en la propia torre de concreto, de forma análoga a como se hace con el cemento; en otros países se propugna la incorporación en fábrica, por razones de calidad de mezcla. En España se utilizan los dos medios, no el de la vía húmeda; las ventajas para la mezcla en obra son una mayor agilidad para modificar proporciones y menor precio.

2. Fabricación del concreto. Ya sea en mezcladoras continuas, o bien en concreteras de diverso tipo,

con tiempos de mezclado entre 45 y 120 segundos, es como los concretos convencionales se mezclan, casi siempre, y por el segundo método. Los concretos compactados, con colado continuo mediante cintas o con camión, se preparan por uno u otro medio, bien que los tiempos de amasado sean muy diferentes -2 ó 3 segundos a 60 segundos-. El hormigonado continuo con torre convencional requiere una producción elevada para suplir la fabricación discontinua y permitir una puesta en obra continua. La calidad es, en principio muy superior.

Probablemente las juntas entre las capas necesitan una atención especial, dependiendo del grado de hidratación entre las capas contiguas y del tamaño máximo de los agregados. Se recomienda que si la hidratación no ha producido un fraguado inicial rígido en la capa previamente colocada, las colocaciones posteriores no requieren ningún tratamiento especial. Si transcurre un tiempo prolongado entre la colocación de las capas sucesivas, digamos de 8 a 24 horas, puede necesitarse una capa de agregados de 1/2 ó 3/4 pulgs. como máximo antes de poner las mezclas de mayor tamaño. Un procedimiento alterno consistiría en escarificar la

superficie. Se deben hacer pruebas de campo a escala completa para determinar las técnicas necesarias para obtener un producto con la calidad requerida para la mezcla dada y el equipo disponible.

## VI - COMPACTACION

### Colocación y Compactación

Después de dispersar el material, se tiene que consolidar o compactar en una masa apretada que tenga un mínimo de vacíos. Con el concreto convencional, ésto se logra con vibración interna la cual es laboriosa, tardada, cara y que requiere de supervisión estrecha, así como control de calidad.

En el caso del CCR la consolidación se hace mecánicamente utilizando equipo de rolado vibratorio. Esto aumenta la producción, reduce la mano de obra requerida y facilita el control de calidad. En las áreas estrechas, por ejemplo, junto a las cimbras, el tamaño del equipo estará limitado sólo por el espacio disponible para la maquinaria. TVA reporta que se ha tenido éxito al colocar y compactar el CCR en áreas confinadas y contra cimbras en condiciones de campo. Se puede usar el mismo tipo de equipo para compactar la tierra contra los muros de retención que para el CCR en estas situaciones. El esfuerzo de compactación requerido es una función de la profundidad y nivelación de las capas, pero básicamente requiere un trabajo semejante al que se necesita para terracerías selectas. El control de campo implica verificar la densidad cuando ya está colocado, o especi-

ficando un número mínimo de pasadas para diferentes tipos y tamaños de rodillos vibratorios.

### Consistencia

El concreto adecuado para compactarse con rodillos vibratorios difiere significativamente, en apariencia en su estado no consolidado, del concreto normal que tiene un desplome medible. Hay poca evidencia de pasta en la mezcla del CCR hasta que ha sido consolidado. Todas las mezclas granulares de este tipo, probablemente se consoliden totalmente a la máxima densidad adquirible bajo suficiente vibración; Sin embargo, el esfuerzo vibratorio requerido es mucho mayor que el requerido para concreto de desplome medible. Cualquier método de vibración aplicado externamente que consolide totalmente este concreto puede ser usado. El tiempo de consolidación puede ser usado como medida de la consistencia del concreto y de la eficiencia del equipo de compactación. Con respecto a información publicada sobre el tiempo de vibración ideal o práctico para trabajar el CCR, las investigaciones indican que el equipo de vibración aceptable debe ser capaz de consolidar totalmente las mezclas más tiesas en 60 seg., para una variedad amplia de proporciones de mezcla. Por supuesto que mezclas más manejables y menos tiesas se consolidarán totalmente en periodos de vibración más cortos. La

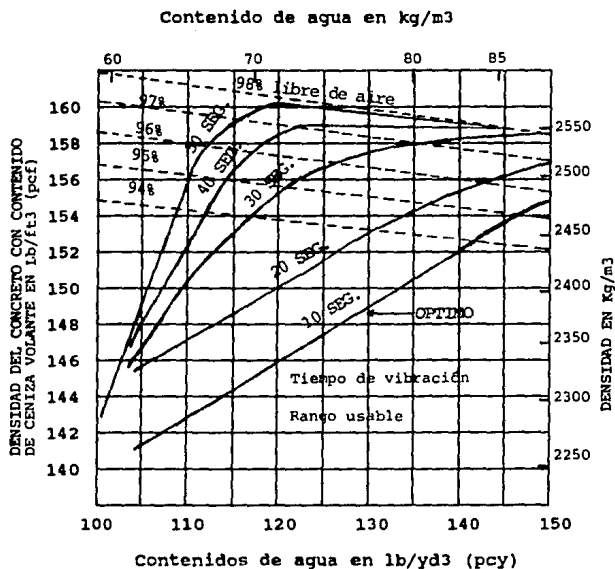
máxima densidad adquirible para una mezcla dada varía con el contenido de agregado y el contenido del mortero usado. Estudios de laboratorio de consolidación de mezclas se muestran en la figura 6.1 y 6.2. En esos estudios una mesa de vibración fue usada para consolidar el concreto en una palangana normal.

La información dada en la figura 6.1 está basada en mezclas reales utilizando ATM (Agregados de Tamaño Máximo) de 3/4 a 4 1/2 pulgadas (19 a 114 mm). La información dada para los tamaños de 3/8 y 6 pulgadas (114 y 152 mm) son difíciles de manejar sin segregación, son incluidos porque tanto la reducción en el desarrollo de calor y la economía pueden dictar las preocupaciones necesarias para su uso.

Para controlar la consistencia durante la colocación puede ser adecuado considerar el material como relleno granular en vez de concreto, y controlar las densidades del concreto vibrado, dentro de la variación dada de máximas para una mezcla dada y el esfuerzo compactivo dado. La figura 6.1 muestra el efecto de variar el contenido de agua y esfuerzo vibratorio en la compactación de mezclas de material de relleno con 14.5 pies cu. (.41 m.cu.) de agregados de tamaño máximo de 1 1/2 plgs. (38 m.m.). Bajo vibración extensa (40 seg. ó

más) las densidades de estas mezclas se elevan rápidamente al incrementar el contenido de agua hasta 115 lb/cu.yd. (68 kg/cu.m.) y después decrece. Las densidades se acercan al 98% de densidades libres de aire con sólo 30 seg. de vibración con contenidos de agua de 145 lb/cu.yd. (86 kg/cu. m.). Subsecuentes incrementos de agua redujeron significativamente el requisito de vibración para una total consolidación, pero también incrementa la posibilidad de rigidez inadecuada para aguantar el peso del rodillo vibratorio. Lo anterior parece indicar que el contenido de agua óptimo para esta mezcla será aproximadamente de esos valores, esto es 130 lb/cu.yd. (77 kg/cu.m.). La figura 6.2 muestra la misma mezcla básica con 100% cemento portland como material cementoso. Esta figura muestra un rango manejable de 170 a 200 lb/cu.yd. (102 a 118 kg/cu.m.) o un contenido de agua óptimo comparable de 185 lb/cu.yd. (110 kg/cu.m.). Los requisitos de agua óptimos para mezclas de cemento portland y material de relleno con estos materiales variará entre estos límites dependiendo del radio de material de relleno a cemento. En una forma similar contenidos óptimos de agua pueden ser establecidos para otras puzolanas, cementos portland e ingredientes de mezcla.

FIGURA 6.1 EFECTO DEL TIEMPO DE VIBRACION Y CONTENIDO DE AGUA EN LA DENSIDAD COMPACTADA DE CONCRETOS CON CONTENIDO DE CENIZAS VOLANTES

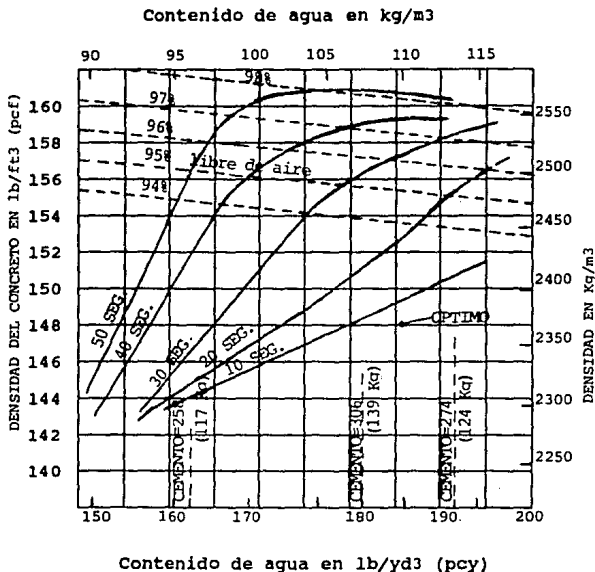


INGREDIENTES	PESO		VOLUMEN	
	Lbs.	(Kg.)	Ft <sup>3</sup>	(m <sup>3</sup> )
ATM 1½" (38 mm)	2556"	(1159)	14.5	(0.41)
Arena	1360"	(587)	7.9	(0.22)
Cenizas Volantes	336"	(152)	2.34	(0.066)

NOTA: Los agregados son manufacturados.



**FIGURA 6.2 EFECTO DEL TIEMPO DE VIBRACION Y CONTENIDO DE AGUA EN LA DENSIDAD COMPACTADA DEL CONCRETO DE CEMENTO PORTLAND**



INGREDIENTES	PESO		VOLUMEN	
	Lbs.	(Kg.)	Ft3	(m3)
1½" (38 mm) MSA	2556	(1159)	14.5	(0.41)
Arena	1293	(587)	7.51	(0.21)

NOTA: Los agregados son manufacturados.

Los límites de material deleterious para aplicaciones compactadas por rodillo deben, por lo tanto, ser establecidos por pruebas. Estos límites deben ser establecidos de acuerdo con su efecto en las propiedades del concreto requeridas para la estructura o colocación involucrados.

Los rodillos vibratorios grandes son capaces de consolidar capas de roca cantera "quarry roc de grosor hasta de 2 pies (0.6 m.) en presas de relleno con piedras. Por lo tanto, los límites en cuanto al tamaño de los agregados no son controlados por la falta de equipo de compactación adecuado. En cuanto a la grava triturada parece no haber suficiente ahorro en el costo de los materiales en agregados de tamaño mayor a las 3 plg. (76 mm.) para compensar el añadir los costos de mezclar y manejar el incremento de problemas de segregación asociados con los agregados más grandes. Sin embargo, para materiales extraídos de bancos o excavaciones no hay economía particular en cribar los agregados más grandes. En tarbela los materiales extraídos de bancos o excavaciones contenían agregados de hasta 9 plg. (229 mm.) en tamaño.

Cuando las capas colocadas son de tres veces el tamaño máximo de agregados, el tamaño tiene poca influencia

sobre la compactabilidad con el tipo de equipo vibratorio actualmente utilizado para relleno de piedra compactada por rodillo. El tamaño del agregado sí tiene influencia en la compatibilidad de equipo de rodillos vibratorios más pequeños normalmente usado para compactar materiales adyacentes a estructuras. Estos rodillos más pequeños parecen ser marginales en su capacidad de consolidar mezclas TMA de 3 plg. (76 mm.) pero si consolidará mezclas TMA de 1 1/2 plg. (38 mm.) en capas hasta de 12 plg. (30 cm.) de grosor.

Aunque el uso de agregados uniformemente graduado tales como los especificados por el ASTM C33 es deseable para obtener mejores resultados, la graduación no es tan importante en el CCR para lograr la compactación deseada como lo es en el concreto desplomable por la diferencia entre el equipo usado para densificar los dos tipos de concreto. Sin embargo, la graduación del agregado sí afecta la compactabilidad relativa del concreto y puede influenciar el número mínimo de pasos vibratorios requeridos para la consolidación total de una capa de grosor dado de CCR. También afecta los requisitos de agua y materiales cementosos necesarios para llenar los vacíos en el agregado y para cubrir las partículas del agregado para producir un concreto de volumen sólido. La graduación ideal para requisitos de pasta mínimos

sería una que produce la densidad dry rodded máxima con el área de superficie mínima. Los agregados usados en la mayoría del trabajo de investigación hasta ahora fueron graduados de acuerdo con estándares aceptados y hasta en los materiales de bancos o excavaciones en la presa TARBANELA y el Cañón Zintel los estudios estuvieron relativamente libres de brechas de cualquier tamaño en la curva de graduación usando la distinción normal entre agregados finos y gruesos, la graduación de agregados finos tiene la mayor influencia en los requisitos de pasta. Los límites de graduación de agregados finos son igualmente adecuados para el CCR. Cuando no se usa puzolana un incremento del 5% en el porcentaje que pasa por la criba No. 100 puede ser beneficioso en reducir los requisitos de pasta que se programen.

Proporción de agregados gruesos para requisitos mínimos de mortero

El proporcionamiento de agregados gruesos depende de los efectos combinados de los vacíos de agregados, área de superficie y la forma de las partículas, cuando las graduaciones son controladas cimbrando y dividiendo los agregados en fracciones de tamaños separados.

Un rodillo vibrador de 6 pies (4.5 m.) de ancho de diseño apropiado (tamaño del tambor, fuerza compactiva, frecuencia de amplitud, etc.) que haga cuatro pasadas a 2 m.p.h. (3.22 km/hr) puede compactar más de 350 yd.cu. (260 m.cu.) por hora de concreto no des-plomable en capas de 10 plg. (25 cm.) considerando la amplia variedad de rodillos vibratorios disponibles, el concepto CCR cambia completamente los elementos de control de producción de colocaciones masivas de concreto desde la cantidad (por tiempo dado) de colocación hasta el rendimiento de la planta de concreto. Una planta de bachadas convencional requeriría aproximadamente cuatro mezcladoras de 4 yd. cu. (3 m. cu.) o una grande de 12 yd. cu. (9 m.cu.) para igualar las capacidades de compactación de un rodillo grande en una operación de compactación continua. Por lo tanto mientras es posible igualar la producción utilizando mezcladoras grandes o encimando o añadiendo mezcladoras o plantas de bachadas, estas nuevas condiciones parecen sugerir la deseabilidad de mezclado continuo para contrapesar el tiempo perdido en operaciones de bachadas.

La experiencia de campo indica que el CCR puede ser compactado a razón de 1,000 yd. cu. (760 m.cu.) o más por hora con varios rodillos vibratorios autopropulsados actualmente disponibles y operando.

Una amplia variedad de equipo de rodillos vibratorios ha sido usado para aplicaciones de prueba y construcciones de CCR. Generalmente cualquier rodillo vibratorio que ha sido usado con éxito para compactar rellenos de piedra compactará CCR. Rodillos autopulsados, con tambos vibratorios, con impulso de fuerza motriz, han probado ser más adecuados para el CCR que rodillos que sólo vibran y requieren otros vehículos o formas de propulsión. La fuerza motriz en los tambos vibratorios permite que el rodillo revierta su dirección sin molestar al concreto compactado. El movimiento en una sólo dirección reduce grandemente las maniobras. Las levas excéntricas que producen la vibración en los rodillos remolcados normalmente son diseñadas para moverse en una sola dirección y rasgarán la superficie del concreto recién compactado si se revierte en el modo vibratorio. Varios tamaños y marcas diferentes de rodillos vibratorios han sido usados con éxito.

La maniobrabilidad, la fuerza compactiva, el tamaño del tambor, la frecuencia, la amplitud y la velocidad de operación son consideradas como parámetros principales para la selección del rodillo. El rendimiento compactivo en volumen de concreto por hora obviamente aumentó con el tamaño y la velocidad del rodillo. El tamaño de la obra y las limitaciones del espacio usualmente deter-

minarán la selección. Los rodillos mayores de 4 ó 5 toneladas por lo general no pueden operar a más de 6 a 9 plg. (15 a 23 cm.) de estructuras u obstáculos por lo que se necesita usar rodillos de menos de 1 a 2 toneladas para consolidar el concreto en estas áreas.

El número mínimo de pasadas para que un rodillo vibratorio dado logre consolidar totalmente (densidad máxima posible) depende principalmente en la mezcla de concreto y el grosor de la capa. El grosor de la capa estará regido más por la eficiencia del esparcimiento que por los requisitos de compactación, siendo que los rodillos grandes son totalmente capaces de compactar capas de piedra cantera de hasta 24 plg. (60 cm.) y más. La mayoría de las colocaciones de CCR hasta hoy han usado capas de 8 a 12 plg (20 a 30 cm.). Deben efectuarse pruebas preliminares durante las primeras etapas de la construcción para determinar el número mínimo de pasadas para consolidación total, usando la mezcla correcta y el grosor de capa escogido.

El reconocimiento de concreto totalmente consolidado también depende un poco en la mezcla de concreto. Si la mezcla ha sido proporcionada para volúmenes de pasta en exceso mínimos, como se discute en el Capítulo 2, entonces el concreto totalmente consolidado exhibirá

plasticidad y podrá detectarse claramente una onda de presión adelante del rodillo, particularmente cuando se han colocado dos o más capas plásticas. Si es insuficiente el contenido de pasta para llenar todos los vacíos del agregado, habrá contacto de piedra a piedra y ocurrirá algo de trituración del agregado con la consolidación total. Pasadas adicionales sólo incrementarán la cantidad de trituración y cada capa estará casi tan tiesa como una junta fría (Ver Capítulo 5 para las consideraciones del diseño al utilizar mezclas de volúmenes inadecuados de pasta). La masa consolidada de una mezcla con volumen adecuado de pasta responderá al trabajo de la superficie como plastilina o jalea tiesa. Esta acción permite que piedras diseminadas en juntas alzadas sean incrustadas en la superficie bajo el esfuerzo compactivo de los rodillos vibratorios, haciendo una masa sólida de construcción en capas.

El rodillo vibratorio aplica una cantidad tan enorme de trabajo a la superficie que cualquier distribución dispareja de pasta dentro de la mezcla o cerca de la superficie producirá un charco visible. La humedad en la superficie que hay inmediatamente después de la consolidación se evapora rápidamente, antes de que ocurra endurecimiento, por lo tanto, no debe confundirse con "sangrado de agua" o laitance.



Las pruebas a escala natural mostraron que la compactación con rodillos en el concreto con elevado contenido de ceniza volante crea una estructura casi monolítica en el centro de una presa con poca debilidad en las juntas. El cimbrado del paramento de la presa es comparable con la compactación con rodillos, si se emplea una pavimentadora deslizante en el concreto interior, observándose que mediante este sistema, ambos concretos se adhieren satisfactoriamente uno con otro.

Las pruebas hechas en concretos con elevado contenido de cenizas volantes demostraron que sus propiedades son más adecuadas para ser utilizados en presas y que dichos concretos tienen varias ventajas técnicas sobre otros considerados propios para la compactación con rodillos.

Cuando se dispone de cenizas volantes, una presa de concreto compactado con rodillos y con elevado contenido de éstas, debe ser comparable con una presa de relleno cuando la ubicación es adecuada para ambos métodos de construcción. La compactación con rodillos del concreto con elevado contenido de cenizas volantes tiene muchas otras aplicaciones además de usarse en presas; se utiliza en especial en la construcción de caminos. Asimismo, se sugiere que el concreto que se emplee en el paramento durante la prueba final, conserve en todos los

climas sus propiedades de concreto estructural vibrado internamente.

La única manera para determinar compactación total en el campo es midiendo la densidad compactada y compararla con la misma mezcla totalmente compactada en el laboratorio por vibración prolongada. A la fecha, todas las pruebas de corazones extraídos han verificado los juicios visuales de compactación total por inspectores. Esto puede sencillamente indicar que a la fecha se ha usado más esfuerzo compactivo aplicado que el mínimo requerido para consolidación completa. En los estudios de campo de CCR en la presa Lost Creek, el número mínimo de pasadas dadas por el cuerpo de Ingenieros a una capa de 8 plg. (20 cms.) fueron cuatro. En la mayoría de los casos, el número de pasadas no controlará la producción, siendo que el esparcimiento parece ser el factor controlador. Sin embargo esta situación está sujeta a cambios con más experiencia en construcción con CCR.

Los rodillos metálicos vibrantes, autopropulsados son los más adecuados para este tipo de operación. En la selección de los mismos, son importantes las consideraciones sobre maniobrabilidad, frecuencia, amplitud y fuerza de compactación y velocidad de operación. Así mismo, se hace necesario disponer de pequeños rodillos

(IT) para la compactación en las proximidades de los encofrados y posibles obstáculos.

En las primeras presas de CCR, las mezclas "secas" tendían a estar en, o ligeramente por abajo del contenido de humedad que corresponde a lo "óptimo" para compactarse con un gran rodillo vibrador. Este ha sido comúnmente el contenido de humedad en la que casi todos los espacios de poros en el material compactado están llenos de agua pero sin que desarrolle presión de poros en la mezcla mientras está siendo compactada. Prácticamente, es el punto en el que la mezcla no llega a desarrollar una onda u ola cuando el rodillo pasa sobre ella. Las mezclas húmedas de CCR no tienen revenimiento pero tienen humedad libre visible en la superficie, pasta discernible que se vuelve líquida cuando se agita, y desarrollan una onda u ola bajo el rodillo. Las mezclas secas no responden efectivamente a los aditivos normales en tanto que las mezclas húmedas sí lo hacen a dosis elevadas. Las mezclas húmedas también parecen seguir las reglas clásicas de la relación agua/cemento en tanto que las mezclas secas no lo hacen.

## VII - CURADO

El curado y protección requeridos para el CCR generalmente son consistentes con el tratamiento necesario para concreto convencional, por lo cual el concreto debe mantenerse en una condición húmeda y una temperatura favorable para la hidratación del cemento. Las prácticas recomendadas en "Prácticas Recomendadas para Curar Concreto (ACI 308-71) (Reafirmado 1978)", "Concretado en Clima Caliente (ACI 305R-77)", y "Prácticas Recomendadas para Concretado en Climas Fríos (ACI 306R-78)", también serán aplicables en la construcción con CCR.

El CCR debe mantenerse constantemente húmedo por 7 días o hasta que se cubra por una capa adicional de concreto. Ningún material para curar debe usarse además de agua, arena o una cubierta que pueda quitarse después en superficies de junta donde será necesario adherirla a otra capa de concreto. Todas las superficies de exposición permanente y no adheridas pueden curarse aplicando agua o cubierta de tierra. No se necesitará curación de las superficies compactadas bajo condiciones de construcción donde se coloquen rápidamente subsecuentes capas, mientras no ocurra secado de las superficies. Esto se

aplicará particularmente a operaciones de colocación continua.

#### Protección - Clima Caliente

Durante climas calientes o condiciones climáticas en las cuales se acelera el secado de la superficie, se hace necesario la protección de las superficies del CCR. Cuando se observa esta condición, se debe agregar agua a las superficies para reemplazar y suplementar la evaporación de humedad. Se debe hacer notar que la mayoría de los problemas generalmente asociados con trabajo de construcción en clima caliente, tales como el incremento de la demanda de agua, pérdida de desplome y agrietamiento de encogimiento plástico, no son severos en la construcción con CCR principalmente por el bajo requisito de agua y los métodos de transportación, colocación y compactación que se usan, sin embargo, algunas medidas de control de la temperatura pueden ser necesarias en ciertos casos donde es importante el control de agrietamiento inducido termalmente.

#### Protección - Clima Frío

Se debe proporcionar suficiente protección de las superficies expuestas del CCR por 7 días después de la colocación, cuando se esperan temperaturas del aire de 0 ó más congelación. Esta protección se puede lograr

cubriendo la superficie de colchonetas de aislante, capas de paja, 6 plg. (15 cm.) de tierra o algún otro tipo de material aislante.

Después de colocarlo, se debe obtener el curado y protección correctos para que el concreto pueda obtener su resistencia máxima sin sufrir las consecuencias de la contracción nociva debida a un secado precoz o cualquier otra reacción adversa. Quizás no sea necesario curar el CCR macizo si el material de la superficie externa del gran volumen es crítico para la integridad estructural general.

La superficie externa se puede considerar como sacrificial. Si el pie (30 cm.) externo, más o menos, de una presa de 300 pies de espesor no está curado, no hará que la presa falle. El diseño inicial no tiene dimensiones tan precisas. Esta capa externa, si no se cura y protege, tendrá muy pobre calidad estructural, pero su presencia impedirá pérdidas de humedad de la masa interior y la protegerá de las rápidas fluctuaciones de la temperatura cotidiana. Este razonamiento justifica la eliminación del curado deliberado aplicando humedad o membranas. Si fuera necesario, se podría utilizar el curado húmedo, pero se tendrían que aplicar con sumo cuidado para que no se deslave el cemento del CCR no

hidratado. Quizás sea difícil aplicar las membranas que se rocían sobre la superficie áspera del CCR y normalmente no se recomendarían.

## VIII - CONTROL DE CALIDAD

### Medidas de consistencia

Una modificación del método "vebe apparatus" está delineada en "Práctica recomendada para seleccionar proporciones para concreto no-desplomable (AIC 211.3-15)", y ha demostrado ser prometedora como medio para medir la consistencia del CCR.

El valor consistencia es el número de segundos requeridos para consolidar el volumen de concreto en un cono estándar para prueba de revenimiento en un cilindro de 9.5 plg. de diámetro y 12 plg. de altura.

En los agregados mayores a 1.5 plg. (38 mm.) hay una mayor tendencia a segregarse cuando se depositan. Esto debe ser reconocido tanto al seleccionar la transportation y el equipo de distribución o en designar los procedimientos de colocación y aplanación que dispersa parejamente el agregado segregado sobre el concreto no compactado. Las bolsas segregadas, si no son corregidas, son difíciles de consolidar totalmente siendo que no hay suficiente exceso de mortero en el concreto cubridor para llenar los vacíos de segregación.



Previamente a la ejecución de la presa se deben realizar los ensayos correspondientes para la obtención de la fórmula de trabajo del CCR. En este sentido, deben ensayarse dosificaciones con el adecuado contenido de pasta, para asegurar su correcta puesta en obra, así como la necesaria unión entre tongadas. Se utiliza habitualmente el aparato vebe modificado para la confección de probetas y la determinación de la humedad óptima para obtener una mezcla con la máxima densidad seca y por tanto la máxima resistencia. Con este aparato el valor de la consistencia es el número de segundos necesarios para compactar un volumen de concreto en un recipiente cilíndrico.

Es de importancia esencial la determinación del tiempo máximo que puede transcurrir entre el extendido de dos capas sucesivas sin que se haga necesario algún tipo de tratamiento suplementario entre ellas, además de mantener la junta constantemente húmeda y limpia. Este tiempo será en función del contenido de pasta (agua + conglomerante) en la mezcla, así como de la temperatura ambiente y la humedad relativa del aire, como factores fundamentales. Los valores comprendidos entre 4 y 8 horas suelen ser habituales.

Así mismo, se debe realizar un bordo o incluso una pequeña presa de ensayo, para determinar que los equipos disponibles en obra para el extendido y compactación van a ser operativos, así como para verificar que la dosificación y el espesor preestablecido van a ser adecuados para la construcción.

El número necesario de pasadas dependerá básicamente para un rodillo concreto, del espesor de la tongada a compactar y de la fórmula de trabajo del CCR: Habitualmente éstas vienen a estar comprendidas entre 8 y 12. En este sentido, se deben verificar los valores de densidad obtenidos en obra, con los medidos en laboratorio, de ser posible con el uso de aparatos nucleares tipo Troxler, de gran rendimiento, cotejados en su caso con el método de la arena.

Pese a ser evidente, mencionaremos que las características exigibles a un hormigón de presa; son:

DENSIDAD

IMPERMEABILIDAD

DURABILIDAD

Si la primera, fácil de medir, fuera un indicador con sensibilidad suficiente, a ella se recurriría fundamentalmente; pero no lo es y carece de información sobre las otras dos características. La porosidad es mucho más sensible y capaz de suministrar información sobre las tres exigencias mencionadas; sucede que es difícil de medir y, en todo caso, no contempla todos los matices de la durabilidad.

Un concreto será tanto más estable en el tiempo en tanto que la porosidad sea mínima y que cada elemento inerte esté envuelto por conglomerante, problema este último que pone en juego, junto con la granulometría, la superficie total de áridos y conglomerante, con la dificultad que supone establecer una barrera entre ambos materiales o conceptos.

De forma simple y esquemática cabe enunciar dos condiciones:

- La superficie total del mortero debe ser capaz de envolver todos los áridos gruesos, siendo su volumen tal que rellene todos los huecos que dejan los referidos áridos.

- La superficie total de conglomerante, incluidos finos activos, debe cumplir la condición antes expuesta respecto a la arena del mortero y su volumen ha de ser tal que proporcione una porosidad mínima.

Lo anterior podría constituir una condición teórica ideal, pero es difícil su control en obras aun dotadas de laboratorios. En su lugar y aunque sea un indicador muy diferente, se controla la resistencia sobre probeta, a veces incluso sobre testigo, a edades de 7, 28 y 90 días, como índice de la calidad del concreto. Es claro que el concreto de una probeta difiere netamente del puesto en obra por su curación diferente en la cámara, del curado térmico en obra, y por el grado de confinamiento.

Ahora bien, aunque la resistencia a tracción o a compresión sea algo muy diferente de la densidad, impermeabilidad y durabilidad exigibles, se recurre a ella por ser un indicador sensible y fácil de medir, con lo que se obtiene un índice de calidad.

Esta disgregación pretende salir al paso sobre la multitud de discusiones pírricas, en obras, acerca de si las tensiones de proyecto en relación con las resistencias

obtenidas en laboratorio suponen un determinado coeficiente de seguridad. Se opina que, pese a medirse en las mismas unidades físicas, se trata de expresiones cuya interconexión pasa por modelos mucho más complejos que la mera comparación. Esto es válido tanto para los concretos convencionales de presas de gravedad o de arco, como para los concretos que nos ocupan: Concreto compactado con rodillo.

Un método rápido para medir la densidad compactada será necesario, puede convenir el empleo de instrumentos nucleares que se usan ahora para medir densidad de la tierra y que son aplicables para medidas de densidad plástica de capas compactadas.

#### Control de Campo

El control de los contenidos de agua de la mezcla por el laboratorio de campo es necesario para asegurarse de que haya suficiente pasta en la masa de mezcla para llenar todos los vacíos de agregado y cubrir las partículas del agregado. Como ya se ha discutido previamente, el exceso de agua en la mezcla es automáticamente controlada en la colocación de campo por la inhabilidad de una mezcla demasiado mojada de soportar el peso de los rodillos vibratorios.

En el laboratorio de campo, el control se logra mejor por observación de la consolidación de muestras de rutina tomadas de la planta de bachada. Bajo vibración continua, puede asumirse que la mezcla tenga un volumen adecuado de pasta mientras la pasta sube a la superficie y es claramente disponible sobre toda el área de la superficie. Con el equipo de vibración adecuado esto puede lograrse en menos de un minuto con mezclas de masa y menos de 30 segundos con mezclas colocadas. Sin embargo, para el control de campo de los contenidos de agua el tiempo límite de vibración no debe ser más de 1.5 veces el tiempo establecido para consolidación total de estas mezclas en el programa de mezclas a prueba. Si la pasta no llena la superficie dentro de este tiempo establecido, el contenido de agua de las bachadas debe aumentarse hasta que esto suceda. El método "Vebe Modificado" descrito anteriormente, también es un proceso de prueba satisfactorio para control de campo de la consistencia.

Cuando la mezcla tiene un volumen de pasta adecuado, se puede hacer la determinación gravimétrica de la densidad compactada midiendo la cantidad de agua necesaria para llenar el espacio de la superficie del concreto compactado a la cima del envase de peso unitario, obteniendo así el peso neto del concreto. La densidad del concreto

es afectada principalmente por la gravedad específica (GEP) de los agregados.

La preparación de especímenes de prueba para pruebas de fuerza compresiva, incluyendo la fabricación de especímenes para fuerza compresiva de CCR, se harán en el mismo orden de frecuencia como las actualmente usadas para evaluar la cualidad de concreto convencional.

En España se usa, desde los años sesentas, el ensayo de permeabilidad sobre conductos moldeados o perforados verticalmente en el concreto, como comprobación de la permeabilidad, fundamentalmente de la unión entre toncadas. Se trata de un ensayo sencillo, de evidente sensibilidad y convincente en cuanto a sus resultados. La técnica Soviética lo ha utilizado también, así como la Mexicana (8o. ICOLD, Edimburgo 1964); más recientemente, el yugoslavo Milovanovic, al referirse a la permeabilidad de las juntas frías, en el 11o. ICOLD, Madrid 1973, se expresa así:

"Recientemente en ensayos de concreto, en la propia presa, para comprobar la impermeabilidad a través de perforaciones hechas a este fin; si los resultados no dan plena satis-

facción, se toman medidas correctivas, a la vez que se mejoran los tratamientos en las futuras juntas..."

Este ensayo, que ha ido cayendo en desuso, entre presistas Españoles, a medida que el tratamiento de juntas se ha generalizado con calidad suficiente, vuelve a ser importante en los concretos compactados. En las presas de ERIZANA y de SANTA EUGENIA se ha empleado con liberalidad, así como en LOS MORALES.

Como indicadores característicos de los concretos compactados, se valoran los siguientes:



FIGURA 8.1 PERMEABILIDAD DE CORAZONES DE CCR

Presa	Cemento y Cenizas Volantes (Kg/m cu)	Permeabilidad (cm/sec)xE-10
Willow Creek	47 + 20	17
Willow Creek	47 + 20	20
Willow Creek	104 + 00	103
Willow Creek	104 + 00	87
Willow Creek	104 + 47	20
Willow Creek	187 + 80	67
Lost Creek	56 + 44	113
Lost Creek	72 + 83	4
Lost Creek	72 + 83	21
Lost Creek	139 + 00	5
Lost Creek	130 + 00	73
Wes	307 + 00	2
Wes	307 + 00	2
Wes	307 + 00	5

- . Tamaño máximo del árido
- . Relación de árido grueso a árido fino
- . Relación pasta a mortero
- . Relación cenizas volantes a conglomerante
- . Relación agua a conglomerante

Esta última, habitual en todos los concretos y que precisa un control extremo de las arenas, hasta tener que preparar varios silos (tres) cuando se seleccionan por vía húmeda, toma en los concretos compactados, especialmente secos o de asiento nulo, relevancia, llegando a ser frecuente que, con la humedad de las arenas, sea suficiente para el amasado.

Es muy significativo que no se haya desarrollado una relación exacta y consistente entre las resistencias de corazones y cilindros de control colados en campo. También es importante la indicación preliminar de que las mezclas de masas más húmedas y/o contenido aglutinante más elevado (cemento + puzolana) que alcanzan resistencias de cilindro elevadas no alcancen las mismas resistencias elevadas en la presa. Esto ocurrió en la sección de prueba de Upper Stillwater y en las mezclas de elevado contenido aglutinante de Willow Creek.

## Instrumentación

La instrumentación en las presas de CCR pobre, generalmente debe ser la misma que se proporcionaría para una presa convencionalmente colada, de tamaño, riesgo y fines similares. Cuando las juntas monolíticas se eliminan o se reducen en grado importante es prudente monitorear cuidadosamente las temperaturas para verificar que los picos térmicos y la tasa de caídas de temperatura sean iguales a las pronosticadas.

Asimismo, cuando las temperaturas son muy dependientes del programa de construcción y éste puede variar, debe proveerse monitoreo de las temperaturas.

Las filtraciones y su cambio con el tiempo son especialmente críticas. Comúnmente, existe una reducción substancial y continuado en las filtraciones con el tiempo, en presas de CCR pobre. Esto debe monitorearse cuidadosamente sobre una base continua para verificar que la lechada y/o el ataque químico no deterioran el CCR pobre con el tiempo.

FIGURA 8.5 ENFRIAMIENTO NATURAL DE LA ALZA DE TEMPERATURA MAXIMA DEL CONCRETO EN MASA

TEMPERATURA DEL AIRE IGUAL A TEMPERATURA DE COLOCACION  
 TEMPERATURA FINAL EXCEDE LA TEMPERATURA DEL AIRE

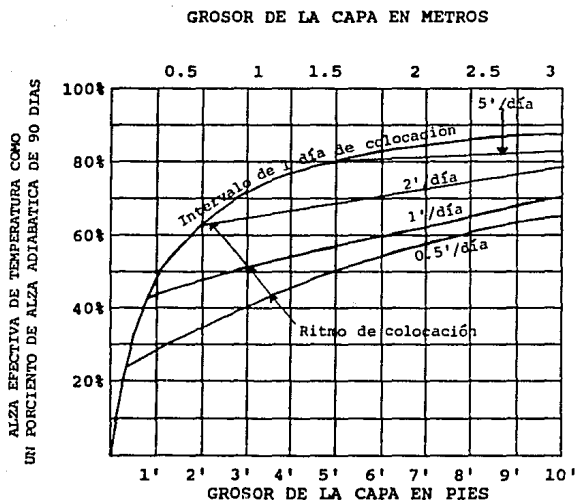
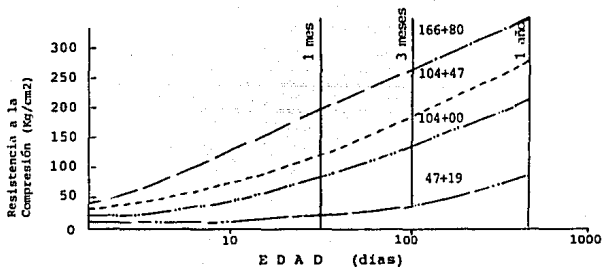


FIGURA 8.2 RELACION EDAD-RESISTENCIA DE CILINDROS DE CCR DE LA PRESA WILLOW CREEK

Cilindros de 15-30 cm ( $TMA^* = 2''$ )  
 47+19 = 47 kg/m<sup>3</sup> de cemento + 19 kg/m<sup>3</sup> de cenizas volantes



\* Tamaño máximo de los agregados

FIGURA 8.3 DENSIDAD Y RESISTENCIA EN RELACION CON EL CONTENIDO DE AGUA

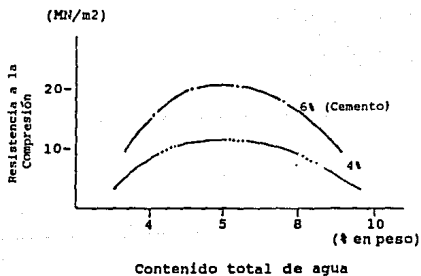
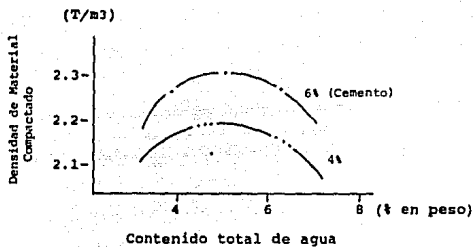


FIGURA 18. INCREMENTO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION ALCANZADA CON LA EDAD EN CUBOS DE CONCRETO DE LA PRUEBA FINAL

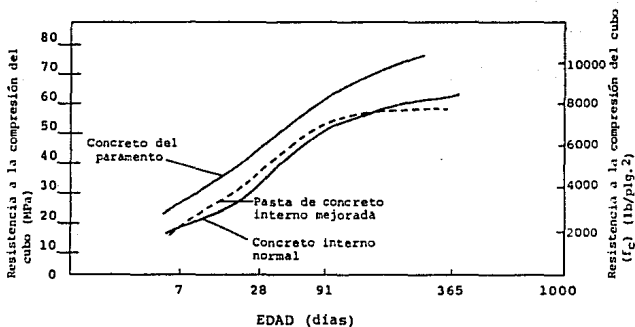
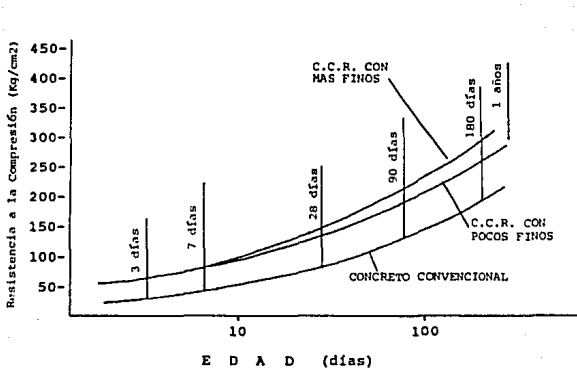


FIGURA 8.4 EDAD-RESISTENCIA DEL CONCRETO CONVENCIONAL Y CCR

Todas las mezclas fueron hechas con TMA\* 3" del material para Willow Creek

103 Kg/m<sup>3</sup> de cemento tipo II  
47 Kg/m<sup>3</sup> de cenizas volantes

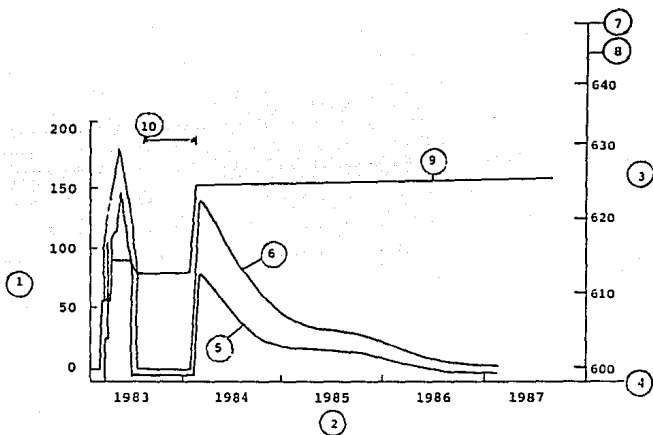
Concreto convencional de 5 cm de revenimiento, elaborado con agregado lavado, aditivos inclusores de aire y reductores de agua



\* Tamaño máximo de los agregados



FIGURA 8.6 FILTRACIONES EN LA PRESA WILLOW CREEK



- 1.- Filtraciones
- 2.- Año
- 3.- Nivel de reserva
- 4.- Fondo de presa
- 5.- Filtraciones en la galería
- 6.- Filtración total
- 7.- Borde de la presa
- 8.- Borde del evacuador de derrames
- 9.- Nivel de agua

Los medidores de grietas internas (extensiometros) pueden ser deseables a través de algunas juntas cuando éstas se emplean, y/o áreas que se juzga ser ubicación potencial de grietas.

#### Laboratorio e Instrumentación en Obra

En la presa Willow Creek se estableció en obra un laboratorio para practicar pruebas de seguridad de calidad sobre terreno y concreto. Las pruebas de concreto pertinentes al estudio térmico incluían contenido de cemento, resistencias de tensión por separación de cilindros a diversas edades y módulos de elasticidad a diversas edades. Las mediciones de contenido de cemento verificaron la elevación de calor adiabático empleando para las mezclas de CCR (105 pci). Los módulos elásticos y las resistencias de tensión fueron empleadas en computaciones de esfuerzos térmicos y análisis de potencial de agrietamiento.

La densidad y la humedad se pueden determinar con exactitud con densímetros nucleares utilizados para colocación de tierra. Las determinaciones del contenido de cemento y un segundo método para verificar la humedad se pueden completar más o menos en 15 minutos, utilizando el sistema Kelly-Vaile, para el que se requiere alrededor de \$2,000 U.S. de equipo de laboratorio de

campo empleando las técnicas de titulación con cloruro y flamafotometría. Este sistema se desarrolló en Inglaterra y ha sido exhaustivamente evaluado por el Laboratorio de Investigación de Ingeniería de la Construcción del Ejército.

Ya se ha hecho mención a la mínima retracción, por lo que se insistirá brevemente sobre ello. Esta retracción puede ser de tres tipos fundamentalmente: Retracción hidráulica a corto plazo, retracción hidráulica a largo plazo y retracción térmica.

La retracción hidráulica a corto plazo o por desecación se evita, tanto en uno como en otro concreto, por el regado durante los primeros diez días.

La retracción hidráulica a largo plazo o por fraguado, será tanto menor cuanto menor sea el volumen del conglomerante y la cantidad de agua de amasado. lo que implica una mínima retracción en los hormigones secos, compactados.

La retracción térmica está condicionada al tipo y volumen del conglomerante; será mínima lógicamente en los concreto "pobres" compactados.

Finalmente, la mayor densidad conseguida con los concretos compactados respecto a los vibrados internamente, implica una menor retracción comprobada.

Tanto el proyecto como la construcción empleando CCR se han presentado como campos fértiles y abiertos al ingenio; la investigación lógicamente habrá de seguir camino análogo.

## **IX - GENERALIDADES**

El CCR, básicamente es un concreto bien dosificado, que acepta mayor número de finos con menor consumo de cemento y agua. Su transporte, colocación y compactación se hacen utilizando equipo de construcción para movimiento de tierras.

Los detalles sobresalientes por lo novedoso, son las formas precoladas las que a su vez tendrán el doble uso de impermeabilizar y servir de cimbra para el concreto compactado con rodillo (CCR) en el paramento aguas arriba. También el sistema de liga entre capas y contra las laderas. Otro detalle es la formación de la galería de inspección a base de relleno de la sección de agregados sin cemento, lo que permite continuar con la colocación de CCR en este tramo: El relleno se retira posteriormente, una vez colocado el CCR alrededor de la zona.

Las ventajas del CCR pueden aplicarse a cualquier tipo de presas: Control de avenidas, riego, agua potable o para generar energía eléctrica.

A partir del Congreso de Madrid (1973), comienza a generalizarse el concreto compactado con rodillo de forma

tal que en el decimoquinto ICOLD, celebrado en Lausana en 1985, son más de treinta las realizaciones mundiales de este tipo: Japón, USA, Gran Bretaña, URSS, Sudáfrica, Australia, Pakistán, Brasil, Francia, España, ello sin contar experiencias parciales en otros países.

Durante los años posteriores a 1936 se desarrolla la técnica de concretos de presas, habiéndose llegado a un perfeccionamiento notable en cuanto a ejecución, buen acabado, durabilidad y belleza; por problemas fundamentalmente económicos, se desarrolla una tecnología nueva, pendiente de una evolución y probablemente capaz de competir con la precedente. Se han ensayado materiales nuevos, tales como:

- . Concretos con fibras de vidrio
- . Concretos expansivos
- . Concretos con resinas
- . Concretos con polímeros
- . Concretos con bajo contenido en conglomerante

Se estudian nuevos equipos de puesta en obra:

- . Cintas transportadoras
- . Camiones de diferentes tipos
- . Bulldozers de extendido

- . Escobas mecánicas con púas de metal o plástico
- . Encofrados deslizantes
- . Compactadores de diverso tipo
- . Máquinas bordilladoras

En lo que respecta a los nuevos materiales, sólo los concretos de mínima retracción hidráulica y térmica parecen ofrecer un camino fértil, para los grandes volúmenes que requieren las presas.

Siguiendo el espíritu de estas páginas, ésto es de hablar de concretos de presas, para desarrollar los concretos continuos compactados y de mínima retracción hidráulica y térmica, se enumeran una serie de ventajas de estos concretos, nacidos bajo la rúbrica de construcción más rápida y más económica de presas de fábrica:

- . Construcción más rápida
- . Construcción más económica
- . Acepta vertidos en la fase de construcción
- . Tomas y desagües a través de una presa
- . Aliviaderos por coronación, con o sin compuertas
- . Explotación sin mayores problemas
- . Comprobación y auscultación análogas a otras presas de fábrica.

Las mismas posibilidades de corrección que en otras presas de fábrica, tanto de la propia fábrica como del cemento.

Para alcanzar tales ventajas, conforme se expone en páginas anteriores, se han desarrollado diversos tipos de concretos secos, aparentemente concebidos con criterios diferentes. Ahora bien, es difícil imaginar un concreto impermeable, por bien dosificados que estén los áridos, con un contenido en finos por debajo de un 10% del volumen, si quiere obtenerse una impermeabilidad y compacidad adecuadas.

En la figura 9.1 se recogen las dosificaciones en peso, no en volumen, de once presas de concreto compactado en diversos países; llama la atención las dosificaciones muy dispares, considerando por separado cemento, cenizas volantes y finos, columnas 2, 3 y 5; se asemejan contablemente si analizamos los valores en las columnas 6 ó 9, en que se muestra el conjunto de los finos, sumando las tres columnas de finos separados (columna 6) y homogeneizando en función del tamaño máximo de áridos (columna 9).



FIGURA 9.1 'APENDICE

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
Presas	Cemento Kg.	Cenizas Volantes Kg.	Finos 200 ASTM (sobre 2.200 kg. de áridos) en t      en kg.		Total Cemento + CV + finos Kg.	Tamaño Máximo mm.	$\sqrt{d/150}$	Finos homogenei- zados Kg.	Agua Litro	
TARBELA (Paquistán)	100		34	66	176	150	1	176		
TAMAGAWA (Japón)	91	19	34	66	196	150	1	196	95	
BAYONA (España)	90	93	3	66	246	100	0.92	226	110-1	
WILLOW CREEK (U.S.A.)	66	-	7	154	220	80	0.882	194	80	
MIDDLE FORK (U.S.A.)	71	-	4-10	80-220	159-291	75	0.87	138-253	106	
MONKSVILLE (U.S.A.)	62	-	10	220	282	75	0.87	245		
UPPER STILLWATER (U.S.A.)	85	142	1	22	269	75	0.87	234	106	
BRAAM RAUDENHEIMER (Sudáfrica)	153	-	5	110	263	75	0.87	229	99	
GALESVILLE (U.S.A.)	62	36	10	220	282	75	0.87	245		
	53	68	5	112	201	75	0.87	174	74	
	99	68	5	112	279	75	0.87	242	77	
MILTON BROOK (U.S.A.)	85	142	1	22	249	40	0.76	189		
CASTEBLANCO (España)	80	112		5	188	40	0.76	143		

Con esta reflexión se asemejan los concretos continuos, por su granulometría, a los materiales de pedraplén impermeable, con lo que se cierra el paralelismo entre ambos materiales, por su puesta en obra y por sus características granulométricas.

La figura 9.2 muestra costos unitarios aproximados en obra para varias presas de CCR, los cuales representan enormes ahorros que van desde 30 a 70 por ciento del costo de una presa de concreto convencional. Los valores que se muestran fueron desarrollados empleando la misma base general y enfoque para cada proyecto, el conocimiento personal de cada proyecto y los datos de costo disponible. Es difícil proporcionar cifras exactas y los informes de otros costos pueden depender de su bases y de sus propósitos finales. Los valores expuestos deben ser considerados como representaciones razonables del total de concreto global en la presa. Representan todo lo relacionado con la presa básica incluyendo todas las mezclas de CCR, agregado, cemento, puzolana, aditivos, mezclado, entrega, colado, curado, protección, concreto de relleno o inicial, superficie de contacto aguas arriba, superficie de contacto aguas abajo incluyendo vertederos), galería, drenes y juntas. El costo no incluye puentes, estribos de vertederos, concreto cong

vencional de la cresta del vertedero, pozos de calma y estructuras accesorias.

Aunque no siempre ha ocurrido, uno de los aspectos más impresionantes de las presas de CCR ha sido su capacidad de ser diseñadas y construidas rápida y económicamente. Los importantes ahorros de proyectos que son construidos y puestos en servicio rápidamente no aparecen en la columna 1 de la Tabla 1. Esta se refiere al interés reducido sobre el dinero recibido en préstamo durante el período de construcción un rendimiento temprano sobre el dinero invertido por la realización temprana de los beneficios del proyecto (irrigación, energía eléctrica, protección contra inundaciones, etc.).

Los ahorros monetarios resultantes del uso del CCR provienen primordialmente de su rápida colocación con mano de obra minimizada.

En vista del aumento de costo de la construcción, debido a los gastos generales, la inflación y contratos laborales a largo plazo desconocidos, el hecho de que las estructuras de CCR se pueden colocar más rápido que el concreto convencional es una gran ventaja. Por ejemplo, una estructura de concreto macizo localizada en un clima que sufre inviernos muy crudos, puede tardar en cons-

FIGURA 9.2 INFORMACION DE PRESAS DE CCR

Presas	País	Altura (m)	Volumen (m <sup>3</sup> cu)	Año de (1) terminacion	Llenado (4)		Cemento Kg/m <sup>3</sup> cu	Puzolana Kg/m <sup>3</sup> cu	Costos \$ m <sup>3</sup> cu
					(2)	(3)			
WILLOW CREEK	E.E.U.U.	52	331,000	1982	1983	1984-84	47	19	29
							104	0	
							104	47	
							187	80	
WINCHESTER	E.E.U.U.	21	25,000	1984	1984	1985	104	0	60
MIDDLE FORK	E.E.U.U.	38	42,000	1984			66	0	
COPPER FIELD	Australia	40	138,000	1984	1984	1985	80	30	
GALESVILLE	E.E.U.U.	51	161,000	1985			110	0	34
							53	53	
							68	65	
KERVILLE	E.E.U.U.	7	17,000	1985	1985	1985	104	0	
SALD	Brasil	56	132,000	1986	1986	1987	70	(7)	
							75	(7)	
MONKSVILLE	E.E.U.U.	46	239,000	1986	1987	-	62	0	31 (6)
GRINDSTONE UPPER	E.E.U.U.	42	88,000	1984	-	-	74	0	
STILLWATER	E.E.U.U.	87	1,070,000	1987	-	-	80	173	37 (6)
							94	207	

(1) Año aproximado en que el volumen de CCR fue completado.

(2) Almacenaje bajo el vertedero.

(3) Almacenaje sobre el vertedero.

(4) Como para junio de 1987.

(5) Costo aproximado incluyendo todas las mezclas (ver texto).

(6) Mayores demandas por resolver.

(7) No fue usada puzolana por separado, pero el cemento fue tipo IIP conteniendo puzolana.

truirse dos años de calendario con concreto convencional, quizás ocho meses de colocación activa y cuatro meses de paro. Si se necesitara un total de diez meses para completar las colocaciones, el contratista tendrá que extenderse hasta el siguiente año de calendario. Sin embargo, si empleara concreto rolado, posiblemente pueda completar todo el proyecto en seis meses, evitando así los tremendos gastos generales en que tendría que incurrir durante el período de paro por el invierno y eliminaría la segunda temporada de construcción.

FIGURA 9.3 PRESAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO DE LOS ESTADOS UNIDOS DE NORTEAMERICA

Nombre del proyecto y ubicación	Alt. Máx. Mts.	Cantidad m <sup>3</sup> de CCR	Características de acabado en la cortina	Periodo de construcción
Willow Creek Heppner, Oregon	52	111,000	Paneles verticales de concreto precolado en la cara de aguas arriba.	1982
North Loop Detention Austin, Texas	10	15,800	Con terraplén en lado de aguas abajo.	1984
Winchester Winchester, KY	21	24,500	Con una membrana de revestimiento y paneles de concreto precolado en el lado de aguas arriba.	1984
Middle Fork Parachute, CO	38	42,000	Concreto convencional en ambas caras.	1984
Great Hills Austin, Texas	11	10,000	Con terraplén en ambas caras.	1984-1985
Galesville Azalea, Oregon	51	170,500	Concreto convencional en el lado de aguas arriba.	1985
Upper Stillwater Duchesne, Utah	88	1,070,000	Moldes de concreto deslizante en ambas caras.	1985-1987
Monksville Ringwood, NJ	46	221,000	Concreto convencional en ambas caras.	1986
Grindstone Canyon Ruidoso, N. Mex.	42	87,500	Concreto convencional en ambas caras.	1986

## X - CONCLUSIONES

Durante más de 60 años, las presas de concreto simple no tuvieron progresos importantes en el mundo. Sólo hasta fechas recientes, el advenimiento del concreto compactado con rodillo vibratorio provocó un cambio revolucionario que marcó una nueva era en la construcción de presas de concreto.

México, en su búsqueda permanente de nuevas tecnologías eficientes y económicas, inició la construcción de cortinas de concreto compactado con rodillo, con lo que se coloca a la vanguardia en América Latina en este tipo de obras. El sistema permite la edificación de presas en un periodo de tiempo más corto y con un considerable ahorro económico.

Los trabajos de CCR se iniciaron en nuestro País, en la presa La Manzanilla. Esta primera aplicación, a nivel experimental, se realizó en una obra de pequeñas dimensiones que no significara grandes riesgos. Ahora, con la edificación de la presa Trigomil -la presa más alta del mundo en su tipo- se inicia una nueva época de la Ingeniería Hidráulica nacional, gracias a una técnica segura, eficiente y que permite reducir los tiempos de construcción.

Partiendo de la Ciudad de Guadalajara, por la Carretera a Barra de Navidad se llega a la población de Unión de Tula, situada a veintiún kilómetros de la presa Trigomil.

Asentada sobre el río Ayuquila, punto intermedio entre las presas Tacotán y el Corcovado, la Trigomil es la segunda presa que se construye en México actualmente con el sistema de concreto compactado con rodillo, que ofrece ventajas de durabilidad, resistencia, menor tiempo de colocación y menor costo.

El objetivo de la construcción es proveer de riego al Distrito El Grullo Autlán. La presa tendrá una capacidad de almacenamiento que permitirá regar 19,500 hectáreas. Adicionalmente, tendrá la función de controlar las avenidas del tramo Tacotán Trigomil, del río Ayuquila.

El sistema de concreto compactado con rodillo ofrece las ventajas principales: Ahorra tiempo y costos. En la difícil situación que enfrenta el País estas características constituyen una garantía de que la actividad en construcción de presas no se detendrá ni disminuirá, sino por el contrario continuará a un ritmo sostenido y con mejores resultados.



A fin de ofrecer una visión de la totalidad del proyecto se presentan las especificaciones de esta obra.

Previo al inicio de su construcción, fue necesario realizar pruebas que permitieran conocer el comportamiento del material durante su colocación y sus características posteriores al fraguado. Con este fin se construyó un bordo de prueba, en el cual se simularon las mismas condiciones y materiales que existían en el sitio de desplante de la cortina. La finalidad de este bordo, llamado "concretaplén", fue la de probar mezclas, equipo, el procedimiento constructivo, ligas con el terreno natural y entre capas, lapsos de interrupción, concreto de liga y CCR.

Este bordo de prueba se construyó de la siguiente manera:

- 1o.- Cuatro capas de CCR con cenizas volantes.
- 2o.- Una capa de concreto de liga completándola con CCR con ceniza volante.
- 3o.- Dos capas de CCR con limo.
- 4o.- Una capa de concreto de liga completándola con CCR con limo.

5o.- Dos capas de CCR con limo (arena limosa).

Obra de desvío.- Consta de tres conductos de 4.5 x 8 m, contruidos en el cauce del río. Están formados por dos pilas y una losa de cubierta de concreto reforzado. La construcción no está realizada en su totalidad con CCR, existen zonas donde se utiliza concreto masivo, como el desplante de la cortina, constituido por material convencional que permite el paso de los escurrimientos del río en época de avenidas. Esta sección está diseñada para un gasto de 725 metros cúbicos por segundo.

Cortina.- La cortina tiene una sección de gravedad, cuya altura máxima partiendo del desplante es de 100 metros. Tiene un volumen de 415,000 m<sup>3</sup>, aloja las obras de desvío, de toma y el vertedor, este último se construirá en su mayor parte con CCR. Zonas como el desplante, la corona y las estructuras se realizarán con concreto masivo.

Las galerías necesarias para inspección y drenaje, se formarán rellinando huecos con los agregados usados en la elaboración del CCR, posteriormente se removerán y las galerías, ya formadas, se revestirán con concreto convencional.

En el talud de aguas arriba se colocarán piezas prefabricadas de concreto, que constituirán una cimbra permanente autosoportada para el concreto de la cortina. Entre estas piezas y el CCR se colocará una zona de concreto convencional para formar una pantalla impermeable. En el talud de aguas abajo se dejará que el concreto rodillado adopte su pendiente natural de reposo, estimada en 0.8:1.

Para el cuerpo de la cortina que será de CCR, se requiere un concreto de  $f'c=150$  Kg/cm<sup>2</sup> y se ha especificado que se usarán cenizas volantes procedentes también de MICARE.

Sin embargo, como prevención para un probable desabasto de cenizas, se estudiaron mezclas con limo obtenido de un banco a unos 30 km. del sitio.

Las mezclas que se han propuesto son:

En un metro cúbico de CCR con cenizas, lleva 47 Kg. de cenizas, 148 Kg. de cemento y 5% de agua.

En un metro cúbico de CCR con limo lleva 264 Kg. de limo, 160 Kg. de cemento y 6% de agua.

El concreto de liga lleva por metro cúbico, 183 Kg. de cemento y el concreto convencional, 280 Kg. de cemento.

Las obras se iniciaron en 1986, pero por problemas de carácter presupuestal, hasta ahora se encuentra en vías de terminación.

Vertedor.- La parte central de la cortina será vertedora, diseñada para un gasto de 3,655 metros cúbicos por segundo.

Se constituirá por un cimacio, un canal de descarga sobre el talud de aguas abajo, muros de encauce y cubeta deflectora, ésta y la zona de la cresta vertedora serán de concreto masivo, mientras que la losa del canal de salida y los muros de encauce serán de concreto convencional reforzado, anclados en el CCR de la cortina.

Obra de toma.- Se alojará en la margen izquierda de la cortina y estará constituida por una estructura de rejillas, tubería de acero de 2.12 metros ahogada en concreto; válvulas de emergencia y servicio y una estructura de salida diseñada para un gasto de 30 metros cúbicos por segundo.

Las estructuras de entrada y salida serán de concreto convencional reforzado y se construirán cuando la colocación del concreto rodillado y las instalaciones lo permitan. Para instalar la tubería de acero es necesario preparar el espacio en forma similar a las galerías de inspección; una vez terminadas las instalaciones se ahogará la tubería en concreto masivo.

Obra de toma provisional.- Con el propósito de no interrumpir el servicio de la zona de Autlán-El Grullo, que ya se encuentra bajo riego y para ayudar durante la etapa de cierre de la cortina, se construirá una obra de toma provisional en la margen derecha del río. La obra, diseñada para un gasto de 15 m<sup>3</sup> por segundo, constará de una estructura de entrada y una de salida, válvulas de emergencia y servicio, tubería de emergencia y servicio, tubería de concreto de 1.52 metros ahogada en la cortina, y se construirá con concreto convencional reforzado.

La Presa Trigomil es básicamente de almacenamiento para riego, pero existe un proyecto de la Comisión Federal de Electricidad que contempla aprovechar la obra de toma para instalar una planta generadora de energía.

A continuación se enlistan los principales datos del Proyecto Trígomil:

Capacidad Total .....	324'000,000 M3.
Capacidad de Conservación .....	250'000,000 M3.
Capacidad de Superalmacenamiento ...	74'000,000 M3.
Capacidad para Azolves .....	25'000,000 M3.
Elevación de la Corona .....	1,212.30 M.
Elevación del N.A.M.E. ....	1,209.00 M.
Elevación de la Cresta Vertedora ...	1,201.40 M.
Elevación del Nivel Mínimo de Operación .....	1,164.20 M.
Elevación del Umbral de la Toma	
Definitiva .....	1,151.50 M.
Longitud de la Cresta Vertedora ....	<u>75.00 M.</u>
Gasto máximo de entrada .....	4,600.00 M3/s.
Gasto de Diseño del Vertedor .....	3,655.00 M3/s.
Gasto de Diseño de la O. de Toma	
Definitiva .....	30.00 M3/s.

## Gasto de Diseño de la O. de Toma

Provisional .....	15.00 M3/s.
Area de la Cuenca Trigomil .....	997.90 Km2.
Trigomil-Tacotán .....	2,164.90 Km2.

## Fabricación y Colocación de CRR:

El suministro de los agregados de los almacenamientos será por medio de una banda transportadora de 48" y túnel de la recuperación a las tolvas de la planta de concreto, la caída de la glorieta será por tubería de 16"  $\varnothing$  y con repartidor inferior para la tolva de la planta, la planta de concreto es una ROSS 220, para fabricación de concreto convencional con una capacidad teórica de producción de 220 m<sup>3</sup>/hr. La característica principal de esta planta, es que tiene 2 revolvedoras que hacen que la producción de concreto sea prácticamente continua, a diferencia de una sola que hace la producción intermitente. La conducción de la mezcla de la planta la cortina, se hará por tubería de 40"  $\varnothing$  con una tolva receptora al inicio y un amortiguador anti-segregación al extremo.

En el nivel de colocación de la cortina, se recibe la mezcla de la tubería en una tolva que se vacía por compuerta neumática a dos camiones de volteo o dumcrets, que transportan la mezcla a lo largo y ancho de la cor-

tina (recorrido máximo 200 Mts.) vaciando a volteo en el sitio de colocación. El extendido se hará con un tractor 3-5 y la compactación se hace con un compactador vibratorio CA-25 o similar. El concreto de liga y de la capa intermedia se fabricará con la planta ROSS y se colocará con el mismo sistema antes descrito; el riego de humedecimiento y curado continuo, se hará con sistema bomba-tanque elevado, conducción por tubería y manguera con rociador fino en el extremo. La preparación de juntas frías se hará con soplete de aire-agua, de acuerdo con lo anteriormente señalado o sea una vez elaborado el CCR, se procede inmediatamente a transportarlo con camiones de acarreo para concreto seco al sitio de colocación para que sea tendido con un tractor sobre neumático en capas de 25 ó 30 cms. de espesor uniformemente en toda el área de la cortina siguiendo una misma dirección y compactándose con rodillo liso vibratorio de 10 Ton. de peso aproximadamente, con el fin de obtener una alta compacidad y eliminar zonas de filtraciones en el concreto antes de colocar la siguiente capa, se debe tender concreto convencional de un espesor aproximado de 8 cms. que sirve de liga entre capas. Este proceso es repetitivo hasta llegar al nivel de proyecto.

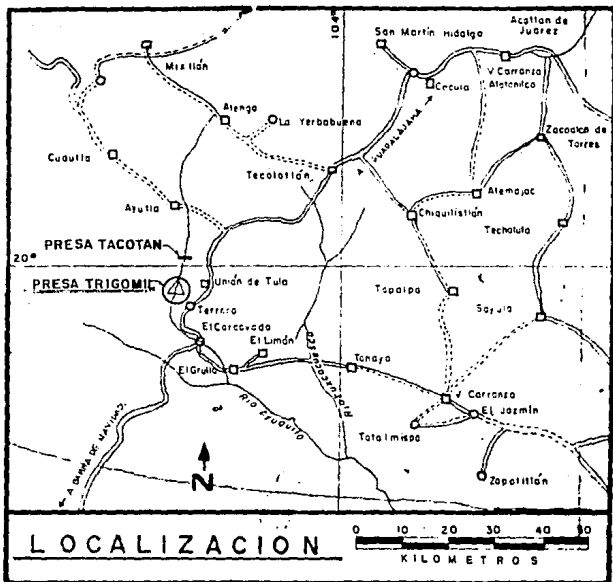


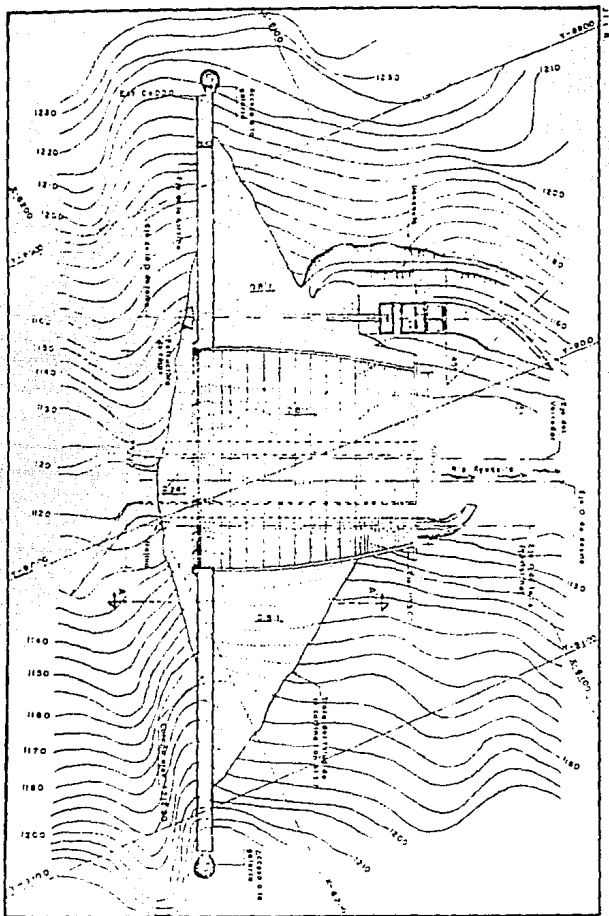
## C o n c l u s i o n e s :

- a) La utilización de los recursos naturales en el lugar y la ejecución del Proyecto en un tiempo más corto del que normalmente se requiere en presas de diseño tradicional, por los volúmenes de cemento a manejar menores, origina la reducción en costos, además la recuperación es menor al reducir la inversión.
  
- b) Abatir el costo de construcción al utilizar menor volumen de materiales, menor tiempo de construcción y el no usar cimbra.
  
- c) Se obtiene una compacidad mayor en el concreto reduciéndose la permeabilidad del mismo y por lo tanto las filtraciones, sobre todo al colocarse en capas sucesivas de espesor pequeño 25 a 30 cms. lo cual hace que el calor de hidratación del cemento generado se reduzca considerablemente, evitando mayores variaciones volumétricas dando por resultado una mejor impermeabilidad del mismo.

El Proyecto de la Presa "Trigomil" representa el inicio de la aplicación en la construcción de un procedimiento novedoso en México, como es el Concreto Compactado con

Rodillo, el cual ofrece amplias perspectivas de continuarse empleando con mayor constancia, por las ventajas que ofrece económicamente y su rapidez de ejecución para las presas futuras del país.



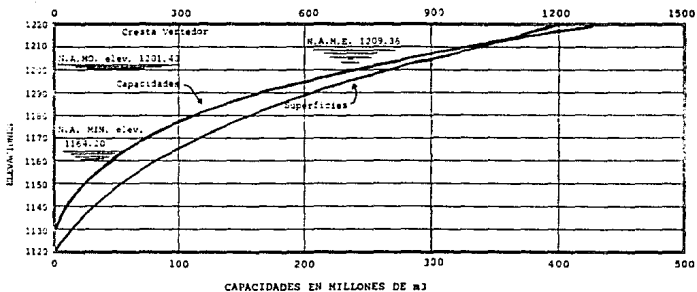


**DATOS DE PROYECTO**

Capacidad total	324,000,000 m3
Capacidad de conservación	250,000,000 m3
Capacidad de superalmacenamiento	74,000,000 m3
Capacidad para azolves	25,000,000 m3
Elevación de la corona	1,212.30 m.
Elevación de la N.A.M.E.	1,209.36 m.
Elevación de la cresta vertedora	1,201.40 m.
Elevación del nivel mínimo de operación	1,164.20 m.
Elevación del umbral de la toma	1,151.50 m.
Longitud de la cresta vertedora	75.00 m.
Gasto máximo de entrada	4,600.00 m3/seg.
Gasto de diseño del vertedor	3,655.00 m3/seg.
Gasto de diseño de la obra de toma	30.00 m3/seg.
Gasto de diseño de la obra de toma provisional	15.00 m3/seg.

ELEVACION	SUPERFICIE	CAPACIDAD
	(Has.)	(Millones de m3)
1120	0.33	0.01
1125	4.05	0.12
1130	21.08	0.75
1135	44.20	2.38
1140	71.58	5.27
1145	108.80	9.78
1150	149.03	16.23
1160	248.05	35.94
1165	302.73	49.71
1170	359.48	66.27
1175	418.78	85.72
1180	480.53	108.20
1185	556.93	134.14
1190	640.58	164.07
1195	732.95	198.41
1200	838.50	237.70
1205	928.95	231.88
1210	1019.43	330.59

CURVAS DE AREAS Y CAPACIDADES



## B I B L I O G R A F I A

---

- 1.- "Roller Compacted Concrete", por Ernest K. Schrader. IMCYC, México, 1977.
- 2.- "Presas de Concreto Rodillado", por Ing. Antonio Mosqueda Tinoco, Revista de Ingeniería Hidráulica en México, SARH, Septiembre de 1985.
- 3.- "Monksville Dam: Design and Construction. A Roller Compacted Concrete Water Supply Structure", por G.C. Elias, XV Congreso de Grandes Presas.
- 4.- "Rolled Concrete Triumphs", por Engineering News-Record, Octubre de 1982.
- 5.- "Upper Stillwater Dam: Design and Construction Concepts", por J.E. Oliverson, Concrete International, Mayo de 1984, CICH-UNAM.
- 6.- "Economic Considerations in Selection of a Roller Compacted Concrete Dam", por C.V. Logie, American Society of Civil Engineers, New York, E.E.U.U., Mayo de 1985.
- 7.- "Presa Trigomil en Union de Tula, Jalisco", Diseño y Especificación Técnica del Proceso Constructivo, SARH, Dirección de Estudios y Proyectos.