

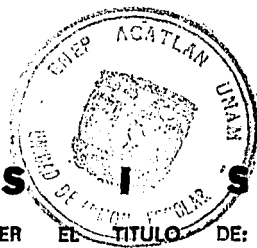


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

21  
2EJ

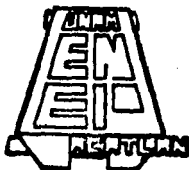
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ACATLAN"

GEOLOGIA Y GEOTECNIA, ASPECTOS  
CONSTRUCTIVOS DEL TUNEL DE CONDUCCION DE  
21 K. M. P. H, ZIMAPAN .



**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO CIVIL**  
**P R E S E N T A :**  
FRANCISCO JAVIER HERNANDEZ GOMEZ

DIRECTOR DE TESIS:  
ING. VICTOR JESUS PERUSQUIA MONTOYA



MEXICO, D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN



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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"  
JEFATURA DEL PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

SR. FRANCISCO J. HERNANDEZ GOMEZ  
ALUMNO DE LA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL.  
P R E S E N T E :

DE ACUERDO A SU SOLICITUD PRESENTADA CON FECHA 5 DE ENERO DE 1995, ME COMPLACE NOTIFICARLE QUE ESTA JEFATURA DEL PROGRAMA TUVO A BIEN ASIGNARLE EL SIGUIENTE TEMA DE TESIS:  
"GEOLOGIA Y GEOTECNIA. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DEL TUNEL DE CONDUCCION DE 21 KM.P.H. ZIMAPAN"

- INTRODUCCION.  
I.- DESCRIPCION GENERAL DEL PROYECTO.  
II.- GEOLOGIA - GEOTECNIA DE LA CONDUCCION.  
III.- EXCAVACION - TUNEL DE CONDUCCION.  
IV.- TRATAMIENTOS PREVIOS AL REVESTIMIENTO.  
V.- REVESTIMIENTO DEFINITIVO.  
ANEXOS.  
CONCLUSIONES.  
BIBLIOGRAFIA.

ASI MISMO FUE DESIGNADO COMO ASESOR DE TESIS EL  
ING. VICTOR PERUSQUIA MONTOYA

PIDO A USTED TOMAR NOTA QUE EN CUMPLIMIENTO DE LO ESPECIFICADO EN LA LEY DE PROFESIONES, DEBERA PRESTAR SERVICIO SOCIAL DURANTE UN TIEMPO MINIMO DE SEIS MESES COMO REQUISITO BASICO PARA SUSTENTAR EXAMEN PROFESIONAL. ASI COMO DE LA DISPOSICION DE LA DIRECCION GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES EN EL SENTIDO DE QUE SE IMPRIMA EN LUGAR VISIBLE DE LOS EJEMPLARES DE LA TESIS, EL TITULO DE TRABAJO REALIZADO. ESTA COMUNICACION DEBERA IMPRIMIRSE EN EL INTERIOR DE LA TESIS.

SIN MAS POR EL MOMENTO, RECIBA UN CORDIAL SALUDO.

A T E N T A M E N T E .  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
ACATLAN, EDO. DE MEX., A 17 DE ABRIL DE 1995

ING. CARLOS ROSALES AGUILAR  
JEFE DEL PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL



ENEP-ACATLAN  
JEFATURA DEL  
PROGRAMA DE INGENIERIA

## **DEDICATORIAS**

**A la memoria de mi Padre por darme el impulso de salir siempre adelante ante cualquier adversidad y el cuál nunca defraudaré tu confianza depositada en mi.**

**A mi Madre por su cariño y motivación para que continuara con mis estudios y lograr lo que ahora soy. A ti madre te agradezco infinitamente todo tu esfuerzo.**

A mis Hermanos porque lograron sus metas propuestas, por su apoyo moral y que continuemos siempre unidos.

A mis amigos Rubén Laguno, Luis Pineda, Juan Pablo Villareal, Esteban Arenas. Por su gran amistad que perdure siempre.

A un gran amigo el Ing. Jorge Sánchez fallecido en la obra P.H. Zimapan. Por su gran amistad que me brindó.

A ti Ceci por brindarme tu apoyo incondicional y porque eres parte de mis ideales.

## **A G R A D E C I M I E N T O**

**A la Universidad Nacional Autónoma de México  
Escuela Nacional de Estudios Profesionales Acatlán  
Por brindarme la formación que ahora tengo  
Muchas gracias.**

**La Tesis es un gran esfuerzo de recopilación de información y experiencias que bien vale la pena leer con detenimiento y hacer uso de ella.**

**La responsabilidad del Ingeniero Civil no es computar con exactitud, sino Juzgar acertadamente.**

## INDICE

Introducción	
I.- Descripción General del Proyecto	
A. Generalidades	1
B. Localización	2
C. Factibilidad Técnico-económica	3
D. Características generales del proyecto	4
E. Escurrimientos y azolves para la obra de contención.	8
F. Planeación de la construcción.	8
G. Impacto ecológico	9
II.- Geología- Geotécnia de la Conducción	
A. Estratigrafía regional de la conducción	11
B. Orientación y Geología superficial del trazo de la conducción	14
C. Areas estudiadas sobre la conducción	15
D. Comentarios de la roca y formación real encontrada, ya excavados los 21 km del túnel de conducción (mayo 93)	23
III.- Excavación-Túnel de Conducción	
A. Orientación y Características	27
1. Estrategias de construcción	27
2. Caminos de acceso	27
3. Ventanas de acceso	28

4. Túneles crucero y/o ventanas de acceso	29
5. Túnel de conducción logística y tipos de secciones	30
B. Descripción de maquinaria y equipo para excavación.	32
C. Procedimiento constructivo	38
1. Ciclo de excavación	39
2. Trazo de la plantilla de barrenación	39
3. Instalación de aditamentos para el avance de excavación.	40
4. Colocación de vía férrea	42
5. Barrenación de la plantilla	43
6. Carga y conexión (poblado de barrenos).	44
7. Voladura	46
8. Ventilación	46
9. Amacice y retiro de rezaga	48
10. Análisis de tratamientos	50
a. Anclajes	50
b. Concreto lanzado	51
c. Marcos metálicos	52
11. Análisis de ciclos de excavación	54
12. Control topográfico	55
D. Cantidades de obra	57
E. Instalaciones en ventanas de acceso	59
F. Instalaciones eléctricas, demandas por frente	60



G. Instalaciones y suministro de agua a los frentes de la conducción	61
H. Equipos de construcción y mano de obra para los frentes de excavación	64
I. Programa de construcción	65
IV. Tratamiento previos de Revestimiento	
A. Objetivo	68
B. Tipos de tratamiento a lo largo de la conducción	68
1. Carsticidad local	68
2. Oquedades mayores	69
3. Alta densidad cárstica	70
4. Diques	71
5. Zonas de exploración geofísica	71
C. Resultado de investigación en zonas Cársticas	72
1. Inyección de los barrenos de exploración	72
2. Tratamiento de la carsticidad del cad. 3+746	73
3. Tratamiento de la cavidad del cad. 6+673	74
4. Carsticidad localizada en el cad. 6+687	75
V. Revestimiento Definitivo.	
A. Antecedentes	77
B. Proyecto Original de revestimiento	77
C. Modificaciones al proyecto	78
D. Proyecto definitivo de construcción	80

E. Procedimientos de construcción	81
1. Alternativas	81
2. Procedimiento real de construcción	82
a. Reposición de piso	83
b. Mezclas	85
c. Plantas de concreto	89
d. Materiales	90
e. Metodología y control del revestimiento	95
3. Rendimientos programados y reales	105
a. Costos de excavación y revestimiento	107
F. Inyecciones de concreto revestido	108
1. Tipo "A" contacto concreto-roca	108
2. Tipo "B" contacto concreto-concreto lanzado-roca	110
3. Tipo "C" Zonas críticas de alta permeabilidad	110
G. Reparaciones del concreto	114
1. Definiciones	114
2. Material de repuesto	115
3. Procedimiento de reparación	116
H. Tratamiento de fisuras del concreto revestido a lo largo de la conducción	119
1. Equipo	120
2. Mezclas de inyección	120
3. Procedimiento de inyección	120
4. Justificación de rechazo	123

<b>Conclusiones</b>	<b>125</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>128</b>
<b>Anexos</b>	

## INTRODUCCION

Este Documento que aquí Presento "Geología y Geotécnia aspectos Constructivos del túnel de Conducción de 21Km p.h. Zimapan". Se describe la Geología que atravesó el túnel, así como los procedimientos de Construcción, apoyos Logísticos en materia de infraestructura requeridos durante su construcción, del inicio a la terminación del mismo.

La finalidad Principal del túnel es Conducir agua desde el sitio de Presa hasta la casa de maquinas, para la generación de energía eléctrica.

El túnel de Conducción quedo localizado en la Confluencia de los ríos Tula y San Juan que forman el río Moctezuma a partir del Cañon del Infiernillo entre el Límite de los estados de Hidalgo y Querétaro atravezando en dirección Norte-Sur el Distrito Minero de Zimapan Hidalgo.

El túnel se excavo en una Sección herradura de 5.2m de diámetro, llevando revestimiento de Concreto hidráulico en su sección terminal.

La Gran extensión del túnel, el cual Cruzó por una fisiografía de altas montañas, con Laderas, Cañadas y Pendientes muy Grandes, planteó siempre una problematica difícil para la Construcción de los Caminos de acceso y obras a los diferentes frentes de Construcción

En la descripción General del Proyecto se describe la importancia que se tiene en cuanto a los escurrimientos que se tendrán durante el Período de Vida útil de la Zona de Presa así como el gasto de aportación a través del río Tula que serán en mayor volumen dada la tasa de Crecimiento de la población del Valle de México. Respecto a la importancia que tendrá el impacto ecológico y ambiental en esta zona de presa, se realizaron estudios detallados para garantizar un ecosistema bien Controlado.

Referente a la Geología que atravesó el túnel de conducción como se indica en el Capítulo II. se describe la Geología General del trazo, así como la Factibilidad Geológica General del trazo, así como la factibilidad Geológica que se llevó a cabo en base a zonas de estudio para determinar una correlación de la roca que cruzaría en túnel en todo su desarrollo de Construcción. Se realizan los Comentarios de la roca y tipo de formación encontrada durante la excavación del túnel ya excavados los 21 km, el cual fue posible reducir algunas zonas de tratamientos especial que se tenían Contemplados en la construcción del túnel, referenciado a los estudios realizados en la factibilidad Geológica.

Para la excavación del túnel, se utilizó el Método tradicional de Carga y Voladora con el uso de explosivos, se describe el proceso constructivo realizado involucrando en ello las diferentes estrategias de construcción.

En este etapa de excavación se describe en forma detallada la planeación y forma

de como se llevo a cabo la excavación del túnel indicando en ello, el número de frentes de trabajo, rendimientos de avance, requerimientos de mano de obra, descripción de equipo, instalaciones en los frentes de ataque como es: instalaciones eléctricas, talleres, polvorines, Suministros de agua. Análisis para el ciclo completo de una voladora, análisis para los tratamientos a la roca durante el avance de la excavación, el control topográfico y la programación de obra entre otros.

Previo al revestimiento definitivo del túnel se realizaron tratamientos en zonas don de pudiera poner en peligro la perdida de gasto durante la operación del túnel. Estos tratamientos se realizaron en zonas locales donde existía problemas geológicos como carstisidades locales, oquedades locales, diques y zonas de alta densidad carstica. estos tratamientos se llevaron a cabo a base de inyección de mortero y tapones de concreto hidráulico el cual la localización y procedimiento constructivo se describe ampliamente en el Capítulo IV de este trabajo.

Una vez concluida la excavación del túnel y terminados los tratamientos previos al revestimiento definitivo, se introdujeron al interior del túnel tres cimbras metálicas telescópicas colapsables deslizadas mediante un Jumbo transportador. Estas cimbras se colocaron en Zonas intermedias a lo Largo del túnel de tal forma que con la programación considerada se concluyera el revestimiento en el tiempo propuesto en la planeación.

El túnel de conducción se revistió en un 96% de concreto hidráulico simple y el 4% restante de concreto armado.

En la etapa de revestimiento definitivo del túnel se describen algunas consideraciones de diseño para el revestimiento, así como las variantes que se tuvieron durante el procedimiento definitivo de construcción.

Durante el proceso constructivo de revestimiento se menciona los diferentes procedimientos que se llevaron a cabo para la reposición de roca en Piso a base de concreto hidráulico previo al revestimiento de la sección definitiva. Se indica los tipos de Mezclas y proporcionamientos del concreto que se usaron posterior a un gran número de pruebas para ajustar dicha mezcla a las condiciones del sitio de revestimiento. Se describe las características de la plantas de concreto, propiedades de los materiales, calidad del agua, cemento y el uso de aditivos especiales.

Se desarrolla la metodología de los calados continuos de revestimiento, así como los rendimientos programados y reales por frente que se obtuvieron por cimbra durante su etapa de construcción.

Durante el Proceso de inyección, se llevó a la par o a una distancia considerable (500-600m) las reparaciones al concreto que se obtenían posterior al decimbrado de una sección revestida, entre los defectos más comunes que se repararon fueron: Juntas frías, Juntas de Construcción, oquedades, irregularidades en la Superficie mayor que las

permitidas. Para la reparación de dichos defectos se describe el procedimiento constructivo que se llevó a cabo, mencionando así los materiales, mano de obra y equipo utilizado. Esta fue una de las últimas etapas de construcción del túnel de conducción antes de ponerse en operación.

Durante el revestimiento del túnel y con el procedimiento constructivo utilizado, no se dejaron juntas de expansión y contracción, el cual se presentaron fisuras radiales con una abertura promedio de 0.1 a 1.0 mm. Se planteó sellar aquellas con abertura mayor de 0.4mm y solo en zonas críticas. Se desarrolló y aplicó un procedimiento de sellado de las mismas el cual no dio los resultados esperados y se optó sellar dichas fisuras con un tratamiento de inyección tipo "C". Posterior a este tratamiento se realizaron pruebas tipo lugeon para comprobar la permeabilidad de la zona el cual se obtuvieron resultados satisfactorios con bajos índices de permeabilidad el cual garantizaba una funcionalidad del túnel con pérdidas mínimas de gasto durante su operación.

## I. Descripción General del Proyecto

### A. Generalidades

El sistema hidrológico del río Pánuco, uno de los 27 sistemas en que se ha dividido el país para propósito de estudios de planeación hidroeléctrica, ofrece un potencial de 7621 GWH, distribuido en 37 proyectos, ocupando el tercer lugar a nivel regional (Región Golfo) y el octavo a nivel nacional, prosiguiendo a los sistemas Grijalba, Balsas, Usumacinta, Papaloapan, Santiago, Costa de Veracruz y Costa de Guerrero. Su generación representa el 4.8% del potencial nacional. (Tabla 1.2)

SISTEMA HIDROLOGICO	NUMERO DE PROYECTOS	POTENCIAL HIDROELECTRICO GWH	POSICION
a) Papaloapan	45	14233	1
b) Costa Veracruz	50	9387	2
c) PANUCO	37	7621	3
d) COATZACOALCOS	11	3084	4
<b>TOTAL</b>	<b>143</b>	<b>34327</b>	

#### SISTEMAS HIDROELECTRICOS A NIVEL NACIONAL (Tabla 1.2)

LUGAR	SISTEMA	POTENCIAL DE GENERACION.
1.	GRIJALVA	22542 Gwh.
2.	BALSAS	17839 Gwh.
3.	USUMACINTA	17593 Gwh.
4.	PAPALOAPAN	14325 Gwh.
5.	SANTIAGO	11413 Gwh.
6.	COSTA VER.	9387 Gwh.
7.	COSTA GRO.	7786 Gwh.
8.	PANUCO	7621 Gwh.

Dentro el potencial hidrológico del Pánuco, destaca en importancia, el potencial del río Moctezuma, en la porción Suroeste de la cuenca con 5218 GWH (68% del total del sistema) en 18 proyectos, concentrándose 2363 GWH (45% del potencial del río) en dos de ellas: Proyecto de Zimapán y Proyecto Jiliapan (Tabla 1.3).

La cuenca del río Pánuco drena una superficie de 84956 km<sup>2</sup> y el volumen de sus escurrimientos es del orden de 23000 millones de m<sup>3</sup> anuales.

**SISTEMA HIDROLOGICO-PANUCO (Tabla 1.3)**

CUENCA	No. DE PROYECTOS	POTENCIAL HIDROELECTRICO GWH	%
MOCTEZUMA	18	5218	68.5
TEMPOAL	5	383	5.0
GUAYALEJO	2	112	1.5
TAMPAON	12	1908	25.0
TOTAL	37	7621	100.00

La posición Geográfica del proyecto Zimapán es cercano a las ciudades de México, Qro. y Zonas industriales, se encuentra relativamente cerca con la interconexión a la red eléctrica de las plantas Termoeléctricas de Tula, Hgo. y el Sauz, Qro., presenta ventajas técnico-económicas para que se lleve a cabo la construcción de este proyecto.

Como se describe anteriormente el potencial eléctrico que generara el P.H. Zimapán, en operación conjunta con otras plantas que se localizan aguas abajo del río, atenderán las demandas de electricidad de la región central del país.

## **B. Localización**

El proyecto hidroeléctrico Zimapán en lo que respecta a los sitios de presa, conducción y casa de máquinas, se localiza entre las coordenadas 20° 39' y 20° 52' de latitud norte y 99° 27' a 99° 32' de latitud oeste.

El proyecto de presa se ubica 400 mts. aguas abajo de la confluencia de los ríos Tula y San Juan sobre el río Moctezuma, en los límites de los estados de Hidalgo y Querétaro, en el cañon denominado "el Infiernillo".

El acceso al proyecto se realiza por ambos edos. Las vías de comunicación más importantes son La Carretera Federal No.85 que comunica Zimapán con la ciudad de México. De Zimapán al sitio de la presa se cuenta con un camino de acceso, de 32 Km de Longitud.

Por el Edo de Querétaro el acceso a la obra coincide con un camino existente de terracería y comunica a la boquilla con el vertedor y la obra de toma a través de dos túneles de 400 y 900 mts., pasando por la corona de la cortina, a este camino fue necesario agregarle otro túnel de 1 km de longitud no previsto en la planeación inicial para atravesar una zona acantilada del macizo rocoso con bloques inestables, de la



boquilla hasta el entronque de la carretera Cadereyta-Xilitla es de 34 km.

La casa de máquinas está localizada a 36 km aguas abajo de la cortina medidas sobre el cause del Río Moctezuma y quedaron ligadas las obras con el túnel de conducción de 21 km.

El acceso a la casa de máquinas actualmente se realiza por Zimapán por el camino de terracería que termina en la mina Balcones, a partir donde se continua sobre el cause del arroyo Tolimán hasta la ranchería Las Abjuntas, ubicada en la confluencia con el río Moctezuma y continuando por una brecha de aprox. 4 m., sólo transitable en época de estiaje.

Otro acceso a la casa de máquinas es por San Joaquín a la casa de máquinas hay una longitud de 38 km.

### **C. Factibilidad Técnico-Económica.**

La factibilidad Técnico-económica de este proyecto se fundamento en una serie de factores como son: afectaciones relativamente bajas en materia de impacto ecológico por razones de su localización en una zona semidesértica, aunada a una excelente calidad estructural de macizo rocoso para alojar las estructuras del proyecto.

El proyecto utilizará las aguas negras de la ciudad de México después de un recorrido de 200 km. Con un caudal medio bien regulado de  $31 \text{ M}^3/\text{seg.}$ , con una capacidad para generar 1140 Gwh por año que lo coloca en el 8° lugar de producción en el país en plantas del mismo tipo.

La elección de un túnel de fuerza de 21 km. de longitud con una generación de 400 mts. de carga resultó el mayor beneficio que el aproximadamente escalonado de la caída con dos plantas a pie de presa.

La caída total de 560 m. Combinada con un gasto de  $59 \text{ M}^3/\text{seg.}$ , dieron como resultado la utilización de 2 turbinas pelton con potencia de 140 MW cada una. estas turbinas serán las más grandes del país en su tipo.

## D. Características Generales del Proyecto.

### 1. Estudio de avenidas

Dada las características hidrológicas de la cuenca, definen la avenida de diseño, tanto para la obra de desvió como para la obra de exedencias.

Tr(tiempo de retorno) años	Gasto Máximo M <sup>3</sup> /seg.	Volumen Mill M <sup>3</sup>
10	632	310
20	842	403
10,000	2,960	1,209

En todos los casos la duración de la avenida se consideró de 11 días.

### 2. Hidrología.

a. Area de la cuenca del Río Pánuco	84,956km <sup>2</sup>
b. Area de la cuenca hasta Zimapán	11,869Km <sup>2</sup>
c. Número de años de registro (deducidos)	43
d. Ecurrimiento medio anual	982 mill M <sup>3</sup>
e. Volumen medio mensual escurrido	81.8 mill M <sup>3</sup>
f. Gasto medio	31.1 M <sup>3</sup> /seg.
g. Volumen medio anual aprovechado	868 mill M <sup>3</sup>
h. Gasto medio aprovechado	27.4 M <sup>3</sup> /seg.
i. Porcentaje de aprovechamiento	88.1 %

### 3. Obras de Control

#### a. Almacenamiento

1) Elevaciones	Capacidad
2) NAMINO nivel de 1520 msnm	680 mill m <sup>3</sup>
3) NAMO 1560 msnm	1360 mill m <sup>3</sup>
4) NAME 1563	1426 mill m <sup>3</sup>
5) Capacidad por azolves	250 mill m <sup>3</sup>
6) Capacidad útil entre NAMINO-NAMO	680 mill m <sup>3</sup>
7) Capacidad útil para control de avenidas	
8) NAMO-NAME	66 mill m <sup>3</sup>
9) Area ocupada por el embalse al NAME	22.9 km <sup>2</sup>
10) Area ocupada por el embalse al NAMO	21.8 km <sup>2</sup>
11) Area ocupada por el embalse al NAMINO	13 km <sup>2</sup>

#### b. Obra de desvió con TR = 20 años

1) Caudal máximo avenida	810 M <sup>3</sup> /seg.
2) Gasto de diseño máximo	702 M <sup>3</sup> /seg.
3) Elevación de la ataguía aguas arriba	14095 msnm
4) Elevación de la ataguía aguas abajo (ejecutada)	1384 msnm
5) Túnel sección portal	9.4x9.4mt
6) Elevación de entrada	1383 msnm
7) Longitud total	566 m
8) Velocidad máxima	8 m/seg
9) Cierre provisional	obturadores metálicos
10) Cierre definitivo	tapón de concreto
11) Volumen de la avenida	310 mill M <sup>3</sup>
12) Volumen de evacuación del túnel	46020 M <sup>3</sup>

#### c. Ataguía aguas arriba

Estructura de materiales graduados con nucleo impermeable

h - 24.00 mts.

L - 147.00 mts.

Sección tropezal de 90.00 A 12.00 MTS.

#### 4. Cortina

a. Tipo	Arco bóveda de concreto
b. elevación de la corona	1565 msnm
c. Longitud de la corona	115 m
d. Altura total al desplante	207 m
e. Volumen	220,000 m <sup>3</sup>
f. Desplante	1365 msnm
g. Bordo libre	2 m
h. Ancho de la corona	8 m

#### 5. Obra de exedencias (vertedor) con "Avenida máxima probable" (TR- 10,000 años)

a. Gasto máximo avenida	2960 m <sup>3</sup> /seg
b. Volumen de la avenida	1200 mill M <sup>3</sup>
c. Gastos de diseño descarga	2520 M <sup>3</sup> /seg
d. Elevación de la cresta	1547.27 msnm
e. Longitud efectiva del cimacio	19.80 mt
f. Compuertas	radiales 2 de 9.90(ancho) x 17.73(altura)
g. Diámetro de los túneles (2)	9.90 m, r=20.00 m
h. Velocidad máxima en el túnel	25 m/seg.
i. Longitud promedio de cada túnel	550 m
j. Relación de llenado.	0.65

#### 6. Obras de generación de energía.

##### a. Obra de toma

1) Bocatoma	en rampa
2) Elevación plantilla en el canal de llamada	1498 msnm
3) Elevación de la obra de toma	1500 msnm
4) Dimensiones de compuertas	3.90x4.5m
4.1.5 Rejillas	6 Tableros de 3x9.5m

## b. Conducción

- |                                       |         |
|---------------------------------------|---------|
| 1) Diámetro del túnel de conducción   | 4.70 m  |
| 2) Se involucra 4 secc. de excavación |         |
| 3) Longitud del túnel de conducción   | 20964 m |

## c. Pozo de oscilación

- |                                    |          |
|------------------------------------|----------|
| 1) Longitud                        | 133.00 m |
| 2) Diámetro del pozo de oscilación | 3.5x4.5  |
| 3) Altura                          | 12.00 m  |

## d. Tubería de presión

- |  |        |
|--|--------|
| 1) Diámetro de la conducción a presión | 3.5 m  |
| 2) Longitud de la conducción a presión | 1050 m |

## e. Casa de máquinas

- |  |                          |
|--|--------------------------|
| 1) Gastos de diseño por unidad                         | 29.5 m <sup>3</sup> /seg |
| 2) Elevación del eje del distribuidor                  | 948.0 msnm               |
| 3) Velocidad de rotación de las turbinas               | 300 r.p.m.               |
| 4) Carga máxima bruta al NAMO                          | 603.00 m                 |
| 5) Carga bruta mínima                                  | 523.00 m                 |
| 6) Carga bruta de diseño                               | 563.00 m                 |
| 7) Carga neta de diseño                                | 568.00 m                 |
| 8) Generador   | 147.4 MVA                |
| 9) Potencial de cada unidad                            | 146.0 MW                 |
| 10) Capacidad instalada, 2 peltón ( 6 chiflones c/uno) | 292 MW                   |
| 11) Factor de planta medio anual                       | 0.53                     |
| 12) Generación media anual firme                       | 1139.6 Gwh/año           |
| 13) Generación media anual secundaria                  | 152.8 Gwh/año            |
| 14) Generación media anual                             | 1292.4 Gwh/año           |
| 15) Nivel de la subestación                            | 965 msnm                 |
| 16) Dos líneas de salida de Dañu Hgo.                  | 230 kv c/u               |
| 17) Longitud hacia la red Dañu por Huichapan, Hgo.     | 80 km                    |
| 18) Subterráneo casa máquinas (ancho x largo x altura) | 20x78x37m                |
| 19) Gasto de diseño por unidad                         | 29.5 m <sup>3</sup> /seg |

## **E. Escurrimientos-Azolves**

Una parte muy importante del estudio hidrológico lo cual constituyen los escurrimientos que deberán ingresar al embalse del proyecto hidroeléctrico Zimapán, integrados estos afluentes por los registros simultáneos de lluvia, volúmenes y gastos de las estaciones hidrometeorológicas consideradas así como la dotación de agua potable a la ciudad de México, las demandas de riego de las cuencas de los ríos Tula y San Juan y los volúmenes empleados en la Termoeléctrica de Tula. Dada la complejidad de las cuencas en estudio, se planteó un modelo de funcionamiento, llamado la caja negra, que considera sólo los factores que intervienen de manera directa en la integración de los escurrimientos.

Cabe destacar la importancia que tiene el crecimiento del área metropolitana de la ciudad de México, ya que las afluentes de la misma representan un volumen significativo y son desalojados hacia la cuenca del Río Tula, principal aportador del proyecto. De tal suerte que los volúmenes aportados variarán de manera significativa con el crecimiento de la población del Valle de México, por lo tanto se considera que el volumen efluente máximo alcanzará cuando la tasa de crecimiento de la población se estabilice estimada para el año 2026, según las tendencias actuales y las proyecciones efectuadas.

Los Azolves de acuerdo al estudio de aportación de sedimentos, basados en los registros de las estaciones Tula y San Juan, se obtuvo un volumen de sedimentos del orden de 250 hm<sup>3</sup> para un período de 100 años.

## **F. Planeación de la Construcción**

### **1. Organización**

Se ejecuto la construcción de esta obra por contrato mediante concurso, la Gerencia Técnica de Proyectos Hidroeléctricos CFE, a través de la Residencia General del proyecto realizó las actividades de planeación, supervisión y control de obra.

En virtud de que Qro., la capital del Edo. del mismo nombre, se encuentra a 115 km del sitio de obras, se instalaran en dicha ciudad las oficinas administrativas, en tanto que las técnicas quedaron en las inmediaciones del sitio de las obras. Se estima que para la ejecución de dicha obra se contara con 3600 trabajadores de los cuales 3150

corresponden a contratistas y 450 a la gerencia y supervisión.

## 2. Cronograma

Las fechas más importantes dentro del cronograma de construcción fueron tentativamente las siguientes:

. Inicio de las obras de infraestructura	Abril 1989
. Inicio de la obra de desvió	Junio 1990
. Inicio de la obra de contención	Enero 1991
. Desvió del río	Abril 1991
. Inicio de fabricación de turbinas	Febrero 1992
. Inicio de fabricación de generadores	Febrero 1992
. Inicio de obras de generación	Junio 1990
. Inicio de obras de exedencia	Marzo 1990
. Cierre final del túnel de desvió	Sep. 1993
. Sincronización de la 1ª unidad generadora	Oct. 1994

## G. Impacto Ecológico

Dada la importancia del proyecto hidroeléctrico y las causas trascendentales que intervienen en ese rubro ecológico para la zona que afectara la construcción de esta obra, la CFE en lo relativo al ambito ecológico, realizó estudios de ecología e impacto ambiental aplicando acciones que permiten reducir los impactos adversos al ecosistema y adecuar la utilización de los recursos de la superficie del futuro embalse y su área de fluencia, en apego a la normatividad que marca la ley gral. de equilibrio ecológico y protección del ambiente, incluye los siguientes aspectos.

Hidrología.- Consiste en avalar la calidad del agua de los ríos Tula, San Juan y Moctezuma, así como la caracterización de la hidrología subterránea del área de influencia del futuro embalse, lo anterior asociado a la climatología de la zona.

Vegetación Acuática y Riparia.- Desarrollo programas para determinar las especies potenciales formadores de malezas acuáticas que podrían proliferar en el futuro embalse, evaluar la tasa de crecimiento y establecer la estrategia de remación.

Fauna Acuática.- Desarrollo programas cuyos objetivos consisten en realizar un inventario de especies para detectar aquellas susceptibles de ser introducidas en burdos temporaleros con fines de autoconsumo. Identificar aquellas especies indicadores de contaminación.

Flora Terrestre.- Desarrollo programas cuyo objetivo principal consistió en identificar las especies en peligros de extinción, caracterizar la fauna en función de los tipos de vegetación y determinar las especies de valor cultural, Geológico, económico, identificar los diferentes vectores de enfermedades.

Epidemiología.- Desarrollo programas cuyos objetivos generales consisten en realizar un diagnostico situacional de salud, establecer un seguimiento epidemiológico en coordinación con los programas concernientes a vectores de enfermedades.

Disposición de Desechos Sólidos y Líquidos.- Consistio en programas cuyos objetivos principales son disponer de las residuos provenientes de campamentos y nuevo poblado, mediante métodos adecuados (rellenos sanitario y pozos de absorción) en sitios que no representan impactos a corto plazo y largo plazo.

Area Natural Protegida.- Consiste en un programa cuyo objetivo principal es restituir las superficies impactadas definitivamente por la construcción del proyecto.

Dicha área actualmente tiene una superficie de 8760 Ha, incluye 7 diferentes tipos de vegetación que se encuentran en lo que será el futuro embalse, subestaciones, casa de máquinas, caminos de acceso y Nuevo Poblado.

Los 7 tipos de vegetación se encuentran bien conservadas lo cual garantizan una diversidad de especies animales vegetales superior a las que impactan el Proyecto Hidroeléctrico Zimapán.



## CAPITULO II

### GEOLOGIA DEL TUNEL DE CONDUCCION

#### II. Geología y Geotécnica de la Conducción.

##### A. Estratigrafía Regional de la Conducción.

La Geología que aflora en la franja a lo largo del túnel de Conducción Son de origen Sedimentario, ígneo y Metamórfico: Las Primeras son carbonatadas, arcillosas y clásticas finas. Las ígneas son de tipo intrusivo y extrusivo y las últimas metamorizadas por contacto con cuerpos intrusivos o cercanos a ellos, constituidas originalmente de areniscas, lutitas y calizas que produjeron skarn, hornfels y pizarras.

Las rocas sedimentarias corresponden a formaciones litoestratigráficas que varían desde el jurásico superior hasta el cretácico, compuestas de los siguientes unidades; las trancas (js), el doctor (hd) y soyatal (ks).

Las rocas intrusivas corresponden a cuerpos plutónicos en forma de apófisis y diques de granodiorita en la zona del pozo de oscilación.

Las rocas volcánicas pertenecen a la formación las espinas, compuestas de andesitas cubiertas por volcánicos indiferenciados y paquetes de riolitas en la superficie.

Regionalmente los principales formaciones que afloran en el área del proyecto incluyen a rocas marinas del mesozoico, separadas en cuatro formaciones: Fm. las trancas del jurásico superior-cretácico inferior, Fm. El doctor del cretácico inferior, Fm. soyatal y Fm. Méndez del cretácico superior; de igual forma incluyen a rocas ígneas intrusivas y extrusivas, así como continentales terciarias-cuaternarias. De los cuales se indican su composición geológica de las anterior mencionadas que atraviesa el túnel de conducción así como las formaciones adyacentes a la zona, como se muestra en la Fig.1

## OBRA DE CONDUCCION

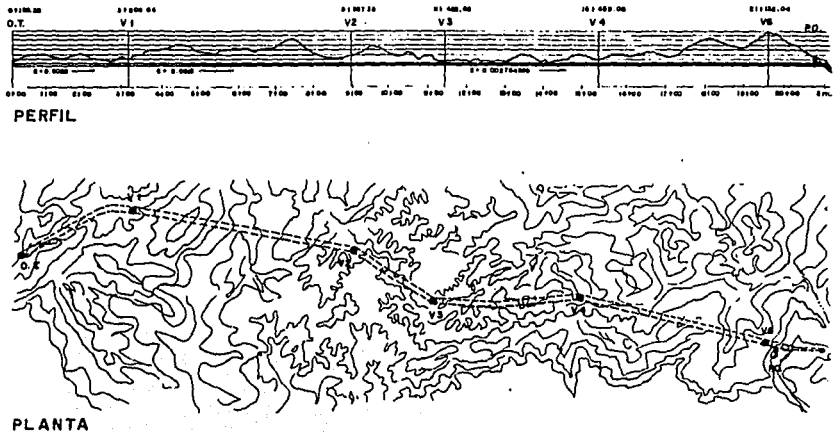


Fig.1 Trazo de la Conducción

### 1. Formación las trancas (JT), Jurásico Superior.

Esta formación está representada por una secuencia areno-calcareá en la base y por una calcárea-arcillosa en la cima. La familia las trancas tiene un espesor calculado de 800 m que se encontró cerca de casa de maquinas. Esta formación subyace concordantemente a la Fm. El doctor.

### 2. Formación el Doctor (KD), Cretacico Inferior.

Esta formación en el área consiste en dos fases: una potente secuencia de gruesos bancos calcáreos y por calizas arrecifales, periarrecifales, micritas, brechas dolomíticas y dolomías., la otra secuencia formada por calizas de cuenca, que se presentan en capas delgadas a medianas, con presencia de lentes y bandas de pedernal y hacia su base por calizas con delgados cuerpos de lutitas.

### **3. Formación Soyatal. (KS). Cretácico Superior.**

Esta formación se presenta en alternancia rítmica de calizas arcillosas y lutitas calcáreas en estratos de 0.10 a 0.20m de color gris, predominante caliza en la parte inferior y la lutita en la superior, observándose ocasionalmente limolitas y delgadas capas de yeso en la cima, la superficie de esta roca se presenta con un aspecto lustroso ó grasoso con poca adherencia cuando se presenta en estratos laminares y medios.

Los estratos de esta formación también se caracterizan por los numerosos pliegues bien sedimentados, causados por ruptura y flujo de la roca no consolidada.

### **4. Formación Méndez. (KM).**

Dentro del proyecto aflora en las mismas áreas que la fm. soyatal. Está compuesta por alternancia rítmica de areniscas y lutitas, predominando hacia la base las lutitas en estratos desde laminares hasta de 0.30-0.40m, color gris verdoso; hacia la cima predominan las areniscas de grano fino a grueso, en estratos de 0.20 a 0.50m, color gris claro, intercalados con lutitas laminares en paquetes de 0.15 a 0.20m. El espesor de esta unidad es cercano a los 1000m.

### **5. Formación el Morro (TM). Terciario Inferior.**

Consiste en un conglomerado fluvio-lacustre, esta bien cementado, presenta como componentes fragmentados de calizas, areniscas, pedernal y rocas volcánicas, alojadas en una matriz arenosa, los fragmentos varían de sub-angulares a redondeados con tamaños de 0.02 a 0.50m.

### **6. Formación las Espinas (TIGEI-TIGEA).. terciario Medio.**

Para esta formación se distinguen tres miembros: dos volcánicos u uno volcanosedimentario. El miembro inferior, está constituido por derrames, tobas y brechas de composición andesítica que lateralmente tiene variación a materiales volcano-sedimentario, formado por tobas arenosas, tobas bentoníticas y conglomerados. El superior está formado por derrames y brechas andesíticas y riolíticas y

ocasionalmente basálticas con algunas horizontales volcano-sedimentarios y paleosuelos intercalados.

## **7. Formación tarango: (TT). Terciario Superior.**

En el área del proyecto aflora aisladamente en la parte Sur. esta formación esta constituida por conglomerados, limolitas, areniseas, lutitas y escasas tobas arenosas, su espesor varía de unos centímetros en los limites de la cuenca a más de 400m en la parte central de la misma.

### **B. Orientación y Geología Superficial del Trazo de la Conducción.**

La obra de toma de la conducción queda ubicada en la margen derecha del río San Juan, a 1200m al Este de su confluencia con el río tula y del cañón del infiernillo.

El trazo del túnel de conducción, tiene una orientación de N7°E del km 0+000 al 10+000 (V-1) y continua desde este punto al km 16+000 (v-4) con una orientación N-S. A partir de este lugar hasta su terminación en el pozo de oscilación el trazo varía su rumbo al N 14° E.

El trazo definitivo de la conducción se localiza sobre rocas sedimentarias volcánica e intrusivas, afectadas por fallas inversas, normales y emplazadas en estructuras anticlinales y sinclinales, simétricas y recostadas.

Los plegamientos en las rocas sedimentarias, se caracterizan por estructuras simétricas y suaves, mientras que los sedimentos depositados en la cuenca de zimapan fueron plegados con mayor intensidad, debido a las características mecánicas de estas rocas.

Las rocas volcánicas afloran principalmente del km 1+600 a 7+100 y sus espesores se han calculado por geofísica y por exploración directa desde algunos metros hasta 200mt en su sección más potente.

### **C. Areas estudiadas sobre la Conducción.**

La exploración geológica se llevo a cabo en 6 áreas sobre el trazo del túnel de conducción, tuvo como principal objetivo el conocer más detalladamente las características litológicas de los diversos niveles estratigráficos de los intrusivos y fallas presentes.

Estas áreas de estudio prevén la interpretación Geológica y la presencia de anomalías geofísicas al nivel del túnel, así como efectuar una correlación entre área y área logrando de esta forma tener un panorama más completo y detallando del modelo geológico sobre el túnel de conducción.

#### **AREA 1.**

Se localiza en la porción sur del trazo de conducción entre los cadenamientos 2+740 y 3+240.

##### **a) Objetivo**

Verificar la interpretación preexistente, en la cual se proponía la presencia de un cuello volcánico con un espesor de 200m y brechamiento asociado.

##### **b) Comentarios**

Con la exploración efectuada se puede decir que no hay evidencias de un cuello volcánico en este cadenamiento y que el brechamiento presente se debe a la fricción e inclusión de sobre la andesita preexistente.

Las rocas volcánicas representan una cubierta superficial por lo que se cortara a nivel del túnel; en cambio, la excavación en este tramo atravesará la parte superior de la formación el Doctor, cuya calidad de la roca se considera buena, debido a las velocidades registradas (4.1-5.2 km/seg). Como se muestra en la Figura No.2

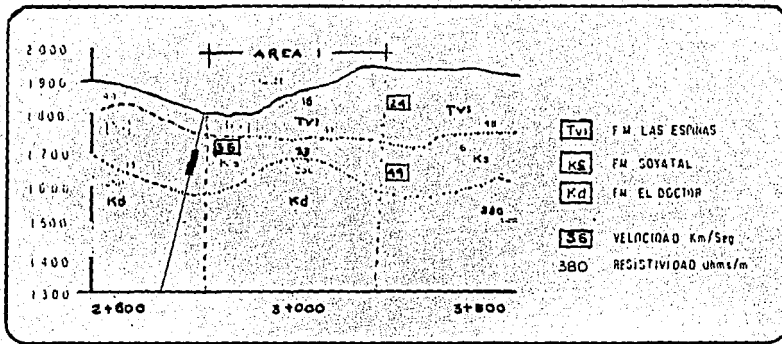


Fig.2 Area 1 de Estudio

## AREA 2.

Se ubica hacia la porción Sur central de la conducción entre los km 7+500 a 8+000.

### a) Objetivo

El estudio detallado de la porción media de la formación Méndez y del cuerpo riolítico, que la intrusión para determinar sus posibles comportamientos geotécnicos al nivel del túnel.

### b) Estratigrafía

La secuencia sedimentaria expuesta en el área constituye la parte media de la formación Méndez, cuya proporción de areniscas y lutitas en esa porción es aproximadamente 40% y 60%, respectivamente. Esta secuencia es intrusionada por un dique con 60m de espesor y una ramificación del mismo de 20m de composición riolítica.

### c) Estructura y fracturamiento

La zona presenta un intenso plegamiento con orientación general NW-SE, compuesto de anticlinales y generalmente cerradas o selladas por calcita.

### d) Comentarios

La porción de la formación Méndez constituye un macizo rocoso de buena calidad, a profundidades mayores de los 30m, mientras que en superficie se presenta muy alterada e intemperizada.

El afloramiento del intrusivo riolítico exhibe alteración, pero se considera, que a la profundidad del túnel se encuentra sanó y silicificado, por lo cual no se prevén problemas de sustentación al atravesarlo.

De acuerdo a la interpretación efectuada, el túnel será excavado sobre la base de la formación soyatal ó encima de la formación el doctor, como se muestra en la Fig.3

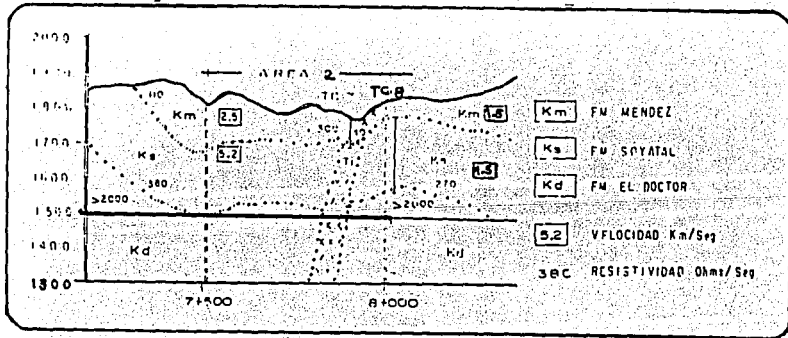


Fig. 3 Area 2 de estudio

### AREA 3.

Se localiza en la porción central de la conducción entre los cadenamientos 10+170 y 10+670.

#### a) Objetivo

Cartografiar y definir las características litológicas del contacto formacional Méndez- soyatal para definir su posible comportamiento geotécnico en el sub-suelo.

#### b) Estratigrafía

La secuencia expuesta comprende la parte superior de la formación soyatal, constituida por una alternancia de calizas y lutitas, además de la porción basal de la formación Méndez, formada por una alternancia de areniscas y lutitas.

#### c) Comentarios

La transición formacional soyatal-Méndez se observa alternada e interperizada, pero por su construcción litológica se considera que la parte inferior de la formación Méndez y la parte superior de la formación soyatal presentarían buenas condiciones mecánicas en el sub-suelo, como se muestra en la Fig. 4

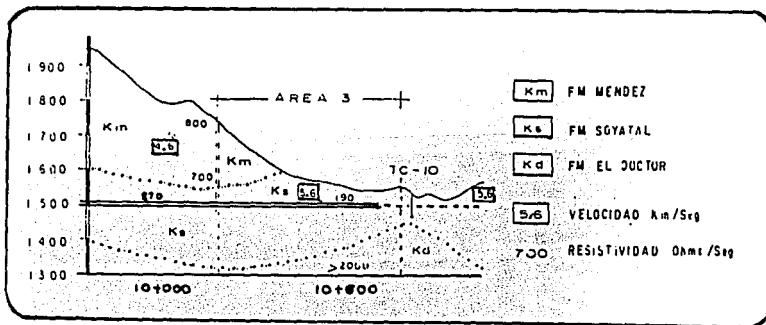


Fig. 4 Area 3 de Estudio



#### **AREA 4.**

Se sitúa sobre el trazo de la conducción hacia la porción central del mismo, entre los cadenamientos 11+150 a 11+700.

##### **a) Objetivo**

Realizar el estudio detallado de la transición formacional soyatal-Méndez y el efecto producido en ella por la intrusión de la compleja red de diques, a fin de determinar el tipo de contacto o alternación en la roca encajonante y su posible comportamiento mecánico al nivel del túnel.

##### **b) Estratigrafía**

Aflora la porción superior de la formación soyatal y de manera escasa la parte basal de la formación Méndez.

La formación soyatal está constituida por una alternancia de lutitas microgranulares y estratos delgados de caliza.

La secuencia representativa de la formación Méndez está formada por lutitas calcáreas, intercaladas con limolitas y areniscas.

##### **c) Comentarios**

De la exploración realizada se desprende que la transición formacional soyatal-Méndez presentara buenas condiciones geotécnicas en el subsuelo. Por otra parte, los contactos dique-roca sedimentaria encajonante son netos, es decir, que no presentan arcilla o alternación entre ellos, que pudieran significar problemas de estabilidad durante la excavación.

Finalmente a la profundidad del túnel se espero encontrar la parte media de la Fm. soyatal, siendo la calidad de la roca buena, dados las velocidades de 4.4 y 4.2 km/seg en estos tramos detectados, como se muestra en la Fig. 5

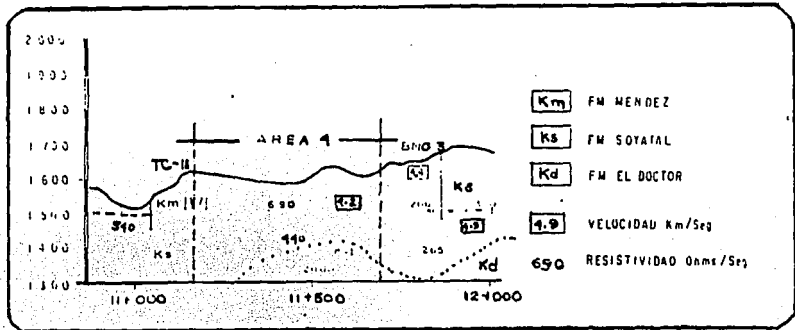


Fig. 5 Area 4 de estudio

**AREA 5.**

Se localiza entre los cadenamientos 13+995 y 14+485

**a) Objetivo**

Conocer las características de la posición basal e intermedia de la formación soyatal y las de la falla Malacate, cuya presencia se infería en esa área en base a los estudios regionales realizadas con anterioridad.

**b) Estratigrafía**

Aflora exclusivamente la formación soyatal en su porción basal e intermedia y está representada por calizas oscuras en alternancia con lutitas de igual color.

**c) Estructura y fracturamiento.**

La secuencia presenta un intenso plegamiento compuesto de anticlinales y sinclinales. Los pliegos están truncados por dos fallas normales en "Echelon" con orientación NW-SE, saltos pequeños y con inclinación solo vertical. Aparece además la falla Malacate, la cual aparece un dique andesítico con 0.70m de espesor y su salto

es indeterminado ya que no existen horizontales de referencia para su cálculo, aunque deben ser menor de 300m determinadas al norte de Zimapan.

**d) Comentarios**

La porción intermedia basal de la formación Soyatal presenta calidades de roca de regulares a buenas en superficie lo que permite suponer que en el subsuelo será buena la calidad del macizo rocoso efectuada en la exploración directa con velocidades de 5.0-6.8km/seg allí presentes.

A base de la exploración efectuada se comprobó la existencia de la falla Malacate, la cual no presenta arcillosidad en su plano de falla, sin embargo al nivel de excavación del túnel deberá considerarse en la zona de falla la manera de ademar el túnel durante su colado para evitar caídos y derrumbes, como se muestra en la Fig. 6

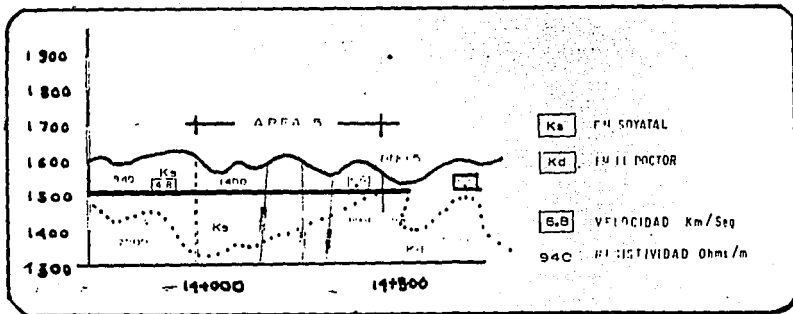


Fig. 6 Area 5 de estudio

## **AREA 6.**

Se localiza sobre el trazo de la conducción entre los cadenamientos 15+985 y 16+485.

### **a) Objetivos**

Desarrollar el estudio detallado de la porción basal de la formación soyatal y la porción superior de la formación el doctor, a fin de conocer sus características litológicas y estructuras para inferir su comportamiento en el suelo.

### **b) Estratigrafía**

Las rocas expuestas pertenecen a la porción basal de la formación soyatal y consisten de una alternancia de calizas arcillosas y lutitas de color oscuro que presentan abundante pirita.

A 50m al N del área aflora la formación el doctor en sus facies de cuenca, constituida por calizas con abundante pedernal; el contacto entre ambas formaciones es normal y transicional.

### **c) Comentarios**

El contacto entre las formaciones soyatal y el doctor es transicional; las calizas de la primera se hacen masivas y desaparecen las lutitas.

Por otra parte se puede decir que las anomalías de baja resistividad puedan correlacionarse con la presencia de sulfuros de plata, plomo zinc, etc.

Finalmente de la interpretación geológico-geofísica se infiere que el túnel atravesara a las calizas con pedernal de las facies, de cuenca de la formación el doctor se estima que la excavación se realizara sobre un macizo rocoso de buena calidad, como se muestra en la Fig. 7

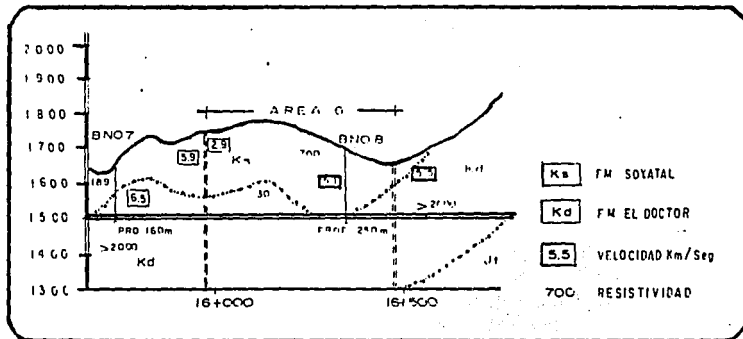


Fig. 7 Area 6 de estudio

**D. Comentarios de la roca y formación real encontrada ya excavadas los 21km del túnel de conducción (Mayo.93).**

**Formación El doctor**

Esta constituida por calizas micríticas de color gris crema a beige en estratos de 0.10 a 0.40 m de espesor, con laminillas de arcilla de color ocre entre estratos ocasionalmente, y estilolitas paralelas a los estratos. Esta formación se encontró en los cadenamientos 0 + 000 - 2 + 815. 3+290 - 4+520 y 6+655 - 8+200.

La roca no presentó problemas de estabilidad tanto con estratos perpendiculares como paralelos al túnel. Con respecto al agua ésta fue escasa contando solo con goteos.

En el cadenamiento 1+380 al 1+425 se localizó la caverna la cual tiene una dimensión N-S/70° E semirrellena de arcilla, calcita y bloques de caliza, sus dimensiones son: de 12 a 15 m de ancho: de 15 m de alto en el eje del túnel y 28 en total: mayor a 50 m de largo.

### **Formación Soyatal-Méndez**

Esta formación fue cortada en los cad. 2+815 - 3+290. 4+520 - 6+655 y 8+200 - 17+155, la constituye una alternancia de lutitas carbonosas y calizas arcillosas (margas) de color gris oscuro a gris, en estratos laminares de 0.20 m de espesor en el primer y segundo cadenamiento a partir del cad. 9+000 al 13+500 se encuentran lutitas margas y calcarenitas en estratos de 0.20 a 0.60 m de espesor.

La formación Soyatal-Méndez, presenta un cambio en las propiedades geomecánicas y geoquímicas producto del metamorfismo de contacto a que fue sujeta la roca, a partir del cad. 13+500 al 17+155 donde se pone en contacto normal con la Fm. Tamaulipas.

Durante la excavación en los cadenamientos 16+ 300. 16+930 y del 17+040 al 17+200, se presentó gran cantidad de agua la cual circuló a través de fallas y fracturas hasta el túnel de conducción.

### **Formación Tamaulipas**

Formada por calizas micríticas de color gris en estratos de 0.05 a 0.40 m de espesor con bandas, lentes y nódulos de pedernal de color negro, la cual fue cortada en el cad. 17+155 - 19+370. La roca es de buena calidad, no presentó caídos, que pusieran en peligro la estabilidad del túnel.

Uno de los problemas que se presentó durante la excavación del túnel fue la cantidad de agua que cayó al mismo, provocando principalmente por circulación del agua a través de fallas y fracturas en el cadenamiento 17+480.

### **Formación Trancas**

Es una alternancia de calizas arcillosas, lutitas y calcarenitas de grano fino de color gris oscuro y negro en estratos de 0.10 a 0.25 m de espesor, presenta un metamorfismo de bajo grado principalmente en el pozo de oscilación. Fue cortada del cad. 19+370 al 20+970.

## **Geología estructural del túnel**

El marco tectónico regional está controlado por los movimientos progénicos laramídicos y postlaramídicos, de tal manera que los grandes esfuerzos comprensivos a que fue sujeta la zona, provocaron que las rocas del banco calcáreo del Doctor cabalgara sobre rocas arcillosas incompetentes de la formación Soyatal, como se encuentra en el flanco SW del sinclinal de Maconi.

Al término de la compresión se origina la distensión caracterizada por fallas normales que deja fosas tectónicas que son rellenadas por el material volcánico como en las fosas Xajhá y Yethay.

A continuación se describen las principales estructuras geológicas detectadas en el túnel de conducción.

### **Cabalgadura el Doctor**

Superficialmente presenta un rumbo NW 35° -40° SE/24°SW es el rasgo morfológico más importante de la región. En el túnel su rumbo es NW40°Se/25°-40°SW. se ve intrusionada por el dique pozo hondo en el cad. 8+200.

Asimismo presenta tres fallas de cabalgadura secundaria que afectan principalmente a los ejes del anticlinal.

- 1.- Falla banco de piedra
- 2.- Falla ventana 1
- 3.- Falla las Pilas

La primer aflora al SE de la fosa Yethay, en el arroyo pegado al banco de piedra, presenta un rumbo NW70°SE/35°Sw en el túnel (cad. 1+120) y en superficie la inclinación es de 56° al SW.

La segunda falla que se localiza a la entrada de la ventana uno pone en contacto a rocas calcáreas sobre rocas arcillosas su rumbo es NW30°SE/38°SW en el túnel cadenamamiento 2+815.

La falla Las pilas en superficie pone en contacto a las calizas con las lutitas mientras que en el túnel el contacto es caliza con caliza, presenta un rumbo NW26°SE/40°SW en el cad. 4+000.

### **Sinclinorio Maconí**

Presenta un rumbo NW 40°SE en general, limitado al NE por el anticlinorio del Piñón y al Sw por la cabalgadura de El Doctor, Está constituido por rocas arcillosas de la Fm. Soyatal-Méndez, las cuales se encuentran deformadas por plegamientos y fallas (fallas inversas) en sus ejes, que hace que el espesor real de la Fm. se incremente.

### **Anticlinorio El Piñón**

Al igual que el anterior el rumbo es NW40°SE en el núcleo aflora la Fm. Trancas mientras que en los flancos, se encuentra la Fm. Tamaulipas, ambas formaciones están muy plegadas.

### **Falla Espejos-Cadereyta**

Es una falla normal de rumbo E-W al oeste del río Moctezuma mientras que al este cambia a NW50°SE/85SW hasta ocultarse bajo el material volcánico. El túnel la corta en el cadenamamiento 6+890 con un rumbo NW50SE/74°SW no presentó problemas de estabilidad ya que su contacto fue caliza con caliza mientras que en superficie fue caliza con lutita.

### **Falla Yethay**

Falla normal localizada en la ventana 1, pone en contacto a rocas arcillosas de la Fm Soyatal con calizas de la Fm. Doctor, su salto es de 400 m aproximadamente, el túnel se corto en el cadenamamiento 3+290 y un rumbo NW40°SE/79°Sw.



## CAPITULO III

### EXCAVACION- T. CONDUCCION

#### A. Orientación y Características

El túnel de conducción está localizado en la confluencia de los ríos San Juan y Tula que forman el río Moctezuma a partir del Cañón del infiernillo en los límites del edo. de Hidalgo y Querétaro, atravesando en dirección norte-sur el distrito minero de Zimapan, Hgo.

Esta obra fue contratada por la C.F.E. bajo licitación internacional por el consorcio Zimapan constituido por las empresas, Impregilio-Italia, Condux del Grupo Protexa-México, Dumez Internacional-Francia y cogefar Imprest-Italia, quienes escogieron como procedimiento de excavación del túnel el método de barrenación y voladura. El túnel tiene sección herradura de 5.20m de diámetro, lleva revestimiento de concreto hidráulico con 4.70 m de diámetro en su sección terminada teniéndose programada su ejecución en 4 años con terminación en agosto, 1994.

#### 1.- Estrategias de Construcción

La gran extensión del proyecto, en combinación con una fisiografía de altas montañas, constituida por grandes cabalgaduras y extensos sinclinatorios con pendientes de laderos y cañadas muy grandes, plantea siempre una problemática difícil, sobre el proyecto y construcción de los caminos de acceso a los diferentes frentes de excavación al propio túnel. A su vez ante esta problemática de los accesos, la C.F.E. decidió dejar a cargo del contratista la selección y ejecución de los accesos a ventanas del túnel de conducción.

#### 2.- Caminos de Acceso.

Para llegar a los frentes de trabajo se tuvo la necesidad de habilitar 10km de acceso ya existentes, construir 27km de caminos nuevos, en ambos casos con un mínimo de corona de 5m y pendientes máximas del 15%; así mismo se acondicionaron 24km del camino Zimapan-Boquilla, con un ancho de corona de 6.0m. Y pendientes máximas del 12% fig.8

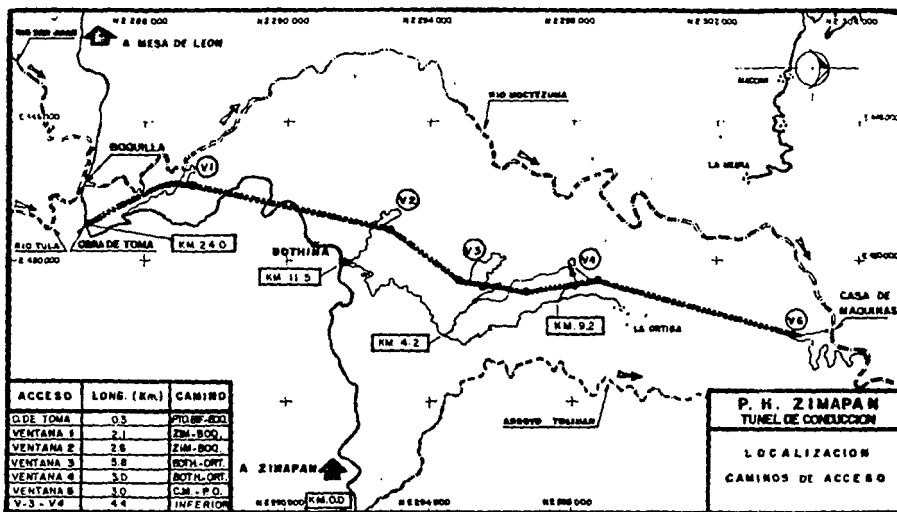


Fig. 8

### 3.- Ventanas de Acceso

Como alternativas para dar acceso al túnel de conducción y atacando simultaneamente por diferentes frentes, se eligieron los frentes; obra de toma, ventanas 1, 2, 3, 4 y 6 con la opción de contar con diez frentes de excavación, lo que sería más rentable y óptimo para ampliar con el programa de ejecución, la plataforma tipo de una ventana es la que se muestra en la Fig. 9

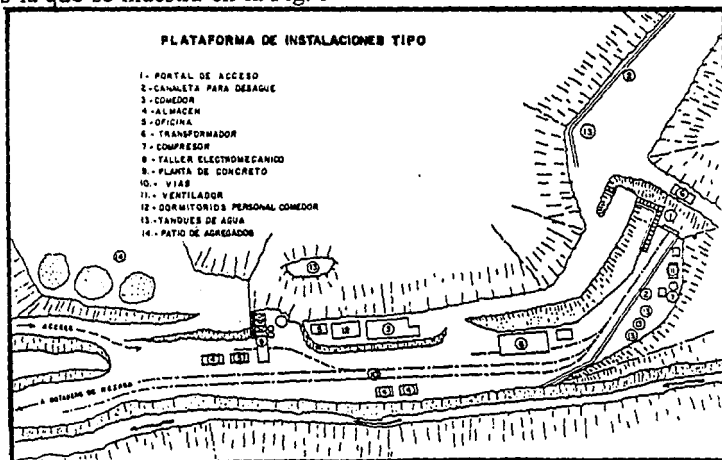


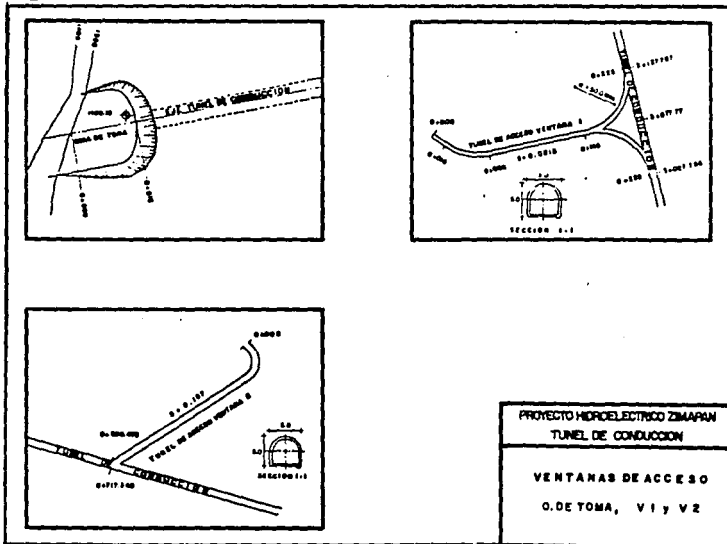
Fig. 9

#### 4.- Túneles Crucero y/o Ventanas de Acceso.

Se determino la posición de entrada de los túneles, entre las elevaciones 1500 y 1454 M.S.N.M.; muy cercanas a arroyos y cañadas naturales, lo que obligó a realizar obras de drenaje especiales. El acceso del túnel de conducción por obra de toma fue directo; en las ventanas fué a través de túneles de acceso sección portal de 5.0 m de diámetro los cuales presentaron las siguientes características:

El acceso por V1 fue construido con dos ramales de 303m de longitud; la V2 de 584m. sin ramales y una pendiente del 16%; la V3 con dos ramales de 380m. de longitud; la V4 de 522m. sin ramales y la V6 de 264m. pasando por el pozo de oscilación; sumando un total de 2053 m. de longitud de los cinco accesos al túnel de conducción.

Particularmente el cruceo de V2 constructivamente fue el más complicado, ya que la pendiente del 16% dificulto el retiro de rezaga y bombeo producto de la excavación; los cruceos de V1 y V3, por la alteración natural de la roca hubo necesidad de aplicar tratamientos de soporte con anclaje de fricción, concreto lanzado reforzado en sitios con doble malla electrosoldada a sección completa, principalmente en las zonas de bifurcación. En todos los casos por la falta de infraestructura y organización al inicio de obra, hicieron aún más problemática la constitución de estos cruceos. Figuras 10-11.



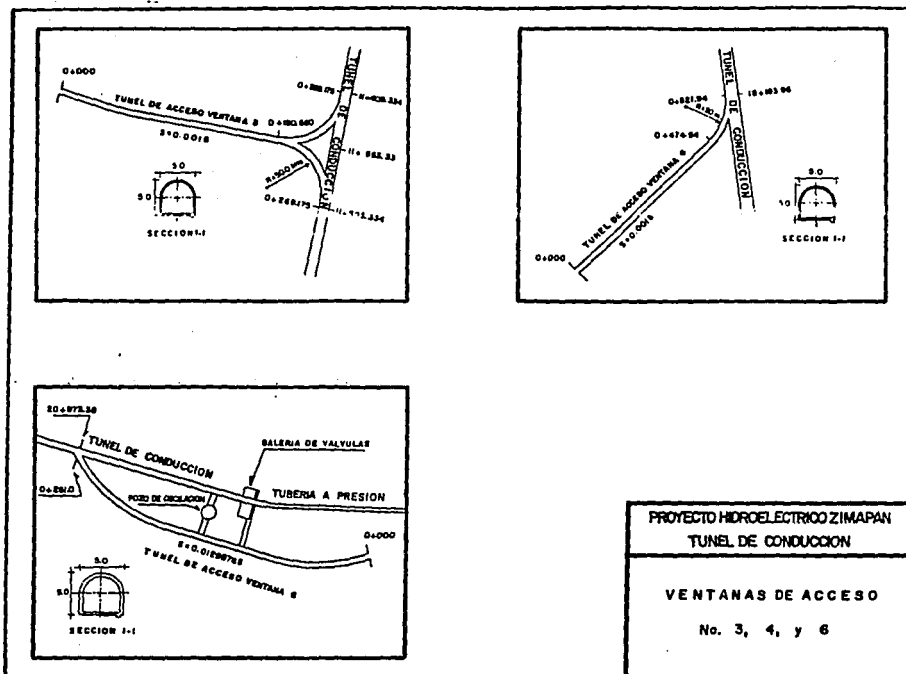


Fig.11

### 5. Túnel de Conducción Logística y tipos de secciones

Dado el procedimiento de excavación de barrenación y uso de explosivos. Inicialmente se consideraron ocho frentes de excavación a partir frente obra de toma y ventanas 1, 3, 4, 6; a raíz de que las condiciones de la roca del tramo V1-V2 eran adversas fue necesario excavar la ventana 2, para obtener los avances requeridos de esta forma la programación por excavar de cada frente fue como se indica:

Frente	(M)	Frente	(M)
OT-V1	1360	V3-V2	2016
V1-ot	1697	V3-V4	2211
V1-V2	3792	V4-V3	1430
V2-V1	1847	V4-V6	2806
V2-V3	820	V6-V4	2965

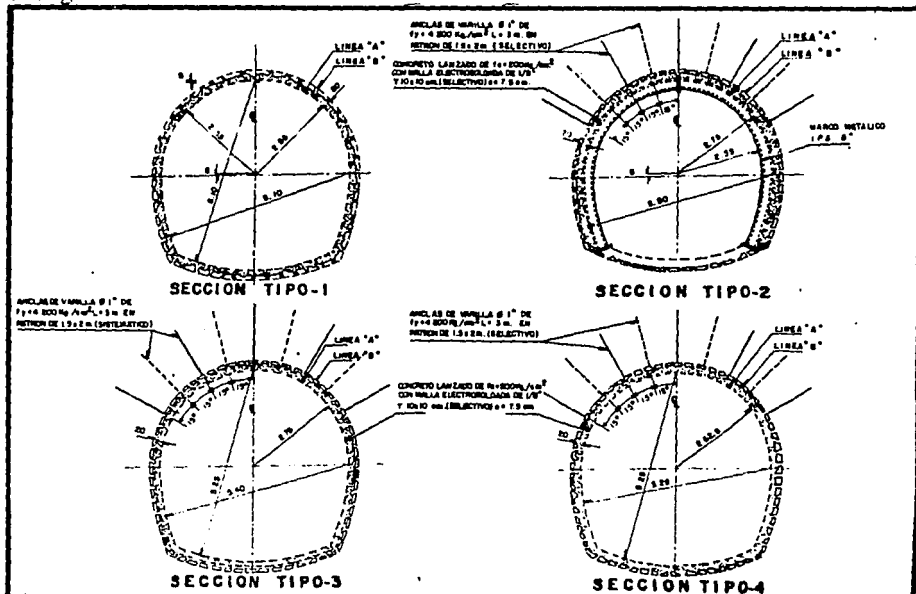
Se eligieron cuatro tipos de secciones de excavación, las cuales varían de 5.10 a 5.40m. Y estas dependen de las condiciones de roca y estructuras geológicas que cruzarían durante la excavación y requerirían de tratamiento de soporte de las cuales se clasificarían de la siguiente forma:

Sección 1. es de 5.10m. se aplicó en aquellas zonas donde el túnel cruza en roca de buena calidad, con fracturas cerradas y limpias ó con estratigrafía sin intercalación de arcilla y con orientación favorable, susceptibles de colocarse algún anclaje selectivo.

Sección 2. es de 5.50m. se aplicó en aquellas zonas donde la roca es de mala calidad o existen fallas geológicas, para colocarse marcos metálicos y adicionalmente si fuera necesario colocar concreto lanzado y anclas.

Sección 3. es de 5.40m. y considera la colocación de concreto lanzado selectivo de 10cm de espesor con malla electrosoldada y en segunda etapa colar concreto armado.

Sección 4. es de 5.25m., se aplica en aquellas zonas del túnel, en donde se encontraron bloques espaciados definidos por estratos, fallas y fracturas, siendo el tratamiento a base de anclas y/o concreto lanzado selectivo hasta 7.7 cm. de espesor, como se muestra en la Fig. 12 Secciones de excavación.



El porcentaje correspondiente a cada sección fue el siguiente:  
Sección tipo 1 el 75%, tipo 2 el 1%: tipo 3 el 7% y tipo 4 el 17%.

## **B) Descripción de maquinaria y equipo para excavación.**

### **1.Barrenación**

Equipo: Jumbo

Características: Marca: tamrock  
Modelo: Daramatic.  
Tipo: H307M.

#### Datos Generales:

País de Origen:	Finlandia
Transito:	Sobre rieles
No. de brazos:	Tres
Longitud de barras:	3.20 y/o 3.80 M
Voltaje:	440 volts
Capacidad de perforadora:	50 H.P
Consumo de energía P/motor:	37 K.W.
Consumo de agua P/perforadora:	35 lts/min
Bomba para percusión y avance:	110 lts/min ó 165 bar
Bomba para rotación:	28 lts/min ó 30-140 bar
Bomba para mov. de brazos:	16 lts/min ó 200 bar
Bomba de aceite:	21 K.W.
Presión de agua:	10 bar
Consumo de agua por ciclo de barrenación:	7000 lts.

### **2. Equipo de rezaga (Fig.13)**

Equipo: Pala rezagadora

Características:  
Marca: Schaeff  
Tipo: TTC-112

Datos Generales:

País de origen:	Alemania
Motor eléctrico:	53 H.P.
Consumo de energía:	40 K.W.
Motor diesel:	56 H.P.
Tránsito s/orugas:	4 km/hr
Remolque:	5-15 km/hr
Rendimiento:	2 M <sup>3</sup> /min
Teórico:	1.5 M <sup>3</sup> /min ó 90 M <sup>3</sup> /hr.

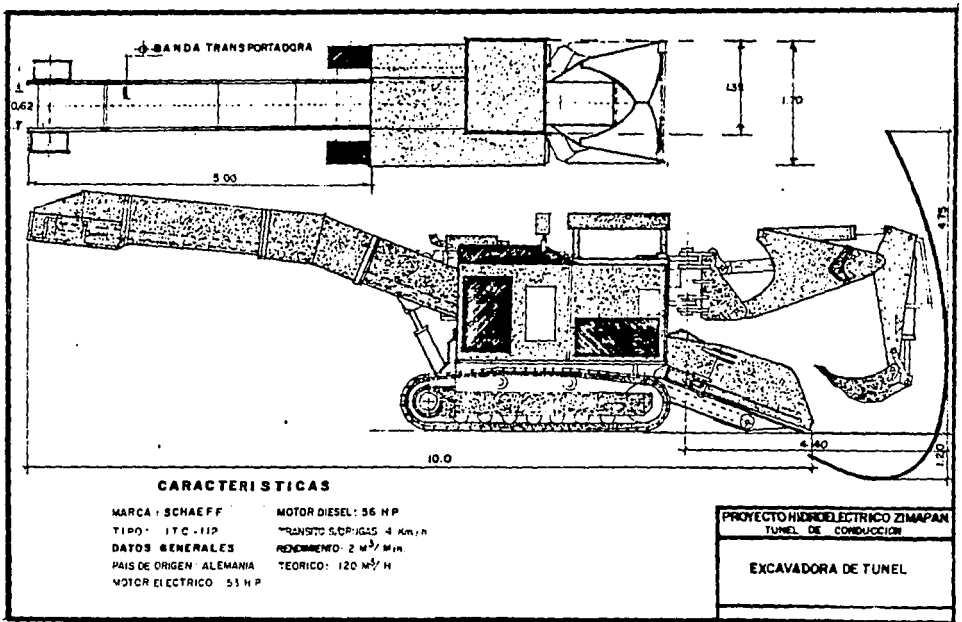


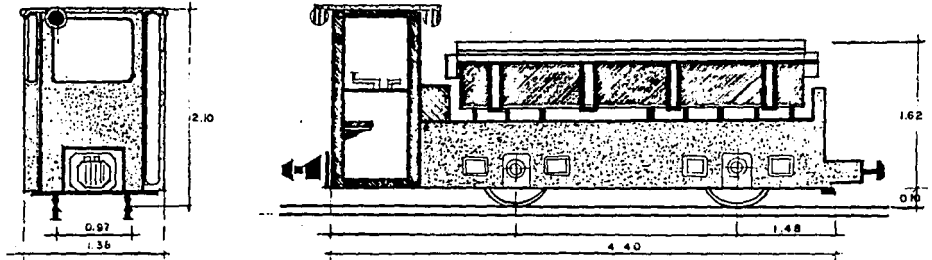
Fig.13 Rezagador de túnel

### 3.- Transporte

Equipo: Locomotora (Fig. 14)

Características:

Marca:	Plymouth	Largo: 4.62 mt.
Modelo:	DMD-24	Ancho: 1.46mt.
Tipo:	Sobre vía-diesel	Alto: 1.70 mt.
Capacidad:	15 H.P.(15 ton.)	
País de origen:	U.S.A.	



**C A R A C T E R I S T I C A S**  
 MARCA : PLYMOUTH  
 PAIS DE ORIGEN : U. S. A.  
 MODELO : D. M. A.  
 TIPO : SOBRE VIA- DIESEL  
 CAPACIDAD : 150 H.P. ( 15 TONS.)

PROYECTO HIDROELECTRICO ZIMAPAN TUNEL DE CONDUCCION
LOCOMOTORA

Fig. 14-A

Equipo: vagoneta (Fig.14-B)

Características:

Tipo:	Volteo-sobre vía
Marca:	Vicenzo-valente
Capacidad:	6 M <sup>3</sup>
País de origen:	Italia



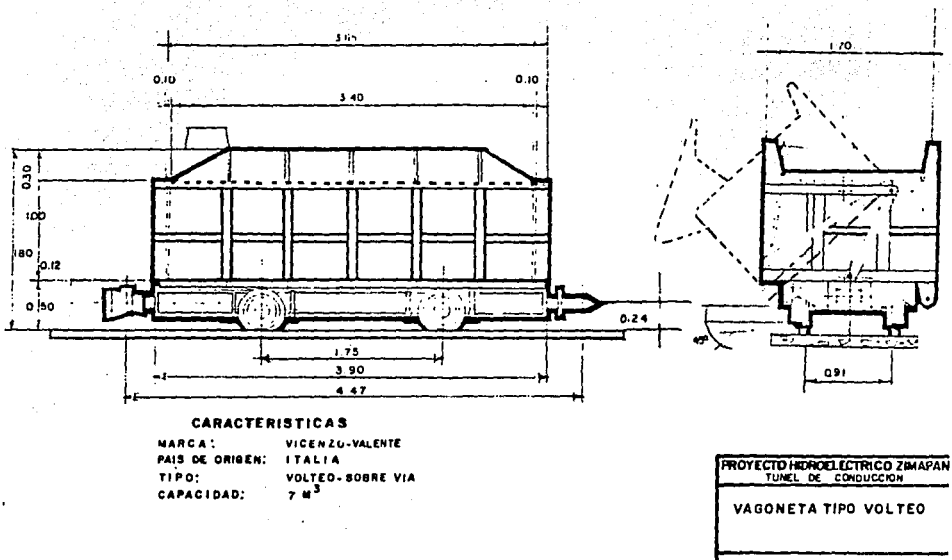


Fig. 14-B Vagoneta tipo volteo

#### 4. Concreto Lanzado (equipo: lanzadora de concreto. (Fig.15)

##### Datos Generales:

Equipo: Máquina para proyector de Gunita, hormigón y chorro de arena

Marca: Aliva

País de origen: Suiza

##### Datos Técnicos

Rendimiento 2.0M<sup>3</sup>/hr (Gunita)

##### Acondicionamiento Eléctrico

Motor:Trifásico, Rotor en Cortocircuito

Tensión: 3 x 380v 50 Hz, puede suministrarse  
a tensiones: 500v 50/60 Hz.  
440v 60 hz y 500v 50 hz.

Adición de Agua

Presión de trabajo: 6 bar (min, 3 bar)

Manguera: 19 mm.

Caudal requerido: 15 l/min.

Acondicionamiento Neumático:

Motor: Motor de aire comprimido, ejecución con brida

Consumo de aire: 3-4 m<sup>3</sup>/min a 6 bar

Potencia: 2.5 Kw a 1500 r.p.m.

Dimensiones

Longitud: 1200 mm

Ancho: 700 mm

Altura de alimentación: 950 mm

Altura Total: 1200 mm

Peso: 280 Kg

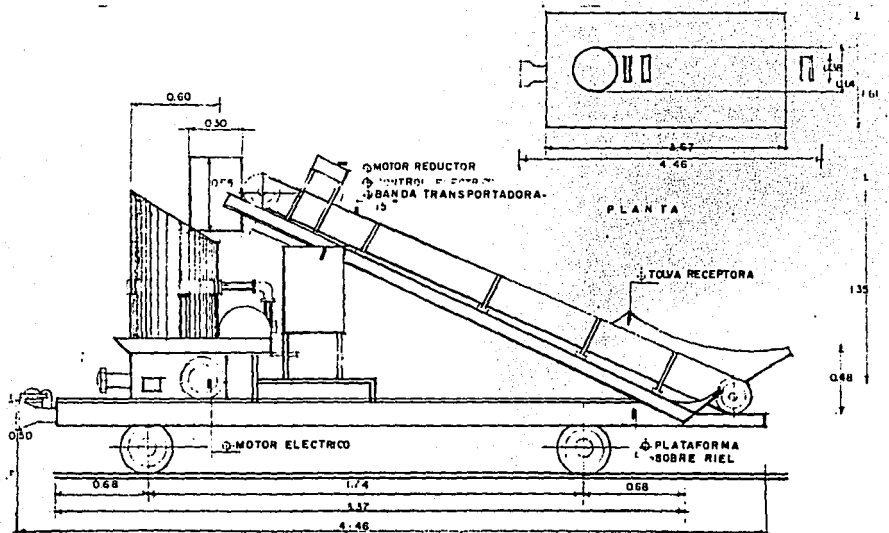


Fig.15 Lanzadora de Concreto

## 5. Equipo de transporte de concreto (carro moran o mixer). Fig.16

### Características:

Marca:	Sacma	Ancho: 1.50 mt.
País de origen:	Italia	Alto: 2.03 mt.
Modelo:	Mecánico	Largo: 6.84 mt.
Tipo:	SNA/6, 2e/01 (sobre vía)	
Capacidad:	6 M <sup>3</sup>	
Potencia:	23 cv.	

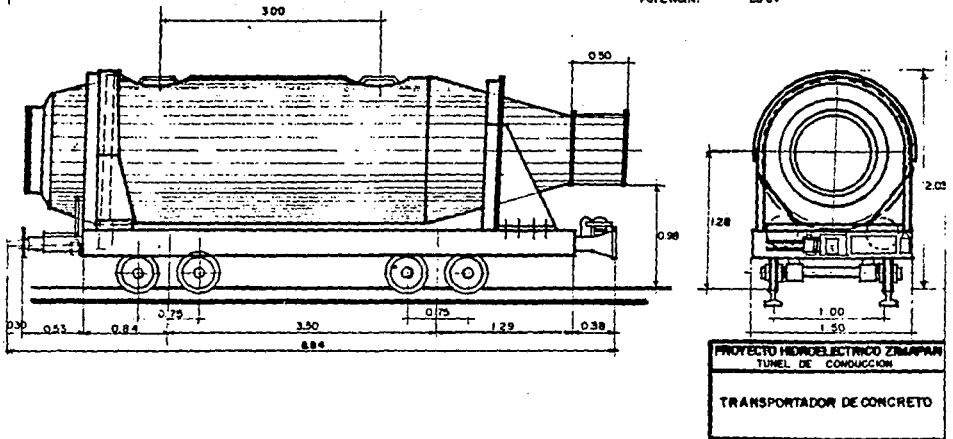


Fig.16 Transportador de Concreto

## 6. Volcador de Vagonetes de rezaga: Electrohidráulico marca valente

## 7. Ventiladores ABC 100 - 120 H.P. marca Berry 150 - 200 H.P. marca ABC

## 8. Compresor (Aire comprimido)

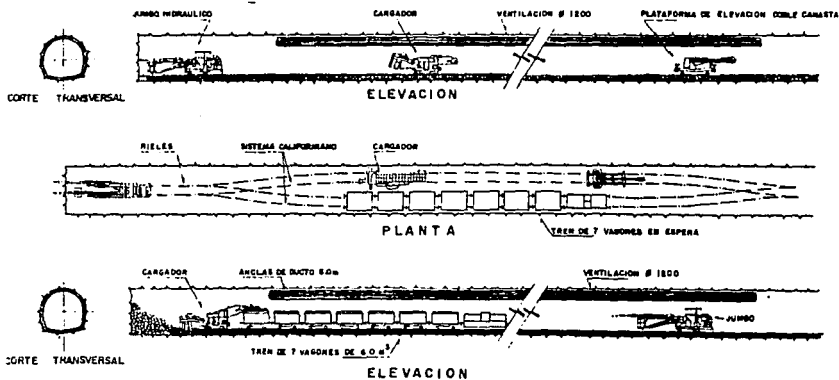
Modelo:	xp750 (Ingersoll-Rand)
Entrega aire libre actual:	750 cfm/354 lts/seg.
Presión normal de operación:	125 psi/8.6 bar
Tipo compresor:	Tornillo asimétrico monoetápico
Sistema refrigerante:	Inyección de aceite
Marca del motor:	Caterpillar
No. cilindros:	6
Capacidad de lubricante:	34 litros
Sistema eléctrico:	24v tierra neg.
Capacidad combustible:	340 lts.

## 9. Cargador Frontal: Caterpillar D936E 3 yd3 Dresser D936 3 yd3

## 10. Tractor Caterpillar D-6 s/orugas

### C. Procedimiento Constructivo de Excavación (V1-OT, V1-V2, V3-V2, V3-V4, V4-V3, V4-V6, V6-V4).

Este procedimiento se generaliza para los frentes anterior descritos ya que los ciclos de excavación, son similares para ambos usando el mismo tipo de maquinaria para su desarrollo, variando solo en algunas de ellas donde se menciona el ciclo de excavación con tratamientos y sin ello. La ilustración gráfica del proceso constructivo se muestra en la Fig. 17



## **1. Ciclo de excavación**

Para un ciclo de excavación en cualquier frente de los ya mencionados se describe en forma parcial las actividades desarrolladas para el ciclo por secuencia ordenada y detallada, aunque posterior se analizará los tiempos reales para la elaboración de una voladura en el cual se pueden realizar actividades simultaneas, eficientando tiempo en el ciclo.

### **Transporte e instalación de equipo de barrenación.**

El transporte del Jumbo sobre rieles se realizaba desde la plataforma de maniobras exterior hasta el frente de excavación del túnel, este era empujado por una locomotora (Plymouth 150 H.P.) a una velocidad media de 40 m/min - 2.4 km/Hr, es lento el traslado de este equipo por las dimensiones del mismo, al cruzar cambios de vía y cuidar no dañar el ducto de ventilación.

Al llegar al frente de excavación se realizan las conexiones de agua, aire comprimido y energía eléctrica (440 Volts). El Jumbo se apoya sobre dos Gatos hidráulicos integrados en su chasis para evitar algún movimiento lateral ó transversal durante al período de barrenación. Este movimiento del Jumbo desde el traslado hasta la fijación del mismo se realizaba con la cuadrilla de personal de barrenación, el tiempo promedio durante este movimiento era de 12 min.

Cabe mencionar que el tiempo de retiro del mismo en promedio era de 8-10 min. (tiempo que duraba la iniciación de la mecha detonante).

## **2. Trazo de la planilla de barrenación**

El trazo de la plantilla se realizó al inicio de la excavación apoyado con dos trompos ancladas en la bóveda a cada 4 mt. y un hilo plomada en cada uno para el eje vertical, dos trompos laterales a 4mts., apoyados en las tablas del túnel para alinear la pendiente, este método se realizó como anteriormente se menciona al inicio de la excavación de los accesos, parte inicial del túnel de conducción y zonas donde existen curvas.

Posterior a este método el control topográfico para minimizar tiempos y llevar una mejor presición, se controlaba por medio de rayo láser en tramos rectos el cual se describiran posteriormente sus características.

El tiempo promedio para este trazo fue aprox. de 5-7 min, normalmente se efectuaba en forma simultanea durante la maniobra de preparación del Jumbo, minimizando este tiempo en el período del ciclo.

### **3. Instalación de aditamentos para el avance de excavación**

Los aditamentos que se debían llevar a par con la excavación era la instalación de tubería de agua-aire, drenaje; ventilación e iluminación.

Estas instalaciones se llevaban a una distancia de 20 mts. como mínimo y 40 mts como máximo, esto es con objeto de no dañar las instalaciones durante el período de la voladura en caso de la distancia mínima y para la distancia máxima por limitaciones de tubería ( agua-aire-drenaje), para distribuciones mayores el volumen de aire para ventilación del frente , ya no es suficiente para despejar gases y mantener en condiciones de operación del personal de excavación, las características de los aditamentos son:

a) Tubería de aire comprimido 6", tramos de 6 ml

Tubería de agua y drenaje, 3", tramos de 6 ml

Estos son soportados en una pared lateral del túnel (tabla) o base de una ancla vr. o 1" como soporte.

#### **b) Ductos de Ventilación.**

La colocación de estos ventiladores fue a base de una plataforma ó en su defecto se usaba el Jumbo como tarango, estos ductos podían ser de diámetro variable, .90 a 1.40 MT de o por 20 M<sup>3</sup> c/u, este a su vez se fijaba con una ancla ó grapa en la bóveda del túnel, una a cada 4.0 mts. lo más recto posible para evitar curvas, debería llevar el mismo nivel el ducto aunque la bóveda no sea uniforme.

El montaje de estos dos conceptos a-b se realizaba con personal de la cuadrilla de barrenación, 1 sobrestante, 2 perforistas, 4 ayudantes generales. El tiempo promedio de estas dos actividades fue de 40-60 min.

c) La instalación eléctrica, se deslinda del ciclo de la voladora, ya que un oficial eléctrico y su ayudante trabajaban en forma independiente durante el ciclo, se van colocaban soportes a 20 mts. para el cableado de 220 volts (alumbrado) y 440 volts para alta tensión (alimentación del Jumbo-rezagadora). Se utilizaba hasta el frente de excavación un par de reflectores de 440 votts a 220 v. que estos a su vez eran movibles como se requería durante el poblado, lanzado de concreto y retiro antes de la voladura.  
Fig. 18-19

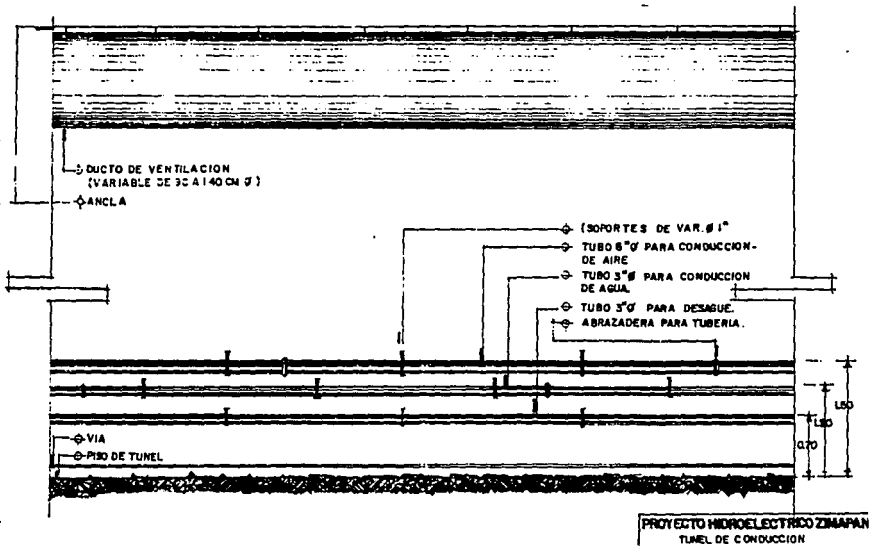


Fig. 18 Instalaciones interiores del túnel

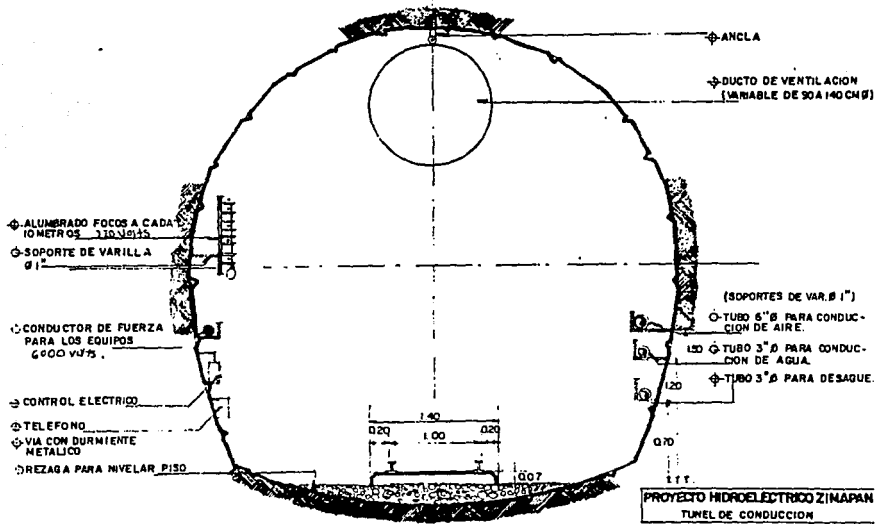


Fig.19 Instalación tipo

#### **4. Colocación de vía férrea.**

Este trabajo se desarrollaba con la misma cuadrilla de excavación y se realizaba cada tres voladuras, el personal que se requería es 1 op. de schaeff, 1 sobrestante y 5 ayudantes, el tiempo promedio para esta actividad fue de 40 min.

El proceso para la colocación fue el siguiente:

- a. La Schaeff cava el piso dejando el nivel requerido
- b. La Schaeff lleva el riel, al colocarlo, se alinea y nivela con respecto al eje del túnel, cabe aclarar durante el período de rezaga la vía se transportaba en una vagoneta dejándola cerca del frente de excavación a un costado del túnel.
- c. Se colocaban sus planchuelas y pernos para fijarlo con el anterior, posteriormente se rellenaban los vacíos con rezaga para garantizar su estanquidad.

#### **Observaciones:**

Durante la colocación de vía férrea se podían abatir tiempos en otras actividades.

- 1) Durante la puesta de riel, 3 personas se encargan de marcar la sección. También se trasladaba el Jumbo al fondo, en un cambio de vía ó en el sistema californiano. Las veces que no se colocaba vía, el Jumbo se llevaba al fondo en cuanto se concluía la rezaga y la marca de la sección se hacía durante los 10 min. de preparación del Jumbo.
- 2) Durante la puesta del riel, se podían perforar los barrenos necesarios para fijar tubería en las tablas, este trabajo podía hacerse igualmente durante la barrenación, el equipo que se uso era una barrenadora de pierna, el personal, 2 perforistas y 3 ayudantes.
- 3) Durante la rezaga y puesta de riel, se podía instalar las tuberías de agua y aire comprimido, drenaje e iluminación.
- 4) Se eficiente la colocación de vía a cada tres voladuras al instalar una placa de acero 1 1/22" de espesor x6M<sup>L</sup> con guías de riel en la parte superior, en la unión con el último riel tenía una rampa al mismo nivel, esta placa era móvil el cual sin la utilización de esta se tendría que colocar vía a cada dos voladuras.

NOTA: Habría que cuidar la centralización del riel respecto al eje del túnel y la nivelación para evitar el zig.zag (que generaba descarrilamientos constantes) y para



evitar tener que nivelar otra vez los rieles, principalmente por causa de formación ó acumulación de agua.

### 5. Barrenación de la plantilla

La barrenación se realizaba con un Jumbo electrohidráulico de 3 brazos sobre vías, operado con dos personas, siendo el más común el mod. H307M, el cual era trasladado al frente de excavación por una locomotora; el diámetro que se barrenaba era de 102 mm para los barrenos sin carga (quemadose aire) y 45 mm para los barrenos cargados, la longitud de barrenación era de 3.20 a 3.80 mts; el rendimiento de barrenación en roca caliza era de 87 m/hr. En lutitas o roca con estratificación delgada el rendimiento era de 115 m/hr; los ciclos de barrenación variaban de 120 y 90 min. respectivamente, con un promedio de barrenos por plantilla de 50+4 para la formación el doctor y 60+4 para la formación soyatal.

Las brocas que se utilizan eran de carburo de tungsteno de una configuración redondeado de 6 a 8 botones en promedio, de uno a tres orificios para inyectar el agua, su elección dependia del tipo de roca; entre más fracturada se encuentra o con presencia de empaques de arcilla, se utilizaba la broca con más orificios; la roca más compacta requiere de menos agua.

El Consumo de brocas dependiendo el tipo de formación era el siguiente.

Tipo de Formación	Tipo de roca	Duración Prom MI	Consumo de agua M <sup>3</sup>
Doctor	Caliza	200-220	95
Soyatal	Lutitas	200-220	95
Trancas	Lutitas y Areniscas	90-120	45

- El tiempo de barrenación promedio era el siguiente:

Número de barrenos:  $55+2=57$ ; barreno por pistola  $57/3 = 19$

Tiempo por barreno: 3 min (normales) + 3min(quemados)

Tiempo por cambio de posición: 20min = 0.12

$T = 19 (3 + 0.12) = 59.28 \text{ min} = 0.99 \text{ Hr.}$  (Barrenos normales)

$T = 3 (5 + 0.12) = 15.36 \text{ min} = 0.26 \text{ hr}$  (barrenos Quemados)

$T_T = 74.7 \text{ min} = 1.25 \text{ Hr.} = 1 \text{ Hr. } 15'$

Tiempo tomado en campo: 1.50 Hr = 1 Hr. 30'

Eficiencia: 83.3%

- El cambio de acero de barrenación (brocas) no influye en este período ya que se cambiaba mientras se realizaba la rezaga o durante su mantenimiento.

## 6. Carga y Conexión (poblado de los barrenos).

Inmediatamente a la terminación de la barrenación se iniciaba la carga de la plantilla, se aprovechaba como plataforma el propio Jumbo; se utilizaba explosivos tovox-Dupond (Hidrogel) en salchicha de 1 1/2" de diámetro por 16" de longitud y para el post-corte se utilizan de 1" x 39" de longitud: su densidad es de 1.1. gms/c.c. y velocidad de 4050 m/seg. (13300 pies/seg.); manejado en cajas de 25 kgs.

### a. Tipo de Detonante-Nonel

Es un detonador con retardo de tiempo eléctrico y secuenciales de tiempos preciso, el cual transmite velocidades de 1829 M/seg, (6000 pies/seg) de un extremo a otro; no puede ser iniciado con electricidad estática, flama, fricción o impacto. El nonel es conectado con cordón detonante y esto a su vez con mecha (de seguridad) para su encendido.

#### Partes del detonante

1) Tipo Ms, milisegundo (rojo) del No.1 (25 Ms/4.9M) al No.9 (250 Ms/4.9M) utilizados en las cuñas de la plantilla.

2) Tipo Lp, períodos largos (amarillo) del No.1 (0.2 seg/4.9 m) al No.12 (6.45 seg/ 4.9 m), utilizados en el resto de la plantilla o sea ayudantes y poscorte.

**b. Cordón detonante.-** Primacord, este se usa para unión de toda la serie de noneles, conectado al final de este una mecha de seguridad, la velocidad de iniciación del primacord es 7000 m/seg.

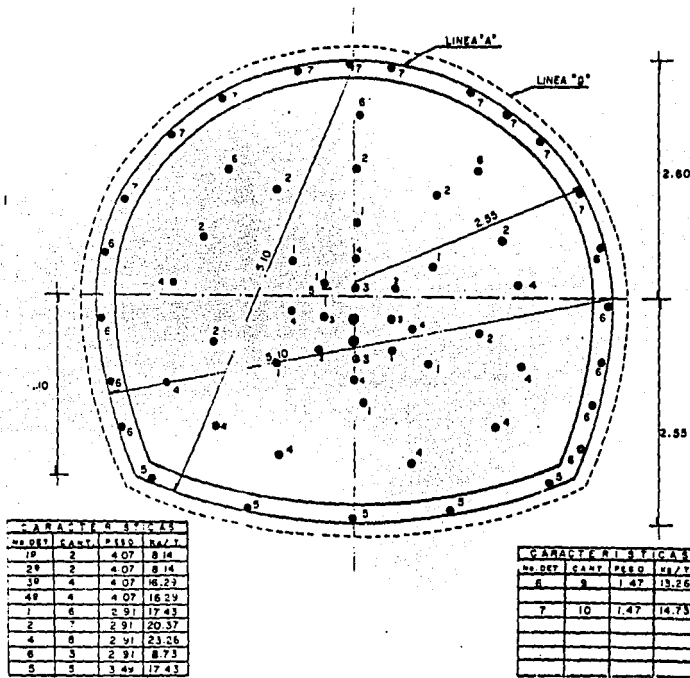
**c. Mecha detonante.-** Esta mecha se usa para dar la iniciación a la voladura tiene una velocidad de 3 min/mts. el cual normalmente se usaba la longitud deseada de acuerdo

a la distancia donde se debe resguardar el personal, en este caso para túnel se usaba 3-4 min para dar tiempo al personal a salir o colocarse en un lugar seguro.

**d. Plantilla tipo (Fig. 20)**

SECCION TIPO I

FRENTE VI A V2



**e. Forma de llenado de la plantilla**

Ubic.	Nº	Cant.
Bnos.	Bnos	Expl.
		(Kg)
Poscorte	19	27.99
Cuña	12	49.00
Piso	5	17.43
Ayudantes	24	69.72
Suma	60	164.14

## f. Datos generales de la plantilla

Número de barrenos	60 pzas
Diámetro de barrenos cargados	17/8"
Diámetro de barrenos vacíos	3 pzas (3" )
Long. de barrenación proyectada	3.80m
Long. de barrenación efectiva	3.50m
Area de Sección	22.86m <sup>2</sup>
Explosivos / voladura	164.14 kg
Volumen de voladura(22.86 x 3.50)	80.01M <sup>3</sup>
Volumen abundado (factor 1.6)	128.02M <sup>3</sup>
Carga específica (164.14/80.01)	2.05 kg/M <sup>3</sup>
Barrenación específica (2.28m/80.01)	2.85 M/M <sup>3</sup>
Eficiencia de Voladura	0.92

Por consiguiente ya descritos los principales componentes para la carga de la plantilla de barrenación, esta actividad se desarrollaba en un tiempo promedio de 60-70' min. La barrenación carga y disparo, se realizaba con la cuadrilla de personal siguiente: un cabo de excavación, dos operadores de Jumbo, un ayte. operador de Jumbo, 4 pobladores y cuatro aytes . de poblador.

## 7. Voladura

Para llevar a cabo la voladura como se mencionó anteriormente el personal se debe resguardar en un lugar seguro dentro ó fuera del túnel, la distancia mínima para soportar la disipación de energía de dicha voladura son aproximadamente 400M<sup>l</sup> dentro de un escape o nicho.

## 8. Ventilación

Posterior a la voladura se debe considerar un tiempo razonable para disipar los gases producto de la voladura, este tiempo depende de la distancia del frente de excavación al portal de entrada del túnel; normalmente se consideraba un tiempo promedio de 30' min. aún para distancias largas (2-3km).

Para satisfacer las necesidades del personal que labora dentro del túnel en cuanto

a calidad del aire se refiere, los valores aceptables. Para un ciclo de trabajo se consideraba un flujo de aire en el frente de 18 a 25M<sup>3</sup>/seg.

Para la ventilación se utilizaba tubería flexible de 1400mm de diámetro que representa una buena relación entre sección útil y pérdida de carga, permitiendo un buen aporte de aire, una de las ventajas de este tipo de ducto es lo rapidez en su colocación. En los casos previstos para utilizar ventiladores en serie, se utilizaba junto a las equipos de ventilación un tramo de tubería metálica para evitar los efectos de subpresiones sobre la tubería flexible. Se utilizaron en la obra 2 tipos de ventiladores de diferentes potencias.

PEABODY ABC DE 200 y 150 H.P. de capacidad, tipo TTS (USA). Para diámetros de tubería de 1400 mm.

BERRY DE 100 y 120 H.P. de capacidad, tipo ADM -52 y 60 (Francia). Para diámetros de tubería de 900 y 800 mm.

El ducto de ventilación es tubo de lona flexible (ventiflex) de 0.8 a 1.40 mts de diámetro de procedencia Nacional.

Para reducir el ruido de los ventiladores tanto en el exterior como en el interior del túnel se acopla en sus dos extremos un silenciador marca PEABODY ABC de fibra de vidrio, longitud 3.0m por 1.40 m: de diámetro; de procedencia U.S.A.

#### LOCALIZACION DE VENTILADORES

Frente	Long. A. Vent. (M)	No. Vent. (H.P.)	Marca	DIAM. DUCTO (M)
OT-V1	1000	2-100	BERRY	1.20
V1-OT	1850 Y 1100	200 Y 100	ABC Y BERRY	1.40
V1-V2	1200 Y 2700	2-150 Y 200	ABC	1.40
V2-V1	1760	2-200	ABC	1.40 Y 1.20
V2-V3	1060	2-100	BERRY	1.20
V3-V2	2300	2-150	ABC	1.40
V3-V4	2500	2-150	ABC	1.40
V4-V3	2300	2-150	ABC	1.40
V4-V6	1780 Y 1370	2-200 Y 100	ABC Y BERRY	1.40
V6-V4	1780 Y 1370	2-200 Y 100	ABC Y BERRY	1.40

Esta localización de ventiladores se muestra en la fig. 21

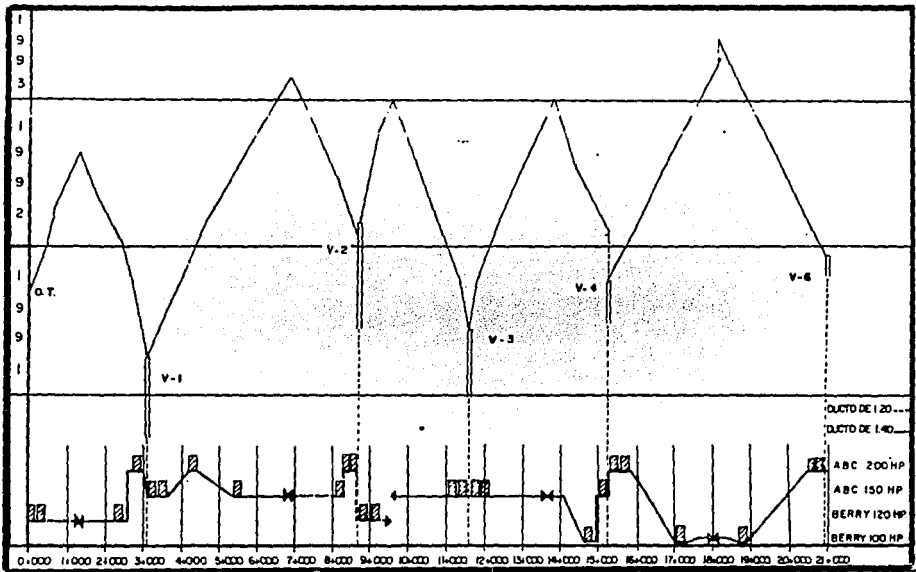


Fig. 21

## 9. Amacice y retiro de rezaga

Posterior a la voladura y ventilación del frente de excavación, se inspecciona en las condiciones que quedo el avance dado por la tronada respecto a la estabilidad de la roca principalmente en la bóveda, se realizaba la operación de amacice la cual se realiza a mano (con barretas) esta actividad era ejecutada con 2 ayudantes de la cuadrilla de excavación. El tiempo promedio de esta actividad era de 20' aproximado (este tiempo no lo involucramos en el ciclo de excavación ya que se puede absorber durante el periodo de rezagado).

El retiro de rezaga producto de la voladura se obtenía en tamaños máximos de 20", lo cual permitía su extracción con una pala rezagadora, equipada con un cucharón y transportador de banda marca Schaeff, modelo DRS112 (Fig. 12), con rendimientos reales de 90 m<sup>3</sup> /hr; este equipo se trasladaba con una locomotora al frente de excavación para más rapidez desplazandose con sus ruedas tipo ferrocarril, además de

su tránsito sobre orugas; la carga para el retiro de rezaga se realizaba en tolvas tipo ferrocarril de 7.0 M<sup>3</sup> de capacidad cada una (Fig. 14) en grupos de cinco, remolcados con una locomotora diesel de 150 H.P. (Fig.13); el tiempo de rezaga para un volumen de 120 M<sup>3</sup> se realizaba de 2.5 a 3.0 Hrs. aproximadamente, tiempo que varía de acuerdo a las distancias entre el frente y la zona de descarga; para una rápida movilización de los equipos, se utilizaba un cambio de vía tipo California desplazable.

Por el frente obra de toma, se excavaron 1465 m, en los frentes de V2 se excavaron 3000.0 m, los frentes de V4, se excavaron 1600m, rezagándose con cargador frontal sobre neumáticos Cat-966 ó similar, utilizando para maniobras nichos de 5 x 5 x 8 m, a distancias promedio de 450 m. Resalto el frente de V2 por la dificultad que presentaba esta actividad dada la fuerte pendiente que existía en el túnel de acceso (17% - 700M<sup>L</sup>), formaron parte de la problemática, el desalojo del agua de barrenación y filtraciones.

Para el movimiento de equipos dentro del túnel, se considero la instalación de vías de ferrocarril de 1.0 m de ancho y 30 kg/M<sup>L</sup>, en su mayoría sobre durmientes metálicos y algunas tramos de madera. Su mantenimiento era importante porque de ello dependía la producción del frente y su seguridad durante el tránsito de los equipos; se dispuso de una cuadrilla para su mantenimiento; para el proceso de rezaga se instalaron cambios de vía a cada 250 m del frente como máximo para el movimiento de las tolvas. En el caso de V1-V2 y V4-V6 que eran los tramos más largos se instalaron cambios de vía denominados "California", el cual consiste en una plataforma que tiene movimiento y se desplaza por medio de un sistema electrohidráulico conforme se requiera, sobre la vía principal; este cambio cuenta con dos vías paralelas con una longitud de 100m para alojar el equipo y grupos de tolvas requeridas durante el proceso de rezaga. (Fig.22)

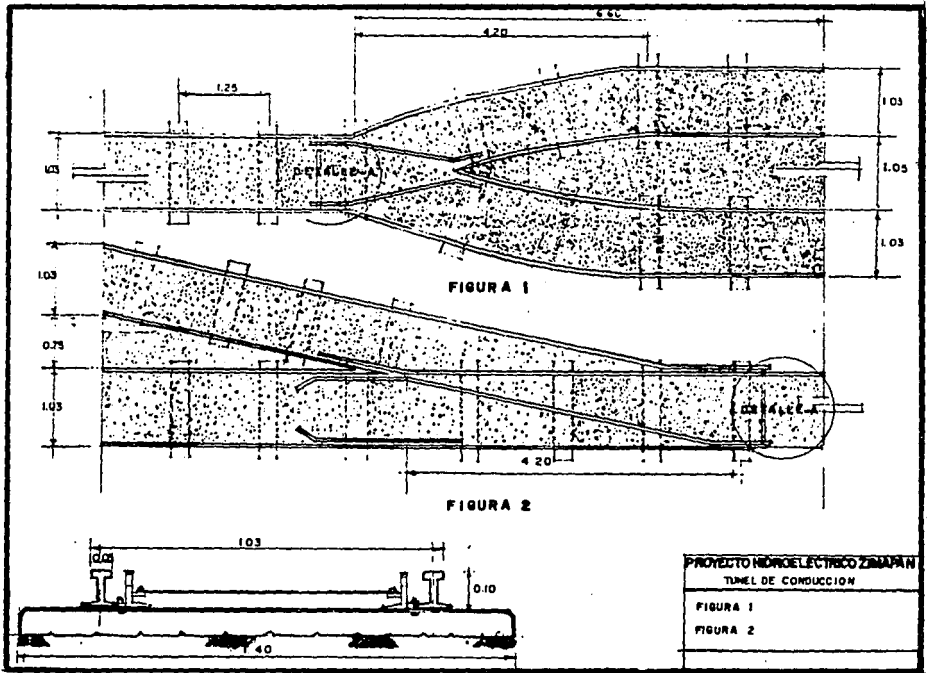


Fig.22 Cambio de vía

## 10. Análisis de tratamientos

A partir de la información geológica y Geotécnica generada durante los estudios, la cual reportó índices buenos en la calidad de la roca, se determinó que la excavación del túnel requeriría sistemas de protección de roca en zonas aisladas encaminadas a proteger la roca susceptible al intemperismo y a la estabilización de bloques con tendencia a caer o deslizarse, considerando para este objetivo, tratamientos a base de anclajes, concreto lanzado y/o marcos de acero estructural.

### a. Anclajes

Se estableció un sistema de reforzamiento a base de anclas de fricción fabricadas con barras de acero  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$  de 3m. de longitud y 1" de diámetro, con un patrón que se determinaría de acuerdo a las condiciones de estabilidad que presentara la roca, siendo el más común el patrón de anclaje de 1.5 x 2.0 m (transversal-



longitudinal). En la clave del túnel, es donde con más frecuencia se han requerido y de manera local el anclaje ocasionalmente por la presencia de bloques inestables también sobre las tablas del túnel, en ocasiones se tuvieron que rediseñar los patrones y longitudinales de las anclajes.

La necesidad de llevar los tratamientos sistemáticos de anclaje cercanos al frente de excavación, hizo necesario utilizar anclas con resina epóxica los cuales presentaban la ventaja en su facilidad y rapidez de instalación, así como su efectividad inmediata.

Para su instalación se procedía a trazar aureolas de anclaje, posteriormente se barrenaba con el jumbo en diámetros de 0 1 3/4". Posteriormente en cada barreno se introducía la resina epóxica, la cual se presentaba en cartuchos de 1 1/2" x 16", provistas de un compartimiento con la resina y su catalizador (endurecedor), posteriormente se inserta la barra con equipos de rotoperfusión, que generalmente es el jumbo utilizado para la perforación, durante su inserción se rompe las cápsulas con la subsecuente mezcla de la resina y el catalizador. Para mayor rapidez son introducidas primero, los cartuchos de fraguado rápido (1 a 5 min.) lo que permite detener el ancla y mayor rapidez en los trabajos.

Además del sistema del anclaje descrito anteriormente, fue necesario utilizar anclajes de inyección de mortero de  $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$  en tramos particularmente críticas incrementando la longitud y modificando el patrón original.

## **b. Concreto lanzado**

Para el túnel de conducción se diseñó un sistema de soporte estandarizado de concreto lanzado para ser utilizado en la mayoría de los casos en que se requiera, con un espesor promedio de 7.5 cm, reforzado con malla electrosoldada de 10 x 10 x 0 1/8", con el criterio de utilizarse en aquellos tramos donde se presentaban bloques pequeños inestables con tendencia al graneó, así como evitar intemperismo, para este, se diseñó una mezcla de  $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$  con proporción/M<sup>3</sup>, cto. 450 kg; arena 1038 kg; grava 3/8" 694, agua 171 lts; aditivo acelerante de fraguado dosificado en 3 y 5% sobre el peso del cemento.

Los agregados gruesos y finos utilizados se obtenían del banco yethay (calizas) y procesados en la planta trituradora del mismo sitio; se utilizaba cemento portland tipo IP (normal). El agua para concreto que se utilizaba durante la excavación, es la misma que se utilizaba para el concreto lanzado excepto en el caso V2 y V3, donde no cumplía con lo requisitos de calidad debido a la gran cantidad de sulfatos, más de 1000 p.p.m

(partes por millón), por lo que fue necesario suministrarla de otras fuentes.

Los agregados y el cemento fueron dosificados en las plantas para mezcla de concreto que se disponían en los frentes V1 y V3. Se transportaba a los frentes con carros mezcladores (**mixers**) montados sobre rieles, como mezcla seca. (Fig.16)

Para la colocación se utilizaba lanzadoras marca aliva AL-250, de los cuales estaban montados en plataformas sobre rieles, (Fig. 15). Durante el lanzado se incorporaba el aditivo a la mezcla y el agua en la cantidad que el lanzador fuera requiriendo, según las necesidades, para alcanzar la clave del túnel (5.10-5.50m) se disponía de plataformas de trabajo montadas sobre rieles. Este trabajo se ejecutaba en dos etapas; primero es colocada una capa de concreto lanzado con un espesor de 4.0 cm., posteriormente se barrenaba para colocar y fijar con pasadores de varilla la malla de refuerzo, se lanza una capa de 3.5 cm de concreto para alcanzar el espesor de proyecto. Las distancias entre los frentes de excavación y de tratamiento fueron variado en los diferentes tramos dependiendo principalmente de las condiciones de estabilidad de la roca que se presentaba, se llevaba rigurosamente hasta el frente de excavación de manera sistemática. Existían zonas en que se colocaba lanzado primario sin refuerzo y en algunos casos solamente en la clave o alguna zona específica.

### **c. Marcos metálicos**

La sección tipo 2 contemplaba la condición de marcos de acero estructural y estaba definida para utilizarse en aquellos tramos de túnel donde se tendría roca de muy mala calidad y/o existan fallas muy importantes. A la fecha solamente se utilizaron en el tramo comprendido entre los cad. 1 + 424 al 1 + 375 al 1+ 380 con un total de 36 pzas. En principio, para la colocación de estos marcos se realizó una preparación del piso, con el fin de colocar la parte inferior que corresponde a las tornapuntas, una vez colocado este segmento se colocan los siguientes componentes que corresponden a la tablas y boveda, acufiándose contra la roca.

Entre el cad. 1 + 406 - 1 + 408. el retaque de las marcos, se hizo a base de concreto lanzado en las tablas y colocandose concreto hidrúhulico en la boveda, entre el cad. 1 + 406 al 1 + 400, se colocaron marcos metálicos, empacando las tablas y la clave con concreto hidrúhulico.

En este tramo de falla, ya comunicados los frentes V1-0. Toma se retiraron estas marcos y concreto hidrúhulico hasta llegar a la roca sana, para posterior dar un tratamiento de soporte especial a la zona de falla encontrada en esta comunicación,

como se muestra en las Figuras 23 y 24.

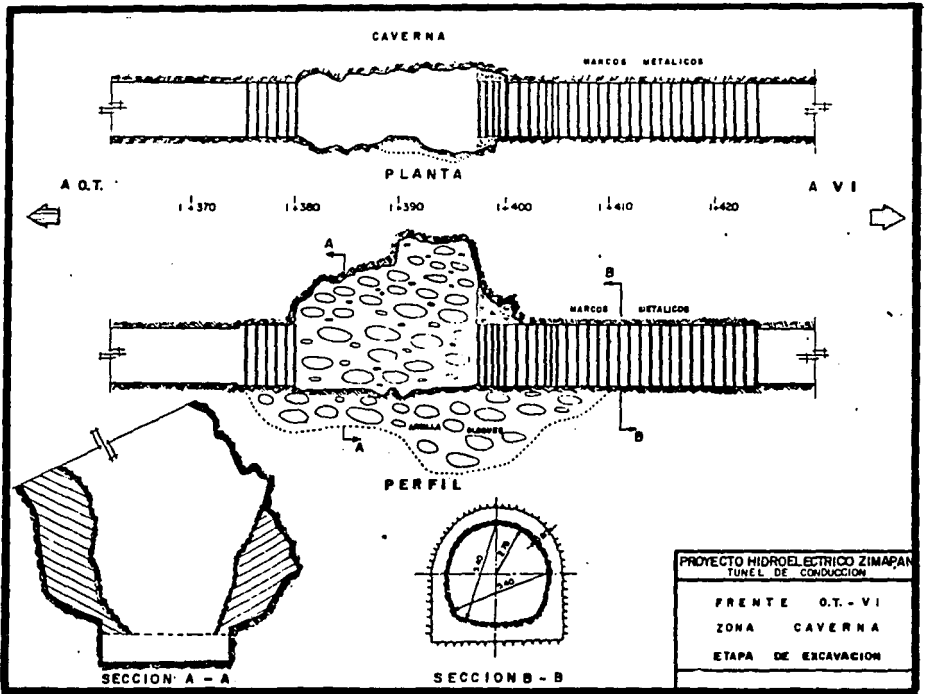


Fig. 23 Etapa de Excavación(zona de Caverna)

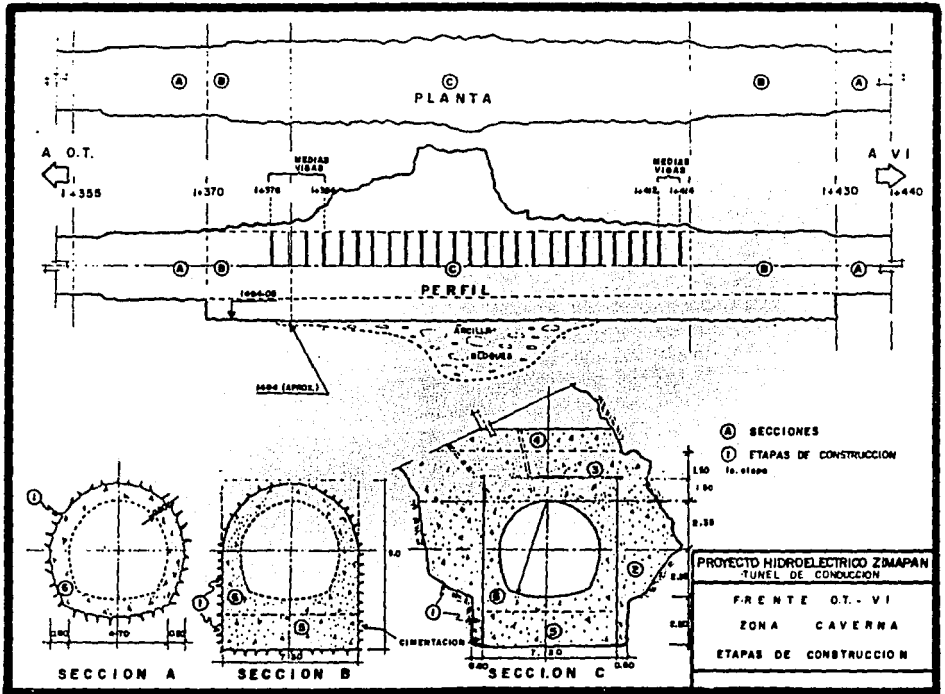


Fig.24 Zona de Caverna etapa de construcción

## 11. Análisis de ciclos de excavación

A continuación se relaciona un ciclo de excavación tipo en el cual se barrena con un jumbo de tres brazos sobre rieles y se rezaga con pala mecánica y tolvas tipo ferrocarril, además se relaciona un ciclo de tratamientos.

Concepto	Tiempo	Concepto	Tiempo
excavación		tratamientos	
Trazo	0.15	C. Lanz. Prim.	1.91
Barrenación	0.80	Col. de malla	2.17
Cargos, conex. y voladura	1.10	C. Lanz. Secc.	
Ventilación	0.30	Completa	1.99
Amacice y rezaga	3.00	Anclaje	1.71
Inst. de vías	0.25	Inyección	0.71
Man. a Inst.	0.56	Mant. Inst.	0.34
Camb. trno. y/o demoras	1.00	Demoras	0.16
Total	7.16		8.99

Normalmente durante la excavación, en los distintos frentes del túnel de conducción un ciclo de excavación sin tratamientos se obtenía un rendimiento promedio de 3.5 voladuras/día = 13.30 M<sup>3</sup>/día. En algunos tramos críticos que requería de un tratamiento a la roca completa donde involucra a los dos ciclos arriba descritas, se obtenía un rendimiento promedio de 5.7 M<sup>3</sup>/día. (1.5 vol/día)

## 12. Control Topográfico

Para la construcción del túnel se estableció una red de puntos a lo largo del proyecto, que consistieron en la combinación de triángulos y polígonos, con la finalidad de acercar los apoyos para su mejor control a través de las ventanas de accesos; suman un total de 43 vértices y 30 monumentos de apoyo, ligados con una longitud de 115 km; con este trabajo se determinó la nivelación de precisión entre la obra de toma y casa de máquinas, así como la fijación de coordenadas para el control horizontal y vertical del túnel.

Para el control topográfico en el interior del túnel como procedimiento práctico a par con cada voladura, se eligió el control por medio de rayo laser, con las siguientes características:

- 1).- Equipo Fijo: Rayo laser  
 Marca: Bramall laser systems  
 Tipo: MKS TCL  
 Voltaje: 220 volts  
 Alcance: 500 m

La ubicación de este equipo se encontraba en la parte media de la sección, sobre el lado derecho en el sentido de la excavación, a 75 cm de la tabla (según el tipo de sección) este era alineado con la pendiente del túnel el cual se regulaba a base de 3 placas con un orificio al centro y un dispositivo de rayo laser, la distancia entre los mismos era 3 mt del rayo a la primera placa, 20 mts de la primera a la segunda y 20 mts de la segunda a la tercera placa. Como se describe en la Fig. 25. La plantilla de barrenación era marcada por el personal de barrenación tomando como base el haz del rayo laser incidente sobre el frente de la excavación.

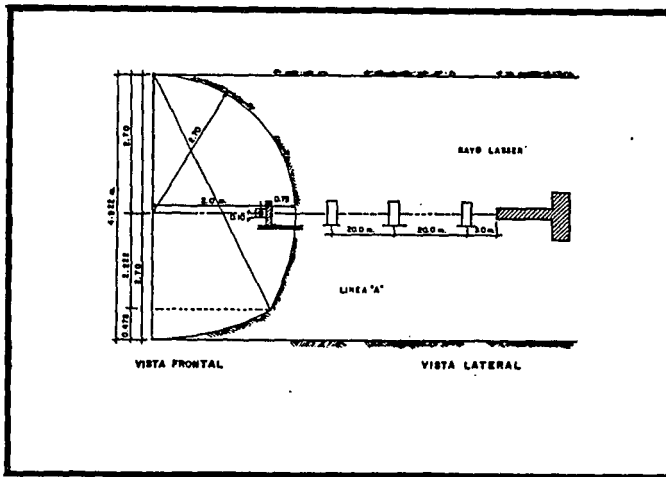


Fig.25 Control topográfico con rayo laser

## D. Cantidades de Obra

### 1.- Volumen de Excavación Real, a línea "B", sin ventanas de acceso

Sección	Longitud(M <sup>L</sup> )	Area(M <sup>2</sup> )	Volumenes
1	15730	25.36	398,913
2	210	29.16	6,124
3	1468	27.90	40,957
4	3565	26.47	94,366
	20973		540,360M <sup>3</sup>

**Nota:** Este volumene se considera sin sobre- excavaciones, lo cual considerando un 30% de las mismas mas 4000 M<sup>3</sup> caidos mas 5970M<sup>3</sup> de nichos desde O.T a V-6, suma un volumen de:

Excavación:	540,360 M <sup>3</sup>
Sobre-Excav:	162,108 M <sup>3</sup>
Caidos:	4,000 M <sup>3</sup>
Nichos:	5,970 M <sup>3</sup>
	712,438 M <sup>3</sup>

El volumen real de excavación , si consideramos un abundamiento de 30% tenemos un volumen en excavación abundado de:

$$712,438 \times 1.30 = 926,169.0M^3 \text{ Volumen rezagado.}$$

## 2. Volumen de concreto, a línea "B" del revestimiento

Sección	Longitud(M)	Area(M <sup>2</sup> )	Volumen (M <sup>3</sup> )
1	15,730	7.04	110,739
2	210	10.84	2,276
3	1,468	9.58	14,063
4	3,565	8.15	29,005
			156,133M <sup>3</sup>

## 3. Volumen de concreto con sobre excavaciones promedio

Sección	Longitud	Area(sobre-exc.)	Volumen (M <sup>3</sup> )
1	15730.0	9.86(40%)	155098.0
2	210.0	14.04(30%)	2948.0
3	1468.0	12.45(30%)	18277.0
4	3565.0	10.60(30%)	37790.0
			214,113.0 M <sup>3</sup>

Tramo O.T.-V1    Revestimiento:    37581M<sup>3</sup>  
 Tapones-Nichos:    450 + 720  
 Caído(caverna):    4000.0 M<sup>3</sup>  
 = 42,751 M<sup>3</sup>

Tramo V2-V1    Revestimiento:    64515.0 M<sup>3</sup>  
 Tapones-Nichos:    450 + 1550  
 = 66,575 M<sup>3</sup>

Tramo V2-V4    Revestimiento:    57812.0  
 Tapones-Nichos:    1300 + 1700



Tramo V4-V6      Revestimiento:    54205.0  
                          Tapones-Nichos:    2145 + 3500

=59850 M<sup>3</sup>

Resumen:

Revestimiento Definitivo: 214113  
                          Tapones:            4,345  
                          Nichos:             7,470  
                          Caidos:             4,000

Total =229,928 M<sup>3</sup> Concreto

**E. Instalaciones en ventanas de acceso**

Para evitar la dependencia de los servicios centrales de la obra se previó la construcción de las instalaciones siguientes por ventana: Comedor para obreros y técnicos, oficinas de campo, bodega para materiales, polvorin, taller mecánico y eléctrico; instalaciones adicionales como: alimentación de agua industrial para servicios de obra y acometida eléctrica. En la bodega de materiales se maneja un stock mínimo como son, cemento, aditivos, anclas, mallas, tuberías, brocas, barras, rieles, tornillería, mangueras, etc; el polvorin se localizaba en la cercanía de las ventanas y contaba con las cantidades necesarias de explosivos para cubrir las necesidades inmediatas del frente; el taller mecánico, eléctrico y de soldadura contaba con personal para la atención de problemas del frente, así como un stock de refacciones para proporcionar los servicios preventivos y correctivos de los equipos; para los concretos se montaron plantas dosificadoras para 35M<sup>3</sup>/hr, el suministro de agregados se transporto desde su lugar de extracción (Banco Yethay en la zona de boquilla) ya clasificado; las captaciones de agua para uso industrial fueron a través del río moctezuma en todos los casos, la alimentación eléctrica se encontro derivada de una línea construida en forma definitiva y aislada en 115 kw. la cual conducía durante la construcción 13.8 kw, su recorrido fue de la boquilla a la casa de máquina a lo largo de la conducción.

## F. Instalaciones Eléctricas, Demandas por frente.

Para cubrir la demanda de energía eléctrica requerida en la construcción del túnel, se conto con una línea que cubría todo el trayecto de la conducción, la cual parte de la subestación para construcción denominada boquilla, con un rango de transformación de 115/13.8 kv, 20 MVA. A partir de esta línea se efectuaron las derivaciones a los diferentes frentes en donde se encontraban localizados subestaciones de transformación.

Desde las subestaciones de transformación de energía eléctrica se distribuía con una línea de 6.6 kv al interior del túnel y la transformación final es de 440 y 220V. Fig. 26

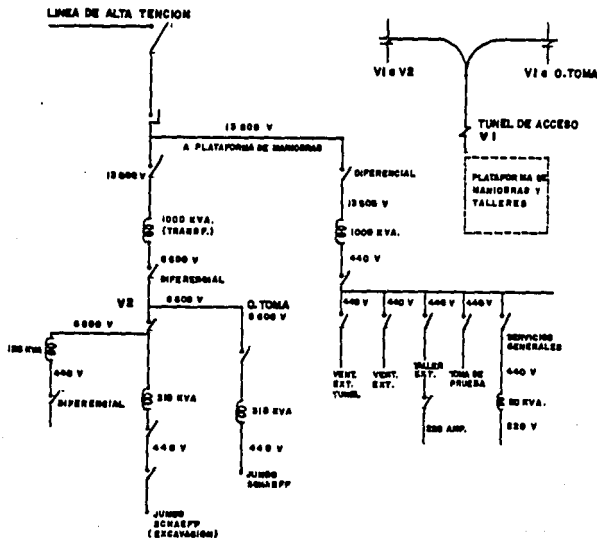


Fig. 26 Instalación eléctrica tipo en un frente

## **G. Instalaciones y suministro de agua actual a los frentes de la conducción**

### **VENTANA 1**

El volumen requerido actualmente para la excavación del frente V1-V2 con sus tratamientos fue de 40 m<sup>3</sup> /día. En el frente Vi-OT, se requería para el colado de reposición del piso 45 m<sup>3</sup>/día, para el servicio de los equipos se requería 15 m<sup>3</sup>/día; sumando un total de 100 m<sup>3</sup>/día.

La captación se localiza sobre el río Moctezuma, en la elevación 1350; se tenía instalada una bomba sumergible de 30 H.P. dentro de un cárcamo, la conducción pasaba por un tanque metálico de rebombeo al tanque de 23 m<sup>3</sup>, en donde se tenía instalada otra bomba de 30 H.P.; está a su vez bombeaba al tanque de 23 m<sup>3</sup> de capacidad localizado en la entrada del túnel en la elevación 1495, del cual se distribuía a los frentes y planta de concreto, con una bomba de 10 H.P. La conducción era de 3" de 0 y su longitud de 800 m, hasta la entrada del túnel.

Se bombeaba 20 horas del día con un gasto promedio de 1.8 lts/seg., con lo cual se cubría la demanda del frente.

### **VENTANA 2**

El volumen promedio requerido para este frente fue de 65 m<sup>3</sup>/día, la captación estaba localizada a 150 m de la entrada del túnel de acceso; se construyó un cárcamo para captar los escurrimientos naturales del arroyo, se tenía instalada una bomba de 10 H.P., para bombear a dos depósitos de 23 m<sup>3</sup> de capacidad c/u a través de una conducción de 50 m. por 3" de 0. Con este equipo se obtenía un rendimiento promedio de 4 lts/seg. cubriendo la demanda de este frente.

Se descarto el uso de esta agua para la producción concretos; por tener un alto contenido de sulfato. La elevación de la captación era de 1567 y de los depósitos de 1587 M.S.N.M.

### **VENTANA 3**

El volumen requerido en las excavaciones fue de 65 m<sup>3</sup>, lo que suma un total por

día de 80 m<sup>3</sup>.

La captación se obtenía sobre un arroyo cercano a la ventana, en el cual se construyó una represa para captar los escurrimientos que se mantienen durante el mayor tiempo del año. Se tenía instalada una bomba tipo horizontal de 30 H.; de la conducción tenía una longitud de 4.4 km y el diámetro de la tubería de 3" de diámetro.

Se bombeaba a dos depósitos metálicos de 23 m<sup>3</sup> de capacidad c/u localizados a la entrada del túnel durante 20 horas al día, con el cual se cubrían las necesidades actuales del túnel.

La elevación de la captación era de 1350 y de los tanques de almacenamiento de 1479.

Se descarto la posibilidad del uso de esta agua para concretos, por tener un alto contenido de sulfatos.

#### **VENTANA 4**

El volumen requerido en las excavaciones fue de 75 m<sup>3</sup> y para el servicio de los equipos de 15 m<sup>3</sup>, lo que suma un total de 90 m<sup>3</sup>. la captación se localizaba sobre el río Moctezuma, a través de un cárcamo en el cual se tenía instalada una bomba; se bombeaba por una conducción de 4 km. y de 3" de  $\phi$ , que pasa por dos rebombes donde se tenía instalado un cárcamo pequeño y una bomba de 10 H.P. por cada uno, finalmente descargaba a dos almacenamientos de la misma capacidad, localizados en la plataforma de instalaciones a partir de los cuales se distribuía a los frentes. La elevación de la captación era de 1034 y de los tanques de almacenamiento 1484.

## RESUMEN

FRENTE	CONSUMOS ACTUALES M3/DIA
V1	100
V2	65
V3	80
V4	90
<b>TOTAL</b>	<hr/> <b>335</b>

### 1.- Requerimientos de agua después del cierre del túnel de desvío

Las actividades que contemplaban ejecutarse del mes de Septiembre de 1992 en adelante en los tramos V2-V1, V2-V4 y V4-V6 (por casa de máquinas) eran los siguientes:

- a).- Revestimiento de concreto
- b).- Inyecciones de contacto concreto - roca
- c).- Construcción de tapones y detalles.

Para determinar los requerimientos de agua por Ml del túnel podemos dividir los conceptos anteriores de la forma siguiente:

#### a.- Revestimiento

- Limpieza y lavado de la sección	350 lts.
- Fabricación de concreto	2,400 lts
- Limpieza de equipos	400 lts
- Humedad en agregados	200 lts
- Limpieza después del colado, curados, resanes, mantenimiento a otros equipos.	250 lts

TOTAL 3,600 lts/ml

NOTA: Volumen de concreto promedio estimado por Ml de túnel 12.00 m<sup>3</sup>

### **b.- Inyecciones de Contacto**

Se consideraban 3 m<sup>3</sup>/ml de túnel y un consumo de 800 lts/m<sup>3</sup>; esto incluye limpieza de barrenos, desperdicio, fabricación de mezclas para inyección etc. por lo tanto se tiene 2,400 lts/m<sup>3</sup>.

### **c.- Construcción de Tapones**

Se considero un volumen de 100 lts/m<sup>3</sup>

### **H. Equipo de Construcción y Mano de Obra para los frentes de excavación.**

En la tabla No. 1-2 se describe la relación y cantidades de equipo y mano de obra, programado por frente en el pico de producción, todos se consideraban en condiciones de servicio, dichas tablas se indican en el anexo 3.

## I. Programa de Construcción

La excavación del túnel fue programado inicialmente en 25 meses con producciones máximas mensuales de 950m.; después de una reprogramación respetando las fechas de terminación establecidas contractualmente, fue necesario a incrementar a 10 el número de frentes de excavación, con lo que se tenía programado durante el mes de mayo de 1992 un máximo de 1525m. Una de las condiciones para alcanzar esta producción y que fue considerada para efectos del programa es el aspecto Geológico; en el tramo V1-OToma se cruzó por un deposito volcanico que requería de la colocación de ademes metálicos y/o en su defecto de un tratamiento de soporte especial, el tramo V3 a V4 cruzó arroyos y cañadas con recargues de agua donde la excavación requiere de tratamientos, en el frente V2 a V3 y V2-V4 dependía el Jumbo de ambos frentes y las condiciones de rezago, muy difíciles por las características del túnel crucero. El frente que se terminó en la fecha más lejan y se consideró crítico es el de V6 a V4 que se terminó durante el mes de mayo de 1993.

FRENTE	LONG.	REND./DIA	FRENTE	LONG.	REND./DIA
OT-V4	1360	5-7.5	V3-V2	2016	5-15
V1-OT	1700	4-7.5	V3-V4	2211	5-6.5
V1-V2	3792	7.5-8	V4-V3	1430	7.5-5
V2-V1	1847	6-6.7	V4-V6	2806	7.5
V2-V3	820	3-6	V6-V4	2973	7.5

Días laborados por mes 24

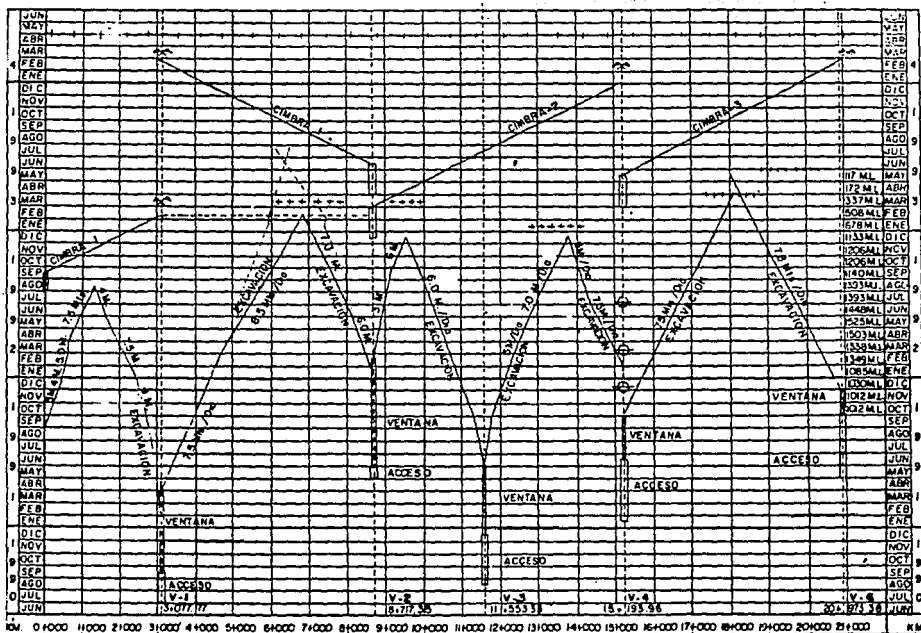
Rendimiento: En metros

El revestimiento del túnel se realizó con concreto armado en los primeros 300 ML y en las zonas de baja cobertura lateral y vertical, el resto se revistió con concreto simple. Aprovechando el acceso por las ventanas se programó la utilización de 3 cimbras para alcanzar rendimientos de 650 m/mes, por frente, se llegó a un avance pico de 2100 M<sup>3</sup>/mes, con las tres cimbras.

Los tratamientos y acabados del túnel que consisten en construcción de tapones en cruceros, inyecciones de contacto concreto-roca principalmente, se realizarán en 45 días del programa y se adelantaron conforme se avanzó en la colocación de concreto.

El programa de obra gráfico de obra se muestra en la Fig.27-28

PROGRAMA DE OBRA



- (O) PRUEBAS U I      — EXCAVACION      □ PREPARATIVOS  
 (O) EN OPERACION U I      - - - - CONCRETOS      ✂ TERMINACION DE AC.

SEPTIEMBRE 1991  
C. F. E.

Fig.27 Programa de obra



**TUNEL DE CONDUCCION  
PROGRAMA DE CONSTRUCCION**

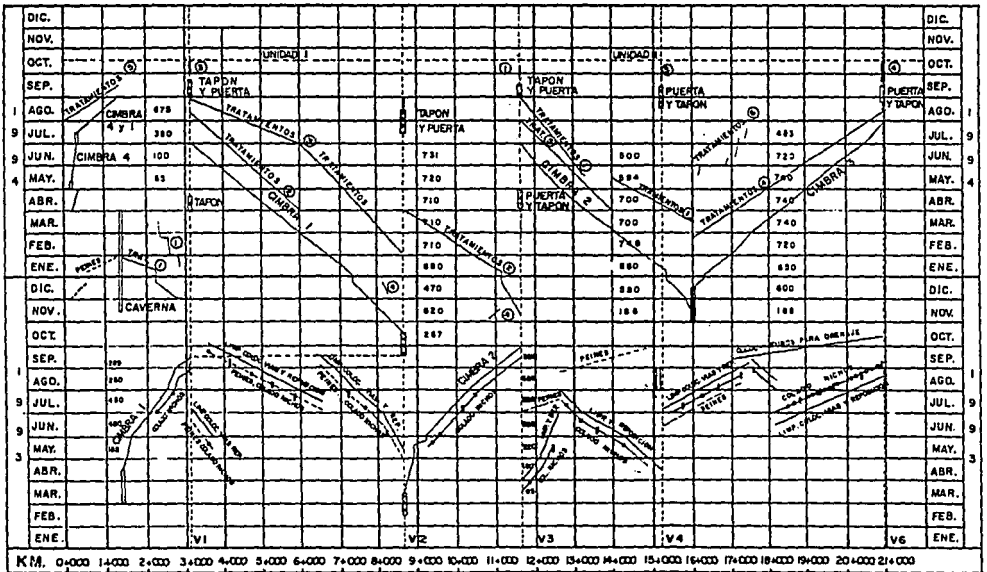


Fig. 28 Programa de Construcción

## **IV. TRATAMIENTOS PREVIOS AL REVESTIMIENTO**

### **A. Objetivo**

Los tratamientos que se describen en el presente documento tienen como objetivo procurar un comportamiento satisfactorios de la estructura correspondiente al túnel de conducción durante la operación del mismo y en condiciones de vaciado. Los tratamientos en este caso, estarán regidos preferentemente a minimizar problemas potenciales de permeabilidad (pérdida de gasto) a través de las distintas condiciones de carsticidad a lo largo de la conducción, así como aquellas de baja cobertura lateral y vertical, afectados por gradientes términos importantes y que coinciden con zonas de filtraciones.

### **B. Tipos de Tratamiento**

A continuación se describen los tratamientos que se consideraron en los diferentes tramos que conforman el túnel. En el anexo I, se presenta en forma tabulada los tratamientos y las zonas donde se aplicaron.

#### **1. Carsticidad Local**

Se refiere a los ductos ú oquedades cársticas que se descubrieron con la excavación y que se presentaron en forma aislada (no se relaciona en la mayoría de las casos con estructuras geológicas), con geometría circular, ovoide o alargada, con o sin rellenos y que presentó diámetros equivalentes entre 10 y 50 cm. El procedimiento que se recomienda para el relleno de este caso a manera de tratamiento dental fue el siguiente:

**a). Identificación.** Conforme se avance en los trabajos de limpieza y retiro de resaga (plantilla de reposición de roca en piso) se identificó previamente los sitios, el carso descubierto se trató antes de colar la plantilla de reposición.

**b). Limpieza.** Este tipo de carsticidad se presentó con rellenos de calcita y arcilla, principalmente esta última la limpieza se realizó como sigue:

- Identificada la oquedad Cárstica se retiró el relleno de arcilla penetrando en la oquedad ó ducto una profundidad de:

Dos diámetros, si la oquedad es perfectamente circular

Dos diámetros mayores, si la oquedad es de tipo oval ó

La mitad de la longitud, si la oquedad es de tipo alargada. En este caso se considerara alargada si la longitud mayor es de tres veces la longitud menor o ancho.

- Habiendo limpiado la oquedad con el criterio anterior, se colocó un tapón interior con un espesor aproximado de un radio de la oquedad o equivalente a la longitud menor si es de tipo alargado.

- Durante los trabajos de colocación del tapón se dejó incluido un tramo de manguera de 1" 0 que atraviesa dicho tapón, a través de la cual, se inyecta un mortero denso de cemento-arena con la siguiente relación:

arena/cemento	$Ar/c = 0.8$
agua/cemento	$a/c = 0.5$

La presión máx. de inyección fue de 5.0 kg/cm<sup>2</sup>, en caso de oquedades alargadas la disposición de mangueras fue de dos a tres, equidistantemente (p.e. de L/3) procediendo a inyectar un volumen máximo por manguera para un diámetro equivalente de L/2.

## **2. Oquedades Mayores**

Corresponden a carsticidades que se presentaron generalmente en forma local en el túnel y que son mayores a los 50 cm de diámetro. La columna (2) del anexo No.1, indica los cadenamientos locales y por tiempo aproximado de este tipo de carsticidad.

El tratamiento recomendado para el tratamiento de este tipo de carsticidades fue el siguiente:

a) Durante el proceso de limpieza y retiro de rezaga del piso si se localiza una cavidad de este tipo, se realizará el tratamiento correspondiente para rellenarse junto con el colado de la plantilla de reposición.

**b) Limpieza.** Al igual que en el caso de carsticidades de menor diámetro, este tipo de oquedad se encontró también con rellenos arcillosos, los cuales debieron ser retirados en forma manual hasta una distancia máxima de un diámetro y mínima de un radio del túnel.

**c) Relleno.** Si este carst grande se localizó de la media sección al piso del túnel, fué posible rellenarlo con concreto (previo al paso de la cimbra), para controlar las condiciones de llenado. Si se localiza sobre la bóveda y partes laterales a la sección, el relleno se efectuó con inyección, rellenando un tapón con concreto lanzado e inyectando posteriormente, con una manguera que atraviesa el tapón, con mortero cemento-arena.

### **3. Alta Densidad Cárstica**

Corresponde a un carst pequeño, menor a 20cm, que se desarrolla a través de zonas de alto fracturamiento en la roca, con espaciamientos entre fracturas de 10 y 20cm. Estas zonas se indican en la columna (3) Anexo 1.

Debido al gran número de oquedades que se descubrieron con la sección del túnel y a su intercomunicación, a causa del mismo fracturamiento, resultó poco práctico ejecutar un tratamiento de tipo dental en cada una de dichas oquedades.

En este caso se consideró el empleo de concreto lanzado aplicandose en toda la sección de acuerdo con lo que se indica a continuación.

**a) Identificación.** Las zonas de alta densidad cárstica se localizaron de acuerdo a lo indicado en el anexo 1.

**b) Limpieza.** Debido a forma y tamaño de las oquedades, la limpieza de los rellenos se realizó a base de chiflón de agua y aire a presión.

**c. Relleno.** En este caso se recomendó aplicar concreto lanzado iniciando propiamente en las oquedades y fracturas asociadas para concluir con el recubrimiento de toda la sección de excavación, el espesor mínimo que se consideró para este lanzado fue de 5 cm.

#### **4. Diques**

En algunas zonas del túnel de conducción se presentaron cuerpos intrusivos de composición, dimensión y dirección variable, los cuerpos provocaron zonas de alteración en el contacto con la roca encajonante, esta alteración correspondió a material arcilloso de espesor variable, el cual, en el perímetro de la excavación conformó un anillo de material deformante.

En ciertos tramos del túnel los diques venían introducidos, a través de sus respaldos arcillosos, filtraciones al interior de la sección.

Por esta razón, fue necesario efectuar el tratamiento de los mismos para retirar el material deformable y sellar la posibilidad de una alta permeabilidad.

El tratamiento por realizar consistiría en el retiro de material arcilloso (limpieza dental) en toda su espesor hasta una profundidad de 30 cm en toda la sección. En las paredes y bóveda se aplicó concreto lanzado como relleno, mientras que en el piso se colocó concreto hidráulico.

En el Anexo No. 1 columna 4 se indican los cadenamientos donde se localizaron diques que se trataron de acuerdo con lo indicado anteriormente.

#### **5. Zonas con Exploración Geofísica**

Entre los cadenamientos 1 + 080 al 2 + 600 se ejecutó una exploración geofísica a través de barrenos de exploración dispuestos en bóveda, paredes y piso. La exploración consistió en la realización de tomografías sísmicas, las cuales cubrieron una longitud neta de túnel de 260 m, en zonas con presencia de carsticidad.

El tramo entre los cadenamientos 1 + 446 y 3 + 100 se ha revestido en forma definitiva con la sección de concreto hidráulico correspondiente a las indicaciones de proyecto. De los resultados de la exploración de zona cárstica más sobresalientes se localizó entre los cadenamientos 2 + 390 - 2 + 400, sobre la tabla derecha, siendo descubierta en forma directa por la existencia de un nicho. En particular, este Cárst se trató mediante la colocación de rellenos de concreto junto con el propio nicho y adicionalmente se consideró una sección reforzada para el revestimiento del túnel.

En los demás tramos, las condiciones reportadas por las tomografías no evidencian la presencia de carsticidad en grandes huecos, por lo que el tratamiento que se ejecuto previo al colado fué local, para posterior realizar las inyecciones de contacto concreto-roca.

### **C. Resultado de Investigación en Zonas Cársticas**

El propósito de la investigación, la cual considera los cadenamientos del 3 + 328 al 4 + 520 y del 6 + 670 al 7 + 800 de la Fm el doctor. Es comprobar la existencia de oquedades y cavernas ocultas en zonas donde la excavación del túnel descubrió cársticidad. La longitud de las barrenaciones en la mayoría de los casos se encontró entre uno y dos diámetros del túnel.

Los resultados de las investigaciones de exploración identificaron en general cavidades tubiformes asociados a fallas y fracturas, teniendo rellenos ó semirellenos de arcilla, con diámetro que oscilan entre 0.20 m y 0.60 m y representaron aproximadamente en 85 % de las cavidades descubiertas.

Existieron otras cavidades con diámetros equivalentes aproximados a 1.0 m semi rellenos de arcilla, que representaron un 10% de los explorados.

Finalmente, existieron cuatro cavidades adyacentes al túnel con volúmenes mayores a los 10 M<sup>3</sup> (2x2x3m), las cuales se encontraron semi rellenos de arcilla, algunos de ellos han funcionado como drenes naturales para la excavación del túnel, estas cavidades representaron el porcentaje restante.

Los tratamientos derivados de la exploración anterior, fueron los que se indican a continuación:

#### **1. Inyección de los Barrenos de Exploración.**

Todos los barrenos que se indican a continuación se localizaron en el piso, por lo cual se debería reperforar, puesto que incidieron en zonas de cársticidad adyacente al túnel con semirellenos de arcilla se perforaron dado que el colado de la plantilla de concreto de reposición selló los brocales.

Los barrenos ejecutados en la exploración se debieron inyectar con mortero a

una presión de 5 kg/cm<sup>2</sup>.

## **2. Tratamiento de la Cársticidad del Cad. 3 + 746**

La cársticidad que se localizó en este cadenamiento tiene un rumbo Nw 20° SE/70° SW, era de forma alargada ubicandose sobre la tabla derecha en el cad. 3 + 742, mientras que en la tabla izquierda en el cad. 3 + 752.

El tratamiento considerado en esta zona consistió en las siguientes actividades.

a) Una vez identificada la zona, se procedio sobre una de las tablas al retiro del relleno de arcilla hasta penetrar una distancia de aprox. 6.0 m en la tabla y una profundidad sobre la misma de 3.0 a 4.0 m.

b) Se limpio la superficie con agua para retirar convenientemente la arcilla y que esta se canalize a la cársticidad de la tabla izquierda (oquedad con consumos de agua).

c) Se procedio al relleno de la cavidad con concreto hidráulico, asegurandose que éste se introdujera adecuadamente en los vacios o huecos.

d) En los últimos colados superiores fue necesario colocar una manguera para posteriormente inyectar un mortero o lechada que lograra rellenar y obturar adecuadamente la cavidad.

e) Para el caso de la cavidad de la tabla izquierda fue necesario, mediante rompedoras, ampliar la entrada a la misma para tener la posibilidad de accederse. Con el acceso se realizó la limpieza de la misma, retirando arcilla y fragmento de roca.

f) Se construyo un tapón a una distancia o profundidad de 10.0M en las oquedades o ductos que se descubrieron.

g) Se realizó el relleno de la cavidad con concreto hasta lograr sellarla, los rellenos se continuaran hasta la parte superior.

### **3. Tratamiento de la Cavidad del Cad. 6 + 673**

Para el tratamiento de esta cársticidad, se considero posible realizarlo en 2 etapas: la primera aprovechando la posibilidad de un acceso directo para su relleno por gravedad y la segunda por medio de inyección. Fig. N°29

#### **a) Primer Etapa:**

Se considero que era necesario ampliar la cavidad que se observaba en la tabla derecha para tener un fácil acceso al interior de ésta cavidad. Una abertura de 1.50 x 1.50 m, parecio ser suficiente posterior a esto fue necesario realizar el retiro de arcilla y fragmentos de roca, procurando abturar el ducto hacia abajo a una profundidad aproximada de 15.0m. Adicionalmente, se considero conveniente lavar la oquedad con suficiente agua para retirar las últimas fragmentos de arcilla.

Hecha la limpieza, se procedio a rellenar el ducto a gravedad con concreto hidráulico  $f_c = 150 \text{ kg/cm}^2$ , este relleno se construyo hasta la abertura de acceso a la cavidad.

#### **b) Segunda Etapa**

Al igual que lo indicado en el inciso anterior, se debio hacer una limpieza rigurosa en las paredes de la cavidad hacia arriba hasta una distancia de 15.0 m. A esta profundidad fue necesario construir un tapon.

A través del barreno de exploración No. 6, se inyecto mortero a una presión de  $5 \text{ kg/cm}^2$ . La condición de relleno fue cuando la presión de rechazo alcanzo un valor de  $10 \text{ kg/cm}^2$ . Ver figura 29



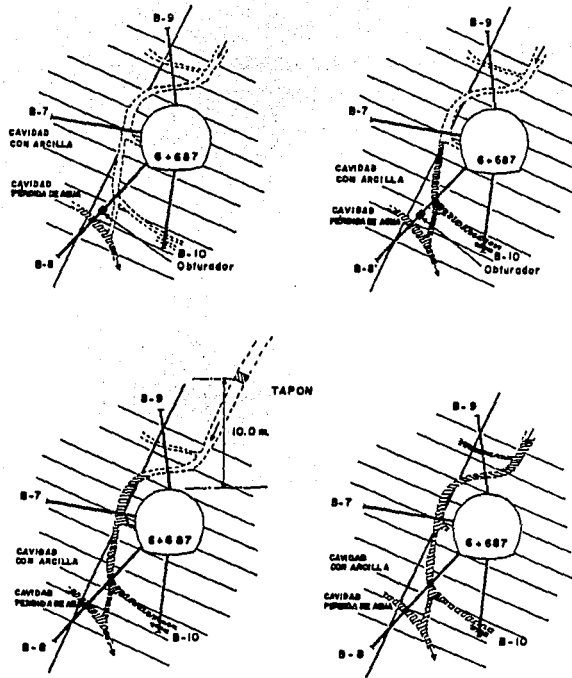


Fig.29 Carsticidad cad. 61687

#### 4. Cársticidad Localizada en el Cadenamiento 6 + 687

Para este caso se considero realizar un barreno en la oquedad a través de los barrenos de exploración de la siguiente manera:

##### a) Reperforar barrenos de exploración 8 y 10.

Debido a que los trabajos de reposición de roca en piso dejaron ocultas los barrenos 8 y 10, los cuales intersectaban el ducto cárstico fue necesario reperforarlos. La ubicación y dirección exacta es la que se indica en la Fig. 30

**b) Inyección a través del barreno 8.**

Para iniciar la inyección por este barreno fue necesario colocar previamente un obturador a 5.0 m de profundidad. Se realizó la inyección con mortero a una presión de 1 a 2.0 kg/cm<sup>2</sup> hasta lograr obturar la cavidad a esa profundidad. Esta actividad fue repetitiva hasta lograr el sello del ducto.

c) Para continuar la inyección debio realizarse la limpieza de arcilla de las cavidades superiores y construir un tapón a una distancia de 10.0m sobre la clave del túnel. Se construyo también un tapón en el carst expuesto en la pared.

d) Concluida la limpieza y las topones, se continuo con la inyección a través del barreno 9 hasta el termino de la mezcla por el barreno 7 de la bóveda. Ver fig. 30

e) A partir de este momento, se obturó el barreno 9, y se continuo la inyección por el barreno 7 a una presiónn de 5kg/cm<sup>2</sup> hasta la presión de rechazo de 10 kg/cm<sup>2</sup>.

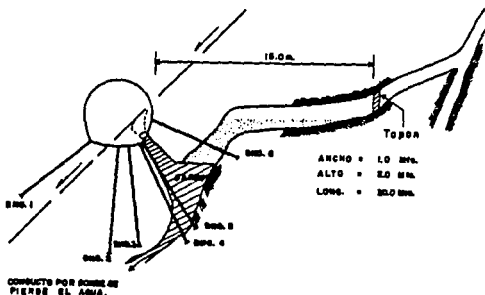
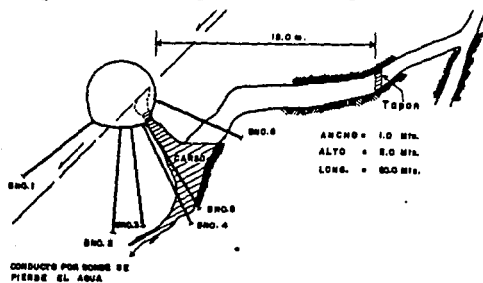


Fig.30 Carsticidad Cad. 6+687

## **V. REVESTIMIENTO DEFINITIVO.**

### **A. Antecedentes.**

De esta obra que integra el Proyecto, se obtuvo como determinación el tipo de revestimiento que se adoptaría para llevar a cabo la construcción final del túnel. Los cambios y propuestas llevadas por el área de proyectos de C.F.E. Inicialmente revestimiento de concreto reforzado en la parte inicial del túnel y el resto de concreto armado en la cubeta y lanzado en las partes laterales y bóveda; las alternativas de cambio mejorando las condiciones hidráulicas se determinó que todo el túnel debería quedar revestido a base de concreto hidráulico en un 96% de concreto simple y el resto de concreto armado finalmente.

### **B. Proyecto original de revestimiento.**

Inicialmente el proyecto original Concurado para la excavación y revestimiento definitivo del túnel de conducción, se adoptarían tres diferentes secciones transversales para su construcción como se ubica a continuación:

- La sección 1. Con revestimiento de concreto reforzado de 30cm de espesor, se colocaría en los primeros 500m de la conducción.

- Las secciones 2 y 3 revestidas a base de concreto lanzado y malla electrosoldada con espesores de 15 y 10cm constructivamente referidas a la calidad de la roca, con longitudes estimadas en 7,200 y 13,400m respectivamente, según información geológica básica.

Las tres secciones se consideraban en la parte inferior de la cubeta reforzados con concreto armado que sirve como apoyo a los concretos laterales y de la bóveda. La sección de excavación común para las tres era trapecial, con ancho de 4.0m en la plantilla para luego ampliarse en la parte media a 5.30mt promedio para los tres tipos.

La excavación para este tipo de sección se llevaría a cabo mediante el método tradicional con Jumbo (barrenación, carga y voladura), el ancho de 4.0mt de plantilla correspondía directamente al uso de equipo para excavación subterránea como jumbo, rezagadora y locomotoras.

La sección hidráulica de las tres secciones en cuestion era circular con dimensiones como sigue: sección 1, con  $\phi$  4.85m en su sección final (concreto reforzado), sección-2 con  $\phi$  5.00m (concreto lanzado), sección 3 con  $\phi$  5.10m (concreto lanzado).

La otra arternativa de construcción, con maquina tunelera consideraba de igual forma 3 secciones de excavación, revestidas a base de concreto lanzado reforzado con malla electrosoldada. Los espesores de revestimiento y diámetros interiores eran los siguientes:

Sección 1: Espesor de 30cm concreto armado toda la sección, con un diámetro interior de 4.85mt., corespondiente a los primeros 500.0m de la conducción.

Sección 2 y 3 revestidos a base de concreto lanzado y malla electrosaldada con espesores de 12.5 y 7.5cm, concreto armado en la parte inferior de la cubeta con los mismos espesores respectivamente, con diámetro de la sección hidráulica correspondiente en 4.90 y 5.0 ml.

Las restricciones que limitaron de manera importante la ejecución del túnel con tunelera, considerando de acuerdo con las ofertas correspondientes, sólo se podría contar con ello dos frentes de ataque para excavar los 21 km correspondiente al túnel de conducción.

## **B. Modificaciones al proyecto.**

A mediados de octubre de 1990, C.F.E. Modifico, el diseño de la sección hidráulica del túnel.

Esta modificación consistio en cambiar la sección de concreto lanzado por una de concreto hidráulico de 4.60 m. de  $\phi$  por una de 4.80 m de diámetro con las mismas condiciones que los anteriores que, para todas los casos se consideran los costos de construcción, tratamientos o pérdidas de carga.

Una vez planteados los antecedentes y revisado la modificación desde el punto de vista técnico-económico, analizando los procedimientos constructivos, costos. En cuanto a la sección definitiva de la construcción tipo herradura.

**Esta sección tendría un diámetro de 4.70 m interior, espesor de concreto hidráulico de 20cm en piso y paredes, variable de 20 a 25 cm en la clave. Lo mismo se aplicaría en la zona por condiciones de servicio se requiera acero de refuerzo en la cual se adoptará la sección de 4.70m interior con recubrimiento uniforme de 35cm de espesor.**

**Esta modificación respecto a no colocar concreto lanzado quedo reforzado por el grupo consultor ya que en opinión de ellos a lo largo del tiempo, esta clase de revestimiento podría presentar desprendimientos de arena y finos que serían transportados hasta las turbinas ocasionando daños importantes de aqui se deduce que el túnel revestido con concierto hidráulico presentara mayor confiabilidad durante su operación.**

**Aun con la desición adoptada de revestir el túnel en toda su longitud, en el mes de noviembre de 1992 se solicito a la jefatura de proyectos, se revisara el funcionamiento hidráulico de la conducción considerando que el túnel estuviera sin revestir en cierta longitud especifica, considerando para estos tramos roca de buena calidad.**

**Se analizaron 5 alternativas, considerando en cada, una de las alternativas un funcionamiento hidráulico distinto.**

**A1: Se consideró una longitud de 4913m de túnel con revestimiento de concierto hidráulico y 16, 051m sin revestir.**

**A2: En esta alternativa se consideró revestir, 4,913m a base de concreto hidráulico y 16,051m revestidos con concreto lanzado.**

**A3: Esta alternativa es semejante a la alternativa A1 con la diferencia que el tramo sin revestir se ampliaría a una sección de 6.80m con objeto de igualar las perdidas de carga que se tienen considerados en el proyecto original.**

**A4: En esta alternativa se consideró revestir 13,464m a base de concreto hidráulico, dejando 7500m sin revestir, considerando que en esta longitud la roca era de buena calidad.**

**A5: La diferencia enre la alternativa A5 con la anterior A4 es revestir los 7500m con concreto lanzado con una consecuente reducción de sección.**

Estas alternativas son funciones desde el punto de vista hidráulico, cabe mencionar la importancia de revestir o no el túnel en toda su longitud, por lo que este factor fue imprescindible. Tomando en cuenta el factor de rugosidad dependía en gran medida a las pérdidas de carga que directamente se traducen en pérdidas de generación de energía.

#### **D. Proyecto definitivo de construcción.**

Una vez determinado que el túnel sería revestido en toda su longitud, a base de concreto hidráulico simple y reforzado, se adoptaron 4 secciones de excavación y revestimiento, con espesores variables dependiendo la calidad de la roca que en cada una de ellas confiere.

El revestimiento contemplado para las cuatro secciones tipo tenían las siguientes características.

**Sección tipo 1:** Para esta sección se consideró un espesor de revestimiento de 20cm a base de concreto hidráulico simple,  $f_c=250\text{kg/cm}^2$ .

**Sección tipo 2:** Esta sección considera el uso de marcos metálicos de viga "I" estandar, IPR de 8" de peralte y 4" de patin sección liviana (27.38kg/m de peso) colocadas a cada 1.0m, y concreto hidráulico simple, para dar un espesor final de soporte de 40cm.

**Sección tipo 3:** Consideró un espesor de revestimiento de 35cm. de concreto armado.

**Sección tipo 4:** Consideró un espesor de revestimiento de 27.5cm (20cm de concreto simple y 7.5cm de concreto lanzado, en caso de no contar el tramo correspondiente de concreto lanzado, el espesor final de revestimiento sería 27.5cm de concreto simple).

- Las secciones adicionales para zonas de concreto armado los espesores de revestimiento son.

sección E5:	5.40m
sección 2a:	5.50m
sección 3a:	5.40m
sección E1a:	6.30m
sección E4:	7.50m

## **E. Procedimiento de Construcción**

### **1. Alternativa (s)**

**Inicialmente por concurso y adjudicación de obra se tenía contemplado revestir el túnel los primeros 500m de concreto armado y el resto a base de concreto lanzado con 15 y 30cm de espesor respectivamente. Posteriormente se decidió revestir el túnel de conducción en toda su longitud como anteriormente se describió en los párrafos anteriores.**

**Se realizó una propuesta inicial de la forma como procedería llevar a cabo el revestimiento del túnel con sus metodologías, la propuesta comprende de la siguiente forma:**

**a. Se propone que para distancias menores de 3500m desde el frente a la planta de concreto se utilizara mezcla húmeda, sin necesidad de instalar un tren de colado. Este procedimiento se describe más adelante ya que el mismo no se modifico con la metodología real de revestimiento.**

**b. Para colados de túnel a distancias mayores de 3500, desde el frente previsto a la planta de concreto, se utilizaría mezcla seca. Por lo tanto se instalaría en el interior del túnel un tren de colado para la elaboración de concreto en el frente. Este conjunto de equipos se instala arriba de un cambio californiano, de esta forma se mantiene el acceso al frente para permitir la limpieza contemporánea del colado y la posibilidad de ejecutar trabajos de reposición de roca en piso en caso de presentarse sobreexcavaciones considerables.**

**La disposición del tren de colocado que se utilizaría consta de tolvas para el transporte de agregados y cemento que estos a su vez alimenten por medio de una banda transportadora a 2 mezcladoras de 5M3 y las mezcladores a su vez a la bomba de concreto por medio también de una banda transportadora, la bomba colocaría el concreto en la boveda del túnel a una distancia no prevista por la descripción, pero consistiría en un promedio de 120-140m ya que adelante de la bomba, estaría la rezgadora y las tolvas retirando la rezaga inicial en piso producto de la excavación.**

**Prevista esta técnica de construcción, la estrategia para el colado del**

concreto en el túnel de conducción fue de vital importancia, dadas las características particulares del proyecto: túnel largo, accesos muy difíciles, tiempo de transporte prolongado, formaciones geológicas problemáticas que exigen un concreto sin grietas.

Por recomendaciones del grupo consultor, consideró que mediante el uso de aditivos retardantes de fraguado no era necesario usar la mezcla seca. Uno de los inconvenientes de está fue que durante el tiempo de transporte se inicia la reacción entre el agua de los agregados y el cemento, por lo que al agregar el agua de diseño la reacción ya a progresado en un porcentaje desconocido. La consecuencia es un concreto de mala calidad y con resistencias erráticas. Por experiencia del grupo en otros proyectos indica lo inconveniente que es la mezcla seca y que, mediante el uso controlado de aditivo, es posible retardar el fraguado por más de una hora.

## **2. Procedimiento real de construcción.**

Adoptada la metodología real de revestimiento este procedimiento difiere al propuesto inicialmente en lo siguiente:

- Para distancias menores de 3500m, no difiere el procedimiento de construcción, ya que antes de llevar a cabo el revestimiento, garantiza la sección mínima a línea "A", realiza la reposición de roca en piso de todo el tramo considerado y procede a la recolocación de vía ferrea de toda la longitud por colar.

- Para distancias mayores de 3500m (V1V2; V4-V6) se considero en la propuesta inicial colocar un tren de colado en el interior del túnel como se describio en el punto anterior, dicho procedimiento se anulo a causa de las complicaciones que tendría realizar el revestimiento, retirar la rezaga y regularizar el piso en forma simultanea. Se optó de igual forma al punto anterior, realizar la reposición de piso en toda la longitud y garantizar la sección mínima de revestimiento. Esta alternativa fue posible realizando análisis de ciclos, el uso de aditivos relardantes y fluidificantes que durante en tiempo de uso de la mezcla no alteraran su calidad.



### **a. Reposición de piso.**

Una vez concluida la excavación se procedió a una serie de trabajos preliminares al calado para garantizar una mayor realización de labores que se desarrollaron una vez instalada la cimbra colapsable, los trabajos previos se describen como sigue:

1) Se realiza un control topográfico para garantizar la sección mínima requerida a línea "A" en toda la longitud en cuestión, en caso de detectar peines o subexcavaciones estos se procedieron a realizar. En este caso durante su construcción se detectaron un gran número de peines de dimensiones variables. La forma con la cual el contratista retiro los mismos fue a base de barrenación corta, carga y voladura del tramo que consideraría colar. durante en periodo determinado.

2) Retiro de vía ferrea y rezaga de Piso, se procedio a la limpieza manual con chiflon de agua y aire, en los casos donde la calidad de la roca era mala (zonas con alto grado de fracturamiento é intercalación de arcilla) se reduce a un supleteo mínimo retirando manualmente el material suelto.

3) Colado de la plantilla a base de concreto hidráulico simple con  $f'c=150\text{kg/cm}^2$  tangente a la línea "A", esta actividad se realizó en tres formas cosntructivamente distintas:

3.1 A base de concreto bombeado. Se preparaban tramos de 50-100m se instalaba la bomba y tubería con tramos de 3.0m c/u a lo largo de todo el tramo de tal forma que la bomba quedara instalada en el lado opuesto donde de se iniciaba el colado\*. El acarreo del concreto se realizaba desde la planta el sitio de colado con transportadres conocidos como mixer ó moran con capacidad de 5m<sup>3</sup> cada uno. Este sistema de colado se llevo a cabo en el tramo caverna-ventana uno (km 1+500 al 3+100).

\*(Para este tramo no se realizo previamente el retiro de resaga y vía ferrea, conforme se fue avanzando se preparaban tramos con la longitud antes descrita)

3.2 Colados a tiro directo. Para llevar a cabo estos colados de reposición, se realizo previamente lo conserniente al opunto 2 en toda la longitud de los tramos correspondientes; OT-CAVERNA V3-V2, V2-V3, V4-V3, V2-V1 ( Cad.

8+720 al 6+870). V4-V6 (15+200-18+000).

La forma como se desarrollaron estos colados, fue de la siguiente forma:

Tramos perfectamente lavados, soplados y sin acumulamiento de agua (80 a 100m)

Ya realizado el colado de este tramo, se esperaba un tiempo de 8hr para proseguir con el colado siguiente dándole una duración de fraguado al concreto de (8hr).

Este fue el sentido del colado hasta cerrar con la longitud total prevista para dicho frente.

El equipo de transporte fue por medio de normet operando con 3m<sup>3</sup> de concreto cada uno (tres unidades por frente).

Para el frente V2-V1 (cadenamientos anterior descritos) el transporte más eficiente dada la dificultad de la pendiente en el acceso (17%) fue con camiones volteo de 5 M<sup>3</sup> de capacidad, operando con 2m<sup>3</sup> de concreto cada uno (tres unidades). La fabricación del concreto para este frente, se realizó por medio de una planta no prevista en la planeación original, dosificando los agregado, agua y aditivos por volumen, para la mezcla de los mismos se dispuso de una olla revoladora sobre neumáticos con capacidad de 4.5 M<sup>3</sup>.

**3.3 Colado a tiro directo (transporte con equipo sobre vía).** Los colados de reposición que se llevaron a cabo con este procedimiento, correspondio a los frentes V1-V2 (cad. 3+100 al 6+870), (V6-V4 (18+000 - 20 +900), la forma de construcción fue la siguiente:

- Retiro de rezago y vía ferrea de tramos cortos (100-150mL)
- Posterior se realizaba la limpieza de la zona con chiflon de agua y aire, para garantizar una buena adherencia entre la roca y concreto
- Se instala nuevamente la vía ferrea perfectamente alineada y nivelada, ya que esta quedaría embebida en el concreto de reposición.
- El transporte y vaciado a tiro directo del concreto fue con mixer ó carros moran con 4-5m<sup>3</sup> de concreto c/u respectivamente (tres unidades).
- El sentido del colado con este procedimiento, se pudiera decir que fue continuo, quiere decir que no se daba tiempo para que fraguara el concreto, si

el tramo preparado era del cad. 3+100 al 3+250, el colado comienza en el cad 3+100 vaciando el concreto en forma continua hasta cerrar con el cad. 3+250. El equipo de transporte pasaba por la vía no afectando la estructura del concreto cuando estaba fresco aun.

Cuando se terminaba el colado de dicho tramo (100-150m), se preparaba nuevamente otro de la forma anterior descrita, de esta forma se llevo a cabo la reposición de piso para estos frentes.

4) Una vez concluida la reposición de roca de los tramos, en cuestión, se procedía a la recolocación de vía con la precisión suficiente para garantizar un buen transito de los trenes durante el colado, Esta recolocación excluye a los tramos V1-V2, V6-V4, ya que dicha vía quedo embebida durante la reposición de roca.

5) Por lo conserniente a la ventilación, una vez comunicados los frentes se procederio al retiro de los ductos de ventilación y los ventiladores interiores por donde pasaria la cimbra. Del lado opuesto al sentido del colado se instaló una puerta estancia con un ventilador que aspiraba aire del exterior y lo anviaba al túnel. Este sistema es comunmente utilizado para la ventilación de minas subterranas que pudo garantizar un buen resultado en el túnel garantizando la estanqueidad de la puerta.

#### **b. Mezclas.**

Respecto a las dimensiones en las estructuras, se consideraron tres tipos de concreto: Masivo, cuyo espesor era mayor de 100cm, semi-masivo, con espesor entre 60-100cm y normal, con espesor menor de 60cm. Cuando por efectos de sobre-excavación u otra causa, el espesor previsto aumento, el concreto debería tratarse como semi-masivo ó masivo, según el caso.

Para las estructuras que atribuyeron a las obras de generación (t. conducción) se tuvieron los siguientes concretos:

1. Concreto simple de  $f'c=100\text{kg/cm}^2$  para rellenos o reposición de caidos.

2. Concreto simple o reforzado de  $f'c=150\text{kg/cm}^2$  para regularizar el piso en algunas zonas de los túneles, en firmes, banquetas, obras de arte,

registros, cimentaciones menores y restituciones.

3. Concreto simple reforzado de  $f'c=200\text{kg/cm}^2$  y  $f'c=250\text{kg/cm}^2$  para el revestimiento de los túneles.

4. Concreto o mortero lanzado de  $f'c=200\text{kg/cm}^2$ .

La utilización del tamaño máximo de agregado (TMA) fue el que a continuación se describe.

**TMA**                      **Estructura**

**38mm (1 1/2")**Muros, losas, vigas, pilos, tapones de sacavones y revestimiento de subterráneas entre 30 y 100cm de espesor.

**19mm (3/4")**Muros delgados, losas, revestimiento en subterráneos con espesor menor de 30cm.

La temperatura de las diferentes mezclas de concreto no debieron exceder los valores mostrados en la siguiente tabla:

Tipo de concreto	Espesor, elem. Por colar, cm	Temperatura en planta °c	Máxima al colar °c
Masivo	> 100	20.0	23.0
Semi-masivo	60-100	23.0	26.0
Normal	< 60	28.0	31.0

**Dosificación de mezclas.**

La dosificación para las diferentes resistencias y tamaño máximo de agregados para el túnel de conducción fue la siguiente clasificación. Estos diseños fueron elaborados considerando agregados provenientes del banco yethay y Cemento Cruz-Azul tipo II puzolana de bajos álcalis.

Resistencia kg/cm <sup>2</sup>	150	230	300		
TMA	<sup>3</sup> / <sub>4</sub>	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	3		<sup>3</sup> / <sub>4</sub>
Forma de Colocación	Directo	Directo	Directo	Directo	Bombeable
Cemento kg/m <sup>3</sup>	220	200	200	230	340
Agua lt/m <sup>3</sup>	150	170	118	120	170
arena kg/m <sup>3</sup>	948	972	7X0	700	890
Grava <sup>3</sup> / <sub>4</sub> " kg/M <sup>3</sup>	1029	507	390	384	965
Grava 1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> " kg/M <sup>3</sup>	-	507	520	512	-
aditivo c.c/kg-cTo	4c.c	4c.c	4c.c	4c.c	4c.c

\* La resistencia fue a 90 días en cilindros 30 x 45 cm, el aditivo pozzolith 322-R (retardante de fraguado), su disificación podría variar, dependiendo de las condiciones de campo al momento de colado, no debiendo rebasar los c.c por kg de cemento (c.c= Centímetros cúbicos).

### Clasificación de Proporciones para Concreto Bombeable

Resistencia kg/cm <sup>2</sup>	100	150	250	300	
TMA	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	<sup>3</sup> / <sub>4</sub>	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	<sup>3</sup> / <sub>4</sub>	<sup>3</sup> / <sub>4</sub>
Forma de colocación	directo	bombeable	bombeable	bombeable	bombeable
<sup>1</sup> / <sub>C</sub>	1.14	0.81	0.59	0.61	0.59
<sup>6</sup> / <sub>A</sub>	50/50	48/52	55/45	50/50	50/50
<sup>6</sup> / <sub>G2</sub>	60/40	-	57/43	-	-
cto.	180	230	265	280	300
Agua	205	186	156	171	177
Arena	10X0	993	853	898	900
Grava <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	605	919	590	898	900
Grava 1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	405	-	450	-	-
Grava 3	-	-	-	-	-
Pozzalith 322-R 4c.c. en Lts.	0.720	0.920	0.060	1.120	1.200
MB-VR (0.4c.c) Lts.	-	0.092	0.106	0.112	0.1200

MB- VR: Aditivo inclusor de aire

Pozzalith 322-R: Aditivo retardante de fraguado.

En cuanto a estas mezclas, se fueron realizando modificaciones en campo haciendo ajustes para determinar las mezclas definitivas, principalmente las de uso para el revestimiento definitivo. Se realizaron modificaciones en cuanto el

contenido de cemento, agua y aditivos adaptando esta mezcla a los largos periodos de tiempo (hasta 2Hr). Logrando que el concreto conservara sus mismas características de Rvto (+/- 2cm), trabajabilidad cohesión y cuerpo para la bombeabilidad del mismo. Finalmente se llego al diseño de las siguientes mezclas:

Resistencia Kg/cm <sup>2</sup>	250	
TMA	<sup>3</sup> / <sub>4</sub>	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>
Cemento	300 kg/m <sup>3</sup>	280kg/m <sup>3</sup>
arena	849kg/m <sup>3</sup>	936kg/m <sup>3</sup>
Grava 3/4	1000kg/m <sup>3</sup>	664kg/m <sup>3</sup>
Grava 1 1/2"	-	358kg/m <sup>3</sup>
agua	156lt/m <sup>3</sup>	154lts/m <sup>3</sup>
pozzolith 322-R	3.6lt/m <sup>3</sup>	3.36lt/m <sup>3</sup>
Rheobuild xA-3520 (fludificante, reductor de agua).	0.6lt/m <sup>3</sup>	0.560lt/m <sup>3</sup>

### c. Plantas para la producción de concreto.

Las plantas para la producción de concreto del revestimiento definitivo estuvieron ubicadas en la zona de boquilla, ventana uno, ventana tres y ventana seis respectivamente.

1. La planta ubicada en la zona de boquilla (CIFA), no se tenía contemplado su uso en el programa original para dar abastecimiento al túnel de conducción, esta estaría enfocada en las obras correspondientes a la zona de boquilla como son cortina, vertedor, lumbreras del túnel de desvío etc. Se requirió del apoyo de esta planta para dar los tratamientos de soporte definitivo de la caverna, reposición de roca en piso y revestimiento definitivo de concreto aramado los primeros 300 correspondiente al túnel de conducción (o.t-caverna).

2. Las plantas ubicadas en las ventanas uno, tres y seis respectivamente son las que se enfocaron a revestir en su totalidad el túnel de conducción.

Las plantas en ventana uno tres, tienen las mismas características de fabricación, estas plantas individuales, estaban diseñados para una producción de concreto de  $35\text{m}^3/\text{hr}$ , Dosificando en forma manual, conto con 2 mezcladoras de eje horizontal con capacidad de  $6\text{rd}^3$  c/u y  $\text{d}^{3\text{c}}/\text{u}$ , montado sobre porticos y una banda trasportadora para la carga de los mismos, basculas de cemento y agregados, dosificadora de aditivos, hidrómetro electrónico; así como tres tolvas para agregados de  $18\text{m}^3/\text{u}$ , conto con silos de cemento para almacenamiento a granel de 30-50 y 450 ton.

Para la verificación del buen funcionamiento de las plantas, los dispositivos de medición debieron ser calibrados cada 15 días como máximo ademas estableciendo un programa de mantenimiento. La tolerancia de presición para los dispositivos de medición correspondiente a los especificados técnicas para esta obra era el 2%.

La planta de concreto de ventana uno fue aprobada para la producción de concreto para revestimiento, después de haber cumplido con lo especificado en cuanto a sus requerimientos propios de la planta, arreglo de patios (construcción de mamparas), protección de tolvas y bandas transportadas contra sol y lluvias, equipo de transporte para el concreto, personal de operación y control de mezclas.

La planta de ventana tres se aprobó, para la producción de concretos, cumplimiento de igual forma los requerimientos que la planta de ventana uno.

Estas dos plantas no contaron con dispositivos para la dosificación de hielo este se tiene que adicionar manualmente cuando se requería para controlar las temperaturas del concreto fresco,  $28^\circ\text{c}$  en planta y  $31^\circ\text{c}$  en colocación.

La planta ubicada en ventana seis cubrió los requisitos de igual forma que las plantas anteriores, esta planta conto con dispositivos propios para la fabricación y dosificación del hielo en escamas. Esta planta cubrió las necesidades de concreto para el revestimiento del túnel de conducción (V4-V6), tubería de presión y pozo de oscilación.

#### **d. materiales para la producción del concreto.**

**1. Agregados.** La utilización de los agregados para el túnel de conducción, fueron procesados en la planta del banco yethay y donde se controló la



**producción verificando que estos cumplieron con los requisitos de calidad especificada ASTM C-33.**

**La producción generada en este banco de agregados, cubrió las necesidades de la zona de boquilla y túnel de conducción. Para el traslado de los agregados a los frentes de revestimiento se verificó su aceptación antes de dar salida, se realizan pruebas para garantizar su calidad como fueron:**

**Análisis granulamétrico de agregados (ASTM C 136-84a), determinación de piezas planas  $\frac{V}{O}$  alargadas (ASTM C-119-63), peso volumetrico de agragdos (ASTM C 29-87), impurezas organicas en arena (ASTM C 4-84), perdida por lavado de agregados (ASTM C 117-90), densidad y absorción de Gravas (ASTM C 127-88), densidad y absorción de arena (ASTM C 128-88).**

**Los bancos de almacenamiento en los frentes de revestimiento (V1, V3, V6) debían tener extensión suficiente para acomodar todos los agregados sin que estas se mezclaran y sin formar pilas de altura excesiva que ocasionara segregación. El terreno se emparejaba previamente dandole pendiente para permitir su drenaje, se colocaba una plantilla de concreto pobre o agregados apisanados. Para las operaciones de carga y descarga de agregados clasificados debería usarse solo equipo previsto de llantas de hule.**

**Para el revestimiento del tramo V4-V6, suministro por V-6, los agregados eran procesados y clasificados por casa de maquinas del arroyo toliman.**

**2. Cemento. Inicialmente el cemento autorizado y requerido por las especificaciones técnicas para el túnel de conducción, era cemento portland-puzolana tipo Ip, utilizado en el concreto lanzado y reposición de roca en piso (caverna-V1). El uso de este tipo de cemento se modifico para cualquier obra conservniente para el túnel de conducción usando cemento "Cruz Azul" tipo Iip, de bajos alcalis procedentes de jasso hidalgo. (la justificación de este cambio se debio a la alta reacción alcali-agregado del agregado del banco yethey con el cemento tipo Ip)**

**El transporte y almacenamiento del cemento en sacos y a granel fue realizado en la planta de concretos cifa (ubicado en la zona de boquilla). La calidad era aprobada desde la planta cementera, no existiendo problemas para su utilización.**

**El cemento a granel era almacenado en silos hermeticos de 800ton. de capacidad cada uno el cual se va controlaba su salida a las plantas instaladas en V1 y V3 de tal forma que no se utilizara cemento caliente durante los colados de revestimiento (40°C como temperatura máxima para su utilización).**

**3. Agua. El agua fue imprescindiblemente uno de los problemas importantes durante el desarrollo de los colados, inicialmente concreto lanzado, reposición de roca y revestimiento definitivo.**

**El agua autorizada para la producción de concretos en el túnel de conducción fue sin problemas la procedente del río moctezuma.**

**Se rechazo el uso de agua para la producción de concreto de los abrevaderos y escurrimientos naturales procedentes en las ventanas dos y cuatro por su alta concentración de sulfatos, mayor de 1000 ppm (partes por millon). Como se indica en las tablas 3.1 y 3.2**

**Durante la etapa de revestimiento del túnel y posterior al cierre del túnel de desvío las necesidades de agua en los trabajos de revestimiento, inyecciones, reparaciones fue una necesidad preponderante respecto a la necesidad de un gasto mayor. Para el frente de V4 hasta V2 se atendio este problema suministrando agua de ventana cuatro de las filtraciones y escurrimientos naturales sobre el cause del río moctezuma, reforzando el suministro con pipas de agua de 15m<sup>3</sup> en ventana tres precedente de boquilla.**

**Para el frente de obra de toma a V-2 el suministro inicialmente fue por el cause del río moctezuma desde la ventana uno. Posterior al cierre del desvío se atendieron las necesidades por la boca toma procedente el agua ya del embalse de la presa a previo tratamiento durante su uso. A ventana dos se apoyo el suministro de agua por medio de pipas con 15m<sup>3</sup> de capacidad procedente de boquilla.**

PRUEBAS FÍSICAS Y QUÍMICAS A MUESTRAS DE AGUA				
CONCEPTOS		RESULTADOS		
IDENTIFICACION	Muestra No.	Especificación		
	Procedencia		Utilizados por CFE	
	Fecha de muestreo	Método de prueba ASTM		
	Sitio de obtención			
ANÁLISIS QUÍMICO (P. P. M.)	Cationes en forma de:	CaO (óxido de calcio)	D-511	
		MgO (óxido de magnesio)	D-511	
		Na <sub>2</sub> O (Óxido de sodio)	D-1428	
		K <sub>2</sub> O (óxido de potasio)	D-1428	
	Aniones	HCO <sub>3</sub> (bicarbonatos)	D-513	500 máx
		CO <sub>3</sub> (carbonatos)	D-513	
		OH (hidróxidos)	D-513	
		SO <sub>4</sub> (sulfatos)	D-516	1000 máx
		Cl (cloruros)	D-512	600 máx
		NO <sub>3</sub> (nitratos)	D-992	
		CO <sub>2</sub> (bióxido de carbono)	D-513	Trizas o P.H. no menor de 6
		O <sub>2</sub> (oxígeno consumido en medio ácido)	D-1252	20 máx
		Sólidos disueltos	5 UNIDADES de unidades de resistencia	2000 máx
		Sólidos en suspensión		
MEZCLA DE MUESTRAS ASTM D-109	pH	D-1298	6 mín	
	Índice de resistencia a compresión con respecto a mortero hecho con agua dest.			
	A 7 días (99)		90 mín.	
	A 28 días (99)		90 mín.	
A 90 días (99)		90 mín.		

Tabla 3.1. Pruebas Físicas al agua (limites)

PRUEBAS FISICAS Y QUIMICAS A MUESTRAS DE AGUA					
CONCEPTOS		RESULTADOS			
IDENTIFICACION	Muestra No.	94-020	94-021	94-022	
	Procedencia	P.H. ZIMAPAN HGO.			
	Fecha de muestreo	21-Feb.94	21-Feb.94	22 Feb.94	
	Sitio de obtención	pta. CIFA Embalse	Deposito V3 Río Moctezuma	Pta. ICOMA Río Moctez.	
ANALISIS QUIMICO (p. p. m)	Cationes en forma de:	CaO (óxido de calcio)	140	84	78
		MgO (óxido de magnesio)	56	24	20
		Na2 O (Óxido de sodio)	230	74	74
		K2 o (óxido de potasio)	26	10	10
		HCO3 (bicarbonatos)	434	203	176
	Aniones	CO3 (carbonatos)	17	3	7
		OH (hidróxidos)	-	-	-
		SO4 (sulfatos)	167	126	126
		Cl (cloruros)	170	37	36
		NO3 (nitratos)	NO SE DETERMINO		
	CO2 (dióxido de carbono)	-	-	-	
	O2 (oxígeno consumido en medio ácido)	6	3	3	
	Sólidos disueltos	600	380	360	
Sólidos en suspensión	---	---	---		
MEZCLA DE MORTERO ASTM C 109	pH	6.9	6.4	6.4	
	Índice de resistencia a compresión con respecto a mortero hecho con agua dest.				
	A 7 días (%)	98	98	100	
	A 28 días (%)				
	A 90 días (%)				
Observaciones: Las aguas por su bajo contenido de sales solubles son aptas para la fabricación y curas del concreto.					

Tabla 3.2. Pruebas físicas al agua en obra.

**4 Aditivos.** para su uso se realizan análisis y estudios propios para las necesidades acorde con el uso de concretos en la obra. Los aditivos utilizados en la fabricación de concreto cumplen con los requisitos de calidad según la norma ASTM-C494 el cual fueron los siguientes:

- a) Pozzolith 322-R.- Retardante de fraguado, fluidificante.
- b) MB-VR.- Includor de aire.
- c) Rheobuild XA-3520.- Reductor de agua, plastificante
- d) Curaquin E Blanco.- Membrana para curado, emulsión blanca acuosa.

#### **e. Metodología y control del colado continuo.**

El procedimiento constructivo para el revestimiento tenía la misma similitud las tres cimbras que abarcaba el túnel de conducción. La ubicación, longitudes por colar y restricciones en cuanto al tiempo de ejecución se desarrolló en el inciso correspondiente al programa de revestimiento.

Acabados los trabajos previos al revestimiento definido el eje del colado y asegurada la geometría del túnel, se procedió a la instalación de la cimbra telescópica. 66ml de cimbra colapsable compuesta por 11 módulos y 12 invert de 6.0m de longitud cada uno, jumbo transportador para el movimiento de los módulos (electrohidráulico) y 11 carros desplazados a lo largo del centro del invert para el acabado en la zona central del piso.

##### **1) Procedimiento general previos al revestimiento definitivo.**

Dado que el revestimiento definitivo constituyo la etapa final de construcción del túnel, fue de vital importancia obtener resultados satisfactorios en cuanto a las dimensiones, acabados y calidad del mismo, por lo que requirio llevar a cabo durante su construcción una excelente planeación de los métodos constructivos, así como un buen desarrollo y control antes, durante y despues de los colados, considerando los siguientes aspectos:

##### **1.1) Requerimientos previos al colado.**

En esta etapa se hacía la recepción de la excavación, tratamientos y limpieza, lo cual en ambos casos debería ir por adelantado, previo al desplazamiento de la cimbra.

**Excavación:** Se realiza un última verificación, en caso de existir pequeños peines se procedía a su retiro.

**Tratamientos:** Debido a que durante la excavación se realizaron tratamientos de soporte como anclaje y concreto lanzado, se realizaron peines en zonas donde se encontraba dicho tratamiento, se analizó el estado de soporte y calidad de la roca donde se determina se excluyera o realizara nuevamente.

Respecto a las zonas cársticas, estos tratamientos se realizaron previo al movimiento de la cimbra.

**Limpieza:** Se realizó el retiro del material grueso como rezaga o desperdicio con el fin de facilitar las maniobras de la cimbra.

### **1.2) Acero de refuerzo.**

- Previo al habilitado del acero este debería contar con certificados de calidad del fabricante.

- Contar con el despliegue del proyecto, respecto a las indicaciones del mismo, este se debería apegar a las normas ACI-318-77, capítulo 7

### **1.3) Preparación de la junta de construcción.**

Durante la suspensión e inicio de un colado, las juntas de construcción eran tratadas de manera que los agregados quedaran expuestos para recibir el siguiente colado; se realizó con chifon de agua-aire cuando el concreto ya tenía cierta resistencia mecánica.

### **1.4) Control de la cimbra.**

Durante el movimiento de la cimbra, debido a que durante su uso y manejo, presentaba desgastes y deterioros, estos defectos se deberían ir reparando para dar continuidad a los colados posteriores.

Para el movimiento de la cimbra durante el colado continuo, los modulos deberían estar limpios, sin incrustaciones de concreto ó cualquier otro elemento contaminante, garantizando el acabado F-4.

### **1.5) Colocación de la cimbra.**

Las uniones entre módulos e invert deberían estar dentro de las tolerancias especificadas en las tablas 3.11 del manual S.R.H 1970. Durante el ensamble de la cimbra, los elementos que dan fijación y rigidez a la estructura como son pasadores y peines estos deben estar debidamente colocados para no sufrir desplazamientos durante el colado.

### **1.6) Control topográfico.**

Para el alineamiento horizontal y vertical de la cimbra este se controló por medio de bancos de nivel predispuestos y revisadas con anterioridad, se dejaban referencias en las paredes del túnel para el alineamiento horizontal y clavos en el piso a lo largo del eje del túnel para el alineamiento vertical.

El alineamiento vertical y horizontal de la cimbra correspondió con las siguientes tolerancias:

- \* Alineación o pendiente establecida 20.0mm
- \* Variaciones en las dimensiones interiores 0.5%
- \* Variación del espesor establecido en cualquier punto 0.

El control topográfico de la cimbra se realizó en el movimiento de cada módulo en toda la longitud del túnel debido al constante movimiento de esta y así evitar la acumulación progresiva de error en los desalineamientos y tolerancias indicadas en los puntos anteriores.

### **2) Metodología del colado (antes, durante y después del mismo).**

Una mezcla de concreto puede tener propiedades y características adecuadas que satisfagan los requisitos de comportamiento bajo condiciones particulares de uso sin embargo durante su construcción si no se toman medidas preventivas de control, se obtendría un concreto con marcadas deficiencias de calidad.

Para el inicio de los colados de revestimiento, durante su desarrollo, la contratista debe apegarse a los lineamientos constructivos especificados para ello, es responsabilidad de la supervisión comprobar y controlar se llevan a cabo los requerimientos de calidad que para este tipo de revestimiento se requiere.

**Por tanto los procedimientos de construcción a ejecutados durante el revestimiento del túnel se desarrolló bajo los siguientes aspectos:**

### **2.1) Desarrollo antes del colado.**

**Para dar inicio a cualquier colado de revestimiento se debería cumplir con los siguientes puntos.**

**-Contar con un almacenamiento de agregados (previa aceptación desde su salida en la planta trituradora) libre de contaminación.**

**- El volumen de agregados debe ser suficiente para el transcurso del colado, en este caso durante los colados continuos (10-11días) debería contarse con un stock suficiente. Previo al uso de lo mismos, el agregado se homogenizaba para corregir cualquier alteración en su composición granulométrica.**

**- Para el inicio y durante el transcurso del colado, se adecuaba la mezcla con las correcciones por contaminación y humedad, la limpieza y el funcionamiento del equipo de transporte debería ser eficiente, así como el número mínimo de unidades, previendo tener una unidad de respaldo. Para este punto después de un análisis de ciclos para distancias largas (que adelante se describe), se determinó en número mínimo de 5 unidades. Es importante no descuidar este punto ya que ocasionaría problemas en el suministro, traducido esto a periodos largos de espera en el sitio de colocación, ocasionando problemas en el acabado (principalmente apariencia de juntas frías, cambios de calor en el concreto panel de abeja, presencia de mucha burbuja en las partes laterales del túnel y piso por exceso de vibrado, etc.,)**

**- Al inicio del colado las cuadrillas de personal deberían estar completas tanto en el sitio de colocación como en la planta.**

### **Requerimientos en el sitio de colado**

**- El área de colado debería estar limpia, lavada y sopleteada, retirando todo el material suelto de la sección transversal.**

**- En caso de haber un colado anterior, se escarifica la junta de construcción ó la superficie de contacto de cualquier concreto que estaría en**



contacto con el concreto nuevo.

- Se realizaba la limpieza, calafateo y aplicación del desmoldante a la cimbra.

- En el área de colado, la iluminación debería ser suficiente tanto en las partes laterales y boveda del interior de la cimbra; Equipo, los vibradores de contacto, vibradores manuales de 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub>" y 3" de o , en buen estado y funcionamiento mecánico.

Durante el proceso de colado, la cimbra contaba con un gran número de vibradores de contacto 70-80 pzas, distribuidos de tal forma que garantizaban un buen acomodo y compactación del concreto, los vibradores manuales (1 1/2") ayudaban a la compactación del concreto en las partes laterales del túnel y la zona de piso.

- El personal del sitio de colocación debería estar completo; este personal corresponde a todo el que labora en el interior del túnel, se componen en 3 cuadrillas:

**Cuadrilla de limpieza:** Durante el colado continuo, este personal realizaba las siguientes actividades, retiro de rezaga manual, limpieza, lavado y sopleteo de la zona donde se va colocaba la cimbra; colocación de retenes transversales a cada 6.0m a base de malla desplegable sostenida con vr. de <sup>3</sup>/<sub>8</sub>" y 1" de diámetro; retiro de vía ferrea y durmientes conforme el avance de la cimbra, esta actividad se llevo acabo en los tramos donde la vía no quedo enbebida en el concreto, de reposición (V1-Caverna, V2 a V4).

**Cuadrilla de colocación del concreto.**

**Cuadrilla de montaje de cimbra y curado.**

La bomba de concreto.- La tolva debería estar limpia, la instalación y troquelamiento de la tubería debe garantizar la estanqueidad de la misma y contar con una válvula para el cañoneo del concreto (15mt antes de la salida del concreto, manguera de aire de 2" de 0), la tubería se autosoportaba de un carro transportador, rodillos con vr anclados en la boveda del túnel a cada 6mt (3 pzas) y el resto de la tubería se autosoportaba sobre la cimbra, la longitud de la tubería en el tramo recto era de 45 mts.

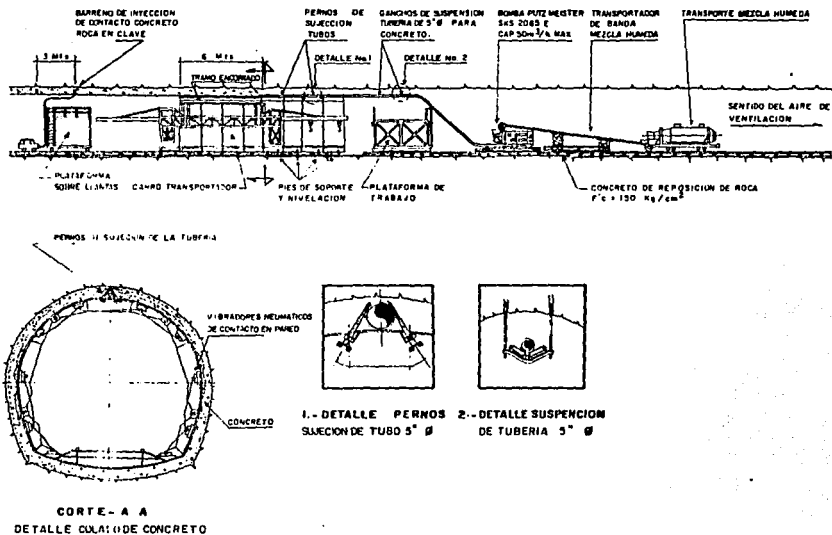


Fig. 31 Procedimiento de Colado

## 2.2) Desarrollo durante el colado.

Para la metodología durante el colado se consideraron puntos de control tanto en planta como en el sitio de colocación los cuales describen a continuación:

### Planta:

- Se controla la mezcla de concreto, mediante pruebas físicas como son: revenimiento estipulado, (simple 12+2cm, armado 14+2), temperatura (28°C máx por especificación), peso volumétrico (el que determina laboratorio de concretos durante el diseño de la mezcla), contenido de aire (esencial para el

bombeo del concreto 4 a 7% según la necesidad de la mezcla). Para controlar la mezcla por temperatura fue necesario colocar hielo en escamas en sustitución por volumen de agua, principalmente en los meses calurosos, se realizaban cilindros para prueba de 15X30cm a cada 250m<sup>3</sup> de concreto fabricado ó menos si había indicios de alguna variación.

**Sitio:**

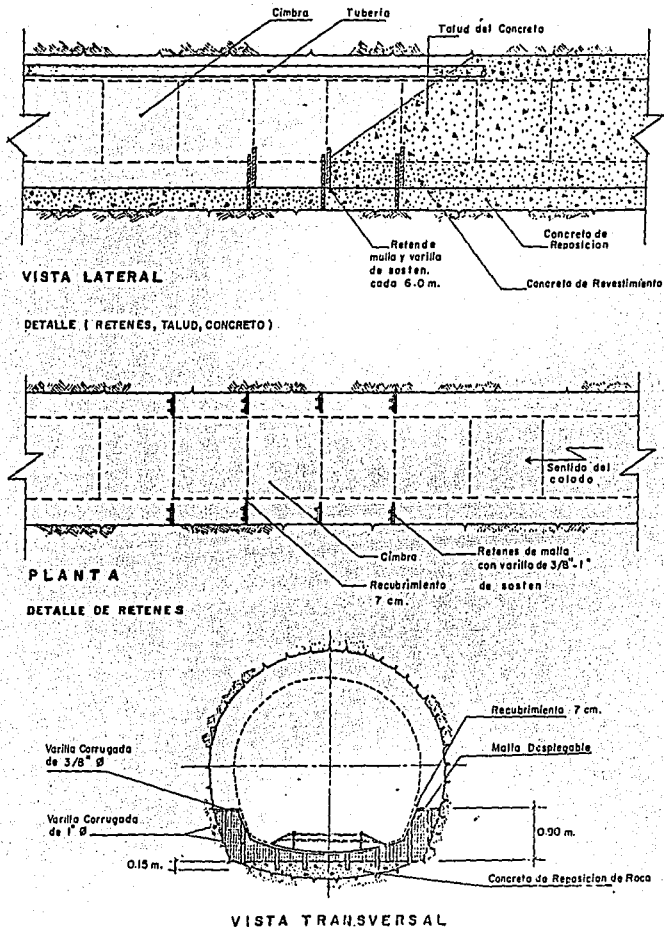
- Durante el traslado del concreto al sitio de colocación el tiempo aceptado entre fabricación y colocación fue 90min (1<sup>1</sup>/<sub>2</sub> horas), este tiempo fue modificado al indicado en las especificaciones técnicas para esta obra de 45´ mín a 90´min. La modificación a este tiempo, fue a la inclusión de un aditivo retardante de fraguado (pozzolith-322-R), analizado previamente en la laboratorio en cuanto a su dosificación.

- La homogenización del concreto en el sitio de colado fue preponderante ya que a distancias largas (mayores de 3500m) el concreto tiende a segregarse fluyendo agua del mismo a la superficie del transportador (mixer), se requirio de 60-70 revoluciones, tiempo alcanzado durante 4-5min por los transportadores de concreto.

- Homogenizado el concreto, se evalua el revenimiento en el sitio de colocación, determinando si este cumple con el especificado, 12+2 (concreto simple). Ademas se verifica la temperatura del concreto de 31°c como máximo.

Inicialmente se podia redosificar aditivo fluidizante en el sitio de colocación para levantar el revenimiento requerido. esta adición tuvo consecuencias en cuanto a la homogenización del concreto con el equipo de transporte, mal control del aditivo y por consecuencia retardo de fraguado para decimbrar en el tiempo previsto. De tal forma no se autorizo adicionar aditivo o agua en el sitio de colocación rechazando el concreto que estuviera fuera de la tolerancia especificada.

- Colocación y compactación del concreto; durante el colado se procedió a bombear el concreto en la boveda del túnel y debido al gran número de vibradores de concreto é inmersión, este se distribuye por gravedad en toda la sección. Para llevar a cabo este fenomeno la cimbra estaba dotada de ventanillas de inspección por las cuales se intervenía para asegurar la correcta distribución del concreto. Fig. N° 32



**Fig. No.32**

Durante el proceso de colado, se adoptó colocar retenes de malla desplegable sostenidas con vr de  $\frac{3}{8}$  y 1 pulg de diámetro \* Para contener el concreto lo más posible con el fin de no tener un pateo muy largo el cual creaba problemas durante la colocación. Las desventajas de tener durante el colado un

pateo largo ( $18M^L=3$ modulos) era la dificultad de refrescar estos laterales se colocaba un poco fluido el concreto (13-14cm de rvto) para que, pudiera bajar por gravedad con ayuda de los vibradores de contacto é inmersión ligando las capas. Esto ocasiona descontrol en la planta debido a que todo el concreto ya no salía con el mismo rvto. Lo ideal y el método que dió resultado durante los colados, fue mantener un reventimiento uniforme en planta (12-13cm) y colocación (10-12cm), el pateo del concreto fue mínimo ( $12M^L$ ) el cual no dificultó refrescarlo continuamente, este reventimiento en sitio fue ideal para llenar la parte de la cubeta y boveda. Problemática muy vista durante el inicio de los colados.

Para asegurar el llenado de la boveda del túnel se predispuso que el tubo tenia que quedar ahogado en el concreto por lo menos 2.0mt, el constructor manifesto su informidad de ello lo cual inicialmente con las bombas putzmeister 206 se comenzaron los colados de revestimiento (V2-V3), este tipo de bombas no dieron resultado para los colados continuos, ademas trabajaban a alta presión provocando taponecimientos continuos, suspensión del colado y por consecuencia acabados del concreto deficientes.

Se dio continuidad a los colados de revestimiento con las bombas schwing mod. Bp 2000-2012HDE con capacidad de  $50m^3/hr$  a 300m con motor de 120kw, con este tipo de bombas no se tuvo problema para el bombeo del concreto a la distancia de trabajo en el túnel (50-55mt).

Durante el colado el tener embebido 1.5-2-0m el tubo en el concreto, aseguraba el llenado en zonas donde existía poca sobre excavación (25-40cm de revest) no cañoneando el concreto.

Para sobre excavaciones mayores (33-70-90cm) el tener embebido el tubo en el concreto provocaba presiones exesivas en la bomba, cañoneando el concreto aun teniendo embebido el tubo ocasionaba huecos en el fondo, formación de bolsas de aire y por consiguiente al vibrar se bajaba el concreto en la boveda y hacia las partes laterales volviendo a quedar hueco en el centro de la clave.

La forma de llenado que afin dió resultado sin problemas fue llevar el tubo separado 50-60cm del fondo cañoneando y vibrando ambos laterales y el centro, asegurando así de esta forma el llenado de la boveda y sin problemas latentes en el acabado del concreto, trabajando siempre con un reventimiento de

## **10-12cm en colocación.**

La prueba de ello, fue en base a la poca lechada y mortero que tomo el concreto revestido durante la inyección de contacto y muestras de nucleos que afirman la calidad del concreto (tramo de referencia V4-V3).

- Para el decimbrado se requirió un tiempo mínimo que durante el cual se alcanzara una resistencia de  $f'c=25\text{kg/cm}^2$ , ajustada la mezcla con la inclusión de aditivo retardante (322-R) y fluidificante (XA-3520), se determino un tiempo de 12hr para el decimbrado.

-Durante el colado se presentaron problemas en la producción (planta), descarrilamientos, descuido del personal de colocación para refrescar alguna zona, etc., dado que es un colado continuo el concreto debe estar todo el tiempo fresco, si el concreto presenta en alguna zona fraguado inicial, se suspende al colado y se procede a la preparación de la junta de construcción.

El fraguado se presenta cuando la superficie del concreto pierde brillo y el vibrador de inmersión ya no provoca ningun efecto (no penetra en la masa).

La junta de construcción debe tratarse de tal forma que el agregado quede expuesto, regularizar la superficie y los desniveles (realizar cortes en piso y boveda con un espesor mínimo de 20cm).

Al finalizar un colado de revestimiento, fue más conveniente y práctico dejar un talud en vez de un tápon vertical, ya que al reinicio en caso de tápon vertical se debía colocar un mangeron o trompa de elefante para evitar la caída del concreto desde altura excesiva, operación muy difil por el poco espacio entre la roca y cimbra para las maniobras de vaciado y distribución del concreto en las partes laterales del túnel.

### **2.3. Desarrollo Despues del Colado**

El movimiento de la cimbra se realizaba cuando el concreto tenía la edad establecida. Requirio un tiempo mínimo durante el cual el concreto bombeable, se ajusto la mezcla con la inclusión de aditivo retardante (322-R) y fluidificante (XA-3520), se determino un tiempo de 12hr para el decimbrado.

- El curado del concreto se realizaba cuando se inciaba el fraguado inicial

en la zona de la cubeta é inmediatamente despues del decimbrado de los modulos. Podía efectuarse el curado con agua manteniendo húmedo el concreto durante 7 días como mínimo, operación muy dificultosa en un túnel, se llevo a cabo con membrana de curado, aplicandose por aspersión en toda el área (antes de aplicar la menbrana se humedece la zona con agua).

### **3. Rendimientos Programados y Reales por frente.**

Los rendimientos previstos para el revestimiento con la propuesta original de concurso serían:

- Concreto lanzado: 25M<sup>L</sup> diarios promedio por cada día de trabajo.
- Solera: 40M<sup>L</sup> diarios promedio por cada día trabajado.

La producción media programada con la metodología real de construcción sería de 40M<sup>L</sup>/día por cimbra, llevando a disponer de una capacidad de bombeo de 17M<sup>3</sup>/hr. Esta producción fue posible alcanzarla el constructor con el tipo de bombas adquiridas (schwing Mod. Bp200-20RHDE), la modificación en las plantas de concreto y el equipo suficiente de transporte (mixer y locomotoras en buen estado hidraulico y mecánico).

La producción prevista por cimbra correspondio de la siguiente manera:

Avance promedio 880m/mes=440m/oncena=40m/día. Considerando 20hrs de trabajo, obteniendose  $\frac{40}{20}=2\text{mt/hr}$  de avance efectivo.

Las cantidades de concreto por M<sup>L</sup>, se consideraron en 10M<sup>3</sup>/m<sup>L</sup>, incluyendo también la reconstrucción de roca en piso y el relleno de nichos, Ya que estos trabajos se ejecutaron en forma independiente, la cantidad de concreto se reduce a 8.5M<sup>3</sup>/m<sup>L</sup> de túnel. Considerando esta producción prevista se tuvo que garantizar una colocación promedio de 8.5M<sup>3</sup>/mx2m/hr=17M<sup>3</sup>/hr.

Los ciclos de colado para distancias de planta al sitio de colocación, distancias de 6000m aprox. (V4-V6, V2-V1) fue la mayor a veirificarse, para distancias cortas 3000m (o.toma-V1, V2-V3, V4-V3). tuvo menor grado de dificultad.

- Ciclo de colado para distancias de 6000m.

1. carga de mixer de  $6M^3$  con la planta de  $30M^3/hr$ .

$$\frac{6}{30} \times 60 = 12 \text{min.}$$

2. Traslado desde la planta al frente con velocidad promedio de:

$$10 \text{km/hr} = \frac{6000}{10000} \times 60 = 36 \text{min.}$$

3. Descarga y bombeo.

Comprende las maniobras y 10 minutos de bombeo efectivo (bomba trabajando a  $40M^3/hr$ ) = 20min.

4. Regreso a la planta = 36min.

5. Tiempo total del ciclo = 104min.

Considerando que se requiere colocar  $17M^3/hr$ , se infiere que se necesitan.

$$104 \times \frac{17}{60} = 4.9 \text{trenes} = 5 \text{trenes.}$$

- Ciclo de colado para distancia de 3000m entre la planta de concreto y el frente.

1. Carga del mixer

$$\frac{6}{30} \times 60 = 12 \text{ min.}$$

2. Traslado desde la planta al sitio de colocación a una velocidad  $10 \text{km/hr}$

$$(3000/10000) \times 60 = 18 \text{min.}$$

3. Descarga y bombeo = 20min



4. Regreso a la planta=18min

5. Tiempo total del ciclo para  $6M^3=68min$

Por tanto:  $68 \times \frac{17}{60}=3.2$  trenes=4 trenes.

- Para el transporte del concreto de la planta al sitio de colocación, en el interior del túnel se encuentran colocados cambios de vía distantes 500-600mt uno del otro.

Es evidente que conforme se acorta la distancia entre la planta y el sitio de colocación de producción va en aumento.

Por consiguiente se describen las tablas con los rendimientos por cimbra, periodos de ejecución programado y real, defazamiento al programa.

Tabla 1.1 Periodos de ejecución, producción programada y real, cimbra #1.

Tabla 1.2 Periodos de ejecución, producción programado y real, cimbra#2.

Tabla 1.3 Periodos de ejecución, producción programada y real, cimbra#3.

#### a) Costos de excavación y Revestimiento

Excavación en túnel de conducción en cualquier clase de material

Sección 1	N\$ 3,785.00 M <sup>L</sup>
Sección 2	N\$ 4,666.829 M <sup>L</sup>
Sección 3	N\$ 4,482,781 M <sup>L</sup>
Sección 4	N\$ 4,109,053 M <sup>L</sup>

Concreto  $f_c= 250$  kg/cm<sup>2</sup> en túnel de conducción excavado (incluye inyecciones de contacto).

	Area (cm <sup>2</sup> )	
Sección 1	7.04	N\$3,060.270 M <sup>L</sup>
Sección 2	10.84	N\$4,922.913 M <sup>L</sup>
Sección 3	9.58	N\$4,132.704 M <sup>L</sup>
Sección 4	8.15	N\$3,572.241 M <sup>L</sup>

Concreto lanzado  $f_c=250$  kg/cm<sup>2</sup>

Sección 2	N\$ 2,368.671 M <sup>L</sup>
Sección 3	N\$ 1,880.448 M <sup>L</sup>

Precios cotizados Enero-1991

## F. Inyecciones del Concreto Revestido

En este inciso se describen los tipos y procedimientos de inyección que se llevaron a cabo en toda la trayectoria del túnel ya revestido, dados las problemáticas geológicas que se presentaron en la trayectoria de la conducción como fue zonas de alto recarga de agua, roca de mala calidad, zonas de baja cobertura lateral y vertical, zonas cársticas, oquedades, etc. se selecciono el tipo de tratamiento a base de inyección que se debería aplicar. Además en estos tipos de inyección abarca el tratamiento en las zonas de accesos, consolidación o sello del agrietamiento por contracción del concreto revestido (de acuerdo a este tipo de revestimiento que fue a base de colados continuos no cuenta con juntas de contracción y expansión por tanto se presenta fisuramiento sistemático a cada 6.0 M en la sección radial del túnel con aperturas de 0.01 a 0.8 mm.)

### 1. Inyección tipo "A" Contacto Concreto-roca

Esta inyección se llevo a cabo para llenar el espacio anular entre la roca y el revestimiento de concreto en la bóveda del túnel, se realiza una inyección de contacto con lechada o mortero (en función de los consumos) a través de los barrenos cortos.

Esta inyección se llevó a cabo una vez que el concreto del tramo por inyectar haya alcanzado su resistencia de proyecto. Se indican a continuación las características como llevar a cabo esta inyección. En el anexo 1 columna (5) se localizan los cadenamientos donde se aplico dicha inyección.

**a. Barrenos**, estos se realizaron en secciones a cada 3.0 m en aureolas de 3 y 2 barrenos a tresbolillo, debiendo penetrar una longitud mínima de 30 cm en roca. La sección de 3 barrenos considerará un barreno en la clave y dos adyacentes con una inclinación de 30° a cada lado del eje del túnel. Los barrenos son normales a la sección revestida con un diámetro entre 1 3/4" a 2 1/4".

**b. Los materiales y proporcionamientos para uso de lechadas y morteros destinados a este tipo de inyección son los siguientes:**

**Lechada:**

Cemento Monterrey tipo II  
Aditivo sikament Nz

Rel. a/cc=0.7  
Adit. 0.75% (con relación al peso del cemento)

**Morteros:**

Cemento Cruz Azul tipo II  
Arena triturada

Rel. a/c=0.5  
Ar/c =0.8

Cemento Monterrey tipo II  
Arena triturada

Rel. a/c = 0.5  
ar/c =0.7

**c. Presiones y volúmenes de inyección.** Las presiones máximas a utilizar fueron de 3 kg/cm<sup>2</sup> tanto para el caso de lechadas como para morteros fue recomendable cerrar la inyección con lechada para alcanzar la presión de rechazo.

Se considero que los consumos en general deberían ser reducidos, sin embargo, cuando se tenían consumos por barrenos superiores a los 150 lts se consideraba recomendable la inyección del mortero. Estos casos podían ocurrir en la consistencia de zonas cársicas.

**d. Procedimiento de inyección.** Se denomina la Aureola "A" la correspondiente a 3 barrenos y "B" la de 2 barrenos, cuando se inicia la inyección en un tramo dado, ésta dará inicio con las Aureolas "A" con los barrenos A1 y A2 (laterales) para finalizar con el barreno A3 (central), concluida la inyección de las Aureolas "A", se procederá a inyectar las aureolas "B" con los barrenos B1 y B2 se llevaron registros de los consumos correspondientes por barreno.

## **2. Inyección tipo B. Contacto Concreto-Concreto lanzado-roca.**

En particular este tipo de inyección se realizó en los tramos del túnel en donde se aplicó concreto lanzado durante la etapa de excavación. Este tratamiento corresponde a una consolidación corta.

Esta inyección se efectúa cuando el concreto de revestimiento definitivo haya alcanzado su resistencia de proyecto. En el anexo 2, columna (6) se indican los cad. donde se llevara a cabo este tipo de inyección.

**a. Barrenos.** Los barrenos se realizaron en secciones o aureolas a cada 3.0 m con aureolas de 9 y 8 barrenos a tresbolillo, debiendo penetrar una longitud mínima de 1.0 m en roca, el diámetro será entre 1 3/4" a 2 1/4". La disposición de los barrenos fue la que se indica en la Figura 33

**b. Materiales y proporcionamiento.** Se empleó lechadas y morteros con las características indicadas en el inciso anterior.

**c. Presiones y volúmenes de inyección.** La presión máxima a utilizar fue de: 5 kg/cm<sup>2</sup> sin límite de volumen.

**d. Procedimiento de inyección.** La aureola "A" corresponde a 9 barrenos y la "B" a 8 barrenos. La inyección se ejecutó en las aureolas "A" a través de los barrenos anteriores (que se encuentran en las tablas ó partes laterales del túnel) pares y nones hasta cerrar en la clave. Posteriormente se inyectan las aureolas "B" en forma similar, es decir, iniciando con los barrenos de tablas y cerrando con los de la clave. En ambas aureolas los barrenos en las tablas se inyectaron en forma simultánea se debe llevar los registros correspondientes al consumo de cada barreno.

## **3. Inyección tipo "C" Zonas críticas de alta permeabilidad**

Este tipo de inyección se realizó en los primeros tramos de la conducción, en donde existan condiciones de permeabilidad natural al túnel a través de los rasgos estructurales de la roca, en conjunción con las características topográficas superficiales de cañada y escurrimientos.

En el anexo 1 columna (7) se indican los cadenamientos los cuales se efectúa este tratamiento. Para este tipo de inyección se ha considerado perforar aureolas con 8 barrenos a cada 3.0 m y longitudes de perforación de 5.0 m. En la figura 30 se indica las características de este tipo de tratamiento.

**a. Inyección de Contacto.** Previamente a la inyección de los barrenos para este tipo de inyección, se perforaron e inyectaron los barrenos de contacto concreto-roca para el relleno de las cavidades existentes en la clave del revestimiento.

**b. Barrenos.** Los barrenos se realizaron en secciones a cada 3.0 m con aureolas de 8 barrenos (4 primeros ortogonales y 4 secundarios ortogonales intermedios a los primarios). La longitud de estos barrenos fue de 5.0 m, perforandose en forma radial al túnel, con diámetro de 2 1/4".

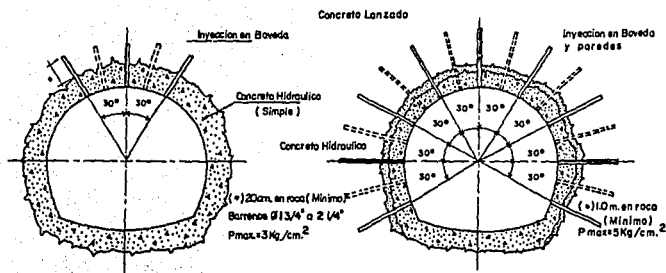
**c. Materiales y proporcionamiento.** Se empleará la siguiente mezcla de inyección

- Cemento Monterrey	Rel. a/c = 0.7
- Aditivo sikament Nz	aditivo 0.75% con relación al peso del cemento

**d. Presiones y volúmenes de inyección.** La presión que se aplicó fué de 15 kg/cm<sup>2</sup>, hasta el rechazo. Para no elevar la presión 3 kg/cm<sup>2</sup> durante 2 minutos, posterior a 9 kg/cm<sup>2</sup> durante 2 minutos y por ultimo a 15 kg/cm<sup>2</sup> durante 3 minutos hasta que ya no tome lechada o mortero.

**e. Procedimiento de inyección.** Se perforaron e inyectaron las aureolas "A" (a cada 6.0 m) a través de los barrenos primarios y enseguida los secundarios. Posteriormente se perforaron e inyectaron en forma similar las aureolas "B" intermedios a las aureolas "A".

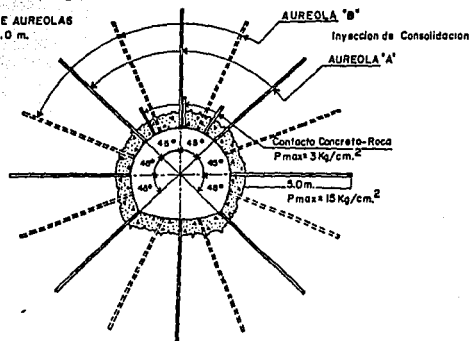
La ilustración gráfica de estos tipos de inyección se muestran en la figura 33.



INYECCION TIPO-A

INYECCION TIPO-B

LA SEPARACION ENTRE AUREOLAS "A" y "B" SERA DE 3.0 m.

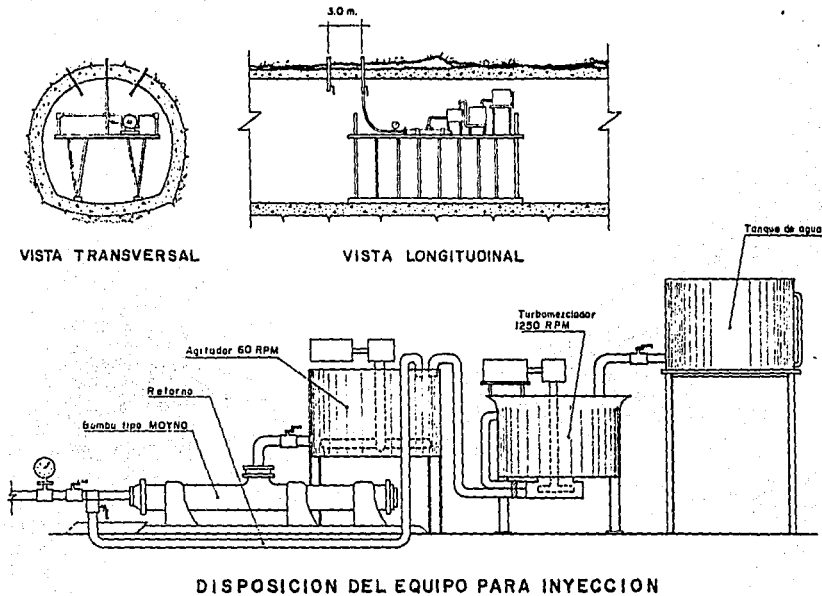


INYECCION TIPO-C

Fig. 33 Inyecciones tipo

#### 4. Procedimientos de Ejecución y equipo de Inyección

La mezcla se preparaba en un turbomezclador de donde se pasaba a un tanque para mantener en agitación durante el proceso y de ahí a la bomba de inyección donde se controlaba la presión con una válvula de retorno, Figura 34.



**Fig. 34 Equipo para Inyección**

Para las inyecciones tipo "A" y "B" se utilizaban boquillas de 1" o con válvulas y acuñadas en barrenos de 1 3/4" . Para las inyecciones tipo "C" se emplearon obturadores mecánicos de 2" .

La secuencia de inyección fue la que indicaba el proyecto iniciando con secciones externas y luego las intermedias e iniciando con los barrenos inferiores para concluir con los superiores.

En cada barreno inyectado se inició el proceso con baja presión hasta alcanzar la máxima indicada por el proyecto siendo de 3 kg/cm<sup>2</sup> para inyección tipo "A" y de 5 kg/cm<sup>2</sup> para inyección tipo "B".

**En el caso de las inyecciones tipo "C" cada barreno se inyectó en 2 etapas; en la primera, el obturador era colocado en roca y se iniciaba la inyección hasta alcanzar los 15 kg/cm<sup>2</sup> de presión de rechazo. En la segunda etapa se colocaba el obturador en el concreto de revestimiento para inyectar contacto concreto-roca hasta el rechazo a 5 kg/cm<sup>2</sup>.**

**Desde el inicio de los trabajos de inyección, en lo que se refiere a la de contacto concreto-roca, se presentaron altos consumos en los barrenos asociados a la presencia de sobreexcavaciones y en la dificultad que estas originaron para un correcto llenado en la clave con el concreto de revestimiento. Aunado a la presencia de los fuertes volúmenes de absorción se presentó continuamente la comunicación entre barrenos. Esta situación añadiendo que en un principio solo se trabajaba con un turno de trabajo por día ocasionaba dejar muchos barrenos en proceso de inyección por más de 4 hrs. La problemática disminuyó con la implementación de dos turnos de trabajo por día; sin embargo para comprobar que la inyección fuera efectiva, en aquellos casos en que se suspendía el proceso temporalmente se realizaban sistemáticamente inyecciones de verificación.**

#### **- Barrenos adicionales**

**Con objeto de controlar las filtraciones que se presentaban a través de las fisuras en el concreto de revestimiento. Se indicó la ejecución de barrenos adicionales de características similares a las de la inyección de contacto concreto-roca (tipo "A") en las tablas de la sección revestida en los tramos donde esta se presentara.**

#### **G Reparaciones del concreto endurecido.**

**Posterior al revestimiento definitivo del túnel se realizaron las reparaciones del concreto dañado antes de poner en servicio la estructura, fue recomendable realizar las reparaciones del concreto dañado después de haber concluido los tratamientos de inyección (contacto y consolidación).**

#### **Definiciones:**

**Mortero de liga. Es una pasta de cemento portland-arena (cribado a través de la malla No. 16) cuya proporción varía de acuerdo a la resistencia del concreto a la estructura que se aplique, la relación promedio cemento arena fue de 1:2.5.**



**Resinas Epóxicas.** Son compuestos orgánicos de termofraguado, que se caracterizan por su buena resistencia mecánica y una magnífica adherencia sobre materiales, incluyendo concreto. Consta de dos ingredientes básicos estables por separado, resina y catalizador, que al combinarse generan una reacción que en corto plazo endurece la mezcla.

**Adhesivo Epóxico.** Material que se utiliza en sustitución del mortero de liga en aquellas reparaciones que sea necesario.

**Alveolado (cacarizo).** Superficie de concreto que presenta exposición de agregado grueso (grava) por falta de eficiente llenado y compactado de la masa.

**Caja.** Figura geométrica trazada en líneas perpendiculares o sea ángulos de 90°.

**Tonificación.** Se denomina a la adición de cemento blanco al cemento base para aquellas estructuras en donde la apariencia sea importante, debido a la diferencia en edades de fraguado de la estructura.

## **1. Material de repuesto.**

La elección del material de repuesto se realizó de acuerdo a las características geométricas del volumen por reponer, siendo los más comunes; el mortero seco de relleno (Dry-Pack), mortero lanzado neumáticamente y concreto. En cada caso se verifica la dosificación y preparación del material de reposición.

**a. Mortero seco (Dry-Pack).** Este material de reposición se utilizó en oquedades, ranuras y grietas, cuya profundidad mínima es de 3cm y que el espacio en que se aplique ofresca apoyos laterales y de fondo. este tipo de mortero se empleo para el relleno de huecos de cimbra en piso, relleno de barrenos de inyección y servicio.

**b. mortero lanzado neumáticamente.** Este material se uso para cavidades extensas y cuya profundidad no admita el empleo de concreto.

La dosificación es sin grava con la misma resistencia utilizada en la estructura. El uso de mortero lanzado se utilizó en la reparación de defectos en las partes laterales y boveda del túnel.

**c. Concretos.** Este material de reposición se aplicó cuando las oquedades presentan una superficie mayor de 0.1m<sup>2</sup> y una profundidad que excede de 5-10cm. Durante la preparación de la mezcla esta debe tener la misma composición de la original excepto por el tamaño máximo de la grava que puede ser reducido y por el contenido unitario de agua menor. El uso del concreto hidráulico se apoyo principalmente a las reparaciones de defectos en la zona de la cubeta dada la facilidad de colocación y el acabado del concreto.

**Procedimiento de reparación.**

- Mortero para reparaciones.

a. Proporción en volumen para mortero aplicado neumaticamente fue la siguiente:

1. parte de cemento                      2 Partes de arena.  
Para la dosificación se utilizó cubos de 25x25x25cm

<u>Volumen del Mortero.</u>		<u>Cantidades en kg</u>	<u>M<sup>3</sup>kgs.</u>
cemento	7.381lts.	21.406	713kg
arena	16.509lts.	43.750	1458kg
agua	6.101lts.	6.101	203lts.

- Reparación de los daños en el concreto.

a) Juntas frías y juntas de construcción

1. Se determinaba una junta cuando la unión de dos concretos de diferentes tiempos de colocación no presenten una buena liga de integración, quedando marcada con segregación la separación de las dos copas de concreto.

2. Se delimita la zona afectada cortando el concreto con disco a una profundidad de 3a 5cm aprox.

3. Se saca todo el concreto alterado hasta encontrar concreto sano, tratando de mantener el perfilamiento original.

4. Se limpia con chorro de agua y sopleteo la superficie hasta en total

retiro de material suelto.

5. Previo al inicio del lanzado se mantendra la superficie húmeda (sss: concreto saturado superficialmente seco)

6. Se rellena la zona con mortero aplicado neumaticamente hasta concluir todo el espesor.

7. Una vez terminada la reparación se aplica una capa de membraba de curado.

8. Posteriormente se pule el exceso de mortero hasta lograr la regularidad de la superficie.

En base a las recomendaciones para las reparaciones del concreto endurecido del manual de concreto tomo 3 S.R.H. México 1970.

Para las reparaciones del concreto se aprobo el método de mortero lanzado neumaticamente, no requiriendo el uso de adhesivo de liga.

**b) Defectos por manejo de cimbra.**

1. Cuando aparecen defectos ocasionados por la cimbra, estos se limpian con agua a chorro y sopleteo, hasta remover el material suelto.

2. Para este caso se acepta que el concreto se repare puliendo la superficie, desvanecimiento los bordes perimetrales del área dañada cuando este se localice en concreto sano.

3. En caso de localizarse en zonas de concreto segregado (unión de modulos, juntos frías), debe aplicarse el procedimiento 3a.

**c). Irregularidades en la superficie del concreto (escalones)**

1. Limpieza en la zona por tratar

2. Marcar la zona por desvanecer, con una relación 1:5 (perpendicular el flujo) y 1:2.5 (paralela al flujo)

3. Se rebaja el concreto con piedra abrasiva hasta lograr la regularización de la superficie.

**d) Pequeñas oquedades.**

1. Localizada de zona se corta el concreto con disco para delimitar el área por reparar una profundidad de 3a 5cm aprox.
2. Se retira todo el concreto alterado hasta encontrar el concreto sano.
3. Los cortes se elaboran de manera que se evite tener puntas, procurando los cortes a 90°.
4. Se limpia con chorro de agua y sopleteo la superficie hasta el total retiro del material suelto.
5. Previo al inicio del lanzado se mantiene la superficie húmeda.
6. Se rellena la zona con mortero aplicado neumáticamente hasta cubrir todo el espesor de la caja por reparar.
7. Concluida la reparación se aplica una capa de membrana de curado.
8. Posteriormente se pule el exeso de mortero hasta regularizar la superficie.

**e) relleno de huecos de tornillos de cimbra en piso perforaciones de inyección y de servicio.**

1. Limpieza y secado del interior del hueco con agua y aire a presión.
2. para el relleno de huecos se utilizó concreto de bajo revenimiento (proporción original con TMA  $3/8''$  ) o mortero seco.
3. Cuanto se utiliza concreto de bajo revenimiento este se compacta con vibrador, el mortero seco se compacta con un pizon de las dimensiones del hueco en capas de 5cm aprox.
4. Terminada la reparación se realiza el acabado a la superficie evitando irregularidades (acabado F4).

**Acabado F4:** Se aplica en superficie donde el alineamiento y la regularidad sean extremadamente precisos, a fin de evitar los efectos destructivos de agua que fluye a gran velocidad, en cuyo caso se encuentran compuertas de salida. Tubos de aspiración y túneles vertedores. Las formas deben ser resistentes y mantenerse en el alineamiento preciso con firmeza y precisión, pudiendose construir con cualquier material que produzca la superficie especificada (modera machimbrada, de chapa o acero).

**f) Aire atrapado (burbujas) en las partes laterales y piso del tunel.**

Para este defecto. No se requirió tratar las burbujas, ya que de acuerdo a los resultados abtenidos por control de calidad del túnel de conducción; los núcleos extraídos no demostraron oquedades internas, siendo estos unicamente superficiales.

- Mano de obra y equipo para reparaciones por frente.

Cantidad	Equipo	cantidad	Personal
2	Cortadores de concreto	1	Cabo
3	Martillos	5	of. albañil
3	Escarificadores	5	ay. Generales.
2	Pistola para mortero Lanzado		
5	Pulidoras con disco adrasivo		

**H. Tratamiento de fisuras de concreto revestido a lo largo de la conducción.**

A causa de la contracción natural del concreto se presentaron fisuras radiales en el revestimiento del túnel, las cuales pueden ser causa de filtraciones o perdidas de agua. Con el proposito de que tales perdidas fueran mínimas se considero el tratamiento de estas fisuras mediante la inyección de las mismas.

**El tratamiento de las fisuras se realizó principalmente en las zonas donde existen fallas geológicas, alta densidad carstica, diques, cavidades, solamente se trataron aquellas fisuras que se identificaron con apertura igual o mayor de 0.4mm en estas zonas.**

### **1. Equipo**

**a. taladro eléctrico para perforar barrenos de 16mm de diámetro y 5cm de profundidad.**

**b. bomba manual para alcanzar presiones de 3kg/cm<sup>2</sup> como máximo**

**c. Turbo-mezclador de altas revoluciones (1520 rpm mínimos) para la fabricación de la mezcla.**

**d. Mezclador de bajas revoluciones, (60 rpm máximo) para mantener la mezcla en agitación durante la inyección.**

**e. Manómetros registradores con capacidad para medir un tercio más de la presión de rechazo especificada.**

**f. Boquillas de plástico para insertar en el barrero de inyección.**

### **2. Mezclas de inyección.**

**Cemento: Microcemento con superficie específica Blaine de 10000 cm<sup>2</sup>/gr como mínimo.**

**Aditivo: Fluidizante tipo perfolig o Rheobuild marca**

**Agua: Debe ser limpia con bajo contenido de sólidos disueltos y libre de materia orgánica.**

### **3. Procedimiento de inyección**

**Relación agua cemento a/c= 1.0 a 1,5 más 0.5 a 1.0% de aditivo. Las propiedades que debe cumplir la mezcla son:**

**Viscosidad al cono marsh, entre 28 y 31 segundos (constante durante una**

hora).

**Sedimentación, 3% máximo en 3hrs**

**Cohesión, 0.03gr/cm<sup>2</sup>**

**Resistencia a la comprensión simple 100kg/cm<sup>2</sup> a 28 días.**

**a. metodo de preparación de la mezcla.**

La preparación de la mezcla es en el turbo-mezclador, colocando los materiales en el siguiente orden: agua más aditivo, agitandose durante un minuto, despues se adiciona el cemento y se agita durante dos minutos, despues de esto se pasa al agitador de bajas revoluciones en el cual se mantiene durante su inyección.

Las mezclas con más de 60 minutos de haber sido preparadas se desechan.

**b. Procedimiento.**

**1). Prepración de la fisura.**

Para poder efectuar la inyección de la fisura sería necesario colocar un sello exterior en todo el desarrollo de la misma (radial) de la siguiente forma:

Limpieza superficial de la fisura se limpia una franja de 5.0cm a cada lado de la fisura en todo su desarrollo mediante un cepillado enérgico con cepillo de alambre. Simultáneamente al cepillado se aplica agua para retirar el polvo permanente de la superficie a tratar.

La aplicación del sello. Se coloca directamente sobre la fisura un sello que sirve como calafaleo para la inyección posterior de la misma. este sello puede ser de los siguientes materiales.

- \* Cinta adhesiva
- \* Pintura de alquitrán
- \* Mezcla de yeso y cemento
- \* Producto epóxico.

**Nota:** La determinación del material mas idoneo se determina directamente por medio de pruebas físicas.

**Perforaciones para inyección.** Cuando el sello superficial se haya colocado en su totalidad, se procede a la ejecución de las perforaciones para la inyección. Las perforaciones deben ser de 16mm de diámetro y 5cm de profundidad.

Se realizan un total de 7 perforaciones distribuidos a cada 45° cubriendo ambas partes laterales y boveda del túnel, estas perforaciones se pueden realizar con taladro eléctrico.

Concluida cada perforación se retirara el detrito de la misma y posteriormente se introducen las boquillas o tubos de plastico penetrando 5cm en el revestimiento inmediatamente después se sella el entorno de cada tubo.

Una vez terminada la colocación de los tubos se esta en condiciones de iniciar la inyección de la fisura.

#### **c. Inyección de la fisura.**

Quando el sello superficial de la fisura tenga una resistencia suficiente, se procede a la inyección de la misma.

**d) Saturación de la fisura.** Se procede a inyectar agua a una presión de 3kg/cm<sup>2</sup> para saturar las superficies de la fisura. La inyección se realiza en forma ascendente (de las boquillas inferiores de ambas tablas hasta la que se localiza en la clave), se observa el retorno del agua en cada boquilla superior. Conforme se presenta el retorno del agua se clausura provisamente cada boquilla hasta que aparesca el retorno en la clave.

Una vez lograda la condición anterior se procede a iniciar la inyección de la fisura con mezcla de microcemento.

**e) Inyección de la fisura.** Inmediatamente después de haber concluido esta condición se procede a inyectar la fisura, esta operación se realiza en forma ascendente en una o ambas tablas a la vez.

El proceso de la inyección se observa en las boquillas superiores en las cuales debe aparecer el retorno de la mezcla se considera que el volumen



mínimo a inyectar por boquilla mientras que las ubicadas en tablas y superiores sera aprox. 3lts.

La inyección se incorporará a una presión máxima de  $3\text{kg/cm}^2$  para lograr los consumos anteriores.

Cuando en una boquilla no se presenta el retorno y en la boquilla inmediata inferior se incorporó en doble del volumen indicado anteriormente, seguramente existe una comunicación y toma la mezcla en el contacto concreto-roca. En este caso se suspende la inyección por esta boquilla y se incorpora en la inmediata superior en donde se esperaba el retorno. Este es el criterio que se aplica cada vez que se presenta esta condición.

Una fisura se considera inyectada cuando se alcanza la presión de  $3\text{kg/cm}^2$  en todas las boquillas.

#### **4.- Justificación de rechazo (con microcemento)**

##### **a. Tratamiento para inyección de las fisuras**

Uno de los problemas que se tuvieron en el revestimiento de concreto fue la presencia sistemática de fisuras transversales a cada 6 m aproximadamente debido a la contracción por temperatura del concreto durante el fraguado, altos espesores de concreto y a la falta de juntas por contracción, se presentaron fisuras de 0.1 a 1.0 mm. Se consideró realizar un tratamiento de inyección a fin de sellarlo y evitar con ello una pérdida de gasto de operación inaceptable y problemas de estabilidad en zonas críticas, donde se pudiera presentar fisuración termica asociados a la alta permeabilidad natural del terreno.

Se planeo tratar las fisuras mayores de 0.4 mm de abertura y solo en los tramos criticos, se diseño un tratamiento a base de inyección de lechadas con microcemento (superficie blaine mayor de  $10000\text{ cm}^2/\text{gr}$  como mínimo). Con la finalidad de evaluar la eficiencia de este tratamiento se realizaron 3 pruebas en el tramo ot-V1 durante los meses de abril a mayo -94 procedimiento anterior descrito observandose que los resultados obtenidos no fueran los esperados debido a una muy baja absorción registrada y a que después de extraer núcleos en las fisuras tratados estos no se encontraban selladas como se esperaba.

**Adicionalmente se realizó una prueba para estimar la permeabilidad de una fisura tipo registrandose también muy baja absorción. Para lo anterior se elimino este tratamiento sustituyendolo por una inyección tipo "B" con mayor presión para impermeabilizar el tramo tratado.**

#### **b. Pruebas de permeabilidad tipo Luyeon**

**Como parte del proyecto de inyecciones en el túnel de conducción se ejecutaron pruebas de permeabilidad tipo luyeon, en diferentes estaciones del túnel distribuidos a lo largo de los 21 km de la conducción, con una doble finalidad.**

**1) Para tener un parámetro más para evaluar las pérdidas de gasto durante la operación del túnel.**

**2) Para comprobar la eficiencia de las inyecciones**

**Para su ejecución, consistio en ejecutar 2 barrenos de 5.0 m de profundidad en roca é inyectarse agua en cada uno de estos hasta 11 kg/cm<sup>2</sup> de presión máxima, se utilizaron las mismas estaciones de inyección que se ocuparan en los diferentes frentes del túnel y en general se obtuvieron buenos resultados determinando una condición de roca en todos los casos de muy baja permeabilidad a impermeable.**

## CONCLUSIONES

La extensión del túnel de conducción, sin precedentes en la historia de la hidroelectricidad en nuestro país hizo de la construcción de esta obra uno de los retos más importantes a afrontar para la Comisión Federal de Electricidad y la Ingeniería Mexicana.

La dispersión de los frentes de trabajo, las problemáticas durante la ejecución de esta obra, obligó a una planeación muy cuidadosa del diseño, construcción y supervisión, el cual se aplicaron una serie de mecanismos basados en un sistema de aseguramiento de calidad que garantizara en el mayor grado posible la calidad de esta obra.

Uno de los grandes beneficios económicos que generará Esta obra, es su ubicación en la zona central del país, dada su cercanía con la ciudad de México, estado de Querétaro y Hidalgo con pérdidas mínimas de energía.

Respecto a la geología que atravesó el túnel a lo largo de toda su trayectoria. Se realizaron los comentarios del tipo de roca real encontrada, concluyendo que en base a los estudios de factibilidad Geológica se tendría una formación y tipo de roca en determinados cadenamientos, el cual defirió en gran parte en algunas zonas, por tanto se comprueba la aproximidad de los métodos físicos y teóricos utilizados (estudios Geofísicos y Sísmicos), Contando con ello además que las seis áreas de estudio donde se profundizó más la exploración (barrenos de prueba) y la geofísica superficial en toda la trayectoria del túnel sirvió como correlación entre área y área para determinar el tipo de formación que cruzaría el túnel durante su excavación.

El Procedimiento elegido para la excavación del túnel utilizando el método tradicional de carga y voladora con el uso de explosivos, fué el más óptimo para su construcción, ya que se contó con diez frentes de ataque el cual hicieron posible la ejecución del túnel en el tiempo previsto y a un costo menor.

En principio como alternativa se tenía la posibilidad de utilizar dos escudos de frente cerrado para la excavación total del túnel, el cual se descartó esta posibilidad por el largo período de ejecución, costo y además cuando todas las obras que implican el proyecto deberían tener sincronía en cuanto a tiempo de ejecución para poner en operación la planta.

En la etapa de excavación del túnel se describió a detalle el procedimiento constructivo que se llevó a cabo para la ejecución del mismo así como la planeación estrategias de construcción e infraestructura utilizada. De tal forma podría resaltar el gran reto que se tuvo durante esta etapa de construcción principalmente del

personal obrero y técnico que laboramos directamente en los frentes de obra bajo condiciones hostiles de trabajo y alto riesgo en situaciones de caídos y otros en el interior del túnel de los diferentes frentes de trabajo.

Posterior a la excavación y previo al revestimiento definitivo se llevaron a cabo los tratamientos en zonas donde existían fallas geológicas que pudieran poner en riesgo la pérdida de agua a lo largo del túnel durante su operación. Por tal motivo esta fue un punto que se estudio a detalle, ya que se pudo comprobar y observar que durante la excavación del túnel el agua producto de filtraciones y la utilizada o en el frente de ataque la encauzaban a algún carst descubierto a la vista y nunca había forma de llenarlo o saber la magnitud del mismo en el interior del subsuelo, por tal motivo se les dio un tratamiento especial a todo este tipo de fallas.

Siguiendo la etapa de revestimiento definitivo del túnel, se describió algunas consideraciones de diseño, alternativas e infraestructura utilizada para su ejecución. En esta etapa se destaca, la importancia que se tuvo con la utilización de este método principalmente a los avances obtenidos, el cual hicieron posible la terminación del túnel en el tiempo previsto por la planeación original aun con las grandes problemáticas encontradas como una falla geológica (caverna), el cual se le dio un tratamiento de soporte y revestimiento definitivo especial.

Posterior al revestimiento se llevaron a cabo las inyecciones al concreto revestido a base de lechadas y mortero para sellar los espacios que quedaron entre la roca y suelo además de consolidar algunas zonas donde se tenía problemas Geológicos importantes. Estos tipos de tratamiento fué necesario dado que el túnel trabajará a presión con una mejor distribución de esfuerzos no solo en el concreto de la sección revestida.

Terminadas las inyecciones anterior descritas, se enfocó de lleno a realizar las reparaciones al concreto de la sección revestida, ya cuando se tenía un porcentaje de avance al término de las inyecciones. Fue necesario llevar a cabo estas reparaciones para garantizar una durabilidad del concreto y funcionalidad del túnel.

Un punto el cual no trate en el desarrollo de este trabajo y el cual es importante mencionar, es la ubicación de las puerta estanca que se dejaron a lo largo del túnel en las ventanas de acceso al cruce con el túnel de conducción, las cuales fueron en ventana uno, dos, tres y cuatro. La finalidad de construcción de estas puertas fué para inspección y mantenimiento del túnel cuando se llegara a requerir.

Por último me atrevó a concluir que el túnel de conducción garantiza una funcionalidad estructural é hidráulica, con los mas altos grados de calidad en condiciones de conducir agua para la generación de energía eléctrica del P.H.

**Zimapan, el cual aportará Grandes beneficios económicos para el desarrollo de nuestro país.**

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- ASTM manual on presentation of data and control Chart Analysis, STP 15D, American Society for testing and materials, filadelfia, 1976.
- 2.- BERTOLD E. WEINBERG, CLAUDE E. JAYCOX. Manual de inspección del hormigon ACI 7a. edición, publicación Sp-2 ACI. Edición en español, American Concrete Institute, 1985.
- 3.- BIENIAWSKI. "Rock Mechanics Desing in Mining and Tunneing".
- 4.- CARLOS GONZALEZ CRUZ. Geología de Construcción reporte 92/07/TC, consideraciones geológicas VI-0.T cad. 14410. Junio de 1992.
- 5.- COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD. Especificaciones Técnicas de Construcción de la Obra Civil. Proyecto Hidroeléctrico Zimapán. Tomo IV obras de generación, capítulo 1 excavaciones, capítulo 2 concretos, capítulo 4 soporte y tratamiento de la roca, México 1989.
- 6.- COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD. Manual de Diseños de Obras Civiles. B.3 Mecánica de Rocas, B.3.7. Procedimiento de Excavación, B.3.2. Obras Subterranas, B.3.5. Tratamientos de Macisos Rocosos. 1a. impresión; México, Editorial Mexicana, S.A. 1983.
- 7.- especificaciones para Materiales, procedimientos y aplicación de concreto lanzado (ACI 506. 2-90). Informe del comité ACI 506.
- 8.- GUSTAVO ARVIZULARA, JORGE M. ALACANTARA DIAZ. Factibilidad Geologica del Proyecto Hidroeléctrico Zimapán, Hgo. 1a. edición, México. Editorial Harla, S.A. de C.V. 1989.
- 9.- ICI. Explosivos. Atlas de México, S.A. de C.V. Explosivos Mexicanos S.A. de C.V., San Lorenzo, 1009 Col. Del Valle, México, D.F.
- 10.- INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. Compactación del Concreto ACI-309. IC-R87 1a. Edición. México, Editorial IMCyC A.C. 1992.
- 11.- INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. Diseño y Control de Mezcla de Concreto PCA (Postland Cement Association). 1a. edición. México, Editorial IMCyC A.C. 1992.
- 12.- COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD. Tratamientos Túnel de Conducción, P.H. Zimapán. revisión No. 2. Mecánica de Rocas. Enero de 1994.

13.- JOHN BREEN, BASILE G. RABBA. Reglamento de las Construcciones de Concreto Reforzado (ACI 318-89) y Comentarios (ACI 318R-89). 1a. Edición México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. 1991.

14.- SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS. Dirección de Proyectos, Departamento de Ingeniería experimental. Manual de Concreto parte 3. México, 1970.

15.- T.F. RyAn. Concreto Lancado. INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. 1a. Impresión, México, Editorial Taller Editorial, S.A. de C.V., 1976.

**PAGINACION VARIA**

**COMPLETA LA INFORMACION**



ANEXO 1.- TABLA DE TRATAMIENTOS EN EL TUNEL DE CONDUCCION , P.H. ZIMAPAN

TRAMO	CARSTICIDAD			DIQUES (4)	INYECCION "A" (5)	INYECCION "B" (6)	INYECCION "C" (7)
	LOCAL (1)	QUEVEDADES MAYORES (2)	ALTA DENSIDAD CARSTICA (3)				
V1    OT	0+019-1+360				0+019-1+360		
	1+440-2+350				1+440-2+350	11	
	2+405-2+520	2+395	2+350-2+405		2+405-2+520	2+350-2+405	
	2+580-2+800		2+520-2+580		2+580-2+800	2+520-2+580	2+800-2+840
						2+840-3+078	
	2,586 m		115 m		2,586 m	353 m	40 m
V2       V1	3+310-3+390	3+315-3+330			3+310-3+400	3+078-3+310	
		3+397	3+400-3+425			3+400-3+425	
	3+415-3+500	3+495			3+425-3+545		
		3+502					
	3+545-3+565		3+545-3+565			3+545-3+565	
	3+695-3+740	3+695	3+695-3+790		3+565-3+695	3+695-3+750	
		3+740-3+750			3+750-3+875	3+875-3+890	
	3+750-3+775	3+765					
			3+875-3+890		3+890-4+280		
			3+910-3+920	3+987-3+995			
	3+945-3+970						
	4+020-4+050						
	4+080-4+090						
	4+135-4145	4+300	4+280-4+305			4+280-4+305	
	4+310-4+320	4+430-4+440	4+430-4+470		4+305-4+430	4+430-4+470	
			4+485-4+495			4+485-4+495	
						4+495-4+520	
	4+485-4+500				4+470-4+485	4+520-6+700	

ANEXO 1.- TABLA DE TRATAMIENTOS EN EL TUNEL DE CONDUCCION , P.H. ZIMAPAN

TRAMO	CARSTICIDAD			DIQUES (4)	INYECCION "A" (5)	INYECCION "B" (6)	INYECCION "C" (7)
	LOCAL (1)	QUEDADES MAYORES (2)	ALTA DENSIDAD CARSTICA (3)				
V2	6+700-6+900	6+675		6+995	6+700-8+140		8+140-8+210
	7+075-7+645	6+690		7+065		8+210-8+280	
		6+722					
		6+750		7+160			
	7+715-7+750	7+420		7+190	8+280-8+717		
	7+805-7+840	7+652		7+320			
	7+900-7+940						
		7+665		8+150-8+202			
	7+970-7+990	7+669		8+355-8+365			
				8+515-8+530			
V1	8+010-8+080	7+700		8+650-8+690			
		7+702					
		7+798					
	8+125-8+160	7+802					
		7+840					
		7+970					
	1,360 m	35 m	240 m	125 m	2,872 m	2,672 m	92 m
V3					8+718-10+970		
				9+375-9+415 9+455-9+485			10+970-11+020
V2				11+020-11+553			
				70 m	2,785 m		50 m

ANEXO 1.- TABLA DE TRATAMIENTOS EN EL TUNEL DE CONDUCCION , P.H. ZIMAPAN

TRAMO	CARSTICIDAD			DIQUES (4)	INYECCION "A" (5)	INYECCION "B" (6)	INYECCION "C" (7)
	LOCAL (1)	QUEDADES MAYORES (2)	ALTA DENSIDAD CARSTICA (3)				
V3 - V4						11+553-11+700	
						11+750-11+850	11+700-11+750
						11+960-12+000	11+850-11+960
					12+000-12+070	12+070-12+100	
					12+100-12+180	12+180-12+220	
					12+220-12+420		
						12+460-12+490	12+420-12+460
						12+530-12+570	12+490-12+530
						12+630+12+680	12+570-12+630
					12+680-12+800	12+800-12+860	
					12+900-12+980		12+860-12+900
				12+985-13+010		13+020-13+080	12+980-13+020
						13+120-13+250	13+080-13+020
				13+145-13+180	13+250-15+194		
				13+350-13+400			
				14+410-14+450			
				150 m	2,494 m	727 m	420 m

ANEXO 1.- TABLA DE TRATAMIENTOS EN EL TUNEL DE CONDUCCION , P.H. ZIMAPAN

TRAMO	CARSTICIDAD		DIQUES (4)	INYECCION "A" (5)	INYECCION "B" (6)	INYECCION "C" (7)
	LOCAL (1)	QUEDADAS MAYORES (2)				
V6		17+475-17+485 20+198-20+200	18+405-18+415	15+194-16+270 16+310-16+900 16+940-17+015 17+220-17+305 17+345-20+964.784		16+270-16+310 16+900-16+940 17+015-17+220 17+305-17+345
V4		12 m	10 m	5,445 m		325 m







ANEXO 3 Tabla 1.9.2 RELACION DE MAQUINARIA Y EQUIPO.

EQUIPO	MARCA	CIMBRA 1	CIMBRA 2	CIMBRA 3	CIM- BRA 4	OBSERV
Cimbra deslizante	MEKANO	1				
Cimbra deslizante	Molde-Equipos		1			
Cimbra deslizante	Molde-Equipos			1		
Jumbo transportador	Molde-Equipos				1	
Invert (soporte del modulo)	Molde-Equipos				3	
Planta de Concreto	MYPESA	1	1			
Planta de Concreto	ICOMA			1		
Bomba de Concreto	SCHWINT BP-2000	1	1	1		
Locomotoras	PHYMOUTH	6	6	5		
Mixer	SACMA	5	5	5		
Cargador frontal	Caterpillar	1				
Cargador frontal	Dresser D936		1			
Compresor	I. RAND P-750	2	1			
Electro Compresor	Equiment		1			
Motocopresor	Dresser		1			
Camión	Famsa 5M <sup>3</sup>	1	1			
Planta de soldar	Miller	1	4			
Ventilador	ABC	2	1			
Ventilador	Berry		1			
Generador movil	Caterpillar	1	1			
Tractor	DSH-CAT	1	1			
Jumbo	Tamrock 307H	1	1			
Rezayadora	Schaeff	1	1			
Yagones	Yatente	6	10			
TOTAL						



ANEXO 3 Tabla 1.9.1. RELACION DE PERSONAL T. CONDUCCION.

Concepto	CIBRA 1		CIBRA 2		CIBRA 3		OBSERVACIONES
	P	R	P	R	P	R	R: REAL
REVESTIMIENTO							P: Programado
MONTAJE:							
Cabo montador		2		2			
OP. Jumbo		2		2			
Mecánico				2			
Montadores		8		10			
Soldador		2		2			
Ay. General		6		6			
Ay. Electrico				2			
COLOCACION DE CONCRETO							
Sobresaliente de Colocación		2		2			
Cabo		2		2			
Vibradorista		4		8			
Cañonero		2		2			
OP. Bomba		2		2			
albañiles		8		8			
Ay. General		6		4			
Carpintero		2					
		*					
SOPLETE Y LIMPIEZA DE PISO							
Cabo		2		2			
Perforista		8		2			
Rielero				4			
Ay. General		6		4			
Albañil		2					
PERNES T TAPONES DE CIBRA							
Maniobrista				2			
Soldador		2		2			
Perforista		2		2			
Ay. General				4			
TRANSPORTE DE CONCRETO							
OP. Locomotora		12		10			
Ay. general		12		10			

<b>FABRICACION DE CONCRETO.</b>						
Encargado de C. Calidad		2	2			
OP. Cargador		2	2			
OP. Planta		2	2			
OP. Camión		2				
Ay. General		4	4			
<b>MANTENIMIENTO MECANICO</b>						
OF. Soldador		4	2			
OF. Mecánico		2	4			
Ay. Mecánico		4	4			
OF. Eléctrico			2			
<b>SERVICIO DE PATIOS</b>						
OP. Tractor		2	2			
Seguridad			2			
Tomador de tiempo		2	2			
Chofer		2	2			
OP. Retro (CASE)			2			
Velador		2	2			
bomba de agua río		2				
<b>INDIRECTOS</b>						
Jefe de Ventana		1	1			
Jefe de turno		2	2			
Sobrestante confianza		2	2			
otros						
<b>Total</b>		<b>131</b>	<b>135</b>			