



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE LA CORTINA DE  
CONCRETO ARCO-BÓVEDA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO  
ZIMAPÁN: UNA MEJORA EN LA PROGRAMACIÓN DE OBRA.**

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:  
**ING. TANIA CATALINA ALARCÓN DIONET**

TUTOR PRINCIPAL:  
**DR. HUMBERTO JUAN FRANCISCO MARENGO MOGOLLÓN**

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO. A OCTUBRE DEL 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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 esta 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.

## JURADO ASIGNADO

**Presidente:** Ing. Mendoza Sánchez Ernesto René  
**Secretario:** M.I. Mendoza Rosas Marco Tulio  
**Vocal:** Dr. Marengo Mogollón Humberto J. F.  
**1<sup>er</sup>. Suplente:** M.I. Haaz Mora Hugo Sergio  
**2<sup>do</sup>. Suplente:** Ing. Terrazas y de Allende Jorge I.

Lugar donde se realizó la tesis:

Universidad Nacional Autónoma de México  
Ciudad Universitaria, Ciudad de México.

TUTOR DE TESIS:

**Dr. Marengo Mogollón Humberto Juan Francisco**

-----  
FIRMA

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme acompañado y guiado a lo largo de mis estudios, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo de bendiciones.

A mis padres Edith y Santiago, por ser los principales promotores de mis sueños; por confiar y creer en mí; por impulsarme y apoyarme en cada decisión; gracias por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, por cada consejo y ser mi ejemplo de superación, humildad y amor.

A mi hermana Edith Aimé, por ser un ejemplo de desarrollo profesional a seguir, por llenar mi vida de alegrías y comprensión cuando más lo he necesitado.

A mi familia, por sus palabras de apoyo y demostraciones de orgullo en cada paso que doy.

A Carlos por ser mi inspiración y el complemento de mi vida; por brindarme de su paciencia y amor incondicional en todo momento; por creer en mí y motivarme a ser mejor día con día.

A mis amigos, por su apoyo, comprensión y amistad, sobre todo por ser mi familia en esta ciudad y haber permitido mi etapa de posgrado un trayecto inolvidable.

A mi tutor el Dr. Humberto J.F. Marengo Mogollón, por orientarme, corregirme y apoyarme durante la elaboración de este trabajo, sobre todo por haber compartido conmigo sus conocimientos y su tiempo.

A mis profesores de posgrado, por su confianza, apoyo y dedicación de tiempo para mi crecimiento profesional.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por la oportunidad de cursar mis estudios de posgrado y permitirme ser parte de los alumnos de esta gran casa de estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico durante mis estudios de posgrado.

Finalmente quiero agradecer a todos aquellos que estuvieron presentes durante toda o la mayor parte de la realización y el desarrollo de esta tesis, gracias a aquellos que realizaron aportes a esta y perfeccionaron la elaboración de la misma.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	9
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	10
JUSTIFICACIÓN .....	11
OBJETIVO GENERAL .....	12
I. PRESAS CON CORTINA DE CONCRETO.....	13
II. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO EN CONCRETOS MASIVOS.....	34
III. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ZIMAPÁN .....	60
IV. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CORTINA EN EL P.H. ZIMAPÁN.....	88
V. RESULTADOS .....	120
VI. CONCLUSIONES .....	150
BIBLIOGRAFÍA .....	152

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1 Clasificación general de las cortinas.....	21
Figura I.2 Cortina de arco con doble curvatura.....	22
Figura I.3 Cortina de arco con doble curvatura.....	22
Figura I.4 Vista en planta de una presa con cortina de arco.....	24
Figura I.5 Vista lateral de una cortina de Arco y Arco-Bóveda.....	25
Figura I.6 Clasificación básica de las cortinas de arco.....	27
Figura I.7 Esquema de trabajo general de un proyecto hidroeléctrico (Grandes Rubros).....	28
Figura I.8 Diagrama de flujo general del desarrollo del proyecto de una presa.....	30
Figura I.9 Grúa Torre.....	30
Figura I.10 Retroexcavadora.....	31
Figura I.11 Excavadora.....	31
Figura I.12 Camión volteo.....	31
Figura I.13 Bulldozer.....	31
Figura I.14 Motoniveladora.....	31
Figura I.15 Silos.....	32
Figura I.16 Silobús.....	32
Figura I.17 Cubeta para concreto.....	32
Figura I.18 Cimbra trepante.....	33
Figura I.19 Depósitos clarificadores.....	33
Figura II.1 Generalidades de las estructuras masivas.....	35
Figura II.2 Requerimientos para el óptimo manejo de las estructuras masivas.....	35
Figura II.3 Grafica del calor de hidratación (cal/g) vs tiempo (días) por tipos de cemento.....	41
Figura II.4 Efectos de la temperatura con tuberías internas de enfriamiento.....	54
Figura II.5 Programación de actividades para la construcción de la cortina.....	58
Figura II.6 Actividades a realizar en la construcción de una cortina de concreto.....	58
Figura III.1 Sistema fluvial y red de canales que alimentan al P.H. Zimapán.....	62
Figura III.2 Diagrama de balance de la Cuenca Hidrológica Río Moctezuma 1.....	63
Figura III.3 Imagen satelital del embalse del P.H. Zimapán.....	64
Figura III.4 Climograma de Zimapán.....	65
Figura III.5 Temperatura ambiente promedio ambiental del cañón del Infiernillo.....	65
Figura III.6 Perfil estructural de la boquilla del P.H. Zimapán.....	66
Figura III.7 Foto del recorrido en lancha por el embalse del P.H. Zimapán.....	67
Figura III.8 Camino de acceso a la Casa de Maquinas.....	71
Figura III.9 Ubicación de los caminos de acceso y elementos principales del P.H. Zimapán.....	72
Figura III.10 Planta de trituración de los agregados utilizada en el P.H. Zimapán.....	73
Figura III.11 Principales secciones transversales que se presentan a lo largo del túnel de conducción.....	76
Figura III.12 Sección transversal del pozo de oscilación.....	77
Figura III.13 Turbina Pelton en la casa de máquinas en el P.H. Zimapán.....	79
Figura III.14 Corte transversal al eje de la turbina.....	80
Figura III.15 Cortina del embalse del P.H. Zimapán.....	84
Figura III.161 Esquema del túnel de conducción de: Obra de toma – Casa de Máquinas.....	84
Figura III.17 Proceso de generación hidroeléctrica del P.H. Zimapán.....	85
Figura IV.1 Organigrama de la mano de obra utilizada en la colocación del concreto de la cortina.....	89
Figura IV.2 Esquema del proceso general de la trituración de agregados.....	90

Figura IV.3 Esquema del proceso de trituración primaria en el sitio del banco en el P.H. Zimapán.....	90
Figura IV.4 Esquema de la planta de producción de agregados para concreto en el P.H. Zimapán.....	91
Figura IV.5 Planta de agregados del P.H. Zimapán.....	91
Figura IV.6 Planta de dosificación de concreto utilizada en la presa arco-gravedad Casasola, España. ....	92
Figura IV.7 Fábrica de escamas de hielo, para sustitución del agua de la mezcla del concreto. Rendimiento de 66 ton al día. ....	92
Figura IV.8 Depósito de clarificador de agua fabricado en acero. ....	93
Figura IV.9 Mapa geológico del área del P.H. Zimapán, Geología levantada por M. Carrillo en 1981.....	95
Figura IV.10 Esquema de desvío y cómo es probable que se coloquen las ataguías.....	96
Figura IV.11 Planta general de la superficie de cimentación de los bloques 4 y 5 del P.H. Zimapán.....	99
Figura IV.12 Vista panorámica desde la ribera oriental del Río Moctezuma hacia el banco calcáreo El Doctor, Qro. ....	100
Figura IV.13 Descarga del concreto desde los silobuses a la cubeta en el P.H. Zimapán.....	103
Figura IV.14 Fotos de la movilización y colocación del concreto en el P.H. Zimapán. ....	103
Figura IV.15 Movilización de un silobús en la plataforma a 220m de altura en las instalaciones del P.H. Zimapán.....	103
Figura IV.16 Ejemplo de un ciclo de colado con cubetas de concreto. ....	104
Figura IV.17 Variaciones en las dimensiones de las cimbras de trabajo de levantamiento automático. ....	106
Figura IV.18 Componentes de la cimbra trepadora utilizada en el P.H. Zimapán. ....	106
Figura IV.19 Vista en planta de la disposición de los serpentines del P.H Zimapán. ....	108
Figura IV.20 Esquema del sistema de alimentación y campos de enfriamiento de los Bloques 4 y 5.....	109
Figura IV.21 Colocación del concreto por medio de cubetas en la cortina. ....	109
Figura IV.22 Fotos de la construcción de la cortina del P.H. Zimapán.....	110
Figura IV.23 Foto de trabajadores que lanzan la capa de lechada (espuma) desde la superficie recién vertida en uno de los bloques internos de la presa, en preparación para el próximo levantamiento. ....	111
Figura IV.24 Vista en planta y corte de las características y disposición de los serpentines del P.H Zimapán.....	113
Figura IV.25 Circuitos de las tuberías de la Etapa 1 para un bloque colado.....	114
Figura IV.26 Circuitos de las tuberías de la Etapa 2 para un bloque colado.....	114
Figura IV.27 Campos de enfriamiento de los 3 bloques centrales de la cortina del P.H. Zimapán .....	116
Figura V.1 Programa de construcción inicial utilizado para los estudios del sistema de enfriamiento.....	121
Figura V.2 Temperatura ambiental promedio ambiental del cañón del Infiernillo .....	124
Figura V.3 Temperatura del agua promedio ambiental del cañón del Infiernillo .....	124
Figura V.4 Grafica de la variación de la temperatura en función del tiempo del Bloque 1. ....	125
Figura V.5 Grafica de la variación de la temperatura en función del tiempo del Bloque 2. ....	125
Figura V.6 Grafica de la variación de la temperatura en función del tiempo del Bloque 3. ....	126

Figura V.7 Grafica de la evolución de la temperatura promedio en algunas capas de bloques colados. ....	128
Figura V.8 Resultados de la simulación de la evolución térmica de la cortina del P.H. Zimapán en el mes de Agosto.....	129
Figura V.9 Resultados de la simulación de la evolución térmica de la cortina del P.H. Zimapán en el mes de Octubre.....	130
Figura V.10 Resultados de la simulación de la evolución térmica de la cortina del P.H. Zimapán en el mes de Noviembre .....	131
Figura V.11 Grafica del caudal de agua de refrigeración requerido en función del tiempo. ....	133
Figura V.12 Grafica de la cantidad diaria de calor eliminada por el enfriamiento. ....	134

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1 Principales presas construidas en México en el período de 1946 a 1982 .....	15
Tabla I.2 Principales presas construidas en México en el período de 1983 a 1995 .....	15
Tabla I.3 Principales presas construidas en México en el período de 1995 a 2017 .....	16
Tabla I.4 Situación actual de las presas en México en el período de 2015 a 2017 .....	17
Tabla I.5 Principales presas en México .....	18
Tabla I.6 Puntos a considerar para la selección de la cortina de una presa hidroeléctrica .....	23
Tabla I.7 Relación de presas más altas en el mundo de tipo de Arco.....	26
Tabla I.8 Clasificación de las cortinas de arco de acuerdo a la relación base - altura.....	27
Tabla II.1 Características generales de las presas "Mazatepec", "Santa Rosa" y "Novillo" .....	37
Tabla II.2 Porcentaje total de inclusión de aire de acuerdo al tamaño del agregado grueso de la mezcla. ....	45
Tabla III.1 Características generales de la obra de desvío.....	74
Tabla III.2 Características generales de las ataguías. ....	74
Tabla III.3 Características generales de la cortina. ....	75
Tabla III.4 Niveles característicos de diseño del P.H. Zimapán.....	75
Tabla III.5 Cantidades de obra generados en la construcción de las obras de generación. ....	76
Tabla III.6 Magnitud de la cobertura y del tipo de roca que se excavó en el túnel de conducción. ....	77
Tabla III.7 Principales dimensiones del túnel de conducción. ....	77
Tabla III.8 Principales dimensiones del pozo de oscilación. ....	78
Tabla III.9 Principales dimensiones de la tubería de presión.....	78
Tabla III.10 Principales dimensiones de la casa de máquinas. ....	78
Tabla III.11 Principales dimensiones de la galería de transformadores. ....	78
Tabla III.12 Principales características de la obra de excedencias. ....	79
Tabla III.13 Principales características de las unidades generadoras.....	80
Tabla III.14 Principales características del generador. ....	80
Tabla III.15 Fechas de inicio oficiales de la construcción del P.H. Zimapán .....	81
Tabla III.16 Fechas de inicio presentadas al inicio del proyecto del P.H. Zimapán .....	82
Tabla III.17 Principales problemas presentados en cinco presas hidroeléctricas en México .....	83
Tabla IV.1 Datos de la cortina del P.H. Zimapán .....	89
Tabla IV.2 Principales características de la subestación. ....	90
Tabla IV.3 Tipos de concretos utilizados en el P.H. Zimapán.....	101
Tabla IV.4 Características de los materiales utilizados para el concreto del P.H. Zimapán .....	101



Tabla IV.5	Concretos utilizados en bloques 4 y 5 .....	101
Tabla IV.6	Parámetros del concreto aguas arriba utilizados para el cálculo de enfriamiento....	102
Tabla IV.7	Parámetros del concreto masivo de la cortina en el P.H. Zimapán .....	102
Tabla IV.8	Etapas con elevación del colado del bloque 5.01 .....	105
Tabla IV.9	Características generales del serpentín. ....	109
Tabla V.1	Características del concreto aguas arriba de la cortina. ....	123
Tabla V.2	Características del concreto masivo de la cortina del P.H. Zimapán .....	123
Tabla V.3	Resumen de la variación de temperatura con ambas etapas de enfriamiento en función del tiempo de los tres bloques centrales. ....	127
Tabla V.4	Resumen de la evolución térmica del bloque No. 10 en el bloque central No.2 de la cortina. ....	132
Tabla V.5	Duración de construcción de la cortina de ambos escenarios a evaluar. ....	138
Tabla V.6	Presupuesto total del P.H. Zimapán (Grandes Rubros). ....	139
Tabla V.7	Estimación de la programación de construcción y egresos anuales de las obras civiles principales, en Miles de pesos, del P.H. Zimapán .....	140
Tabla V.8	Resumen de las generalidades de ambos escenarios a evaluar. ....	144
Tabla V.9	Datos de los precios de la electricidad del 1er trimestre del 2006. ....	144
Tabla V.10	Resumen del análisis económico de la Inversión No. 1 .....	147
Tabla V.11	Resumen del análisis económico de la Inversión No. 2 .....	148
Tabla V.12	Cuadro comparativo de los resultados económicos de ambas inversiones. ....	149

## RESUMEN

Dentro del campo de la ingeniería, uno de los tópicos que ha sido de gran beneficio para toda la humanidad es la generación de electricidad a partir de recursos hidrológicos.

La carencia de información integral de los sistemas de enfriamiento en concretos masivos, que implican muchos subprocesos de análisis, diagnóstico y construcción, crea atrasos en los trabajos en obra y problemas que afectan la calidad de las presas hidroeléctricas, es por ello que surge la necesidad de determinar el impacto en tiempo, calidad y costos que tiene la modificación del sistema de enfriamiento en una cortina de concreto masivo.

Para encontrar dicha modificación en la programación de la construcción, este estudio se realizó con un desarrollo progresivo de diferentes etapas que inicia desde la recopilación bibliográfica de los sistemas de enfriamiento hasta la evaluación de las simulaciones realizadas por los Ingenieros Consultores Lombardi S.A. del sistema de enfriamiento utilizado en el Proyecto Hidroeléctrico Zimapán, además de un análisis de los resultados de manera cualitativa y económica.

La intensificación del sistema de enfriamiento trajo consigo mejor calidad en el concreto, reducción en el tiempo de funcionamiento del sistema de enfriamiento, obteniendo 30 días menos en la construcción de la cortina y con ello un funcionamiento anticipado de la central para generación de energía comercial. Sin embargo, esto presento un aumento en el costo total de la obra civil, pero se obtuvo mayor ganancia durante la vida útil del proyecto.

Finalmente, con estos resultados se logró erradicar la falsa impresión de que el costo de enfriamiento adicional no es factible para proyectos de esta índole. Un enfriamiento más rápido con un ligero costo adicional resulta en una reducción sustancial del costo a largo plazo de algunos artículos y, en nuestro caso, obtención de una mayor ganancia durante la vida útil del proyecto.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los puntos críticos en la construcción de una central hidroeléctrica es la construcción de la cortina, ya que incluye procesos y subprocesos que limitan y repercuten en la realización de actividades posteriores. En el caso del Proyecto Hidroeléctrico (P.H.) Zimapán no fue la excepción, en ella se tuvieron que ir solventando una gran cantidad de problemas que afectaron la programación general del proyecto. Una de las actividades a tratar, fue la implementación del sistema de enfriamiento, para el control de la temperatura del concreto masivo.

La carencia de información integral de los sistemas de enfriamiento, que implican muchos subprocesos de análisis, diagnóstico y construcción, crea atrasos en los trabajos en obra y problemas que afectan la calidad de las estructuras, debido a la ejecución de procesos que han sido vistos solo de forma empírica, contando únicamente con los conocimientos adquiridos.

Por tal motivo, con base en los estudios del sistema de enfriamiento del P.H. Zimapán se busca determinar el impacto que tiene este sistema en el proceso constructivo de una cortina de concreto, mejorar la programación y calidad constructiva, documentar la experiencia de este proyecto y determinar el impacto económico de su optimización. El desarrollo de nuestro caso de estudio atiende a la necesidad de administrar el conocimiento experimentado en esta construcción para la buena ejecución de futuros proyectos.

En la construcción de una presa hidroeléctrica, las variables de trabajo son numerosas, por lo que documentar cada una de ellas servirá de base para futuras estructuras similares o con características afines. Brindando antecedentes de trabajo, que permitan ordenar y solucionar con un alto grado de eficiencia, las actividades que una estructura de este tipo implica, logrando crear procesos y subprocesos de construcción que formen una línea fija de trabajo y estudio a la hora de iniciar una construcción tan importante como lo es una presa.

## JUSTIFICACIÓN

Todo proyecto que se pretende ejecutar es necesario y de vital importancia planificar, programar y controlar, igualmente interpretar y evaluar resultados de estudios realizados por los especialistas en cada área

El diseño y construcción de este tipo de obras que utilizan concreto masivo, generalmente incluyen un sistema de enfriamiento de la masa de concreto con el propósito de disminuir los efectos patológicos del calor de hidratación evitando su agrietamiento, por lo que es importante saber y relacionarse con el funcionamiento del mismo. Las presas son estructuras de gran importancia para el desarrollo del país, por lo que enfocarse en estudiar la seguridad y sus deficiencias en la programación de su construcción, es un punto importante para el buen desempeño de las mismas, garantizando así su función, calidad y éxito del proyecto.

Existen diferentes criterios para la elección del sistema de enfriamiento más adecuado para la estructura. Por tal motivo con la realización de este trabajo se pretende:

- Contribuir a la información bibliográfica existente de los sistemas de enfriamiento con la evaluación de los resultados de la cortina de una presa hidroeléctrica y la implementación de ellos en la programación de la obra, de tal manera que sea una guía rápida de consulta para estudiantes y profesionales interesados en este tema.
- Proporcionar al profesionista que se desempeñe en esta área, una visión general del funcionamiento e importancia del sistema de enfriamiento, la cual coadyuvará a la buena ejecución de juicios en la construcción, ordenando sus actividades y su intervención directa y oportuna en el desarrollo del proyecto.
- Marcar la relación entre la programación de obra y el funcionamiento del sistema de enfriamiento, brindando el impacto que tiene en costos, calidad y tiempo.
- Lograr la competitividad y mejora continua de los procesos constructivos relacionados con el sistema de enfriamiento.

En proyectos de generación de energía eléctrica, como el caso de una presa, anticipar o cumplir con la programación del llenado del embalse permite la producción de energía para uso comercial, es decir, generar ingresos antes de tiempo. Por lo que buscar mejorar la calidad de la estructura y reducir tiempo en la programación de los procesos para el funcionamiento anticipado de la presa, genera beneficios considerables al proyecto.

## OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo es evaluar el funcionamiento del sistema de enfriamiento y con base en ellos modificar la programación constructiva de la cortina de concreto de un proyecto hidroeléctrico. Con la finalidad de determinar el impacto en tiempo y costos de la modificación, mejorar la calidad de la estructura, documentar la experiencia de este tipo de proyectos y determinar la funcionalidad del sistema de enfriamiento. Esto se logrará mediante la experiencia obtenida en el proyecto hidroeléctrico Zimapán y proyectos anteriores que de manera empírica han sentado las bases para la optimización de los procesos del sistema de enfriamiento en concretos masivos.

Para el alcance de nuestro objetivo, se cumplirán los siguientes objetivos específicos. En el capítulo I se identificarán las generalidades de las presas, su situación actual y los aspectos generales de su clasificación. De igual forma, se resumirá todo lo relacionado en el ámbito constructivo de las presas con cortina de concreto masivo, como programación y maquinaria requerida para la realización de este tipo de proyectos.

El capítulo II determinará los principios fundamentales de los concretos masivos y de los sistemas de enfriamiento utilizados en las presas con cortinas de concreto, dando una descripción general de los conceptos, procesos y maquinaria utilizada en las cortinas de este tipo.

En el capítulo III se mencionarán las generalidades del proyecto, desde su localización, importancia de los estudios previos, hasta el resumen a detalle de los componentes y elementos, para la generación de energía de la central, del P.H. Zimapán.

El capítulo IV establecerá un acercamiento al proceso constructivo de la colocación del concreto masivo y del sistema de enfriamiento en la cortina del P.H. Zimapán, abarcando de manera general la maquinaria, equipo, herramienta y mano de obra utilizada en la construcción de una presa de este tipo.

En el capítulo V se presentarán los resultados de esta investigación, se interpretarán las simulaciones realizadas por los Ingenieros Consultores Lombardi S.A del sistema de enfriamiento del P.H. Zimapán, y con base en ellos, se buscará optimizar la programación constructiva de la cortina. Se evaluará cualitativa y económicamente dicha propuesta, con la finalidad de conocer el impacto que tiene en costos la modificación del sistema de enfriamiento con los beneficios de la presa hidroeléctrica durante su vida útil.

Finalmente se presentarán las conclusiones generales y las recomendaciones de la tesis, involucrando los aspectos más importantes en el desarrollo de este trabajo.

---

## I. PRESAS CON CORTINA DE CONCRETO

---

### 1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo identificarán las generalidades de las presas, su situación actual y los aspectos generales de su clasificación. De igual forma, se resumirá todo lo relacionado en el ámbito constructivo de las presas con cortina de concreto masivo, como programación y maquinaria requerida para la realización de este tipo de proyectos. Con el fin de brindar un panorama de la misma y de los conceptos relacionados para el desarrollo constructivo de un proyecto hidroeléctrico de este tipo. La información reunida para este capítulo generaliza el contexto de la tesis y no se profundizará en la información de la misma, ya que hoy en día se cuenta con bibliografía muy importante y relevante al respecto.

En el presente trabajo, el concepto de presa será el conjunto de estructuras que se utilizan para aprovechar o defenderse del agua; y al elemento estructural que impide el paso del agua, se referirá a la cortina. De igual forma, se introduce a la clasificación de las cortinas la cual puede ser según su propósito y de acuerdo a sus materiales de construcción, para ubicar la de nuestro interés, que son las de concreto.

### 1.2 INTRODUCCIÓN A LAS PRESAS

Las presas son una barrera artificial que se construye en algunos ríos para embalsarlos y retener su caudal. La literatura reporta varias definiciones de lo que es una presa. Por ejemplo, la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 2008) la define como *“Una obstrucción artificial al flujo natural de agua, que se construye con uno o más propósitos específicos como la acumulación de agua para la irrigación, la generación de energía eléctrica, la creación de un lago artificial para la navegación o actividades recreativas, el abastecimiento de agua a las ciudades o a la industria, la prevención de inundaciones, la desviación de ríos hacia canales, y para tener una reserva de agua fresca”*.

Por otro lado, en México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 1999) afirma que *“Las presas son barreras artificiales que están construidas generalmente con materiales térreos o a base de concreto con la finalidad de controlar o almacenar agua para una gran variedad de usos. Se pueden colocar a través de una corriente de agua o fuera del cauce”*.

Los motivos principales para construir grandes presas son (Mates Pajares, 2007):

- Concentrar el agua del río en un sitio determinado.
- Generar electricidad.
- Regular el agua y dirigirla hacia canales y sistemas de abastecimiento
- Aumentar la profundidad de los ríos para hacerlos navegables
- Controlar el caudal de agua durante los periodos de inundaciones y sequías
- Crear pantanos para actividades recreativas.

Hoy en día, muchas presas desempeñan varias de estas funciones.

### 1.2.1 Reseña histórica de las presas en México

Es importante hacer mención de algunos datos históricos que permitan recordar cómo han ido evolucionando estas estructuras de ingeniería que constituyen el tema de las presas. La historia de las presas en México se inicia en 1550, cuando las aguas de la laguna de Yuriria en Guanajuato, se confinaron con bordos hasta de 12 m de alto, para almacenar 221 (millones de metros cúbicos)  $Mm^3$  y destinarlos al riego; de la misma manera se presenta un punto de referencia muy singular en 1995 con la terminación de la presa Huites, sobre el río Fuerte en Sinaloa, con su múltiple finalidad de riego, generación de energía eléctrica y protección contra inundaciones, y más recientemente con la construcción de dos grandes proyectos hidroeléctricos en la cuenca del río Lerma Santiago, El Cajón terminado en el 2006 y La Yesca en el 2012, que están entre las más altas del mundo en su tipo y, junto con Chicoasén, han recibido el reconocimiento internacional consideradas como "Milestone Dam Projects" (Carpio Riva, 2013).

De acuerdo con el avance que al 2011 registra la base de datos que está integrando la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), existen en el territorio mexicano más de 4 mil presas, construidas tanto por dependencias gubernamentales como por particulares, para hacer frente a problemas de sequías, inundaciones y satisfacción de necesidades de agua potable (CONAGUA, 2011).

El ICOLD considera que las grandes presas son aquéllas que superan los 15 metros de altura o que con más de 5 metros tiene un volumen de embalse de más de  $3Mm^3$  y de acuerdo a esta definición, en México hay 1017 grandes presas de las cuáles, con 202 se emite la política hidráulica de México.

En 1926 se creó la Comisión Nacional de Irrigación, para desarrollar un programa de agricultura de riego, que requirió de un esfuerzo importante en el campo del diseño y construcción de presas, ejerciendo presupuestos importantes que permitieron la contratación de empresas estadounidenses que contaban con técnicos experimentados en ambos campos.

Por la Comisión Nacional de Irrigación se construyeron varias presas, entre las que destacan la Lázaro Cárdenas en la Región Lagunera, Marte R. Gómez en el río San Juan Tamaulipas y Manuel Ávila Camacho en Puebla, todas ellas con cortinas de tierra y roca. Es a partir de entonces que los conceptos de mecánica de suelos se aplican sistemáticamente al diseño y construcción de presas de materiales graduados, con la tendencia a lograr presas más seguras y económicas, llegándose a desarrollar en México técnicas y equipos de laboratorio propios para determinar las propiedades de los materiales de construcción.

En 1937 se creó la Comisión Federal de Electricidad, que también ha participado en forma importante en el diseño y construcción de presas y en la investigación inherente a estos procesos. Con la experiencia adquirida, disponiendo cada vez de más y mejores herramientas para el diseño y contando con maquinaria de construcción en constante evolución, inició el auge en construcción de presas. En el registro de las principales presas terminadas, ordenando cronológicamente, observamos que entre 1946 y 1982, se

terminaron 31 presas de gran altura, con capacidad conjunta de casi 105 mil Mm<sup>3</sup>, entre ellas destacan las que se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 *Principales presas construidas en México en el período de 1946 a 1982*

<b>NOMBRE</b>	<b>RIO</b>	<b>ESTADO</b>	<b>ALTURA (m)</b>	<b>TIPO</b>	<b>CAPACIDAD TOTAL (Mm<sup>3</sup>)</b>
Ing. Manuel Moreno Torres (Chicoasén)	Grijalva	Chiapas	261	Tierra-roca	1,439
El infiernillo	Balsas	Michoacán	149	Tierra-roca	12,000
Belisario Domínguez (La Angostura)	Grijalva	Chiapas	144	Tierra-roca	18,500
Netzahualcóyotl (Malpaso)	Grijalva	Chiapas	138	Tierra-roca	12,960
Plutarco Elías Calles (El Novillo)	Yaqui	Sonora	134	Arco	3,500
Presidente Miguel Alemán (Temascal)	Tonto	Oaxaca	76	Tierra-roca	9,000

A partir de 1983 y hasta 1995, el panorama que se presenta es diferente y está caracterizado por la construcción de un gran número de presas de mediana altura y moderada capacidad de almacenamiento, destinadas en su gran mayoría al riego de tierras con extensiones medianas y pequeñas. En este período se terminaron 105 presas importantes, con almacenamiento conjunto de 27, 700 Mm<sup>3</sup>.

Tabla 1.2 *Principales presas construidas en México en el período de 1983 a 1995*

<b>NOMBRE</b>	<b>RIO</b>	<b>ESTADO</b>	<b>ALTURA (m)</b>	<b>TIPO</b>	<b>CAPACIDAD TOTAL (Mm<sup>3</sup>)</b>
Zimapán	Moctezuma	Hidalgo	200	Arco-Bóveda	1,019
Aguamilpa	Grande de Santiago	Nayarit	187	Enrocamiento	5,710
Lic. Luis Donaldo Colosio	Fuerte	Sinaloa	160	Gravedad y arco	4,568
Carlo Ramírez Ulloa (El Caracol)	Balsas	Guerrero	126	Tierra-roca	1,860
Gral. Ramón Corona Madrigal (Trigomil)	Ayuquila	Jalisco	107	Gravedad	324
Constitución de Apatzingán (Chilatán)	Cupatitzio	Michoacán	103	Tierra-roca	806
Trojes Solidaridad	Barreras	Jalisco	87	Tierra-roca	294
Ing. Guillermo Blake Aguilar (El Sabinal)	Ocoroni	Sinaloa	81	Tierra-roca	488
Ángel albino Corzo (Peñitas)	Grijalva	Chiapas	53	Tierra-roca	1,628
El cuchillo Solidaridad (El Cuchillo)	San Juan	Tamaulipas	44	Tierra-roca	1,785



La ingeniería mexicana de presas se ha distinguido en el mundo entero por su avance en el estudio, diseño y construcción. Algunos de los ejemplos de su capacidad para las grandes presas han sido Aguamilpa, Huites, Zimapán, la Yesca y el Cajón.

Tabla 1.3 *Principales presas construidas en México en el período de 1995 a 2017*

NOMBRE	RIO	ESTADO	ALTURA (m)	TIPO	CAPACIDAD TOTAL (Mm <sup>3</sup> )
Ing. Alfredo Elías Ayub (La Yesca)	Río Santiago	Nayarit	208.5	Enrocamiento con Cara de Concreto (ECC)	2292
Leonardo Rodríguez Alcaine (El Cajón)	Río Santiago	Nayarit	186	ECC	2551
El Realito	Río Santa María	Guanajuato	90.5	Gravedad-Concreto Compactado con Rodillo (CCR)	50
Picachos	Río Presidio	Sinaloa	80	Concreto Compactado con Rodillo (CCR)	322

### 1.2.2 Estado actual de las presas en México

Hoy en día en México se cuenta con 5 166 presas y bordos, número que aumenta de forma constante (CONAGUA, 2013). La capacidad de almacenamiento de los vasos es de 138,080 Mm<sup>3</sup>, que representa el 41% de los volúmenes de escurrimiento natural medio del país (CONAGUA, 2011).

En el Programa Nacional de Infraestructura (PNI), donde se describen los principales proyectos dentro del rubro de infraestructura hidroagrícola y de control de inundaciones, correspondientes a los años de 2014-2018 se reitera la necesidad de que haya inversiones conjuntas entre el sector público y el sector privado, e incluso se habla de una democratización del agua dentro de la cual quedarían insertos los proyectos de infraestructura hídrica. En este último programa, se pone especial énfasis en la región sureste donde se pretende aprovechar la abundancia de recursos naturales, en un contexto regional de poco desarrollo en cuanto a infraestructura se refiere (Pérez Macías, Peral Garibay, & Pérez Jiménez, 2017).

Los principales proyectos que señala el PNI 2014-2018, dentro del sector hidráulico, con referencia construcción de presas son (Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018):

1. Presa Piedras Azules, Chihuahua
2. Presa Rocheachi, Chihuahua

3. Presa El Yathé, Hidalgo
4. Presa El Zapotillo, proyecto de abastecimiento de agua potable para la ciudad de León (Jalisco y Guanajuato)
5. Presa La Laja, zona conurbada de Ixtapa-Zihuatanejo en el estado de Guerrero
6. Proyecto Nuevo Guerrero (La Parota), Guerrero
7. Aprovechamiento Hidráulico de Usos Múltiples Paso de la Reina, Oaxaca
8. Las Cruces, Nayarit
9. Central Hidroeléctrica Chicoasén II, Chiapas
10. Tenosique, Tabasco/Chiapas
11. Presa de Almacenamiento la Maroma, San Luis Potosí
12. Chiapas (Angostura II), Chiapas
13. La Yesca U1 y U2, Nayarit
14. Sistema Purgatorio-Arcediano, Guerrero
15. Santa María, Sinaloa.

La situación de algunas de ellas se muestra en la siguiente tabla, hasta el año 2017.

Tabla I.4 *Situación actual de las presas en México en el período de 2015 a 2017*

NOMBRE	ESTADO	ALTURA (m)	Año de terminación	CAPACIDAD TOTAL (Mm <sup>3</sup> )
Santa María	Sinaloa	120	En construcción (Inició en Marzo 2015)	979
Zapotillo	Jalisco	80	Detenida	911
Bicentenario	Sonora	67	En construcción (Inició Sept 2013)	488

*Fuente: (Pérez Macías, Peral Garibay, & Pérez Jiménez, 2017)*

Al cierre de 2015 se reportó 97 centrales de generación hidroeléctrica con una capacidad total de 12,488.5 MW, 0.5% mayor que lo reportado en el año anterior. En 2014 se reportó el mayor incremento de capacidad de los últimos años con 796 MW mientras que en el 2015 sólo se adicionaron 59.5 MW al SEN. Entre 2005 y 2015 la producción de electricidad proveniente de hidroenergía creció a un ritmo de 2.1% anual. Sin embargo, las constantes sequías continuaron afectando de manera negativa a la generación de energía hidroeléctrica, reduciéndose 7,930.4 GWh entre 2014 y 2015 (SENER, 2016).

Las centrales hidroeléctricas son el futuro de la generación de energía eléctrica en México, son detonadoras de progreso y desarrollo económico en los lugares de afectación, lo cual, con la política mundial actual y en la búsqueda del abatimiento del calentamiento climático, cobra relevancia como la fuente de generación de energía eléctrica en México más fuerte utilizando recursos renovables que no contaminan y no promueven el efecto de gas invernadero (Ramos Gutiérrez & Montenegro Fregoso, 2012).

Las tendencias actuales muestran que la mayoría de los desarrollos hidráulicos futuros se basaran más en grandes proyectos que en pequeños. La principal inversión durante el siglo XXI será en muy grandes presas, con costos promedio de algunos cientos de millones de dólares estadounidenses. Probablemente habrá más presas con alturas mayores a 100 m, pero un menor número de hidroeléctricas con embalses de gran volumen, en comparación con el pasado.

El beneficio total de las presas durante el XXI será cinco veces mayor que el beneficio producido desde 1950; los problemas técnicos, económicos y ambientales no deberán interferir en la implementación de estas extraordinarias benéficas estructuras (Marengo Mogollón, 2018).

### 1.2.3 Principales presas en México

La tabla 1.5 muestra las 30 presas más grandes en el país y sus características; en ella podemos encontrar el P.H. Zimapán, en la posición número 22, la cual es el caso de estudio del presente trabajo.

Los usos de estas presas son de irrigación (I), uso público (U), control de avenidas (CA) y generación de energía eléctrica (GE).

Tabla 1.5 Principales presas en México

No.	NOMBRE	CAPACIDAD AL NAMO (Mm <sup>3</sup> )	REGION HIDROLOGICA-ADMINISTRATIVA	USOS
1	Dr. Belisario Domínguez La Angostura	13,169	XI Frontera Sur	GE
2	Netzahualcóyotl Malpaso	12,373	XI Frontera Sur	GE y CA
3	Infiernillo	9,340	IV Balsas	GE
4	Presidente Miguel Alemán Temascal	8,119	X Golfo Centro	GE y I
5	Solidaridad Aguamilpa	5,540	VIII Lerma-Santiago- Pacifico	GE y I
6	Internacional La Amistad	4,040	VI Río Bravo	GE, CA, I, U
7	Vicente Guerrero Las Adjuntas	3,910	IX Golfo Norte	I, U
8	Internacional Falcón	3,265	VI Río Bravo	CA, GE, U
9	Adolfo López Mateos El Humaya	3,086	III Pacifico Norte	GE, I
10	Álvaro Obregón El Oviachic	2,989	II Noroeste	GE, I
11	Miguel Hidalgo y Costilla El Mahone	2,921	III Pacifico Norte	GE, I
12	Luis Donald Colosio, Huites	2,908	III Pacifico Norte	GE, I

13	La Boquilla Lago Toronto	2,894	VI Rio Bravo	GE, I
14	Lázaro Cárdenas El Palmito	3,336	VII Cuencas Centrales del Norte	I, CA
15	Plutarco Elías Calles El Novillo	2,833	II Noroeste	GE, I
16	Miguel de la Madrid Cerro de Oro	2,600	X Golfo Centro	I
17	José López Portillo El Comedero	2,580	III Pacifico Norte	GE, I
18	Leonardo Rodríguez Alcaine El Cajón	2,552	VIII Lerma- Santiago-Pacifico	GE
19	Ing. Alfredo Elías Ayub La Yesca	2,293	VIII Lerma- Santiago-Pacifico	GE
20	Gustavo Díaz Ordaz Bacurato	1,860	III Pacifico Norte	GE, I
21	Ing. Carlo Ramírez Ulloa El Caracol	1,458	IV Balsas	GE
22	<b>Ing. Fernando Hiriart Balderrama Zimapán</b>	<b>1,390</b>	<b>IX Golfo Norte</b>	<b>GE</b>
23	Manuel Moreno Torres Chicoasén	1,385	XI Frontera Sur	GE
24	Venustiano Carranza Don Martín	1,313	VI Rio Bravo	I
25	Cuchillo- Solidaridad El Cuchillo	1,123	VI Rio Bravo	U, I
26	Ángel Albino Corzo Peñitas	1,091	XI Frontera Sur	GE
27	Presidente Benito Juárez El Marqués	964	V Pacifico Sur	I
28	Adolfo Ruíz Cortines Mocuzari	950	II Noroeste	GE, I
29	Solís	800	VIII Lerma- Santiago-Pacifico	I, CA
30	Lázaro Cárdenas La Angostura	703	II Noroeste	I, U

Fuente: (CONAGUA, 2017)

#### 1.2.4 Componentes de una presa

Una presa la constituyen varios componentes, ya sean naturales o hechos por el hombre, entre los principales se encuentran (Tellez Quintanar, 2012):

- Cuenca. Área de captación de la lluvia.
- Parte aguas. Es el límite de la cuenca y como su nombre lo indica separa el agua entre cuencas vecinas.
- Vaso de almacenamiento. Se forma por la presencia de la cortina.

- Boquilla. Sitio donde se localiza la cortina.
- Vaso. Es el área en dónde queda almacenada el agua formando un lago artificial.
- Cortina. Obstáculo que se interpone a la corriente para formar un vaso de almacenamiento.
- Obra de desvío. Permite desviar la corriente del río para permitir la colocación de la cortina.
- Obra de excedencias. Su objetivo es descargar el agua que está en exceso dentro del vaso de almacenamiento.
- Obra de toma. Su función es extraer el agua del vaso de almacenamiento en forma controlada para satisfacer una o varias demandas.
- Obra de control. Se dice que es de control ya que permite regular el agua que es desalojada por la obra de excedencias y poder dosificarla para garantizar la seguridad de las poblaciones aguas abajo

### 1.3 INTRODUCCIÓN A LAS CORTINAS

En teoría, una cortina puede ser de cualquier material que soporte el empuje del agua, siempre que cumpla con los principios básicos de toda obra de ingeniería civil: resistencia, deformabilidad, impermeabilidad y costo.

Existen diversas formas de clasificarlas; en algunos casos se clasifican por los materiales que están constituidas, pero esa forma no es adecuada para evaluar su comportamiento. Es más racional agruparlas según su desempeño estructural y fundamentalmente se dividen en rígidas y flexibles; después, se clasifican conforme a los materiales de que están formadas, ya que de ellos depende el comportamiento. Por lo que, las cortinas se suelen clasificar de acuerdo a tres características básicas:

- Altura estructural
- Función
- Materiales

La clasificación más utilizada por altura, es la brindada por la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD), que las define como Grandes a aquellas que tienen una cortina con altura mayor a 15 m desde el desplante. También se consideran grandes, aquellas con altura de cortina entre 5 y 15 m, que almacenan más de 3 hm<sup>3</sup>. Se consideran Pequeñas a aquellas con altura entre 5 y 15 m, que almacenan entre 0.5 y 3 hm<sup>3</sup> (Murillo Fernández, 2012).

Por su funcionamiento hidráulico, podemos clasificar a las cortinas como:

- Almacenamiento (71%)
- Derivación (12%)
- Regulación y control de avenidas (12%)
- Otras

La clasificación por comportamiento adoptada por la CONAGUA para cortinas y diques es (CONAGUA, 2012):

- Rígidas
- Flexibles
- Intermedias

Estas a su vez se sub-clasifican de acuerdo a su sección, en las rígidas encontramos de:

- Gravedad
- Arco
- Arco Bóveda
- Arco Gravedad
- Contrafuerte o Machones
- Muros y Losas

En las flexibles:

- Tierra y/o Enrocamiento
- Gaviones



Figura 1.1 Clasificación general de las cortinas.

Fuente: Adaptado de (CONAGUA, 2012).

### 1.3.1 Cortinas rígidas

Este tipo de cortinas presentan deformaciones pequeñas, son construidas con materiales cementados que resisten las fuerzas actuantes, ya sea por su peso propio o transmitiéndolas a su cimentación por medio de su arreglo estructural.

En ellas se encuentran las cortinas de gravedad, las cuales se adaptan a sitios donde la cimentación corresponde a una roca sana. Por otro lado, las cortinas de arco se construyen en sitios donde la relación ancho-altura de la boquilla no es muy grande y los apoyos laterales están constituidos por roca sana, capaz de soportar los empujes de arco. Por último, las cortinas con contrafuertes o machones, están formadas por un frente más o menos plano y un contrafuerte con forma triangular. Generalmente requieren 30 – 60% menos de concreto o mampostería en comparación con las cortinas de gravedad tradicionales (Tellez Quintanar, 2012).

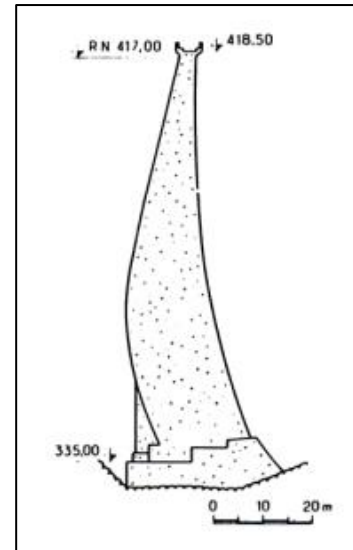


Figura 1.2 Cortina de arco con doble curvatura.

### 1.3.2 Cortinas flexibles

También son llamadas cortinas de terraplén, y su subdivisión está basada en la composición interna de su cuerpo, entre las cuales se encuentran de:

- Enrocamiento, si la mayor cantidad de material empleado es éste, ya sea con cara de concreto o con otros elementos impermeables como la arcilla (también se utiliza el concreto asfáltico, acero, cobre o geomembranas de polímeros en otros países).
- Sección homogénea, cuando principalmente están formadas de suelos finos (arcillas, limos) compactados o no, que pueden tener, además, inclusiones verticales como drenes (chimmey drain) o muros rígidos o celulares, horizontales como filtros, galerías y conductos de diversos materiales como arena, grava-arena, concreto, acero, etc.
- Material graduado, si existe un núcleo de baja permeabilidad confinado entre materiales de mayor permeabilidad (filtro de arena) y éstos a su vez por materiales de mayor tamaño o respaldos de rezaga o enrocamientos.

Dentro de esta clasificación, existen muchas variantes, ya que en ocasiones se agregan pantalla de inyecciones o impermeable, tapete de consolidación, ambos en la cimentación, delantal de material impermeable hacia aguas arriba para alargar la trayectoria del flujo de agua, filtros horizontales en la zona aguas debajo de la cortina para forzar el flujo interno a una trayectoria favorable, así como galerías de inspección, parapetos y otros detalles estructurales (Murillo Fernández, 2012).

En México se han construido tres grandes presas de enrocamiento con cara de concreto (ECCC), Aguamilpa y el Cajón en el estado de Nayarit, y La Yesca en el estado de Jalisco.

En cuanto a las presas construidas internacionalmente, se reportó la existencia de presas de concreto, materiales sueltos y otras que combinaban ambos materiales. Asimismo, en México, se construyeron en el periodo de 1550 a 1998, un total de 1017 presas, de las cuales casi el 70% fueron de materiales sueltos y el restante 30% lo constituyen conjuntamente las presas de gravedad, arco y de contrafuertes (Marengo Mogollón, 2002).

### 1.3.3 Cortinas Intermedias o Mixtas

La separación entre rígidas y flexibles resulta a veces tan sutil, que es muy difícil decidir en qué tipo de comportamiento se ubican las cortinas construidas con algunos materiales como las de suelo cemento o de suelo reforzado, aún inexistentes en nuestro país, en las cuales el tipo de material (grava, arena, limo o combinaciones de éstos), con una mayor o menos cantidad de cementante o refuerzo, puede resultar en un material tan rígido como un concreto estructural o tan deformable como una cortina homogénea de tierra (Murillo Fernández, 2012).

### 1.3.4 Selección del tipo de cortina

Para elegir el mejor tipo de estructura para construir un determinado proyecto, se consideran dos criterios esenciales:

- Solicitaciones del medio físico (por ejemplo: sismos, precipitaciones, y tipo de suelo)
- Función (por ejemplo: riego, abastecimiento, o generación eléctrica).

Con base en ellos, actualmente las cortinas se proyectan mediante procedimientos que permiten asegurar un diseño seguro y eficiente. De igual forma cada uno de los estudios previos influye en la selección del tipo de cortina (Tellez Quintanar, 2012).

Tabla 1.6 *Puntos a considerar para la selección de la cortina de una presa hidroeléctrica*

<b>PUNTOS A CONSIDERAR</b>	<b>FINALIDAD</b>
Estudios Topográficos	Identificar los sitios angostos de una corriente que representan los lugares más favorables para la ubicación del eje de la cortina.
Estudios Geológicos y Geotécnicos	Se define los tipos y calidad de rocas que se disponen, y con ellos los bancos de materiales. Características del suelo de cimentación, obteniendo la capacidad de carga del terreno.
Ubicación de los bancos de materiales	Influye en los tiempos, costos y calidad del transporte para el material.
Ubicación de la obra de excedencias.	Por ejemplo; incluir la obra de excedencias en cortinas rígidas implica reducir los costos de una obra de excedencias independiente. Sin embargo, la fabricación de concreto y los procesos para su colocación pueden resultar ser más costosos

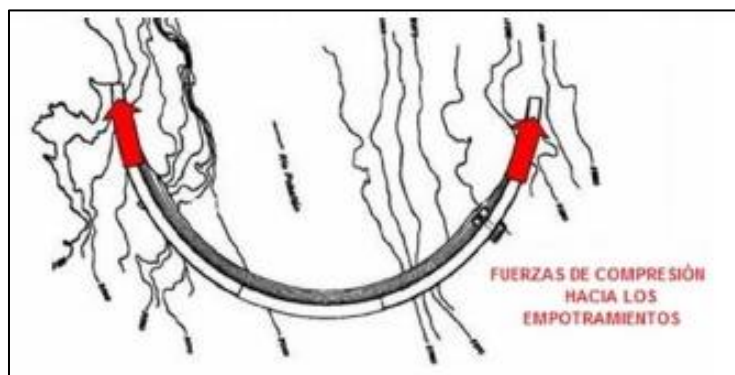


	que utilizar los materiales naturales sueltos con alguna técnica de compactación.
Determinación si es o no zona sísmica.	Por ejemplo; si la zona de construcción se encuentra en una zona de alta sismicidad es preferible construir cortinas que tengan la capacidad suficiente para disipar la energía producida por un sismo, como son las cortinas de tipo gravedad y las de tierra. Por otro lado, las cortinas de contrafuertes resisten mejor el efecto sísmico en sus elementos, sin embargo en el eje longitudinal de la cortina su estabilidad es menor, por lo que si se decide construir una cortina de este tipo en una zona sísmica, deben considerarse en su diseño refuerzo rígidos.
Forma de la boquilla	Por ejemplo; en sitios donde la altura de la cortina es menor o proporcional al ancho de su cauce, se toman en consideración, las cortinas de tipo gravedad, las de contrafuertes y cualquier cortina de materiales naturales sueltos. Cuando la forma de la boquilla tiene una gran altura respecto al ancho del cauce, en forma de V, las cortinas de arco representan una buena opción

*Fuente: Adaptación de (Tellez Quintanar, 2012).*

#### 1.4 CORTINAS DE ARCO

Este tipo de presas son adecuadas para sitios donde la relación ancho – altura no es grande, además donde la base de la cimentación es una roca solida capaz de resistir el empuje que se presentara sobre el arco (US Bureau of Reclamation, 1987).



*Figura 1.4 Vista en planta de una presa con cortina de arco*

En este tipo de estructuras, la forma de la cortina es la encargada de resistir el empuje del agua. Debido a que la presión se transfiere en forma concentrada de la cortina hacia las laderas de la boquilla, se requiere que la cortina se encuentre apoyada en roca dura y resistente, para así asegurar la estabilidad y seguridad de la estructura. Este tipo de presas forman parte de una variedad innovadora en cuanto al diseño, ya que en contraste con las de gravedad, requieren menos concreto para su construcción, y su mantenimiento es mínimo.

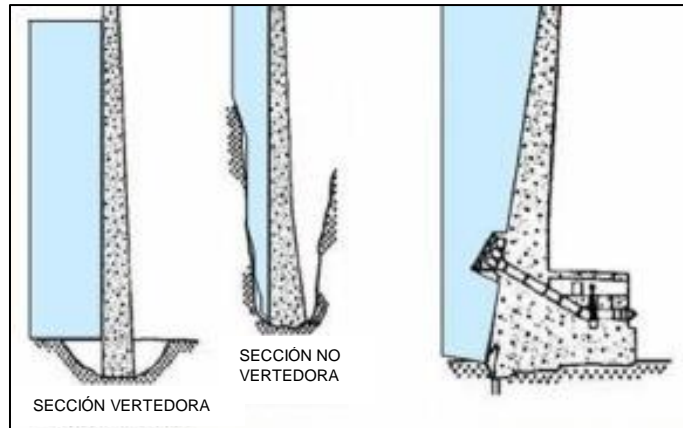


Figura 1.5 Vista lateral de una cortina de Arco y Arco-Bóveda

Cabe destacar que el material que se utiliza para su construcción es concreto o concreto reforzado. Su proceso constructivo se basa en sobreponer bloques de concreto, los cuales no presentan discontinuidades para el análisis del estado de esfuerzos, si durante la construcción estos bloques tienden a colgar aguas abajo convergen y soportan parcialmente su peso propio; pero, si se colocan en la zona aguas arriba tienden a separarse entre sí por efecto del peso propio, por lo que su estado de esfuerzos se calcula como un conjunto de cantilivers independientes (Pérez Pliego, 2009).

En nuestro país, solo existen quince cortinas tipo arco, siendo la más conocida la presa Luis Donaldo Colosio (Huites) en Sinaloa, con 164.70 m de altura. Una interesante cortina de arcos múltiples, es la reguladora Jocoqui (Aguascalientes), que es vertedora y combina arcos, losas de concreto en la corona y cara aguas abajo con machones de mampostería, además de ser la única cortina hueca.

Las cortinas Arco Bóveda son similares a las de arco, se diferencia en que tienen también una curvatura en el sentido vertical en su cara agua abajo o en ambas, lo cual permite una utilización más eficiente del concreto. Existen cuatro en el país, las más conocidas son la presa Calles en Aguascalientes, de 6 m de altura y la Ing. Fernando Hiriart (Zimapán) en Hidalgo- Querétaro, de 203 m de altura (Murillo Fernández, 2012).

En el caso de la P.H. Zimapán su altura, de 203 m, la clasificó dentro de las más importantes del mundo, y su reducido volumen de 200,000 m<sup>3</sup> de concreto colocados y con el más moderno sistema de enfriamiento, colocan a esta presa mexicana dentro de las más relevantes obras en el mundo (CFE, 2006).

Las cortinas de Arco Gravedad, corresponden a un modelo de trabajo estructural similar al arco, el cual además de transmitir esfuerzos hacia las laderas, lo hace hacia la zona baja de la cimentación y soporta parte de la carga por acción de su peso, tiene mayor capacidad de soportar esfuerzos en las partes inferiores, aunque las especificaciones de la cimentación son similares a las de arco. Existen seis en el país, la más conocida es la presa La Angostura (Lázaro Cárdenas), en Sonora, de 91.7m de altura, construida en 1942 (Murillo Fernández, 2012).

A nivel mundial también encontramos la presa Hoover la cual es una presa de concreto arco-gravedad de 221.46 m de altura, ubicada entre los estados de Arizona y Nevada. A continuación, se muestra la relación de las presas más altas en el mundo de tipo Arco, Arco Gravedad y Doble Arco.

Tabla I.7 *Relación de presas más altas en el mundo de tipo de Arco.*

No.	NOMBRE	ALTURA (M)	AÑO DE TERMINACIÓN	PAÍS	TIPO
1	Bakhtiyari	315	En construcción	Irán	Arco
2	Jinping-I	305	2013	China	Arco
3	Xiaowan	294	2010	China	Arco
4	Xiluodu	286	2013	China	Arco
5	Baihetan	277	En construcción	China	Arco
6	Inguri	272	1987	Georgia	Arco
7	Yusufeli	270	En construcción	Turquía	Doble Arco
8	Mauvoisin	250	1957	Suiza	Arco
9	Laxiwa	250	2009	China	Arco
10	Deriner	249	2012	Turquía	Doble Arco
11	Sayano Shushenskaya	242	1985	Rusia	Arco - Gravedad
12	Ertan	240	1999	China	Arco - Gravedad
13	El Cajón	234	1985	Honduras	Doble Arco
14	Chirkey	233	1976	Rusia	Arco
15	Goupitan	232	2009	China	Doble Arco
16	Karoon-4	230	2010	Irán	Arco – Gravedad
17	Luzzone	225	1963	Suiza	Arco
18	Hoover	223	1936	Estados Unidos	Arco – Gravedad
19	Mratinje	220	1976	Montenegro	Arco
20	Contra	220	1965	Suiza	Arco
21	Ermenek	218	2009	Turquía	Doble Arco
22	Glen Canyon	216	1966	Estados Unidos	Arco – Gravedad
23	Daniel Johnson	214	1970	Canadá	Doble Arco
24	Dagangshan	210	2015	China	Arco
25	Karun-3	205	2005	Irán	Arco – Gravedad
26	<b>Zimapán</b>	<b>203</b>	<b>1993</b>	<b>México</b>	<b>Arco – Bóveda</b>
27	Dez	203	1963	Irán	Arco – Gravedad
28	Almendra	202	1970	España	Arco
29	Berke	201	2001	Turquía	Arco – Gravedad
30	Shadid Abbaspour Karun-1	200	1976	Irán	Doble Arco

Fuente: (ICOLD, 2017).

#### 1.4.1 Clasificación de las cortinas de arco

Los diferentes tipos de presas de arco se clasifican de acuerdo a la relación  $b/h$  donde  $b$  es el espesor de la base y  $h$  la altura estructural de la presa. Con base en ello se tiene la siguiente clasificación (US Bureau of Reclamation, 1977):

Tabla 1.8 Clasificación de las cortinas de arco de acuerdo a la relación base - altura.

<b>Arco Delgado (Thin arch)</b>	$b/h < 0.2$
<b>Arco Mediano (Medium arch)</b>	$b/h 0.2 - 0.3$
<b>Arco Grueso (Thick arch)</b>	$b/h > 0.3$
<b>Arco – Gravedad</b>	$b/h > 0.5$

Con base a la tabla anterior, la clasificación básica de las cortinas de arco es la siguiente:

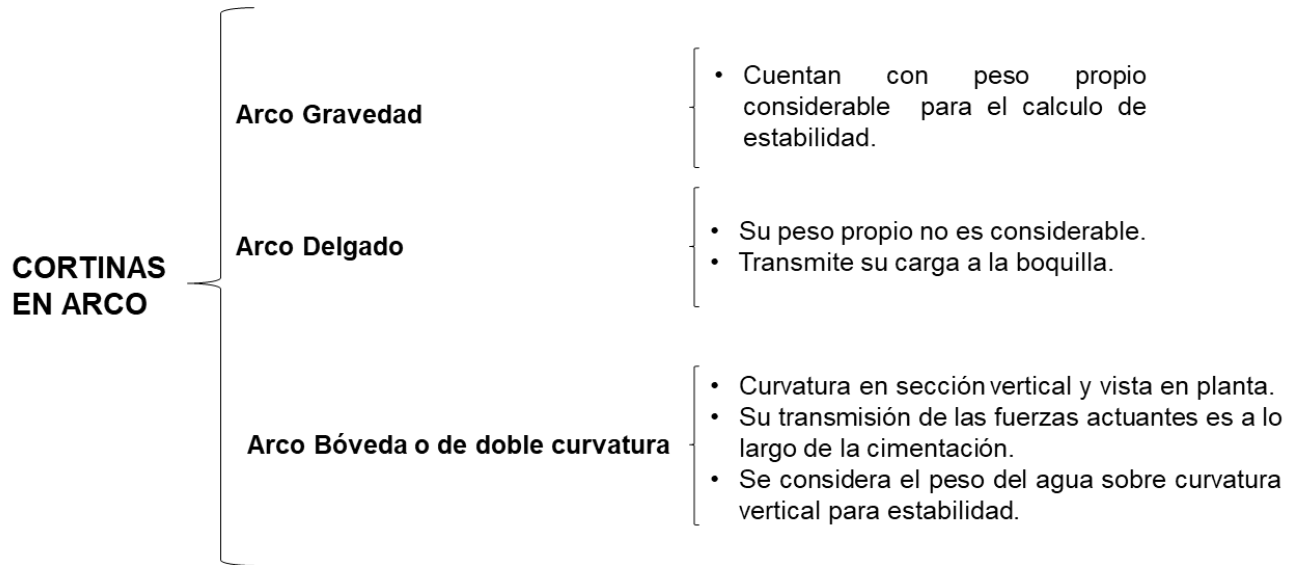


Figura 1.6 Clasificación básica de las cortinas de arco.

Fuente: Elaboración propia

## 1.5 CONSIDERACIONES GENERALES DE LA PROGRAMACIÓN CONSTRUCTIVA DE LAS PRESAS

El procedimiento constructivo para una presa parecería ser simple y sistemático, sin embargo, no es así. Es un procedimiento que debe ser planeado, ejecutado, monitoreado y, si es el caso corregido cuidadosamente, ya que abarca una serie de subprocesos minuciosos que deben coordinarse entre ellos para obtener los resultados deseados.

En la figura siguiente se presenta el esquema de trabajo general seguida en la construcción de un proyecto hidroeléctrico. En ella se observa la clasificación de los trabajos, mostrando las etapas de la obra civil que se llevan a cabo.

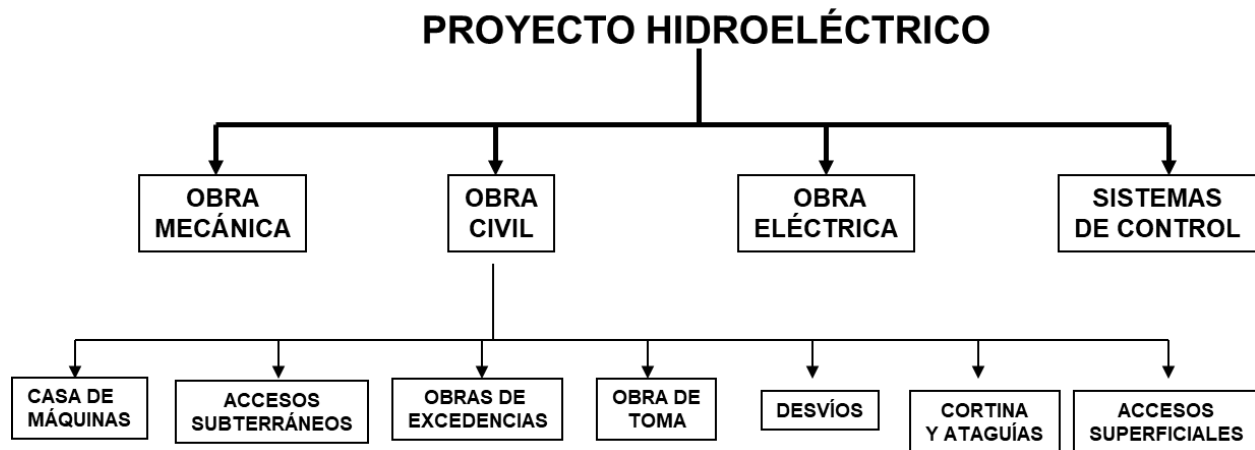


Figura 1.7 Esquema de trabajo general de un proyecto hidroeléctrico (Grandes Rubros)  
Fuente: Elaboración propia

### 1.5.1 Programa de trabajo general de una presa

#### 1. Preparación del sitio y construcción (US Bureau of Reclamation, 1987).

- Remoción de material que se encuentra en el cauce del río y que no reúne las características para desplantar la obra (cortina), asimismo del material que se encuentre suelto y la roca fragmentada o que tiene grietas en las paredes del cañón, para anclar la cortina en ellas, también deberá removerse el material para construir las galerías en los márgenes de la corriente.  
Remoción de la capa de material que cubre los bancos de préstamo que no cumple con las características necesarias para su utilización en la construcción de las obras del proyecto.
- Establecimiento del campamento para la estancia del personal que será contratado y para el resguardo de la maquinaria que será utilizada para la construcción del proyecto.
- Camino de acceso, consiste en rehabilitación de caminos para poder transportar los equipos de construcción y comunicar con los diversos puntos de la obra.
- Explotación de bancos de préstamo de materiales.
  - o Bancos de grava y arena
  - o Bancos de roca
  - o Bancos de material impermeable, el cual se utiliza para la construcción de ataguías.
- Obra de desvío, esta permite desecar el cauce del río para permitir la construcción de la cortina. Se conforma de canales a tajo a cielo abierto y ataguías.

- Excavaciones para las estructuras de la cortina. Se removerá el material que no reúne las características necesarias para cimentar la obra. Muchas veces se recomienda limpiar el desplante a una profundidad de 5m por debajo del cauce para mejorar la capacidad de carga de la roca, además de realizar inyección de cemento en el cauce y paredes conformando una pantalla impermeable que impida las infiltraciones del agua del embalse hacia aguas debajo de la cortina.
  - Construcción de la cortina. El cuerpo de la cortina debe ser homogéneo o heterogéneo formado de diferentes materiales. El proceso constructivo de este elemento lo trataremos en el siguiente capítulo.
  - Diques. Comúnmente son de material impermeable y se construyen con pantallas impermeables para impedir el paso del agua hacia poblados próximos.
  - Obra de control de excedencias o vertedor. Permiten disminuir la longitud de la cresta necesaria y lograr el máximo almacenamiento en la capacidad útil de la presa.
  - Obra de toma
2. Requerimiento de mano de obra. Para realizar la construcción de las diferentes obras que conforman la presa el personal requerido, comúnmente se contrata de los lugares cercanos a las obras con la finalidad de que su contratación no impacte con incrementos en los precios de los productos y servicios de la zona. Dicho personal tendrá diferentes niveles de especialización de acuerdo a las actividades que vaya a desarrollar.

En forma sistemática, el siguiente diagrama de flujo resume las actividades mencionadas anteriormente.

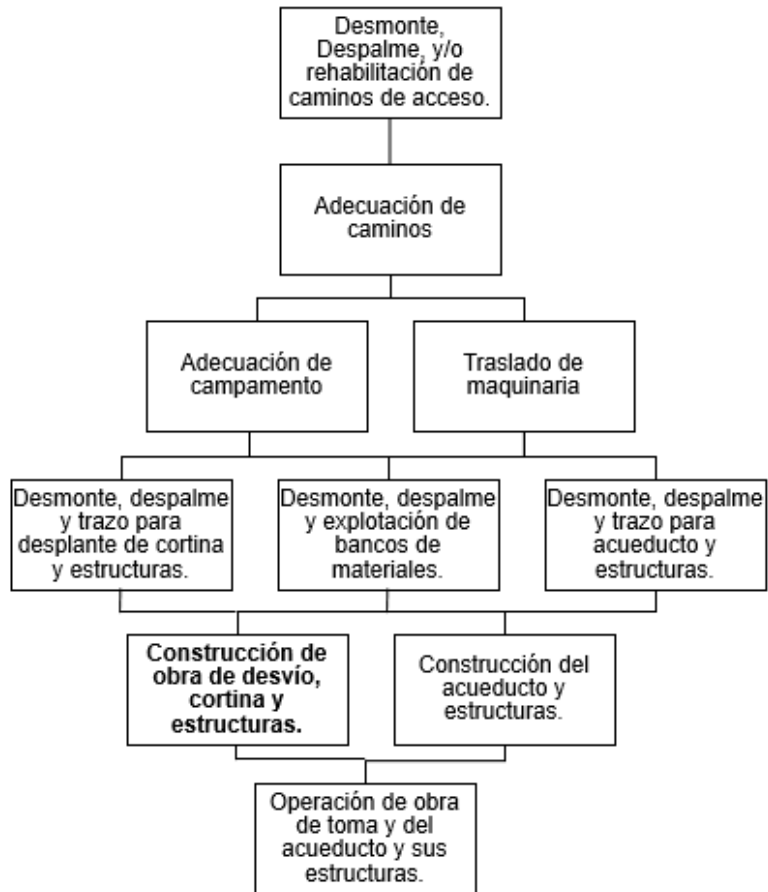


Figura 1.8 Diagrama de flujo general del desarrollo del proyecto de una presa.  
Fuente: Elaboración propia

## 1.6 MAQUINARIA Y EQUIPO

Los siguientes son los diversos tipos de maquinarias y equipos que se utiliza en la construcción de las presas de arco de concreto. Además, se incluye una breve descripción de la forma en que se pueden utilizar (Fernández M. & Parraguez G. , 2014).

- ✓ Grúa Torre. La grúa torre ofrece la mejor combinación de altura y capacidad de elevación y se utiliza en las construcciones de gran altura. El operador de la grúa puede sentarse en la cabina en la parte superior de la grúa o puede optar por operar la grúa desde el suelo con control remoto.



Figura 1.9 Grúa Torre

- ✓ Retroexcavadora (TLB). Esto es similar a una excavadora, pero cuenta con una cubeta accionada hidráulicamente donde estaría la pala de las excavadoras. Esta máquina es ideal para sacar material del suelo y cargarlo en un camión volquete. También se puede usar para mover el suelo a lo largo del suelo o incluso para extenderlo.



Figura 1.10  
Retroexcavadora

- ✓ Excavadora. Consiste en un cucharón de excavación montado en el extremo de un brazo hidráulico articulado en dos partes que puede extenderse y plegarse. Su brazo largo lo hace ideal para excavaciones a nivel del suelo, tiene un alcance de 6 a 7m. También es capaz de pararse más lejos de donde se llevarán a cabo las excavaciones debido a su largo brazo. La capacidad de la pala es aproximadamente de 1 a 2.5m<sup>3</sup>.



Figura 1.11 Excavadora

- ✓ Camión de volteo. Este es un camión con un contenedor de gran capacidad en la parte posterior que puede levantarse e inclinarse para quitar el material. La capacidad del contenedor varía de 5m<sup>3</sup> a 15m<sup>3</sup>. El dumper más grande se usará para transportar el material sobrante fuera del sitio.



Figura 1.12 Camión volteo

- ✓ Bulldozer. Este es un vehículo pesado que está montado en pistas para permitir el movimiento de todo el terreno. Se fijan con una hoja recta o en ángulo que se puede subir o bajar según el nivel deseado que se desee alcanzar. Sus usos son desmonte de la capa superficial del suelo, excavación de capas poco profundas, empuje de traillas, extensión y nivelación, etc.



Figura 1.13 Bulldozer

- ✓ Motoniveladora. Máquina de construcción enfocada en la nivelación de terrenos mediante la utilización de una hoja metálica ubicada en la parte inferior. Suele presentarse en tres ejes. El ancho de la hoja alcanza 3.7m aproximadamente. Puede incluir un escarificador en la parte trasera.



Figura 1.14  
Motoniveladora



- ✓ Silos. Depósitos para almacenar los materiales utilizados para la fabricación del concreto.

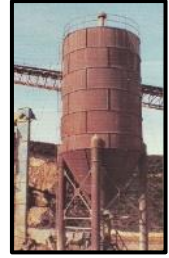


Figura 1.15 Silos

- ✓ Silobus. Diseñados para el transporte de hormigón en masa, desde su punto de producción hasta el de vertido en los cubos. Capacidades hasta  $9\text{m}^3$  o más, con movimiento sobre neumáticos o vías.



Figura 1.16 Silobús

- ✓ Cubeta para concreto. Cubren distintas capacidades, de 4 - 6  $\text{m}^3$ . Su diseño permite trabajar con grúa, pudiendo efectuar diversos tipos de descarga con total seguridad.



Figura 1.17 Cubeta para concreto

- ✓ Compactadoras. Maquinaria muy utilizada en la compactación de materiales sueltos tales como grava, arcillas, arenas, etc.  
Rodillo pata de cabra, se caracteriza por presentar un rodillo con forma similar a las patas de las cabras, tiene por función aumentar la presión en esas superficies en contacto con el suelo, favoreciendo a un buen sello entre capas sucesivas. Se usa principalmente para compactar suelos cohesivos, como el núcleo de la presa.  
Rodillo neumático. Utilizado en los núcleos impermeables por el texturizado que deja la rueda, el cual favorece como el rodillo pata de cabra, a un buen sello entre capas sucesivas.  
Rodillo liso. Sirve para compactar el material para los espaldones y los filtros. Se puede ocupar un rodillo liso vibratorio, el cual aplica mayor energía sobre el suelo y lo ayuda a aumentar la fricción entre las partículas.  
Rodillo de compactación por impacto. Se caracterizan por ser de múltiples caras. El propósito de los rodillos es introducir la energía al terreno en rápidas sucesiones de golpes, cerca de dos golpes por segundo.

- ✓ Cimbra trepante. Se trata de una cimbra configurable que puede ser fabricada a medida, optimizándola para cada aplicación. Cuenta con una altura máxima de encofrado de 3 m, anchura de plataforma de 170 cm, anclaje sobre muro tipo DW20, retranqueo para liberar el panel en desencofrado y adaptable a muros inclinados.



Figura 1.18 Cimbra trepante

- ✓ Depósitos clarificadores. Depósitos de agua que permiten un amplio rango de abastecimiento. Están formados por módulos prefabricados en ménsula de diferentes alturas, con los cuales se pueden realizar depósitos de cualquier geometría (cuadrado, rectangular, circular, elíptico e irregular), permitiendo un aprovechamiento máximo de la parcela disponible.



Figura 1.19 Depósitos clarificadores

## 1.7 CONCLUSIÓN

La información obtenida durante el capítulo proporciona los conceptos básicos relacionados a una presa con cortina de concreto. De igual forma, se desarrolló el tema de las presas y su evolución histórica en México, dando una breve introducción de todo lo relacionado en el ámbito constructivo, como programación y maquinaria requerida para un proyecto de esta magnitud.

Se definió y planteó que es una presa, sus elementos y componentes y sus requerimientos constructivos. Al igual que el esquema de trabajo de un proyecto de esta índole.

Se conoció la clasificación de las cortinas de las presas, con enfoque en las cortinas tipo Arco - Bóveda. Así mismo, se abordó la finalidad de los estudios que se necesitan para la elección de la cortina del proyecto.

Se presentó la teoría de la programación constructiva de los grandes rubros para el desarrollo de una central, permitiendo ubicar los conceptos de obra civil que hay que realizar para llevar a cabo un proyecto hidroeléctrico.

---

## II. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO EN CONCRETOS MASIVOS

---

### 2.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es determinar los principios fundamentales de los concretos masivos y de los sistemas de enfriamiento utilizados en las presas con cortinas de concreto, dando una descripción general de los conceptos, procesos y maquinaria utilizada en las cortinas de este tipo.

La práctica en construcción del concreto masivo ha evolucionado para satisfacer los requerimientos de la ingeniería, ha sido utilizado ampliamente en la construcción de centrales hidroeléctricas, grandes cimentaciones, puentes, etc., gracias a la realización de estas obras es donde se identifica por primera vez la relación agrietamiento-temperatura. Esta relación también es aplicable a las estructuras más pequeñas, donde los altos niveles de tensiones por causas térmicas, generan potenciales grietas debido a los cambios volumétricos. Señalando así, como punto importante el control de la temperatura del mismo.

Como se sabe, el fraguado del concreto es un proceso químico que desprende calor. Dicho calor no suele constituir ningún problema en las estructuras construidas con este material, pues normalmente se disipa rápidamente. Sin embargo, en el caso de las presas que utilizan el concreto de forma masiva su comportamiento es diferente.

Por tal motivo, es importante que el constructor adopte medidas especiales con el fin de satisfacer los requisitos de temperatura del concreto, como pueden ser: hielo en sustitución parcial del agua de mezclado; dar sombra a los recintos de almacenamiento de los agregados, de cemento y quizás a la planta de concreto; regar o pre-enfriar con agua los depósitos de grava y arena; efectuar colados durante las horas de baja temperatura en la obra; o la utilización de post-enfriamientos.

### 2.2 CONCRETO MASIVO

#### 2.2.1 Definición

El Concreto Masivo es definido por el ACI 116R (American Concrete Institute) como cualquier volumen de concreto con dimensiones lo suficientemente grandes para requerir que se tomen las medidas necesarias para hacer frente a la generación de calor por hidratación del cemento y el consecuente cambio de volumen, con el fin de minimizar el agrietamiento (ACI Committee, 2000).

#### 2.2.2 Generalidades

El diseño de estructuras masivas está regido por:

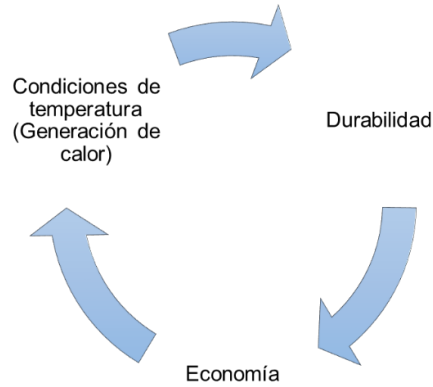


Figura II.1 Generalidades de las estructuras masivas.  
Fuente: Elaboración propia

En estructuras masivas, tales como presas de gravedad y grandes macizos de cimentaciones que soportan la carga en virtud de sus dimensiones y su masa, la resistencia a compresión es un factor secundario. Con los datos proporcionados por el experto en materiales, el calculista se define los requerimientos de refuerzo para controlar retracciones y asumir las tensiones debidos a los cambios volumétricos.

Los requerimientos que se deben seleccionar y combinar para el óptimo manejo de una estructura masiva son:



Figura II.2 Requerimientos para el óptimo manejo de las estructuras masivas.  
Fuente: Elaboración propia

La mayoría de los principios en la tecnología del concreto masivo son similares para el trabajo en general de los concretos. Estas prácticas especiales de construcción se han

desarrollado para satisfacer los requerimientos ingenieriles en estructuras de concreto masivo, como presas de gravedad y de arco, reactores nucleares, casas de máquinas, grandes bases para equipos industriales, grandes cimentaciones, pilas y mástiles de puentes (Arcila López).

### 2.2.3 Breve reseña histórica

La construcción de grandes estructuras de concreto masivo, se podría decir que comenzó hace 100 años. Sin embargo, la problemática de los efectos térmicos y de sus consecuencias sobre la potencial fisuración térmica durante el proceso de fraguado y endurecimiento del concreto, empezó a ser estudiada durante la década de los años veinte. En esta década la fisuración térmica en edades tempranas fue asociada, por primera vez, al incremento de temperatura experimentado en el seno de la masa de concreto, debido al calor de hidratación.

El periodo comprendido entre los años 1930 y 1970 fue considerado como un periodo de rápido desarrollo de la tecnología de construcción de grandes presas. A principios de 1930, la presa Hoover (arco-gravedad), de altura 221m y concluida en 1936, obligó a plantear investigaciones más elaboradas con el objetivo de determinar el efecto de la composición y finura del cemento, de la relación agua-cemento, de la temperatura de curado, del tamaño máximo del agregado, etc., sobre el calor de hidratación del cemento, resistencia a compresión, y otras propiedades de morteros y concretos. Los resultados de las investigaciones condujeron al empleo de un cemento de bajo calor de hidratación en la construcción de la presa. Además, marcaron el inicio de prácticas como el post-enfriamiento por medio de tuberías embebidas en el concreto. Esto representó una nueva tecnología constructiva del concreto masivo, que se mostró eficaz para disipar el calor generado de una forma más rápida, permitiéndose así el sellado e inyección de juntas de la presa, técnicas que se extendieron a todo el mundo (Calmon Nogueira Da Gama, 1995).

Los primeros esfuerzos serios para pre-enfriar el concreto fueron durante la construcción de la presa Norfolk de 1941 a 1945 por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, los cuales introdujeron hielo triturado como agua de mezclado durante los meses de verano. Para 1949 la combinación de pre-enfriamiento y post-enfriamiento fue usada en la presa Glen Canyon donde en el verano se tenían temperaturas de hasta 38° C.

Como se sabe, un factor que incide notablemente en la elevación de la temperatura del concreto es la cantidad de cemento en la mezcla, en los años treinta la práctica común era que se utilizara como mínimo 223 Kg de cemento por metro cúbico de concreto en la construcción de presas. En la presa Hiwassee, terminada en 1940 el contenido de cemento fue de 167 Kg/m<sup>3</sup>, un inusual contenido para la época, pero al terminarse sin grietas por temperatura, inició la tendencia de reducir la cantidad de cemento que se tiene hasta la fecha. Un ejemplo de estos bajos contenidos de cemento es la presa Prince Flat en California construida por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos en 1954 con tan solo 140 Kg/m<sup>3</sup> de cemento Tipo II ASTM.

El uso de adiciones puzolánicas como reemplazo de cemento, se da por primera vez en la presa Boneville (USA) en 1938, ya que en ensayos previos se demostró un incremento

en el tiempo de trabajabilidad de la mezcla fresca y sobre todo la disminución del calor generado, en esa ocasión se usó una relación 1:3 de puzolana pumítica – clinker.

El uso de aditivos ya era común para mediados de los años 40, pero es en los 50 cuando se reconoce la importancia y beneficios de los reductores de agua, los cuales permiten reducir la cantidad de cemento sin modificar la relación agua – cemento, y a su vez reducir la generación de calor. Un significativo desarrollo de los años cincuenta fue el desechar como requerimiento de diseño en presas la resistencia a la compresión a los 28 días, ya que el concreto después de este tiempo sigue desarrollando resistencia y la estructura no es sometida a esfuerzos de diseño sino hasta mucho tiempo después.

Los esfuerzos realizados hasta los años 60 para evitar la fisuración térmica se enfocaron, principalmente, hacia la reducción del incremento de temperatura en el concreto masivo y hacia la disminución del período de enfriamiento del concreto del cuerpo de presa. A partir de los años 60, se abre una nueva vía de trabajo e investigación dirigida hacia la obtención de la distribución de tensiones térmicas asociadas al campo transitorio de temperaturas existente en el cuerpo de presa durante el proceso de fraguado y endurecimiento del concreto.

En México la primera presa construida de concreto masivo fue la Presa Lázaro Cárdenas (La Angostura) sobre el río Bavispe, afluente del río Yaqui en el estado de Sonora. Su construcción estuvo a cargo de la Secretaría de Recursos Hidráulicos de 1936 a 1942. Esta es una presa de arco – gravedad, cuenta con una altura de casi 92 m y una longitud de 178 m. El ancho en la base es de 31 m y en la corona es de 3.5 m, con un volumen total de concreto de 184, 000 m<sup>3</sup> y un tamaño máximo del agregado grueso de 15 mm (6”). El cemento utilizado fue de bajo calor de hidratación, producido por primera vez en el país, con un contenido de 223 Kg/m<sup>3</sup>. Para disipar el calor por la hidratación del cemento, se hizo circular agua fría por serpentines embebidos en el concreto. La tubería para formar los serpentines fue de fierro con un diámetro de 25mm.

Continuando de manera cronología, en los años cincuenta y principios de los sesentas se construyeron tres importantes centrales hidroeléctricas muy similares entre sí: Mazatepec, Santa Rosa y el Novillo.

Tabla II.1 *Características generales de las presas "Mazatepec", "Santa Rosa" y "Novillo".*

Nombre	Ubicación	Generalidades	Características del concreto
<b>Mazatepec (La Soledad) 1962</b>	Río Apulco (Puebla)	Cortina de tipo rígida de arco-bóveda en la parte central extendiéndose hacia ambas márgenes mediante diques de sección gravedad, la longitud del arco es de 154m en la corona. Altura máxima 91.5m,	Cemento Portland tipo II de bajo contenido de álcalis y puzolanas naturales. Cantidad de cemento de 250kg/m <sup>3</sup> F'c 280kg/cm <sup>2</sup>

		espesor en la base 14m y en la corona 2.5m.	Colados a una altura de 1.5m, repartida en tres capas de espesor similar.
<b>Santa Rosa 1964</b>	Río Santiago (Jalisco)	Cortina tipo arco-bóveda, con una altura de 114m, con un espesor en la base de 13.5m y 2.5m en la corona.	TMA 10cm Contenido de cemento de 250kg/m <sup>3</sup> F'c 285kg/cm <sup>2</sup> Espesor de los colados de 1.5m repartido en tres capas de 0.5m.
<b>El Novillo (Plutarco Elías Calles) 1964</b>	Río Yaqui (Sonora)	Entro en operación en 1964. Consiste en una cortina de concreto masivo de arco de doble curvatura con una altura de 133.8 m, longitud de corona de 188m, espesor de la cortina en la base de 20m y en la corona de 4m.	TMA 152 mm (6") Cemento Portland tipo II y puzolanas naturales. f'c 250kg/cm <sup>2</sup> Colados a una altura de 2m, repartida en tres capas de espesor similar.

Para el control de la temperatura debido a las altas temperaturas del ambiente y a la generación de calor de hidratación del cemento, se enfriaron los agregados por medio de sombreado y rociado de agua de 4°C, utilizando hielo en escamas como parte del agua de mezclado y se optó por la realización de colados nocturnos.

En la presa el Novillo, debido a las altas temperaturas del sitio de la obra, se realizó el enfriamiento del concreto con los procedimientos siguientes:

- a) Pre-enfriamiento añadiendo hielo triturado al agua para que el agua alcanzara una temperatura de 4°C, logrando colocar el concreto a 25°C.
- b) Post-enfriamiento mediante circulación de agua a 20°C en el interior de la masa de concreto con serpentines de cobre.

En la actualidad, los estudios y trabajos de investigación avanzan principalmente en la línea de establecer metodologías capaces de predecir la respuesta térmica y tensional de las estructuras masivas de concreto en primeras edades, considerando la evolución de las propiedades del concreto en el tiempo. Sin embargo, es importante destacar que el empleo del concreto seco compactado con rodillo ha supuesto un notable desarrollo científico y tecnológico en el campo del concreto masivo, utilizado en la construcción de grandes presas (Candelas Ramírez, 2008).

#### 2.2.4 Procesos en la tecnología del concreto masivo

Como se ha mencionado anteriormente, el diseño y construcción de obras masivas de concreto como son las presas de arco y de gravedad generalmente incluyen recomendaciones para el enfriamiento de la masa de concreto con el propósito de disminuir los efectos patológicos del calor de hidratación del cemento pensándose que pueden llegar a inducir agrietamiento.

Existen diferentes criterios sobre la manera de realizar este enfriamiento, las técnicas más relevantes para controlar la temperatura en este tipo de estructuras son (Arcila López)

- Enfriar los agregados de la mezcla para lograr que la temperatura del concreto antes de su colocación este por debajo de los 18°C, esto reducirá el gradiente de temperatura entre el medio ambiente y el material.
- Usar agua helada o hielo en escamas como sustituto del agua de la mezcla.
- Uso de nitrógeno líquido para enfriar los agregados o enfriar el masivo. Esta opción es muy efectiva pero su costo es alto.
- Colocar serpentines en la masa de concreto para refrigerar el núcleo mediante el paso de agua helada.
- Enfriar la superficie del masivo, pero solo para secciones con espesor menor a 50cm usando formaletas que no aíslen (Por ejemplo: Cimbras metálicas).

Para estructuras con más de 1m de espesor:

- Aislar el masivo del medio exterior.
- Hacer un buen diseño de mezcla.

En líneas generales el desarrollo de las temperaturas depende de los siguientes factores:

- Dimensiones y geometría de la estructura.
- Propiedades térmicas del concreto joven (calor de hidratación, conductividad, calor específico, etc.).
- Condiciones del concreto (temperatura de puesta en obra, tipo de encofrado, protección, enfriamiento, etc.).
- Condiciones ambientales (temperatura del aire, radiación solar, temperatura de las estructuras adyacentes, etc.).

#### *2.2.4.1 Control de la temperatura*

La generación de calor y la elevación de la temperatura ocurrirán rápidamente generando el endurecimiento del concreto mientras se expande. El aumento de rigidez da una continua elevación de la temperatura por varios días, lo cual puede ser poco importante si:

- a. La máxima temperatura puede ser limitada a un valor cercano a su temperatura final al enfriarse.
- b. Se controla y mantiene la misma temperatura en todo el volumen incluyendo a las superficies expuestas.
- c. Se puede contener en cimbras que se expandan o contraigan según el concreto.

Cabe recalcar, que ninguna de las tres condiciones anteriores puede lograrse por completo o simultáneamente. La a y b pueden ser realizadas hasta cierto punto en la mayoría de las construcciones. La c es la más compleja de obtener, pero ha sido lograda a escala limitada por medio del calentamiento del concreto previamente colocado para



limitar la diferencia de temperatura entre el concreto viejo y la máxima temperatura que se espera alcanzar en el concreto nuevo.

#### 2.2.4.2 *Requerimientos Estructurales*

En ciertas estructuras es necesario controlar la temperatura y hay factores que determinar hasta qué punto es necesario, los cuales son: el tamaño, tipo y función de la estructura, el clima ambiental y el grado de restricción interna y externa impuesta a la estructura.

Por ejemplo, en estructuras gravitacionales, para su seguridad y estabilidad de la integridad estructural, no pueden tolerar grietas en ciertos planos, por lo que el número de juntas debe ser mínimo de acuerdo con los requerimientos de diseño y construcción. En ellas se debe establecer un diseño de fuerzas que cumplan con los requerimientos de la estructura como son: un óptimo desempeño, cargas de construcción, descimbrado y durabilidad. Además de alcanzar la resistencia más allá de los 28 días.

Los concretos con una resistencia temprana mayor de la necesaria después de los 28 días, necesitarán una excesiva cantidad de cemento, además de introducir calor adicional al concreto aumentando el problema del control de la temperatura. Las grietas producidas por la tensión por temperatura, permiten la entrada del agua, y con ello la corrosión del refuerzo, la oxidación y/o la congelación y deshielo; trayendo consigo la caída del recubrimiento y/o provocando otra acción destructiva de la estructura.

Otro punto importante es el programa de construcción, el cual debe tener una relación estimada de la colocación del concreto con la época del año, punto que debe ser considerado por el diseñador. Es común saber, que la temperatura más alta ocurrirá en el concreto colocado durante los meses más calurosos del verano; de igual forma al inicio de otoño se alcanzará un gran pico de temperatura y probablemente estará expuesto a una abrupta caída de la temperatura del aire. En invierno se estará expuesta a una severa condición de baja temperatura. El tiempo más conveniente para la colocación del concreto masivo es al final de la primavera, ya que la temperatura del aire en el ambiente tiende a crecer diariamente, lo cual coincide con la elevación de la temperatura del concreto. Dando como resultado que el concreto no absorba mucho calor del aire, evitando en él un cambio brusco de temperatura en la superficie.

Estas últimas consideraciones no necesariamente se llevan a cabo, pero se deberían de tener en cuenta de acuerdo a las condiciones de temperatura en el ambiente de la región donde se realizará la estructura.

#### 2.2.4.3 *Generación de calor*

El contenido de cemento de la mezcla usado para una estructura en particular lo rige, el requerimiento de resistencia, durabilidad y las características de los agregados disponibles. Actualmente las opciones de cemento que se tienen para limitar la generación de calor son:

- a. Cemento con característica especial de Bajo Calor de Hidratación (BCH).
- b. Cementos hidráulicos tipo CPP, CPC.

- c. Reducción del uso de cemento, por utilización de material puzolánico (ceniza volante o puzolana natural), logrando una reducción máxima de la producción de temperatura sin limitar el desarrollo de resistencia a largo plazo.

En algunos casos se puede tomar ventaja de la reducción del cemento aprovechando la reducción del agua de mezclado. Con estas opciones se puede minimizar el calor generado, pero tiene como desventaja una lenta ganancia de resistencia provocando una edad mayor de diseño. Como bien se sabe, en construcción es importante obtener resistencias tempranas para: el rápido descimbrado, el uso continuo de la cimbra y la preparación de juntas, por lo que no es muchas veces factible la reducción del cemento para obtener una baja generación de calor.

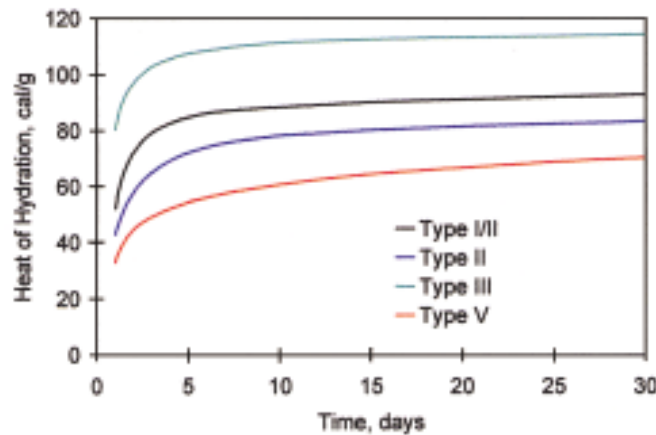


Figura II.3 Grafica del calor de hidratación (cal/g) vs tiempo (días) por tipos de cemento.  
Fuente: (Gajda & Vangeem, 2002)

#### 2.2.4.4 Clima

La temperatura experimentada por el concreto en su interior, está determinada por la temperatura en el colado, más la elevación de la temperatura adiabática<sup>1</sup>, menos el calor perdido al aire y menos la temperatura estable final.

Capas de 1.5 m pueden perder del orden del 25% del calor generado si está expuesta por tiempo suficiente, alrededor de 5 días, previo a la colocación de la siguiente capa, siempre que la temperatura ambiente esté por debajo de la temperatura interna del concreto. Capas mayores de 1.5 m colocadas con poca o nada de diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura interna del concreto perderán poco o nada de calor.

Cuando la temperatura de la capa superficial desciende bruscamente se pueden producir deformaciones, que si llegan a exceder la capacidad de deformación del concreto producirá grietas.

<sup>1</sup> Temperatura que puede alcanzar el elemento si no hubiera pérdida de calor hacia el entorno (Gutiérrez Ñahui, 2017)

Por otro lado, deberá tenerse en cuenta que cuando la temperatura del concreto es baja, la hidratación avanza a una velocidad mucho menor. Las temperaturas inferiores a los 10° C son desfavorables para el desarrollo de la resistencia a edad temprana; debajo de los 4.5° C el desarrollo de la resistencia a edad temprana se retrasa en gran medida; y a temperaturas de congelación o por debajo de ellas, hasta los -10° C, el desarrollo de resistencia es mínimo o nulo.

### 2.2.5 Producción

El objetivo de la producción de concreto masivo es obtener:

- Uniformidad
- Homogeneidad
- Economía
- Trabajabilidad

Las primeras dos son indicadas por propiedades físicas, tales como peso volumétrico, revenimiento, contenido de aire y resistencia en dosificaciones sucesivas de las mismas proporciones del mezclado, así como una apropiada secuencia y combinación de los ingredientes.

#### 2.2.5.1 *Suministro de Materiales*

Los agregados fino y grueso, el cemento, el agua (incluyendo el hielo) y los aditivos químicos deben ser adecuadamente manejados, procesados, almacenados y dosificados, para mantener su calidad en la producción de concreto.

#### 2.2.5.2 *Agregados*

Para la producción y suministro, los agregados son transportados desde los bancos localizados previamente hasta la trituradora, para la selección de tamaños, son cribados por diferentes mallas, luego se almacenan en montones donde se lavan, y posteriormente se enfrían si es necesario para la elaboración de mezclas.

Cuando se transporta agregados de gran tamaño desde bandas elevadas, se reduce al mínimo las fracturas, utilizando una conducción de escalera. El agregado se almacena separándolo en diferentes tamaños. Sin embargo, cuando es necesario almacenar en montones, el uso de métodos incorrectos acentúa problemas con los finos y también causa segregación, rompimiento del agregado y una excesiva variación en la graduación. Los montones deben construirse en capas horizontales o suavemente inclinadas. Debe tenerse una base dura provista de un buen drenaje para evitar la contaminación del material en el fondo, y el mezclado de los diferentes tamaños debe evitarse mediante muros apropiados o amplios espacios entre los montones.

#### 2.2.5.3 *Cemento*

Debido a las grandes cantidades de cemento que se consumen en la producción masiva de concreto, se tiene la necesidad de transportarlo a granel de las plantas de cemento, puede ser por medio de furgones de ferrocarril, hasta un punto cercano a la obra, o bien por medio de camiones. En el primer caso, el cemento es depositado en silos para ser

almacenado y posteriormente es transportado por medio de camiones para su almacenamiento en los silos de las plantas dosificadoras y/o mezcladoras de concreto, en el segundo caso el cemento llega directo a los silos de las plantas.

#### 2.2.5.4 Agua

El agua se extrae de la fuente que puede ser un río, lago, pozo y es bombeada a tanques de almacenamiento que se encuentran en partes más elevadas, y por gravedad suministra al depósito que se encuentra en la planta dosificadora para proporcionar el agua requerida para ser suministrada en las mezcladoras y así elaborar la mezcla de concreto determinada.

Cuando es necesario la utilización de hielo en mezclas de concreto para su enfriamiento es conveniente que se incorpore directamente en el depósito de agua de mezclado para así convertir el hielo en agua fría y de esta manera hacer más manejables los componentes del concreto durante su mezclado. En ocasiones es necesario contar con una planta que suministre escarcha de hielo a la mezcla y que será parte del agua de mezclado.

#### 2.2.5.5 Aditivos

Los aditivos líquidos que se utilizan con más frecuencia en la elaboración de mezclas de concreto masivo son aditivos reductores de agua e inclusores de aire, los cuales se almacenan en tanques, para posteriormente ser bombeados a los depósitos de aditivos de las plantas y pasar a la dosificadora para suministrar las cantidades necesarias de aditivo e incorporarse al agua de mezcla para una mejor homogeneización en la elaboración de concreto.

#### 2.2.6 Dosificación

La dosificación, es el proceso de medición, por peso o volumen de los componentes del concreto e introducirlos al mezclador. Para producir concreto masivo de calidad, los ingredientes deberán medirse con precisión en cada mezcla. La mayoría de las especificaciones requiere que las dosificaciones se efectúen por peso en vez de hacerlo por volumen debido a las imprecisiones al medir los agregados como resultado del abundamiento. El empleo de un sistema de dosificación por peso suministra una mayor exactitud y simplicidad. El agua, hielo y aditivos líquidos se pueden medir correctamente ya sea por volumen o por peso. Durante las operaciones de medición y dosificación, los agregados se deben manejar de tal manera que mantengan la granulometría deseada, pesándose todos los materiales a la tolerancia requerida para mantener homogéneas las características de la mezcla de concreto diseñada.

Los silos para el cemento, así como los almacenamientos de agua, agregados y aditivos que proveerán a la planta dosificadora deberán tener el tamaño adecuado para alimentar eficazmente la capacidad productora de la planta.

Las tolvas pesadoras deben ser cargadas mediante almeja o cargador frontal. Las compuertas que se emplean para cargar dosificadores semi o totalmente automáticos

deberán estar equipados con motor y con un apropiado control de "goteo" para lograr la exactitud deseada de peso.

El sistema de dosificación individual automática por peso está provisto de básculas y tolvas medidoras, separadas para cada tamaño de agregado y para cada uno de los otros materiales que entran en la mezcla, interruptores para cortar los ciclos de pesado y de descarga cuando las tolerancias se han excedido, selectores de la mezcla, medidores y compensadores de humedad en los agregados y registradores. El ciclo de pesado se inicia mediante un interruptor sencillo, y las tolvas medidoras individuales se cargan simultáneamente.

Además de la medición exacta de los materiales, también deben emplear procedimientos correctos de operación, si se quiere mantener la uniformidad del concreto. Se debe tener cuidado de asegurar que los materiales que se han dosificado estén puestos en la secuencia apropiada, y combinados de manera que se carguen uniformemente dentro de la mezcla.

Las especificaciones generalmente exigen que los materiales se midan en revolturas individuales con los siguientes porcentajes de precisión: cemento 1%, agregado 2%, arena 1%, aditivos 3% y agua 1%. Los equipos deberán tener la capacidad de medir las proporciones dentro de las tolerancias mencionadas. La dosificación de aditivos se deberá revisar diariamente, ya que la sobredosis de ellos puede llegar a provocar problemas muy serios en el concreto, ya sea en estado fresco o endurecido.

### 2.2.7 Mezclado

Es esencial un mezclado completo para la producción de un concreto de calidad uniforme. Por lo tanto, el equipo y los métodos que se emplean deben ser capaces de mezclar con eficiencia los materiales para concreto que contengan el mayor tamaño de agregado especificado, para producir mezclas uniformes con el menor revenimiento que sea práctico para el trabajo. Se debe proveer suficiente mezclado, así como los medios para transportarlo y colocarlo, para que exista continuidad y quede libre de juntas frías.

Todo concreto se deberá mezclar completamente hasta que su apariencia sea uniforme, con todos sus ingredientes distribuidos equitativamente. Los mezcladores no deben ser cargados por encima de su capacidad y deberán ser operados aproximadamente a la misma velocidad para la cual fueron diseñados, el ingeniero determinará la duración máxima de la mezcla con el fin de obtener la mejor manejabilidad.

Puesto que la manejabilidad inicial no es constante, se deberá prever un tiempo prudente. Un tiempo de mezclado corto tiene efectos más desfavorables que uno de mayor duración.

Un factor que aumenta o disminuye el tiempo de mezclado es la inclusión de aire a la mezcla.

Tabla II.2 *Porcentaje total de inclusión de aire de acuerdo al tamaño del agregado grueso de la mezcla.*

Tamaño máximo del agregado grueso (pulgada)	% Total de aire en volumen de concreto
$\frac{3}{4}$	$6 \pm 1$
$1 \frac{1}{2}$	$5 \pm 1$
3	$4 \frac{1}{2} \pm 1$

### 2.2.8 Transporte

El concreto puede ser transportado por métodos y equipos diversos, tales como: mezcladoras de camión, cajas de camión fijas con o sin agitadores, bachas con grúa, conductos o mangueras, y por bandas transportadoras. Cada tipo de transportación posee ventajas y desventajas específicas que dependen de:

- Condiciones del uso
- Ingredientes de la mezcla
- Accesibilidad y ubicación del sitio de colocación
- Capacidad y tiempo de entrega requeridos
- Condiciones ambientales

Aunque no exista una forma perfecta para transportar y manejar el concreto, una planeación anticipada nos ayudará en la elección del método más adecuado a las necesidades especiales de transporte, evitando así la ocurrencia de problemas. La planeación deberá tener en consideración tres eventos, que, en caso de suceder durante el manejo y la colocación, podrían afectar seriamente la calidad del trabajo terminado:

1. Retrasos. El objetivo que se persigue al planear cualquier calendario de trabajo, es hacerlo con mayor rapidez, contando con el equipo adecuado y gente especializada para realizarlo. Las máquinas para transportar el concreto se han ido modernizando continuamente. Se logrará la máxima productividad si se planea el trabajo aprovechando al máximo el personal y el equipo de manera que se reduzca el tiempo de retraso durante la colocación de concreto. El intervalo de tiempo que transcurra entre el final de mezclado y la compactación debe ser lo más corto posible, sin importar el medio de transporte que se eligió, para que la pérdida de manejabilidad sea mínima.
2. Endurecimiento temprano. El concreto comienza a endurecer en el momento en que se mezclan el cemento con el agua, pero el grado de endurecimiento que ocurre durante los primeros 30 min normalmente no presenta problemas, por lo general, el concreto que se haya mantenido en agitación se puede colocar y compactar dentro de la primera hora y media después del mezclado.
3. Segregación. Tiene como consecuencia que parte de la mezcla tenga una cantidad demasiado pequeña de agregado grueso y que el resto tenga agregado grueso en

cantidades excesivas. Probablemente la primera parte se contraerá más, se agrietará y tendrá una baja resistencia a la absorción. La segunda será demasiado áspera para lograr una consolidación total.

Para la elección del método de transporte, la primera cuestión por analizar es el tipo de trabajo: su tamaño físico, la cantidad total de concreto por colar y el programa a cumplir. El estudio de los detalles de la obra, determina la cantidad de trabajo que queda debajo del nivel del terreno, por encima de este o en nivel del terreno, permitiendo escoger los equipos adecuados de manejo de concreto necesario para colar el concreto en los niveles que se requieran.

Un requisito básico del equipo y método de colocación, como de todos los demás equipos y métodos de manejo, es que debe conservar la calidad del concreto en lo referente a la relación agua-cemento, revenimiento, contenido de aire y homogeneidad. La selección del equipo debe basarse en su capacidad para manejar eficientemente el concreto en las condiciones más ventajosas de tal modo que pueda ser fácilmente consolidado en su lugar mediante vibración.

Los equipos y métodos de transporte y colocación del concreto masivo son similares a los empleados en otros tipos de concreto, es decir: camión - revolvedora, camión de volteo, camión agitador, grúa y bacha etc. solo que por lo general se usarán de gran tamaño o en cantidades adecuadas a los grandes volúmenes de concreto y por supuesto de gran producción, sin embargo un equipo de transporte y colocación que se ha empleado con éxito, y que es poco empleado en otras obras de concreto, son las bandas transportadoras.

#### 2.2.8.1 Transportadoras de banda

Las bandas transportadoras de concreto están diseñadas o modificadas especialmente para transportar concreto en estado plástico, desde una fuente de suministro hasta las cimbras u otros lugares, sin tener que usar equipo adicional, excepto el requerido para la compactación. La colocación del concreto por medio de bandas transportadoras debe ser una operación continua. Los mejores resultados se obtienen cuando se cuenta con un suministro constante de concreto mezclado adecuadamente para cargar la banda transportadora, así como los dispositivos necesarios para desplazar el punto de descarga durante la colocación, de manera que el concreto en estado plástico pueda ser depositado en toda el área, sin necesidad de traspalearlo o aplicarle demasiada vibración.

Las bandas transportadoras pueden clasificarse en tres tipos:

##### 1. Transportadoras portátiles o auto suficientes.

Distancia máxima horizontal de la pluma	60m
Inclinación máxima de pluma sobre el nivel de terreno	30°
Inclinación máxima de pluma bajo el nivel de terreno	15°
Capacidad máxima. de transporte	500m <sup>3</sup> /h

2. Transportadoras de alimentación en serie. La colocación del concreto a largo alcance hace necesario el uso de bandas transportadoras de alimentación, que operan en serie con puntos extremos de descarga para la transferencia. Este tipo de bandas transportadoras normalmente se usa para colocar grandes volúmenes de concreto, ya que requieren de mucho tiempo para su instalación y puesta en marcha. Sus características son:
  - Capacidad de cada línea transportadora: 500 m<sup>3</sup>/h.
  - Velocidad usual de 1as bandas: 190 m/min.
  - Pendientes máximas: 30°.
  - La banda transportadora de descarga, es movilizadora, para distribuir el concreto, por medio de una torre-grúa.
  - Se emplean revenimientos de 3 a 6 cm.
  - Las bandas, se cubren para proteger el concreto del viento y del sol.
3. Transportadoras de distribución, con descarga radial o lateral. Para colocaciones de grandes cantidades, el método más eficiente, en lo que respecta al equipo y a la forma de colocación para acabados con equipo mecánico, se logra por medio de transportadoras.

### 2.2.9 Preparación Antes de la Colocación

La preparación previa al colado de concreto incluye diversas actividades, como son:

- Humedecimiento de la superficie
- Montaje de las cimbras
- Colocación de tapa juntas
- Instalaciones de serpentines (cuando se realizará un post-enfriamiento)
- Inyección de juntas
- Fijación segura en el concreto del acero de refuerzo y de los demás accesorios que vayan a quedar ahogados.

Se debe realizar una inspección final detallada de las cimbras, tapa juntas, refuerzo, elementos ahogados y otros detalles de la colocación del concreto antes de que se coloque.

#### 2.2.9.1 *Temperatura del concreto*

La temperatura del concreto, cuando se coloque, no debe ser mayor de 32.5°C, en tiempo moderado, o de 10.0°C en épocas en las que la temperatura media puede descender a menos de 4.5°C.

Cuando la temperatura del concreto, este entre 26.7°C y 32.5°C, el concreto se mezclará en la obra y se descargará inmediatamente después de mezclarlo. Si la temperatura del concreto excede este límite, el contratista deberá emplear medios efectivos de pre-enfriamiento y/o post-enfriamiento.



### 2.2.10 Colocación

El equipo y el método utilizados para colocar concreto masivo deben evitar la separación de agregado grueso del concreto. El agregado segregado no se eliminará con operaciones subsecuentes de colocación y consolidación.

El concreto se colocará en capas horizontales de 38 a 60 cm de espesor y evitando capas inclinadas y juntas frías. El método escalonado de colocación se debe emplear en estructuras masivas donde se abarcan grandes áreas, para impedir la formación de juntas frías. En este método, la colocación de concreto se hace por una serie de capas horizontales escalonadas. La colocación del concreto en cada capa se extiende por la anchura total del bloque, y las operaciones de colocación progresan desde un extremo de la elevación hacia el otro, exponiendo solamente pequeñas áreas de concreto a la vez. Al progresar la colocación, parte de la misma estará ya terminada, mientras que ésta continuará en lo que queda.

El equipo debe disponerse de tal manera que el concreto tenga una caída vertical libre máxima de 1.5 m hasta el punto de colado o hasta el interior del contenedor que lo reciba. El chorro de concreto no debe separarse, permitiendo que caiga libremente sobre varillas, espaciadores, refuerzos u otros materiales ahogados. Si las cimbras están suficientemente abiertas y libres, de manera que no estorben la caída vertical del concreto en el lugar de colocación, es preferible la descarga directa y sin el empleo de tolvas, conductos o vertedores. El concreto debe ser depositado cerca o en su posición final durante su colocación, ya que presenta la tendencia a segregarse cuando tiene que hacerse fluir lateralmente hasta su lugar.

Al elegir el equipo de colocación se debe considerar su capacidad para colocar el concreto en el sitio correcto de manera económica y sin alterar su calidad. La selección del equipo es influenciada por el método de producción del concreto. El colado deberá comenzar a lo largo del perímetro en un extremo del área de trabajo descargando cada mezcla contra el concreto previamente colado. En general el concreto deberá colarse en capas horizontales de espesor uniforme, consolidando adecuadamente cada capa antes de colar la siguiente.

### 2.2.11 Compactación

La compactación es el proceso que permite eliminar la concentración de piedras, agujeros y aire atrapado en el concreto fresco, así como amoldarlo dentro de las cimbras, la vibración interna es el método más eficaz para consolidar concreto plástico para la mayor parte de las aplicaciones. La efectividad de un vibrador interno depende principalmente del diámetro de su cabeza, de la frecuencia y de su amplitud. Los vibradores no se deben emplear para mover concreto en sentido lateral, y deben insertarse y quitarse verticalmente a intervalos próximos, usando un patrón sistemático de vibración para asegurar que todo el concreto haya sido adecuadamente compactado.

En grandes aplicaciones, se pueden usar grupos de vibradores operados mecánicamente, por ejemplo, utilizar retroexcavadoras adaptándoles vibradores a cada una de ellas, cubriendo así un área mayor de vibrado en un tiempo menor y con una

mayor eficiencia. Es posible compactar también con algún equipo pesado, por ejemplo, un tractor (Candelas Ramírez, 2008).

### 2.2.12 Juntas

La presa requiere un material homogéneo para lograr zonas de igual resistencia e impermeabilidad isotrópicas y continuas. Pero es imposible trabajar una masa tan grande sin discontinuidad, porque la jornada laboral impone, en general, unas horas y días de descanso; pero aun con trabajo en tres turnos hay interrupciones accidentales o estacionales por condiciones climáticas extremas. Pero, sobre todo, el concreto se retrae y se fisura, por lo que por necesidad funcional hay que poner juntas o dispositivos para evitarlos.

Por lo anterior se realiza una división de la presa en unidades de concreto independientes que después hay que tratar para que queden trabadas y unidas entre sí y la presa funciones estructuralmente como una masa continua.

En primer lugar, la presa se divide en áreas verticales de ancho uniforme y caras planas verticales normales al eje de la corona. El ancho normal de las áreas es de 15 m, que la práctica ha dado como bueno para evitar la fisuración, pero hay una tendencia a aumentarlo en grandes obras, normalmente con un límite de 20 m.

Desde el punto de vista del concreto, y con independencia de que las juntas se sellen o no posteriormente, las juntas separan y definen grandes bloques que, a su vez, hay que trabajar por unidades parciales, pero de forma que luego se traben entre sí para constituir bloques de corta altura para facilitar el extendido del concreto fresco y su enfriamiento posterior antes de extenderse sobre el bloque horizontal siguiente.

Normalmente cada bloque horizontal se trabaja por capas sucesivas y superpuestas de 40 a 75 cm de espesor; cada capa se extiende de aguas abajo hacia aguas arriba y se vibra sobre la anterior. El concreto de cada capa no debe comenzar a fraguar hasta que la capa siguiente haya sido completamente extendida y vibrada, para que la adherencia entre ambas sea completa; de otra forma quedaría una junta imperfecta, de menos resistencia y con riesgo de facilitar la filtración desde el embalse.

#### *2.2.12.1 Juntas verticales en las presas de arco*

Las presas en arco también se pueden construir por bloques. En cañones estrechos se suelen construir arcos enteros en la parte baja hasta que el ancho sea del orden de 20 a 30 m, a partir del cual se va dividiendo en ménsulas.

El menor espesor de las presas bóveda permite, en general, prescindir de las juntas de construcción longitudinales paralelas a la corona y los bloques de concreto abarcan de uno a otro paramento, sin división.

Las juntas transversales de las presas arco son radiales, pero no pueden permitir el juego de dilataciones y contracciones que ocurren por efecto de los cambios de temperatura,

porque la presa arco debe funcionar como tal, y eso obliga a que sus secciones horizontales obviamente no puedan tener discontinuidad radial.

Antiguamente se usaban juntas abiertas, con secciones horizontales similares para garantizar la unión de la junta. Pero el problema es esencialmente distinto en una presa arco que en una de gravedad, en ésta ya se ha dicho que los esfuerzos tangenciales en una junta vertical son importantes respecto a los normales, por lo que la cohesión es imprescindible; por el contrario, en las juntas radiales verticales de una presa arco los esfuerzos normales son notables, y la resultante no suele estar, muy inclinada respecto a la normal, por lo que el rozamiento absorbe todo el esfuerzo tangencial o menos, la mayor parte.

Para mayor garantía de impermeabilidad es aconsejable colocar cerca del parámetro mojado una banda transversal de impermeabilización en toda la altura de la junta.

Las juntas verticales de las presas arco se convierten en inclinadas con frecuencia, en las proximidades del cimientado para buscar una incidencia normal a esto, acercándose a la transmisión de los esfuerzos, y para evitar las fisuras que, de no hacerlo, tendería a producirse en esta dirección.

### 2.2.13 Curado

Para lograr un concreto de buena calidad, la colocación adecuada de la mezcla deberá ir seguida del curado, en un medio ambiente propicio durante las etapas tempranas del fraguado. Se llama curado al procedimiento que se utiliza para promover la hidratación del cemento, consiste en mantener un contenido satisfactorio de humedad, y temperatura en el concreto recién colado, para que puedan desarrollarse las propiedades deseadas. Los objetivos del curado son:

- a. Prevenir (o reaprovisionar) la pérdida de humedad del concreto.
- b. Mantener una temperatura favorable en el concreto durante un período definido.

Existen diversos materiales, métodos y procedimientos para el curado del concreto. Los dos sistemas para obtener ese contenido satisfactorio de humedad son:

- La continua o frecuente aplicación de agua por anegamiento, aspersión, vapor o cubiertos de materiales saturados, como mantas de yute o algodón, alfombras, tierra o arena.
- Empleo de las hojas de plástico, papel impermeable o la aplicación de compuestos de curado formadores de membrana sobre el concreto, los cuales evitan la pérdida excesiva de agua en la superficie.

El concreto curado con agua debe mantenerse húmedo durante 14 días por lo menos, inmediatamente después de haber colado el concreto o hasta que se cubra con concreto fresco. El curado del concreto se pueda reducir a 6 días durante los periodos en los que la temperatura media diaria, en la vecindad de la obra, sea menor de 4.48°C (Candelas Ramírez, 2008).

## 2.3 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

En complemento con el apartado anterior, debido al proceso de hidratación del cemento, sumado a la baja conductividad del material y al método rápido de construcción, aparecen gradientes térmicos elevados entre el interior de la masa y la superficie exterior en estructuras de concreto masivo. Durante el enfriamiento, debido a la presencia de restricciones interiores y exteriores, este gradiente térmico causa tensiones térmicas importantes. Si estas tensiones térmicas, sumadas a otras sollicitaciones debido a cargas externas, exceden la resistencia del concreto, se producirán fisuras que atentan contra la durabilidad estructural (Azenha & Faria, 2008).

La posibilidad de agrietamiento por tensión térmica debe ser considerada tanto para la superficie como para dentro de la masa. Una de las influencias más fuertes para evitar el agrietamiento térmico es el control de la temperatura de colocación del concreto. Los sistemas o procedimientos para dicho control son:

- a) Enfriamiento del agua de la mezcla
- b) Pre enfriamiento o protección de los materiales agregados
- c) Post enfriamiento del concreto
- d) Concreto nocturno
- e) Cementos fríos, puzolanas o cenizas volantes
- f) Camadas de bajo espesor con menores frecuencias de colocación.

En general, cada sistema de enfriamiento de concreto para concreto masivo tiene los siguientes componentes (Empresa KTI-Plersch Kaltetechnik, 2015):

- Una planta de enfriamiento para el total de la mezcla de agua.
- Un depósito de agua fría con su estación de bombeo.
- Una planta de hielo en escamas.
- Almacén de hielo en escamas y un sistema totalmente automático de raspado y descarga de hielo.
- Entrega de hielo en escamas.
- Pesaje de hielo en escamas.
- Un sistema de enfriamiento de mezcla.
- Post-enfriamiento de la mezcla de concreto.

En resumen, el suministro de concreto de temperatura controlada para la construcción de grandes presas es una necesidad en todo el mundo. El desarrollo de la fuerza en el concreto es acompañado por el aumento de calor mientras el cemento endurece (calor de hidratación). En las pequeñas estructuras este fenómeno no es de importancia, pero sí es muy significativo en el manejo de concreto masivos. El calor de hidratación aumenta la temperatura hasta 25° durante el proceso de curación ocasionando un aumento del volumen.

La temperatura de colocación del concreto puede ser elegida de acuerdo a la potencial deformación que resulta del descenso de la temperatura desde el valor pico inicial hasta

la temperatura estable final, siempre que no exceda la capacidad de esfuerzos del concreto. El procedimiento es descrito por la siguiente expresión:

$$T_i = T_f + (100 \times C / e_t \times R) - A_t \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$T_i$  = Temperatura de colocación

$T_f$  = Temperatura final estable

$C$  = Capacidad de deformación (en millones)

$e_t$  = Coeficiente de expansión térmica por grado de temperatura (en millones)

$R$  = Grado de restricción en porcentaje

$A_t$  = Elevación inicial de la temperatura del concreto

Después de la curación del concreto, éste vuelve a enfriarse y reduce su volumen por lo que eventualmente pueden aparecer grietas. Por lo tanto, la temperatura inicial para verter el concreto debería reducirse tanto, que la temperatura máxima durante el proceso de curación no supere una cierta temperatura determinada por los consultores.

Aunque las temperaturas requeridas para verter el concreto varían de un sitio a otro y de un país a otro (de 7°C a 15°C máximo), siempre se requiere contar con un sofisticado sistema de refrigeración. Como los costos iniciales y de operación de un sistema de refrigeración son bastante altos (incluso pueden ser más altos que los de la propia planta de concreto) es esencial que el contratista tenga un optimizado sistema instalado.

### 2.3.1 Pre-Enfriamiento

Su objetivo es imponer un grado de control sobre la influencia de los cambios de temperatura del concreto en la producción de grietas. El diseñador debe saber el tipo y extensión del agrietamiento que puede ser tolerado en la estructura. El propio diseño puede dar cabida a anticipar el agrietamiento. En la mayoría de las circunstancias no es realista esperar que el agrietamiento no ocurra, por lo tanto, deben ser implementadas acciones de prevención para combatirlo.

Debido a que los agregados son la mayor parte de la mezcla de concreto, un cambio en la temperatura de los agregados, efectuara un cambio mayor (excepto cuando se usa hielo) en la temperatura del concreto. Como la cantidad de cemento es relativamente pequeña en una típica mezcla de concreto masivo, su enfriamiento no será significativo para un programa de control de temperatura.

Por conveniencia, la cantidad de concreto y las cantidades de sus componentes, pueden ser consideradas en términos de agua equivalente, en relación a sus capacidades térmicas (calor específico).

Los componentes del concreto pueden ser pre-enfriados de muchas maneras, por ejemplo:

- El agua puede ser enfriada o sustituida una parte de ella por hielo. En este caso debe darse atención al suministro de los materiales al mezclador y al tiempo de mezclado.
- Mantener en sombra los almacenes de agregados.
- Utilizar métodos para enfriar los agregados como: esparcir agua en los almacenes para suministrar enfriamiento por evaporación, esparcir agua fría sobre los agregados que se mueven en la banda transportadora, inmersión de los agregados en tanques con agua fría o soplar aire enfriado a través de las tolvas hasta forzar la evaporación del agua en almacenes aislados.
- Uso de nitrógeno líquido para enfriar el concreto durante su mezcla.
- Introducción de nitrógeno líquido dentro del cemento y ceniza volante durante la transferencia de los materiales de los tanques a los silos de almacenamiento.

Es frecuentemente necesaria la combinación de varias de estas prácticas o métodos de enfriamiento y por lo tanto se deben analizar las diferentes alternativas teniendo en cuenta los cambios de temperatura estacionales, sobre todo cuando éstos son extremos y decidir el o los procedimientos aplicables más económicos.

#### 2.3.1.1 *Enfriamiento del agua de mezclado*

El efecto que produce es relativamente limitado, pues el agua representa una baja proporción de la masa. El contenido en agua varía entre 70 y 140 l/m<sup>3</sup>, de la que debe descontarse, el contenido de los materiales pétreos, quedando para la actuación de un posible enfriamiento unos 36 a 100 l/m<sup>3</sup>. El agua se enfría en un circuito de evaporación de amoníaco hasta unos 4°C y suele llegar a la instalación del concreto a unos 5°C, con lo que el descenso de la temperatura producido en el concreto es solo de 1°C.

En el enfriamiento por hielo el calor de fusión del mismo es de 80 cal/g, con lo que se puede reducir la temperatura del concreto fresco en 1°C por cada 7.5 kg de hielo. Con proporciones de 35 a 100 kg de hielo por metro cúbico de concreto la temperatura de éste es de 6 a 16°C, que es ya un efecto sensible.

#### 2.3.1.2 *Enfriamiento y protección de los agregados*

El primer tipo de tratamiento es el pasivo, de protección contra el sol; para evitar el sobrecalentamiento de los materiales estos deben situarse en zona de sombra predominante o protegerlos con coberturas aislantes si están al aire, y pintar de blanco los silos. Otro paso más definitivo es enfriarlos artificialmente. En primer lugar, se sabe que hay de 3 a 3.5 veces más peso de materiales gruesos que de arena, por lo que es en los primeros en los que será mayor el rendimiento térmico. Por otra parte, la arena tiene poca inercia térmica y recupera la temperatura con relativa rapidez en cuanto cesa el tratamiento. Por ello, éste se ciñe a los elementos gruesos.

El enfriamiento de éstos se consigue por tres procedimientos aislados o combinados:

- Evaporación del agua superficial. Es el más simple y apto sobre todo en climas cálidos y secos: los agregados se van colocando en capas, que se rocían parcialmente con agua y se deja evaporar antes de colocar y tratar el siguiente bloque.

- Inmersión en agua o aspersión. En el primero, los agregados se colocan en un tanque por el que circula el agua a unos 5°C y se mantiene en ella durante unos 25 minutos. En el segundo, pasan en una cinta móvil por un túnel y se mojan por medio de un aspersor con agua a 2.5°C; la travesía suele durar de 4 a 5 minutos y la temperatura de los materiales se reduce en unos 9°C. Estos dos sistemas son los más empleados.
- Aire frío. Se hace circular aire frío sobre el material mayor de 20 mm (para evitar que los menores puedan helarse y formar bloques). El aire entra a 17°C en el silo y sale a unos 3°C y la temperatura de los agregados puede llegar a ser de -2°C a -7°C, al final de la operación.

Con todos estos tratamientos se puede conseguir un resultado conjunto de un descenso en unos 10°C en la temperatura del concreto al fraguar, que es una reducción sensible.

### 2.3.2 Post-enfriamiento

El objetivo del post-enfriamiento es evitar diferencias de temperatura entre las capas superficiales y el interior de la estructura, realizando un enfriamiento progresivo y uniforme de la masa de concreto hasta una temperatura similar a la temperatura media anual del sitio, evitando el choque térmico y el fisuramiento consecuente, manteniendo dentro de los límites de diseño las grietas que por contracción se presentarán.

El control de la temperatura del concreto masivo puede ser realizado por medio de la circulación de líquido, usualmente agua, a través de tubos de pared delgada embebida en el concreto; el agua que circula enfría el concreto, y el calor que ha recibido de éste es llevado por el agua al exterior, ya sea reintegrándola al río o llevándola a un órgano de enfriamiento, retornando al concreto en circuito cerrado.

Dependiendo de las dimensiones de la tubería, del volumen y temperatura del fluido circulante, el calor removido durante el proceso, puede reducir en una cantidad significativa el máximo de temperatura (pico) y además acelerará el enfriamiento hasta la temperatura ambiente.

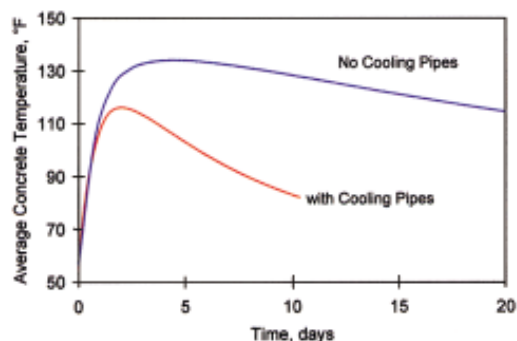


Figura 11.4 Efectos de la temperatura con tuberías internas de enfriamiento.  
Fuente: (Gajda & Vangeem, 2002)

De igual forma, la intensidad del enfriamiento depende de la temperatura del agua, su caudal y la separación de los tubos, es decir, el caudal específico, que suele ser, como máximo, de 0.5 cm<sup>3</sup>/s por metro cúbico del bloque. El efecto marginal obtenido por

encima de esta cifra es pequeño, por lo que no tiene interés en superarla. El diámetro de los tubos no influye prácticamente, por lo que se adopta un mínimo posible que dé una pérdida de carga hidráulica aceptable: normalmente suele ser de 1" a 1 ½".

Es común continuar con el proceso de enfriamiento después del máximo de temperatura hasta que alguna de las siguientes condiciones ocurra:

- a. La velocidad de enfriamiento del concreto alcanza el máximo que puede ser tolerada sin agrietarse.
- b. La temperatura del concreto decrece 17° C por abajo del valor del pico inicial. Este es un valor empírico en base a pruebas lentas de deformación por temperatura.
- c. El concreto se ha enfriado hasta su temperatura estable final u otra temperatura intermedia especificada por el diseñador.

Para garantizar la uniformidad del enfriamiento, cada cierto tiempo se invierte el sentido de circulación del agua. Cada 24 o 48 horas debe hacerse un control de temperatura del concreto, para lo que se interrumpe la circulación de agua hasta que ésta adquiera una temperatura estable, que es la del concreto. Este periodo de enfriamiento inicial puede ser corto de varios días o largo como un mes, posteriormente la temperatura del concreto crecerá otra vez, si el incremento es significativo, uno o más periodos de enfriamiento será necesario.

Las tuberías externas de alimentación deben ir convenientemente aisladas para evitar el calentamiento prematuro del agua. Pueden ir por las galerías de la presa apoyadas en los paramentos. Con este sistema se logra una gran eficacia y un control completo de la temperatura interna en el volumen total de la presa y durante todo el tiempo que sea necesario. Con esto el proceso de la obra queda liberado de las limitaciones de enfriamiento natural ya que:

- No solo se enfría desde la superficie libre del bloque, sino también, desde abajo de ella.
- El enfriamiento puede prolongarse indefinidamente y en pocos días.
- Puede controlarse a voluntad su intensidad, actuando sobre la temperatura y caudal del agua, mientras que el enfriamiento natural depende de la temperatura ambiente.

En contrapartida, la instalación y su mantenimiento son costosos y solo aplicables en presas cuyo gran volumen prácticamente lo exige o económicamente lo justifica por la disminución de plazo.

La temperatura del agua debe ser tal que no produzca una excesiva caída térmica en el concreto susceptible de producir fisuras.

El momento del comienzo del enfriamiento artificial es asunto discutido. Es normal empezar alrededor de 24 horas después del comienzo de la colocación del concreto con lo que se consigue reducir temperatura de 5 a 10°C. Esta primera fase de enfriamiento con agua natural suele durar de 2 a 3 meses, según la estación del año y la temperatura



exterior. En esta fase la caída de temperatura no debe ser superior  $0.5^{\circ}\text{C}$ , por lo que se utiliza el agua natural, sin enfriar, haciendo más lento el proceso, pero eficaz, pues además de las fisuras se evitan defectos de fraguado en la inmediación de los tubos. En esta etapa de enfriamiento es recomendable usar el equipo a toda su capacidad ya que siempre la generación de calor será mayor que la capacidad de desalojarlo. Es común que la temperatura pico se alcance entre el segundo y sexto día.

Posteriormente, entre los días 10 y 16 se deberá reducir la temperatura para no alcanzar la temperatura pico nuevamente, aun cuando queda mucho calor por liberarse.

En la segunda fase se emplea agua enfriada a una temperatura de  $2.5^{\circ}\text{C}$ . Esta fase suele comenzar cuando el concreto está a unos  $25^{\circ}\text{C}$ , pero la decisión depende de lo que sea más económico, dentro lo deseable. Esta parte del tratamiento suele durar 3 meses.

Este método tiene altos costos iniciales y operativos, pero sus beneficios superan esos costos si optimizamos apropiadamente el tamaño de la tubería, espacios y temperaturas (Vangeem & Gajda, 2002).

#### 2.3.2.1 *Serpentines*

Los tubos se colocan directamente sobre la superficie horizontal del concreto endurecido, en forma concéntrica o de parrilla, con los elementos tubulares rectos unidos por codos simples o en T, y una equidistancia entre ellos igual o ligeramente superior al espesor de los bloques. Así, la capa superior se hormigona sin estorbo alguno, pues los tubos quedan debajo, en el contacto entre bloques. Cada bloque queda, enfriado desde sus dos superficies horizontales.

Los materiales empleados en las tuberías que formarán los serpentines, que quedarán embebidas en el concreto, pueden ser de aluminio, acero, plástico o PVC, con dimensiones usuales de 25.4 mm de diámetro y 1.5 mm de espesor de pared. Para conseguir la mejor distribución del agua y del enfriamiento, la longitud total de cada circuito de tubos se limita a unos 300 m.

Cada serpiente deberá probarse antes de ser cubierto por el concreto y contar con un medidor de flujo. Se recomienda hacer circular el agua al mismo tiempo que el concreto la va recubriendo para asegurar el inicio del enfriamiento a edad temprana, para minimizar posibles daños en la tubería y para evitar que flote en el concreto fresco.

Para que el sistema de post-enfriamiento sea eficiente se requiere las instalaciones adecuadas de bombeo y refrigeración lo que está determinado por el número de serpentines en operación al mismo tiempo, por la temperatura de entrada establecida en el diseño y la necesidad de ser flexible en la duración esperada de la operación de enfriamiento del concreto. Se ha utilizado agua a  $3^{\circ}\text{C}$  para el post-enfriamiento y hasta  $1^{\circ}\text{C}$  mezclando agua con anticongelante en proporción 70:30 respectivamente. En tubería de 25 mm un gasto de 15 a 17 litros por minuto es recomendable para un adecuado intercambio de calor. Si el agua se toma de un río, deberá filtrarse para quitar sedimentos que puedan dañar al sistema.

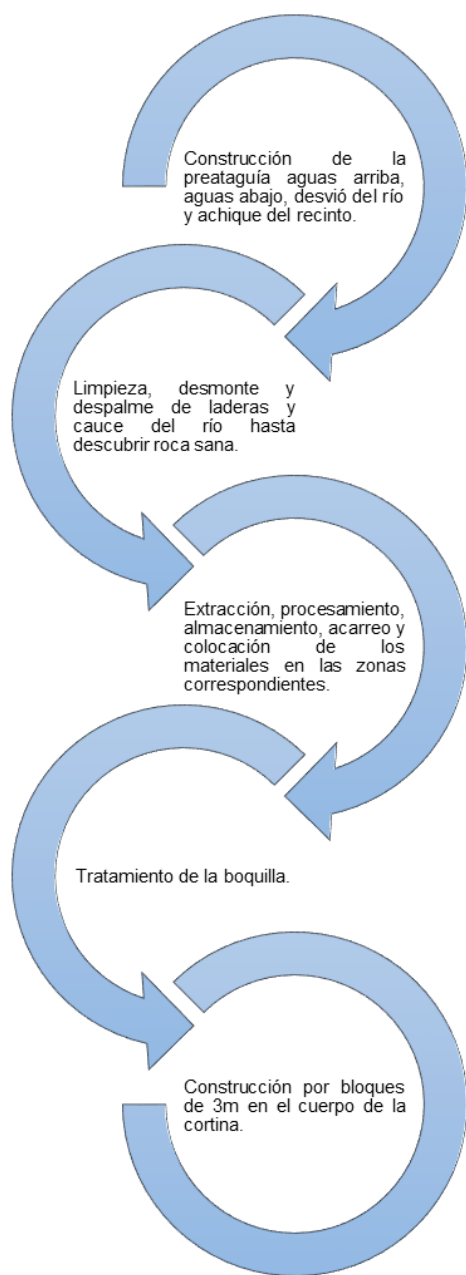
Adicionalmente a lo comentado, la operación del sistema de post-enfriamiento es de suma importancia ya que de ella depende el adecuado enfriamiento y la deformación del concreto dentro de los límites que admite sin agrietamientos peligrosos (Candelas Ramírez, 2008).

## 2.4 PROGRAMA GENERAL DE OBRA DE LAS CORTINAS DE CONCRETO

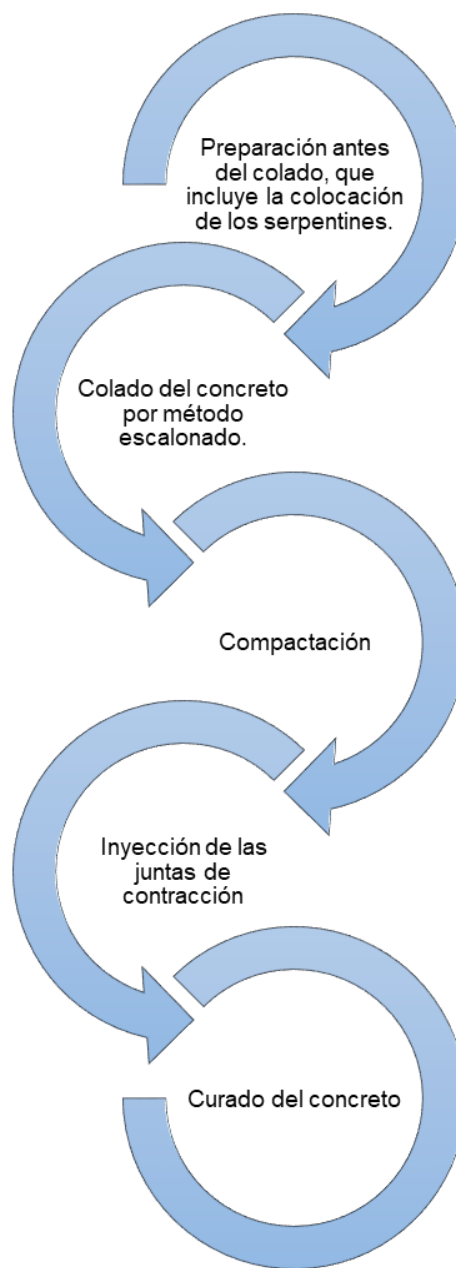
El procedimiento constructivo de una cortina de concreto se complementa con el procedimiento particular del concreto masivo, el cual tratamos en el apartado anterior, y con las actividades previas a realizar en todo el proyecto, tratadas en el capítulo anterior (Apartado 1.5). Dando como resultado las siguientes actividades generales:

- Ubicación de la cortina.
- Zonificación de los materiales sobre la cortina (Diseño geotécnico de la cortina)
- Ubicación y explotación de los bancos de materiales.
- Trazo y construcción de caminos de acceso tanto a bancos como al sitio de construcción de la cortina.
- Explotación de los bancos y almacenamiento de materiales.
- Trazo de líneas topográficas.
- Desmonte, despalme, regularización y limpieza del terreno.
- Excavación de laderas.
- Regularización y tratamientos de la zona de cimentación y zona del plinto.
- Carga, acarreo, colocación, adición de agua (en los materiales que así lo requieren) y compactación de los diferentes materiales en las zonas correspondientes, tanto de ataguías como del cuerpo de la cortina.
- Pruebas de verificación calidad de los materiales.
- Instrumentación del cuerpo de la cortina, juntas de losas y plinto.
- Tratamiento del talud aguas arriba de la cortina.
- Construcción de las losas de arranque.
- Construcción de del cuerpo de la cortina, tomando en consideración el procedimiento del concreto masivo.

La construcción de la cortina se debe efectuar en la secuencia indicada en el programa general de construcción y hasta las líneas y cotas mostradas en los planos.



*Figura II.5* Programación de actividades para la construcción de la cortina.  
Fuente: Elaboración propia



*Figura II.6* Actividades a realizar en la construcción de una cortina de concreto.  
Fuente: Elaboración propia

## 2.5 CONCLUSIÓN

Este capítulo ofreció las implicaciones constructivas que trae consigo una estructura de concreto masivo, como es el caso de las presas, mostrándonos qué se requiere para movilizar grandes cantidades de material (del orden de cientos de miles de metros cúbicos de concreto), así como de mano de obra, maquinaria y, en general, de medios que contribuyan a la consecución de nuestro objetivo. Mostrándonos los parámetros importantes del concreto masivo en la construcción de una presa (materiales, dosificación, procedimientos de construcción, etc.) para economizar en lo posible todo este proceso, sin dejar de lado la calidad y seguridad, a lo largo de toda la vida de la estructura.

Se estudió la evolución y los conceptos importantes del concreto masivo, asegurando ser la solución más adecuada para la construcción de diversos proyectos, entre ellos una presa hidroeléctrica. Mencionando sus múltiples ventajas, al igual que las medidas para controlar sus desventajas, adentrándonos a los sistemas de enfriamiento requeridos para su uso.

En resumen, un apropiado diseño del sistema de enfriamiento, puede reducir significativamente la temperatura del concreto y disminuir el tiempo que requiere para la realización de actividades consecuentes. Concluyendo que:

- Para minimizar la generación de calor en el concreto es importante el control necesario del contenido de materiales cementantes, opciones de tipos (cementos Portland y puzolanas) y cantidades.
- El pre-enfriamiento, busca bajar la temperatura de colado del concreto por medio del enfriamiento de sus ingredientes.
- El post-enfriamiento, pretende limitar el aumento de la temperatura de la estructura, removiendo el calor por medio de una tubería embebida en el concreto, por la cual circula agua fría.
- Se debe cuidar el procedimiento constructivo de la cortina, para proteger a la estructura de excesivos diferenciales de temperatura debido al manejo del concreto y programa de construcción.

---

## III. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ZIMAPÁN

---

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo tiene como objetivo mencionar las generalidades del Proyecto Hidroeléctrico Fernando Hiriart Balderrama o mejor conocido como P.H. Zimapán, la cual es nuestro caso de estudio. Esta central pertenece a la Gerencia Regional de Producción Central de la Comisión Federal de Electricidad. Esta obra fue adjudicada al consorcio formado por las empresas IMPREGILO, CONDUX, DUMEZ y COGEFAR.

Se encuentra localizada en El Infiernillo, ubicada entre los límites de los estados de Hidalgo y Querétaro, la cual aprovecha el potencial del río Moctezuma, perteneciente al sistema hidrológico del río Pánuco.

El P. H. Zimapán se comenzó a construir en 1989, aunque previamente y durante más de 10 años se realizaron estudios correspondientes a diferentes áreas (hidrología, geología, topografía, etc.) con el fin de determinar la viabilidad de la obra física. Fue inaugurada en 1995, como instalación primordial para el Sistema Eléctrico Nacional por su capacidad de rápida respuesta en la generación de la energía eléctrica para la zona central del país debido a su facilidad de interconexión con el Sistema Eléctrico Nacional.

En 1995, debido a su longitud de 21 kilómetros, aproximadamente, la posicionó como la más larga del mundo y su altura de 203 metros, como la cortina más alta en su tipo.

Se caracteriza por contar con un túnel de conducción hacia dos unidades generadoras, las dos unidades generadoras son tipo Pelton verticales, cada turbina tiene un diámetro de 4.5 metros, genera 146MW de potencia, alcanza una velocidad de 300 RPM con un consumo específico de 0.7 m<sup>3</sup> por cada kWh de energía eléctrica generada, en promedio generan anualmente 1,292.4 GWh, lo que la convirtió en el año de 1995 en la central hidroeléctrica con mayor potencia instalada en ese tipo de turbinas.

### 3.2 GENERALIDADES

#### 3.2.1 Sistema hidrológico

##### 3.2.1.1 Cuenca hidrográfica Río Pánuco

El río Pánuco nace en la cabecera hidrológica del río Tepeji o San Jerónimo, controlado por las presas de Taxhimay y Requena, donde cambia su nombre a río Tula. Sus orígenes se localizan en el cerro de La Bufa, dentro del Estado de México, a una elevación de 3,800 m, en el parteaguas que separa la cuenca del río Lerma y el Valle de México.

La cuenca del río Pánuco se encuentra situada geográficamente entre los 19° 01' y 23° 50' latitud norte, y entre 97° 46' y 101° 21' longitud oeste; tiene un área aproximada de 84,956 km<sup>2</sup>, que la sitúa en el cuarto lugar de la República Mexicana, la cual se encuentra distribuida dentro de las siguientes entidades federativas: Estado de México (2.8%), Puebla (0.1%), Hidalgo (20%), Querétaro (11%), Veracruz (12.1%), Guanajuato

(6.2%), San Luis Potosí (27.7%), Tamaulipas (19.5%) y Nuevo León (0.6%) (Pereyra Díaz, Pérez Sesma, & Salas Ortega, 2010).

### 3.2.1.2 *Región hidrológica No. 26 Río Panuco*

Esta se divide en Alto Panuco y Bajo Pánuco; la primera, está integrada por las cuencas del Río Tula, Río San Juan y una porción del Río Moctezuma. En la cuenca del Río Moctezuma es donde se ubica la P.H. Zimapán.

El río San Juan se alimenta de los escurrimientos de la parte septentrional de la Sierra de las Cruces, en las inmediaciones de Polotitlán y San Juan del Río; tiene su origen en la confluencia del Río Arroyo Zarco, que recibe agua de las presas Huapango, Molino y Prieto, localizadas a 1km de la población Toscoa, en el estado de Querétaro. Cruza el valle de San Juan del Río, donde recibe el agua del Río Caracol, alimenta la Presa Centenario y posteriormente pasa por Tequisquiapan. En su trayectoria recibe los excedentes de las Presas Madero y Paso de Tablas. En su recorrido 175km, drena una cuenca de 3,062 km<sup>2</sup>.

El Río Tula, que drena las zonas de Zumpango, Tezontepec, Mixquiahuala e Ixmiquilpan, tiene como uno de sus más importantes tributarios al Río Salado. Este último conduce las aguas negras de la Zona Metropolitana de la Cuenca de México (ZMCM), a través de las descargas de los túneles de Tequixquiac, que a su vez reciben excedentes de las aguas negras de la ZMCM que nos son utilizadas en el Distrito de Riego del Valle del Mezquital, conducidas por el gran Canal drena una cuenca de 6,660 km<sup>2</sup>.

Se define de esta manera un gran sistema hidrológico modificado, que parte del Río de la Compañía, pasa por el Lago de Texcoco (cuyas aguas descargan en el Gran Canal) pasando por los Ríos Salado y Salto, el cual también es tributario del Río Tula y este a su vez del Río Moctezuma. A la altura de la casa de máquinas de la Presa Zimapán, el Río Moctezuma se une al Tolimán, para formar después el Río Panuco que desemboca en el Golfo de México.

Si se toma en cuenta que parte de las aguas que se utilizan en la ZMCM provienen del Sistema Cutzamala, la Presa Zimapán forma parte de una transferencia continental de agua, de una cuenca oceánica a otra, con aguas de buena calidad de la Cuenca del Lerma en el Pacífico, modificadas en su calidad en la ZMCM y vertidas como aguas negras a la Cuenca del Pánuco en el Golfo de México. Este es el único caso documentado en el que se toma agua de la vertiente del Pacífico, se contamina y se vuelca la vertiente del Golfo de México.

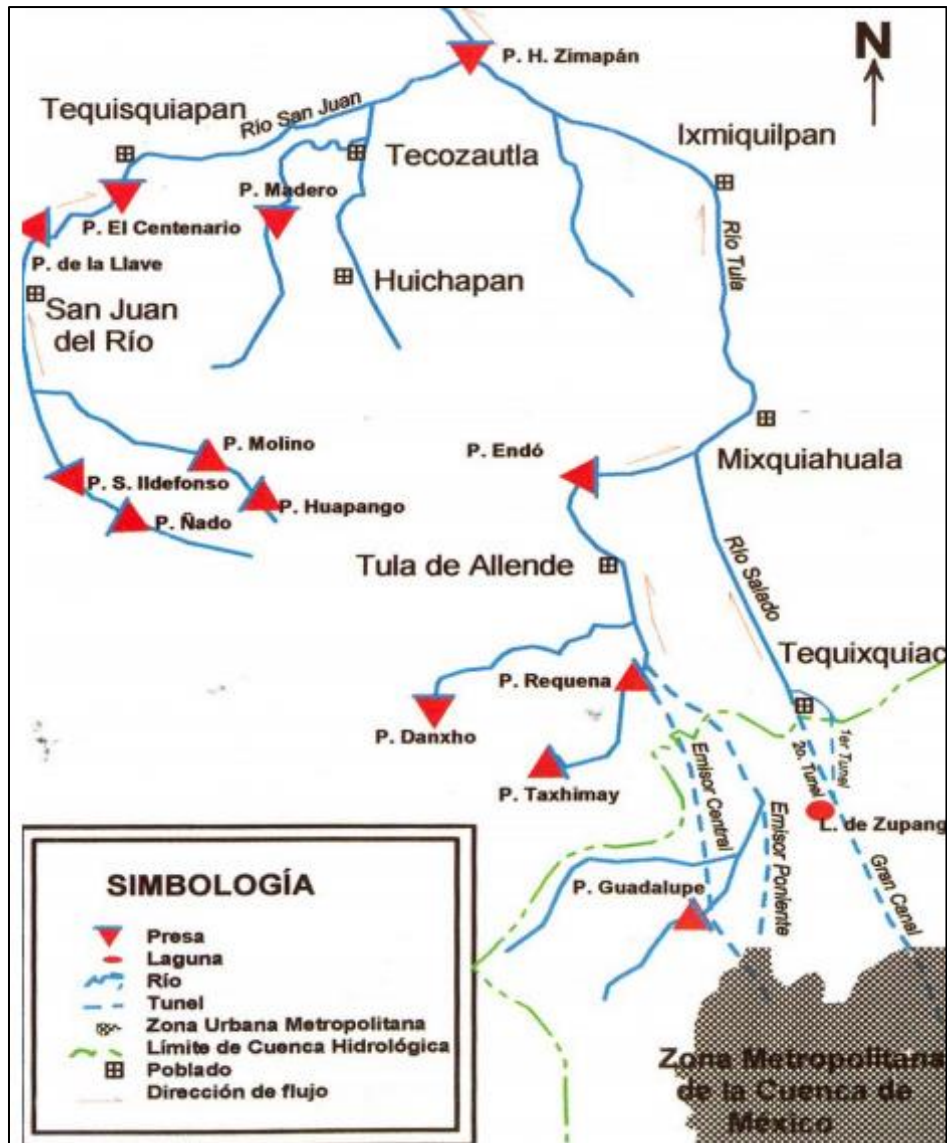


Figura III.1 Sistema fluvial y red de canales que alimentan al P.H. Zimapán.  
Fuente: (Cortés, Lozano, Pérez, & Martínez, 2006).

### 3.2.1.3 Cuenca del Río Moctezuma

Es considerada como el dren general del Río Pánuco, recibe el nombre a partir de la confluencia de los ríos Tula y San Juan del Río. Su rumbo es norte-noroeste, el cual conserva hasta la confluencia con el río Extoraz.

El área drenada por este río es aproximadamente de 4,606 km<sup>2</sup>, en los que se incluyen municipios, tanto del estado de Hidalgo como del estado de Querétaro, ya que sirve de límite entre estos dos estados, y también dentro de esta área se localizan municipios del estado de San Luis Potosí.

Los municipios que se ubican dentro de esta cuenca son: Pacula, Zimapán, Jacala, Pisaflores y la Misión, pertenecientes al estado de Hidalgo; así como, Landa de Matamoros al estado de Querétaro; además de: Tamazunchale, Tampacan, Tampamolón, Ciudad Santos, Coxcatlán, Huehuetlán, Tanquian de Escobedo, San Antonio y San Vicente Toncuayalab, estos del estado de San Luis Potosí.

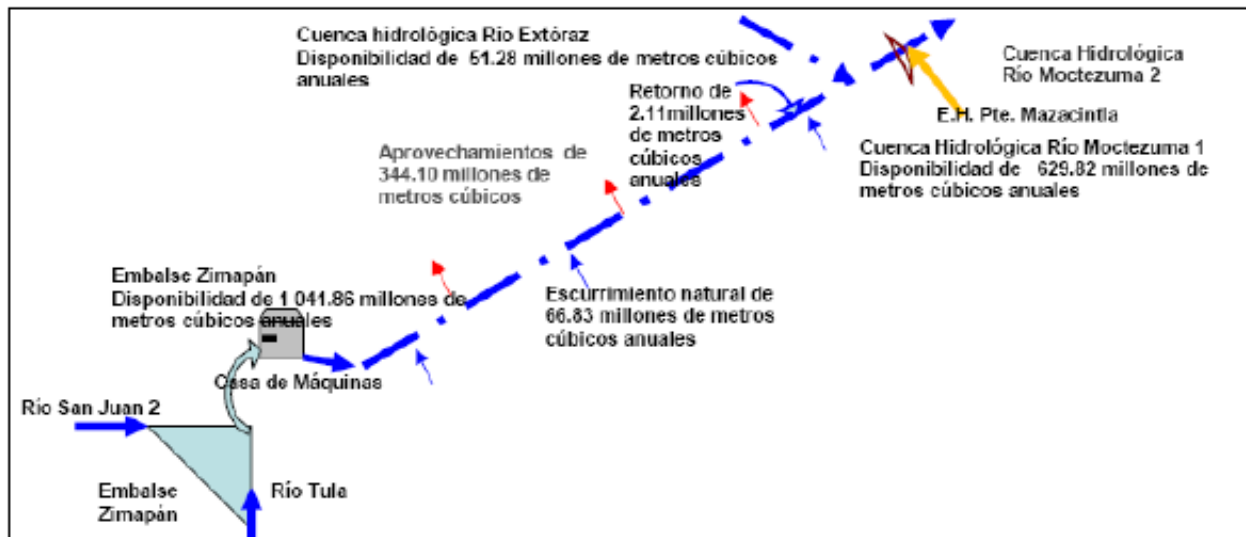


Figura III.2 Diagrama de balance de la Cuenca Hidrológica Río Moctezuma 1  
Fuente: (Lueghe Tamargo, 2009)

### 3.2.1.4 Aprovechamientos hidráulicos

Los aprovechamientos hidráulicos en la cuenca, tanto en riego como hidroeléctricos, son pocos. Por otro lado, la potencialidad de la cuenca en el aspecto de riego, es enorme debido a la gran extensión de terrenos en la llanura costera apropiados para ello y por los grandes volúmenes de agua dulce disponible. En lo que respecta al aprovechamiento hidráulico, sobre el río Tula, es donde se localiza el P.H. Zimapán, con capacidad de generación instalada de 292 MW.

### 3.2.2 Ubicación Geográfica

Fisiográficamente el proyecto se localiza en el límite de las provincias eje Neovolcánico Transmexicano y Sierra Madre Oriental. Esto hace que el proyecto se divida en dos áreas de trabajo, la zona de la boquilla y la zona de máquinas. El sitio donde se ubica la cortina se encuentra en la parte occidental del estado de Hidalgo, colindando con el estado de Querétaro, al norte-noroeste de la ciudad de Pachuca.

Sus coordenadas geográficas son 20° 40' de latitud Norte y 99° 30' de longitud Oeste, en la confluencia de los ríos Tula y San Juan, en el sitio conocido como Cañón de El Infiernillo. Las poblaciones más cercanas a la presa son Zimapán, Hidalgo y Cadereyta, Querétaro.



El proyecto hidroeléctrico capta las aguas del Río Tula y Río San Juan, su capacidad de almacenamiento es de 1,426 Mm<sup>3</sup>. Las aguas captadas son conducidas a lo largo de un túnel de 21,132 m hasta la casa de máquinas, donde su función es mover dos unidades de 146 MW de potencia cada una y generan un promedio anual de 1,292.4 GWh. Dada su localización y su cercanía a las ciudades de Querétaro y México, así como su facilidad de interconexión con el sistema eléctrico nacional por la proximidad con las plantas termoeléctricas de Tula, Hidalgo y el Sauz, Querétaro, ayuda a satisfacer las demandas de energía eléctrica de la región central del país (CONABIO, 2016).



Figura III.3 Imagen satelital del embalse del P.H. Zimapán

### 3.2.3 Clima

El clima de Zimapán es un clima estepa local. Hay pocas precipitaciones durante todo el año. Su clima se clasifica como BSh (Semiárido-cálido).

- La temperatura media anual es de 18.9°C.
- Hay alrededor de precipitaciones de 458mm. Entre los meses más secos y más húmedos, la diferencia en las precipitaciones es 71mm.
- La variación en las temperaturas durante todo el año es 6.8 ° C.
- Mayo es el mes más caluroso del año, con una temperatura media de 21.7 ° C.
- Las temperaturas medias más bajas del año se producen en enero, cuando está alrededor de 14.9 ° C.
- La precipitación es la más baja en febrero, con un promedio de 8mm.

- La mayor cantidad de precipitación ocurre en junio, con un promedio de 79mm.

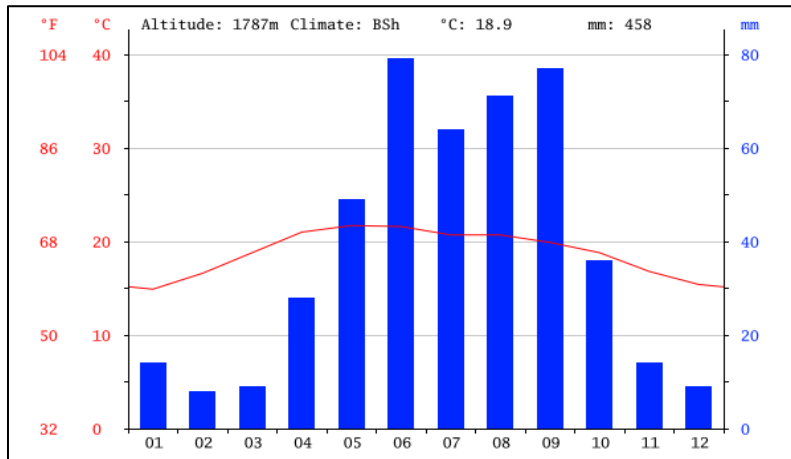


Figura III.4 Climograma de Zimapán  
Fuente: (Climate Date, 2017)

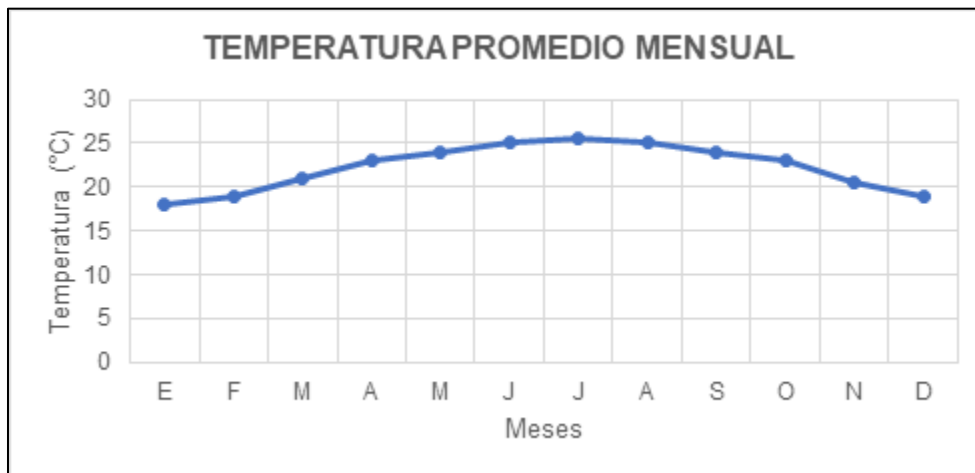


Figura III.5 Temperatura ambiental promedio ambiental del cañón del Infiernillo  
Fuente: (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

### 3.2.4 Geología

Para establecer las condiciones geológicas en la zona de obras, se llevaron a cabo en campo levantamientos geológicos y geofísicos, en los primeros se realizó una toma sistemática de datos estructurales y en los segundos se utilizó el método de refracción sísmica para su obtención. Posteriormente, se realizó la integración geológico-geofísica.

El cañón del Infiernillo está conformado por calizas dolomíticas y dolomías brechoides de la formación El Doctor, que por contacto tectónico sobreyace a una alternancia de calizas arcillosas, lutitas calcáreas y areniscas de la Formación Soyatal. Ocasionalmente se presentan entre los estratos, capas delgadas de material arcilloso.

En referencia a las condiciones geológicas del sitio donde se excavaron las galerías de inyección, drenaje e inspección del P.H. Zimapán, estructuralmente el cañón es un homoclinal de 10° de buzamiento de margen derecha a izquierda y hacia aguas abajo. Tiene una altura de 400 m con ambas paredes casi verticales y una anchura de 9m en el cauce y 270m en su parte superior.

Según estudios realizados en esta área, la roca presentaba recuperaciones del 91% y RQD (Rock Quality Designation) de 81% en promedio, la velocidad compresional oscila entre los 5000 y los 5100 m/s, y la permeabilidad es de menos de 0.7 unidades Lugeon, es decir, se trata de una roca de buena competencia y baja permeabilidad. En la zona somera de las laderas se presentan fisuras finas casi paralelas a la superficie de la roca, éstas son provocadas por efectos térmicos y la descompresión de esta zona; sin embargo, dichas fisuras no se consideraron para el diseño de las galerías debido a que esta zona se eliminaría con las excavaciones para el empotramiento de la cortina.

Existe otro sistema de fisuración que aparece en dirección diagonal al eje del río que, al combinarse con el anterior, en la zona de aguas abajo del eje de la cortina, logra delimitar una serie de cuñas potencialmente inestables y propensas a la acción de presiones intersticiales de agua que pudieran ocasionarse en esta zona; uno de los objetivos del proyecto de inyección y drenaje fue evitar o, por lo menos, disminuir la concentración de agua en dichas discontinuidades.

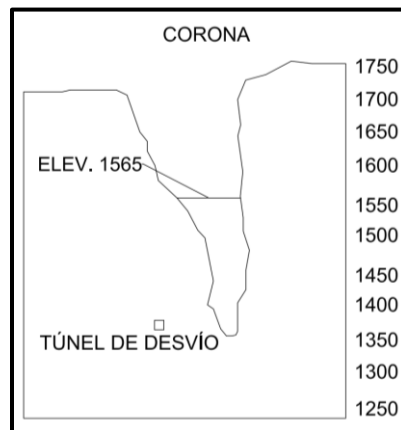


Figura III.6 Perfil estructural de la boquilla del P.H. Zimapán.

Por otra parte, en el macizo rocoso hay oquedades cársticas que, a pesar de no contar con un gran tamaño, sí representaron una de las principales vías para la circulación de agua; por tal motivo fue necesario rellenar mediante inyecciones, evitando así la fuga de agua del embalse y la presencia de la misma en lugares indeseables.

Es evidente que, en un macizo rocoso de estas características, puede escaparse a la inyección algunas oquedades cársticas que quedarían sin sellar, por ello se consideró la ejecución de las galerías de drenaje que permitían dar salida eficiente al agua que logre atravesar la pantalla de inyección (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991).

### 3.2.5 Impacto Ambiental

En ámbitos ambientales, los proyectos hidroeléctricos hacen “uso no consuntivo” del agua, es decir, que esta devuelve al ambiente el total del volumen extraído y hay poca alteración en la calidad del agua, es por eso que se vende como una fuente de energía limpia y ecológica. Sin embargo, es una manera de minimizar o negar las alteraciones posibles que se generan al desviar el cauce de los ríos, ya que se genera vasos hídricos que causan sedimentación, cambios de temperatura en la zona, y cambios generales en el camino hacia las turbinas.

El lugar donde se encuentra el P.H. Zimapán forma parte de la zona semiárida queretana-hidalguense, extremo sur del desierto Chihuahuense, con el que comparte ciertas afinidades en lo edáfico y climático, binomio que ha originado que ciertas especies de cactáceas y de otras familias botánicas presenten una biogeografía común en ambas zonas. La construcción de la presa trajo consigo algunas consecuencias ambientales afectando parte de la flora y la fauna del lugar, como fue el daño a la población de la vegetación *Echinocactus grusonii* cactácea que se ha tomado como icono del municipio de Cadereyta de Montes (Nieto León, 2016).

Por otro lado, el embalse del P.H. Zimapán está considerada como una de las principales presas del altiplano para la pesca recreativa, y aunque en sus aguas también se llegan a practicar esquí y veleo, el lanzar el anzuelo es, sin duda, el deporte dominante. Actualmente existen cooperativas de pesca comercial así como organizaciones de pesca deportiva, las cuales, realizan algunos eventos dentro de la presa con el Serial de Pesca Zimapán que se organiza anualmente. Todas las competencias se llevan a cabo según la regla de “captura y libera”, que permite preservar la vida de las lobinas que pican el anzuelo. De esta manera, el P.H. Zimapán se ha convertido en un excelente lugar para quienes quieren disfrutar de la pesca y apreciar una gran obra de la ingeniería moderna.



Figura III.7 Foto del recorrido en lancha por el embalse del P.H. Zimapán.

### 3.2.6 Impacto Social

En el aspecto social, la construcción de una presa puede presentar reubicaciones inducidas por programas de desarrollo, las cuales son atendidas mediante planes de reubicación particulares.

El lago artificial que se forma a partir de la cortina, se extiende 14 kilómetros aguas arriba del río San Juan y 12 kilómetros sobre el río Tula afectando a 31 comunidades de 17 ejidos y alrededor de 7 comunidades con régimen de pequeña propiedad, y otra con concesión federal. Existen además otra serie de obras importantes que se construyeron alrededor de la cortina y su embalse: canal de conducción, casa de máquinas, carreteras, campamentos, helipuertos, tendido de líneas eléctricas, instalación de plantas de concreto y talleres, y uso de banco de materiales, que causaron afectaciones socio-productivas y por ende culturales, a otras comunidades fuera del área de embalse. De esa manera encontramos un total de 48 comunidades afectadas directamente en diversos grados y formas, más otro número no cuantificado exactamente, de comunidades impactadas indirectamente (Comisión Federal de Electricidad (CFE); Enriquez, J., 1992).

En una aproximación global se afectaron directa e indirectamente, comunidades en por lo menos cinco áreas diferenciadas:

1. *Área central del embalse.* En ella la CFE, agente operativo a cargo del proyecto, determinó que fue donde se presentaron las principales alteraciones. Estas comunidades fueron reubicadas, centrandose en ellas las acciones de atención social. Las comunidades eran:
  - Rancho Nuevo, Vista Hermosa y la Vega en el ejido Vista Hermosa del municipio de Cadereyta, Querétaro. De allí se reubicaron a poco más de 2,100 personas (para lo que se construyeron 400 viviendas) hacia una meseta llamada Mesa de León en terrenos del propio ejido, denominando al nuevo poblado "Bella Vista del Río".
  - Paso del Arenal, del ejido Saucillo en el municipio de Zimapán, Hidalgo, misma que fue reubicada en terrenos cercanos a la comunidad de la Candelaria en Tasquillo, Hidalgo, para lo que se construyeron 20 viviendas unifamiliares y 7 "milperas".
  - Los llamados poblados dispersos de Machotí (asentados en los parajes de El Cardonal, Machotí, El Limón, San Antonio y la Joya que en conjunto integraban 15 viviendas) del ejido Aljibes, municipio de Tecozautla y que fueron reubicados en un predio cerca de la Esquina en el mismo municipio. Allí se construyeron 16 viviendas unifamiliares y 73 milperas.
  - Algunas familias (6 viviendas unifamiliares y 6 milperas) de El Epazote en el ejido del mismo nombre, municipio de Tasquillo y que fueron reubicados en un predio colindante de esa misma cabecera municipal.

2. *Área periférica*, estaba conformada por el resto de las comunidades del embalse, a las cuales se les prestó una menor atención, fueron afectadas principalmente por pérdidas de parcelas de cultivo de riego y temporal, terrenos de agostadero e infraestructura productiva variada. Las acciones de atención consistieron en indemnización y/o expropiación de sus terrenos y bienes productivos.
3. *Zona de casa de máquinas*, distante del embalse aproximadamente 22 kilómetros aguas abajo del Moctezuma, en donde se encuentran las comunidades La Mora del ejido de Maconí (municipio San Joaquín, Qro.) y Los Ruzzios en el ejido de Adjuntas (municipio de Zimapán, Hgo.), en ellas las acciones fueron reubicar a dos familias de la primera comunidad y a 5 de la segunda dentro de las propias comunidades, además de presentarse otras afectaciones en bienes y en terrenos productivos.
4. *Comunidades receptoras de los procesos de reubicación*; estamos hablando de cuatro comunidades de tres municipios diferentes que se vieron impactados por la llegada de vecinos, que se reubicaron, afectando en la demanda de los servicios.
5. *Resto del área de impacto*. Situada fuera del embalse, y que comprende las cabeceras municipales y comunidades cercanas a las obras las cuales fueron afectadas por obras de caminos, campamentos, torres de energía, helipuertos, uso de bancos de materiales, túnel de conducción o por ser sitios de residencia y/o esparcimiento de ingenieros. Esta zona fue mínimamente atendida.

Las afectaciones presentadas en las poblaciones fueron las siguientes:

TIPOS DE AFECTACIÓN	AFECTADOS
<i>Afectación directa</i>	Aquí se encuentran los pobladores que: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fueron reubicados temporalmente y los de forma definitiva.</li> <li>• No fueron reubicados y perdieron su casa, milpera y/o tierra.</li> <li>• Perdieron su tierra de pastoreo y/o su área de recolección de plantas.</li> <li>• Perdieron sus fuentes de trabajo (jornaleros, avecindados, artesanos, etc.) e incluso sus fuentes de alimentación (huertos y frutales de los cuales se les permitía consumir y especies menores que se cazaban).</li> </ul>
<i>Afectación Indirecta</i>	Vecinos de los pobladores al ser reubicados o indemnizados que dejaron de participar en las obras de mantenimiento de la infraestructura comunal (canal para riego por ejemplo).

<i>Afectación Cultural</i>	Modificaciones de las relaciones y de las formas de organización (política, religiosa, comunitaria e incluso familiar) para la atención de todos los asuntos de la vida social en las comunidades, las alteraciones en espacios compartidos y/o simbólicos, y en composición sociocultural, entre otros.
----------------------------	--

### 3.2.6.1 Acciones compensatorias de la CFE

Como parte del proceso de atención social, la CFE realizó como principales acciones las siguientes:

- *Organización y Realización de Traslados temporales.* Por las condiciones constructivas del proyecto se tuvieron que realizar traslados temporales en algunos casos, antes de verificar los definitivos. Esto significó la construcción de viviendas temporales estilo campamentos, para que fueran ocupados por los afectados, en tanto se construían las definitivas y se realizaba el traslado final.
- *Construcción de viviendas de reposición.* Esta acción se realizó con plena participación de los afectados y/o sus comités de representantes, negociándose ventajas para los reubicados como el hecho de que el número de recamaras correspondía al número de cuartos con que se contaba en la vivienda original, adicionándole la sala-comedor, cocina y baño.
- *Reposición productiva.* En esta acción se acordó restituirles la tierra que poseían mediante una proporción de 2x1. Sólo en el caso de las comunidades de Querétaro no se llevó a cabo este acuerdo, pues éstas decidieron libremente que se les indemnizara en efectivo.
- *Indemnizaciones varias.* Se indemnizaron bienes como: cercas, canales, varias infraestructuras, árboles y cosechas. Al igual que la propia tierra (sobre todo de las comunidades afectadas que no serían reubicadas, de las pequeñas propiedades afectadas y de las comunidades de Querétaro, por el hecho ya antes señalado), mediante el proceso de expropiación por causa de utilidad pública.

Como información adicional, para este proyecto no existió un programa de atención regional que definiera los mecanismos para atender a las comunidades impactadas de acuerdo a sus tipos, grados y tiempos de afectación. Ya que al no existir una normatividad, las concertaciones quedaban bajo el criterio de la gente encargada (Greaves, 1997).

## 3.3 EJECUCIÓN DEL PROYECTO

En enero de 1989 con los estudios de pre-factibilidad y los básicos de geología e hidrología de la cuenca del valle de México, del río Tula y del río San Juan, así como los registros de escurrimientos, azolves, evaporaciones, temperaturas y lluvias, se permitió determinar la magnitud del aprovechamiento del P.H. Zimapán. Para lo que en abril de 1989 se iniciaban las obras de infraestructura.

### 3.3.1 Caminos de acceso

Para facilitar los trabajos de construcción fue necesario la realización de una red de caminos para dar acceso a la maquinaria de movimiento de tierras, el cual constaba de 130km en lo más abrupto de la sierra gorda. El campamento central se encontraba ubicado en Mesa de León, el cual se encontraba a 10min en vuelo con helicóptero y 3.5 h por tierra a la casa de máquinas. Para ello, se convino caminos de San Joaquín- Casa de Maquinas (32km), Casa de Maquinas- Pozo de Oscilación (7km), Zimapán-Bothiñá (18km de acondicionamiento), Cadereyta- Boquilla (28.5 km de acondicionamiento, 1.5 km de construcción), Bothiñá – Obra de toma (10.5 km de acondicionamiento, 1.5 km de construcción).

El poblado más próximo es San Joaquín y se encuentra a 32 km de Casa de máquinas, se tiene un diferencial de nivel de 1500 metros en una distancia de 24 kilómetros, la orografía de la zona fue un gran reto para la ingeniería mexicana, al trazar un camino en este terreno tan accidentado.



*Figura III.8* Camino de acceso a la Casa de Maquinas.



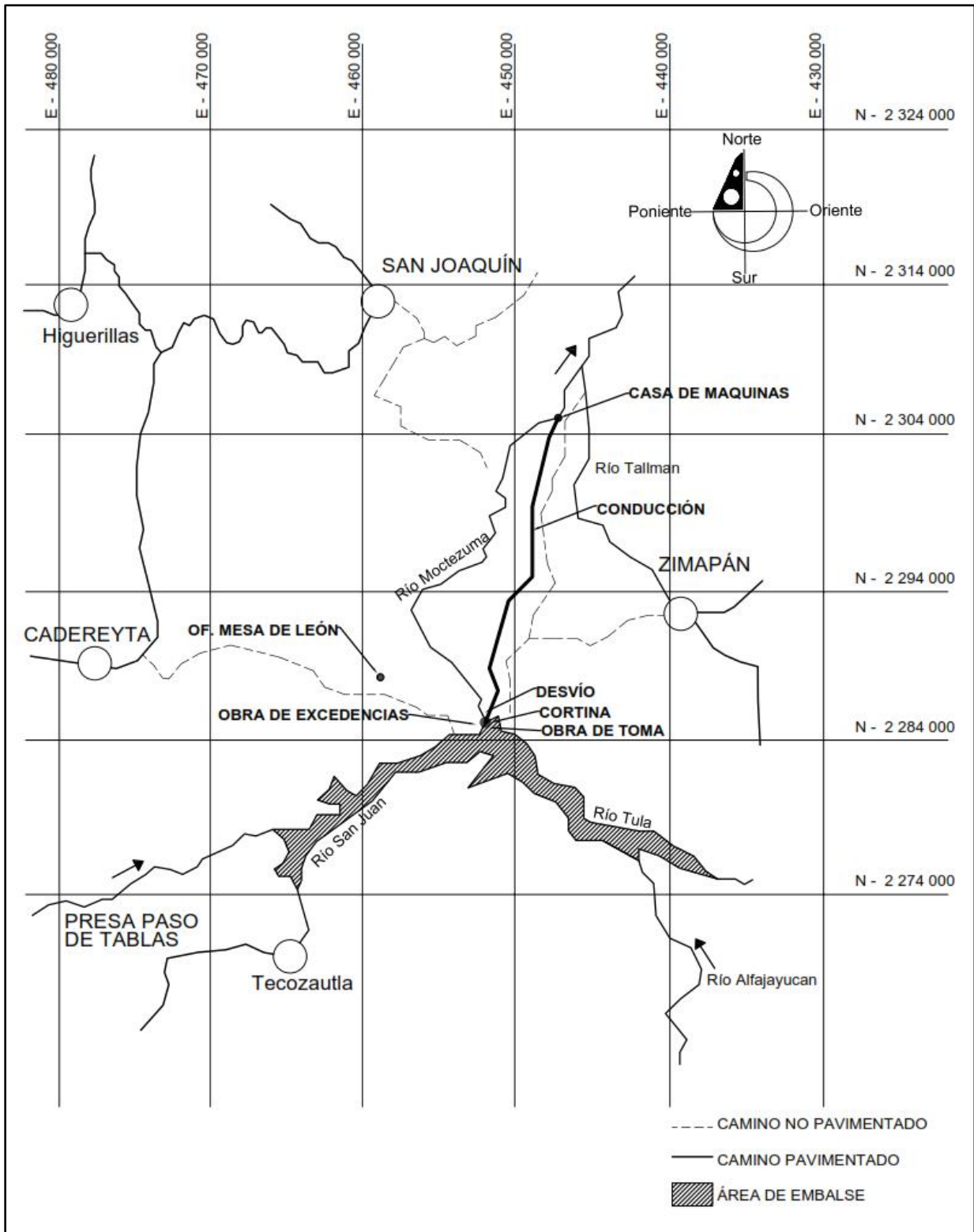


Figura III.9 Ubicación de los caminos de acceso y elementos principales del P.H. Zimapán  
 Fuente: (Arévalo Mendoza, 2016)

### 3.3.2 Materiales de Construcción

En el sitio de obra existen bancos de grava-arena y canteras de piedra en cantidad suficiente y calidad adecuada que fueron utilizados para fabricar los concretos de los diferentes componentes del proyecto. Por lo que fue necesario la instalación de una planta de trituración de agregados.

Las plantas instaladas para la elaboración del concreto, se ubicaron a las proximidades del banco del Yedhay, por encima del nivel del embalse, de donde provenían los agregados



*Figura III.10* Planta de trituración de los agregados utilizada en el P.H. Zimapán.

Para la fabricación del concreto fue necesario usar el agua de los ríos San Juan, Tula y Moctezuma, los cuales eran aceptables para su uso con un tratamiento adecuado, el cual incluyó la caracterización físico-química.

### 3.3.3 Obras de desvío

Las obras de desvío comprenden: los túneles, las lumbreras y plataformas para el cierre provisional y definitivo, así como las ataguías aguas arriba y aguas abajo (Hernández Mondragón, 2005).

El consorcio encargado de la construcción contemplo excavar primero la bóveda, seguida por un frente de banqueo a una distancia de 50m a 75m atrás. Se consideró un acceso hacia el portal de salida para empezar algunos trabajos allí antes de llegar con la excavación del túnel de desvío. Este acceso fue útil para la CFE, ya que gracias a ella se verificaba las condiciones geológicas y topográficas para corroborar o modificar el diseño de la cortina.

Esta obra, consiste en un túnel no revestido ubicado en la ladera izquierda del Cañón del Infiernillo, tiene una longitud de 566m y un diámetro de 9.40m en sección portal y gasto

de diseño máximo de 702m<sup>3</sup>/s. La roca observada en el socavón No. 1 indicó que su calidad era adecuada para la construcción y operación del túnel.

Así mismo, se construyó una ataguía aguas arriba de materiales térreos con corona a la elevación 1409.50m.s.n.m. la cual era el camino de acceso al sitio de la cortina. Contaba con una sección reducida, con un volumen total de materiales de 333,414m<sup>3</sup>.

Su plan de construcción fue dragar lo que era factible para desplantar la ataguía sobre las gravas y arenas restantes. Se inició limpiando las laderas de apoyo y el 2 de abril de 1991 se realizó con éxito la desviación del agua de estiaje de los ríos Tula y San Juan por el túnel. El túnel puede descargar 810m<sup>3</sup>/s que corresponde a un tiempo de retorno de 20 años.

Tabla III.1 *Características generales de la obra de desvío.*

<i>Gasto máximo para avenida de tr= 20 años</i>	810m <sup>3</sup> /s
<i>Volumen de la avenida de tr= 20 años</i>	310 millones m <sup>3</sup>
<i>Gasto máximo del diseño para el túnel</i>	702 m <sup>3</sup> /s
<i>Velocidad máxima</i>	8m/s
<i>Elevación de la plantilla a la entrada</i>	1,383 m.s.n.m.
<i>Total de excavación entrada, lumbreras y túneles</i>	122,000 m <sup>3</sup>
<i>Volumen total de concreto</i>	5,910 m <sup>3</sup>
<i>Acero de Refuerzo y estructural</i>	115 t

Tabla III.2 *Características generales de las ataguías.*

<i>Tipo</i>	<i>Materiales graduados</i>
<i>Talud de Aguas Arriba</i>	1.8 : 1
<i>Talud Aguas Abajo</i>	1.8 : 1
<i>Elevación de la Corona</i>	1409.50 m.s.n.m.
<i>Volumen total de materiales</i>	333,414 m <sup>3</sup>

#### 3.3.4 Obras de contención

La cortina de la central es de tipo Arco - Bóveda. Debido a las características geológicas y topográficas de la boquilla ubicada dentro del cañón de El Infiernillo, la cortina tiene una altura desde el desplante hasta la corona de 203m. Tiene en su base 22m de ancho y en la corona 5m, cuenta con una ampliación a un camino carretero con 2 bandas de

circulación que sirve para unir las poblaciones de Cadereyta, Qro. y Zimapán, Hgo. con una longitud sobre la cortina de 130m.

Para la adecuada cimentación de la cortina se removieron los bloques sueltos y de roca alterada y descomprimida, así como el material aluvial del cauce. Para el empotramiento de la cortina se requirió el empleo de la técnica de “pre corte” cuyo objetivo fue reducir el fracturamiento inducido en la roca por el uso de explosivos.

Tabla III.3 *Características generales de la cortina.*

<i>Tipo</i>	Arco- Bóveda de concreto
<i>Elevación de la corona</i>	1,565 m.s.n.m.
<i>Longitud de la corona</i>	122.00 m
<i>Altura total del desplante</i>	203.00 m
<i>Volumen de concreto</i>	220,000 m <sup>3</sup>
<i>Elevación de desplante</i>	1,362 m.s.n.m.
<i>Bordo libre</i>	2.00 m

Tabla III.4 *Niveles característicos de diseño del P.H. Zimapán*

<i>Nivel de agua mínimo de operación (NAMINO)</i>	1520 m.s.n.m.
<i>Nivel de agua máximo de operación (NAMO)</i>	1560 m.s.n.m.
<i>Nivel de agua máximo extraordinario (NAME)</i>	1563 m.s.n.m.

Para la realización de las soluciones y modificaciones que se desarrollaron, previas y durante, en el proyecto de la cortina fue necesario contar con:

- a) Topografía de detalle de la boquilla 50m aguas arriba y aguas abajo del eje.
- b) Levantamiento detallado de fracturas, contactos, fallas locales en la zona de apoyo de la estructura.
- c) Verificación del levantamiento, durante el proceso de excavación de la zanja perimetral para apoyo de la cortina.
- d) Definición mediante barrenos de la geometría de la falla El Doctor aguas debajo de la presa.

En el siguiente capítulo se retomará a detalle el proceso constructivo de la cortina.

### 3.3.5 Obras de generación

La obra de generación se conforma por una obra de toma de sección herradura de 4.70m de diámetro y 21km de longitud, al término del túnel de conducción se dispone de una tubería blindada con acero de 4m de diámetro, uniendo a la conducción con un pozo de oscilación de 12m de diámetro y 133m de altura, esto se complementa mediante una

tubería de acero de 3.50m de diámetro y 1080m de longitud que trabaja a presión, en su parte final, antes de llegar a la casa de máquinas, se bifurca en ramales de 2.10 m de diámetro cada uno. Esta obra se encuentra ubicada en el margen derecha.

Tabla III.5 *Cantidades de obra generados en la construcción de las obras de generación.*

<i>Excavación a cielo abierto</i>	79,350 m <sup>3</sup>
<i>Excavación en túnel</i>	491,100 m <sup>3</sup>
<i>Excavación en caverna</i>	66,400 m <sup>3</sup>
<i>Concreto</i>	97,850 m <sup>3</sup>
<i>Acero de refuerzo</i>	2,500 t
<i>Acero estructural, blindaje</i>	2,800 t

### 3.3.5.1 Túnel de conducción

La conducción del agua desde la obra de toma hasta el pozo de oscilación es por medio de un túnel de sección herradura de 4.70m de altura, desde el desplante hasta la clave del túnel, y 21km de longitud, partiendo de la ladera derecha del río Tula y terminando en el cerro de los Lirios donde este localizado el pozo de oscilación. Cuenta con un revestimiento de concreto simple, prácticamente en toda su longitud, esta tubería tiene una pendiente de 0.00207 para un gasto de diseño de 29.50 m<sup>3</sup>/s por unidad; la carga hidráulica máxima en el interior del túnel es de 110m.

Esta se realizó con diez frentes de trabajo y sus avances eran de 7 - 8m por día. Las condiciones geológicas fueron diversas, se tuvieron problemas de estabilidad ya que se encontraban zonas de arcilla mezcladas con bloques grandes de caliza, por lo que se tuvo que instalar marcos de acero con retajes de madera y algunos anclajes para soportar la roca. Fue necesario instalar los anclajes primero y esperar algunos días (2 o 3 semanas) para colocar el concreto lanzado, dejando muchas veces unas franjas sin concreto para permitir algunas deformaciones.

Para el concreto de revestimiento, se usó: un cemento no caliente, agua fría, cemento con bajo calor de hidratación, aditivos apropiados y cantidades de cemento entre 200-250 kg/m<sup>3</sup>. De igual forma se utilizó aditivos retardantes y superplastificantes. Asegurando un concreto sin grietas de contracción.

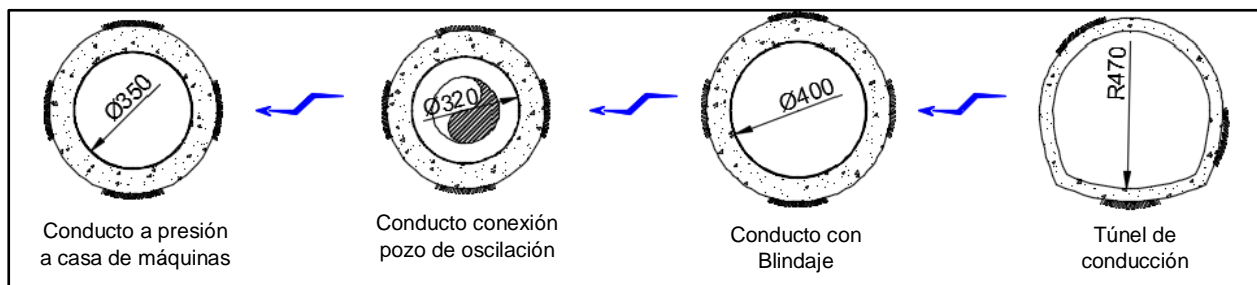


Figura III.11 Principales secciones transversales que se presentan a lo largo del túnel de conducción.

La cobertura de roca sobre el túnel, así como la geología varían a lo largo del mismo. En la tabla siguiente se resume aproximadamente la magnitud de la cobertura y del tipo de roca que se excavó en el:

Tabla III.6 *Magnitud de la cobertura y del tipo de roca que se excavó en el túnel de conducción.*

Cadenamiento (km)	Cobertura de roca (m)	Formación Geológica
0 – 2.8	250 -400	Kd, Caliza y dolomía
2.8 – 10.0	450- 550	Kd, caliza y dolomía Ks, pizarra y arenisca; cuello volcánico y diques; contactos y fallas.
10.0 – 15.5	100 – 250	Ks, pizarra y arenisca; numerosos diques y pequeñas fallas
15.5 – 16.5	250 – 350	Ks, Kd
16.5 – 18.4	350 – 750	Kd
18.4 – 20.3	750 – 850 (100m al final)	Jt, caliza con pizarras

Tabla III.7 *Principales dimensiones del túnel de conducción.*

Radio, sección herradura	4.70 m
Longitud	20,964.78 m

### 3.3.5.2 Pozo de oscilación

Tiene un diámetro de 12 m y 133 m de altura, el cual cuenta con un revestimiento de concreto armado. Su función principal es proporcionar rápidamente el agua necesaria durante los aumentos de la demanda de carga eléctrica, así como amortiguar y controlar las variaciones de presión debido al fenómeno transitorio llamado Golpe de Ariete producido por demandas y rechazos súbitos de carga eléctrica. Se localiza en las coordenadas E=452,138.902, N=2'304,260.458.

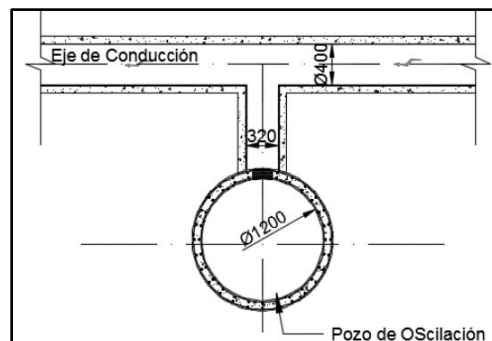


Figura III.12 Sección transversal del pozo de oscilación.

Tabla III.8 *Principales dimensiones del pozo de oscilación.*

<i>Altura</i>	133 m
<i>Diámetro</i>	12 m
<i>Elevación de desplante</i>	1354.243 m.s.n.m.
<i>Diámetro de orificio</i>	2 m

### 3.3.5.3 *Tuberías de presión*

Después del pozo de oscilación, la obra de generación se complementa mediante una tubería de acero cuyo diámetro interior con camisa metálica empacada en concreto es de 3.5m, tiene una longitud de 1,050 m y antes de llegar a las unidades, se bifurca en dos conducciones de 2.10 m de diámetro para alimentar a cada turbina.

Tabla III.9 *Principales dimensiones de la tubería de presión.*

<i>Diámetro</i>	3.5 m
<i>Longitud</i>	1,050 m
<i>Diámetro de bifurcación</i>	2.10 m
<i>Longitud de bifurcación</i>	43 m

### 3.3.5.4 *Casa de máquinas*

Esta obra, es tipo caverna y sus dimensiones son: 22.60m de ancho, 70.60, de largo y 37.55m de alto. En su excavación, debido a las diaclasas y algunas fallas, fue necesario colocar anclajes y concreto lanzado. Para monitorear la estabilidad de las bóvedas y las paredes (particularmente del pilar entre la caverna de casa de máquinas y la sala de transformadores) fueron instalados varios extensómetros. Para el montaje electromecánico se instaló un sistema de tierras y la excavación de la obra termino exitosamente en febrero de 1992.

Tabla III.10 *Principales dimensiones de la casa de máquinas.*

<i>Tipo</i>	Caverna
<i>Ancho</i>	22.60 m
<i>Largo</i>	70.60 m
<i>Alto</i>	37.55 m

### 3.3.5.5 *Galería de transformadores*

Tabla III.11 *Principales dimensiones de la galería de transformadores.*

<i>Tipo</i>	Caverna
<i>Ancho</i>	11.50 m

Largo	70 m
Alto	11 m

### 3.3.6 Obras de excedencias

Se encuentra ubicada en el margen izquierdo, controlado en un túnel. Cuenta dos túneles de sección portal, con una dimensión de 9.90m de diámetro, con altura variable de 13.90m, el túnel No.1 tiene una longitud de 567m y el túnel No.2 533m. Los gastos se controlan con 2 compuertas radiales de 9.90 m x 18.50m con una capacidad máxima de 2520m<sup>3</sup>/s.

Tabla III.12 Principales características de la obra de excedencias.

Gasto máximo para avenida de tr= 10,000 años	2,960 m <sup>3</sup> /s
Volumen de la avenida de tr= 10,000 años	1,209 millones m <sup>3</sup>
Gasto máximo diseño	2,520 m <sup>3</sup> /s
Elevación cresta	1,545.27 m.s.n.m.
Velocidad máxima del agua en el túnel	25.00 m/s
Relación de llenado	0.65
Excavación en túnel	142,500 m <sup>3</sup>
Concreto	68,800 m <sup>3</sup>
Acero de Refuerzo	4,450 ton

### 3.3.7 Unidades generadoras

#### 3.3.7.1 Turbinas

Las dos turbinas Pelton de eje vertical se localizan en la casa de máquinas tipo caverna.



Figura III.13 Turbina Pelton en la casa de máquinas en el P.H. Zimapán.



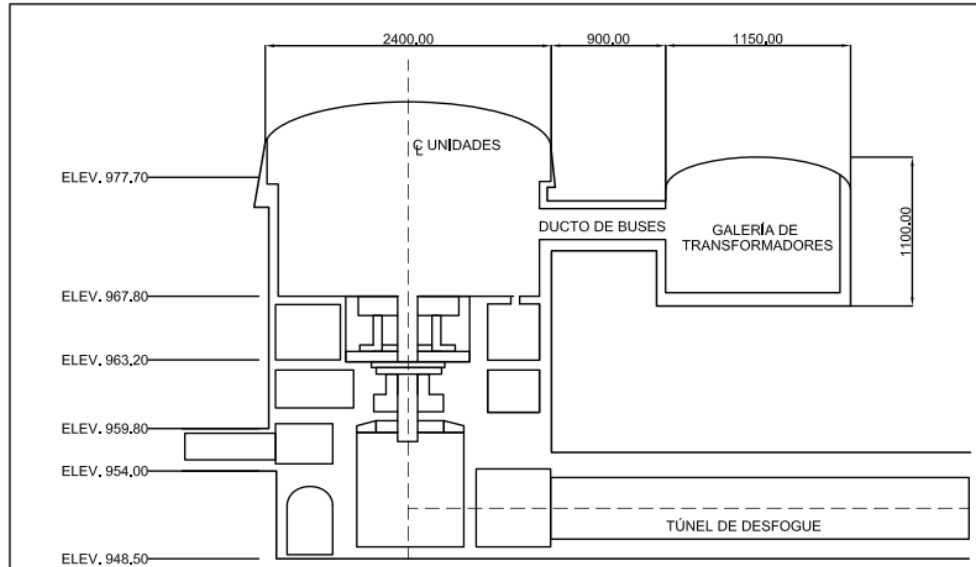


Figura III.14 Corte transversal al eje de la turbina.

Tabla III.13 Principales características de las unidades generadoras.

Tipo	Pelton
Número de unidades	2
Potencia	146 MW
Velocidad de rotación	300 RPM
Gasto de diseño por unidad	29.50 m <sup>3</sup> /s
Nivel del eje del distribuidor	957 m.s.n.m.
Nivel medio de desfogue	951.80 m.s.n.m.
Carga bruta máxima	603 m
Carga bruta mínima	563 m
Carga bruta de diseño	593 m
Carga neta de diseño	553 m
Factor de planta media anual	0.53

### 3.3.7.2 Generador:

Tabla III.14 Principales características del generador.

Tipo	Vertical
Capacidad	153.70
Factor de potencia	0.95 Mva

<i>Velocidad nominal</i>	300 RPM
<i>Numero de polos</i>	24
<i>Tensión de generación</i>	16 Kv
<i>Frecuencia</i>	60 Hz
<i>Factor de planta media anual</i>	0.53
<i>Generación media anual firme</i>	1,139.60 GWh
<i>Generación media anual secundaria</i>	152.80 GWh
<i>Generación media anual total</i>	1,292.40 GWh

### 3.3.7.3 Subestación

Estas son de 230/115KV tipo encapsulada en SF6, la de 230 KV tiene un arreglo de interruptor y medio a través de ella se entrega la energía generada. La de 115 KV tiene un arreglo de barra principal y barra de transferencia y entrega energía a las entidades de Zimapán y Ezequiel Montes, así como a la subestación de 34.5 KV convencional de arreglo de barra principal y barra de transferencia para alimentar los servicios auxiliares de los frentes de cortina, obra de excedencias, obra de toma y válvula de seguridad.

Tabla III.15 *Fechas de inicio oficiales de la construcción del P.H. Zimapán*

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FECHA DE INICIO OFICIAL</b>	<b>FECHA DE TERMINACION</b>
<b>OBRA DE DESVIO</b>	Inicio de Excavaciones 15 – Julio – 1990 Desvío del rio Moctezuma 02 – Abril – 1991 Cierre definitivo 27 – Nov – 1993	-
<b>OBRA DE EXCEDENCIAS</b>	18 – Marzo – 1991	30 – Julio – 1994
<b>CORTINA</b>	15 – Agosto – 1991	30 – Abril – 1994
<b>TUNEL DE CONDUCCIÓN</b>	18 – Febrero – 1991	15 – Sep. – 1994
<b>CASA DE MAQUINAS</b>	04 – Mayo – 1991	02 – Agosto – 1994
<b>O.T. MONTAJE</b>	28 – Sept – 1993	-
<b>OPERACIÓN DE UNIDADES</b>	Unidad No. 1 30 – Junio – 1995 Unidad No. 2 30 – Sep. – 1995	-

Tabla III.16 *Fechas de inicio presentadas al inicio del proyecto del P.H. Zimapán*

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FECHA DE INICIO</b>
<b>OBRA CIVIL</b>	16 – Abril – 1990
<b>OBRA DE DESVIO</b>	15 – Junio - 1990
<b>OBRA DE EXCEDENCIAS</b>	07 – Marzo – 1991
<b>CORTINA</b>	01 – Abril – 1991
<b>TUNEL DE CONDUCCIÓN</b>	01 – Ago. – 1990
<b>CASA DE MAQUINAS</b>	15 – Abril – 1991
<b>EQUIPO ELECTROMECHANICO</b>	Inicio montaje de turbinas 01 – Marzo – 1992 Inicio montaje de generador 01 – Mayo – 1993
<b>OPERACIÓN DE UNIDADES</b>	Unidad No. 1 01 – Agosto – 1994 Unidad No. 2 01 – Noviembre – 1994

### 3.4 PRINCIPALES PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS PRESENTADOS EN LA OBRA

En este proyecto, durante la etapa constructiva se produjo un caído en la margen derecha, aguas abajo del empotramiento, por lo que se coló y colocó como soporte un gran bloque de concreto de dimensiones 15x4x60 m, en la zona de la boquilla.

De igual forma otro problema significativo fue que se presentó agrietamiento en la cortina de la presa por efectos térmicos del concreto, lo cual es recurrente cuando se utiliza concreto masivo. Por tal motivo, fue necesario un sistema de enfriamiento de la masa de concreto con el objeto de disminuir los efectos patológicos del calor de hidratación del cemento, el cual induce al agrietamiento, el cual no fue suficiente presentándose gradientes térmicos. Este caso es el que estudiaremos en la presente investigación, por lo cual retomaremos el detalle del sistema utilizado posteriormente.

Otro problema muy importante que se tuvo fue en el año 2002, en donde se encontraron bloques de concreto en los inyectores 5 y 6 de la unidad 2 razón por la que se realizó una inspección, en la cual se detectaron presencia de desprendimientos de concreto en los cadenamientos 18+720 y 20+660, cerca del inicio de la tubería a presión. En términos generales esto fue originado por el diferencial de velocidades y consecuentemente de presiones en el interior del túnel. La solución fue el diseño y construcción de un puente subterráneo. En este último problema la utilización de la tomografía sísmica fue fundamental en el ahorro de los costos de excavación (Vázquez Contreras , Dávila Serrano, & Acosta Quevedo).

Tabla III.17 Principales problemas presentados en cinco presas hidroeléctricas en México

Presa	Años construcción	Altura (m)	Tipo	Años operación	Problemas principales
Peñitas, Chiapas	1982-1986	53	Cortina flotada con corazón de arcilla y materiales graduados	24	Cimentación en acarreo. Deslizamiento de 55Mm <sup>3</sup> en su vaso durante su operación (2007)
Zimapán, Hidalgo	1993-1996	203	Concreto arco-gravedad	14	Grietas en la cortina. Desprendimientos de bloques en la ladera. Caverna en la conducción.
Aguamilpa, Nayarit	1991-1994	187	Presa enrocamiento con cara de concreto	16	Sismicidad inducida (magnitud 5). Asentamientos menores en el concreto de la cortina
Chicoasén, Chiapas	1978-1981	261	Materiales graduados con corazón impermeable de arcilla	29	Solo filtraciones de 10l/s o menores. Profundización de la cimentación más allá de lo planeado por bloques en el cauce.
El cajón, Nayarit	2000-2004	181	Presa de enrocamiento con cara de concreto	6	Asentamientos menores en el concreto de la cortina. Filtraciones al pie de la cortina de hasta 162l/s
La Yesca, Nayarit	2008-2011	210	Presa enrocamiento con cara de concreto	-	Deslizamiento de una gran masa de MI. Mala calidad del macizo sobre todo en CM subestación y obra de toma.

Complejidad Baja	Complejidad Media	Complejidad Alta
------------------	-------------------	------------------

Fuente: Vázquez Contreras, A., Dávila Serrano, M., & Acosta Quevedo, R. (s.f.). *La importancia de la exploración geológica y geofísica en los costos de construcción de presas hidroeléctricas*. Obtenido de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica AC.

### 3.5 PROCESO DE GENERACION HIDROELÉCTRICA DEL P.H. ZIMAPÁN

El proceso inicia con la captación de agua en el embalse, en forma de energía potencial, con la infraestructura de ingeniería civil correspondiente, con una cortina de 203 m de altura, tipo arco-bóveda, única en el mundo para su fecha de construcción, la cual fue construida con 220,000 m<sup>3</sup> de concreto que fueron vertidos durante 700 días ininterrumpidos, para lograr contener el agua y captar en el embalse 1460Mm<sup>3</sup> de agua.

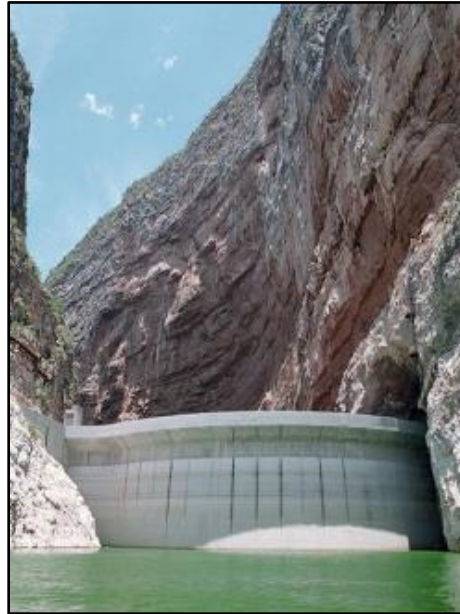


Figura III.15 Cortina del embalse del P.H. Zimapán.

Posteriormente el agua es conducida hacia la casa de máquinas, a través de un túnel de conducción, convirtiendo el agua en energía cinética, desplazando 60 m<sup>3</sup>/s y generando una presión hidrostática de 60 Bar.

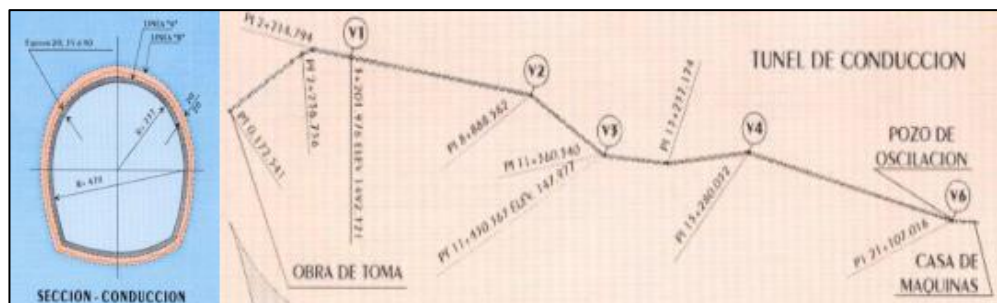


Figura III.161 Esquema del túnel de conducción de: Obra de toma – Casa de Máquinas.

Continúa su transformación a energía mecánica en la turbina y por medio de la flecha acoplada al generador a energía eléctrica, eleva su voltaje en los transformadores de potencia y distribuyéndola por medio de la subestación encapsulada a las diferentes líneas de transmisión para ser entregada al cliente ACOC/CENACE (Martínez Arroyo, 2011).



Figura III.17 Proceso de generación hidroeléctrica del P.H. Zimapán

### 3.6 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ZIMAPÁN

AÑO	SUCESO
1995	Inicio de operaciones con tecnología de vanguardia para dar respuesta a la creciente demanda de energía eléctrica del país, bajo los principios del Programa Institucional de Calidad y Competitividad de CFE.
1997	Implantación de la Administración por Calidad Total contemplando elementos de planeación y liderazgo, mejora del ambiente de trabajo, metodologías de trabajo para grupos de mejora y un sistema de aseguramiento de calidad.
1999	Certificación del sistema de administración de calidad bajo los requisitos de la norma ISO-9002:1994 con un enfoque de control de proceso y satisfacción de los requerimientos del cliente.
2000	Con la finalidad de entrar en un proceso sistemático de innovación y mejora continua el P.H. Zimapán toma como estrategia participar en premios de calidad en el ámbito regional y nacional obteniendo Mención Honorífica en el Premio Hidalgo a la Calidad en su primera participación.

<b>2002</b>	Congruente con su visión y el compromiso del cuidado y preservación del ambiente la P.H. Zimapán, certifica su sistema de administración ambiental en la Norma ISO-14001:1996.
<b>2003</b>	Certificación en el Sistema Control Total de Pérdidas (Det Norske Veritas) con un nivel 5, el más alto a nivel mundial para centrales hidroeléctricas, que comprende aspectos de calidad, ambiental y seguridad.
<b>2004</b>	<p>Como un reconocimiento al desarrollo y mejora de sus procesos productivos y de gestión, el P.H. Zimapán obtiene el Premio Estatal de Calidad “Premio Hidalgo a la Calidad”.</p> <p>Como resultado del proceso de comparación referencial con organizaciones líderes, se inicia el desarrollo e implantación del Modelo de Dirección de Clase Mundial (MDCM), que busca generar valor superior a clientes, empresa, personal y sociedad y generar energía eléctrica para el desarrollo competitivo del país. Se establece el Convenio de Competitividad Cliente-Proveedor con evaluaciones cuantitativas de los factores críticos del cliente y usuarios finales identificados en la cadena de valor.</p>
<b>2005</b>	<p>Consolidación de su estructura para la administración de la mejora continua en el P.H. Zimapán (Organización con Equipos Naturales de Alto Desempeño Autoadministrados, ENAD´s).</p> <p>Con base a los resultados obtenidos en el SIACT a nivel regional, la Subdirección de Generación adopta esta buena práctica e integra bajo el mismo esquema, el Sistema Integral de Gestión (SIG; comprende aspectos de calidad, ambiental y seguridad), que permite al P.H. Zimapán compartir y adquirir experiencias a nivel nacional.</p> <p>El Gobierno de la República Mexicana otorga el “Premio Intragob” al P.H. Zimapán por su consolidación en la implantación de sistemas de gestión bajo las directrices de calidad, modernización y competitividad y la participación activa y decidida de todo el personal que da impulso al desarrollo del capital intelectual para administrar con efectividad el conocimiento y el acervo tecnológico de la organización.</p> <p>La CFE otorga el “Premio Institucional de Calidad y Competitividad” al P.H. Zimapán.</p>
<b>2006</b>	Obtiene el “Premio Nacional de Calidad”, siendo la primera central de generación de energía eléctrica de CFE en obtener esta distinción.
<b>2007</b>	<p>Consolidación del Modelo de Dirección de Clase Mundial, implementación y puesta en servicio del control automático de generación (AGC) a través de un canal digital.</p> <p>El ACOC/CENACE la distingue como la mejor central a nivel nacional por la contribución a la estabilidad del Sistema Eléctrico Nacional.</p> <p>“Certificación de industria limpia” en los estados de Querétaro e Hidalgo.</p>

<b>2008</b>	Ganadora del “Premio Iberoamericano de la Calidad”, siendo la primera central generadora a nivel nacional en obtener éste reconocimiento. El cual es otorgado a las empresas que se distinguen por su desempeño con estándares de Clase Mundial.
-------------	--

Fuente: Reporte del Modelo Iberoamericano de Excelencia en la Gestión del P.H. Zimapán proceso facilitador Liderazgo y Estilo de Gestión (FUNDIBEQ, 2008)

### 3.7 CONCLUSIÓN

El objetivo del capítulo fue realizado satisfactoriamente al brindar las generalidades del P.H. Zimapán. Partiendo desde su localización, importancia de los estudios previos, hasta el resumen a detalle de los componentes y elementos que forman parte de ella, para la generación de energía de la central. Mostrando la magnitud e importancia del proyecto.

En conclusión, este capítulo nos determinó la importancia y relevancia que tienen los estudios previos, de cualquier tipo de proyecto de construcción, estos con el fin de no aumentar los costos del mismo. Por ejemplo, en el caso del P.H. Zimapán el ámbito social fue un componente problemático, ya que prevaleció la visión ingenieril en vez de la social, conllevando un incremento considerable del gasto en la obra social por no contar con un programa establecido. De igual forma otro punto problemático, fue el agrietamiento presentado de la cortina por gradientes térmicos, por un insuficiente sistema de enfriamiento. Trayendo consigo un aumento de costos en el mantenimiento de la estructura.



---

## IV. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CORTINA EN EL P.H. ZIMAPÁN

---

### 4.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo tiene como objetivo dar un acercamiento al proceso constructivo de la cortina del P.H. Zimapán, abarcando de manera general la maquinaria, equipo, herramienta y mano de obra utilizada en la construcción de una presa de este tipo. Determinando los puntos claves para la correcta ejecución de este concepto de obra.

Uno de los puntos críticos en la presa, fue la construcción de la cortina. Ya que, al llegar la temporada de lluvia se llenaría el primer embalse de la cuenca, estableciéndose de esta manera un programa de llenado de dos años, el cual respetaba el tiempo de puesta en marcha de las turbinas. Este proceso comenzaba antes del final del trabajo de colado de la cortina. Por lo tanto, debía tomarse en cuenta que el proceso de enfriamiento del concreto se completará en los niveles correspondientes y con ello poder realizarse las inyecciones de las juntas de construcción entre los bloques, las cuales debían afinarse en etapas durante la construcción. Con la finalidad de que el llenado del embalse no se retrasará. Debido a las demoras que se habían acumulado en el sitio, entre el programa de colado de concreto y el inyectado de las juntas, el llenado del embalse no se realizó de acuerdo al programa.

La División de la Corporación de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (US Army Corpy of Engineers, 1994), determina que los pasos que deben tomarse en consideración para la construcción de una presa de arco son:

1. Desvío
2. Excavación de la cimentación
3. Consolidación de la cimentación de la cortina
4. Concreto
5. Juntas de construcción
6. Drenajes

### 4.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CORTINA DE CONCRETO TIPO ARCO-BÓVEDA

La presa se encuentra justo aguas abajo de la confluencia de los ríos San Juan y Tula. Es de tipo arco de arco con doble curvatura. Las condiciones topográficas del desfiladero son muy favorables para la implantación de una estructura de este tipo. El eje de la cortina se ubica a 400m a la entrada del cañón, tiene una altura de 203m con la corona a la elevación 1565 m.s.n.m.

Tabla IV.1 Datos de la cortina del P.H. Zimapán

Tipo	Arco- Bóveda de concreto
Elevación de la corona	1,565 msnm
Longitud de la corona	122.00 m
Altura total del desplante	207.00 m
Volumen de concreto	220,000 m <sup>3</sup>
Elevación de desplante	1,358 msnm
Bordo libre	2.00 m

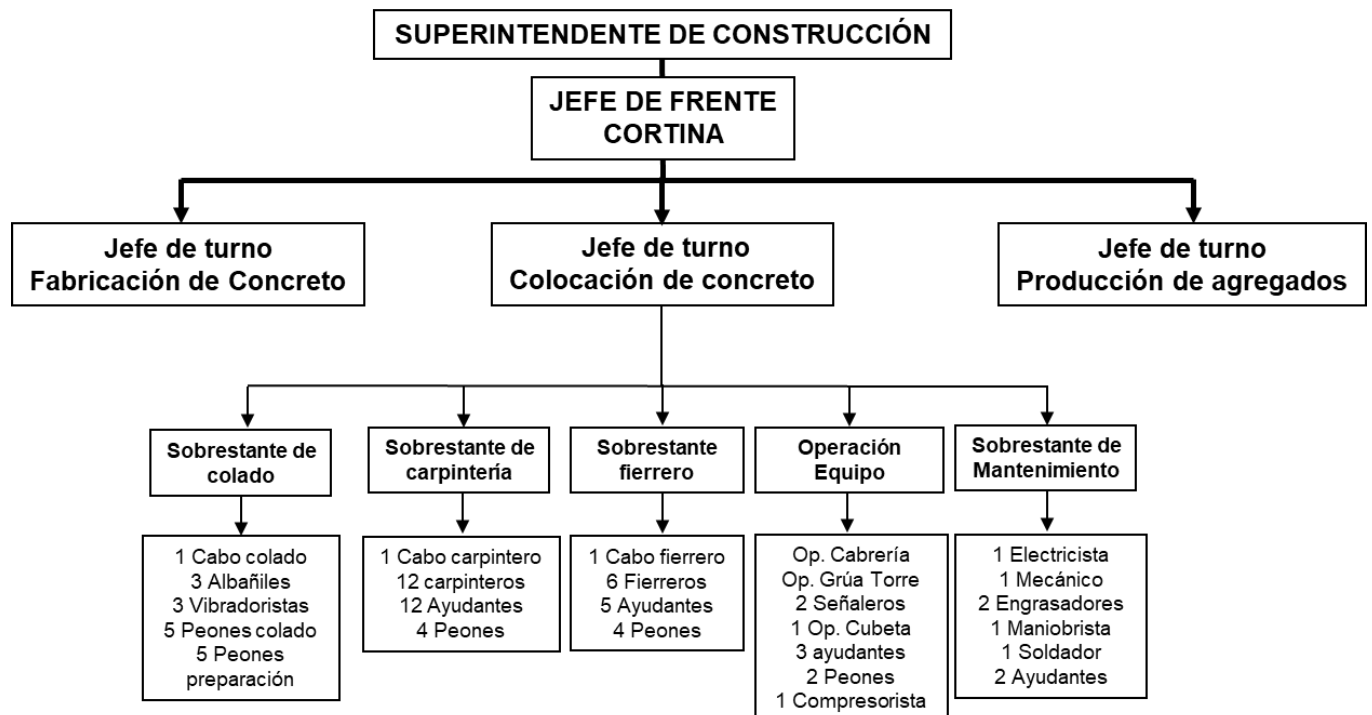


Figura IV.1 Organigrama de la mano de obra utilizada en la colocación del concreto de la cortina.  
Fuente: Elaboración propia.

## 4.3 INSTALACIONES

### 4.3.1 Subestaciones eléctricas

Estas son de 230/115KV, la de 230 KV es tipo encapsulada en SF6 y la de 115 KV tiene un arreglo de barra principal y barra de transferencia, esta última entrega energía a las entidades de Zimapán y Ezequiel Montes, así como a la subestación de 34.5 KV convencional de arreglo de barra principal y barra de transferencia para alimentar los servicios auxiliares de los frentes de cortina, obra de excedencias, obra de toma y válvula de seguridad.

Tabla IV.2 Principales características de la subestación.

	S.E. 230 KV	S.E. 115KV	S.E. 34.5 KV
<b>Frecuencia nominal</b>	60 Hz	60 Hz	60 Hz
<b>Corriente nominal</b>	1,200 A	600 A	1,200 A
<b>Numero de interruptores</b>	8	5	11
<b>Numero de cuchillas</b>	21	14	34

#### 4.3.2 Planta trituración de agregados

En el caso del P.H. Zimapán, las condiciones de los bancos de materiales eran favorables para realizar un concreto de excelente calidad. Se instaló una planta fija de trituración de agregados, formada básicamente por un primario, un secundario, un conjunto de cimbrar, bandas, tolvas y elementos - accesorios, así mismo una clasificadora de arenas y equipo Rheax que permitía la separación de la arena gruesa y fina, eliminando todas las partículas ligeras. Esto se hizo con el fin de lograr al máximo la granulometría requerida y el módulo de finura de las arenas.

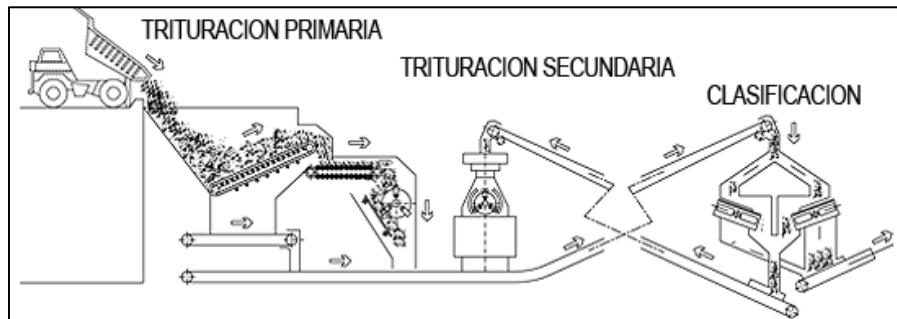


Figura IV.2 Esquema del proceso general de la trituración de agregados.

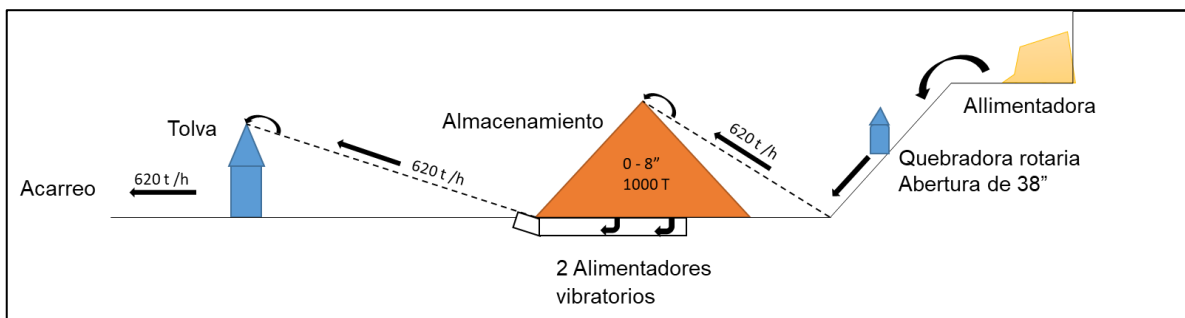


Figura IV.3 Esquema del proceso de trituración primaria en el sitio del banco en el P.H. Zimapán.  
Fuente: Elaboración propia.

La capacidad de la planta trituradora era de 200 ton/h, de los cuales 60 ton/h eran de arena. Esta producción - horario era mayor de la que se requería, por lo que ofreció un buen factor de seguridad.

Para el almacenamiento de los agregados grueso procesados se contó con 3 silos con capacidad de 1000m<sup>3</sup> cada uno. Estos agregados se separaron en tres fracciones:

- 1 1/2" – 3"
- 3/4" – 1 1/2"
- 3/4" - #4

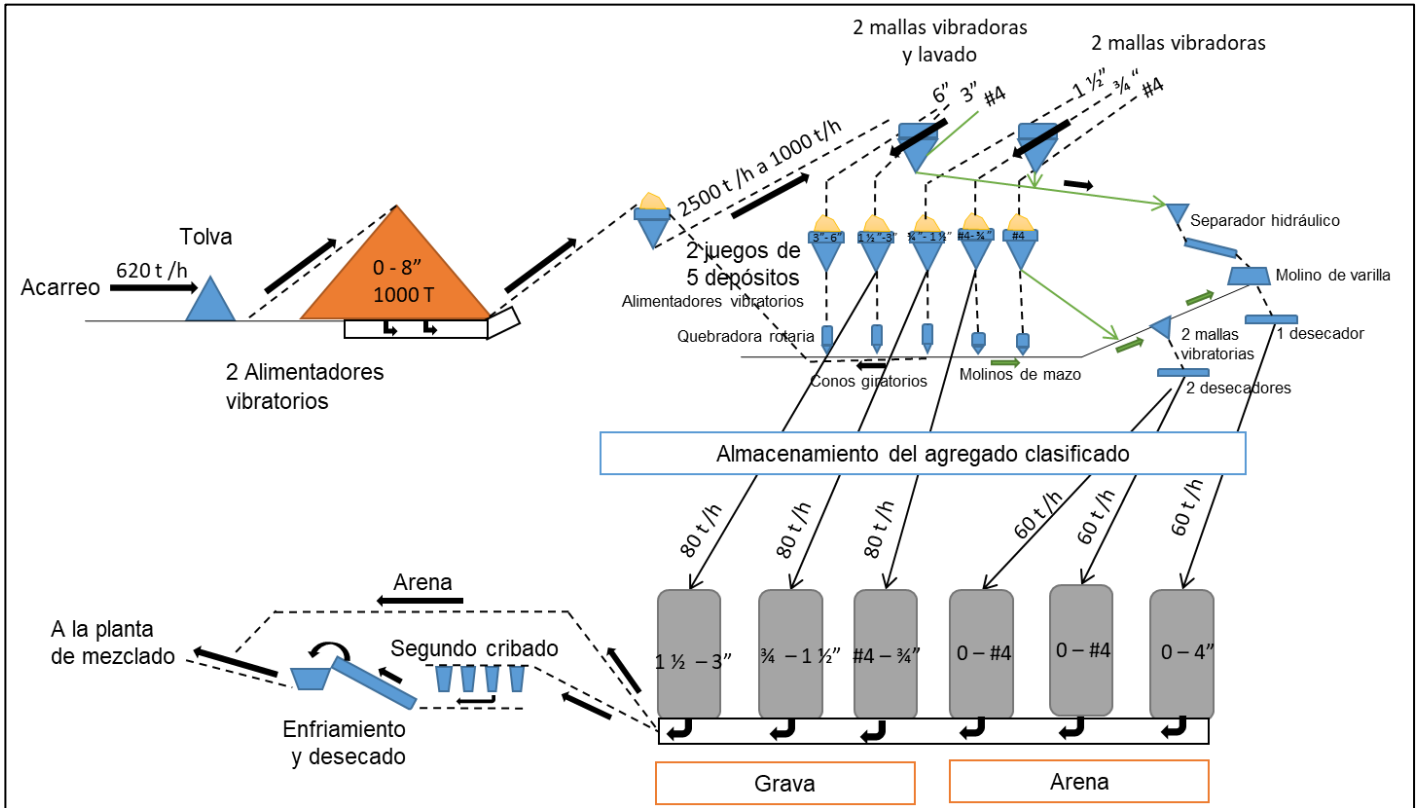


Figura IV.4 Esquema de la planta de producción de agregados para concreto en el P.H. Zimapán.  
Fuente: Elaboración propia.

Para el almacenamiento de la arena también se contó con 3 silos, esto con el fin de permitir un periodo de decantación del agua de procesamiento y tener un buen control del agua del mezclado.



Figura IV.5 Planta de agregados del P.H. Zimapán  
Recuperado del video "Presa Zimapán" (Bilbatua, Martínez, Grecko, & <https://www.youtube.com/watch?v=zmf7sYjVNzA>, 2010)

#### 4.3.3 Planta de dosificación del concreto

La planta de dosificación de concreto, contaba con mezcladores de tipo de aspas encontradas y su capacidad era de 100 m<sup>3</sup>/h, lo cual era aceptable para la obra. Los tres silos para el cemento tenían una capacidad de 4500ton, lo cual era suficiente para la producción de concreto durante 14 días. Esta planta fue verificada y calibrada para que el pesaje se encontrara dentro de las tolerancias especificadas

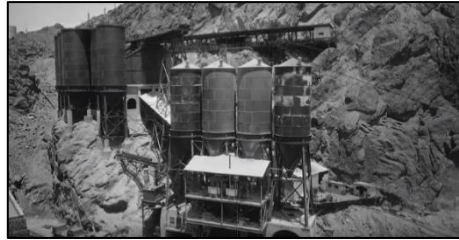


Figura IV.6 Planta de dosificación de concreto utilizada en la presa arco-gravedad Casasola, España.  
Fuente: (FCC Construcción S.A., 2013)

#### 4.3.4 Planta de enfriamiento de agua y fabricación de hielo

Comúnmente para el enfriamiento del agua por medio de hielo, es necesario construir una planta de hielo cerca del sitio de la construcción. Una fábrica de hielo debe contar por lo menos con una máquina de hielo en escamas y un almacenamiento de hielo. Generalmente también se deben instalar en el lugar sistemas de transporte, peso y dosificación. La totalidad de la fábrica solo ocupa un espacio limitado porque las unidades de producción y almacenamiento se ubican una encima de la otra.



Figura IV.7 Fábrica de escamas de hielo, para sustitución del agua de la mezcla del concreto.  
Rendimiento de 66 ton al día.

Para el enfriamiento de los agregados gruesos y de la mezcla de concreto, se contó con plantas de enfriamiento de agua y con tres cilindros para producción de hielo. Esta producía 3 ton/h, lo cual al principio se consideró que era un rendimiento muy ajustado para la producción pico diaria de 1400m<sup>3</sup> de concreto con un remplazo de agua por hielo de alrededor de 45 kg/m<sup>3</sup>, posteriormente se ajustó.

#### 4.3.5 Agua

Las necesidades de agua de la obra quedaron cubiertas con las aportaciones de los ríos San Juan, Tula y Moctezuma. El agua era almacenada en depósitos clarificadores, desde donde suministraba a la planta de concreto e instalaciones. Por medio de estos depósitos se lograba eliminar todos los lodos disueltos en ella para poder utilizarla de nuevo en el proceso de lavado de los áridos.



Figura IV.8 Depósito de clarificador de agua fabricado en acero.

#### 4.3.6 Requerimientos del post-enfriamiento

La tubería de PVC del sistema de enfriamiento, se conectaban adicionalmente a:

- ✓ Válvulas reguladoras
- ✓ Contenedor de agua de río
- ✓ Contenedor de agua fría (6°C)

### 4.4 DISEÑO GEOTECNICO DE LA CORTINA

En el caso de la geotecnia del sitio, la calidad y cantidad de los estudios son fundamentales para que se cumpla en tiempo y forma con los programas de obra y con los presupuestos de la misma, lo que permite afianzar la seguridad de la misma durante su operación. A continuación se transcriben tres fragmentos al respecto tomados de la Comisión Internacional de Grandes Presas (International Commission on Large Dams (ICOLD), 1986)

- Las investigaciones geológicas deben ser tan completas como sea posible para obtener el conocimiento completo del sitio con la mayor precisión.
- En estructuras geológicas complicadas, en forma previa a la contratación de la construcción y con el fin de obtener un diseño apropiado, es recomendable realizar excavaciones de las partes alteradas con la finalidad de clarificar las dudas posibles sobre los tipos de cimentaciones más adecuadas.
- Los diseños se deben basar en información real y no en datos teóricos o en aquellos tomados de investigaciones limitadas.

En el caso del P.H. Zimapán, el perfil a través de la garganta se caracteriza por paredes prácticamente verticales con ensanchamiento en la parte superior de la margen izquierda.

La garganta fue excavada en rocas calizas de buena calidad. Debido a la morfología, el acceso a la coronación en ambos bancos solo podía realizarse por túneles.

De forma puntual, los parámetros que controlan el diseño de la cortina, aparte de la geometría del terreno, son:

- Las cargas en la presa; Carga y Factor de Seguridad.
- El grado de fijación a la cimentación y el contrafuerte.
- Las propiedades de los materiales componentes de la presa y de las cimentaciones.

Algunos puntos importantes que debe examinar y cuestionar el encargado de la construcción del proyecto a los especialistas en geotecnia es:

- La resistencia es suficiente en los apoyos, en contra de los empujes de la presa y del agua del embalse.
- La posibilidad de movimientos exógenos debidos, por ejemplo, a variaciones del nivel freático.
- La deformabilidad o rigidez de los distintos puntos de la cimentación
- Las condiciones hidráulicas (permeabilidad)
- La influencia de las presiones hidráulicas y de las presiones totales sobre la deformabilidad del macizo.
- Tratamiento y existencia de casos especiales (Por ejemplo: karst, solubilidad y otros más).

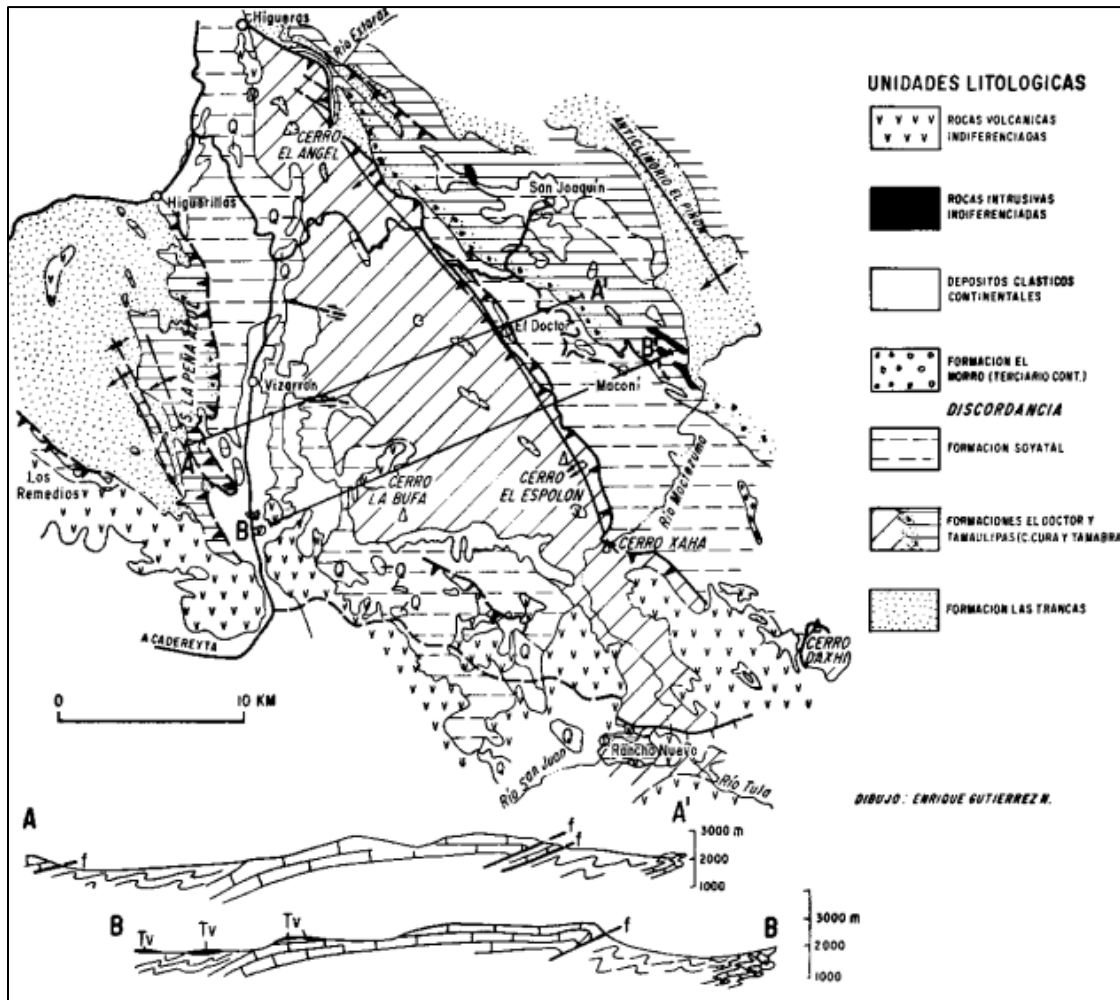


Figura IV.9 Mapa geológico del área del P.H. Zimapán, Geología levantada por M. Carrillo en 1981

#### 4.5 DESVÍO

Independientemente del tipo de dique que contenga la pared de la presa, ya sea de concreto o de otro tipo de material, es necesario desaguar el sitio para fines de inspección geológica e incluso para mejorar las cimentaciones. Antes de que cualquier trabajo de infraestructura, el río debe ser desviado temporalmente. El método y el costo de la desviación dependerán del tipo de presa, del material del lecho de la presa y de las consecuencias de la falla de cualquier parte de las obras temporales, solo por nombrar algunas.

El esquema de desviación debe diseñarse para permitir que troncos flotantes, hielo y otros desechos pasen por las obras de desvío sin atascarse dentro de ellos y reducir su capacidad, o evitar que estos elementos ingresen a los trabajos de desviación (International Commission on Large Dams (ICOLD), 1986).



Existen diferentes métodos de desvío, los esquemas de desviación más comunes para las presas de arco son: canales o conductos, bloques bajos o una combinación de todos estos. En cada uno de estos métodos, se requerirá una ataguía a través del río (aguas arriba y aguas abajo) para bloquear el agua con fines de deshidratación.

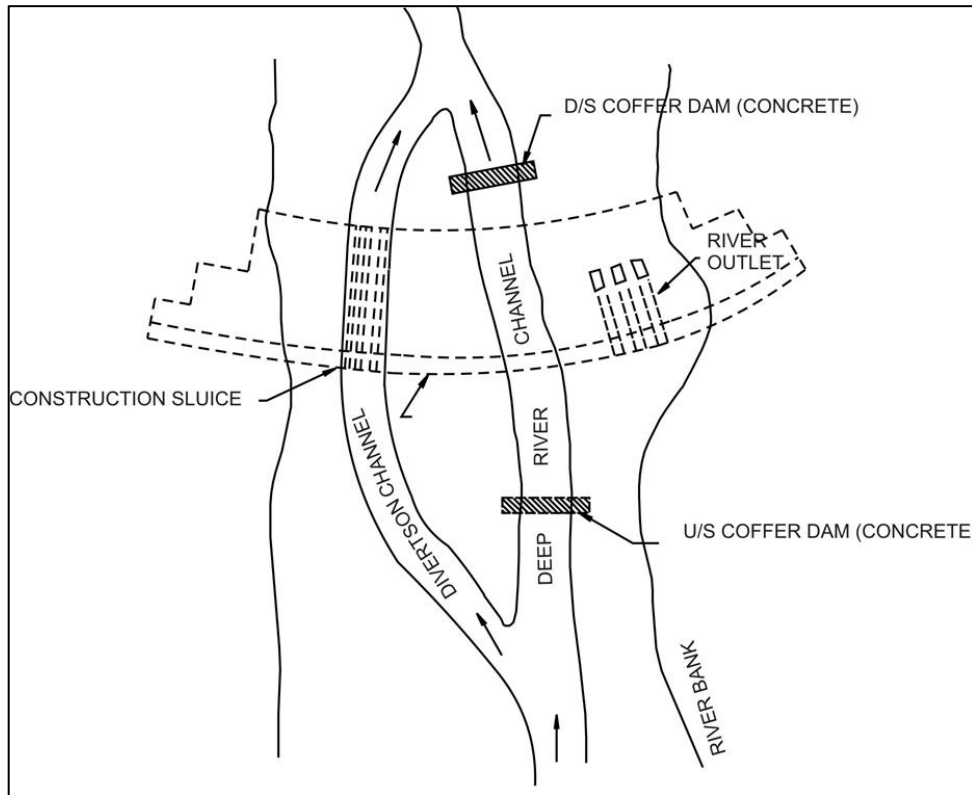


Figura IV.10 Esquema de desvío y cómo es probable que se coloquen las ataguías.  
Fuente: (US Army Corpy of Engineers, 1994)

En el P.H. Zimapán, se desvió el río para evitar que este se situará en la discontinuidad geológica que se encontraba en la zona, utilizando drenes inclinados. En vista de la excelente calidad de la roca, fue muy favorable la construcción de la boquilla en bóveda, pero la estabilidad de las laderas aguas debajo de los apoyos de la bóveda mereció una atención particular.

#### 4.6 EXCAVACIÓN

En el P. H. Zimapán, los geólogos estudiaron la geología de la boquilla en detalle por medio de muescas (medias cañas) excavadas en las laderas y con fotos de color tomadas de un lado a otro. De igual forma, mapearon las estructuras y estratificaciones, preparando de esta manera los planos, las secciones estructurales y diagramas de frecuencia.

Los resultados de estos estudios, concluyeron en que la roca encontrada para la cimentación de la cortina era masiva, dura y resistente, apta para la presa de arco de gran altura. En resumen, para una buena ejecución de la excavación de la cortina, se tuvo que:

1. Hacer un levantamiento geológico preciso de toda la superficie de la roca excavada antes de colocar la capa de concreto lanzado.
2. Realizar la excavación cuidadosamente para no dañar la roca.
3. Excavar por banqueros de 6m.
4. Anclar y asegurar a la roca por razones de seguridad. De igual forma, colocar mallas de acero como protección para evitar que piedras sueltas se movieran y cayeran poniendo en peligro a los trabajadores trabajando por debajo
5. Conectar las galerías de inyección con la excavación de la cortina.
6. Realizar eventualmente, algunos tratamientos de saneamiento de la roca a pesar de la necesidad de las inyecciones de consolidación de la cimentación.
7. Conocer los fenómenos kársticos y todas las capas de arcillas encontradas.
8. No cubrir la superficie de cimentación con concreto lanzado.

Las perforaciones en el cauce, a partir de la cota 1400, indicaron roca sana, permitiendo reducir la profundidad de las excavaciones en el fondo del río. La forma de la superficie de la cimentación fue excavada con muy buena precisión, pero en los bordes aguas arriba y aguas debajo de la misma, se produjeron notables sobre-excavaciones y grandes caídos de bloques, lo cual presentaron un notable peligro adicional para los trabajadores y los equipos, reduciendo apoyo a la ladera y a la presa misma.

Entre las elevaciones 1490 y 1430 en la margen derecha aguas abajo del eje de la futura cortina se produjo en mayo de 1992, un caído de unos 1500m<sup>3</sup>. La faja de roca que se despegó era regular habiendo sido limitada por una fractura preexistente sub-vertical y paralela al valle que se encontraba a unos 5-6m de la ladera. El ancho de la zona caída era del orden de los 15-20m y afecto por unos 3-4m el apoyo aguas debajo de la cortina.

La solución brindada ante esta situación, fue la rotación de la cortina. Es así que se diseñó la nueva geometría a partir de la elevación 1515 y se mantuvo invariada la excavación de la parte baja de la cortina en correspondencia del cauce del río. El eje de la ménsula central se desplazó de 1m a elevación 1450 y se empato el proyecto original hacia abajo, a la elevación 1358 y hacia arriba a elevación 1515. La nueva geometría afecto solo la parte central de la cortina ya que no se podía modificar la parte superior, por presencia de la caverna en margen derecha y por haber ya colado las primeras tongadas de los bloques 4 y 5, en margen izquierda.

Para facilitar el trabajo, se solicitó marcar en la roca algunos puntos característicos de la nueva geometría de los arcos entre las elevaciones 1481 y 1445 a cada 6m. Además, se pidió un control topográfico de estos puntos para verificar las tolerancias y eventuales errores en los planos.

Como dato importante, desde el inicio de la construcción se recomendó investigar el futuro estado térmico de la cortina para evaluar los esfuerzos debido a las variaciones de temperatura y con ello definir la forma más apropiada del arco de la coronación.

#### 4.6.1 Pozos verticales

Se excavaron dos pozos verticales, uno en cada ladera. El pozo del margen derecha era una contra-pocera de 2.65m de diámetro.

Estos fueron utilizados para colocar un elevador de personas, escalera de emergencias, tubo de protección de la plomada y los cables eléctricos necesarios, por lo que se requirió sellar de filtraciones de agua, para evitar la erosión de las capas de arcilla que presentaba.

### 4.7 CIMENTACIÓN DE LA CORTINA

La cimentación de una presa se construye por debajo del nivel del suelo original donde pueden encontrarse suelos más débiles, el cual es removido y reemplazado con materiales más fuertes. De acuerdo a los resultados de los estudios geotécnicos del P.H. Zimapán, se notó la presencia de dos familias prominentes de diaclasas y varias zonas de capas delgadas cizalladas de fallas locales, de empuje de 20° a 40° de inclinación y plegamientos secundarios. Por tal motivo, se requirió de sobre-excavaciones locales, anclas de fricción inyectadas y concreto proyectado como revestimiento, donde fuese necesario, para evitar la filtración de agua. Además, de mapeos de todas las estructuras para estudios de estabilidad de cuñas que podían afectar la estabilidad de la presa.

De forma general, la estructura se apoya sobre calizas de la formación “El Doctor”. 40m abajo del fondo del río (elevación 1365) se localiza la falla inversa del mismo nombre, la cual tiene una inclinación hacia aguas abajo y hacia margen izquierda. Por tal motivo fue importante la estabilidad del bloque de roca de cimentación por la limitación de dicha falla, conduciendo a la necesidad de prestar atención al drenaje de la cimentación y a la utilidad de la galería que se excavó bajo el cauce del río.

#### 4.7.1 Tratamiento de Karst

En la zona de apoyo de los arcos, las excavaciones presentaron oquedades kársticas. El procedimiento se realizó de la siguiente manera:

- Levantamiento geológico cuidadoso de todos los fenómenos kársticos de la excavación.
- Limpieza mecánica y con chorro de agua de alta presión de los ductos kársticos eliminando hasta la máxima profundidad posible de todo material suelto que pudieran contener.
- Colocación de mangueras de inyección en las oquedades, en número suficiente y lo más profundo posible.
- Sellado de la boca del ducto con mortero.
- Llenado por inyección de los ductos kársticos por medio de las mangueras empezando desde abajo hacia arriba y desde aguas abajo hacia aguas arriba.

Después de este tratamiento se inició el colado del concreto de la cortina en la zona respectiva.

#### 4.7.2 Tratamiento de juntas con arcilla.

Se excavaba una galería de 1 x 1.50 m de alto con una longitud de 15m. una vez excavada la galería, se rellenaba con concreto y se inyectaba. Este tratamiento se hacía enseguida para evitar interferencias con el hormigonado de la cortina.

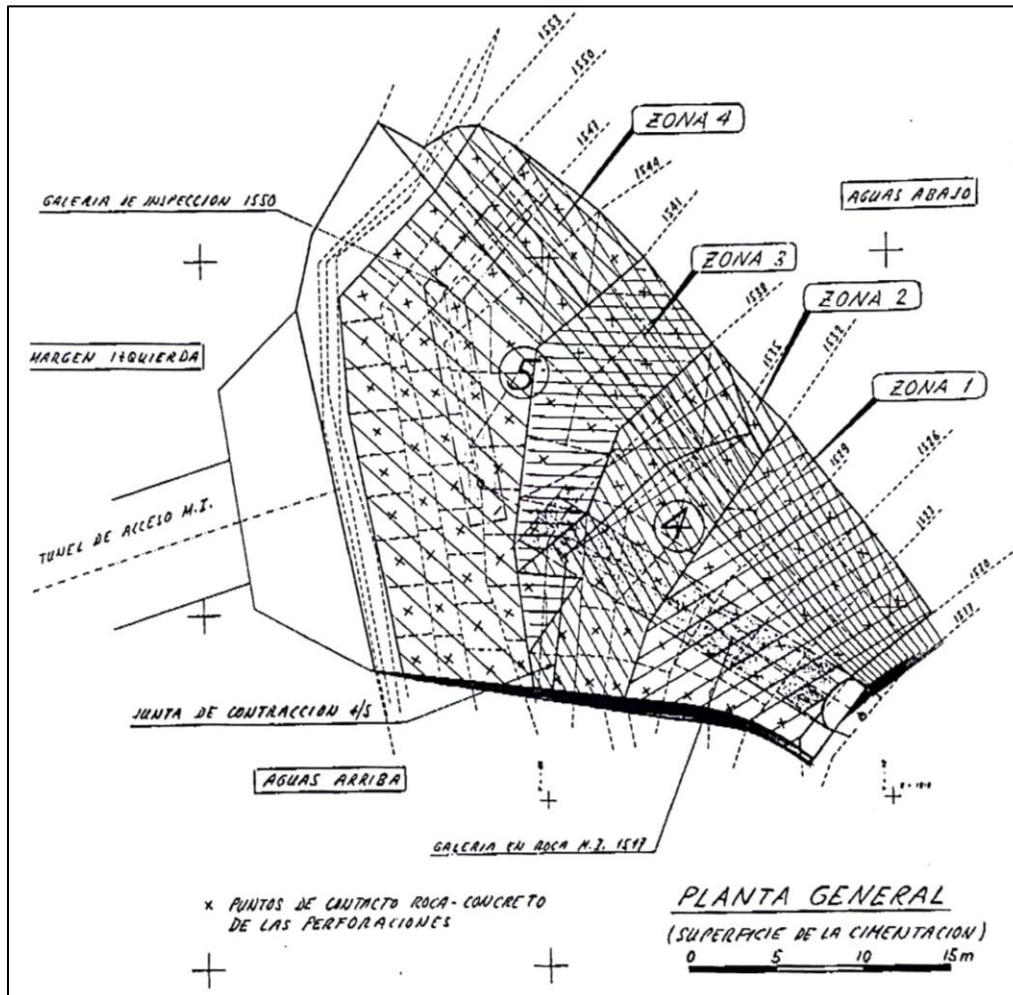


Figura IV.11 Planta general de la superficie de cimentación de los bloques 4 y 5 del P.H. Zimapán.

#### 4.7.3 Estabilización del margen derecho

En las paredes del cañón del infiernillo se distinguieron tres tipos de trabajo de estabilización:

- Estabilización local de seguridad. Permitió la ejecución de los trabajos al personal de la obra con suficiente garantía de incolumidad. Se realizó por medio de amacice manual y tratamiento de anclaje de fricción de 20t a los bloques.
- Estabilización para evitar la descompresión. Esto en la parte aguas abajo del apoyo de la cortina. Se realizó con barras de 1 ½" tipo DIWIDAG de longitud de 12-15m, se hizo desde arriba hacia abajo utilizando andamios. Estas anclas

sobresalieron 1m para ser embebidas posteriormente en el concreto de reposición armado.

- Estabilización general. Se realizó en todo el margen derecha con el fin de garantizar y bajo todas las condiciones de carga la seguridad de la cortina. Constaba de galerías armadas y rellenas con concretos similares que se utilizaron para estabilización de las cavernas. Estas fueron excavadas desde el interior del macizo después de haber realizado la estabilización contra la descompresión. Tuvieron una dirección perpendicular al valle y se ubicaron a 20m del paramento aguas debajo de la cortina. Fueron integradas a la estabilización contra descompresión para que actuaran como conjunto único. De igual forma se integraron a las galerías de drenaje ya previstas en el diseño de la cortina.

#### 4.7.4 Pantallas de inyección y drenaje

Una vez revestidas las galerías, se colocaba la pantalla de inyección pasando por el eje de las mismas de manera que se evitaran traslapes entre la pantalla y las inyecciones de sutura.

Debido a la karsticidad de la zona, la pantalla de inyección tuvo gran importancia para la seguridad de la obra y la estanqueidad del embalse. Estas pantallas se dividen en dos zonas:

- La parte más cercana a la cimentación de la cortina hasta unos 15m de plano de contacto roca-concreto.
- El resto de la pantalla más alejada de la cortina, hacia el interior del macizo o bajo el cauce del río.

De igual forma, el sistema de drenaje aguas debajo de la pantalla de inyección tuvo gran influencia sobre la estabilidad de las laderas. Por lo que fue importante su correcta realización.

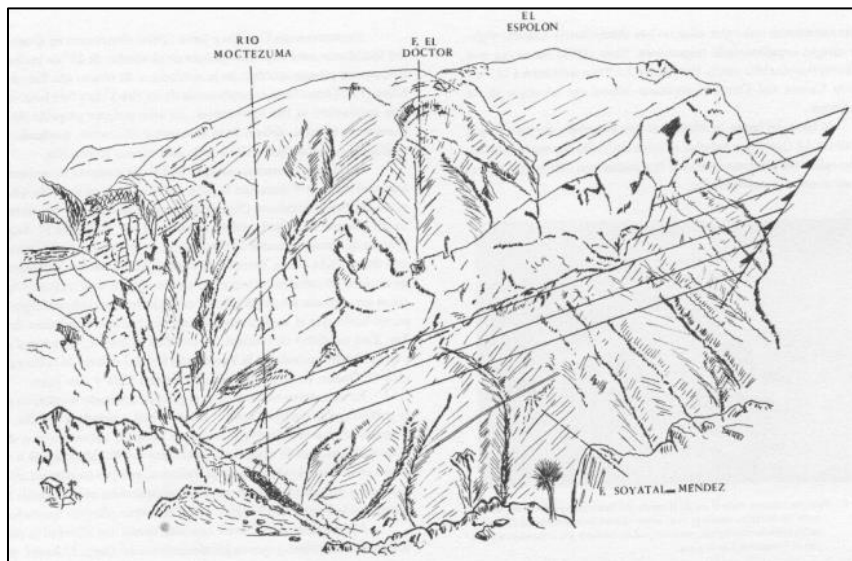


Figura IV.12 Vista panorámica desde la ribera oriental del Río Moctezuma hacia el banco calcáreo El Doctor, Qro.

#### 4.8 FABRICACIÓN DEL CONCRETO

Uno de los puntos previos a la construcción de la cortina en el P.H. Zimapán, fue la elección del diseño de la mezcla. El tipo de cemento fue Cruz azul puzolánico (185) de bajo álcalis con clinker 2 y se utilizaron con las siguientes características:

Tabla IV.3 *Tipos de concretos utilizados en el P.H. Zimapán.*

TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
Dosificación 200kg/m <sup>3</sup> TMA 3" Rel. A/C 0.55	Dosificación 230kg/m <sup>3</sup> TMA 3" Rel. A/C 0.50	Dosificación 250kg/m <sup>3</sup> TMA 1 ½" Rel. A/C 0.60

Utilizando el "Tipo 2" en el paramento aguas arriba y contra roca.

Tabla IV.4 *Características de los materiales utilizados para el concreto del P.H. Zimapán*

MATERIALES	PROCEDENCIA	DENSIDAD	ABSORCION
<i>Cemento</i>	Tipo II Puzolánico Cruz Azul, Hidalgo	2.90	-
<i>Arena</i>	Banco Yethay	2.72	1.30
<i>Grava</i>	Banco Yethay	2.65	0.8
<i>Agua</i>	Río San Juan	-	-
<i>Aditivo</i>	Puzolana 322.R 5cc/kgcto		

Antes de la elección de la misma, se realizaron varios diseños con diferentes cantidades de cemento, los cuales se probaron a los 28 días por medio de cilindros estándar de 15cm x 30cm, y existió la necesidad de elaboración de cilindros de 30 x 45 cm.

El tamaño máximo del agregado para el concreto de la cortina es de 3". Pero en el colado del bloque 5, el tamaño máximo del agregado fue de 1 ½" y por consiguiente fue necesario utilizar 250kg/m<sup>3</sup> de cemento, ya que en obra no se contaba con el equipo de transporte necesario ("patos") para concreto de 3".

Tabla IV.5 *Concretos utilizados en bloques 4 y 5*

BLOQUE 4	TIPO DE CONCRETO UTILIZADO	BLOQUE 5	TIPO DE CONCRETO UTILIZADO
4.01 A	Tipo 3	5.01 A	Tipo 3
4.01 B	50% Tipo 3 50% Tipo 1	5.02 B	Tipo 3
4.02	Tipo 2	5.02	Paramento aguas abajo y contra roca, Tipo 2 El resto Tipo 1

Otro de los puntos clave en este concepto, fue la asignación de procedencia del cemento, para lo cual el gerente de proyecto tuvo que contar, por lo menos, con dos fábricas que produjeran cemento con la calidad requerida y especificada. En términos de calidad, se efectuaron análisis físico – químicos del cemento y de la puzolana para conocer con precisión el contenido de álcalis del cemento.

De igual forma, se probó la resistencia del concreto con la implantación de método de resistencia acelerada, con el fin de conocer la resistencia del concreto a edades tempranas (24hr – 48hr) y correlacionarla con la resistencia a los 28 días inicialmente y luego a los 90 días.

El paramento aguas arriba de la cortina, con un espesor de 2m, tiene un concreto de revestimiento con mejores características de impermeabilidad. En el cálculo de enfriamiento se asumieron los siguientes parámetros:

Tabla IV.6 *Parámetros del concreto aguas arriba utilizados para el cálculo de enfriamiento.*

<i>Dosificación de cemento Portland (CP)</i>	260 kg/m <sup>3</sup>
<i>Peso específico del concreto</i>	2,500 kg/m <sup>3</sup>
<i>Calor de hidratación que se desarrolla en 12 días</i>	15,454 kcal/m <sup>3</sup>
<i>Temperatura de colocación del concreto</i>	20°C

Para el concreto masivo del resto de la cortina se asumieron los siguientes parámetros (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991):

Tabla IV.7 *Parámetros del concreto masivo de la cortina en el P.H. Zimapán*

<i>Dosificación del Cemento Portland</i>	220 kg/m <sup>3</sup>
<i>Peso específico del concreto</i>	2,500 kg/m <sup>3</sup>
<i>Calor de hidratación que se desarrolla en 12 días</i>	13,077 kcal/m <sup>3</sup>
<i>Temperatura de colocación del concreto</i>	20°C

#### 4.9 CARGA Y TRANSPORTE DEL CONCRETO

Existen varios métodos y equipos utilizados para el transporte del concreto durante la construcción de una presa de arco, dentro de los más usuales podemos citar: cable vías, grúas torres, bandas transportadoras, bombas especiales de concreto y vehículos.

Independiente del procedimiento o equipo utilizado, el tiempo transcurrido durante su transporte debe ser tal que no ocasione una segregación apreciable de los agregados o tenga pérdidas de revenimiento mayores de 2.5 cm al ser entregado en la obra.

En el P.H. Zimapán, desde la tolva se descargaba el concreto sobre los silobuses. El mando de apertura del cierre de la tolva era del tipo maneta retornable que obligaba a mantener accionado el interruptor durante la descarga, para evitar descargas involuntarias. Los silobuses se desplazaban sobre el camino horizontal hasta la

plataforma correspondiente. La descarga del silobús se realiza directamente sobre la cubeta de concreto (bacha) con capacidad de 4m<sup>3</sup>, emplazados en las plataformas realizadas.



Figura IV.13 Descarga del concreto desde los silobuses a la cubeta en el P.H. Zimapán.

Para el traslado del concreto y otras labores en la presa se requirió una Grúa Torre de mas 100m, la cual movilizaba la cubeta de concreto de acción neumática sobre la cortina. Esta se encontraba apoyada en el margen izquierdo de la cortina sobre una plataforma.



Figura IV.14 Fotos de la movilización y colocación del concreto en el P.H. Zimapán.

En las zonas del cuerpo de la presa, se requirió de:

- Plataformas a 220m de altura a la que llegaban los camiones y maquinaria por túneles de acceso. Los silobuses descargaban el concreto directamente sobre las cubetas.



Figura IV.15 Movilización de un silobús en la plataforma a 220m de altura en las instalaciones del P.H. Zimapán.



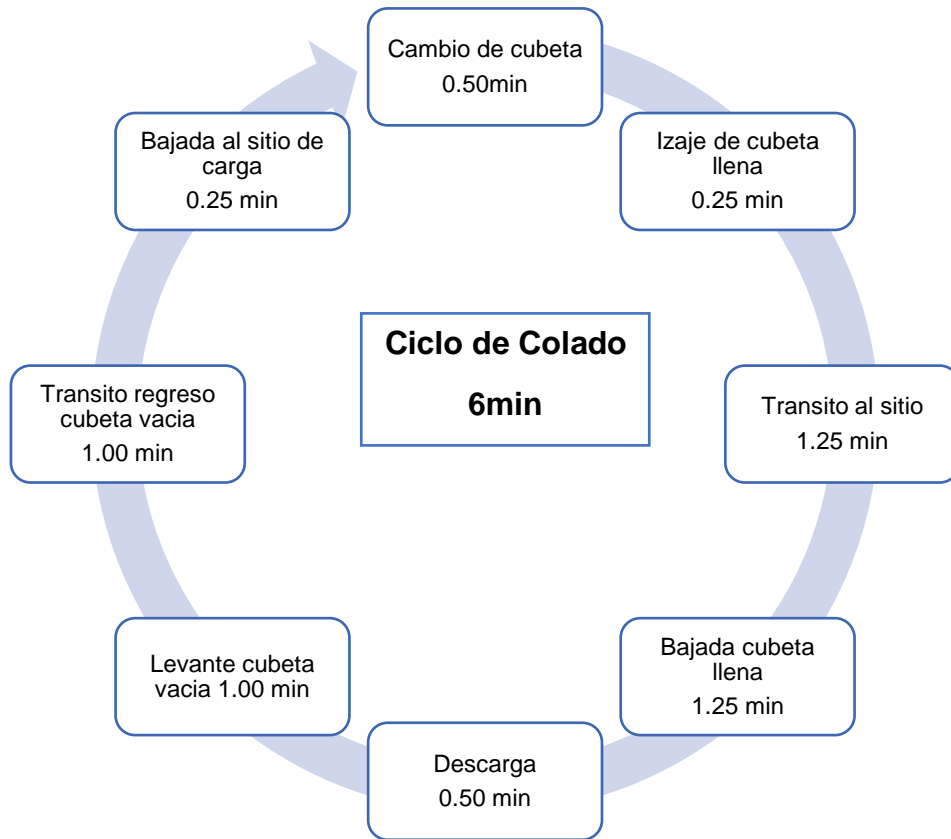

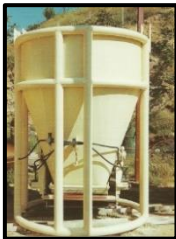
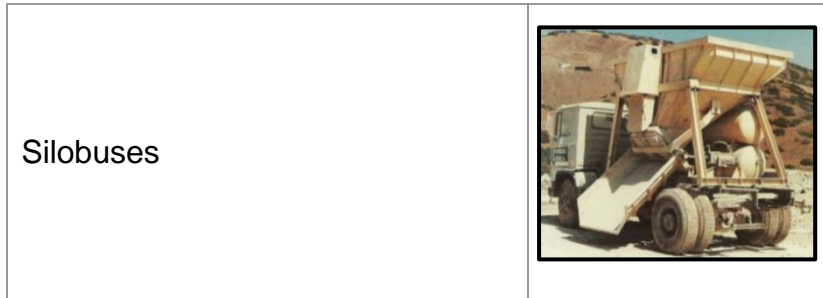


Figura IV.16 Ejemplo de un ciclo de colado con cubetas de concreto.  
Fuente: Elaboración propia

El equipo utilizado para esta etapa constructiva, consistia basicamente en:

EQUIPO	FOTO
Grua Torre compuesta por: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cable de botones</li> <li>• Contrapeso</li> <li>• Cable de izaje</li> <li>• Motor electrico</li> </ul>	
Cubetas o bacha de 4m <sup>3</sup> cada una	



#### 4.10 COLOCACIÓN DEL CONCRETO

Previo al colado del concreto se requiere la revisión minuciosa de que hayan cumplido varios aspectos, como: la topografía, correcta colocación de las juntas, acero de refuerzo, limpieza y preparación de las superficies de contacto, colocación de las tuberías de post-enfriamiento, etc., con el objeto de tener un mejor control de calidad.

La cortina del P.H. Zimapán, se dividió en tres bloques principales y dos bloques secundarios ubicados en la parte superior del soporte izquierdo. De acuerdo con los estudios realizados se fijó una altura de colado de 3m y el procedimiento de curado fue cuidadoso durante los primeros 15 días para disminuir la micro-fisuración.

Dentro de la presa, en su altura, se disponen siete galerías de control horizontal, conectadas a dos ejes de acceso vertical.

El concreto de la cortina comenzó con el vaciado del bloque 5. La calidad de la roca bajo este primer bloque, era de muy buena calidad y de muy alta resistencia. En este bloque se realizó el colado en dos etapas, el primer colado (5.01 A) fue hasta la elevación 1539.50 y el segunda (5.01 B) hasta la elevación 1542.00.

Tabla IV.8 *Etapas con elevación del colado del bloque 5.01*

Bloque 5.01	Elevación
5.01 A	1539.50
5.01 B	1542.00

##### 4.10.1 Limpieza

Se comenzaba con limpieza picado y sopleteado de la capa de mortero superficial del colado anterior. En los bloques de contacto con el cimiento se realizaba una limpieza exhaustiva del mismo, seguida de un chorro de aire y agua a presión.

##### 4.10.2 Preparación y cimbra del bloque

Para comenzar el colado de una tongada se preparaban primero los accesos del personal al bloque. A continuación, se descimbraba la tongada anterior y se trepaba el encofrado.

Según Portnov y Sklyarenko (1974), es importante la selección del tipo de cimbra, tamaño de los paneles y métodos para desplazarlos y, a la vez, la colocación de concreto en la presa. La cimbra de los bloques en el P.H. Zimapán eran de madera y eran encofrados

trepantes de 3m con una anchura de plataforma de 17m. La cimbra se anclaba sobre la estructura del bloque colado anterior a la que se pretendía colar. El desplazamiento de los elementos se realiza mediante la grúa torre.

Las cimbras utilizadas en la construcción de este tipo de presas son usualmente compuestas de segmentos en planos cortos. La longitud de estos segmentos corresponde a la longitud de los paneles, que no debe superar los 2.5cm.

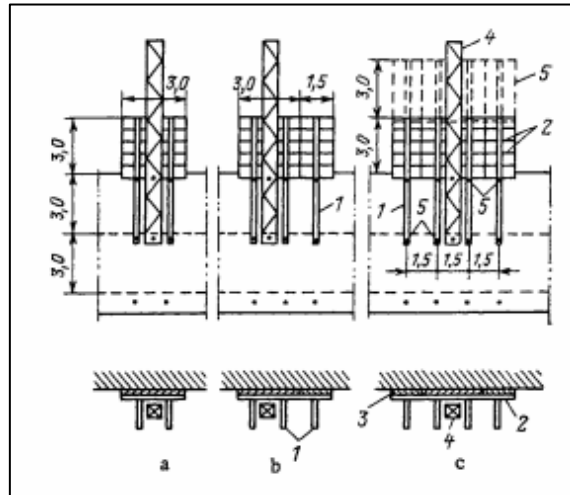


Figura IV.17 Variaciones en las dimensiones de las cimbras de trabajo de levantamiento automático. a, b, y c) Paneles de encofrado para dos, tres y cuatro refuerzos.

1) soportes voladizos para tableros; 2) tablas de refuerzo; 3) paneles de encofrado; 4) abrazadera para levantar el encofrado; 5) conexiones de anclaje para llaves.

Fuente: (N.I. Zinevich, 1973)

La cimbra utilizada se componía de los siguientes elementos:

- ✓ Panel de encofrado. Es un panel convencional para la ejecución de muros. Incorporada con una plataforma superior para el hormigonado y, si fuese necesario en función de la altura de alzada, otra plataforma a mitad de panel para dar acceso a posiciones intermedias de anclajes o elemento de unión entre módulos.
- ✓ Consola de trepa: está formada por dos estructuras planas de forma triangular denominadas consolas convenientemente arriostradas, que permiten la formación, en el plano horizontal, de una plataforma de trabajo. Deben estar preparadas para adaptarles en su parte inferior unas prolongaciones que permitan la creación de una plataforma colgante de trabajo para la recuperación de anclajes y operaciones de repaso y acabado.

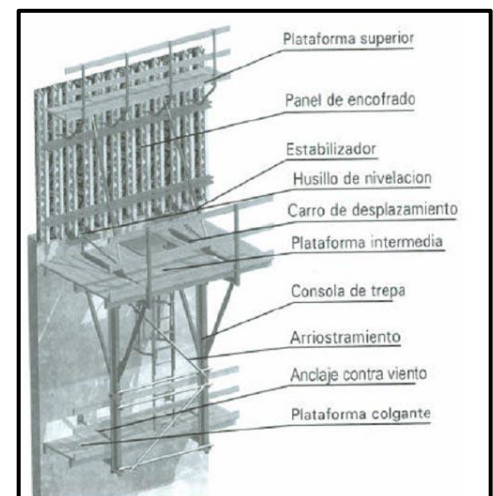


Figura IV.18 Componentes de la cimbra trepadora utilizada en el P.H. Zimapán.

- ✓ Elementos de conexión: serie de accesorios propios de cada sistema mediante los cuales se realiza la conexión del panel de encofrado a la unidad de trepa. En los encofrados trepantes modernos, los elementos de conexión deben posibilitar el izado del módulo de trepa completo; las operaciones de encofrado y desencofrado, permitiendo el aplome y nivelación del encofrado, y retranqueo de los paneles de encofrado para poder efectuar las labores de limpieza del mismo, así como la colocación del acero de refuerzo. En el caso de encofrados trepantes a una cara, los elementos de conexión deberán dimensionarse para permitir la transmisión de los empujes del concreto, garantizando además el perfecto apriete del encofrado en su solape con la tongada inferior evitando así pérdidas de lechada.
- ✓ Anclajes: diseñados para permitir el cuelgue del módulo de trepa sin la intervención directa de ningún operario, evitando así la presencia de personas sobre el módulo de trepa durante la maniobra de izado y cuelgue del mismo.

Las fases en el empleo de la cimbra trepadora fueron:

1. Realización del colado del bloque inicial, la fijación de este se realiza mediante un anclaje que se dejó previamente en la cimentación.
2. Se coloca el concreto en el primer bloque.
3. Se desmonta el primer bloque, la cual es suspendida. La cimbra es elevada y fijada mediante pernios en el siguiente bloque a colar.
4. Se completa la unidad de encofrado mediante la plataforma de seguimiento.
5. Con esto queda completado para los pasos sucesivos que se volverán a repetir en cada bloque.

De manera adicional, actualmente existe el programa Arch Dam Construction Program ADCOP, Programa de Construcción de una Presa de Arco, el cual se ha desarrollado para generar la información necesaria para establecer la ubicación del encofrado a lo largo de las caras ascendente y descendente de cada ascensor. ADCOP es un programa informático, que requiere información de geometría de la presa y genera datos que controlarán el diseño del encofrado de cada monolito en el cuerpo de la presa. (US Army Corpy of Engineers, 1994).

#### 4.10.3 Armado por temperatura y sellos de cobre y polivinilo.

Después de la alineación de taludes, el aplomado y arrostramiento de paneles. Se colocaban las juntas de PVC entre bloque, sin ser dobladas hacia la cimbra, y los elementos de anclaje para la siguiente capa. Esta constaba de una serie de anclas sub-horizontales, para el amacice sistemático de la excavación. Se posicionaban a la elevación donde terminaba el bloque colado a una distancia de 1.80m, estas anclas se conectaban por medio de una barra de 1.50" de diámetro a la armadura del bloque con un gancho de amarre. Sobre estas barras se colocaba una parrilla de ¾" de 30 x30 cm.

La preparación terminaba con la retirada de restos propios de las operaciones descritas y con un chorro de aire a presión.

#### 4.10.4 Colocación de los serpentines

Los serpentines se colocaron según los planos base, es decir, directamente sobre la superficie del último bloque colado, una vez limpiada y lavada la superficie de concreto. La tubería de PVC se colocaba en cada capa de concreto, separada verticalmente cada 3m y horizontalmente cada 1.5m, como se muestra en la figura 4.19.

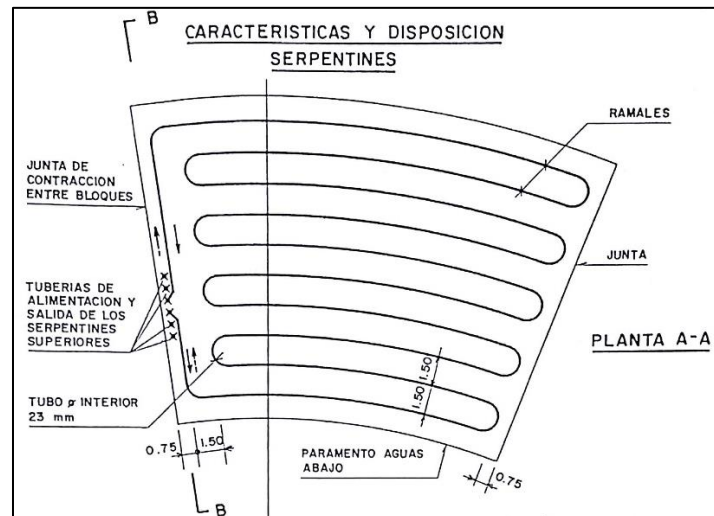


Figura IV.19 Vista en planta de la disposición de los serpentines del P.H Zimapán.  
Fuente: (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

Inmediatamente después de la colocación de un serpentín, se controlaba que el agua circulara regularmente y se verificaba que la presión era por lo menos igual a la más alta que el serpentín tendría durante la explotación.

Durante la colocación del bloque superior, el serpentín debía de estar fuera de explotación y sin presión. Se ponía en explotación el serpentín 24 horas después de la terminación de la colocación del bloque superior.

Cada serpentín era numerado a la entrada y a la salida del mismo, con una etiqueta soldada a la extremidad del pedazo de unión flexible cerca del distribuidor, con el fin de facilitar el control de sus lecturas.

El primer serpentín de enfriamiento se colocó en la elevación 1539.50 antes de proceder al hormigonado del bloque 5.01 B.

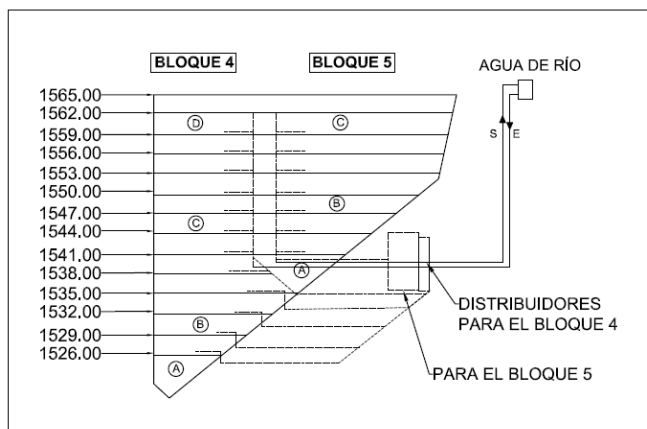


Figura IV.20 Esquema del sistema de alimentación y campos de enfriamiento de los Bloques 4 y 5.  
Fuente: (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

De acuerdo a los planos proporcionados, se realizó la cuantificación de tubería utilizado por m<sup>3</sup> de cortina, esto con el fin de realizar el análisis de costo del sistema de enfriamiento, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.9.

Tabla IV.9 Características generales del serpentín.

<i>Diámetro interno del serpentín</i>	23 mm
<i>Distancia entre tuberías en planta</i>	1.50 m
<i>Distancia entre tuberías en altura</i>	3.00 m
<i>Longitud por m<sup>3</sup> de concreto</i>	16 m

#### 4.10.5 Colado del concreto

De acuerdo a los ingenieros de la Fuerza Armada de EUA (US Army Corps of Engineers, 1994), indican que una elevación de concreto de 7- ½ pies (2.3m) se debe colocar en cinco capas. En el caso del P.H. Zimapán el colado se realizó en bloques de 3m de altura, dividiéndose en sub-bloques de 0.75m, es decir, se realizaba en 4 capas cada bloque.



Figura IV.21 Colocación del concreto por medio de cubetas en la cortina.

La descarga del concreto se realizaba verticalmente y con la cubeta de concreto parada, desde una altura máxima de 2.0m.

Para el extendido se usaba un bulldozer de empuje en capas de 75 cm de espesor y el vibrado se hacía con un equipo de vibradores hidráulicos sobre retroexcavadora, compactación mediante rodillos vibratorios de peso estático de 10 ton. En caso de tener dimensiones menores, se empleaban vibradores sostenidas a mano. Su uso era obligatorio en los alrededores de los aparatos de auscultación y de la tubería de enfriamiento embebidas en el concreto.



Figura IV.22 Fotos de la construcción de la cortina del P.H. Zimapán.

Al vibrar cada sub-bloque las puntas de los vibradores se hacían penetrar ligeramente en la capa inferior. Además de todo lo anterior, se contaba con un equipo de control de calidad y un equipo completo de mantenimiento.

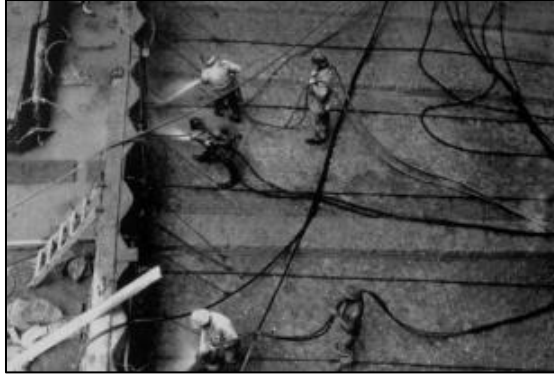
#### 4.10.6 Curado

Comenzando el fraguado del concreto del último sub-bloque, se lavaba la superficie para eliminar lechada y elementos sueltos, sin remover las partículas gruesas. Estas partículas finas son el resultado de la elevación del agua libre en respuesta a la separación de agregados, la vibración y la agitación de la mezcla después de la colocación (Troxell, Davis, & Kelly, 1968).

Una vez hecho esto, se retiraban los equipos y se instalaban los elementos de riego por aspersion para el curado, manteniendo la superficie húmeda hasta el colado del concreto del siguiente bloque, el tiempo mínimo de espera era de 48 h después de haber terminado el colado del bloque anterior. Este tiempo tomaba en cuenta la temperatura elevada del sitio, la facilidad del desencofrado, la alta resistencia del concreto y el eficiente sistema de enfriamiento.

Además del riego de la superficie horizontal de cada bloque, se mantenía permanentemente a lo largo de toda la presa un riego de ambos paramentos realizado desde la parte superior.





*Figura IV.23* Foto de trabajadores que lanzan la capa de lechada (espuma) desde la superficie recién vertida en uno de los bloques internos de la presa, en preparación para el próximo levantamiento. En ella se puede observar los tubos de enfriamiento de una pulgada de diámetro espaciados a 5 pies de distancia.

Fuente: (U.S. Bureau of Reclamation, 1947)

#### 4.11 INYECTADO DE LAS JUNTAS

Para minimizar los efectos térmicos que se presentan durante la construcción de cortinas de concreto, los diseñadores de este tipo de obras, diseñan juntas de construcción más o menos verticales; buscando que la superficie de cimentación sea lo más horizontal posible.

La lechada debe consistir en la mezcla más espesa que ingresará a la unión, llenará todos los vacíos pequeños y viajará a la ventilación. Esta mezcla usualmente varían desde proporciones de agua-cemento de 2:1 en volumen (1.33 en peso) al inicio de la operación de rejuntado hasta mezclas más gruesas (1:1 en volumen o 0.66 en peso) a medida que avanza la operación (US Army Corpy of Engineers, 1994).

Con el fin de permitir una nivelación de la temperatura del concreto sobre la entera altura del campo de inyección, se realizaba la interrupción definitiva del sistema de enfriamiento por lo menos 48 horas antes del inicio de las inyecciones.

En el caso de la presa Zimapán, las juntas de construcción se construyeron ligeramente inclinadas, ya que la superficie de cimentación no era horizontal y las paredes del cañón eran prácticamente verticales. Es decir, que cada junta de construcción fue perpendicular al eje de los arcos en cada nivel; lo cual fue ventajoso para tener ciertas llaves sencillas en las juntas verticales (por razones de resistencia a sismos).

En las juntas verticales fue suficiente una tapa-junta de PVC en cada cara. Además, fueron subdivididas con tapajuntas horizontales para limitar los campos de inyección.

La inyección de las juntas fue hecha cuidadosamente para evitar deformaciones y esfuerzos parásitos en la bóveda, y en cada galería se colocó medidores de abertura de juntas.

Las operaciones se realizaban desde la galería del mismo recinto en dos fases:



- Lavado de la junta. A través de una tubería se hacía llegar agua a presión a la ranura inyectora. El agua iba ascendiendo por el plano de la junta arrastrando las impurezas y lavándola paulatinamente. El lavado cesaba cuando salía limpia el agua por la ranura colectora.
- Inyección de la junta. Sin vaciar de agua el recinto, se inyectaba lechada con la concentración establecida. Cuando la lechada que se recogía por la ranura colectora era de la misma concentración que la lechada inyectora, se aumentaba la concentración final de manera estable. Llegando este momento, se cerraba el tubo de la ranura colectora, se cerraba el conducto de la ranura colectora y se dejaba fraguar.

#### 4.12 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO EN EL P.H. ZIMAPÁN

En el caso del P.H. Zimapán no fue posible bajar la temperatura final del concreto al valor promedio de la temperatura ambiental, de 19°C, utilizando únicamente un pre-enfriamiento con hielo. Por lo que fue indispensable un sistema de post-enfriamiento con agua fría mediante serpentines embebidos en el concreto.

##### 4.12.1 Principio del Sistema de enfriamiento

En el P.H. Zimapán el enfriamiento del concreto se realizó por medio de agua circulante dentro de serpentines embebidos en cada bloque de 3m de la cortina. Cada serpentín está conectado por medio de tuberías a la galería de inspección subyacente más cercana.

En la figura 4.24 se representa las características típicas de los serpentines, su disposición y el principio de conexión a la galería de inspección.

Los serpentines están formados por tubos de PVC separados verticalmente cada 3m y horizontalmente cada 1.5m, su diámetro interior es de 23mm y su caudal de 0.2 l/s. El sistema de conexión previsto a las tuberías de alimentación y de salida, permiten invertir el flujo de agua de enfriamiento dentro de cada serpentín. Es así posible circular el agua desde el paramento de aguas abajo hacia el paramento aguas arriba por un cierto tiempo y luego invertir el flujo; el agua circulante entonces desde el paramento aguas arriba hacia el paramento aguas abajo.

El enfriamiento fue realizado en dos etapas:

1. Etapa 1. Se utilizó directamente el agua de los ríos Tula, San Juan y de la boquilla, cuya temperatura promedio anual era de 20°C. Esta etapa de enfriamiento comenzaba el mismo día del colado y duraba 59 días.
2. Etapa 2. Se utilizó directamente el agua refrigerada cuya temperatura a la entrada del serpentín era de 6°C. Esta etapa comenzaba al sexagésimo día y duraba hasta que la temperatura promedio de cada capa de concreto alcanzara los 19°C. Aproximadamente 2 meses (60 días) antes de los trabajos de inyección de las

juntas de contracción para poder nivelar y traer la temperatura de cada bloque a valores de alrededor de 20°C.

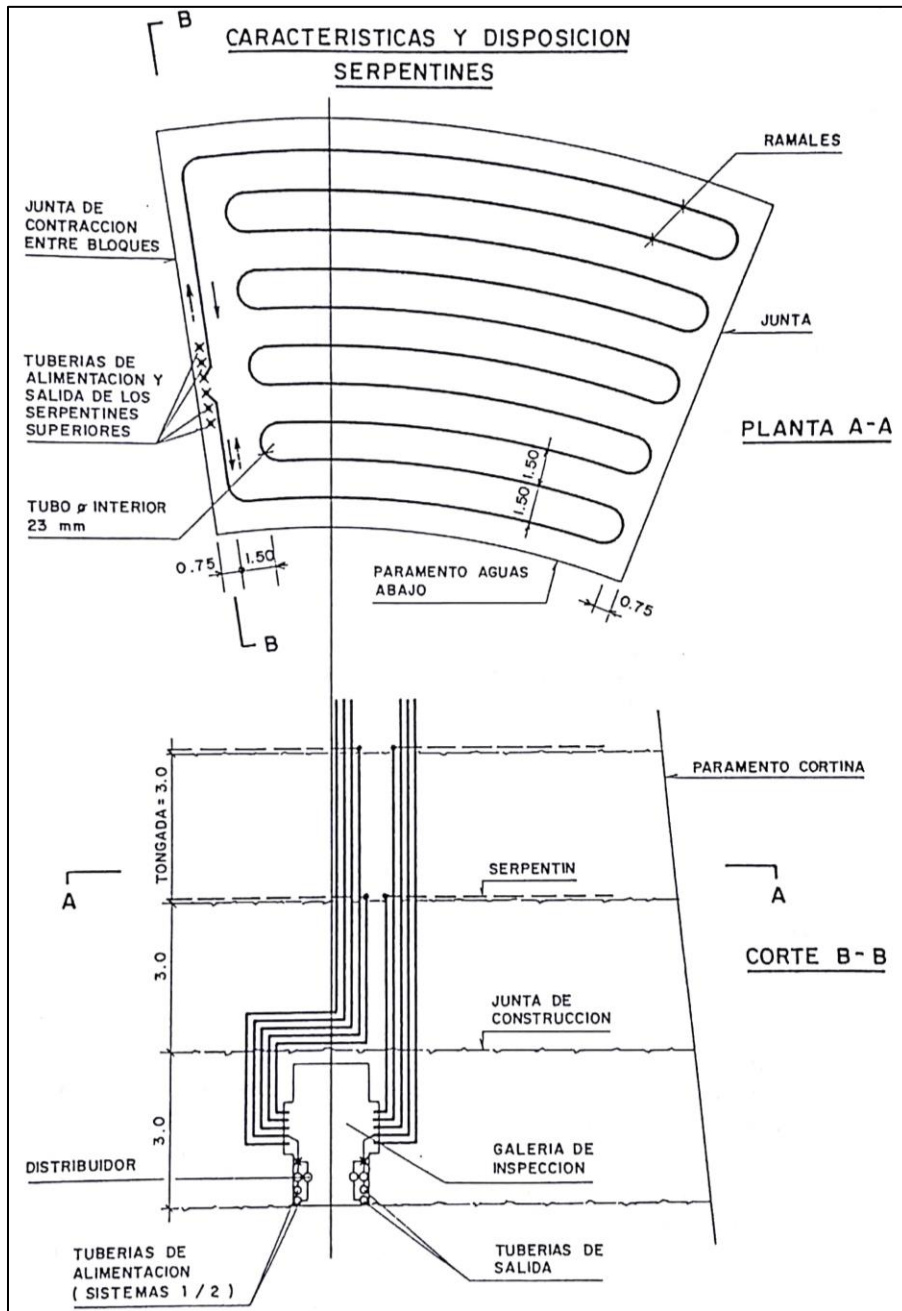


Figura IV.24 Vista en planta y corte de las características y disposición de los serpentines del P.H Zimapán.

Fuente: (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

En los siguientes esquemas, se indica la posición del invertidor del flujo que se operaba diariamente. De esta manera, cada día todos los serpentines cambiaban de dirección del flujo del agua garantizando un enfriamiento más uniforme de los bloques colados.

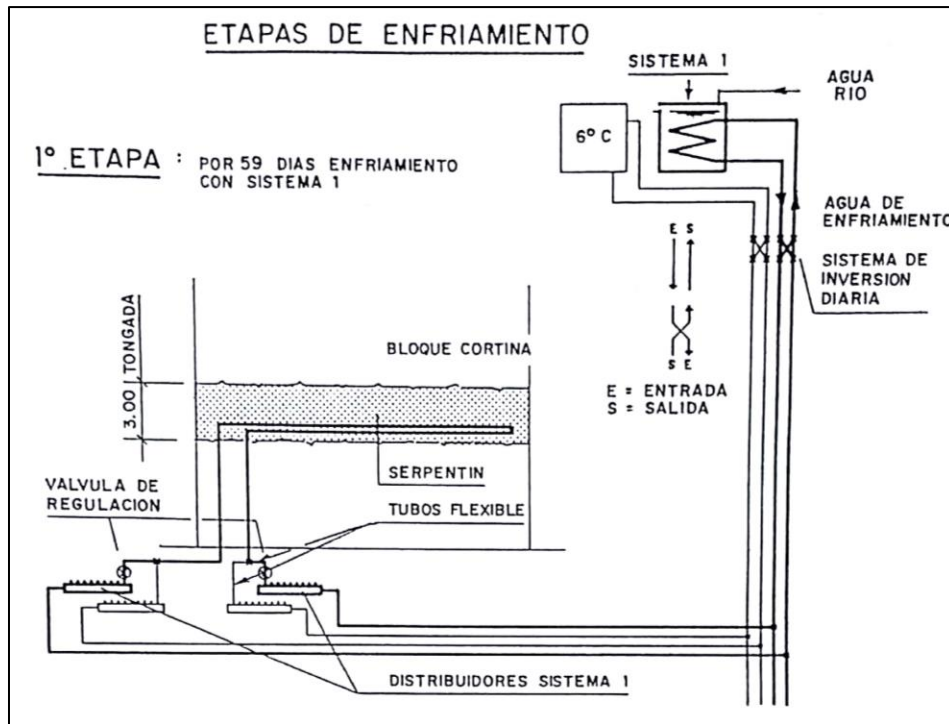


Figura IV.25 Circuitos de las tuberías de la Etapa 1 para un bloque colado  
Fuente: (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

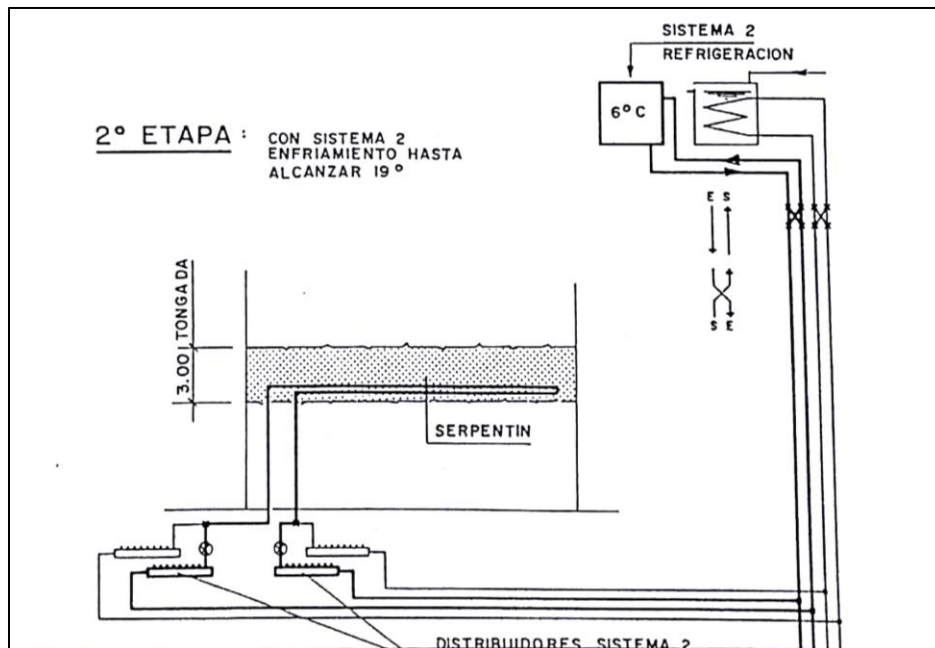


Figura IV.26 Circuitos de las tuberías de la Etapa 2 para un bloque colado  
Fuente: (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

El caudal de cada serpentín se asumió igual a 0.20 L/s en ambos sistemas. En las galerías de inspección, en el cuerpo de la cortina, se colocaron los distribuidores para cada bloque y para cada sistema. Los serpentines están conectados a los respectivos distribuidores por medio de tubos flexibles que permitan la conexión de medidores de flujo (contadores), termómetros y válvulas de regulación. De esta manera se mantuvo bajo estricto control el enfriamiento de cada bloque colado. El sistema de termómetro permitió determinar la temperatura del agua de enfriamiento a la entrada y salida de cada serpentín.

La siguiente imagen muestra los campos de enfriamiento de los 3 bloques centrales de la cortina y como se conectan las tuberías de alimentación de los dos sistemas de enfriamiento de cada campo a las galerías horizontales. La parte baja de la cortina fue enfriada por un sistema provisional hasta que se pudo alimentar el sistema por la galería a la cota 1373.

## CAMPOS DE ENFRIAMIENTO Y ALIMENTACIÓN

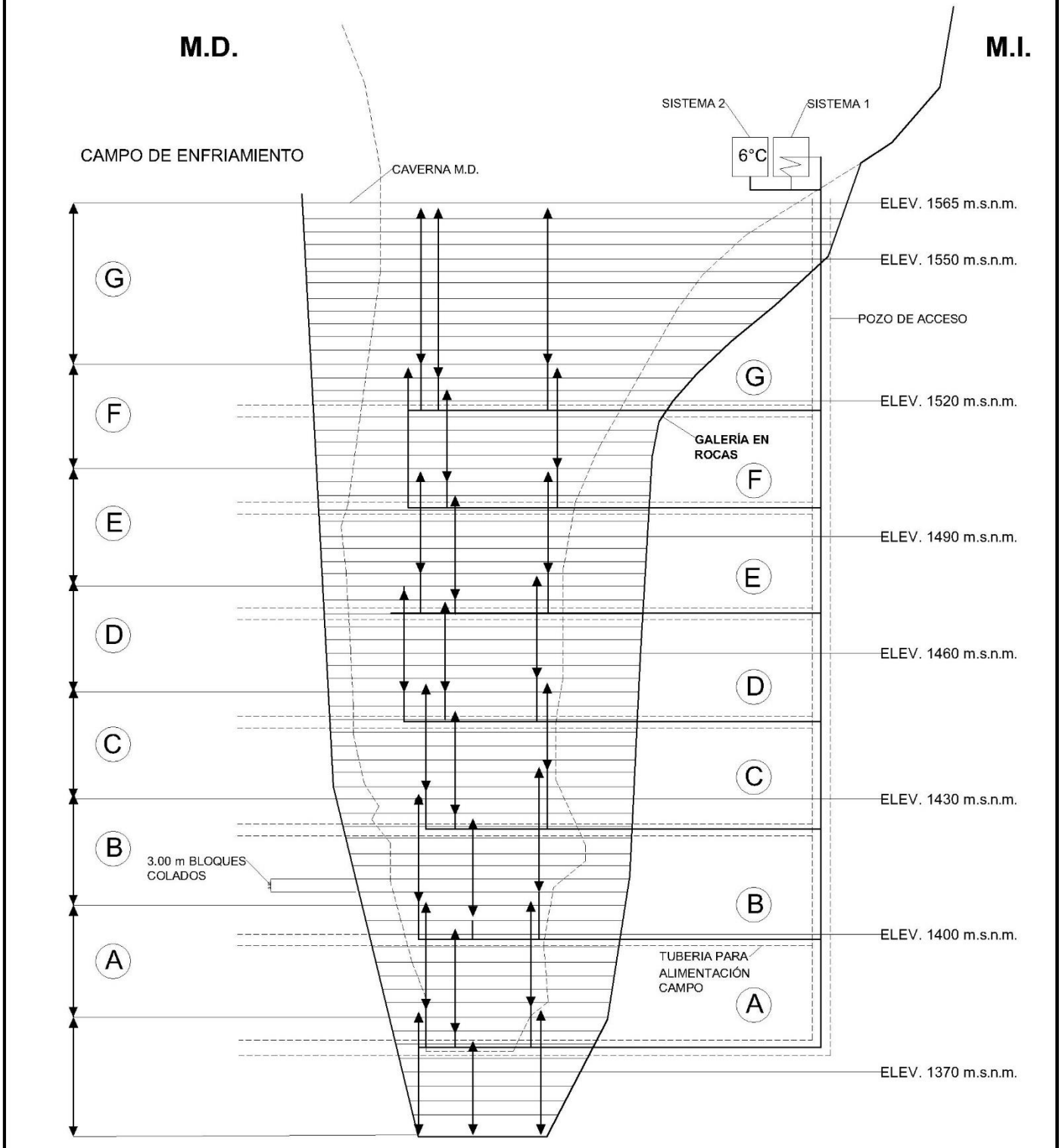


Figura IV.27 Campos de enfriamiento de los 3 bloques centrales de la cortina del P.H. Zimapán  
Fuente: (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

## 4.12.2 Proceso del control de la temperatura

### 4.12.2.1 Explotación

En los bloques 4 y 5 se previó instalar solamente la primera etapa del sistema de enfriamiento usando el agua correspondiente a la temperatura del agua del río.

El agua que circulaba en los serpentines era libre de impurezas y de lodo, por lo que la planta fue a circuito cerrado con un cambio de temperatura colocado en un reservorio, alimentado por agua del río. Diariamente se invertía el flujo del agua a la entrada y a la salida de las columnas principales. Esta estación de maniobra fue colocada en las cercanías del reservorio y era único para todo el sistema de enfriamiento de la cortina. El conducto de salida del reservorio fue equipado con un contador fijo de caudales.

La explotación de un serpentín se interrumpía cuando la temperatura del agua en salida, después de 24 horas de permanencia en la tubería, alcanzaba los 20°C según la estación. La interrupción definitiva del enfriamiento era por lo menos 48 horas antes del inicio de las inyecciones, esto con el fin de permitir una nivelación de la temperatura del concreto sobre la entera altura del campo de inyección.

Una vez terminado el proceso de enfriamiento de los serpentines, estos se sellaban con lechada de cemento; mientras que las cajas sobre el paramento aguas abajo con mortero y concreto; y las tuberías principales eran vaciadas y desmontadas.

### 4.12.2.2 Control periódico de los caudales

Después del control del caudal realizado al momento de la puesta en explotación del serpentín, se debía hacer semanalmente el control de los caudales.

En el caso del P.H. Zimapán, a partir del 1 de septiembre de 1992 el control era realizado cada 15 días; dicho control se hacía con un contador móvil que fue colocado a la salida, entre el distribuidor y la tubería flexible de unión.

La toma de medidas se alternaba, es decir, en una semana se medían los caudales de los serpentines colocados en los bloques colados 4.03, 4.05, 4.07, 4.09, 4.11, 4.13, 4.15, 5.03, 5.05, 5.07 y 5.09, y en la otra semana colocados en los bloques colados 4.04, 4.06, 4.08, 4.10, 4.12, 4.14, 5.02, 5.04, 5.06 y 5.08.

Diariamente se tomaban los datos del contador fijo, instalado a la entrada de los conductos principales. Todas las mediciones eran registradas sobre un formulario apropiado, para su fácil administración.

### 4.12.2.3 Control de las temperaturas

Es importante recordar que las mediciones de la temperatura sirven para dos objetivos:

- Seguir el progreso del enfriamiento.
- Controlar el funcionamiento de las instalaciones y por ende se puede definir en qué momento se ha alcanzado la temperatura deseada.

De una manera específica en el P.H. Zimapán, las mediciones de los bloques 4 y 5 permitieron controlar los datos básicos utilizados en cálculo para poder ajustar la campaña de los bloques centrales 1,2 y 3. Las mediciones se realizaron una vez a la semana hasta el 1ro de septiembre de 1992 y después de esta fecha una vez cada 15 días, igual que las mediciones de los caudales.

El proceso de la medición de la temperatura se llevó a cabo de la siguiente manera. A la fecha de la medición se interrumpía la circulación de un cierto número de serpentines puestos a un intervalo en altura de 6m. Después de un día de estancamiento se vaciaba el agua del serpentín dentro de un recipiente térmicamente aislado para la medición de la temperatura. Se repetía cada medición por lo menos 4 veces, sacando durante cada operación lo mínimo posible de agua, cuidando eliminar un volumen igual al contenido de la tubería que sobresale del concreto y a aquel de la unión flexible, en el caso que la toma se haga aguas debajo de la misma. Cada vez que se extraía un poco de agua caliente de la salida, esta era sustituida con un aditamento de agua fría. Las 4 mediciones eran registradas sobre un determinado formulario y en base a ellas se realizaron los gráficos mostrados más adelante de la presente investigación.

Cada día tenía que ser medida también la temperatura del agua a la salida y a la entrada de los conductos principales. Para tal operación se necesitó disponer de dos termómetros fijos en el mismo sitio, ubicados donde está el contador de caudales y cerca del reservorio.

#### 4.13 ACTIVIDADES CONSECUENTES CONSTRUIDA LA CORTINA

Tan pronto como se construya una porción significativa de la cortina, se pudo comenzar el proceso de llenado del embalse. Esto se hace de una manera altamente controlada para evaluar las tensiones en la cortina y observar su funcionamiento temprano.

Las otras estructuras que hacen funcionar a la presa, se agregan tan pronto como se alcanza la elevación de su ubicación a medida que la cortina se construye. Los componentes finales son: la protección contra la erosión en el lado aguas arriba de la presa (y algunas veces corriente abajo en las bases de las estructuras de salida), instrumentos a lo largo de la cresta y caminos, veredas laterales, alumbrado público y retención paredes.

Lejos de la cortina, la casa de máquinas y los edificios de instrumentos también están terminados. Por lo que, se realizan pruebas iniciales de todas las instalaciones de la presa. Los detalles finales de las construcciones se cierran cuando la presa se pone en servicio.

#### 4.14 CONCLUSIÓN

La construcción de la cortina, es una de las partes más complejas a realizar en la construcción de un proyecto hidroeléctrico. Por lo que, el objetivo planteado en este capítulo de brindar un panorama del proceso constructivo y detallar la colocación del concreto en nuestro caso de estudio se cumplió satisfactoriamente. Comprendiendo la necesidad del control de todas las actividades involucradas para que el proyecto se realice exitosamente.

Una colocación exitosa de concreto y un buen diseño del sistema de enfriamiento, puede lograr mejoras notables en la programación de construcción de la cortina. Por lo que, mediante la información detallada en este capítulo, se puede concluir que los requisitos que proporcionan un funcionamiento sin problemas para la colocación rápida y continua del concreto son:

1. Una fuente constante y disponible de suministro de todos los materiales
2. Almacenamiento a granel adecuado de todos los materiales con un tamaño de almacenamiento para compensar el tiempo de inactividad programado y probable.
3. Instalaciones básicas de transporte y procesamiento para todos los materiales adaptados a los requisitos de producción del producto final con alguna capacidad adicional para superar el tiempo de inactividad y otros problemas no programados.
4. Superar el almacenamiento lo más cerca posible del punto de uso final, para compensar el tiempo de inactividad en el procesamiento intermedio y las instalaciones de transporte.
5. El equipo en funcionamiento debe ser simple y resistente con la menor cantidad posible de piezas móviles con fácil acceso para reparar o reemplazar componentes.
6. Se deben establecer medios rápidos y seguros de comunicación entre la gerencia y la supervisión en puntos críticos del sistema de producción en operación.



---

## V. RESULTADOS

---

### 5.1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo a las conclusiones de capítulos anteriores, se debe tener un buen control del procedimiento constructivo de la cortina, para proteger a la estructura de excesivos diferenciales de temperatura debido al manejo del concreto y cumplir con el programa de construcción de la misma.

Por tal motivo, el objetivo principal de este capítulo es presentar la interpretación de los resultados de los estudios del sistema de enfriamiento del P.H. Zimapán realizado por los Ingenieros Consultores Lombardi S.A. y con base en ellos, se realizará una modificación a la programación constructiva de la cortina.

Continuando con una evaluación cualitativa y económica de la propuesta elegida, dando a conocer el impacto que tiene en costos la modificación del sistema de enfriamiento.

Es importante recordar que la búsqueda de la alternativa de mejora radica en anticipar los siguientes puntos:

1. El sellado de las juntas de contracción de los bloques.
2. El llenado del embalse.
3. Generación de energía para uso comercial, es decir, generar beneficios antes de tiempo.

Trayendo consigo mejora en la calidad de la estructura, optimización del proyecto y eliminación de interferencias entre los procesos.

### 5.2 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE DE LOS INGENIEROS CONSULTORES LOMBARDI S.A.

Para establecer el método de post-enfriamiento, se requirió la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales de transmisión de calor. Esta resolución fue emitida por el software diseñado por la Asesoría técnica externa, la cual estaba a cargo de los Ingenieros Consultores Lombardi S.A.

Los estudios del sistema de enfriamiento se basan en datos existentes, mencionados más adelante, y en el programa de construcción, que involucraba los siguientes puntos:

- A. Programa de colado de los bloques a cada 3 m
- B. Fin del proceso de enfriamiento Etapa 2
- C. Programa de la inyección de las juntas de construcción
- D. Programa del llenado del embalse.

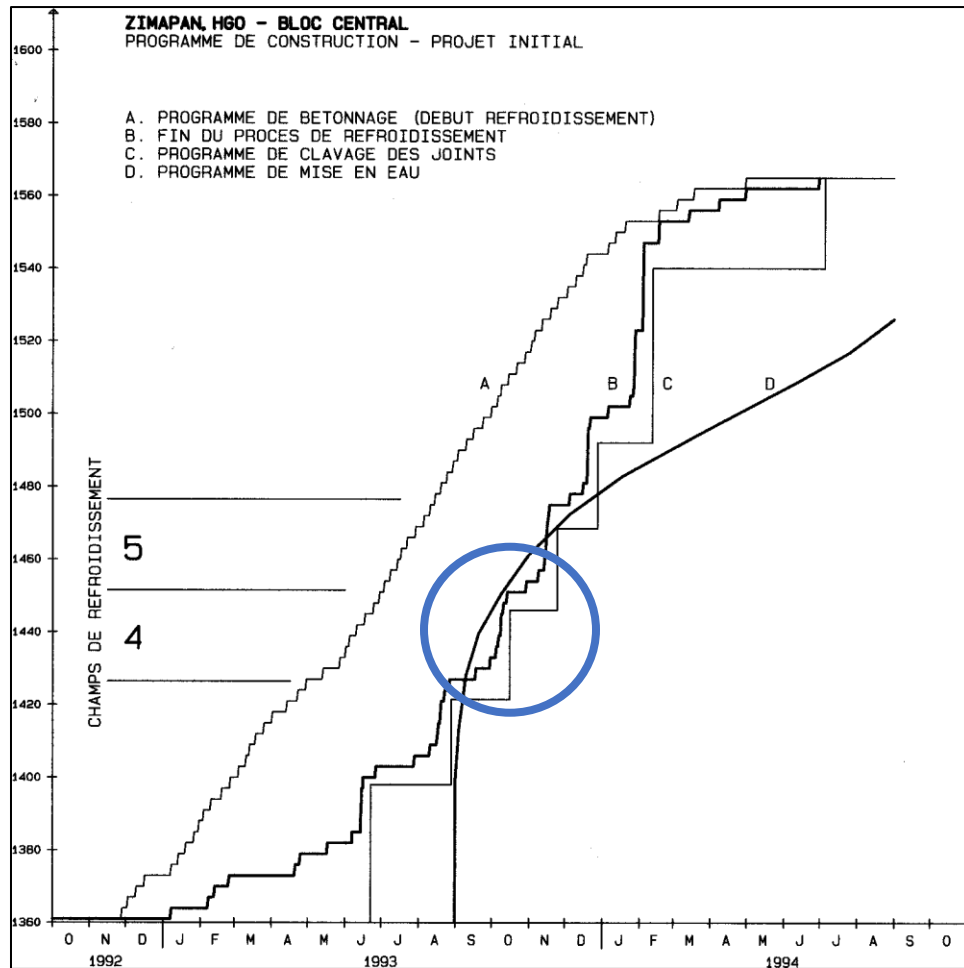


Figura V.1 Programa de construcción inicial utilizado para los estudios del sistema de enfriamiento.  
Fuente: Recuperado de las simulaciones del software diseñado por los ingenieros Consultores Lombardi S.A. en 1991 (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

En particular, este programa toma en cuenta las siguientes leyes de física:

- Conductividad térmica del concreto;
- Transmisión de calor dentro del concreto y distribución alrededor de la bobina;
- Eliminación de calor por el agua que circula en las tuberías;
- Difusión por superficies;
- Radiación solar, nubosidad y absorción de radiación térmica;
- Evaporación del agua en las superficies (función de la temperatura, la humedad del aire y la intensidad del viento);
- Comportamiento elástico lineal del concreto.

A su vez, estas ecuaciones toman en cuenta:

- Las propiedades térmicas de la roca y de los concretos empleados.
- La forma (geometría) de cada bloque de la cortina.
- La posición de cada serpentín.
- El programa de obra, considerando la fecha de cada colado.

- Las temperaturas ambientes promedio mensuales del aire y del agua del río.
- Las condiciones de insolación de cada colado.
- El curado por riego de la superficie.
- Los sistemas de enfriamiento (agua de río y agua refrigerada).

Con los resultados de la resolución numérica se obtiene:

- Longitud de los serpentines.
- Temperatura máxima del concreto.
- Calor de hidratación total.
- Calor de hidratación a eliminar.
- Calor de insolación.
- Calor substraído por sistema (agua de río y agua refrigerada), diario y total.
- Calor dispersado por la superficie libre del concreto
- Gastos de cada sistema (agua de río y agua refrigerada).

Debido a las demoras que se habían acumulado en el sitio de la P.H. Zimapán, fue necesario buscar soluciones para reducir el tiempo de enfriamiento del concreto e inyectar los campos inferiores de las juntas de contracción antes del llenado del embalse.

El trabajo de adaptación del sistema de refrigeración se pudo estudiar y realizar rápidamente gracias al desarrollo del programa de los consultores. El programa es adecuado para simular las condiciones del sitio de la vida real y comparar varias alternativas, así como optimizar los procesos de enfriamiento. También analiza los voltajes y las deformaciones inducidas por la temperatura.

Los parámetros variables del cálculo son los siguientes datos físicos:

- La geometría, la cual está definida por las caras de aguas arriba y aguas abajo, mediante la definición de áreas por los diferentes tipos de concreto y la introducción de huecos debido, por ejemplo, a la presencia de galerías de control.
- El ambiente, el cual está determinado por las temperaturas del aire y del agua del río, los cambios en el tiempo, los cambios en el nivel de la cuenca, las condiciones de insolación (orientación, latitud, nubosidad, absorción de la superficie del lago).
- Los materiales, el cual se define para un máximo de 5 tipos de concreto, por la dosificación del cemento, las propiedades térmicas (densidad, calor de hidratación, conductividad, calor específico, difusividad, expansión térmica y módulo de elasticidad), así como por las características correspondiente de la roca.
- El programa de colado de concreto, el cual se define por la altura de cada capa, la fecha y la temperatura de implementación, el nivel de bloques vecinos y la correlación entre las capas y los campos de enfriamiento.
- El enfriamiento, el cual se define por el tipo de bobina (acero o plástico, diámetro y espesor de pared), la distancia de instalación, el uso de uno o dos sistemas de refrigeración (agua de río y refrigeración) o por una temperatura modulada del agua debido a la mezcla, la duración del enfriamiento y la temperatura final prescrita.

### 5.2.1 Consideraciones generales para la elaboración de los cálculos

La solución al problema de transferencia de calor en una presa de concreto requiere del conocimiento que usan una serie de parámetros, los cuales son en función de la temperatura y/o el tiempo. A continuación, se mencionan de manera general los parámetros que utilizaron los Ingenieros Consultores Lombardi S.A. para la simulación de funcionamiento del sistema de enfriamiento en el P.H. Zimapán.

#### 5.2.1.1 Características del concreto

El paramento aguas arriba de la cortina, con un espesor de 2m, tiene un concreto de revestimiento con mejores características de impermeabilidad. En el cálculo se asumieron los siguientes parámetros:

Tabla V.1 *Características del concreto aguas arriba de la cortina.*

<i>Dosificación de cemento Portland (CP)</i>	260 kg/m <sup>3</sup>
<i>Peso específico del concreto</i>	2,500 kg/m <sup>3</sup>
<i>Calor específico</i>	0.23 kcal/kg °C
<i>Calor de hidratación que se desarrolla en 12 días</i>	15,454 kcal/m <sup>3</sup>
<i>Difusibilidad del concreto</i>	0.003 m <sup>2</sup> /h
<i>Temperatura de colocación del concreto</i>	20°C

Fuente: (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

Para el concreto masivo del resto de la cortina se asumió:

Tabla V.2 *Características del concreto masivo de la cortina del P.H. Zimapán*

<i>Dosificación del Cemento Portland</i>	220 kg/m <sup>3</sup>
<i>Peso específico del concreto</i>	2,500 kg/m <sup>3</sup>
<i>Calor específico</i>	0.23 kcal/kg °C
<i>Calor de hidratación que se desarrolla en 12 días</i>	13,077 kcal/m <sup>3</sup>
<i>Difusibilidad del concreto</i>	0.003 m <sup>2</sup> /h
<i>Temperatura de colocación del concreto</i>	20°C

Fuente: (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

#### 5.2.1.2 Condiciones climáticas

Las condiciones climáticas del cañón del infiernillo y la temperatura del agua del río se resumen en los siguientes diagramas. Los cuales muestran la temperatura promedio mensual junto a un coeficiente de transmisión entre aire y concreto de 20kcal/m<sup>2</sup> °C, el cual adoptaron para la realización de los cálculos de enfriamiento.

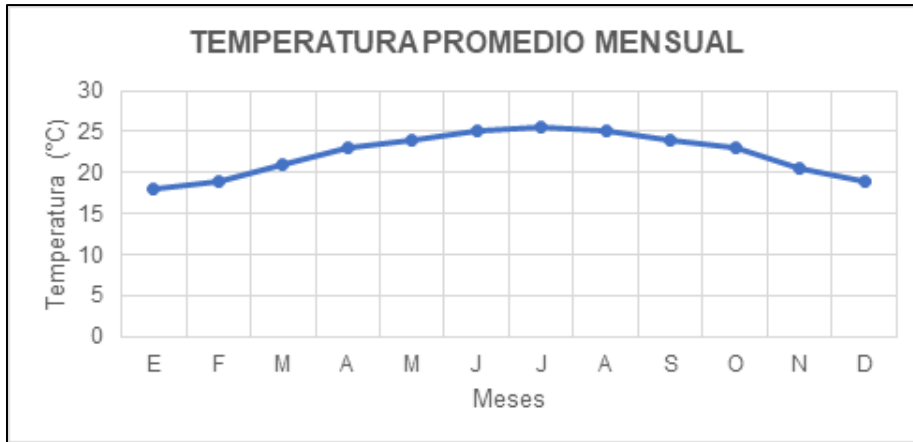


Figura V.2 Temperatura ambiental promedio ambiental del cañón del Infiernillo  
Fuente: (Lombardi S.A. Ingenieros Consultores, 1991).

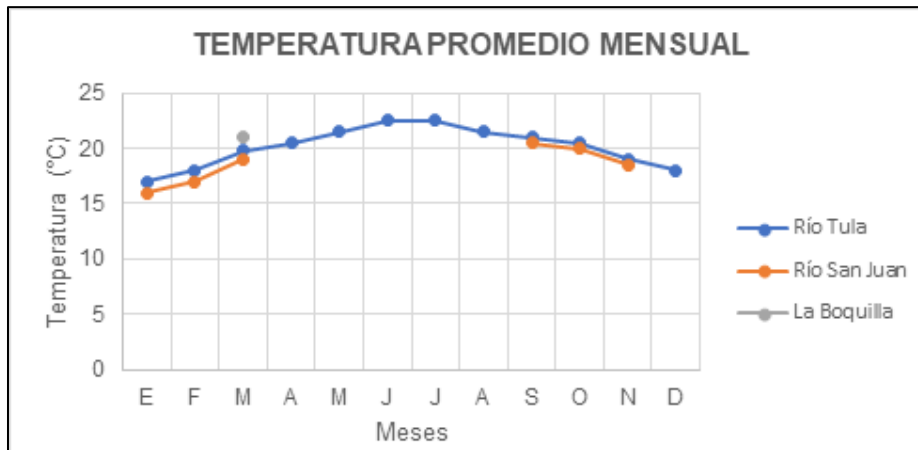


Figura V.3 Temperatura del agua promedio ambiental del cañón del Infiernillo  
Fuente: (Lombardi S.A. Ingenieros Consultores, 1991).

### 5.3 EVALUACIÓN DE LAS GRAFICAS DE RESULTADOS

A continuación, se resumirán los resultados obtenidos en la simulación realizada por el software de los Ingenieros Consultores (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991) con la colocación a cada 3.00m de los serpentines. Ellos muestran la temperatura promedio de cada capa, al centro de la capa y en la superficie o la de una serie de puntos seleccionados. De igual forma, se muestra el balance de calor, el historial del enfriamiento, el balance del agua utilizada y el calor eliminado. Así mismo, los gráficos de los voltajes inducidos y las deformaciones del bloque debido al estado térmico y sus variaciones.

Los datos que arroja el programa de los consultores, se memorizan y los representan en forma de gráficos o tablas. Con base en dichas graficas se realizó la siguiente evaluación.

#### 5.3.1 Variación de la temperatura promedio en función del tiempo

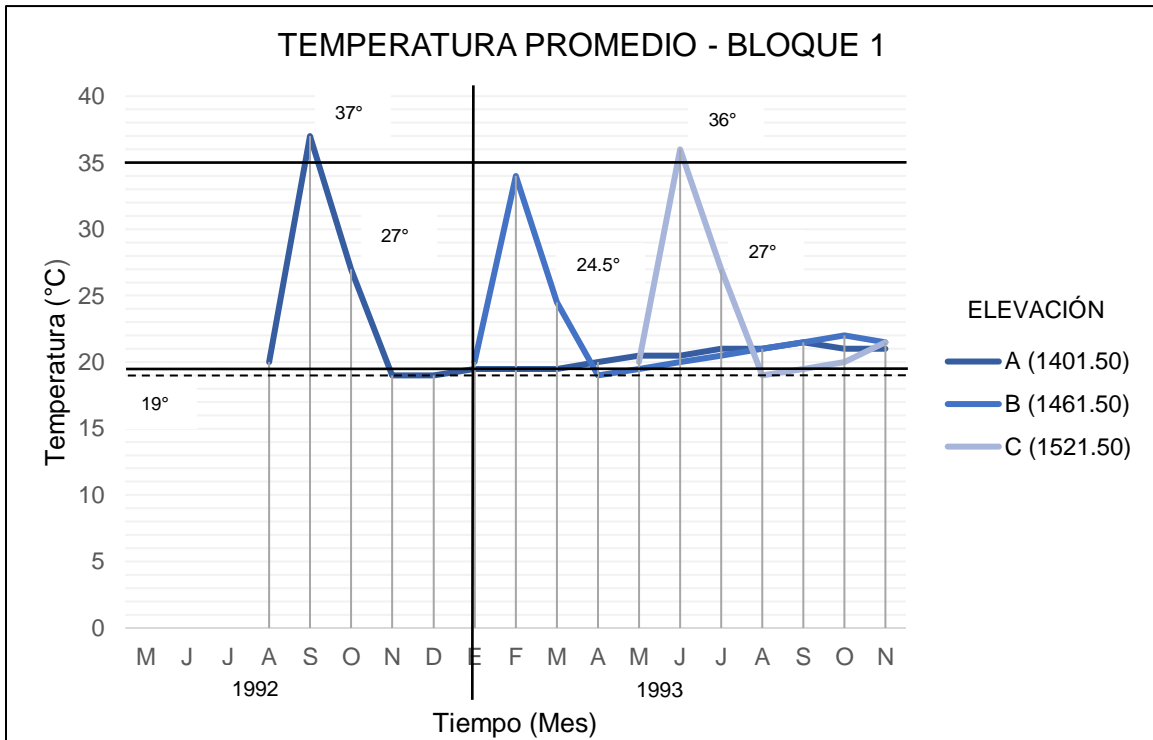


Figura V.4 Grafica de la variación de la temperatura en función del tiempo del Bloque 1.  
Fuente: Recuperado de las simulaciones del software diseñado por los ingenieros Consultores Lombardi S.A. en 1991 (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

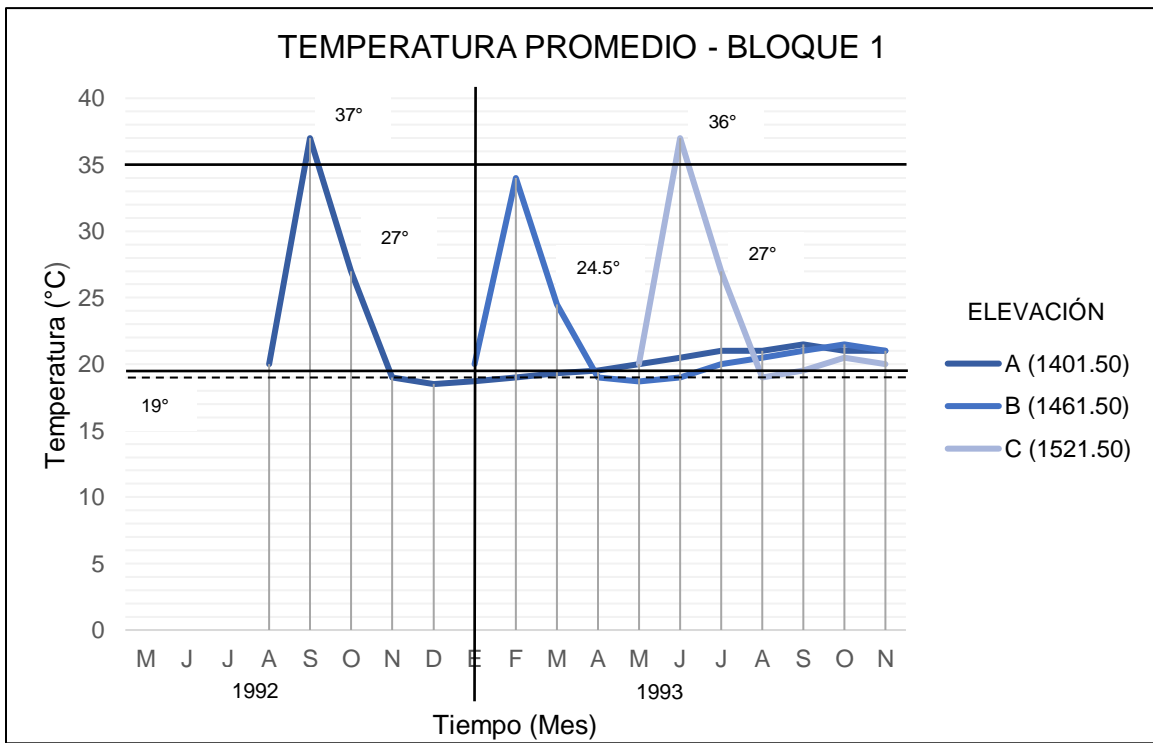


Figura V.5 Grafica de la variación de la temperatura en función del tiempo del Bloque 2.  
Fuente: Recuperado de las simulaciones del software diseñado por los ingenieros Consultores Lombardi S.A. en 1991 (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

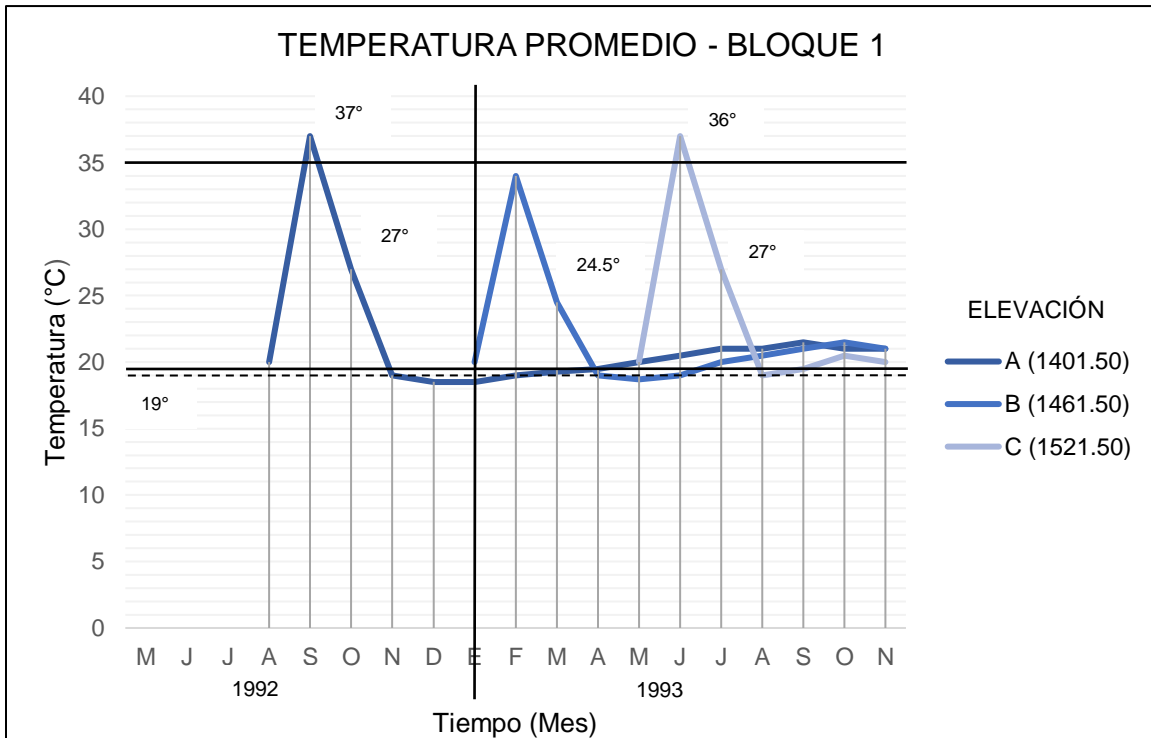


Figura V.6 Grafica de la variación de la temperatura en función del tiempo del Bloque 3.  
Fuente: Recuperado de las simulaciones del software diseñado por los ingenieros Consultores Lombardi S.A. en 1991 (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

Estas graficas nos muestran las curvas de la variación de temperatura promedio de cada bloque colado considerado. Inicialmente la temperatura sube muy rápido alcanzando un pico de 34 - 37°C (según la temporada, presentándose la más baja en temporada invernal) después de 12 días del colado.

De igual forma, se observa que el pico se modifica por la influencia del colado del bloque superior (el aumento es del orden de 1°C aproximadamente). Luego la temperatura baja rápidamente por efecto de la etapa 1 de enfriamiento. A medida que la temperatura baja, la etapa 1 va perdiendo su eficiencia ya que la diferencia de temperatura entre el concreto y el agua de enfriamiento disminuye.

La etapa 1 permite bajar la temperatura unos 10°C en 60 días. La etapa 2, que reemplaza a la etapa 1 del sistema cuando la temperatura oscila entre los 27 – 24 °C, permite bajar la temperatura hasta los 19°C requeridos. La disminución de temperatura que realiza la etapa 2 del sistema es de alrededor 6 - 8°C y tiene una duración de 30 - 35 días.

Tabla V.3 Resumen de la variación de temperatura con ambas etapas de enfriamiento en función del tiempo de los tres bloques centrales.

Cota	Fecha de colado	Temperatura inicial (Aprox. °C)	Etapa 1			Etapa 2		
			Duración (Días)	Temperatura (°C)	$\Delta$ Temp. (°C)	Duración (Días)	Temperatura (°C)	$\Delta$ Temp (°C)
<b>BLOQUE 1</b>								
A	sep-92	37	59	27	10	35	19	8
B	ene-93	34	59	24.5	9.5	30	19	5.5
C	may-93	36	59	27	9	35	19	8
<b>BLOQUE 2</b>								
A	sep-92	37	59	27	10	35	19	8
B	feb-93	34	59	25	9	25	19	6
C	may-93	37	59	27.5	9.5	35	19	8.5
<b>BLOQUE 3</b>								
A	sep-92	36	59	28	8	35	19	9
B	ene-93	27	59	24	3	30	19	5
C	may-93	36	59	26	10	35	19	7

El siguiente gráfico muestra, a modo de ejemplo, la evolución de la temperatura promedio de algunas capas, con los serpentines colocados a cada 3 m.

En ella se observa un rápido aumento de la temperatura en los primeros días después de que se coló el bloque de concreto, seguido de una disminución gradual debido al enfriamiento artificial, con el punto característico de cambio de pendiente correspondiente al inicio de la etapa 2.



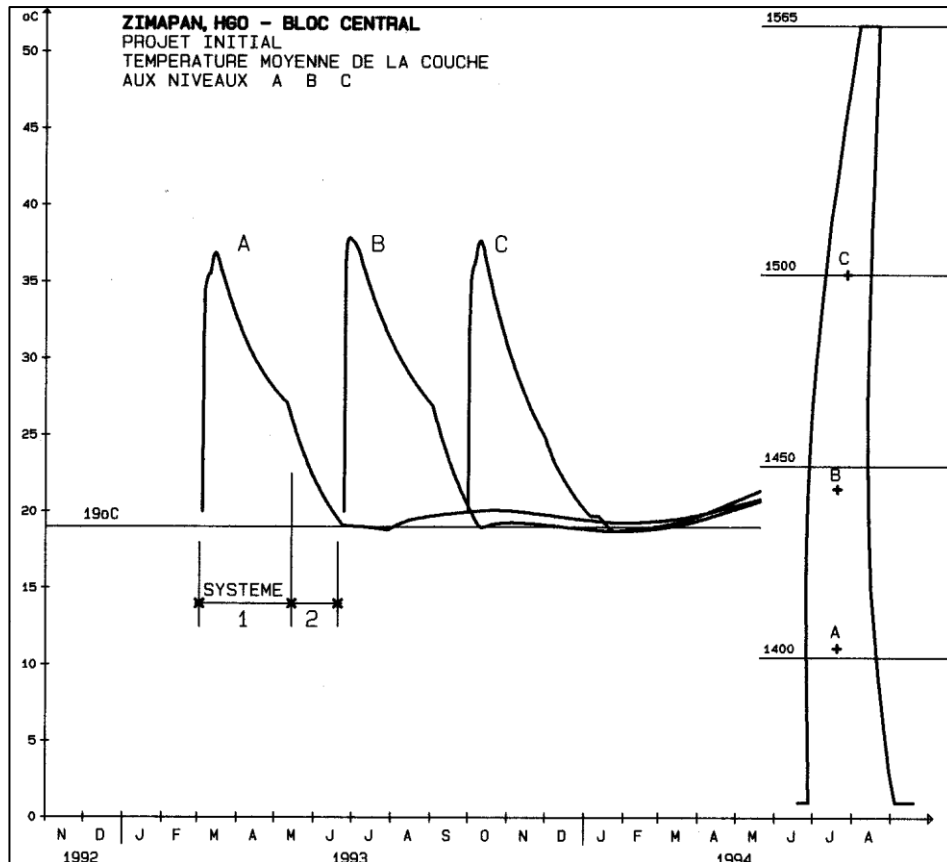


Figura V.7 Grafica de la evolución de la temperatura promedio en algunas capas de bloques colados. Fuente: Recuperado de las simulaciones del software diseñado por los ingenieros Consultores Lombardi S.A. en 1991 (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

Con ayuda de estas mediciones, se puede concluir que el empleo de las dos etapas del sistema enfriamiento disminuye sensiblemente el “shock térmico<sup>2</sup>” dentro de los bloques colados. Al final del tiempo de enfriamiento, la temperatura del bloque colado alcanza los 19°C y, sucesivamente, sigue el ciclo de la temperatura ambiental según la temporada.

### 5.3.2 Seguimiento de la evolución térmica

Como se mencionó anteriormente, el programa de los Ingenieros Consultores Lombardi S.A. estimó la evolución térmica de los bloques desde su colocación. El resultado de estas simulaciones se muestra en las figuras 5.12, 5.13 y 5.14.

<sup>2</sup> Diferencia entre la temperatura del concreto y la temperatura del agua de enfriamiento (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991).

TABLA A1

PROYECTO: ZIMAPÁN, HIDALGO. POST-ENFRIAMIENTO - BLOQUE 2

	ELEVACIÓN ALCANZADA	COTA DE OPERACIÓN DE SERPENTINES	NÚM. DE BLOQUE COLADO	TEMPERATURA INICIAL	CAUDAL		TEMPERATURA		CALOR TRANSFERIDO 1		CALOR TRANSFERIDO 2		TOTAL DE CALOR TRANSFERIDO POR AMBOS SISTEMAS
					ETAPA 1 (l/s)	ETAPA 2 (l/s)	ENTRADA	SALIDA	TOTAL	TOTAL	TOTAL		
					08/08/2000		09/08/2000		10/08/2000				
141	1385	130	1382.13	10	20	0.2	0	22.1	23	0.01	0	0	0.01
141	1385	118	1379.13	9	35.45	0.2	0	22.1	23.1	0.02	0	0	0.13
141	1385	106	1376.13	8	37.15	0.2	0	22.1	23	0.02	0	0	0.24
141	1385	94	1373.13	7	35.61	0.2	0	22.1	22.8	0.01	0	0	0.34
141	1385	82	1370.13	6	34.24	0.2	0	22.1	22.7	0.01	0	0	0.38
141	1385	70	1367.13	5	33.03	0.2	0	22.1	22.6	0.01	0	0	0.44
141	1385	58	1364.13	4	31.98	0.2	0	22.1	22.6	0.01	0	0	0.51
141	1385	46	1361.13	3	30.85	0.2	0	22.1	22.5	0.01	0	0	0.53
141	1385	34	1358.13	2	28.61	0.2	0	22.1	22.4	0.01	0	0	0.44
141	1385	130	1382.13	10	30.25	0.2	0	22.1	23.3	0.02	0	0	0.03
141	1385	118	1379.13	9	35.64	0.2	0	22.1	23.2	0.02	0	0	0.15
141	1385	106	1376.13	8	36.82	0.2	0	22.1	23	0.02	0	0	0.26
141	1385	94	1373.13	7	35.37	0.2	0	22.1	22.9	0.02	0	0	0.36
141	1385	82	1370.13	6	34.01	0.2	0	22.1	22.7	0.01	0	0	0.39
141	1385	70	1367.13	5	32.83	0.2	0	22.1	22.6	0.01	0	0	0.45
141	1385	58	1364.13	4	31.8	0.2	0	22.1	22.6	0.01	0	0	0.52
141	1385	46	1361.13	3	30.69	0.2	0	22.1	22.5	0.01	0	0	0.54
141	1385	34	1358.13	2	28.49	0.2	0	22.1	22.4	0.01	0	0	0.45
141	1385	130	1382.13	10	33.27	0.2	0	22.1	23.2	0.02	0	0	0.05
141	1385	118	1379.13	9	36.03	0.2	0	22.1	23	0.02	0	0	0.17
141	1385	106	1376.13	8	36.53	0.2	0	22.1	22.9	0.02	0	0	0.27
141	1385	94	1373.13	7	35.13	0.2	0	22.1	22.7	0.01	0	0	0.37
141	1385	82	1370.13	6	33.79	0.2	0	22.1	22.7	0.01	0	0	0.4
141	1385	70	1367.13	5	32.63	0.2	0	22.1	22.6	0.01	0	0	0.46
141	1385	58	1364.13	4	31.63	0.2	0	22.1	22.6	0.01	0	0	0.53
141	1385	46	1361.13	3	30.54	0.2	0	22.1	22.5	0.01	0	0	0.55
141	1385	34	1358.13	2	28.37	0.2	0	22.1	22.4	0.01	0	0	0.45

Figura V.8 Resultados de la simulación de la evolución térmica de la cortina del P.H. Zimapán en el mes de Agosto

Fuente: Recuperado de las simulaciones del software diseñado por los ingenieros Consultores Lombardi S.A. en 1991 (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

TABLA A2

PROYECTO: ZIMAPAN, HIDALGO. POST-ENFRIAMIENTO - BLOQUE 2

ELEVACIÓN ALCANZADA	CÓTA DE OPERACIÓN DE SERPENTINES	NUM. DE BLOQUE COLADO	TEMPERATURA INICIAL	CAUDAL		TEMPERATURA		CALOR TRANSFERIDO 1		CALOR TRANSFERIDO 2		TOTAL DE CALOR TRANSFERIDO	
				ETAPA 1 (l/s)	ETAPA 2 (l/s)	ENTRADA	SALIDA	TOTAL	TOTAL	TOTAL			
06/10/2000													
249	1412	238	1409.13	19	34.76	0.2	0	20.8	22.1	0.02	0.12	0	0.12
249	1412	226	1406.13	18	36.13	0.2	0	20.8	22	0.02	0.25	0	0.25
249	1412	214	1403.13	17	34.88	0.2	0	20.8	21.8	0.02	0.36	0	0.36
249	1412	202	1400.13	16	33.37	0.2	0	20.8	21.5	0.01	0.41	0	0.41
249	1412	190	1397.13	15	32.06	0.2	0	20.8	21.4	0.01	0.47	0	0.47
249	1412	178	1394.13	14	30.89	0.2	0	20.8	21.3	0.01	0.53	0	0.53
249	1412	166	1391.13	13	30.09	0.2	0	20.8	21.3	0.01	0.58	0	0.58
249	1412	154	1388.13	12	29.28	0.2	0	20.8	21.3	0.01	0.65	0	0.65
249	1412	142	1385.13	11	28.48	0.2	0	20.8	21.2	0.01	0.63	0	0.63
249	1412	130	1382.13	10	27.79	0.2	0	20.8	21.2	0.02	0.71	0	0.71
249	1412	118	1379.13	9	26.5	0.2	0	6	7.8	0	0.68	0.03	0.21
249	1412	106	1376.13	8	24.97	0.2	0	6	7.7	0	0.7	0.03	0.41
249	1412	94	1373.13	7	23.47	0.2	0	6	7.6	0	0.72	0.03	0.59
249	1412	82	1370.13	6	22.03	0.2	0	6	7.7	0	0.67	0.03	0.78
249	1412	70	1367.13	5	20.74	0.2	0	6	7.6	0	0.67	0.03	0.95
249	1412	58	1364.13	4	19.64	0.2	0	6	7.5	0	0.69	0.03	1.11
07/10/2000													
261	1415	238	1409.13	19	34.77	0.2	0	20.8	21.9	0.02	0.14	0	0.14
261	1415	226	1406.13	18	36.32	0.2	0	20.8	21.7	0.02	0.27	0	0.27
261	1415	214	1403.13	17	34.63	0.2	0	20.8	21.5	0.01	0.37	0	0.37
261	1415	202	1400.13	16	33.12	0.2	0	20.8	21.4	0.01	0.42	0	0.42
261	1415	190	1397.13	15	31.84	0.2	0	20.8	21.3	0.01	0.48	0	0.48
261	1415	178	1394.13	14	30.8	0.2	0	20.8	21.3	0.01	0.54	0	0.54
261	1415	166	1391.13	13	29.92	0.2	0	20.8	21.3	0.01	0.59	0	0.59
261	1415	154	1388.13	12	29.12	0.2	0	20.8	21.2	0.01	0.65	0	0.65
261	1415	142	1385.13	11	28.34	0.2	0	20.8	21.2	0.01	0.64	0	0.64
261	1415	130	1382.13	10	27.66	0.2	0	6	8.1	0	0.71	0.04	0.04
261	1415	118	1379.13	9	26.27	0.2	0	6	7.8	0	0.68	0.03	0.25
261	1415	106	1376.13	8	24.68	0.2	0	6	7.7	0	0.7	0.03	0.44
261	1415	94	1373.13	7	23.22	0.2	0	6	7.7	0	0.72	0.03	0.62
261	1415	82	1370.13	6	21.8	0.2	0	6	7.6	0	0.67	0.03	0.81
261	1415	70	1367.13	5	20.54	0.2	0	6	7.6	0	0.67	0.03	1.05
261	1415	58	1364.13	4	19.45	0.2	0	6	7.5	0	0.69	0.03	1.14

Figura V.9 Resultados de la simulación de la evolución térmica de la cortina del P.H. Zimapán en el mes de Octubre

Fuente: Recuperado de las simulaciones del software diseñado por los ingenieros Consultores Lombardi S.A. en 1991 (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

TABLA A3

PROYECTO: ZIMAPÁN, HIDALGO. POST-ENFRIAMIENTO - BLOQUE 2

	ELEVACIÓN ALCANZADA	COTA DE OPERACIÓN DE SERPENTINES	NUM. DE BLOQUE COLADO	TEMPERATURA INICIAL	CAUDAL ETAPA 1 ETAPA 2 (l/s)		TEMPERATURA		CALOR TRANSFERIDO 1		CALOR TRANSFERIDO 2		TOTAL DE CALOR TRANSFERIDO
					10/11/2000	11/11/2000	ENTRADA	SALIDA	TOTAL	TOTAL	TOTAL		
321	1430	310	1427.13	33.94	0.2	0	19.7	20.9	0.02	0	0	0	0.11
321	1430	288	1424.13	35.17	0.2	0	19.7	20.7	0.02	0	0	0	0.24
321	1430	286	1421.13	34.3	0.2	0	19.7	20.5	0.02	0	0	0	0.34
321	1430	274	1418.13	32.78	0.2	0	19.7	20.3	0.01	0	0	0	0.42
321	1430	262	1415.13	31.45	0.2	0	19.7	20.2	0.01	0	0	0	0.48
321	1430	250	1412.13	30.29	0.2	0	19.7	20.1	0.01	0	0	0	0.55
321	1430	238	1409.13	29.32	0.2	0	19.7	20.1	0.01	0	0	0	0.6
321	1430	226	1406.13	28.42	0.2	0	19.7	20	0.01	0	0	0	0.67
321	1430	214	1403.13	27.62	0.2	0	19.7	20	0.01	0	0	0	0.74
321	1430	202	1400.13	26.84	0.2	0	19.7	20	0.01	0	0	0	0.73
321	1430	190	1397.13	25.63	0	0.2	6	7.8	0	0.03	0	0	0.9
321	1430	178	1394.13	24.19	0	0.2	6	7.7	0	0.03	0.36	0	1.09
321	1430	166	1391.13	22.75	0	0.2	6	7.6	0	0.03	0.55	0	1.28
321	1430	154	1388.13	21.48	0	0.2	6	7.5	0	0.03	0.73	0	1.47
321	1430	142	1385.13	20.21	0	0.2	6	7.5	0	0.03	0.9	0	1.57
321	1430	130	1382.13	19.06	0	0.2	6	7.4	0	0.03	1.07	0	1.78
11/11/2000													
321	1430	310	1427.13	34.03	0.2	0	19.6	21.2	0.03	0	0	0	0.14
321	1430	288	1424.13	35.35	0.2	0	19.6	20.7	0.02	0	0	0	0.26
321	1430	286	1421.13	34.01	0.2	0	19.6	20.4	0.02	0	0	0	0.36
321	1430	274	1418.13	32.5	0.2	0	19.6	20.3	0.01	0	0	0	0.43
321	1430	262	1415.13	31.2	0.2	0	19.6	20.2	0.01	0.49	0	0	0.49
321	1430	250	1412.13	30.08	0.2	0	19.6	20.1	0.01	0.56	0	0	0.56
321	1430	238	1409.13	29.13	0.2	0	19.6	20.1	0.01	0.6	0	0	0.6
321	1430	226	1406.13	28.25	0.2	0	19.6	20.1	0.01	0.67	0	0	0.67
321	1430	214	1403.13	27.47	0.2	0	19.6	20.1	0.01	0.75	0	0	0.75
321	1430	202	1400.13	26.7	0.2	0	19.6	20	0.01	0.83	0	0	0.83
321	1430	190	1397.13	25.38	0	0.2	6	7.7	0	0.03	0.21	0	0.94
321	1430	178	1394.13	23.89	0	0.2	6	7.6	0	0.03	0.39	0	1.12
321	1430	166	1391.13	22.49	0	0.2	6	7.6	0	0.03	0.58	0	1.31
321	1430	154	1388.13	21.24	0	0.2	6	7.5	0	0.03	0.75	0	1.49
321	1430	142	1385.13	20	0	0.2	6	7.5	0	0.03	0.93	0	1.6

Figura V.10 Resultados de la simulación de la evolución térmica de la cortina del P.H. Zimapán en el mes de Noviembre

Fuente: Recuperado de las simulaciones del software diseñado por los ingenieros Consultores Lombardi S.A. en 1991 (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

La interpretación de estas simulaciones, detallada a continuación se enfoca en la evolución térmica del bloque No. 10.

Tabla V.4 *Resumen de la evolución térmica del bloque No. 10 en el bloque central No.2 de la cortina.*

<b>Fecha</b>	<b>Temperatura inicial (°C)</b>	<b>Sistema de enfriamiento</b>
<b>8 Agosto 1992</b>	20.00	Etapa 1
<b>9 Agosto 1992</b>	30.25	
<b>10 Agosto 1992</b>	33.27	
<b>6 Octubre 1992</b>	27.79	Etapa 2
<b>7 Octubre 1992</b>	27.66	
<b>10 Noviembre de 1992</b>	19.06	

El día 220 correspondiente a la fecha 8 de agosto, se ha colado el bloque No. 10 con crecimiento hasta la cota 1385 y con serpentín a la cota 1382.13. La temperatura de colado es de 20°C. Inicia en seguida el enfriamiento con la etapa 1, con caudal 0.2 l/s, temperatura de entrada 22.1 °C y temperatura de salida 23°C.

En ese día se puede ver el comportamiento de los bloques colados que se encuentran por debajo de la No. 10, observando que el bloque No. 8 es aquella que tiene la temperatura más elevada 37.15 °C, a la que corresponde una temperatura de salida del serpentín de 23.1 °C comprobando la funcionalidad del enfriamiento.

En el día siguiente 221, se aprecia cómo se eleva la temperatura del bloque No. 10, por efecto del desarrollo del calor de hidratación, llegando a 30.25°C; mientras que el bloque No.8 ya pasó el pico de temperatura máxima y comienza a bajar.

El bloque colado No.2 (correspondiente a la primera sobre la roca) alcanzó ya la temperatura de 28.49°C con solo la etapa 1 en explotación.

La figura 5.9 nos traslada al día 279, correspondiente al 6 de octubre. El bloque colado No.10 tiene una temperatura de 27.79°C y hasta esa elevación se tiene en explotación la etapa 1, con agua de enfriamiento a la entrada a 20.80°C y a la salida de 21.2 °C ( $\Delta T = 0.6^\circ\text{C}$ ).

Los bloques colados que se encuentran por debajo de la No.10 están ya conectadas con la etapa 2 de enfriamiento; el agua entra a 6°C en los serpentines y sale a 7.6 °C ( $\Delta T = 1.6^\circ\text{C}$ ).

El día siguiente 280, correspondiente al sexagésimo día después del colado del bloque No.10, se pasa la etapa 2 de enfriamiento. Con ello, ya se puede constatar que en los primeros dos bloques colados (No. 2 y 3) la etapa 2 está fuera de explotación, habiendo ya alcanzado los 19°C temperatura el cual es el límite del enfriamiento y por lo tanto no figuran más en la tabla.

En la figura 5.10 se presenta la simulación de los días 314 (10 de noviembre) y 315. Aquí el bloque ya alcanzó la elevación 1430, habiéndose colado el bloque No. 25.

El bloque colado No.10 se está aún enfriando con la etapa 2 y ya alcanzó la temperatura de 19.06°C al día 314. Al día siguiente 315, se suspendió el enfriamiento y no figura más en el cuadro.

En resumen, el bloque No. 10 obtuvo un total de:

- Etapa 1= 0.71 G. cal, en 59 días. Con una temperatura 27.79°C
- Etapa 2 = 1.07 G. cal, en 35 días. Con una temperatura 19.06°C
- Total= 1.88 G. cal, en 94 días.

Concluyendo que se requiere 94 días para que cada bloque alcance los 19°C requeridos, con la colocación de los serpentines a cada 3m.

<i>Etapa 1</i>	59 días
<i>Etapa 2</i>	35 días
<b>Tiempo Total de enfriamiento</b>	<b>94 Días</b>

### 5.3.3 Resultados de los caudales de agua de enfriamiento para los dos sistemas y de calor transferido.

Con base en los resultados del software de los consultores, se determina que el flujo máximo requerido para el bloque central es de 3.7 L/s y 2 L/s para las etapas 1 y 2, respectivamente. En la figura 5.11 se muestra el caudal de agua de refrigeración requerido en función del tiempo, en la que se observa claramente el cambio de un circuito a otro.

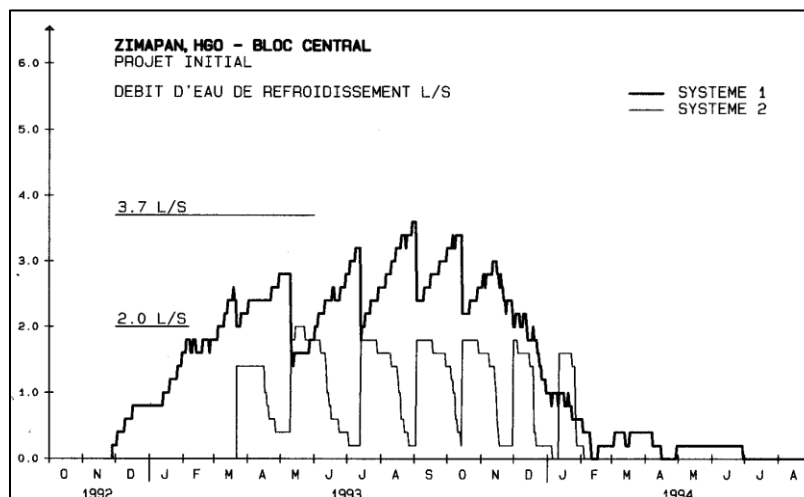


Figura V.11 Grafica del caudal de agua de refrigeración requerido en función del tiempo.  
Fuente: Recuperado de las simulaciones del software diseñado por los ingenieros Consultores Lombardi S.A. en 1991 (Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991)

De igual forma, la simulación definió que en la etapa 2 con agua a 6°C elimina, para el bloque central, un pico máximo diario de 1.6 G.cal. En la siguiente figura, se representa la cantidad diaria de calor eliminada por las dos etapas del enfriamiento.

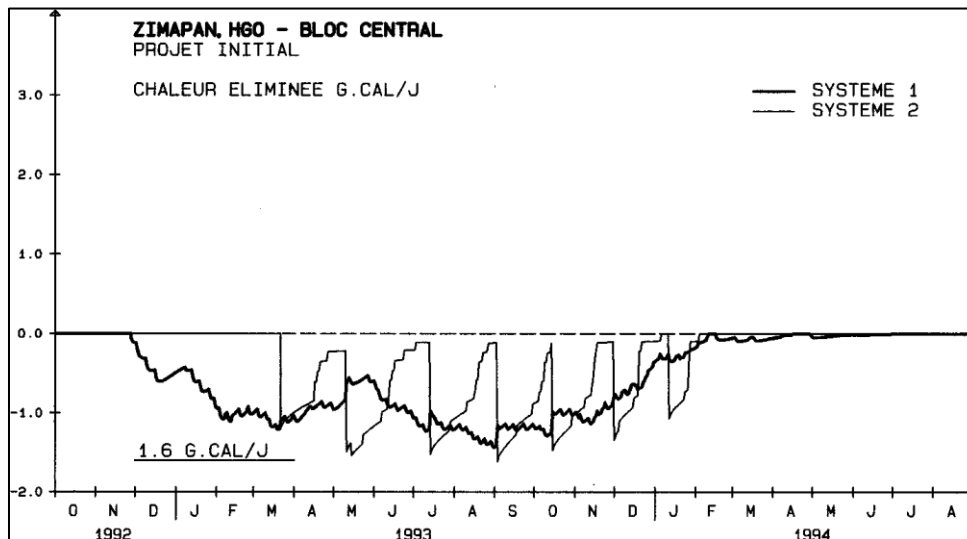


Figura V.12 Grafica de la cantidad diaria de calor eliminada por el enfriamiento.

Fuente: Recuperado de las simulaciones del software diseñado por los ingenieros Consultores Lombardi S.A. en 1991 (*Ingenieros Consultores Lombardi S.A., 1991*)

Concluyendo, que solo el 35% del agua utilizada tuvo que ser enfriada a 6°C y, en promedio, el agua era calentada alrededor de 7.2°C.

#### 5.4 EVALUACIÓN CUALITATIVA

Con base en la evaluación bibliográfica de la presente investigación, se llega a las siguientes propuestas de mejora para la programación de construcción de la cortina:

- Reducción a 19 días el tiempo de enfriamiento de la etapa 1, en ciertos bloques centrales, antes de pasar a la etapa 2.
- Colocación de serpentines a media altura de la alzada de los bloques, es decir a cada 1.50m, para intensificar el sistema de enfriamiento. De igual forma reducir progresivamente la temperatura del agua en los serpentines de 20° a 6°.

La presente evaluación cualitativa se realizó de acuerdo a las características del proyecto, a los casos aplicados con éxito a nivel internacional y a la información bibliográfica existente. Se presenta un panorama de las ventajas e inconvenientes que podrían tener cada una de ellas.

- **Alternativa 1.** Reducción a 19 días el tiempo de enfriamiento de la etapa 1, en ciertos bloques centrales, antes de pasar a la etapa 2.

### ***Ventajas***

- Reducción de días en la programación de obra.
- De acuerdo a estudios teóricos, el uso normal del sistema de enfriamiento de tuberías integrado consiste en un período de enfriamiento inicial de 10 a 15 días. Ya que, las temperaturas del concreto se reducen desde la temperatura máxima del concreto hasta tal temperatura que el calor continuo de la hidratación del cemento no producirá temperaturas máximas más altas que obtenido previamente.
- Entra en funcionamiento la etapa 2 antes de tiempo, por lo que se obtendría en menos tiempo los 19°C esperados.

### ***Desventajas***

- Se sigue presentando la interferencia en el programa, entre el llenado del embalse y los campos de juntas de construcción.
- De acuerdo a casos prácticos realizados en concretos masivos, al tener una temperatura todavía alta, se presentaría choque térmico en el concreto en el momento de paso a la etapa 2, presentando grietas o fallas en la estructura debido al cambio brusco de temperatura (Mondada, 1995).
- El aumento de temperatura no solo depende del sistema de enfriamiento, también se controla mediante la selección del tipo y la cantidad de cemento utilizado en el concreto, la estación del año y la temperatura del aire.

Se descarta como solución esta propuesta de reducir los días de la Etapa 1 del sistema de enfriamiento, debido a que cálculos realizados previamente por el programa desarrollado por Consultores Lombardi S.A. para el P.H. Zimapán los cuales proponían acortar a la mitad el tiempo de enfriamiento de la Etapa 1, de 59 días a 30 días, mostraron un choque térmico demasiado alto para el concreto en el momento del paso a la etapa 2. Por lo que se considera que nuestra alternativa de acortar a 19 días implicaría la misma falla en el concreto provocando un choque térmico más alto y, por ende, la falla de la estructura.

- **Alternativa 2.** Colocación de serpentines a 1.50 m, es decir a media altura de la alzada de los bloques, para intensificar el sistema de enfriamiento. De igual forma reducir progresivamente la temperatura del agua en los serpentines de 20° a 6°.

### ***Ventajas***

- Reducción de días en la programación de obra. Tomando en cuenta que uno de los puntos más importantes para el funcionamiento efectivo del

### ***Desventajas***

- Costos iniciales más altos, por aumento de materiales y mano de obra.



sistema de post-enfriamiento, obteniendo la temperatura esperada en menos tiempo, es la separación de las tuberías (Myers, Fowkes, & Ballim)

- Reducir progresivamente la temperatura y modificar la temperatura del agua, evita las grietas en el concreto y choque térmico en el concreto (Townsend, 1981).
  - Con pruebas de campo y programas a detalles de los mezcladores de agua es posible ajustar la temperatura del agua, para mantener un gradiente constante entre el concreto y el agua de entrada.
  - En bloques grandes es más probable la presencia de grietas, ya que están sujetos a un mayor número de concentraciones de tensión debido a las irregularidades físicas y la composición variable de la base. Por lo que reducir a media altura evitaría esta probabilidad.
  - La colocación de serpentines en dos niveles a una separación de 1.5m aseguran un enfriamiento uniforme de toda la estructura, de acuerdo a artículos técnicos de sistemas de post-enfriamientos (Maron Valarezo, 2014).
  - Disipación rápida del calor de hidratación.
  - Casos prácticos con éxito en la colocación de serpentines a cada 5 o 7 ½ pies (1.5 m).
- Monitoreo constante de la circulación de agua fría y control de la temperatura del agua, para mantener un gradiente térmico constante.
  - Las grietas pueden ocurrir debido a los retrasos en el programa de construcción y las operaciones de construcción, no únicamente por el control de la temperatura.

Por otro lado, reducir progresivamente la temperatura del agua en los serpentines de 20° a 6°C se considera viable, ya que, a experiencias y a resultados de estudios, el enfriamiento del concreto durante 3 a 4 semanas a una tasa de caída de temperatura de aproximadamente 1°C por día puede crear tensiones que son iguales o superiores a la resistencia a la tracción del concreto, evitando que el enfriamiento artificial cause grietas. Generalmente, los sistemas de enfriamiento funcionan de tal manera que la caída de temperatura es de más de 1°C por día.

Los efectos de los cambios durante el período de construcción de: el tipo o cantidad de cemento utilizado en el concreto, los métodos de curado empleados, variación de las temperaturas de exposición a las asumidas, o cualquier otro factor que influya en las temperaturas del concreto; normalmente se resuelven variando los períodos de flujo y la tasa de flujo del agua de enfriamiento. Si estos cambios se convierten en cambios importantes y varían mucho de los asumidos, los efectos de la temperatura pueden resolverse variando el espaciado horizontal de la tubería y/ o la longitud de la bobina de enfriamiento en aquellas partes de la presa que se está construyendo.

Es importante hacer mención, que al tener menos volumen de concreto que enfriar, este alcanzaría la temperatura deseada en menos tiempo. Ya que es bien sabido, que el aumento de la temperatura puede controlarse mediante la colocación del sistema de enfriamiento a poca distancia o mediante el uso de una mezcla de concreto diseñada para limitar el calor de hidratación.

## 5.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para el desarrollo de un proyecto hidroeléctrico es importante la realización de varios estudios para llevarlo a cabo. En la etapa de planeación, se encuentra el estudio de factibilidad, es donde su objetivo, como su nombre lo dice, es establecer la factibilidad económica, técnica, social y ambiental del proyecto, definiendo las obras del aprovechamiento.

En la siguiente sección, determinaremos los costos y beneficios del P.H. Zimapán. Para determinarlos, tomamos en cuenta únicamente los costos de construcción de la presa, de operación y mantenimiento en operación de la misma. Usamos información disponible públicamente, así como un razonamiento e intuición económica integral para determinar las aportaciones de nuestro modelo.

Los dos escenarios a evaluar son:

- Inversión 1, Instalación de los serpentines del sistema de enfriamiento a cada 3m.
- Inversión 2, Instalación de los serpentines del sistema de enfriamiento a cada 1.50m (Proyecto Modificado).

### 5.5.1 Metodología

Para fines de este estudio, se realizó una estimación de la programación constructiva de la cortina para determinar la duración del proyecto de ambos escenarios y, con ello la obtención de los costos y beneficios mensuales y anuales.

De acuerdo a la evaluación de los resultados realizados en el capítulo anterior, se determinó que los días de funcionamiento de la Etapa 2 del sistema de enfriamiento es de 35 días para un bloque de 3m, por lo que, al colocar serpentines a la mitad del bloque, implicaría enfriar la mitad de volumen del concreto. Intuyendo de esta manera que el tiempo necesario para el enfriamiento, se reduciría aproximadamente 10 días, trayendo consigo una disminución en el tiempo de espera para la inyección de la junta de construcción de la cortina.

Tabla V.5 *Duración de construcción de la cortina de ambos escenarios a evaluar.*

<i>Inversión 1</i>	757 días
<i>Inversión 2</i>	729 días

Con el fin de mostrar los dos escenarios en condiciones iguales, el tiempo de ejecución y costos de los otros conceptos involucrados en la obra civil, no se les realiza ninguna modificación. De igual forma, el tiempo de colado de la construcción de la cortina no se modificó, ya que, como se mencionó anteriormente, el colado de los bloques se realiza independiente del tiempo de explotación del serpentín del mismo bloque. Este únicamente limitaba el proceso de la inyección de la cortina y con ello el programa del llenado del embalse.

En la tabla 6.3 se encuentra graficado la estimación de la programación y de los egresos anuales de las obras civiles principales del P.H. Zimapán. La primera tabla muestra la situación real del proyecto (Inversión 1), donde se puede observar que la última inyección de la junta de construcción se realizó el 07 de septiembre de 1994, cuatro meses después de que se terminará de colar el último bloque de la cortina. En cambio, en la segunda tabla, se muestra la programación con la propuesta alcanzada (Inversión 2), donde se observa que la última junta de construcción se realiza el 29 julio de 1994, casi tres meses después de que se terminará de colar el último bloque de la cortina.

La intensificación del sistema de enfriamiento, trajo consigo mejor calidad en el concreto, reducción en el tiempo de funcionamiento del sistema de enfriamiento, obteniendo 30 días menos en la construcción de la cortina, lo que implica una reducción del 3% en tiempo y con ello un funcionamiento anticipado de la central para generación de energía comercial.

Los costos financieros considerados, son los derivados directamente de la construcción y operación de la presa a lo largo de nuestro horizonte de tiempo. Básicamente, hay dos grupos principales de costos de inversión en proyectos de energía hidroeléctrica:

- Los costos de construcción civil, que normalmente son los mayores costos del proyecto de energía hidroeléctrica
- El costo de los equipos electromecánicos para la transformación de la energía.

Además, los costos de inversión incluyen los costos de planificación, análisis de impacto ambiental, concesión de licencias, la mitigación de la pesca y vida silvestre, la mitigación

de recreación, mitigación histórica y arqueológica, y monitoreo de la calidad del agua. Estos costos no los consideraremos en la presente evaluación.

El presupuesto total del P.H. Zimapán involucra los siguientes rubros:

Tabla V.6 *Presupuesto total del P.H. Zimapán (Grandes Rubros).*

<b>CONCEPTO</b>	<b>COSTOS (Miles de pesos 1994)</b>
1. Ingeniería, administración y supervisión	\$ 295,137.30
2. Obras civiles principales	\$ 1,561,486.03
3. Obra electromecánica	\$ 394,744.14
4. Líneas de transmisión	\$ 8,089.31
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 2,259,456.78</b>

Para el presente estudio, se modificó el costo del concepto No. 2, referente a “Obras civiles principales”, ya que el aumento de costo por la modificación de la cantidad de tuberías para serpentines, se presenta en este rubro. Los otros se consideraron iguales.



### 5.5.2 Costos de construcción

Tomando como referencia bibliográfica el artículo de la Sociedad Americana de los Ingenieros Civiles (Rapid Construction of Concrete Dams [Construcción rápida de presas de concreto]., 1970), el cual muestra un desglose del costo por yarda cúbica del concreto masivo de una presa de 2.5 millones de yardas expresado en porcentaje del costo directo y, los precios unitarios de la Susitna Hydroelectric elaborado por (Acres American Incorporated, 1982) donde se utilizó un sistema de enfriamiento similar al utilizado en P.H. Zimapán, se estimó el precio unitario por m<sup>3</sup> de la colocación de la cortina. Dado que el análisis de costos es muy amplio, únicamente se mostrará el criterio general de los costos directos.

Los costos de construcción de cualquier artículo en particular consisten en dos porciones: costos directos y costos indirectos. Los costos directos consisten en los costos de equipos, materiales y mano de obra que se pueden identificar específicamente con el rendimiento y los logros de un artículo o grupo de artículos de trabajo en particular. Los costos indirectos son aquellos que deben ser incurridos por el contratista (y el propietario) durante la ejecución del trabajo, y que no pueden identificarse con ningún artículo o grupo de artículos en particular. Por tal motivo, solo nos enfocaremos en los costos directos.

Para realizar la presente investigación, los precios unitarios de todos los conceptos se consideraron iguales en ambos escenarios. Únicamente se modificó en el concepto de "Post-enfriamiento", proponiendo ocupar el doble de lo que se utilizó en la realización del proyecto original.

Para la "Inversión No.1" el análisis de precio, es el siguiente:

DESCRIPCIÓN	P.U.	UNIDAD
Materiales (Agregado grueso y fino)	\$ 745.49	m <sup>3</sup>
Planta de concreto y agregados	\$ 826.94	m <sup>3</sup>
Planta de pre-enfriamiento y operación	\$ 103.14	m <sup>3</sup>
Planta de fabricación de concreto	\$ 411.58	m <sup>3</sup>
Post-enfriamiento del concreto	\$ 195.74	m <sup>3</sup>
Colocación de cimbras	\$ 699.19	m <sup>3</sup>
Colocación y vibrado del concreto	\$ 333.79	m <sup>3</sup>
Tratamiento del concreto	\$ 83.06	m <sup>3</sup>
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 3,398.93</b>	<b>m<sup>3</sup></b>

Dando como resultado un costo por m<sup>3</sup> en pesos y dólares de:

<b>COSTO/M<sup>3</sup></b>	\$ 3,398.93	MXN
	\$ 638.90	USD <sup>3</sup>

<sup>3</sup> Valor de cambio de 1994: 1 Dólar = \$5.32 Pesos

Para la "Inversión No.2" es:

DESCRIPCIÓN	P.U.	UNIDAD
Materiales (Agregado grueso y fino)	\$ 745.49	m <sup>3</sup>
Planta de concreto y agregados	\$ 826.94	m <sup>3</sup>
Planta de pre-enfriamiento y operación	\$ 103.14	m <sup>3</sup>
Planta de fabricación de concreto	\$ 411.58	m <sup>3</sup>
Post-enfriamiento del concreto	\$ 391.48	m <sup>3</sup>
Colocación de cimbras	\$ 699.19	m <sup>3</sup>
Colocación y vibrado del concreto	\$ 333.79	m <sup>3</sup>
Tratamiento del concreto	\$ 83.06	m <sup>3</sup>
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 3,594.67</b>	<b>m<sup>3</sup></b>

Dando como resultado un costo por m<sup>3</sup> en pesos y USD:

<b>COSTO/M<sup>3</sup></b>	\$ 3,594.67	MXN
	\$ 675.69	USD

El concepto de post-enfriamiento, de ambas inversiones, incluye:

- Movilización y desmantelamiento
- Suministro e instalación de tuberías de enfriamiento
- Suministro e instalación de la planta de refrigeración
- Operación de la planta
- Sellado de las tuberías al término del proceso de enfriamiento

Como dato existente de la cortina, fue que se utilizó 220,000 m<sup>3</sup> de concreto para el colado de la misma, con esta cantidad, determinamos el costo de la cortina y con ello el presupuesto de la inversión inicial de ambos escenarios a evaluar.

El presupuesto de grandes rubros de las obras civiles principales para la "Inversión No.1" es:

DESCRIPCIÓN	IMPORTE (MXN)	%
Obra de desvío	\$ 73,818,710.05	4.73
Obra de control y de excedencias	\$ 169,124,900.79	10.83
<b>Cortina</b>	<b>\$ 747,765,191.39</b>	<b>47.89</b>
Obra de generación	\$ 516,108,657.68	33.05
Caminos y puentes	\$ 39,272,157.93	2.52
Obras auxiliares de electrificación	\$ 9,492,641.60	0.61
Campamentos	\$ 5,903,770.56	0.38
<b>TOTAL OBRA CIVIL</b>	<b>\$ 1,561,486,030.00</b>	<b>100</b>

El presupuesto para la “Inversión No.2” es:

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>IMPORTE (MXN)</b>	<b>%</b>
Obra de desvío	\$ 73,818,710.05	4.63
Obra de control y de excedencias	\$ 169,124,900.79	10.61
<b>Cortina</b>	<b>\$ 790,828,401.70</b>	<b>49.60</b>
Obra de generación	\$ 516,108,657.68	32.37
Caminos y puentes	\$ 39,272,157.93	1.82
Obras auxiliares de electrificación	\$ 9,492,641.60	0.60
Campamentos	\$ 5,903,770.56	0.37
<b>TOTAL OBRA CIVIL</b>	<b>\$ 1,594,354,800.43</b>	<b>100</b>

Con base en estos dos presupuestos, se puede observar el impacto que tiene la instalación adicional de los serpentines, lo cual repercute en un aumento de \$32,868,770.43 pesos, alrededor del 2%, en el costo total de la obra civil.

La inversión inicial a considerar toma en cuenta, además del costo total de la obra civil, la inversión presupuestaria de Ingeniería, administración y supervisión, obra electromecánica y líneas de transmisión.

### 5.5.3 Costos fijos de operación y mantenimiento

En términos de costos, las centrales hidroeléctricas se encuentran entre las primeras cinco tecnologías con los costos fijos de operación y mantenimiento más bajos, y presentan un costo variable de operación cercano a cero.

En cuanto a los costos fijos de operación, el COPAR-95 (CFE, 1995) señala que el costo fijo del área de operación es independiente de la capacidad de la unidad, y en julio de 1996 por año se estimaba en:

\$ 1,220,285.00.

El mismo documento señala que los costos fijos de mantenimiento (Cfm) se pueden calcular de la siguiente manera:

$$C_{fm} = 179,240 K^{0.5877} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

K= Capacidad de la unidad en MW

Obteniendo de esta manera un resultado de los costos fijos operación y mantenimiento, utilizados en este estudio.

<b>Costos fijos de O&amp;M (\$/Anual)</b>	<b>\$ 5,710,685.55</b>
---	------------------------



Finalmente, los montos contemplados de inversión y los costos fijos de operación y mantenimiento para la evaluación económica, así como los parámetros de la central que se adoptaron para estimar los ingresos, se resume en la siguiente tabla:

Tabla V.8 *Resumen de las generalidades de ambos escenarios a evaluar.*

	<b>Proyecto Actual "Inversión 1"</b>	<b>Proyecto Modificado "Inversión 2"</b>
<b>Inversión inicial</b>	<b>\$ 2,259,456,780.00</b>	<b>\$ 2,292,325,550.43</b>
Costos fijos de O&M (\$/año)	\$ 5,710,685.55	\$ 5,710,685.55
Aportación por hora al sistema eléctrico nacional	292 MW	292 MW
Generación Anual Media	1,292 GWh	1,292 GWh
Capacidad de almacenamiento	1460.20 Mm <sup>3</sup>	1460.20 Mm <sup>3</sup>
Unidades generadoras	2 Pelton (146MW)	2 Pelton (146MW)
Volumen de concreto	220,000 m <sup>3</sup>	220,000 m <sup>3</sup>
Área bloque de refrigeración	415 m <sup>2</sup>	415 m <sup>2</sup>
Longitud de tuberías PVC (sistema de enfriamiento) en el bloque	19,102 m	19,102 m
Tubería por m <sup>3</sup> de concreto	15.34 m	30.69 m

#### 5.5.4 Beneficios

Los beneficios del proyecto principalmente consisten en el valor de la electricidad producida durante toda la vida de la presa. Se trabaja con la metodología tradicional de flujo de caja libre, en donde los ingresos son la variable clave, que básicamente depende de energía producida y de su precio.

El organismo internacional de energía elabora estadísticas internacionales sobre energía. De ellas se obtuvo el cuadro siguiente, en el que se comparan los precios medios de la electricidad para la industria en diversos países en el 2006.

Tabla V.9 *Datos de los precios de la electricidad del 1er trimestre del 2006.*

<b>País</b>	<b>USD/KWh</b>
<b>Francia</b>	0.0483
<b>Estados Unidos</b>	0.0549
<b>Reino Unido</b>	0.1003
<b>México</b>	<b>0.1009</b>
<b>España</b>	0.0833

Fuente: (International Energy Agency, 2006)

En México, las tarifas se definen con base en los costos históricos. En 1998 el costo histórico se situó en 6.3 cts. USD/kWh y en 1996 se estableció en 5.9 cts USD/kWh (Rodríguez Padilla & Sheibaum Pardo, 2002). Con estos dos valores, determinamos la tarifa en venta por kWh utilizado para la obtención de los ingresos, de este estudio.

Para la evaluación se asume que el proyecto vende toda su energía firme y la secundaria.

Generación Media Anual Firme	1,139.60 GWh
Generación Media Anual Secundaria	152.80 GWh
<b>Generación Media Anual Total</b>	<b>1,292.40 GWh</b> <b>1,292,400,000 KWh</b>

La tarifa de venta de electricidad, lo convertimos a moneda nacional con un valor de cambio de \$5.32 correspondiente al año de 1994. Con ese valor, obtuvimos los ingresos mensuales de la central en pesos mexicanos (MXN).

Tarifa de venta (USD/KWh)	Generación anual media (KWh)	Ganancia por año (USD)	Ganancia por año (MXN)	Ganancia por mes (MXN)
\$ 0.059	1,292,000,000	\$76,251,600.00	\$ 405,658,512.00	\$ 33,804,876.00

Desde el punto de vista electro-mecánico, una hidroeléctrica debe tener una disponibilidad de 90%. Dependiendo de las características de la cuenca a la que la central pertenezca, la disponibilidad puede afectarse por condiciones de azolve. En el caso de México, 90% es alcanzable.

Para la presente evaluación, se asumió que la central tendría una disponibilidad inferior, hasta el año 1995, ya que el proyecto entrara en ejecución gradualmente. Se estima que, en el año 1994, se estará llenando el embalse conforme se avanza la construcción de la cortina, por lo que operará en forma constante con un factor del 70%, puesto que se tiene que esperar a que se inyecte la última junta de construcción para que el embalse se llene completamente.

Hasta el año 1996 se proyecta con un factor del 90% de su capacidad total.

Factor de carga	Ganancia por año (USD)	Ganancia por año (MXN)	Ganancia por mes (MXN)
0.30	\$ 53,376,120.00	\$ 283,960,958.40	\$ 23,663,413.20
0.15	\$ 64,813,860.00	\$ 344,809,735.20	\$ 28,734,144.60
0.10	\$ 68,626,440.00	\$ 365,092,660.80	\$ 30,424,388.40

### 5.5.5 Evaluación

El P.H. Zimapán, construida por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en su momento, debió cumplir con los lineamientos vigentes y cumplir con los análisis de costo-beneficio de los programas de inversión correspondiente a los proyectos de infraestructura económica del sector económico – electricidad. Para la aprobación de su construcción se tuvo que cumplir con la normatividad que establece la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) del Gobierno Federal, no se pretende exponer aquí una guía extensa de evaluación socioeconómica de proyectos de inversión, pero (sin llegar a mayor detalle) sí dejar claro que todo proyecto hidroeléctrico por su impacto social y económico en general debe generar más beneficios que costos, y contemplarse como una opción más viable que otros proyectos, esto es, cumplir con eficiencia. Para tomar la decisión de ejecutar un proyecto de esta magnitud, debe cumplir con criterios de evaluación.

En otras palabras, un proyecto es económicamente viable si genera beneficios económicos netos con un Valor Actual Neto (VAN) positivo. De igual forma, un análisis de Beneficio - Costo determina la viabilidad económica de un proyecto señalando la utilidad que se obtendrá con el costo que representa la inversión; es decir, que, por cada peso invertido, cuánto es lo que se gana. Así mismo, con la Tasa Interna de Retorno (TIR) se conoce el máximo rendimiento que da el flujo de efectivo del proyecto evaluado.

Los factores a utilizar para esta evaluación son:

<b>Horizonte a evaluar</b>	50 años
<b>Tasa de descuento</b>	12.00%
<b>Costos fijos de O&amp;M anual (MXN)</b>	\$ 5,710,685.55

La vida útil del proyecto es de 50 años. Esta evaluación se realizó también para un periodo de 25 años con el fin de sensibilizar el resultado de la misma, considerando como año inicial 1994.

En los casos de los proyectos de inversión pública en México, estos establecen una tasa de descuento del 12% (parámetro oficial de la Unidad de Inversiones de la SHCP).

Nuestro objetivo no es comprender la relación inversión - financiamiento por lo que el estudio no considera la inversión financiada con recursos propios o de terceros. Ignorando los periodos de capitalización, periodo de gracia, plazo y método de amortización. El análisis económico se dirigió en determinar el impacto que tienen el incremento de la inversión inicial por modificación del precio unitario de la cortina por serpentines adicionales, buscando cumplir con:

- a. Relación beneficio - costo sea mayor o igual a 1.
- b. Resultado de Valor Actual Neto sea positivo
- c. Tasa Interna de Retorno mayor a la tasa de descuento.

## Inversión No. 1

Los costos y beneficios utilizados para el análisis por año, son los siguientes:

<b>Año</b>	<b>COSTOS (MXN)</b>	<b>BENEFICIOS (MXN)</b>
<b>1990</b>	\$ 59,729,742.70	-
<b>1991</b>	\$ 333,687,069.41	-
<b>1992</b>	\$ 479,382,598.37	-
<b>1993</b>	\$ 463,605,751.46	-
<b>1994</b>	\$ 226,508,539.45	\$ 70,990,239.60
<b>1995</b>	\$ 5,710,685.55	\$ 344,809,735.20
<b>1996</b>	\$ 5,710,685.55	\$ 365,092,660.80
<b>1997</b>	\$ 5,710,685.55	\$ 364,979,664.00
... <b>2044</b>	\$ 5,710,685.55	\$ 364,979,664.00

Los principales resultados de la evaluación del proyecto con la Inversión No.1 son:

*Tabla V.10* Resumen del análisis económico de la Inversión No. 1

<b>Inversión No. 1</b>	<b>\$ 2,259,456,780.00</b>	
<b>Periodo de análisis</b>	<b>25 años</b>	<b>50 años</b>
<i>Relación Beneficio - Costo (B/C)</i>	1.270	1.344
<i>Periodo de recuperación de la inversión</i>	6 años	6 años
<i>Tasa Interna de Retorno (TIR)</i>	15.87%	16.27%
<i>Valor Actual Neto (VAN)</i>	\$ 610,678,859.50	\$ 776,483,103.47

## Inversión No. 2

Los costos y beneficios utilizados para el análisis por año, son los siguientes:

<b>Año</b>	<b>COSTOS (MXN)</b>	<b>BENEFICIOS (MXN)</b>
<b>1990</b>	\$ 57,031,214.50	
<b>1991</b>	\$ 336,613,760.64	
<b>1992</b>	\$ 491,443,909.97	
<b>1993</b>	\$ 478,965,264.20	
<b>1994</b>	\$ 232,204,212.98	\$ 118,317,066.00
<b>1995</b>	\$ 5,710,685.55	\$ 344,809,735.20
<b>1996</b>	\$ 5,710,685.55	\$ 365,092,660.80
<b>1997</b>	\$ 5,710,685.55	\$ 365,092,660.80
... <b>2019</b>	\$ 5,710,685.55	\$ 365,092,660.80

Los beneficios obtenidos en el año 1994 son mayores, en comparación con la inversión No. 1, ya que estos se obtuvieron de forma anticipada al inyectar la junta de construcción aproximadamente un mes antes, tal y como se muestra en la Tabla 6.3 de la estimación de la programación de obra. De igual forma los costos aumentaron al incluir más mano de obra, herramientas y materiales y los costos de operación y mantenimiento que esto implicaba.

En la siguiente tabla se muestra el resumen de la evaluación económica de la Inversión No. 2.

Tabla V.11 *Resumen del análisis económico de la Inversión No. 2*

<b>Inversión No. 2</b>	<b>\$ 2,292,325,550.43</b>	
<b>Periodo de análisis</b>	<b>25 años</b>	<b>50 años</b>
<i>Relación Beneficio - Costo (B/C)</i>	1.272	1.345
<i>Periodo de recuperación de la inversión</i>	6 años	6 años
<i>Tasa Interna de Retorno (TIR)</i>	15.98%	16.37%
<i>Valor Actual Neto (VAN)</i>	\$ 624,185,134.54	\$ 789,989,378.51

## 5.6 CONCLUSIÓN

Los resultados del presente capítulo, cumplieron con los objetivos planteados en él. Se interpretó los resultados de las simulaciones realizadas por el programa de los ingenieros consultores Lombardi S.A., se mencionó la base del sistema y los datos necesarios que se requieren para la obtención de los mismos. Complementando de esta manera la información bibliográfica existente de los sistemas de enfriamiento.

Con la evaluación de los resultados se pudo observar teóricamente la evolución térmica de un bloque colado de 3m, determinando que se necesitan 94 días para que este alcanzara los 19°C.

Asimismo, con base en los resultados del sistema de enfriamiento, se concluye la importancia de incluir la Etapa 2 en los bloques centrales (1,2 y 3) para cumplir con la programación de la inyección de juntas y del llenado del embalse, y con ello, el funcionamiento de la central en el tiempo previsto. En las simulaciones se observó que la eficiencia de la etapa 1 es óptima, pero pierde su eficiencia meses después, cuando la diferencia de temperatura entre el concreto y el agua de enfriamiento disminuye. Implicando un aumento de días para que cada bloque alcanzara los 19°C, lo cual retrasaría en su totalidad la programación del proyecto.

Se plantearon dos propuestas de mejora de programación de obra. Concluyendo que la más viable, de acuerdo a un análisis cualitativo, es la alternativa No. 2 que consiste en la colocación de serpentines a 1.50m, es decir a media altura de la alzada de los bloques.

Con la evaluación económica, se realizó una comparativa de la situación real del proyecto (Inversión No.1) y la propuesta (Inversión No.2), obteniendo:

- a) La relación Beneficio - Costo fue mayor a 1.
- b) El Valor Actual Neto (VAN) fue positivo y mayor a cero.
- c) La Tasa Interna de retorno fue mayor a la tasa de descuento propuesta.

Tabla V.12 Cuadro comparativo de los resultados económicos de ambas inversiones.

	<b>Inversión No. 1</b>	<b>Inversión No. 2</b>
<i>Inversión inicial</i>	\$ 2,259,456,780.00	<b>\$ 2,292,325,550.43</b>
<i>Relación Beneficio - Costo (B/C)</i>	1.344	<b>1.345</b>
<i>Periodo de recuperación de la inversión</i>	6 años	<b>6 años</b>
<i>Tasa Interna de Retorno (TIR)</i>	16.27%	<b>16.37%</b>
<i>Valor Actual Neto (VAN)</i>	\$ 776,483,103.47	<b>\$ 789,989,378.51</b>

Se observó un mismo valor en ambas inversiones en la relación Beneficio – Costo, el cual es un índice que representa el rendimiento obtenido por cada peso invertido, demostrando que por cada peso invertido en el proyecto se obtendrán 34 centavos de ganancia, lo que hace viable la inversión, ya que, bajo este criterio se confirma la rentabilidad del mismo.

En virtud de los resultados obtenidos del VAN, ambos proyectos se aceptan y rige para decisión el que obtuvo mayor valor, en este caso la inversión No.2 presenta una diferencia mayor de \$13,506,275.04 pesos, lo que denota un incremento en las ganancias durante el horizonte de planeación del proyecto.

De igual forma, la tasa máxima de rendimiento (TIR) obtenida en ambas inversiones es mayor a la tasa de descuento propuesta, es decir, generan una rentabilidad superior a la exigida. En este caso, la TIR más elevada la obtuvo la Inversión No. 2, con un 16.37%.

Los métodos si bien son lógicos, nos son consistentes. El criterio económico de Costo – Beneficio y la Tasa Interna de Retorno son números relativo, en comparación con el VAN que es un número absoluto. Por lo que, en evaluaciones de inversiones, es recomendable elegir la mejor de ellas con el VAN.

Se concluye que el P.H. Zimapán tiene la capacidad para generar ganancia sobre su inversión, comprobando su aceptación como proyecto. Sin embargo, los métodos de evaluación no son métodos de elección automáticos, para la toma de decisión de la inversión es muy importante la propensión al riesgo del inversionista, es decir, la decisión gira alrededor del análisis de riesgo.

---

## VI. CONCLUSIONES

---

Este capítulo presenta las principales conclusiones del trabajo desarrolladas a lo largo de la investigación. De igual forma brinda las recomendaciones para investigaciones futuras.

### 6.1 CONCLUSIÓN GENERAL

El objetivo de este estudio fue evaluar el funcionamiento del sistema de enfriamiento y con base en ellos modificar la programación constructiva de la cortina de concreto de un proyecto hidroeléctrico. Este trabajo se adecuó a las condiciones del P.H. Zimapán, por lo que es importante mencionar que el presupuesto fue una estimación del mismo y no existe un único camino para la determinación de él. Por lo que, esta propuesta se puede tomar como base, cambiando y modificándolo a las condiciones del proyecto que se quiera simular. Siendo una guía para quienes interviene en el estudio de estos aprovechamientos.

Con la realización de este trabajo, se puede concluir que:

- Tener un amplio conocimiento del proceso constructivo de la cortina en una presa hidroeléctrica es un punto clave para el desarrollo óptimo de toda la obra. Un buen resultado en cuanto a calidad, comportamiento, tiempo y economía de una estructura de concreto masivo, como fue el caso de la cortina del P.H. Zimapán, son producto de una serie de medidas con relación al programa de obra, a los materiales, a la disminución de la temperatura de colado y aun adecuado pre y post-enfriamiento.
- Para poder tomar decisiones preventivas y correctivas en el programa de obra, es importante un buen análisis de los estudios brindados por los diversos especialistas involucrados en el proyecto y el entendimiento de los mismos. En este trabajo se evaluó los resultados del sistema de enfriamiento del P.H. Zimapán, siendo un punto clave para alcanzar la calidad de la estructura en términos del concreto masivo y con base en ellos se brindó propuestas de mejora en la programación. Determinando que, no se puede ahorrar ningún costo mediante el uso de diseños improvisados o cargando la mano a los trabajadores, el ahorro en tiempo y costo de construcción debe iniciar en el diseño y en la evaluación de estudios brindados por los especialistas. Siendo un trabajo en conjunto entre Constructor – Especialistas, desde las etapas de planeación, diseño y construcción.

En el caso del P.H. Zimapán el software de sus consultores externos, Consultores Lombardi S.A, fue un elemento importante para tomar las medidas necesarias, para la ejecución en tiempo del proyecto y determinar el correcto funcionamiento del sistema de enfriamiento. Por lo que, nos deja de enseñanza que toda construcción debe prever procedimientos y prácticas para enmendar atrasos o

traslapes de actividades que se puedan presentar en el desarrollo de la obra y que estas medidas deben ser respaldadas por estudios realizados por especialistas en el área.

- Finalmente, de la evaluación económica, el proyecto presentó buenos indicadores económicos para ambas inversiones. Considerando que el proyecto se evaluó sin financiamiento, una TIR del 16% y VAN positivo, es un muy buen indicador de que el proyecto es rentable. Obteniendo mejor ganancia en la Inversión No. 2. Es de suma importancia establecer que, al efectuar el estudio, la mayoría de los valores encontrados estaban en dólares, por lo que este punto puede ser una fuente de perturbaciones ya que presentan variaciones considerables a lo largo de los años analizados. Por lo que se recomienda que los costos aquí manejados, sean cuidadosamente actualizados en caso de utilizar y reevaluar el desempeño económico de la central.

De igual forma, con el análisis de los precios unitarios se puede observar que las diferencias en precio son mínimas, pero que al proyectarla en nuestro horizonte a evaluar se logra ver la diferencia en ganancia, obteniendo mayor resultado la Inversión No. 2.

	<b>Inversión No. 1</b>	<b>Inversión No. 2</b>
<i>Inversión inicial</i>	\$ 2,259,456,780.00	<b>\$ 2,292,325,550.43</b>
<i>Relación Beneficio - Costo (B/C)</i>	1.344	<b>1.345</b>
<i>Periodo de recuperación de la inversión</i>	6 años	<b>6 años</b>
<i>Tasa Interna de Retorno (TIR)</i>	16.27%	<b>16.37%</b>
<i>Valor Actual Neto (VAN)</i>	\$ 776,483,103.47	<b>\$ 789,989,378.51</b>

En conclusión, con estos resultados se logró erradicar la falsa impresión de que el costo de enfriamiento adicional no es factible, en este caso de estudio fue un aumento del 2% en el costo total de la obra civil. Sin embargo, un enfriamiento más rápido con un ligero costo adicional podría resultar en una reducción sustancial del costo a largo plazo de algunos artículos y, en nuestro caso, obtención de una mayor ganancia durante la vida útil del proyecto. Además, se determinó que la intensificación del sistema de enfriamiento, trae consigo mejor calidad en el concreto, reducción en el tiempo de funcionamiento del sistema de enfriamiento, obteniendo 30 días menos en la construcción de la cortina, lo que implica una reducción del 3% en tiempo y con ello un funcionamiento anticipado de la central para generación de energía comercial reduciendo y/o evitando interferencias entre los procesos a ejecutar.

Con respecto al desarrollo formal del estudio, se puede concluir que se cumplieron satisfactoriamente los objetivos presentados en un principio y se abordaron temas que no habían sido planteados, pero que permitieron complementar el desarrollo de la evaluación con resultados de mejor calidad.



## 6.2 RECOMENDACIONES

Para contar con un estudio más exacto, se recomienda profundizar al máximo ciertas áreas de estudio que requieren de mayor tiempo, como por ejemplo: el análisis de riesgos del costo del proyecto, realización de un presupuesto de construcción abordando las incertidumbres inherentes en el proceso de estimación de costos, es decir, involucrando los ámbitos sociales, ambientales y jurídicos. De igual forma, considerar en los análisis de costos las variaciones de los precios de los materiales civiles, que tienden a ser muy fluctuosos.

## BIBLIOGRAFÍA

- ACI Committee. (2000). Cement and Concrete Terminology (ACI 116R-001) [Terminología del cemento y concreto]. *American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.*, 73.
- Acres American Incorporated. (1982). *Susitna Hydroelectric Project. Unit prices- Backup calculations. Devil Canyon. Arch dam concrete.* [Proyecto Hidroeléctrico Susitna. Precios unitarios: cálculos de respaldo. Devil Canyon. Arco de presa de concreto.]. Niagara Falls, Ontario: Acres Consulting Services Ltd.
- Arcila López, C. (s.f.). Concretos Masivos. *Asociación Colombiana de Productores de Concreto. Instituto Americano del Concreto.*, 44-49.
- Arévalo Mendoza, V. (Enero-Abril de 2016). *Excavación de galerías de inyección, drenaje e inspección del proyecto 3 Hidroeléctrico Zimapán.* Obtenido de Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana: <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/index.php/component/content/article/215-sitio/articulos/tercera-epoca/5101-02/973-5101-02-1-arevalo>
- Azenha, M., & Faria, R. (2008). Temperatures and stresses due to cement hydration on the R/C foundation of a wind tower. A case study. [Temperaturas y tensiones debidas a la hidratación del cemento en la base R/C de una torre eólica. Un caso de estudio.]. *Engineering Structures*, 2392-2400.
- Bilbatua, D., Martínez, F., Grecko, R., & <https://www.youtube.com/watch?v=zmf7sYjVNzA> (Dirección). (2010). *Presa Zimapán* [Película].
- Calmon Nogueira Da Gama, J. (1995). *Estudio térmico y tensión en estructuras masivas de hormigón. Aplicación a las presas durante la etapa de construcción.* Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Candelas Ramírez, L. (2008). *El concreto masivo.* Ciudad de México.: Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Carpio Riva, J. J. (2013). *Estudios básicos para determinar la prefactibilidad de un equipamiento hidroeléctrico, en presas cuyo propósito es distinto al de generación eléctrica.* Ciudad Universitaria, Ciudad de México.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- CFE. (1995). *Costos y parámetros de referencia para la formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Electrico.* México.

- CFE. (2006). *Perfil de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama*. Ciudad de México: Comisión Federal de Electricidad.
- Climate Date. (2017). *Clima: Zimapán*. Obtenido de Climate-Date.org: <https://es.climate-data.org/location/45567/>
- Comisión Federal de Electricidad (CFE); Enriquez, J. (1992). *Adquisición y transferencia de tierras en el caso del P.H. Zimapán México*. Brasil: Ponencia presentada en el Seminario Internacional sobre Reasentamiento Involuntario de Población no Setor Eléctrico.
- CONABIO. (2016). *Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región de "Los Mármoles" Hgo.* Obtenido de [http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfDQ006\\_2a\\_parte.pdf](http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfDQ006_2a_parte.pdf)
- CONAGUA. (2011). *Estadísticas del agua en México*. Ciudad de México: CONAGUA.
- CONAGUA. (2012). *Sistema Informático de Seguridad de Presas (SISP)*. México: Subdirección General Técnica, Gerencia de Ingeniería y Normas Técnicas.
- CONAGUA. (2013). *Inventario Nacional de Presas*. Ciudad de México: CONAGUA, Gerencia del Consultivo Técnico.
- CONAGUA. (2017). *Principales presas de México*. Obtenido de Sistema Nacional de Información del Agua: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=presasPrincipales&ver=reporte&o=0&n=nacional>
- Cortés, A., Lozano, A., Pérez, J., & Martínez, F. (2006). *Tomo X. Reporte Técnico. Estudio exploratorio de las condiciones isotópicas e hidrogeoquímicas de afloramientos en la comunidad de El Arbolito, Cadereyta, Qro.* Santiago de Querétaro, Qro.: CONCYTEQ.
- Empresa KTI-Plersch Kaltetechnik. (2015). Enfriamiento de concreto. *Revista Mundo HVACR*.
- FCC Construcción S.A. (Dirección). (2013). *Presa de Casasola*, <https://www.youtube.com/watch?v=a5B9zIWlUg&list=PLF492hs00FdJIM2iG0mrrJZQj--KFokPj> [Película].
- Fernández M., E., & Parraguez G., B. (2014). *Maquinaria pesada y funcionalidades en la construcción de presas*. Santiago de Chile: Universidad de Santiago de Chile. Facultad de Ingeniería. Departamento de Obras Civiles.
- FUNDIBEQ. (2008). *Modelo Iberoamericano de Excelencia en la Gestión*. Querétaro, México: Comisión Federal de Electricidad.
- Gajda, J., & Vangeem, M. (2002). Temperatures in Mass Concrete [Temperaturas en concreto masivo]. *Concrete International*, 59-62.
- Google Earth. (2017). Obtenido de <https://www.google.com.mx/maps/place/Presa+Fernando+Hiriart/@20.6633078,-99.5029173,672m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x85d3f26870c6df37:0x6ed089cb91b242f3!8m2!3d20.6633078!4d-99.5007286>

- Greaves, P. (1997). *La intervención del Banco Mundial y la CFE en los proyectos hidroeléctricos de Aguamilpa y Zimapán: los límites de una política social de reacomodo*. Ciudad de México.
- Gutiérrez Ñahui, J. (2017). *Variación de la temperatura y su influencia en la fisuración en concretos masivos*. Lima-Perú: Universidad Nacional de Ingeniería Lima Perú.
- Hernández Mondragón, S. (2005). *Procedimiento constructivo de la cortina del proyecto hidroeléctrico El Cajón, en el estado de Nayarit*. Ciudad de México: UNAM. Facultad de Ingeniería.
- ICOLD. (2008). *ICOLD [Comisión Internacional de Grandes Presas]*. Obtenido de International Commission of Large Dams: <http://www.icoldcigb.net>
- ICOLD. (2 de Noviembre de 2017). *Classification by type [Clasificación por tipo]*. Obtenido de International Commission on Large Dams: [http://www.icold-cigb.net/article/GB/world\\_register/general\\_synthesis/classification-by-type](http://www.icold-cigb.net/article/GB/world_register/general_synthesis/classification-by-type)
- Ingenieros Consultores Lombardi S.A. (1991). *Planta Hidroeléctrica Zimapán. Sistema de Enfriamiento*. Lucerna, Suiza: Nota técnica para la Comisión Federal de Electricidad.
- International Commission on Large Dams (ICOLD). (1986). *River Control During Dam Construction [Control del río durante la construcción de la presa]*. Bulletin 48a.
- International Energy Agency. (2006). *Key World Energy Statistics [Estadísticas clave de energía a nivel mundial]*. Paris: International Energy Agency.
- Lueg Tamargo, J. (2009). *Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrologicas Río Moctezuma 1*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Marengo Mogollón, H. (2002). Consideraciones de Riesgo de Falla en Presas Mexicanas. *Seminario de la Seguridad de Presas*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.
- Marengo Mogollón, H. (2016). *Apuntes de la clase: "Diseño y construcción de presas"*. Ciudad Universitaria, Ciudad de México.: Posgrado de la facultad de ingeniería. UNAM.
- Marengo Mogollón, H. (2018). El futuro de las grandes presas. *Ingeniería Civil. Organó oficial del Colegio de Ingenieros Civiles de México*, 4-7.
- Maron Valarezo, A. (2014). *Instrumentación de bloques de concreto masivo para verificar el sistema de enfriamiento*. American Concret Institute.
- Martínez Arroyo, A. C. (2011). *Relatoria de la experiencia profesional en la Comisión Federal de Electricidad*. Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Mates Pajares, E. (2007). *El uso y la tecnología de los recursos hídricos*. Catalunya, España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Mondada, A. (1995). *Adaption au cours des travaux du projet du système de refroidissement au barrage de Zimapán [Adaptación durante el trabajo del proyecto del sistema de refrigeración en la presa de Zimapán]*. Crans-Montana, Stwizerland: Lombardi S.A.

- Murillo Fernández, R. (2012). *Cortinas de presas*. Acapulco, Guerrero: XXII Congreso Nacional de Hidraulica.
- Myers, T., Fowkes, N., & Ballim, Y. (s.f.). *Modelling the Cooling of Concrete by piped water [Modelado del enfriamiento del concreto mediante tubería de agua]*. Barcelona, España: UAB Sciency Faculty.
- N.I. Zinevich, L. T. (1973). Self-Lifting cantiliver formwork for dam construction at the toktogul'sk hydroelectric plant [Encofrado en voladizo autoelevador para la construcción de presas en la central hidroeléctrica de Toktogul'sk]. *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*, 9-12.
- Nieto León, E. (2016). *Presa Hidroeléctrica Fernando Hiriart Valderrama*. Obtenido de Cadereyta de Montes, Pueblo Mágico: [http://www.cadereyapueblomagico.com.mx/presa\\_zimapan.html](http://www.cadereyapueblomagico.com.mx/presa_zimapan.html)
- Pereyra Díaz, D., Pérez Sesma, J. A., & Salas Ortega, M. d. (2010). Hidrología. En J. Escamilla Ortíz, & E. Florescano, *Atlas del Patrimonio Natural, Histórico y cultural de Veracruz* (págs. 92-93). México: Universidad Veracruzana, Comisión del Estado de Veracruz.
- Pérez Macías, L., Peral Garibay, J., & Pérez Jiménez, S. (2017). *Análisis de desplazamientos por presas en México (2006-2016)*. Ciudad de México: Colectivo Geocomunes.
- Pérez Pliego, B. (2009). *Análisis de riesgo y confiabilidad en presas de tierra: un caso en el Estado de México*. Toluco, Edo. de México.: Universidad Autónoma Estado de México.
- Presidente de la República. (2014). *Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018*. Ciudad de México: Gobierno de la República.
- Proceedings of the Engineering Foundation Research Conference. (1970). *Rapid Construction of Concrete Dams [Construcción rápida de presas de concreto]*. New York, NY.: American Society of Civil Engineers.
- Ramos Gutiérrez, L. d., & Montenegro Fregoso, M. (2012). Las centrales hidroeléctricas en México: Pasado, presente y futuro. *Tecnología y Ciencias del Agua. Vol III, núm. 2*, 103-121.
- Rodríguez Padilla, V., & Sheibaum Pardo, C. (2002). El sistema de precios de la electricidad en México. *Revista Latinoamericana de Economía. Vol. 33 Num. 128*, 211.
- SENER. (2016). *Prospectiva de energías renovables 2016-2030*. Ciudad de México: Secretaría de Energía.
- Sklyarenko, A., & Portnov, V. (1974). Formwork operations on the construction of the arch dam of the Chirkey hydroelectric station [Operaciones de encofrado en la construcción de la presa de arco de la central hidroeléctrica Chirkey]. *Gidrotekhuicheskoe Stroi'stvo*, 15-20.
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. (2008). *Evaluación de daños provocados por la falla de presas de tierra: Un caso en el Estado de México*. Veracruz, Veracruz.: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Tellez Quintanar, C. (2012). *Nociones de estabilidad de la cortina*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería. UNAM.

- Townsend, C. L. (1981). *Control of Cracking in Mass Concrete Structures [Control de agrietamiento en estructuras de concreto masivo]*. United States: U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation.
- Troxell, G., Davis, H., & Kelly, J. (1968). *Composition and properties of concrete [Composición y propiedades del concreto]*. New York: Mc Graw-Hill.
- U.S. Bureau of Reclamation. (1947). *Concrete Manufacture, Handling and Control, Boulder Canyon Project Final Reports, Part IV [Fabricación, manejo y control de concreto, Informes finales del proyecto Boulder Canyon, Parte IV]*. Denver: Design and Construction, Bulletin 1.
- US Army Corps of Engineers. (1994). *EM 1110-2-2000. Standard practice for concrete for civil works structures [Práctica estándar del concreto en estructuras de obras civiles]*. Washington, DC: Department of the Army.
- US Army Corp of Engineers. (1994). *EM 1110-2-2201. Arch Dam Design [Diseño de presas de arco]*. Washington, DC.: Department of the Army.
- US Bureau of Reclamation. (1977). *Design of Arch Dams [Diseño de presas de arco]*. Denver, Colorado: A Water Resources Technical Publication.
- US Bureau of Reclamation. (1987). *Design of small dams [Diseño de presas pequeñas]*. Washington, D.C.: New York University Press.
- Valdés, I. C. (2005). *Las Presas y el Hombre*. Ciudad de México: Foro Internacional, las presas y el hombre.
- Vangeem, M., & Gajda, J. (2002). Controlling in Mass Concrete [Control en el concreto masivo]. *Concrete International*, 59-62.
- Vázquez Contreras , A., Dávila Serrano, M., & Acosta Quevedo, R. (s.f.). *La importancia de la exploración geológica y geofísica en los costos de construccion de presas hidroeléctricas*. Obtenido de SMIG: <http://www.smig.org.mx/archivos/biblioteca/COSTOS%20ESTUDIOS%20PRESAS.pdf>