

PRESAS DE GRAVEDAD.

1, PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

El diseño de presas de concreto implica consideraciones de los materiales de construcción durante la fase de investigación. Se requiere una evaluación de la disponibilidad y ventaja de los materiales necesarios para la fabricación del concreto, el cual debe reunir las cualidades estructurales y de durabilidad requeridas, así como de la cantidad necesaria para el volumen de concreto requerido en la presa. Los materiales de construcción incluyen agregados finos y ásperos, materiales cementantes, agua para el lavado de los agregados, mezclado, curado del concreto y aditivos químicos. Uno de los factores más importantes en la determinación de la calidad y economía del concreto, es la selección del origen de los agregados. En la construcción de presas de concreto, es importante que el origen de los agregados tenga la capacidad de producir la cantidad requerida para la producción de concreto, además es necesario revisar las propiedades mecánicas y físicas de la masa rocosa de la cimentación (USACE, 1995).

2. PROPIEDADES DEL CONCRETO

Las propiedades específicas del concreto usadas en el diseño de presas de gravedad de concreto incluye el peso específico, los esfuerzos de resistencia, el módulo de deformación, el de fluencia, la relación de *Poisson*, el coeficiente de expansión térmica, la conductividad térmica, el calor específico y de expansión. Estas mismas propiedades también son importantes en el diseño de presas de CCR. Las investigaciones tienen indicaciones generales del CCR las cuales presentan propiedades similares a las del concreto convencional (USACE, 1995).

3. RESISTENCIA.

La resistencia de concreto varía con la edad; el tipo de cemento, agregados y otros materiales usados; y sus proporciones en el mezclado. El principal factor que afecta la resistencia del concreto es la relación agua-cemento. Una relación baja mejora la resistencia y la calidad. De acuerdo con los tres tipos básicos de esfuerzos la resistencia del concreto se determina por compresión, tensión y cortante (SRH,1980).

El diseño de fuerzas por compresión en el transcurso de los años es útil en llevar completamente las ventajas de las propiedades de resistencia de los materiales cementantes y el bajo contenido de cemento, resultando mínima la temperatura interna última y el bajo potencial de agrietamiento. Las fuerzas de compresión son determinadas por las pruebas de compresión estándar no confinadas suprimiendo los efectos de fluencia (ASTM C-39).

Los esfuerzos cortantes a lo largo de las juntas de construcción o en la unión con la roca de la cimentación pueden ser determinados por la relación lineal:

$$\sigma_T = C + \delta \tan \phi \quad (3.82)$$

donde

C es fuerza de cohesión unitaria,

δ es el esfuerzo normal

ϕ Representa el coeficiente de fricción interna.

Partiendo de las pruebas de tensión (ASTM C-496) o las pruebas de módulo de ruptura (ASTM C-78) pueden ser usados para determinar la resistencia del concreto intacto. Las pruebas del módulo de ruptura proporcionan resultados que son congruentes con las asumidas en el comportamiento de la relación lineal usadas en el diseño. A pesar de los resultados de las pruebas de tensión puede ser usados, sin embargo, el diseñador debe de estar consciente de que los resultados representados de las muestras se comportan de forma no lineal.

4. PROPIEDADES ELÁSTICAS.

Uno de los aspectos principales del concreto endurecido es su comportamiento reológico, esto es, la relación entre las cargas que se aplican y las deformaciones que experimentan. El concreto, como cualquier otro material se deforma cuando se aplica carga, de acuerdo con la magnitud, velocidad y duración de aplicación de esta (SRH,1980).

La grafica de la relación esfuerzo-deformación del concreto sujeta a cargas se va incrementado continuamente en una línea curva, (Fig. 3.22). El módulo de elasticidad y la relación de Poisson es determinada por medio de la prueba ASTM C-469.

La deformación a la cual está sujeta una presa de concreto puede dividirse en dos partes:

- 1) Primero, la deformación elástica, es el esfuerzo medido inmediatamente después de someterlos a las cargas y es expresado como el módulo instantáneo de elasticidad.
- 2) Segundo, una fatiga gradual en un largo tiempo, llamada deformación inelástica o flujo plástico del concreto. Aproximadamente del valor del flujo plástico es reducido al módulo instantáneo. Cuando se requieren valores más exactos para diseñar, debe ser establecido por las pruebas estándar del flujo plástico del concreto a compresión. (ASTM C-512).

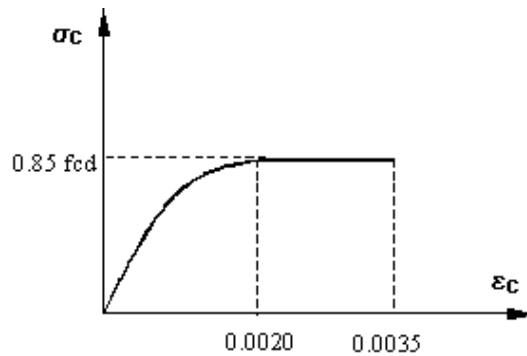


Fig.3.22 Grafica esfuerzo, deformación del concreto.

5. PROPIEDADES TÉRMICAS.

El factor más importante que afecta las propiedades térmicas es la composición de los agregados. La selección de los agregados adecuados está basada en otras consideraciones así que poco o nulo control puede ser ejercitado por las propiedades térmicas de los agregados.

Conductividad Térmica. La conductividad térmica de los materiales es la frecuencia con la cual transmite el calor y es definido como la razón del cambio continuo del calor al gradiente de temperatura. El contenido de agua, la densidad, y la temperatura influyen significativamente en la conductancia térmica de un concreto específico. Los valores típicos son 2.3, 1.7, y 1.2 (Btu)/ hr. / ft /°F para concretos con agregados de cuarcita, piedra caliza, y agregados de basalto, respectivamente.

Difusión Térmica. Es descrita como un índice de facilidad o dificultad de que el concreto salva un cambio de temperatura y, numéricamente, la conductancia térmica es dividido por el producto del calor específico y la densidad. Los típicos valores de difusión para concreto se extienden $7.74192 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para concretos con agregados de basalto, y $1.548384 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para concretos con agregados de cuarcita.

Calor Específico. Es el calor requerido para aumentar un grado al peso unitario del material. Los valores para varios tipos de concreto son sobre el mismo y varían de 0.5117-0.5815 kJ/kg/°F.

Coeficiente de la Expansión Térmica. Puede ser definido como el cambio en la dimensión lineal por unidad de longitud dividida por el cambio de temperatura expresado en millonésimos de °C. Para concretos con agregados basálticos y calizas tiene valores de $9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; concretos con agregados de cuarcita mayores a $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

Calor de Hidratación. La reacción del agua con el cemento es exotérmica y genera mucho calor durante un período de tiempo prolongado. El calor de hidratación para varios tipos de cementos varía de 60-95 cal/gr en 7 días y de 70-110 cal/gr en 28 días.

Capacidad de Esfuerzo a Tensión. El diseño está basado en la deformación máxima a tensión. Los módulos de prueba de ruptura son hechos sobre vigas de concreto evaluadas a la falla bajo el tercio de carga. La capacidad de esfuerzo a tensión es determinada dividiendo los módulos de ruptura por los módulos de elasticidad. Los valores típicos varían de $50-200 \times 10^{-6}$ dependiendo de relación de carga y tipo de concreto.

Flujo plástico (Creep) El flujo plástico del concreto es la deformación que ocurre mientras el concreto está sujeto a esfuerzos sostenidos. La fluencia específica es la fluencia por esfuerzo unitario. El flujo plástico específico del concreto se encuentra en el rango de 400×10^{-6} a $1500 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kg}$.

Módulo de elasticidad. Los módulos de carga instantáneos de elasticidad para concreto varían aproximadamente 1.055 a $4.218 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ y para cargas sostenidas varían aproximadamente de $3.5153-28.1227 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$.

6. PROPIEDADES DINÁMICAS.

Las propiedades del concreto requeridas para introducirse en un análisis dinámico elástico lineal son el peso de unitario, el módulo de elasticidad de Young y la relación

de Poisson. El concreto puesto a prueba debe tener la edad suficiente para representar las propiedades finales del concreto tan cercanas a la práctica. Usualmente los valores limitantes máximo y mínimo del módulo de elasticidad de Young será requerido

Las propiedades del concreto necesarias para un análisis dinámico son las fuerzas de compresión y tensión. La prueba de compresión es aceptable, aunque no describe la relación de carga, ya que normalmente la compresión no es controlada en el análisis dinámico. Partir de la prueba de tensión o el módulo de la prueba de ruptura puede usarse para determinar la fuerza de tensión. La fuerza de tensión estática, determinada por la prueba de tensión, puede ser incrementada por 1.33 comparada con el módulo estándar de la prueba de ruptura.

El valor determinado del módulo de ruptura debe usarse como la fuerza de tensión en el análisis lineal de elemento finito para determinar el inicio del agrietamiento en la masa de concreto. La fuerza de tensión debe incrementarse en un 50 por ciento cuando se use la carga sísmica para justificar la carga rápida. Cuando la tensión en presas existentes exceda 150 por ciento del módulo de ruptura, un análisis no lineal será requerido para evaluar la extensión del agrietamiento. Para las investigaciones de diseño iniciales, los módulos de ruptura pueden ser determinados de la siguiente ecuación (Raphael, 1984):

$$f_t = 0.1617 f_c^{2/3} \quad (3.83)$$

Donde:

f_t fuerza de tensión en kg/cm^2 (módulo de ruptura).

f_c' fuerza de compresión en kg/cm^2 .

7. PROPIEDADES DE LA CIMENTACIÓN.

En el estudio de cimentaciones para cortinas de concreto se presentan dos problemas: investigar las propiedades de las masas rocosas y determinar la influencia de éstas en el comportamiento de la estructura, fundamentalmente para juzgar su capacidad de carga admisible, teniendo en cuenta que cortina y cimentación, constituyen una unidad estructural.

Un verdadero estudio de las condiciones de la cimentación es importante no-solo por razones de seguridad sino también para aprovechar toda la capacidad de soporte de una masa rocosa dada. Es notable que las presas de concreto, en casos donde son más económicas, son muy frecuentemente reemplazadas por presas de tierra y enrocamiento, por falta de un estudio suficientemente elaborado de las propiedades de la cimentación que mostraría las ventajas de la primera solución (Rocha, 1964).

Dada la importancia de las juntas y fallas en la masa de rocas, merecen considerarse con detalle. Desde el punto de vista del comportamiento mecánico de masas rocosas, la gran diferencia entre juntas y fallas debe ser subrayada. La ultima por su naturaleza ya ha sufrido desplazamientos a lo largo de sus superficies, su forma generalmente les permite movimiento sin fracturamiento de importancia de la roca, además, las características mecánicas de los materiales que las rellenan son generalmente pobres. Por esto, bajo las cargas aplicadas por la estructura, las masas de roca pueden fácilmente deslizar a lo largo de las superficies de sus fallas. En zonas sísmicas, las fallas presentan un problema adicional, ya que pueden

ocurrir desplazamientos que alteren su estructura. Como para las juntas, debería hacerse notar que guardan una cierta orientación regular, formando familias paralelas, y espaciadas. Las masas de roca están a menudo cortadas por familias de juntas diferentes, frecuentemente tres, orientaciones (Rocha, 1964).

8. CAPACIDAD DE CARGA.

Las propiedades más importantes de resistencia de la cimentación necesarias para el diseño de estructuras de gravedad de concreto son las fuerzas compresivas y fuerza de cortante. La capacidad de carga permisible para una estructura, es a menudo seleccionado como una fracción de las fuerzas compresivas de la roca, al exponer los planos de debilidad a lo largo de junta naturales y fracturas.

La mayoría de los tipos de roca tienen la capacidad adecuada de carga para grandes estructuras de concreto a menos que sean rocas blandas de tipos sedimentarios como areniscas, esquistos de arcillas, etc.; que están considerablemente erosionadas, que contienen grandes vacíos o amplias zonas de falla. La fuerza de cortante de la roca de la cimentación es dada como dos valores: *la cohesión (C) y la fricción interna (ϕ)*. Los valores de diseño para la fuerza de cortante, es seleccionada a base de resultados de la prueba de cortante directo hecha en laboratorio (Juárez B, 2002).

Las pruebas del laboratorio de resistencia de cortante directo sobre muestras de rocas compuestas son recomendadas para evaluar la fuerza del cortante de la superficie de contacto con la roca o la estructura con la cimentación. Es

NOTAS DE CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO DE PRESAS DE GRAVEDAD.
DR. HUMBERTO MARENGO MOGOLLÓN.
PROFESOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA.

particularmente importante determinar las propiedades de resistencia de las discontinuidades y los materiales más débiles de la cimentación (i.e., Zonas blandas en cortante o fallas), como esos que generalmente controlan el comportamiento de la cimentación. En la tabla 3.7 se muestran algunos valores del esfuerzo cortante de rocas probadas *in situ*.

Roca cortina	Tipo de prueba	Índice de calidad %	Cohesión $C (kg/cm^2)$	Ángulo de fricción (ϕ°)	Coefficiente de fricción ($\tan \phi$)
Granitos Presa: Alto Rabagao	roca	3	13	62	1.9
		5	5	57	1.5
		7	3	52	1.3
		10	2	46	1.0
	15	1	41	0.8	
	Concreto - roca	6.2-7.3	2	56	1.5
Pizarras Presa: Bemposta	Roca normal a la esquistocidad	0.8-1.7	2	69	2.6
	Concreto-roca paralelo a la esquistocidad	1.0-1.4	2	60	1.7
	Concreto- roca paralelo a las juntas	1.3	2	63	1.9
Arenisca Presa: Cambambe	Roca paralela ala esquistocidad	Poco alterada	1	60	1.7
	Concreto-roca paralela a la estratificación.	Poco alterada	2	53	1.3

Tabla 3.7 Esfuerzo cortante de rocas probadas *in situ*.

9. MÓDULO DE DEFORMACIÓN.

Así como en la determinación de la resistencia al corte, la investigación de la deformabilidad en masas de roca requiere la consideración de pruebas *in situ*. Las pruebas de laboratorio sobre probetas labradas de corazones de roca arrojan valores de deformabilidad tales que, salvo casos muy especiales, no pueden aceptarse como representativos de la masa rocosa. El fracturamiento y la fisuración, generalmente influyen en mayor grado sobre la deformabilidad que la resistencia al corte, sobre todo cuando en ésta la contribución de la cohesión es despreciable.

El módulo de deformación de la masa rocosa de la cimentación debe determinarse para evaluar la cantidad de suelo esperado de las estructuras colocadas sobre ella.

El módulo de deformación puede determinarse por distintos métodos, pero el efecto de roca no homogénea (atribuible parcialmente a las discontinuidades de roca) sobre el comportamiento de cimentación debe explicarse. Por lo tanto, la determinación de la compresibilidad de la cimentación debe considerar tanto las deformaciones elásticas, como inelásticas (flujo plástico). El resultado de los "Módulos de deformación" es menor que el valor del módulo elástico para una roca intacta (USBR, 1974).

Los métodos para evaluar los módulos de la cimentación incluyen prueba estática *in situ* (pruebas de carga de placa, dilatómetros, etcétera); pruebas de laboratorio (pruebas de compresión de uniaxial, (ASTM C-3148); y pruebas de velocidad de impulso (ASTM C-2848), pruebas sísmicas de campo; datos empíricos (clasificación de la masa rocosa, correlaciones de fuerzas de compresión no confinadas, y tablas

de valores típicos); y cálculos anteriores que usan mediciones de compresión de instrumentos tales como exténsometros (USACE, 1995).

10. PROPIEDADES DE RESISTENCIA DINÁMICAS.

Cuando la cimentación es incluida en el análisis sísmico, el módulo elástico y la relación de Poisson de los materiales de la cimentación son requeridas. Si la cimentación es modelada, la densidad de la roca también es solicitada.

Evaluar el efecto de la carga sobre el módulo de la cimentación es considerado insignificante en comparación con las incertidumbres involucradas para determinar las propiedades de la roca de la cimentación, y no es medido. Para explicar las incertidumbres, en el límite superior e inferior del módulo de la cimentación debe usarse en el modelado para cada tipo de roca en el análisis estructural (USACE, 1995).

11. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LA CIMENTACIÓN.

Los parámetros de capacidad de carga de la cimentación son requeridos para la estabilidad en presas de gravedad. La determinación de los parámetros requeridos es realizada por evaluación de pruebas *in situ* y de laboratorio, con muestras representativas tomadas de la cimentación considerando las características geológicas de la roca de cimentación. Las pruebas *in situ* son costosas y normalmente son justificados en grandes proyectos o cuando se conoce que existen problemas en la cimentación.

12. INVESTIGACIÓN DE CAMPO.

Las investigaciones de campo pueden evaluar la profundidad y riesgo de erosión, permeabilidad, resistencia, características de deformación y excavación. Se requieren muestras inalteradas para determinar las propiedades de los materiales de la cimentación, demandando extremo cuidado en la aplicación y métodos de muestreo. El muestreo adecuado es una combinación de ciencia y arte; muchos procesos tienen que ser estandarizados, pero la alteración y adaptación de técnicas son frecuentemente establecidos por procesos de campo específicos (USACE, 1995).

La experiencia indica, que lo más conveniente, para la toma de muestras del macizo rocoso sobre la cual insistirá la presa es hacer perforaciones suficientemente profundas, en forma vertical y sesgadas, con el fin de identificar si existe alguna posible fallas o grietas del macizo rocoso. Deben cavarse zanjas cercas del paramento de aguas arriba de la presa sobre el eje de todas las fallas. En los lugares donde hay considerables acarrees deben cavarse trincheras a todo lo largo de la presa proyectada para descubrir la superficie de la roca. (Davis, 1969)

13. PRUEBAS DE RESISTENCIA

La gran variedad de las propiedades de la roca de la cimentación y las condiciones estructurales de la roca excluye una propuesta universal de pruebas estándar de resistencia. Es necesario realizar pruebas *in situ*. Después de haber iniciado algunas pruebas en la roca, los ingenieros geotécnicos, geólogos y de diseño, establecen un programa de pruebas que claramente pueden definir el propósito de

cada prueba. Es necesario usar todos los datos disponibles, así como los resultados de los estudios geológicos y geofísicos.

Las pruebas de laboratorio pretenden pronosticar las situaciones actuales de carga así como las cercanas y las posibles a presentarse. Las pruebas de resistencia a compresión y pruebas de cortante directo son normalmente requeridas para determinar los valores de diseño para el esfuerzo cortante y la capacidad de carga. Las pruebas de resistencia y en algunos casos también la consolidación y la disminución de pruebas pueden ser necesarias para rocas débiles de la cimentación. (USB, 1974)

14. DISEÑO DE LAS FUERZAS CORTANTES.

Los valores de la fuerza cortante usados en el análisis de deslizamiento son determinados por pruebas de campo y laboratorio disponibles, así como distintos criterios. Para diseños preliminares es correcto usar valores de esfuerzos cortantes para distintos tipos de rocas obtenidos de referencias disponibles. Es importante seleccionar las pruebas de resistencia a realizarse, basados en las formas de falla posibles. Generalmente, los esfuerzos en rocas fracturadas y por debajo de la estructura pueden usarse una cuña activa. Una combinación de esfuerzos sobre roca fracturada y/o intacta puede usarse para una cuña pasiva cuando se incluye en el análisis. La resistencia a lo largo de planos cortantes (o fallas) debe ser determinada para pruebas de cortante, donde la resistencia a lo largo de otros tipos de fracturas puede considerarse las características de esfuerzos de diversos materiales a lo largo de los planos de falla. (USB, 1974)

15. CONTROL DE TEMPERATURA EN UNA MASA DE CONCRETO.

El control de temperatura en una masa de concreto masivo es necesario para prevenir el agrietamiento causado por las tensiones excesivas que resultan del enfriamiento diferencial del concreto. El concreto es calentado por la reacción del cemento con el agua y puede ganar el calor adicional a la exposición de condiciones ambientales. El agrietamiento puede ser controlado por métodos que limitan la temperatura máxima a un nivel seguro, así las tensiones desarrolladas por el enfriamiento de equilibrio en el concreto son menores que la capacidad de esfuerzos de tensión.

16. ESTUDIOS TÉRMICOS.

Durante el diseño de presas de gravedad, es necesario evaluar la posibilidad de que la tirantez producida por los cambios de temperatura en el concreto no exceda la capacidad de tirantez del concreto. Los procedimientos de diseño detallados para el control en la generación del calor y los cambios de volumen para minimizar el agrietamiento pueden ser encontrados en el Manual Practico del Concreto de ACI, la sección 207. Los siguientes parámetros concretos deben ser determinados por un laboratorio: el calor hidratación, aumento de temperatura adiabática, conductancia térmica, difusión térmica, calor específico, coeficiente de expansión térmica, fluencia, y capacidad de tirantez a tensión. Las pruebas de propiedades térmicas, no debe iniciarse hasta que las investigaciones de los agregados han alcanzado al punto en el que el origen de los agregados es determinado y la disponibilidad de materiales cementantes es conocida.

17. MÉTODOS DE CONTROL DE TEMPERATURA

Los métodos de control de temperatura disponibles a considerar tienen el objetivo básico de reducir los aumentos en la temperatura debido al calor de hidratación, reducir diferencias térmicas en la estructura, y reducir la exposición al aire frío en superficies de concreto que puede causar el agrietamiento total.

Las técnicas más comunes son el control del grosor de capas, intervalo de tiempo entre capas, colocación del concreto a la temperatura máxima permisible y superficies de protección. El análisis debe hacerse para determinar el método más económico que restringir el aumento de temperatura y subsecuentemente la disminución de temperatura a niveles seguros cuyos valores bajos podrían causar agrietamiento no deseado. Para estructuras de complejidad limitada, tales como presas de gravedad convencionalmente, los resultados satisfactorios pueden ser obtenidos por el uso de los procedimientos de diseño de ACI- 207 "El concreto para presas y otras estructuras grandes." Las opciones de control térmicas para concreto compactado con rodillo (CCR) incluyen la instalación de juntas de contracción, diseño de mezcla, y disipación del incremento de calor. Las juntas de contracción pueden ser creadas para insertar series de reducciones o placas de metal en cada elevación para producir una junta vertical continua. Usando producción muy alta y relación de colocación, la construcción de CCR puede ser limitado por los meses más fríos del invierno sin demoras excesivas en el programa.

18. ESTRUCTURAS ESPECIALES DE PRESAS DE GRAVEDAD.

CONSIDERACIONES ESTRUCTURALES DE DISEÑO

Estas consideraciones generales incluyen juntas de contracción y construcción, obras de excedencia, obras de toma y galerías.

19. JUNTAS DE CONTRACCIÓN Y CONSTRUCCIÓN.

Para el control de la formación de grietas en el concreto, las juntas transversales verticales pueden ser espaciadas uniformemente a través del eje de la presa a aproximadamente a 15 m de separación. En donde la casa de maquinas forma parte integral de la presa y el espaciado de las unidades es mayor a esta dimensión, será necesario incrementar el espaciado de los bloques y ajustar el espaciado de las juntas en la casa de máquinas. En la sección del vertedor, la compuerta y el tamaño del muelle y otros requisitos son un factor en la determinación del espaciado de las juntas de contracción.

La ubicación y el espaciado de las juntas de contracción deben ser controlados por las características físicas del sitio de la presa, los detalles de las estructuras adjuntas, los resultados de estudios de temperatura, los métodos y la razón de colocación, y la posible capacidad de la planta de mezclado del concreto. Las discontinuidades repentinas a lo largo del perfil de la presa, los cambios de materiales, los defectos en los cimientos, y la ubicación de las características como obras de toma que también influirán en la localización de las juntas. Además, los resultados de estudios térmicos suministrarán las limitaciones para la seguridad sobre el espaciado de las juntas en los bloques para evitar el agrietamiento debido a temperaturas inducidas en forma excesiva. Las juntas son verticales y normales

al eje, y se extienden continuamente a través de la sección de la presa. Las juntas son construidas con el propósito de que no exista unión entre bloques adyacentes para garantizar la libertad de cambio volumétrico de bloques individuales.

Las juntas de construcción horizontales o casi horizontales (juntas de elevación) serán espaciadas a dividir la estructura en unidades activas convenientes y controlar el procedimiento de construcción con el propósito de regular los cambios de temperatura. Una típica elevación es de 1.5 m que constará de tres capas de 0.5m, o 2.30 m que constarán de cinco capas de 0.46 m. Donde es necesario medir el control de temperatura, el grosor de las capas puede ser limitado a 0.76 m en ciertas áreas de la presa. La mejor altura de las capas puede ser determinado por la capacidad de producción del concreto y los métodos de colocación. (USACE, 1995)

20. VERTEDORES.

La función principal de un vertedor es derramar el agua excedente del embalse y evitar la inundación aguas abajo para prevenir el daño y una posible falla en la presa. Los vertedores son clasificados como controlados (compuerta) o no controlado (sin compuerta). Los vertedores de exceso (tipo arco) son usualmente asociados con las presas de gravedad de concreto. Otros tipos de vertedores como cubetas de lanzamiento y túneles también son usados, pero para estructuras pequeñas, esto puede ser muy variado según sea el propósito de la presa.

El perfil de vertedor es regido en su parte superior por las consideraciones hidráulicas requeridas para su estabilidad. La superficie aguas abajo del vertedor

en donde termina la sección en tanque amortiguador o una cubeta disipadora de energía, depende principalmente de la naturaleza del sitio y las condiciones de aguas abajo. El diseño del vertedor incluirá la estabilidad y el análisis de esfuerzos internos y el rendimiento de la estructura.

Las cargas dinámicas que ocurren en el disipador de energía incluirán el impacto directo, las cargas vibratorias de la turbulencia, el flujo multidireccional y la deflexión hidráulica, la erosión de superficie para altas velocidades y escombros, y la cavitación. Al final del disipador aguas abajo deben contener protección suficiente contra la socavación debido a la turbulencia y los torbellinos. (USACE, 1995)

21. PUENTE EN LA SECCIÓN DEL VERTEDOR

Los puentes son provistos a través del vertedor de la presa como medio del acceso al tráfico ordinario y automovilístico entre las secciones de no vertido; proporciona acceso o soporte para las operaciones de maquinaria para las compuertas; o, generalmente, desempeñan ambos propósitos. En el caso de vertedores sin control y la falta del tráfico vehicular, el acceso entre las secciones de no vertido puede ser proveído por un puente pequeño de acceso o escaleras y una galería debajo del vertedor.

Los materiales usados en el diseño y construcción del puente deben ser seleccionados basándose en gastos del ciclo de vida y requisitos funcionales. Pisos, márgenes, y parapetos deben ser de concreto reforzado. Las columnas y vigas

podrían ser de acero estructural, de concreto reforzado colado en sitio o precolado, o concreto preesforzado. (USACE, 1995)

22. PILAS EN EL VERTEDOR

Para vertedores no controlados, funcionan como soportes para el puente. Vertedores controlados, los muelles también contendrán el anclaje y las ranuras para las compuertas y podrán soportar montacargas fijos para las compuertas. Los muelles están generalmente ubicados en medio del bloque, y el ancho de muelle es determinado por el tamaño de las compuertas, el ancho medio esta entre 2.5 y 5 m. Debido a que cada pila sostiene una compuerta en cada lado, las siguientes condiciones de carga del muelle deben ser investigadas:

Caso 1 ambas compuertas cerradas y agua al máximo de las compuertas.

Caso 2 una compuerta cerrada y otra puerta abierta con el agua al máximo de la compuerta cerrada.

Caso 3 una compuerta cerrada y otra abierta con mamparas en su lugar y agua al máximo de la compuerta cerrada.

El esfuerzo máximo horizontal se presenta en los casos 1 y 3 en forma normal al eje de la presa y al momento por volteo mayor en dirección aguas abajo. El caso 2 resulta en esfuerzo cortante horizontal bajo y momento por volteo aguas abajo, pero, además, el muelle tendrá un momento lateral debido a que el agua que fluye a través de la compuerta abierta y cuando la maquinaria levanta una compuerta cerrada. El esfuerzo cortante en el plano horizontal también será introducido por la reacción

que actúa en la compuerta cerrada sobre el muelle. Cuando las compuertas se dañan con inclinación y se usan marcos, los casos 2 y 3 presenta la condición de la componente lateral de la presión sobre las uniones como una carga sobre un lado del muelle además de las cargas aplicadas antes mencionadas (USACE, 1995).

23. OBRAS DE TOMA

Las obras de toma para presas de concreto son conductos o compuertas a través de la masa de una estructura tomada sobre la superficie aguas arriba, las compuertas o válvulas para el control, y dissipador de energía sobre la superficie aguas abajo. Múltiples conductos son provistos debido a economía y flexibilidad operativa en controlar un amplio rango de alivio. Los conductos están frecuentemente ubicados en la línea central de los bloques y descargan en el vertedor sobre un tanque amortiguador.

Las obras de toma ubicadas en los bloques de la cortina requerirán un dissipador de energía distinto. Todos los conductos podrían estar en el nivel inferior, o algunos podrían estar ubicados en un nivel superiores para reducir presión sobre compuertas, tener en cuenta una futura retención de sedimentos, o controlar la calidad y la temperatura del agua río abajo.

El diseño, el tamaño, y forma de las obras de toma son basadas en requisitos hidráulicos e hidrológicos, planes de regulación, economía, condiciones topográficas del sitio, operación y mantenimiento son necesarios, y la interrelación entre el plan de construcción y otras estructuras adjuntas. Los conductos pueden

proveer el desalojo del embalse, regulación del flujo para el control de inundaciones, caídas de emergencia, la navegación, ambiental (peces), la irrigación, abastecimiento de agua, mantener el flujo río abajo mínimos y la calidad del agua, o para propósitos múltiples. Los conductos de baja intensidad se usan para ayudar el desalojo del embalse para la calidad del agua y es a veces deseable el paso de sedimentos (USACE, 1995).

24. GALERÍAS

Un sistema de galerías, grutas, y socavones son necesarios en el cuerpo de la presa para proporcionar medios de acceso, así como el espacio suficiente para la instalación, operación y mantenimiento de accesorios y servicios. Las consideraciones principales en el convenio de aperturas en la presa son su utilidad funcional y eficiencia y su ubicación con respecto al mantenimiento integral de la estructura.

Tratamiento en galerías de drenaje. Una galería para tratamiento de la cimentación se desarrollará en toda la longitud de la presa. También servirá como tubería principal para la recolección de filtración de los socavones de drenaje de la cimentación, y de los socavones de drenaje interiores. La ubicación de la galería debe estar cerca de la superficie río arriba y tan cerca de la superficie de roca como sea posible para proveer la reducción máxima en la subpresión total.

Una distancia mínima de 1.5 m debe ser mantenido entre la superficie de la cimentación y el piso de la galería y entre la superficie río arriba y la galería pared río arriba. Ha sido práctica usual proporcionar el tamaño de las galerías de 1.5 m de

ancho por 2.0 m de altura. La experiencia indica que estas dimensiones deben incrementarse para facilitar la perforación y las operaciones de tratamiento. Donde prácticamente, el ancho debe ser incrementado a 1.8 a 3.0 m y la altura a 2.0 m. Un canal debe proveerse a lo largo de la pared aguas arriba de la galería donde la línea de socavones del tratamiento es situada para llevar el agua de la perforación y escoria. Un canal debe situarse a lo largo de la pared de la galería aguas abajo para llevar el flujo de las tuberías de drenaje. La galería es organizada como a series de trayectos horizontales y tramos de escalones.

Túneles de compuertas y galerías de acceso. Los túneles de compuertas están ubicados directamente sobre el servicio y las compuertas de emergencia. Estos túneles, debe dimensionarse para acondicionar las compuertas del montacargas al mismo tiempo que el equipo mecánico y eléctrico, y deben suministrar el suficiente espacio para el mantenimiento. Las galerías de acceso deben ser del tamaño suficientes para permitir el paso del componente mayor de las compuertas y los montacargas así como el equipo requerido para el mantenimiento. (USACE, 1995)

PRESAS DE GRAVEDAD DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO (CCR)

1. INTRODUCCIÓN

La primera presa construida enteramente en concreto compactado con rodillo (CCR) se terminó a mediados del año de 1982 en Willom Creek (EEUU). En realidad, las ventajas del CCR han provocado que para el día de hoy, se hayan terminado con éxito más de 230 presas en el planeta, es decir, cerca de 12 presas por año. En México se tiene contemplada la construcción de presas con este sistema por su buen desempeño para los próximos años.

Esta inusual acogida por nuevas tecnologías en el ámbito de la construcción se debe principalmente a que el Concreto Compactado con Rodillo (CCR) ha demostrado ser capaz de mantener con éxito una sección de presa cada vez más esbelta, cumpliendo los requerimientos estructurales y de impermeabilidad. Igualmente, el menor volumen de las presas en CCR, con respecto a las tradicionales presas de tierra o núcleo de arcilla y cara en enrocamiento, está relacionado con un ahorro importante en las cantidades de materiales, menor tiempo de construcción, menores longitudes de obras de desviación etc. Como vemos, nos encontramos sin que nos hubiésemos percatado, en medio de una tecnología en plena expansión donde parece, aún resta mucho por decir.

Desde Willow Creek en 1982 y hasta 1992, las presas en CCR se habían mantenido en un promedio de 50 mts y permanecieron durante esos 10 años cumpliendo dicha elevación¹. A partir de 1995 la altura de las presas creció al mismo ritmo que la confianza de los diseñadores. De esta forma en los últimos años las presas que sobrepasaron los 100 metros ya pasaron de la decena. Las presas más altas del

mundo de CCR actualmente construidas se encuentran en Colombia (Miel I 196 m) y Japón (Miyagase 156 m).

Esta tecnología rebasará para los próximos 2 años la barrera de los 200 metros con la culminación de la presa Longtang en China, país que si duda lleva la vanguardia en la construcción y estudio en CCR.

En México se ha terminado la construcción de una Presa de control de crecientes, Presa La Amata; este proyecto se encuentra ubicado en el estado de Sinaloa en el km. 60 de la carretera Culiacán-Mazatlán, 16 kms aguas arriba sobre el lecho del Río San Lorenzo. El proyecto Amata (Culiacán-Sinaloa) aparece dentro de este contexto como una estructura de baja altura y volumen diseñada como las primeras estructuras de CCR. Las condiciones atmosféricas en que se construye hacen que el concreto sea especialmente sensible a pérdidas de manejabilidad.

2. GENERALIDADES

El diseño de presas de gravedad de CCR es similar a una estructura de concreto convencional. La diferencia consiste en los métodos de construcción, el diseño de la mezcla de concreto y detalles de distribución de las estructuras. La construcción de presas de CCR es un concepto nuevo y económico. Las ventajas económicas son el alcanzar una rápida colocación, usando técnicas de construcción similares a las empleadas en los terraplenes de presas (USACE, 1995).

Bajo la denominación de concretos compactados (CCR) se engloba una serie de mezclas de cemento y agregados seleccionados, con un contenido de agua suficientemente reducido para permitir su compactación con rodillos. Las

aplicaciones naturales de esta técnica son aquéllas que pueden construirse en una o varias capas con una gran relación superficie / espesor, es decir, los pavimentos y las presas.

El CCR es relativamente en seco, pobre, sin revenimiento dado que los materiales que contiene el concreto son materiales finos y ásperos que se consolidan por vibración externa, usando vibradores de rodillo y otros equipos pesados. En las condiciones de endurecimiento, las propiedades de CCR son similares a las del concreto convencional. Para una consolidación efectiva, el CCR debe de estar relativamente seco para soportar equipo de construcción pesado, pero debe tener una consistencia húmeda la cual permitirá una adecuada distribución en toda la masa durante el proceso de mezclado y vibración, lo cual lleva a conseguir la compactación necesaria del CCR y la prevención de la segregación indeseable. La consistencia requerida tiene un efecto directo en la dosificación de la mezcla requerida. (USACE, 2000)

Cabe indicar que, en los primeros, el nombre de concretos compactados se reserva para las mezclas con un contenido de cemento del mismo orden que el de los concretos vibrados para pavimentos, entre 280 y 330 kg/m³ habitualmente, mientras que aquéllas con dosificaciones más reducidas reciben diversas denominaciones: gravas cemento, concretos magros, bases tratadas con cemento, etcétera. Por el contrario, en las presas se incluyen bajo el término de concretos compactados todos los tipos de mezclas, tanto los de mayor como los de menor dotación de conglomerante. En ambos casos se trata, en definitiva, de obtener unos materiales

que una vez endurecidos presenten características similares a las de los concretos convencionales vibrados, pero en cuya puesta en obra puedan utilizarse los equipos y métodos de construcción de terraplenes y presas de materiales sueltos (motoniveladoras, rodillos, etc.), cuyo rendimiento es muy superior al de la ejecución con cimbra.

No obstante, los concretos compactados para pavimentos muestran unas diferencias muy marcadas respecto a los empleados en presas: a aquellos se les exige, por ejemplo, que una vez compactados cumplan unas exigencias de regularidad superficial que son irrelevantes en las presas; mientras en estas últimas se imponen unas condicionantes de impermeabilidad, tanto del material en sí, como de las uniones entre las distintas capas, que carecen de importancia en los pavimentos. Por ello, ambos tipos de aplicación deben analizar por separado.

3. CONGLOMERANTES

Empleo de aditivos en el CCR, en la mayor parte de las presas de CCR construidas hasta la fecha se ha utilizado cenizas volantes de bajo contenido de cal. Hay que indicar, por otra parte, que en las presas de CCR la proporción de adiciones, y en especial la de cenizas volantes de bajo contenido de cal, ha sido notablemente más elevada que en las de concreto vibrado tradicional. De esta forma, en paralelo con el desarrollo del CCR, se ha llegado a una mejor comprensión del comportamiento de las adiciones en el concreto, debido principalmente al alto contenido de las mismas.

Haciendo uso de esta experiencia, se pueden diseñar los conglomerantes utilizados en el CCR para optimizar el comportamiento tanto del cemento como de la adición. Esta último no debería ser considerada un sustituto del cemento, sino un componente aparte valioso por sí solo y con sus propias propiedades particulares. El empleo de adiciones en el conglomerante del CCR no sólo presenta ventajas de tipo económico, sino que también tiene como consecuencia un fraguado más lento, lo que a su vez se traduce en un plazo mayor para compactar el material y facilitar la unión entre capas, y en un calor de hidratación más reducido.

Otros tipos, como las escorias granuladas de alto horno (fly ash), únicamente se han utilizado en dos casos. Hay que destacar que en ambos la mezcla del cemento y la puzolana se realizó en fábrica. En las restantes realizaciones, con una sola excepción, el cemento y la puzolana se mezclaron en obra. Por el contrario, en otros países la falta de adiciones adecuadas ha obligado a la utilización de materiales menos idóneos, como son las cenizas volantes de alto contenido de cal empleadas en la presa Plátano Vrisy (Grecia, altura 95 m, volumen de CCR 420,000 m³), «finos manufacturados» de algunas presas brasileñas. (Jofre, C. & Fernández R.,2003)

4. COMBINACIONES DE PUZOLANAS

Algunas presas francesas de CCR se han construido utilizando conglomerantes que son una combinación de puzolanas (escoria granulada de alto horno, ceniza volante de alto contenido de cal y filler calizo) sin cemento Pórtland. Cabe indicar que Francia es un país muy avanzado en el aprovechamiento de subproductos industriales y en el desarrollo de este tipo de conglomerantes, los cuales son muy

empleados también en obras de carreteras, para la estabilización de explanadas y la ejecución de subbases y bases compactadas con rodillo.

5. FINOS MANUFACTURADOS

Los finos manufacturados se han empleado en algunos países como un filler/puzolana. Se desarrollaron inicialmente en Brasil, donde hay escasez de puzolanas y donde las presas pueden proyectarse para resistir una tracción muy reducida o inexistente, pues no hay cargas dinámicas. Estos finos han dado buenos resultados en este entorno particular, pero no es probable que sean económicos donde haya una fuente de puzolanas normales a un costo razonable. (Jofre, C. & Fernández R.,2003)

6. TIPOS DE PRESAS DE CCR

A partir de los años setenta, la evolución del concepto de presa de concreto compactado ha seguido varias vías diferentes:

- PRESAS DE MEZCLAS POBRES, con un contenido en pasta de 70 a 100 kg/m³, y con colocación de mortero de retorta entre capas. La presa de Willow Creek (Estados Unidos), finalizada en 1982. Varias presas brasileñas, como la de Jordao, 1996 (85 kg/m³ de conglomerante), han sido construidas con este tipo de mezclas;
- PRESAS DE ALTO CONTENIDO DE PASTA, con dosificaciones de conglomerante entre 150 y 270 kg/m³, con una alta proporción de cenizas volantes. Ejemplos: Upper Stillwater (Estados Unidos, 1987), con más de un

millón 125 mil m³ de concreto y una dosificación de 247 kg/m³ de conglomerante; Rialb (España, 2000), con 200 kg/m³, Beni Haroun (Argelia, 2000), con 225 kg/m³. En general, todas las presas españolas de concreto compactado en servicio en 1995 se encuentran dentro de esta categoría.

- PRESAS DE CONTENIDO MEDIO DE PASTA, con dosificaciones intermedias, entre las de los dos grupos anteriores. La presa de Les Olivettes (Francia, 1987), con 130 kg/m³ de un cemento especial), o San Rafael (México, 1994), con 108 kg/m³ de conglomerante, son realizaciones de este tipo.

A estas categorías habría que añadir otras dos: las denominadas Roller Compacted Dams (RCD), concepto seguido en las presas japonesas, y las presas hard-fill.

La diferencia de *LAS PRESAS RCD* con las anteriormente mencionadas no está en la dosificación de conglomerante (hasta el momento ha oscilado entre 120 y 130 kg/m³), sino fundamentalmente en los paramentos, que son de concreto vibrado tanto aguas arriba como aguas abajo, y en el método de puesta en obra. Se extienden espesores de 50-100 cm en diferentes subcapas, que se compactan de una sola vez, en lugar de hacerlo con cada una de las subcapas. Antes de realizar la compactación, se practican cortes en el concreto fresco cada 15 m, empleando un cuchillo vibrante, en los que se insertan inductores de grietas. Se asegura la unión entre capas mediante una limpieza cuidadosa de su superficie y la extensión de una capa gruesa (15 mm) de mortero de retorta.

La presa de Shimajigawa (1980) constituyó la primera aplicación de dicha técnica, con la que se han ejecutado hasta el momento más de una docena. El ejemplo más

notable es la presa de Gassan (2001), con un volumen total de un 160 mil m³ entre concreto compactado y convencional.

LAS PRESAS HARD-FILL están constituidas por un núcleo de materiales granulares estabilizados con cemento, protegido por un paramento de concreto vibrado, a las que se da una forma especial, con taludes 0,5:1 (H:V), para evitar que se produzcan tracciones incluso en las condiciones dinámicas más severas. Con ello, esta forma de presa resulta muy adecuada para un emplazamiento donde haya condiciones de cimentación relativamente débiles y la carga dinámica sea importante.

El cambio producido desde el CCR magro de bajo contenido de conglomerante, de las primeras presas de este tipo hasta el CCR, de contenido más elevado de conglomerante de la obra más recientes parece haberse estabilizado, y desde 1992 la proporción de presas construidas de acuerdo con las diferentes filosofías de diseño ha permanecido relativamente estable, tal y como se indica a continuación:

- Presas de CCR de alto contenido en pasta (contenido de conglomerante 150 kg/m³), 47.92 por ciento
- Presas de CCR de contenido medio en pasta (contenido de conglomerante entre 100 y 149 kg/m³), 19 por ciento.
- Presas RCD (como las construidas en Japón), 16.72 por ciento.
- Presas de CCR de bajo contenido en pasta (contenido de conglomerante 99 kg/m³), 12.9 por ciento

- Presas hard-fill 1.5 por ciento Se ha producido por tanto una evolución desde las presas de CCR de bajo contenido en pasta construidas a principios de los ochenta hacia las presas de CCR de contenido de pasta medio y alto. Las razones de la misma parecen ser cuatro.
 - 1) Un mayor conocimiento del comportamiento del CCR. Como consecuencia de los ensayos llevados a cabo sobre testigos tomados de presas, finalizadas con diferentes tipos de CCR, se ha visto que se puede obtener un excelente comportamiento mediante el uso de contenidos de pasta elevados. Con ello, ha ido creciendo la confianza en el material.
 - 2) El aumento en el tamaño de las presas de CCR. Como consecuencia del tamaño creciente ha surgido la necesidad de mejores propiedades. Los CCR magros han mostrado un comportamiento in situ bastante inferior en cuanto a cohesión y resistencia a la tracción directa que los CCR de contenido elevado en pasta, a los que se atribuye, por ejemplo, el buen comportamiento de las presas españolas.
 - 3) El cambio en la utilización en las presas de CCR. Sólo unas pocas de las primeras presas de CCR se empleaban para producción de electricidad. A finales de los ochenta y comienzos de los noventa se empezaron a utilizar más presas de CCR con esta finalidad, en la cual el agua tiene que ser almacenada en todas las circunstancias. Esto requiere una mejora en la impermeabilidad del material y una confianza en esa impermeabilidad.

- 4) Economía. Debido a la mejora de las propiedades del CCR de alto contenido en pasta, con respecto a las de CCR magro, la sección transversal de una presa de gravedad puede reducirse, especialmente en aquellas zonas donde haya actividad sísmica. A pesar del mayor costo del material, se ha comprobado que el costo total (es decir, volumen x por costo unitario del material, junto con la cimbra de paramentos, etc.) de una presa de CCR de alto contenido en pasta es frecuentemente más reducido que el de una presa equivalente de CCR magro con coeficientes de seguridad similares.

Parece haber una clara separación de las diferentes filosofías de diseño de las presas de CCR. Así, las RCD se han utilizado casi exclusivamente en Japón; mientras en lo que se refiere a las de bajo contenido en pasta, una proporción importante de las mismas se encuentra en Brasil, donde se ha puesto a punto un método adecuado para las condiciones particulares del país, en el que las cargas dinámicas son muy pequeñas o inexistentes y las puzolanas escasas. Las presas de CCR de alto contenido en pasta son las más usadas. (Jofre, C. & Fernández R.,2003)

7. VENTAJAS DE LAS PRESAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO.

La amplia aceptación de las presas de concreto compactado se explica por las grandes ventajas de esta técnica, algunas de las cuales se mencionan a continuación.

Frente a las presas de concreto convencional:

- a. Mayor ritmo de construcción (puede llegar de 2 a 2.5 m cada semana).
- b. Utilización a gran escala de equipos convencionales (dumpers, bulldozers, rodillos); como consecuencia de lo anterior, un costo más reducido.
- c. Extensión por capas de espesor reducido, por lo que se aumenta la seguridad de la obra, al disminuir los desniveles. El mismo efecto tiene la menor importancia de los trabajos de cimbrado.
- d. Menor impacto ambiental, al no precisar realizarse excavaciones en las laderas para los blindajes. (Jofre, C. & Fernández R.,2003)

Frente a las presas de materiales sueltos:

- a. Acortamiento del plazo de ejecución, al colocarse con ritmos similares volúmenes mucho más reducidos (relación 1:4);
- b. Aliviadero sobre la presa.
- c. Conductos de desagüe y tomas más cortas. Torre de toma adosada a la presa y no exenta.
- d. Desvíos más cortos durante la construcción;
- e. Como consecuencia de lo anterior, se establece un costo de ejecución comparable.
- f. Menor impacto ambiental, ya que la menor cantidad de materiales requerida conlleva una disminución de los problemas de tránsito, producción de polvo y cicatrices en las zonas de préstamos;
- g. Soporte de avenidas o vertidos no sólo en servicio, sino también durante la fase de construcción. (Jofre, C. & Fernández R.,2003)

Esta última característica pudo comprobarse de forma fehaciente durante la ejecución de la presa de Santa Eugenia, en el norte de España. En diciembre de 1987, con media presa levantada, ésta soportó dos grandes avenidas que arrastraron varios cientos de metros aguas abajo la maquinaria que no había podido ser retirada, sin que el cuerpo de la presa sufriera daños.

La mayor parte de las presas de concreto compactado son del tipo de gravedad, aunque en algunos países (Sudáfrica y China) se tienen ya ejemplos de presas arco-gravedad, y en China, de presas arco. En todos los casos, el concreto compactado sustituye en el interior de la presa al convencional (es común que, al menos, el paramento aguas arriba se construya con este último). (Jofre, C. & Fernández R.,2003)

Sin embargo, el concreto compactado puede integrarse en la estructura de la presa de otras formas, tales como las siguientes:

- Refuerzo y/o crecimiento de una presa existente;
- Refuerzo aguas abajo de presas de materiales sueltos inseguras, o bien para permitir su desbordamiento;
- Cimentación de presas de fábrica;
- Relleno de cavidades formadas en las presas de materiales sueltos o en el terreno por vertidos o desbordamientos;
- Rellenos para apoyo de estructuras de presas (por ejemplo, desagües).

Una presa de CCR de calidad necesita:

1. Un diseño simple que permita construir la presa rápidamente, lo que se traduce en calidad y economía.

2. Se debe proyectar con el mínimo de obstáculos para la colocación del concreto. Esto es más difícil que proyectar una presa más complicada.
3. Una mezcla cohesiva que no se segregue durante el transporte, extensión o compactación. Si un CCR se segrega, las propiedades in situ serán inferiores a las esperadas. Por otra parte, si el CCR es cohesivo, los métodos de transporte y extensión se simplificarán y esto se traducirá de nuevo en mejoras en la calidad y en la economía.
4. Una metodología de construcción optimada: el método de construcción de una presa de CCR es lineal, y si se produce una falla en cualquier punto de esta línea, desde la producción y el acopio de los áridos, pasando por el eventual enfriamiento de los mismos y la fabricación del concreto, el transporte de este último a la presa, el que se da sobre la presa, la extensión, la compactación, el curado etc., la colocación del CCR puede detenerse. Muy pocas presas de CCR se han construido hasta la fecha, sin que se hayan presentado puntos débiles en algún eslabón de la cadena de producción.
(USACE, 2000)

Los procedimientos de construcción relacionados con CCR requieren una atención especial dada en la disposición y diseño de la carga del agua y control de la filtración, en juntas horizontales y transversales, revestimiento de elementos, y estructuras adjuntas. El diseñador debe aprovechar la libertad proporcionada por la construcción de CCR y usar el criterio de la ingeniería para balancear la reducción en costos y el requerimiento de técnicas relacionadas con seguridad, durabilidad, y el beneficio a largo plazo. Una sección típica transversal de una presa de CCR es mostrada en la Figura 1a, (USACE, 1995) y en la Figura 1b, una terminada.

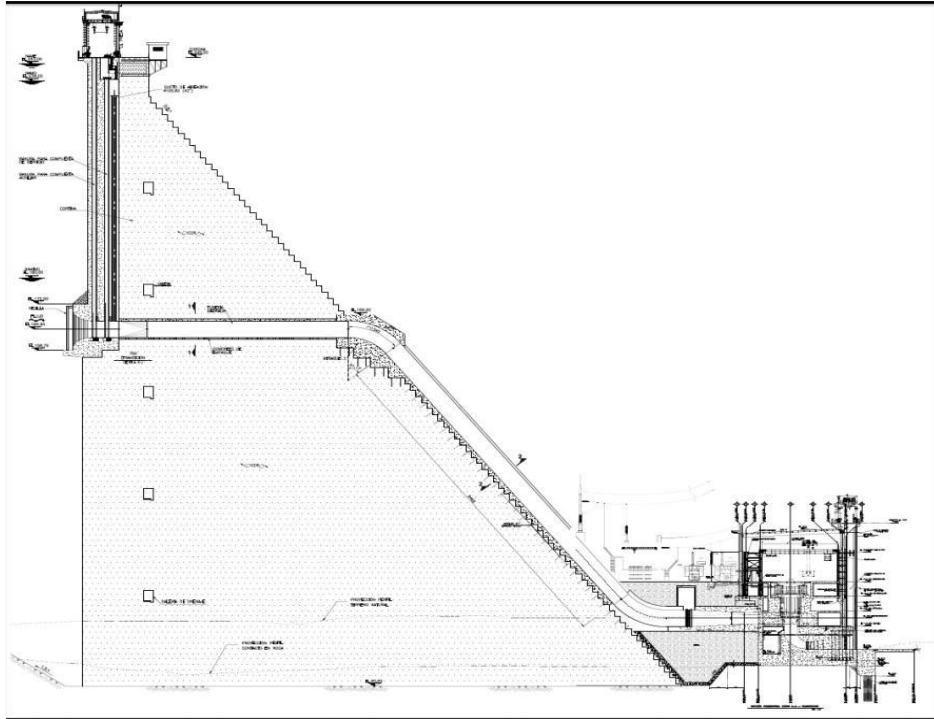


Fig. 1a. Sección típica de una presa de CCR.



Fig. 1b. Sección terminada de una presa de CCR (La Miel, Colombia).

8. MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN

Las técnicas de construcción usadas en la colocación de CCR a menudo resultan en costos unitarios mucho menores por metro cúbico comparado con los métodos de colocación de concretos convencionales. La naturaleza seca e impermeable del CCR hace el uso de un amplio rango de equipo de construcción y colocación continua. Camiones de volteo y cintas transportadoras pueden ser usados en el transporte del concreto de la planta mezcladora a la presa. Los esparcidores mecánicos, como orugas y motoniveladoras, colocan el material en capas o elevaciones; vibradores, rodillos neumáticos junto con bulldozers llevan a cabo la compactación.

El grosor de las capas de colocación se extiende de 20 a 60 cm, que se establece por la capacidad de compactación. Con la flexibilidad de usar mas equipo y la colocación continua, las presas de CCR pueden ser construidos significativamente en un porcentaje mayor que aquellas de concreto convencional.

Un típico diseño de trabajo para la colocación de CCR que difunde la operación es ilustrado en Figure 2. (USACE, 1995)

9. BENEFICIOS ECONÓMICOS

La técnica de construcción de CCR han hecho a las presas de gravedad como una alternativa económicamente competitiva comparadas con estructuras de terraplén. Los siguientes factores atienden a hacer al CCR más económico que otros tipos de presas:

NOTAS DE CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO DE PRESAS DE GRAVEDAD.
DR. HUMBERTO MARENGO MOGOLLÓN.
PROFESOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA.

Ahorro de Material. Los costos de construcción de presas de CCR y concreto convencionales muestran que el costo unitario por metro cúbico de CCR es considerablemente menor. El costo unitario de concreto para ambos tipos de presas varía con el volumen de materiales en la presa. Cuando el volumen aumenta, el costo unitario disminuye. Los ahorros de costos de CCR aumentan cuando el volumen disminuye. Las presas de CCR tienen considerablemente un volumen menor de materiales de construcción que para terraplenes de la misma altura. Cuando la altura aumenta, el volumen *versus* la altura del terraplén de la presa se incrementa casi de manera exponencial en comparación con la presa de CCR.

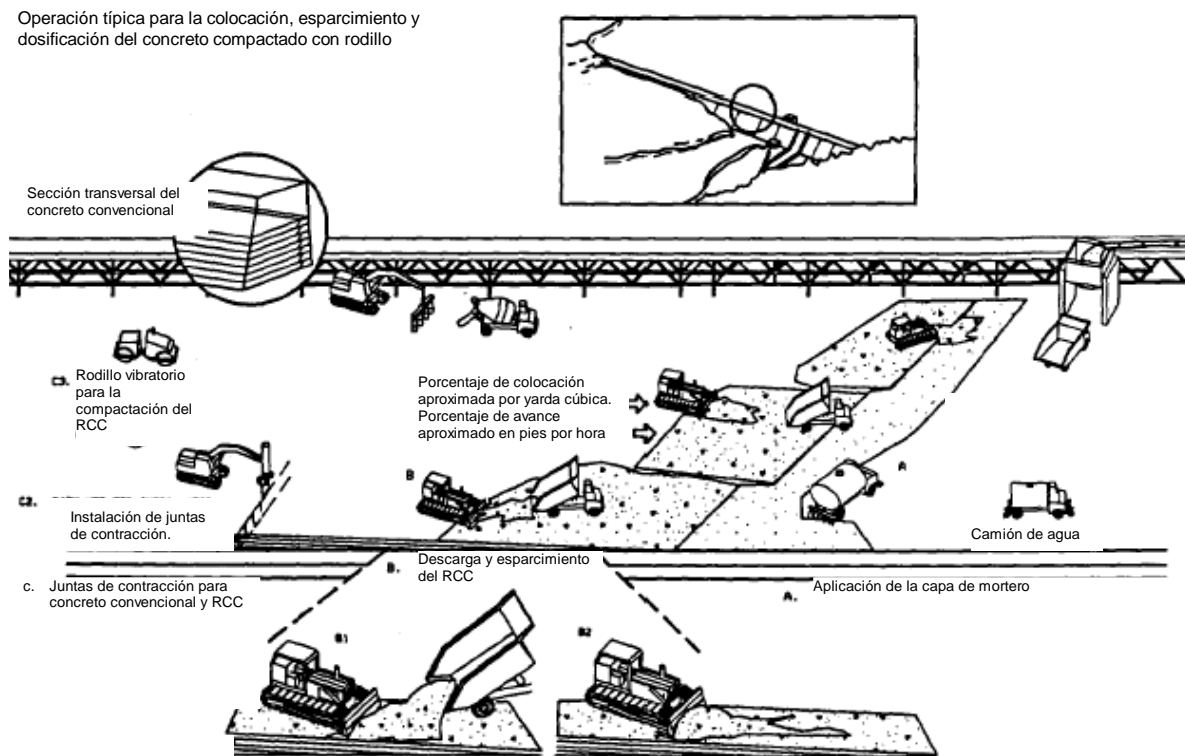


Fig. 2. Proceso de colocación del CCR.

Construcción Rápida. La técnica de construcción rápidas y la reducción del volumen de concreto justifican principalmente los ahorros en costos para presas de CCR. Se han logrado proporciones de colocación máximos de 5,800 a 12,400 yarda cúbicas / día. Estos porcentajes de producción hacen que la construcción de una presa en una temporada de construcción sea fácilmente alcanzable. Cuándo se compara con presas de terraplén, el tiempo de construcción es reducido de 1 a 2 años. Los otros beneficios de la construcción rápida incluyen la reducción de gastos de administración, beneficios tempranos del proyecto, y la selección posible de sitios con temporadas de construcción limitada. Básicamente, la construcción de CCR brinda ventajas económicas en todos aspectos de la construcción de presas que están relacionado con el tiempo. (USACE, 1995)

Vertedores y Estructuras Adjuntas. La ubicación y las alternativas de diseño para vertedores, obras de toma y generación, y otras estructuras adjuntas en presas de CCR proveen ventajas económicas adicionales comparado con presas de terraplén. Los arreglos de estas estructuras son similares a las presas de concreto convencionales, pero con ciertas modificaciones para minimizar la interferencia costosa en la colocación de CCR de manera continua. El diseño permite descargar flujos sobre la cresta de la presa y abajo de la superficie aguas abajo. Por contraste, el vertedor para una presa de terraplén es construido en un estribo al final de una presa o cercano a una cañada natural. En general, el vertedor de una presa de terraplén es más costoso. Para proyectos que requieren múltiples niveles de obras de toma para el control de calidad del agua o para la sedimentación del embalse, la estructura de toma puede ser fijado fácilmente a la superficie agua arriba de la presa. Para una presa de terraplén, el mismo tipo de obra de toma es una torre de

soporte libre en el embalse o una estructura construida en o sobre el borde del embalse de los estribos. Los ahorros económicos para una presa de CCR son considerablemente más barato, especialmente en áreas altamente sísmicas. La dimensión de base más pequeña de una presa de CCR comparado con una presa de terraplén reduce el tamaño y la longitud del conducto y obras de toma y generación. (USACE, 1995)

10. CONSIDERACIONES DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Impermeabilidad y control de filtración. Conseguir la impermeabilidad y controlar la filtración en una presa de CCR es particularmente importante en el diseño y consideraciones de construcción. La filtración excesiva es no deseada en el aspecto de estabilidad estructural y debido a la aparición adversa de la filtración de agua sobre la superficie de la presa aguas abajo, el valor económico relacionado con agua desperdiciada, e impactos adversos a largo plazo sobre la durabilidad. El CCR que ha sido efectivamente proporcionado, mezclado, colocado, y compactado debe ser tan impermeable como el concreto convencional. Las juntas entre las elevaciones de concreto y la superficie de contacto con elementos estructurales son las principales trayectorias para la filtración potencial a través de la presa de CCR. Esta condición es principalmente debido la segregación en los límites de elevaciones y discontinuidades entre las elevaciones sucesivas. También puede ser el resultado de la contaminación de la superficie y los intervalos de tiempo excesivos entre colocaciones de CCR. La filtración puede ser controlada combinando un diseño especial y procedimientos de construcción que incluyen las juntas de

contracción con sellos haciendo impermeable la superficie aguas arriba, sellando la superficie de contacto entre capas de CCR, y drenaje y reunir la filtración.

Revestimiento aguas arriba. El CCR no puede ser compactado eficazmente en contra las formas aguas arriba sin la formación de vacíos en la superficie. Un revestimiento aguas arriba se requiere para producir una superficie con la buena apariencia y durabilidad. Muchos revestimientos incluyen una membrana impermeable. Una membrana impermeable esparcida o pintada en la superficie de concreto convencional es un método; sin embargo, su uso ha sido limitado ya que tales membranas no son suficientemente elásticas para traspasar grietas que se desarrollan debido a la humedad desarrollada entre la membrana y la superficie y el daño subsecuente por las temperaturas de enfriamiento.

Tratamiento de Juntas Horizontales. La fuerza de adherencia y permeabilidad son principalmente concernientes a las juntas de elevaciones horizontales en CCR. Un buen sellado y adhesión son conseguidos mejorando la compacidad de la mezcla de CCR, limpiando la superficie de la junta, y colocando un lecho de mortero entre elevaciones.

Cuando la proporción de colocación y tiempo de fraguado del CCR son tales que la elevación menor es suficientemente plástica para mezclarse y adherirse con la capa superior, el lecho de concreto es innecesaria; sin embargo, esto no es rara vez posible en la construcción normal de CCR. La compacidad es mejorada incrementando la cantidad de mortero y mezclas finas de CCR. Las superficies de

las elevaciones deben estar apropiadamente curadas en húmeda y protegidas. La limpieza de las superficies de las elevaciones antes de la colocación de CCR no es requerida mientras las superficies son mantenidas limpias y libre del exceso de agua. La adición del lecho de mortero sirve para llenar cualquier vacío o depresiones dejadas en la superficie de la elevación previa y reduce los vacíos de bajo de la nueva elevación de CCR cuando es compactada. (USACE, 2000)

Recolección de filtración. Una colección y el sistema de drenaje son un método para detener la filtración de agua para alcanzar la superficie aguas abajo y para prevenir presiones hidrostáticas excesivas en contra del vertedor de concreto convencional o superficie aguas abajo. También reducirá las subpresiones dentro de la presa e incrementará la estabilidad.

Los métodos de colección incluyen drenajes verticales en la superficie aguas arriba y los socavones de drenajes verticales perforados desde adentro de la galería cerca de la superficie aguas arriba o aguas abajo. El agua recolectada puede ser canalizada a una galería o al pie de la presa. (USACE, 1995)

Revestimiento Aguas Abajo de la Cortina. Los sistemas de revestimiento para las secciones de la cortina puede ser requerido para las razones estéticas, manteniendo pendientes más bruscas que el reposo natural de CCR, y protección contra el deshielo en lugares de clima severos. El revestimiento es necesario cuando la pendiente es más brusca que lo $0.8H$ a $1.0V$ cuando el grosor de la elevación es limitado a 30 cm o menor. Las elevaciones más gruesas requieren una pendiente más plana. La experiencia ha demostrado que estas pendientes bruscas

no compactadas pueden ser prácticamente controladas sin equipo especial o formas. (USACE, 1995)

Juntas de Contracción Transversales. Las juntas de contracción transversales son requeridas en la mayoría de las presas de CCR. El potencial de agrietamiento podría ser ligeramente menor en CCR debido a la reducción del agua en la mezcla y a la reducción del incremento de temperatura resultante, de la proporción de una rápida colocación y alturas de elevación menores. Además, las características del CCR punto a punto de contacto reduce la contracción del volumen.

El agrietamiento térmico puede crear una trayectoria de fuga a la superficie aguas abajo que es estéticamente no deseada. Los estudios térmicos deben ser llevados a cabo para evaluar la necesidad de juntas de contracción (USACE, 2000). Las juntas de contracción también pueden ser requeridas en el control del agrietamiento si la configuración de sitio y las condiciones de la cimentación pueden tener en la presa. Si se diseña e instala apropiadamente, las juntas de contracción y no interfieren o complican la operación de colocación continua de CCR. En la presa Elk Creek, las juntas de contracción fueron instaladas sin impacto a las operaciones de colocación de CCR insertando hojas de acero galvanizado en el CCR no compactado para capas enteras y la altura de la presa. Las hojas fueron empujadas verticalmente en el CCR por medio de una pala vibratoria instalada en un tractor, como se muestra en la Figura 3.25.

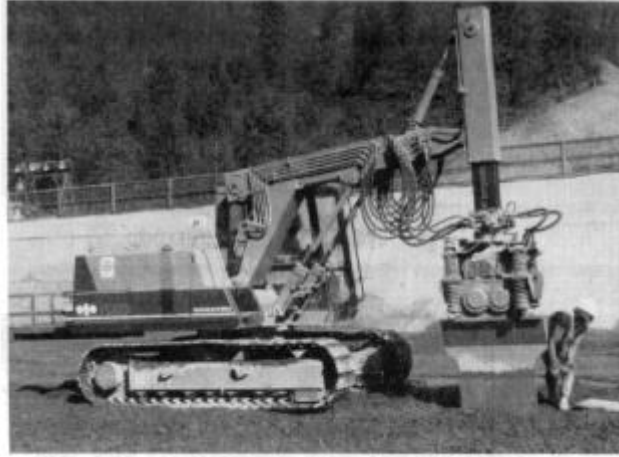


Fig. 3.25 Colocación de juntas de contracción.

11. CONCLUSIONES.

El propósito de este capítulo es presentar un criterio práctico y guía en el diseño de presas de concreto, considerando al concreto convencional y al concreto compactado con rodillo, en donde se exponen las consideraciones necesarias y estudios que deben realizarse, ya sea del sitio donde debe ubicarse, las propiedades de los materiales, así como las suposiciones que deben tomarse, los criterios que deben aplicarse y métodos de construcción.

En el presente capítulo se presenta el procedimiento de análisis de estabilidad de una presa mediante el método del muro independiente, de forma que este método nos presenta como considerar la estabilidad y las cargas que podrían afectar en el diseño de una presa, así mismo se presentan los factores de seguridad que deben tomarse en cuenta para su diseño. Hay que mencionar que este método considera a la estructura como un elemento único, de tal forma que en la realidad no es así, pero nos presenta una forma general de su comportamiento, por lo que para un diseño más preciso de, puede tomarse en cuenta el método del elemento finito el cual presentará un modelo más cercano a la realidad en cuanto a su comportamiento.

Las cargas a las cuales están sujetas las presas, generalmente son las mismas para cada tipo de presa, y esto generalmente depende de su ubicación geográfica y el tipo de clima que se presente, de tal manera que aquí se muestran todas las posibles cargas que ejercen sobre la cortina, la cual el diseñador debe de tener el criterio necesario para seleccionar cuales son las que actúan y tienen efecto directo sobre la presa.

En el diseño de presas de concreto, deben investigarse las propiedades de los materiales de construcción, es importante conocer sus propiedades físicas, térmicas y elásticas, ya que de esta manera conoceremos en forma más exacta el comportamiento de la estructura, así como sus cualidades estructurales y de resistencia. De esta manera el diseño de la presa se asemeja aún más al comportamiento real.

Las presas de Concreto Compactado con Rodillo, en la actualidad se consideran como una alternativa más económica en la construcción de presas de concreto. Debido a la facilidad y rapidez de colocación del CCR, así como la utilización de equipo pesado en su compactación, menor impacto ambiental que en la actualidad se considera primordial, reducción de materiales de construcción, así como una durabilidad mayor de la estructura.