

**Proceso de Excavación en las Obras de Generación del  
Proyecto Hidroeléctrico “El Cajón” en Tepic, Nayarit**

**T E S I S**

Que para obtener el título de :

**I n g e n i e r o      C i v i l**

**P r e s e n t a :**

**Carlos Antonio Medellín Narváez**

# Índice

|                                                                  | Pag. |
|------------------------------------------------------------------|------|
| Introducción                                                     | 1    |
| I. Información Geométrica y Geológica de las Obras de Generación | 3    |
| I.1. Túnel de acceso a Casa de Máquinas                          | 3    |
| I.1.1. Geometría                                                 | 3    |
| I.1.2. Geología                                                  | 3    |
| I.2. Túnel de Acceso a Galería de Oscilación                     | 7    |
| I.3. Túnel Auxiliar a la Bóveda de Casa de Máquinas              | 9    |
| I.3.1. Geometría                                                 | 9    |
| I.4. Túnel Auxiliar de Construcción                              | 10   |
| I.4.1. Geometría                                                 | 10   |
| I.4.2. Condiciones Geológicas Encontradas                        | 11   |
| I.5. Tuberías de Presión                                         | 14   |
| I.5.1. Descripción de la Estructura                              | 14   |
| I.5.2. Condiciones Geológicas Encontradas                        | 15   |
| I.6. Casa De Máquinas                                            | 20   |
| I.6.1. Localización y Dimensiones                                | 20   |
| I.6.2. Condiciones Geológicas Encontradas                        | 20   |
| I.7. Túneles de Aspiración                                       | 24   |
| I.7.1. Localización y Descripción                                | 24   |
| I.7.2. Condiciones Geológicas                                    | 25   |
| I.8. Galería de Oscilación                                       | 27   |
| I.8.1. Localización y Geometría                                  | 27   |
| I.8.2. Condiciones Geológicas Encontradas                        | 27   |
| I.9. Túnel de Desfogue                                           | 29   |
| I.9.1. Localización y Dimensiones                                | 29   |

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| I.9.2. Condiciones Geológicas Encontradas                        | 29 |
| I.10. Portal del Desfogue                                        | 32 |
| I.11. Lumbreras                                                  | 34 |
| I.11.1. Localización y Geometría                                 | 34 |
| I.11.2. Condiciones Geológicas Encontradas                       | 35 |
| I.12. Subestación                                                | 38 |
| I.12.1. Localización y Geometría                                 | 38 |
| I.12.2. Condiciones Geológicas Encontradas                       | 39 |
| II.  Excavaciones a Cielo Abierto                                | 48 |
| II.1. Parámetros que Intervienen en una Voladura a Cielo Abierto | 48 |
| II.2. Factores que Intervienen en las Voladuras a Cielo Abierto  | 48 |
| III. Excavaciones Subterráneas                                   | 52 |
| III.1. Parámetros que Intervienen en una Voladura Subterránea    | 52 |
| III.2. Factores que intervienen en las Voladuras Subterráneas    | 52 |
| III.3. Método de Frente Superior y Banqueo                       | 53 |
| IV.  Procedimiento Constructivo                                  | 54 |
| V.    Ejecución de Obra                                          | 56 |
| VI.  Conclusiones                                                | 57 |
| Bibliografía                                                     | 58 |

## INTRODUCCIÓN

El Proyecto Hidrológico El Cajón forma parte de un plan global de aprovechamiento del río Santiago, ocupará el segundo lugar dentro del potencial del sistema, después de la central Aguamilpa y el noveno lugar en el ámbito nacional.

La finalidad principal del proyecto es la producción de energía eléctrica, en operación conjunta con las otras plantas previstas y construidas a lo largo del río y con factores de planta bajos para atender picos de consumo.

El aprovechamiento hidroeléctrico de esta central estará equipada con dos grupos turbogeneradores los cuales permitirán una generación media anual total de 1228.637 GWh y se reducirán las probabilidades de derrama por el vertedor. Por lo tanto la generación media anual total será de 12980.549 GWh.

El sitio en el cual las obras del proyecto se construyen se encuentra en el estado de Nayarit, al oriente de la ciudad de Tepic, en los municipios de la Yesca y Santa María del Oro, en terrenos comunales del poblado Cantiles, sobre el río Santiago a 60 kilómetros aguas arriba de la C.H. Aguamilpa, sus coordenadas geográficas son 21° 25' 41" de latitud norte y 104° 27' 14" de longitud oeste.

El acceso actual al proyecto desde la ciudad de Tepic es por la carretera federal 15 rumbo a Santa María del Oro, hasta llegar a una desviación 10 kilómetros antes de Santa María del Oro, de ahí son 42 kilómetros de carretera federal pasando por los poblados de Cerro Blanco, El Calimayo, El Buruato, hasta llegar a los campamentos del kilómetro 28 y Las Yeguas, para después continuar 10 kilómetros más hasta llegar a las obras del proyecto y finalizando en el poblado de Ayotitla.

El lugar cuenta con la siguiente hidroclimatología:

- Temperatura media mensual máxima de 32°C en el mes de mayo y mínima de 23.2°C en el mes de enero.
- Evaporación media mensual máxima de 317.8mm en mayo y mínima de 129mm en diciembre.
- Precipitación media mensual máxima de 234.6mm en julio y mínima de 10.7 mm en diciembre.
- Escurrimiento medio mensual máximo de 918.8 millones de m<sup>3</sup> en el mes de agosto y mínimo de 83 millones de m<sup>3</sup> en febrero.

En la zona de las obras, la temporada de lluvias se presenta muy marcada entre los meses de junio a octubre y el estiaje entre los meses de noviembre a mayo. Durante el invierno se presentan lluvias en un porcentaje ligeramente mayor al 5% de la media anual.

Las obras de generación del Proyecto Hidroeléctrico "El Cajón" Nayarit, son de tipo subterráneo, con excepción de la obra de toma y la subestación. Están localizados en la margen derecha del Río Santiago y están integrados por: un canal a cielo abierto de obra de toma, dos tuberías a presión, la casa de máquinas, dos túneles de aspiración, la galería de oscilación, un túnel de desfogue, dos túneles de acceso, uno a casa de máquinas y otro a la galería de oscilación, tres auxiliares, siete lumbreras y una subestación superficial.

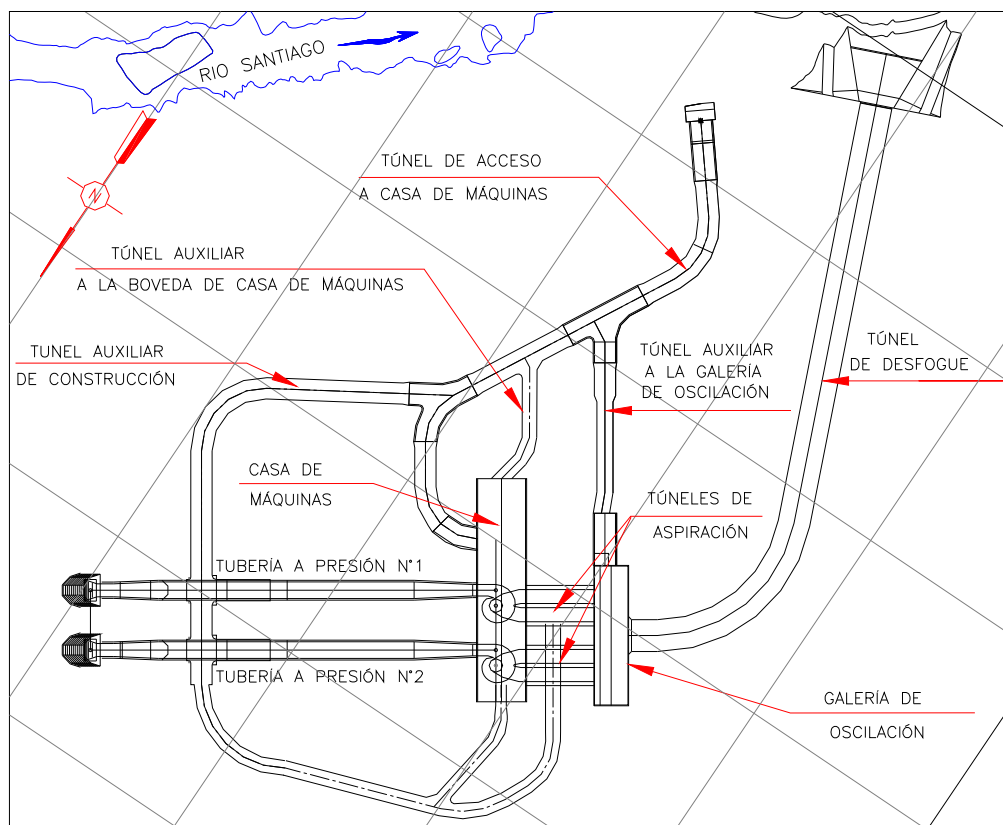


Figura 1. Obras de generación (vista en planta)

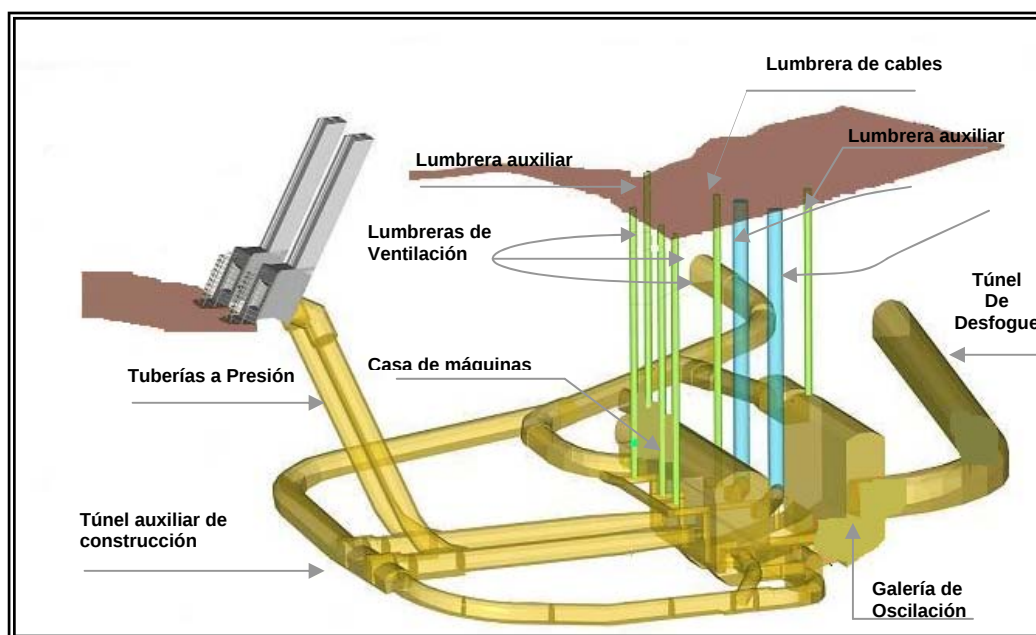


Figura 2. Obras de generación (isométrico)

## I. INFORMACIÓN GEOMÉTRICA Y GEOLÓGICA DE LAS OBRAS DE GENERACIÓN

### I.1. TÚNEL DE ACCESO A CASA DE MÁQUINAS.

#### I.1.1. GEOMETRÍA

El acceso a la casa de máquinas y galerías de oscilación es un túnel único cuyos destinos principales son: el acceso definitivo a la casa de máquinas por la playa de montaje, la bóveda de casa de máquinas por el tímpano sur y a la galería de oscilación. La entrada a este túnel se localiza en la cota 244,00 (msnm) en el talud de aguas abajo de la cortina y su acceso es por un camino que atraviesa de margen izquierda a margen derecha en la misma estructura.

El túnel tiene una longitud total de 451 m, siendo 290 m a la playa de montaje de casa de máquinas, mas 114 m a la galería de oscilación y 47 m a la bóveda de casa de máquinas. Las dimensiones del túnel varían, van desde secciones de 7 X 8 m a secciones de 11,20 X 14,50. La forma del piso es de rampa con pendientes descendentes y ascendentes con inclinación variable de  $S = 0.00$  hasta  $S = 0.1192$  (ver Figura 1).

#### I.1.2. GEOLOGÍA

La roca excavada en este túnel fue casi en su totalidad en la Unidad 3 de la Ignimbrita “El Cajón” (TicU3), excepto en los últimos 35 m hacia la llegada de la casa de máquinas, donde aparecen rocas de la Unidad 2 (TicU2), después de atravesar la falla Crucero – Lagartos (la más importante del proyecto), adicionalmente se cortaron otras 9 fallas, 13 diques y varios sistemas de fracturas, muchas de ellas con relleno arcilloso. Estas condiciones geológicas afectaron al macizo rocoso provocando problemas de estabilidad en varios tramos, de acuerdo con la orientación del túnel, las cuales se describen a continuación:

Cadenamiento 0+000 al 0+070

Los primeros 50 m de excavación de este tramo del túnel tiene un rumbo NW 52° SE. La roca excavada aunque inalterada varia de fracturada a densamente fracturada, con numerosas fracturas con relleno arcilloso, sobre todo a partir del cadenamiento 0+045,00 cuya combinación formó varias cuñas inestables en diferentes lugares de la bóveda, a pesar que en este tramo no se identificó ninguna falla geológica. La orientación de dichas fracturas se agrupó en tres direcciones (sistemas) las cuales se detallan en la tabla 1.

| S1               | S2               | S3               |
|------------------|------------------|------------------|
| N 45° W / 72° NE | N 79° E / 77° SE | N 24° E / 73° NW |

Tabla 1. Sistemas de fracturamiento del cadenamiento 0+000,00 al 0+070,00

Dos de los lugares donde la combinación de fracturas formó cuñas potencialmente inestables en la bóveda del túnel fue en los cadenamientos 0+045,00 y en el 0+060,00, cuyo volumen aproximado de la primera fue de 34 m<sup>3</sup> (83 toneladas), cuya geometría se observa en las figuras 3 y 4.

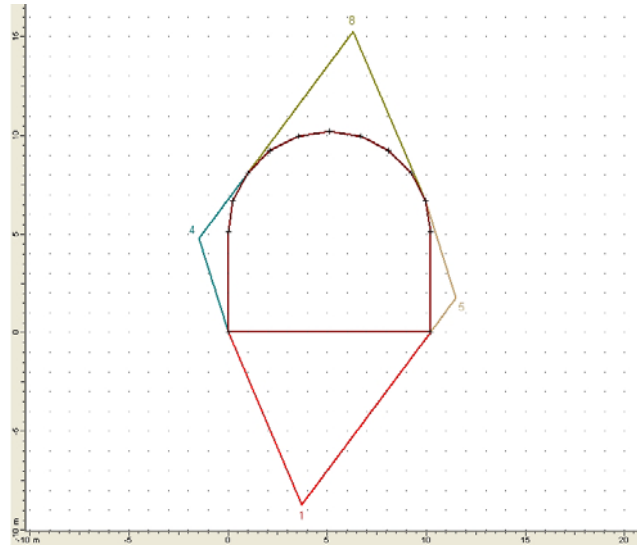


Figura 3. Sección transversal del túnel en el cadenamiento 0+047,00 donde se muestra la geometría de las Cuñas inestables perimetrales que generaron las fracturas.

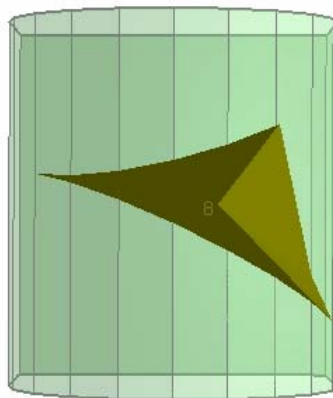


Figura 4. Vista superior de la bóveda del túnel donde se observa la cuña que se formó en la bóveda del túnel.

Estas condiciones prevalecieron hasta el cadenamiento 0+070,00 donde la roca se presentó un poco alterada y también con múltiples fracturas con relleno arcilloso que continuaron formado numerosos bloques inestables en la bóveda de por lo menos 12 toneladas y de menor magnitud en las paredes.

#### CADENAMIENTO 0+070,00 AL 0+215,00

Este sector del túnel se orienta la NE 27° SW, las condiciones geológicas se mostraron poco previsibles, la roca continuó siendo de la TicU3, se presentó parcialmente alterada con poco fracturamiento y muy alterada con fracturamiento denso sobre todo en la cercanía con las fallas, provocando numerosas zonas inestables, obligando inclusive a excavar en tramos a sección reducida para después ampliarse y en ocasiones a colocar marcos para mejorar las condiciones de estabilidad, en general se presentó de regular, mala y muy mala calidad (en los cruces de fallas).

En este tramo se cortaron nueve diques diabásicos varios asociados a fallas del sistema de fallas IV, comúnmente adoptan forma tabular. La roca de estos se presentó parcialmente alterada y dura, en general de buena calidad. Estos diques se presentaron cruzando de forma casi perpendicular a la excavación (véase tabla 2 para sus características).

| DIQUE | CADENAMIENTO        | RUMBO Y ECHADO                       | OBSERVACIONES                                                                                                                                                                                |
|-------|---------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | 0+150,50 y 0+152,50 | N 40° W / 65° SW<br>N 35° W / 75° SW | Dique de 1 a 1,50 m de espesor alterado y ramificado en dos direcciones.                                                                                                                     |
| 2     | 0+168,00            | N 30° W / 76° NE                     | Dique de 1,00 a 2,5 m de espesor de roca dura e inalterada.                                                                                                                                  |
| 3     | 0+175,00            | N 39° W / 57° NE                     | Tiene 2,00 m de espesor de roca dura y ligeramente alterada y se caracteriza por tener intercalaciones de roca ignimbrítica TicU3, ligeramente alterada en el centro del dique.              |
| 4     | 0+182,00            | N 23° W / 40° NE                     | Tiene 1,00 m de espesor de roca dura y ligeramente alterada.                                                                                                                                 |
| 5     | 0+184,50            | N 23° W / 40° NE                     | Tiene 1,50 m de espesor de roca dura y ligeramente alterada.                                                                                                                                 |
| 6     | 0+186,50            | N 40° W / 86° NE                     | Tiene 1,50 m de espesor de roca dura y ligeramente alterada.                                                                                                                                 |
| 7     | 0+193,50            | N 37° W / 60° NE                     | Tiene 0,70 cm de espesor de roca dura y ligeramente alterada.                                                                                                                                |
| 8     | 0+200,00            | N 20° W / 60° NE                     | Tiene 0,70 cm de espesor de roca dura y ligeramente alterada.                                                                                                                                |
| 9     | 0+203,00 y 0+206,00 | N 27° W / 75° NE                     | Dique ramificado en dos partes de 1,00 y 0,50 cm de espesor de roca dura y ligeramente alterada y se caracteriza por tener intercalaciones de roca ignimbrítica TicU3, ligeramente alterada. |

Tabla 2. Diques diabásicos en túnel de acceso a casa de máquinas  
(cadenamiento 0+070,00 a 0+215,00)

Así mismo, en este tramo se cortaron 7 zonas de falla, afectando una longitud de 47 m del túnel. Su orientación, aunque no fue desfavorable, provocó una disminución en la calidad de la roca y junto con el fracturamiento formó cuñas inestables como se muestra en la fotografía 1. Las características de las fallas encontradas se muestran en la tabla 3.



Fotografía 1. Túnel de acceso a casa de máquinas en el cadenamiento 0+191,50, donde se muestra la inestabilidad de la bóveda en forma de cuñas.

| FALLA |               | RUMBO ECHADO     | Y | ANCHO (m) | AFECTACIÓN (m) | CADENAMIENTOS       | OBSERVACIONES                                                                                                      |
|-------|---------------|------------------|---|-----------|----------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | T.A.C.M-1     | N 45° W / 80° NE |   | 1,00      | 7,40           | 0+073,60 a 0+081,00 | El espesor es de arcilla y roca triturada, provocó inestabilidad en la bóveda y un derrumbe.                       |
| 2     | T.A.C.M-2     | N 40° W / 80° NE |   | 1,50      | 7,00           | 0+100,00 a 0+107,00 | El espesor es de roca triturada con arcilla, en uno de sus respaldos tiene un dique diabásico de 50 cm de espesor. |
| 3     | T.A.C.M.-3    | N 46° W / 50° NE |   | 1,00      | 4,50           | 0+140,00 a 0+144,50 | Provocó inestabilidad en la bóveda y un derrumbe, fue necesario colocar tres marcos de acero.                      |
| 4     | T.A.C.M-4     | N 24° W / 40° NE |   | 2,00      | 6,00           | 0+171,50 a 0+177,50 | En la falla se intrusió un dique de 1 m, el resto es de roca triturada y alterada con arcilla.                     |
| 5     | Zona de falla | N 41° W / 57° NE |   | 1,50      | 6,00           | 0+175,00 a 0+181,00 | Su espesor es de roca alterada y triturada con arcilla.                                                            |
| 6     | Zona de falla | N 23° W / 40° NE |   | 1,00      | 10,00          | 0+179,00 a 0+189,00 | El espesor es de roca alterada y triturada con arcilla.                                                            |
| 7     | Zona de falla | N 40° W / 86° NE |   | 1,50      | 6,10           | 0+186,20 a 0+192,30 | El espesor es de roca alterada y triturada con arcilla.                                                            |

Tabla 3. Fallas geológicas en el túnel de acceso a casa de máquinas (cadenamiento 0+070,00 a 0+215,00)

La orientación de las fracturas en este tramo del túnel marca una tendencia al NW con inclinación al NE, notándose la influencia del sistema de fallas VI, tanto en orientación como en el contenido de arcilla; los rumbos de estas discontinuidades se agruparon en tres direcciones (sistemas) de acuerdo a la tabla 4.

| S1               | S2               | S3               |
|------------------|------------------|------------------|
| N 40° W / 72° NE | N 17° E / 76° NW | N 76° W / 72° NE |

Tabla 4. Sistema de discontinuidades del cadenamiento 0+070,00 al 0+215,00

#### CADENAMIENTO 0+210,00 AL 0+291,00.

En el último tramo del túnel de acceso a casa de máquinas, se excavaron 35 m de roca ignimbrítica de la unidad 3 (TicU3), la cual se presentó en los primeros metros, poco alterada y con poca densidad de fracturamiento, en general de regular calidad, sin embargo cerca de la Falla Crucero-Lagartos, la alteración de la roca y la densidad del fracturamiento aumentó haciéndola de muy mala calidad, provocando condiciones inestables en la bóveda. El resto de la excavación fue hecha en la ignimbrita de la unidad 2 (TicU2) la cual se presentó dura y poco alterada, con fracturamiento poco denso, en general de regular a buena calidad.

En esta parte del túnel se cortaron cuatro diques diabásicos parcialmente alterados de regular a buena calidad con espesores de 0,50 cm a 2,00 m de espesor, sus rumbos no mostraron una orientación definida, uno de ellos provocó inestabilidad en la conexión con la playa de montaje de casa de máquinas; sus características se muestran en la tabla 5.

| DIQUE | CADENAMIENTO              | RUMBO Y ECHADO                   | OBSERVACIONES                                                                                                                                |
|-------|---------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | 0+227,00<br>a<br>0+250,00 | N 20° W / 74° NE<br>N -S / 75° E | Dique de 1,20 m de espesor, se presenta poco alterado y con relleno de arcilla y calcita en sus respaldos, corto en forma diagonal al túnel. |
| 2     | 0+244,00                  | N 76° E / 18° SE                 | Dique de 1,00 a 3,00 m de espesor de roca dura y ligeramente alterada el cual corto al túnel en forma transversal.                           |
| 3     | 0+248,00                  | N 40° E / 48° SE                 | Tiene 1,50 m de roca dura y ligeramente alterada, se introdujo a la zona de la Falla Crucero-Lagartos.                                       |
| 4     | 0+290,00                  | N 09° W / 50° NE                 | Tiene 1,00 de roca de Buena calidad, también se intrusionó a una zona de falla.                                                              |

Tabla 5. Diques descubiertos entre los cadenamientos 0+215,00 al 0+291,00

También a lo largo de este tramo se cortaron dos zonas de falla, destacando la Crucero-Lagartos, la cual formó una zona de afectación en la roca de 20 m de los cuales 16 m corresponden a una franja de fracturamiento intenso y los otros 4 m a la zona de falla; sus características se anotan en la tabla 6.

| Falla                 | Rumbo y echado   | Ancho (m)         | Afectación (m) | Cadenamientos             | Observaciones                                                                                                                                                                        |
|-----------------------|------------------|-------------------|----------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1<br>Crucero-Lagartos | N 40° E / 46° SE | De 4,00<br>A 6,00 | 20,00          | De 0+232,00 a<br>0+256,00 | Zona de falla de roca triturada con arcilla (material milonítico) en la cual se intrusiona un dique, se forma también una franja de fracturamiento intenso con la misma orientación. |
| 2<br>Zona de falla    | N 09° W / 50° NE | 1,00              | 2,50           | De 0+287,50 a<br>0+290,00 | Zona de falla de roca alterada triturada con arcilla (material milonítico), en el respaldo del alto se intrusiona un dique.                                                          |

Tabla 6. Fallas descubiertas entre los cadenamientos 0+215,00 al 0+291,00

Las orientaciones de las discontinuidades en este sector del túnel, se agruparon en tres sistemas, considerando la orientación de la Falla Crucero-Lagartos en este tramo, sus datos se anotan en la tabla 7.

| S1               | S2               | Falla Crucero-Lagartos |
|------------------|------------------|------------------------|
| N 30° E / 46° SE | N 26° W / 63° NE | N 09° W / 50° NE       |

Tabla 7. Sistemas de fracturamiento del túnel de acceso a la casa de máquinas, cadenamientos 0+215,00 al 0+291,00

## I.2. TÚNEL DE ACCESO A GALERÍA DE OSCILACIÓN

Este túnel tiene 114 m de longitud con una orientación al N 35° W, se inicia en el cadenamiento 0+120,00 del túnel de acceso a casa de máquinas. Las condiciones geológicas encontradas provocaron que 89 m de excavación fueran en condiciones de riesgo (el 78%); la roca excavada fue de la unidad 3 (TicU3) se presentó muy alterada, fracturada y con franjas de fracturamiento muy denso (cerca de la Falla Crucero-Lagartos) como se observa en la fotografía 2, en algunas zonas con la ligera mejoría (0+035,00 al 0+047,00), en general, de regular a mala calidad provocando problemas de estabilidad en la bóveda lo que obligó a colocar marcos de acero para resolverlos y a excavar con mayor cuidado y lentitud. Después de cruzar la falla (cadenamiento 0+088,00) las características geológicas mejoraron, la roca se presentó dura e inalterada y con poco fracturamiento, en general de buena calidad.



Fotografía 2. Fracturamiento denso que se asocia a la Falla Crucero-Lagartos

La estructura geológica más importante cortada en éste túnel es la Falla Crucero-Lagartos, destacada por la longitud de afectación, la cual suma 35 m, incluyendo los 8,50 m de espesor de la falla, en la tabla 8 se detallan sus características.

| Falla                  | Rumbo y echado   | Ancho (m) | Afectación (m) | Cadenamientos       | Observaciones                                                                                                                                           |
|------------------------|------------------|-----------|----------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Falla Crucero-Lagartos | N 40° E / 58° SE | 8,50      | 35,00          | 0+052,00 a 0+087,00 | El espesor es de roca alterada y fracturada con arcilla más una franja de fracturamiento de 25 m. Se intrusión un dique diabásico de 1,00 m de espesor. |

Tabla 8. Características de la Falla Crucero-Lagartos en el túnel de acceso a galería de oscilación

Las fracturas en este túnel se caracterizaron por presentar abundante arcilla y que al combinarse su orientación, formaron varias cuñas inestables, algunas de las cuales se derrumbaron, como la del cadenamiento 0+015,00 del volumen aproximado de 31 m<sup>3</sup> aproximadamente. (Figura 5).

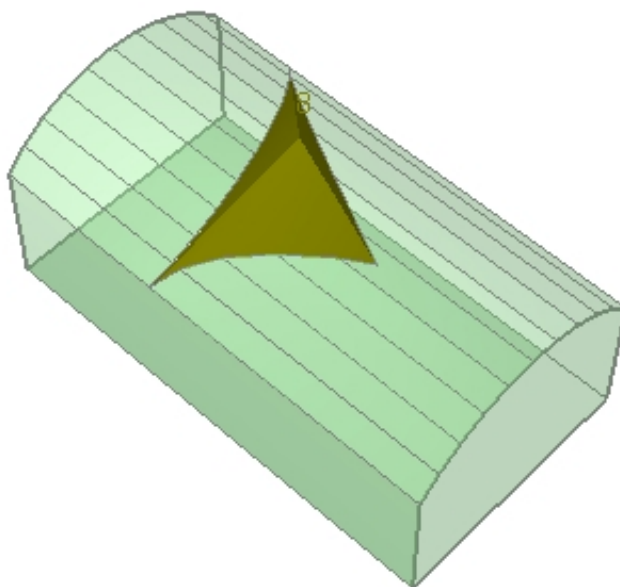


Figura 5. Perspectiva de la geometría de la cuña que se derrumbó de la bóveda del túnel de acceso a la galería de oscilación

El promedio de las orientaciones de las discontinuidades expuestas en el túnel de acceso a la galería de oscilación se anotan en la tabla 9.

| S1               | S2               | S3               |
|------------------|------------------|------------------|
| N 30° E / 46° SE | N 26° W / 63° NE | N 40° E / 58° SE |

Tabla 9. Orientación de los sistemas de discontinuidades en el túnel de acceso a galería de oscilación

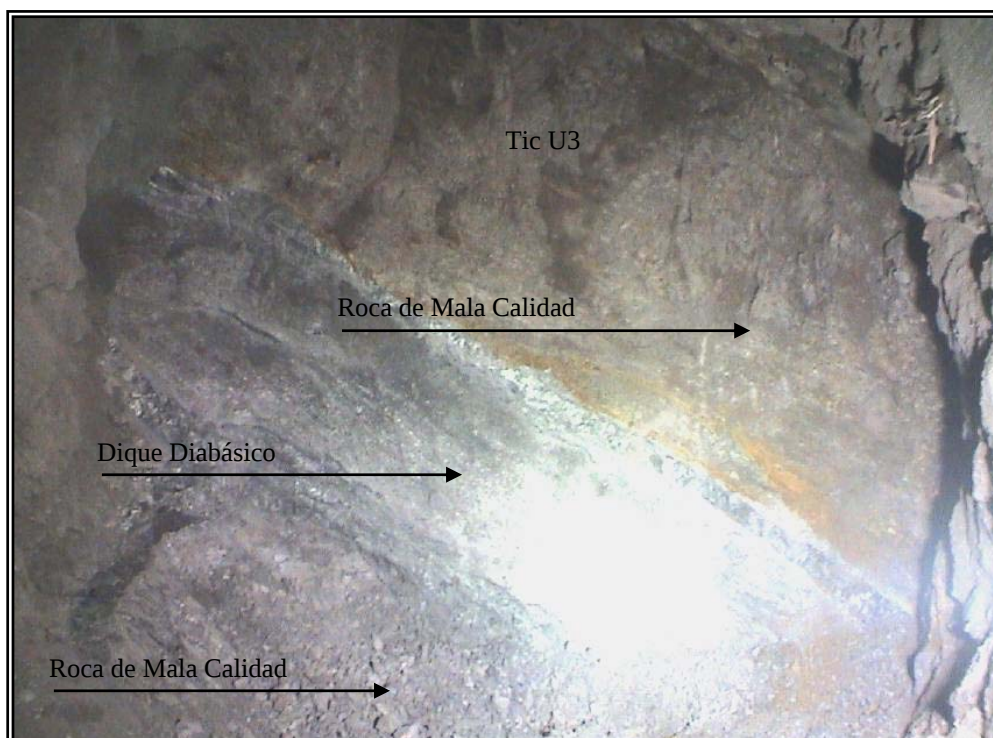
### I.3. TÚNEL AUXILIAR A LA BÓVEDA DE CASA DE MÁQUINAS

#### I.3.1. GEOMETRÍA

Este túnel parte del cadenamiento 0+163,20 del túnel de acceso a casa de máquinas, tiene una sección de 8 x 8 m, una longitud de 53,30 m con una pendiente ascendente de  $S = 0.0818$ . El objetivo principal de este túnel fue llegar a la elevación de la bóveda de casa de máquinas para excavarla.

Las malas condiciones geológicas de este túnel provocaron que la excavación fuera lenta y accidentada como lo muestra la irregularidad de la excavación; la roca excavada fue la ignimbrita riódacítica de la unidad 3 (TicU3), se presentó fracturada, muy alterada y blanda, afectada por franjas de intenso fracturamiento, sobre todo entre los cadenamientos 0+032,00 y 0+058,00, en general de regular a mala calidad. También en este túnel se cortó un dique-falla prácticamente paralelo al rumbo de la excavación, provocando la formación de cuñas inestables en la bóveda.

En este túnel, aunque no se cortó la Falla Crucero-Lagartos, su afectación fue severa, se cortaron 20 m de zona de afectación de esta, causando que la roca se hiciera blanda por alteración y presentara intenso fracturamiento con un RQD < 30% (fotografía 3).



Fotografía 3. Vista del tope del túnel auxiliar a la bóveda de casa de máquinas (cadenamiento 0+053,00) entre los dos diques un intenso fracturamiento y hacia la parte superior, roca triturada y alterada

El fracturamiento en el túnel fue intenso, cerca de la entrada a la bóveda de casa de máquinas se contaba 40 fracturas por metro con orientación similar N 50° E / 52° SE además de esta orientación se determinaron otros dos sistemas de discontinuidades en este túnel de acuerdo con la tabla 10.

| S1               | S2               | Falla Crucero-Lagartos |
|------------------|------------------|------------------------|
| N 30° E / 46° SE | N 26° W / 63° NE | N 47° E / 46° SE       |

Tabla 10. Discontinuidades en el túnel auxiliar a la bóveda de casa de máquinas

## I.4. TÚNEL AUXILIAR DE CONSTRUCCIÓN

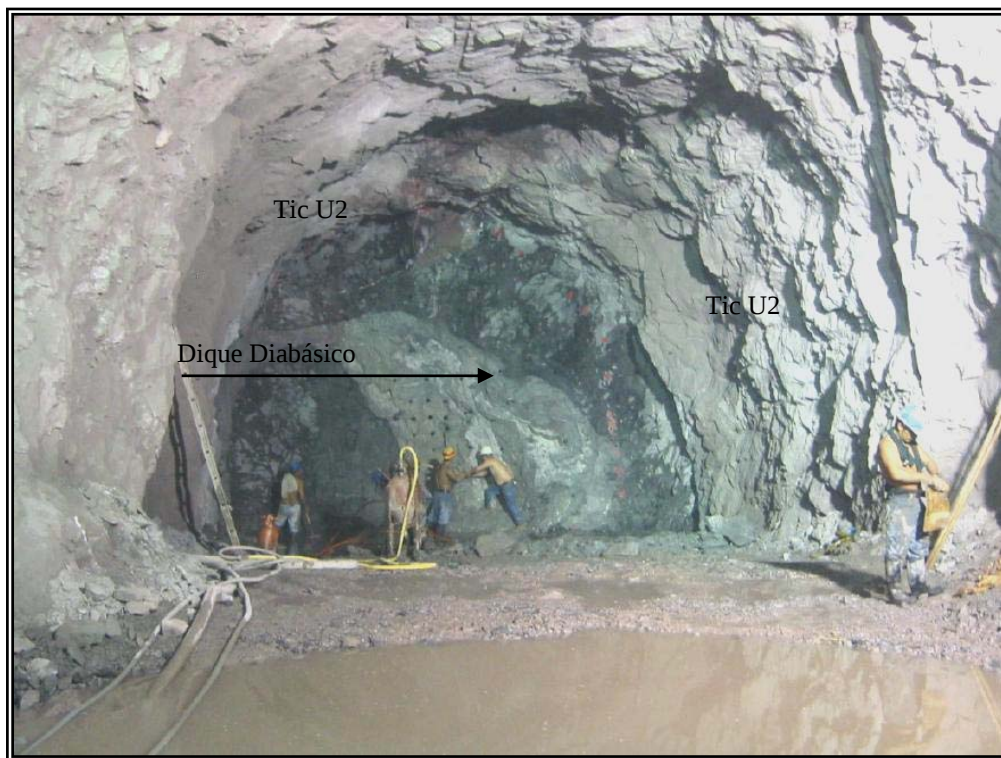
### I.4.1. GEOMETRÍA

La excavación del túnel auxiliar de construcción se inició en el interior del túnel de acceso a casa de máquinas, en el cadenamiento 0+202,234, a la elevación 230,00. Es el túnel cuyo destino principal es el cárcamo de bombeo, antes también se desarrollaron tres ramales, dos a los codos inferiores de las tuberías a presión y otro hacia el tímpano norte de casa de máquinas; también cumplió el objetivo de apoyar a las excavaciones de las tuberías a presión, casa de máquinas, tuberías de aspiración y galería de oscilación.

El túnel auxiliar de construcción tiene forma de “G”, un desarrollo de 398,952 m de longitud (incluyendo el cárcamo de bombeo), tiene una pendiente descendente variable (de 0a 12%) hasta el inicio del cárcamo de bombeo al cual llega a la elevación 208,50, con dos cruceros de 40 m cada uno en los codos inferiores de las tuberías a presión y un ramal de 70,434 m con una pendiente ascendente de  $S = 0,143$ , que parte del túnel-cárcamo de bombeo en el cadenamiento 0+386,496 y que llega al tímpano norte de casa de máquinas a la elevación 208,50. Sus secciones de excavación son variables, desde 5 X 6 m hasta 11,20 X 14,50 m.

#### I.4.2. CONDICIONES GEOLÓGICAS ENCONTRADAS

En general, la roca excavada en este túnel fue en su totalidad en la Unidad 2 de la ignimbrita el cajón (TicU2) en general de buena calidad, incluidos dos aglomerados, tanto el superior como el inferior característicos de esta unidad, la cual está afectada por dos zonas de fallas importantes (la Falla Crucero-Lagartos) e intrusionada por numerosos diques geológicos, relacionados con el sistema de fallas IV, que al inicio del túnel provocaron problemas de estabilidad, además se cortaron numerosos planos de falla así como varios sistemas de fracturas. Fotografía 4.



Fotografía 4. Túnel auxiliar de construcción en el cadenamiento 0+293,00, donde se observan las características de la roca del aglomerado intermedio de la unidad 2 y al fondo se observa un dique diabásico

Otro tipo de roca que se excavó, fueron los diques diabásicos, que se presentaron transversales al túnel, son inalterados de color verde oscuro e invariablemente con presencia de agua en forma de goteo permanente cinco de ellos están relacionados con el sistema de fallas IV, en la tabla 11 se muestran sus características.

| DIQUE | RUMBO Y ECHADO      | ESPESOR (m) | CADENAMIENTO | OBSERVACIONES                                                                                                                                                |
|-------|---------------------|-------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | N 23° W / 62° NE    | 1,50        | 0+014,00     | Es de regular calidad y alterado, manifiesta goteo constante.                                                                                                |
| 2     | N 30° W / 58° NE    | 0,50        | 0+021,50     | De regular calidad, se bifurca cuyo ramal tiene el mismo espesor y un rumbo de N 55° W / 56° NE, manifiesta goteo constante.                                 |
| 3     | N 05° W / 73° al NE | 1,00 a 2,00 | 0+043,50     | Es alabeado y se presenta inalterado con relleno de calcita en sus respaldos, manifiesta goteo constante.                                                    |
| 4     | N 40° W / 65° NE    | 2,00 m      | 0+299,00     | De regular calidad, inalterado con arcilla en sus respaldos (Sistema F-IV).                                                                                  |
| 5     | N 37° W / 42° NE    | 1,50        | 0+316,50     | De regular calidad, inalterado con arcilla en sus respaldos (Sistema F-IV).                                                                                  |
| 6     | N 37° W / 56° NE    | 2,30        | 0+324,50     | De regular calidad, inalterado con arcilla en sus respaldos, en el plano del bajo, se introdujo en una zona de falla (Sistema F-IV).                         |
| 7     | N 33° W / 55° NE    | 1,00        | 0+333,50     | De regular calidad, inalterado con arcilla en sus respaldos (Sistema F-IV).                                                                                  |
| 8     | N 33° W / 61° NE    | 1,00        | 0+338,50     | De regular calidad, inalterado con arcilla en sus respaldos (Sistema F-IV).                                                                                  |
| 9     | N 40° W / 55° NE    | 3,00        | 0+341,50     | De regular calidad, inalterado con arcilla en sus respaldos (Sistema F-IV).                                                                                  |
| 10    | N 35° W / 61° NE    | 1,00        | 0+411,50     | De regular calidad, inalterado con arcilla en sus respaldos.                                                                                                 |
| 11    | N 24° W / 59° NE    | 0,50        | 0+413,55     | De regular calidad, inalterado con arcilla en sus respaldos.                                                                                                 |
| 12    | N 30° W / 57° NE    | 0,50        | 0+415,50     | De regular calidad, inalterado con arcilla en sus respaldos, continúa hasta C.M.                                                                             |
| 13    | N 25° W / 57° NE    | 1,00        | 0+245,50     | Se presenta duro y de buena calidad, en sus respaldos tienen relleno de arcilla de 5 a 20 cm, el cual provocó inestabilidad en la bóveda del lado izquierdo. |

Tabla 11. Diques cortados en el túnel auxiliar de construcción

En este túnel se cortaron cuatro zonas de falla, una de ellas la Falla Crucero-Lagartos, sin embargo no provocó problemas de estabilidad pero si una disminución en la calidad de la roca (fotografía 5); las características de estas fallas se muestran en la tabla 12.

| FALLA            | RUMBO Y ECHADO      | ESPESOR (m) | CADENAMIENTO        | OBSERVACIONES                                                                                         |
|------------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                | N 43° W / 44° NE    | 1,60        | 0+104,00            | El espesor es de roca de triturada y con relleno arcilloso.                                           |
| Crucero-Lagartos | N 50° E / 58° al SE | 1,50        | 0+151,50 a 0+155,50 | Corta al túnel en forma transversal forma una franja de fracturamiento paralelo de 2,50 m de espesor. |
| 3                | N 47° W / 42° NE    | 1,00        | 0+314,50            | El espesor es de roca triturada con arcilla.                                                          |
| 4                | N 37° W / 56° NE    | 0,70        | 0+325,50            | El espesor es de roca triturada con arcilla.                                                          |

Tabla 12. Fallas en el túnel auxiliar de construcción



Fotografía 5. Aspecto de la falla Crucero-Lagartos en la parte oscura del frente de la excavación, en la parte superior se notan los fragmentos del aglomerado intermedio de la Unidad 2

La orientación de los sistemas de discontinuidades expuestas en el túnel auxiliar de construcción es muy semejante, sin embargo con la finalidad de analizar el efecto de las discontinuidades y fallas se dividió para su descripción en tres zonas, de acuerdo con la orientación de la excavación del túnel: una cubre el cadenamiento 0+000,00 al 0+110,00, otra del 0+110,00 al 0+280,00 y la última del cadenamiento 0+280,00 al 0+487,952 y además se describe el túnel que llega al tímpano norte de casa de máquinas.

En general en este túnel el fracturamiento se presentó escaso, de una a dos fracturas por metro, disminuyeron las franjas de fracturamiento y la presencia de planos continuos con estrías de movimiento, uno de estos por su orientación al túnel provocó una zona inestable en la bóveda del cadenamiento 0+088,00 al 0+110,00 (fotografía 6). La orientación de los sistemas de discontinuidades expuestos en este túnel se sintetiza en la tabla 13.



Fotografía 6. Túnel auxiliar de construcción donde se observa el plano de falla en la bóveda orientado a rumbo del túnel provocando la formación de una cuña potencialmente inestable

| Cadenamientos                                      | S1               | S2               |
|----------------------------------------------------|------------------|------------------|
| 0+000,00 al 0+110,00                               | N 21° W / 63° NE | N 06° W / 81° NE |
| 0+110,00 al 0+280,00                               | N 77° E / 81° NW | N 50° W / 77° NE |
| 0+280,00 al 0+488,00                               | N 30° W / 63° NE | -                |
| Túnel de acceso a casa de máquinas (Tímpano norte) | N 30° W / 54° NE | N 56° E / 80° NW |

Tabla 13. Sistemas de discontinuidades en el túnel auxiliar de construcción

## I.5. TUBERÍAS A PRESIÓN

### I.5.1. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Esta estructura esta formada por una obra de toma en forma de canal, dos conductos a presión de 7,95 m de diámetro que alimentan a las turbinas alojadas en la casa de máquinas, cuatro túneles de aspiración, una galería de oscilación, un túnel de desfogue y las vialidades subterráneas que comunican a la casa de máquinas y galería de oscilación (figura 1).

Las tuberías a presión (conductos a presión) se encuentran delimitados entonces por la obra de toma y las turbinas de casa de máquinas, son paralelos espaciados 28,70 m, con una longitud de 235,098 m cada uno, el desnivel es de 118,875 entre los ejes de la tubería, el inicio del trazo de los conductos a presión consiste en una transición en curva de sección rectangular de 6,224 X 7,95 a sección circular de 7,95 m de diámetro con 21,332 m de longitud con una curvatura de radio de 31,80° y 38,435°, posteriormente un tramo recto en línea descendente de 86,38, un tramo en curva de 36,076 m de longitud, ángulo de 65°, radio de 31,8 m, un tramo horizontal de 60,85 m y por último un tramo de 28,06 m, una transición recta de una sección circular de 7,95 m de diámetro a un diámetro de 5,50 m y un tramo horizontal de 2,40 m de longitud y de 5,50 m de diámetro que se conecta con la carcasa espiral.

## I.5.2. CONDICIONES GEOLÓGICAS ENCONTRADAS

En la excavación las condiciones geológicas de ambas tuberías, por su cercanía fueron similares, algunos accidentes geológicos variaron en su cruce solo en elevación, las características se describen a continuación:

### LITOLOGÍA

En la excavación de las dos tuberías a presión quedaron expuestas las unidades ignimbríticas (TicU3 y TicU2) en sus fases aglomerática e ignimbrítica, las cuales fueron intrusionadas por varios diques diabásicos de regular a mala calidad; en general, las rocas se presentaron de buena calidad, excepto en la zona donde se cruzó la Falla Crucero-Lagartos.

La unidad 3 (TicU3) se excavó desde las bocatomas hasta la elevación 294,00 en la tubería a presión 1 y hasta la elevación 273,00 en la tubería a presión 2. Esta unidad se presentó como una roca parcialmente alterada a inalterada, dura, masiva, compacta, que se rompe en forma de bloques, su fracturamiento es continuo, en general es de regular a buena calidad, con algunas zonas aisladas con fracturamiento intenso, como en los primeros metros del codo superior, que provocaron una disminución en su calidad (fotografía 7).



Fotografía 7. Vista de la excavación de las dos tuberías en el codo superior, donde se observan las características de la roca, al fondo en la del lado izquierdo, la galería GD-2

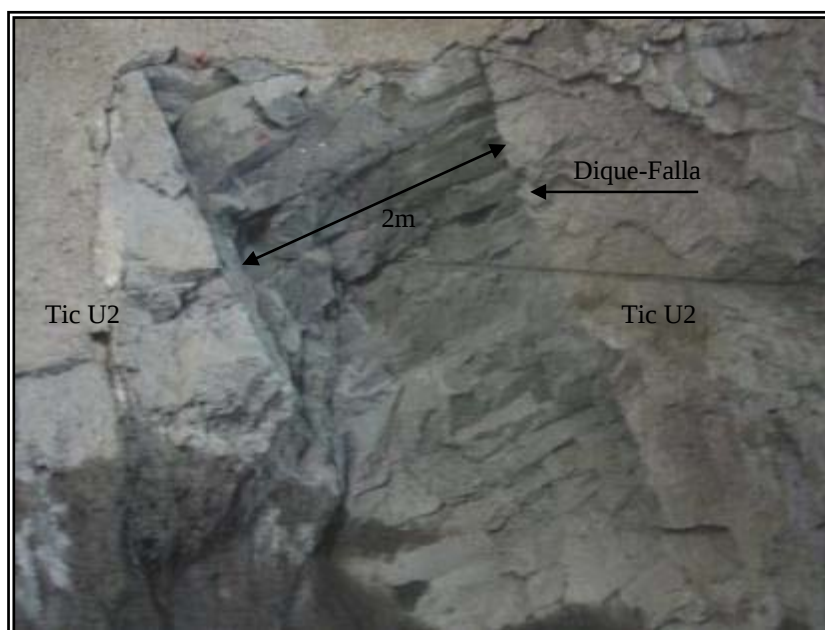
El horizonte aglomerático superior que marca el contacto con la unidad TicU3 se presentó como un horizonte aglomerático de 5 m de espesor, constituido por fragmentos subangulosos y subredondeados cuyo tamaño varía de 10 a 15 cm, en su mayoría de pórfidos andesíticos, empacados en una matriz de aspecto tobáceo y brechoide; en general se presentó de buena calidad con poco fracturamiento y con poca continuidad.

Bajo el horizonte, en el tramo inclinado de las tuberías a presión y hasta la elevación 237,00 y hasta el cadenamiento 0+204,00 se excavó el aglomerado inferior también de la unidad 2 (TicU2), tiene un espesor promedio de 25 m, se caracteriza por tener mejores índices de calidad de roca que el superior, presenta una matriz con mayor capacidad de soldamiento de todos sus componentes, su dureza es alta, se presenta poco fracturada, en general de buena calidad, a pesar de que es afectada por el sistema de fallas IV. En muestra de mano es de color rosáceo claro, muy compacta, rugosa y ligeramente alterada, se trata de un aglomerado bien consolidado y cuyos componentes son los mismos del aglomerado superior (fotografía 8).



Fotografía 8. Vista de la tubería a presión 1 en el cadenamamiento 0+060,00 donde se observa con detalle las características del horizonte aglomerático inferior de la fase ignimbrítica de la unidad TicU2

Otra de las rocas expuestas en estas tuberías son los intrusivos en forma de diques de composición diabásica que rellenaron fallas preexistentes, estos cuerpos de profundidad intermedia son los más jóvenes del área, e intrusionan a toda la secuencia litológica del P.H. El Cajón. Son los más abundantes y se distribuyen con cierta frecuencia en las dos márgenes. En muestra de mano son de composición diabásica, de color verde oscuro a negro, tiene textura afanítica, generalmente se presentan fracturados y alterados, observándose arcilla y en ocasiones calcita en sus contactos, por descomposición de las plagioclasas cálcicas; comúnmente adoptan formas tabulares e irregulares, casi horizontales, verticales y onduladas a rumbo, variando sus espesores de 0,50 a 3 m, sus características se anotaron, en la tabla 14 y fotografía 9.



Fotografía 9. Vista de uno de los diques-falla excavado en la tubería a presión 1 en el cadenamiento 0+147,50  
**FALLAS**

Además de los diques-fallas descritos, la Falla Crucero-Lagartos es la más importante en esta excavación, en donde apareció, las condiciones geológicas se presentaron inestables por la disminución en la calidad de la roca, el material de relleno presentó alteración avanzada, por la influencia de la percolación de agua meteórica y/o por procesos hidrotermales, el material de relleno está compuesto por roca triturada y arcilla plástica el cual tiene 5 m de espesor, su rumbo promedio es de N 42° E / 48° SE. Esta falla presenta una franja de afectación de 20 m que se manifiesta por una roca densamente fracturada (de 15 a 25 fracturas por metro) cuya presencia se observó en ambas tuberías (fotografía 10 y tabla 15).

| Tubería a Presión 1 |                  |         |            |                        | Tubería a Presión 2 |             |            |                        |                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------|------------------|---------|------------|------------------------|---------------------|-------------|------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dique               | Rumbo y echado   | Espesor | Afectación | Cadenamientos          | Rumbo y echado      | Espesor     | Afectación | Cadenamiento           | Observaciones                                                                                                                                                                                                          |
| 1                   | N 25° W / 63° NE | 2,00    | 3,50       | 0+147,50 a<br>0+151,00 | N 25° W / 63° NE    | 2,00        | 3,50       | 0+143,00 a<br>0+146,50 | Cruza en forma perpendicular a las dos tuberías, se presenta de regular calidad esta inalterado, tiene relleno de arcilla y calcita en sus respaldos.                                                                  |
| 2                   | N 25° W / 67° NE | 2,00    | 3,50       | 0+158,50 a<br>0+162,00 | N 51° W / 57° NE    | 2,10 a 3,00 | 4,50       | 0+150,00 a<br>0+154,50 | Dique falla, se ramifica en tres hacia la tubería 2, esta inalterado, tiene de 1 a 2 cm de relleno de arcilla y calcita, en uno de sus respaldos, la zona de falla de 1,50 m de roca triturada y alterada con arcilla, |
| 3                   | N 52° W / 65° NE | 2,00    | 6,50       | 0+165,00 a<br>0+171,50 | N 48° W / 48° NE    | 1,50        | 4,00       | 0+161,50 a<br>0+165,50 | El tercer y cuarto dique se ramifican entre si y forman una "X", son desplazados localmente por un plano de falla, son de regular calidad, en sus respaldos tiene de 2 a 3 cm de relleno de arcilla y de calcita.      |
| 4                   | N 39° W / 57° NE | 1,50    | 2,00       | 0+172,50 a<br>0+174,50 | N 47° W / 61° NE    | 2,00        | 4,40       | 0+165,00 a<br>0+169,40 |                                                                                                                                                                                                                        |
| 5                   | N 43° W / 65° NE | 1,70    | 3,00       | 0+180,00 a<br>0+183,00 | N 60° W / 65° NE    | 2,00        | 6,50       | 0+174,50 a<br>0+181,00 | Cruza en forma diagonal a las dos tuberías, es de regular a buena calidad, en sus respaldos tiene 2 cm de relleno de arcilla y calcita, se presenta ligeramente alabeado en la tubería 1.                              |
| 6                   | N 45° W / 45° NE | 1,00    | 2,80       | 0+188,70 a<br>0+191,50 | N 25° W / 43° NE    | 1,00        | 2,00       | 0+171,50 a<br>0+173,50 | Se corto en forma perpendicular a las dos tuberías, se presenta de regular a buena calidad e inalterado, en sus respaldos presenta relleno de calcita.                                                                 |
| 7                   | N 37° W / 67° NE | 2,00    | 2,90       | 0+204,50 a<br>0+207,40 | N 43° W / 65° NE    | 2,00        | 4,00       | 0+184,00 a<br>0+188,00 | Se corto en forma perpendicular a las dos tuberías, es de regular a buena calidad, en sus respaldos presenta relleno de arcilla y calcita.                                                                             |
| 8                   | N 19° W / 53° NE | 0,70    | 3,50       | 0+227,00 a<br>0+230,50 | -                   | -           | -          | -                      | Se corto en la tubería 1, es de regular a buena calidad, se presenta inalterado, en sus respaldos presenta 1 cm de relleno de arcilla y de calcita.                                                                    |

Tabla 14. Diques geológicos expuestos en las tuberías a presión 1 y 2



Fotografía 10. Vista de la excavación de la tubería a presión 2 (tramo inclinado) a la elevación 293,85, nótese la mala calidad de la roca, alterada y muy fracturada, en el piso aflora uno de los planos de la falla Crucero-Lagartos

| Falla              | Rumbo y echado   | Espesor (m) | Tubería a presión 1 |                 | Tubería a presión 2 |                 | Observaciones                                                |
|--------------------|------------------|-------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|
|                    |                  |             | Afectación (m)      | Elevación       | Afectación (m)      | Elevación       |                                                              |
| Crucero – Lagartos | N 42° E / 48° SE | 5,00        | 20,00               | 274,00 a 259,50 | 20,00               | 308,50 a 284,50 | Formó condiciones inestables, formó una franja de afectación |

Tabla 15. Fallas expuestas en las tuberías a presión 1 y 2

## FRACTURAMIENTO

El fracturamiento que se presentó en las dos tuberías en el tramo inclinado fue poco denso, con algunos planos con estrías y fracturas cerradas con relleno de arcilla y calcita; excepto el fracturamiento que se asocia con la falla Crucero-Lagartos que es muy denso y se describe en el apartado de fallas, la combinación de los sistemas de discontinuidades no propiciaron la formación de cuñas o bloques inestables en esta tubería. En el tramo horizontal en las dos tuberías, las discontinuidades se presentaron escasas y con poca continuidad por la buena calidad de la roca. La orientación de estas discontinuidades se muestra en la tabla 16.

| Tramo      | S1               | S2               | S3                                           |
|------------|------------------|------------------|----------------------------------------------|
| Inclinado  | N 52° W / 72° NE | N 59° E / 73° NW | N 50° E / 72° SE<br>(Falla Crucero-Lagartos) |
| Horizontal | N 39° W / 63° NE | N 70° W / 72° SW | -                                            |

Tabla 16. Orientación de los sistemas de fracturamiento en las tuberías a presión

## **I.6. CASA DE MÁQUINAS**

### **I.6.1. LOCALIZACIÓN Y DIMENSIONES**

La casa de máquinas del P.H. El Cajón, Nayarit , forma parte de las obras de generación subterráneas del proyecto, se trata de una excavación de 23,70 m de ancho, 107,05 m de largo y 55 m de alto en su parte más profunda, la bóveda está a la elevación 245,00. El eje de la casa de máquinas presenta una orientación NW 34° SE, misma que sus paredes más largas (figura 1 y 2).

La pared de aguas arriba fue intersecada por varios túneles entre los que se encuentran las tuberías a presión, dos nichos, tres ranuras de ventilación y el túnel de acceso a casa de máquinas; detrás de esta pared se localiza un túnel auxiliar para las lumbreras de ventilación verticales.

En la pared de aguas abajo están los dos túneles de aspiración y las galerías de buses; atrás de dicha pared se encuentran tres lumbreras, una de cables y dos de buses. Por último a 31 m hacia aguas abajo del muro, se localiza la galería de oscilación, por lo que esta pared limita el pilar de roca que separa ambas excavaciones. Por lo que respecta al tímpano sur de la caverna de casa de máquinas fue intersecado, en la parte superior por el túnel auxiliar de construcción y en el tímpano norte la intersección fue por la parte inferior.

### **I.6.2. CONDICIONES GEOLÓGICAS ENCONTRADAS**

#### **LITOLOGÍA**

La mayor parte de la bóveda y las paredes de la casa de máquinas se excavaron en rocas de la unidad 2 (TicU2), incluyendo el horizonte aglomerático que marca el contacto con la TicU3, las cuales se describen a continuación.

Los primeros metros de excavación de la bóveda de la casa de máquinas se hicieron en la unidad 3 TicU3 (del cadenamiento 0+000,00 al 0+012,00) cuya roca se presentó de muy mala calidad, con intenso fracturamiento y alteración formando condiciones inestables en la bóveda por la presencia de la Falla Crucero-Lagartos y su zona de afectación, por lo que la ampliación de este tramo se hizo en forma cuidadosa y alternada con la colocación del tratamiento.

A partir del cadenamiento 0+012,00 las condiciones geológicas y de estabilidad mejoraron notablemente, después de cruzar la falla apareció la unidad 2 (TicU2) donde la roca se presentó dura con mucho menos alteración y con poca densidad de fracturamiento, en general de buena calidad, parte de esta roca forma parte del aglomerado superior, identificado previamente por CFE, que marca el contacto entre las unidades TicU3 y TicU2, se trata de un horizonte aglomerático de 6 m de espesor bien consolidado (soldado) con una inclinación aparente de 11° hacia la pared de aguas abajo y que queda expuesto en prácticamente toda la parte izquierda de la bóveda; mientras que la parte derecha quedó expuesta la ignimbrita aglomerática de la misma unidad, la cual se presentó de buena calidad.



Fotografía 11. Excavación de la bóveda de la casa de máquinas donde se aprecian las características de la roca

El otro tipo de roca excavada en la casa de máquinas fueron cinco diques diabásicos de forma tabular, dos relacionadas con la Falla Crucero-Lagartos, uno quedó expuesto en la parte de aguas abajo y se prolonga hasta el fondo del tímpano norte (fotografía 12) y dos en la bóveda y pared de aguas arriba, estos se describen en la tabla 17.

| DIQUE | RUMBO Y ECHADO           | ESPESOR (m) | CADENAMIENTO | OBSERVACIONES                                                                                                                                                                                                                     |
|-------|--------------------------|-------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | N 18° W / 84° NE         | 0.50        | 0+000,00     | Cruza la zona de la falla Crucero-Lagartos y se mete a la pared de aguas arriba en el cadenamiento 0+024,00 (Sistema FIV).                                                                                                        |
| 2     | N 22° W / 55 a 58° al NE | 0,70        | 0+011,00     | Cruza en forma diagonal siguiendo el rumbo del fracturamiento y se angosta hasta cerrarse en el cadenamiento 0+055,00 cerca de la pared de aguas arriba (Sistema FIV).                                                            |
| 3     | N 30° W / 56° NE         | 0,50        | 0+035,00     | Se trata de un dique falla, expuesto en la pared de aguas abajo, apareció en la elevación 235,00 y se prolongó al tímpano norte hasta la elevación 225,50. En sus respaldos presentó relleno de arcilla y flujo continuo de agua. |

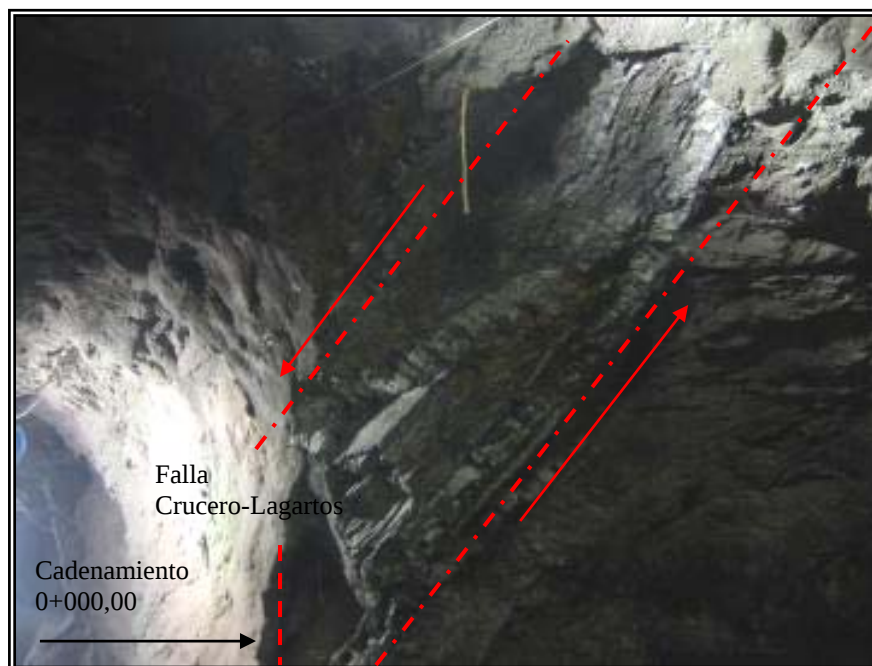
Tabla 17. Diques descubiertos en la excavación de casa de máquinas



Fotografía 12. Parte más baja del tímpano norte de casa de máquinas donde se aprecia el dique-falla donde presentó condiciones inestables

## FALLAS

Sin considerar los diques asociados al sistema de fallas IV, la única zona de falla encontrada en la excavación de la casa de máquinas fue la falla Crucero-Lagartos que afectó la inestabilidad en la bóveda los primeros 12 m de la casa de máquinas (playa de montaje) tiene un rumbo de  $N 51^\circ E / 46^\circ SE$ , en uno de sus planos se intrusionó un dique diabásico, destaca la zona de afectación de la falla, que mide 19 m y que se manifiesta por una zona de roca densamente fracturada (de 15 a 20 fracturas por metro) y que fue excavada desde el túnel auxiliar de la bóveda de casa de máquinas (fotografía 13).



Fotografía 13. Pared de aguas abajo de la bóveda de casa de máquinas (cadenamiento 0+000,00) donde apareció la Falla Crucero-Lagartos

## FRACTURAMIENTO

El fracturamiento que presentó en la bóveda de casa de máquinas fue poco denso, de una a tres fracturas por metro, con algunas franjas de fracturamiento y algunos planos con estrías de falla; este fracturamiento es cerrado sin arcilla, en algunos casos está relleno de calcita; destacan 4 fracturas continuas y cerradas, paralelas, separadas un metro, ubicadas en el lado derecho de la bóveda y que aparecieron desde el cadenamiento 0+070,00 y se prolongan hasta el 0+107,00; la combinación de los sistemas de discontinuidades no propiciaron la formación de cuñas o bloques inestables en la bóveda de casa de máquinas.

En la pared de aguas arriba de la casa de máquinas el fracturamiento y los planos con estrías de movimiento se agruparon en dos direcciones. Lo mismo que el de la pared de aguas abajo, se caracterizan por tener en su mayoría poca continuidad, son cerradas y solo algunas con relleno de arcilla o calcita (fotografía 14).

En los tímpanos, las fracturas generalmente son cerradas, algunas con relleno de calcita. Se agrupan en dos sistemas principales. La orientación de estas discontinuidades se muestra en la tabla 18.

|                       | S1               | S2               | S3               |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|
| Bóveda                | N 41° W / 66° NE | N 37° E / 54° SE | N 77° W / 76° NE |
| Pared de aguas arriba | N 70° W / 81° SW | N 51° W / 63° NE | -                |
| Pared de aguas abajo  | N 70° W / 81° SW | N 03° E / 81° SE | -                |
| Tímpano norte         | N 37° W / 72° NE | N 32° W / 60° SW | -                |
| Tímpano sur           | N 25° W / 32° NE | N 32° E / 82° SE | -                |

Tabla 18. Orientación de los sistemas de discontinuidades en la casa de máquinas



Fotografía 14. Pared de aguas arriba de la casa de máquinas, nótese el fracturamiento cerrado y continuo característico de esta zona

## PROBLEMAS DE ESTABILIDAD

En la bóveda de casa de máquinas la única zona inestable se ubica entre los cadenamientos 0+000,00 y 0+012,00 por la presencia de la Falla Crucero-Lagartos que provocó inestabilidad, sin embargo esta zona fue excavada con cuidado y se evitó que ocurriera algún derrumbe. Sin embargo los constantes goteos de agua están relacionados con los diques geológicos ubicados en la bóveda y en la pared izquierda de esta caverna.

Es importante mencionar que durante los levantamientos geológicos no fue posible identificar alguna cuña inestable en la bóveda, sin embargo se realizaron varios análisis con el fracturamiento, utilizando los tres sistemas de fracturamiento descritos y cuyos resultados nos mostraron que se forma una cuña tipo, cuya geometría particular impide que llegue a fallar por peso propio, a menos que se encontrara seccionada por otra discontinuidad, por ejemplo la pseudo estratificación, que se considero para el diseño del soporte de la bóveda (figura 6).

Upper Left wedge [4]  
FS: 0.167

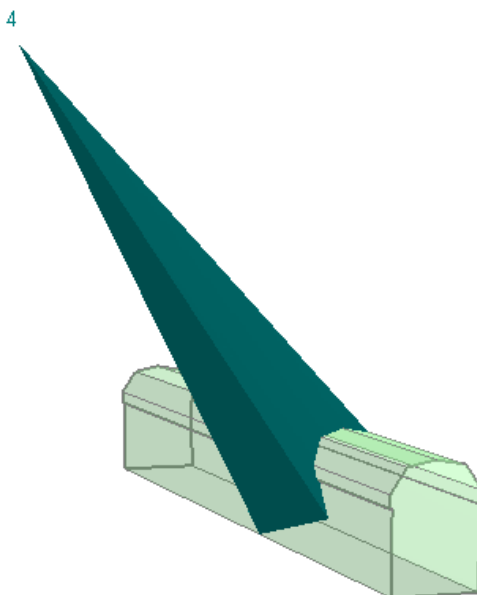


Figura 6. Cuña tipo formada por la combinación de los sistemas de fracturamiento identificados en la excavación de la bóveda de casa de máquinas

## I.7. TÚNELES DE ASPIRACIÓN

### I.7.1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN

Los dos túneles de aspiración forman parte de las obras de generación subterráneas del proyecto, se ubican en la parte más profunda de la casa de máquinas y galería de oscilación donde se comunican para desalojar el agua que pasa por las turbinas.

La excavación de estos túneles fue de sección rectangular, con ancho variable de 17,62 a 20,80 m, una altura también variable de 7,44 m al salir de la casa de máquinas, a 13,15 m. El eje longitudinal de los túneles de aspiración presenta una orientación NE 56° SW, están separados entre sí por un pilar de roca de 11 m y fueron intersecados por el túnel cárcamo en su parte más profunda (Figura 1, 2 y fotografía 15).

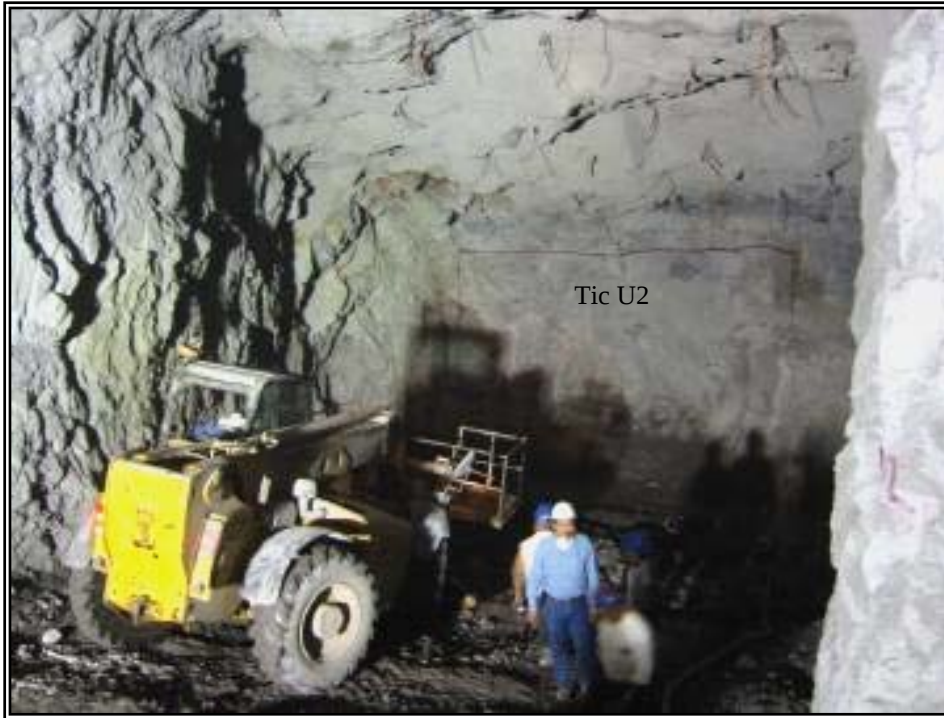


Fotografía 15. Vista hacia aguas arriba del pilar de roca que separa los dos túneles de aspiración, al fondo se nota la comunicación con la casa de máquinas

## I.7.2. CONDICIONES GEOLÓGICAS

### LITOLOGÍA

En la excavación de los dos túneles de aspiración quedó expuesta únicamente la ignimbrita de la unidad 2 (TicU2), la cual se presentó como una roca homogénea, dura, masiva, compacta, poco fracturada e inalterada; en general se presentó de buena y muy buena calidad por lo que no se presentaron zonas inestables. En muestra de mano se trata de una roca dura de color gris verdoso, tiene textura piroclástica-eutaxítica con fragmentos líticos angulosos de andesita hasta 5 cm en una matriz fina bien soldada (fotografía 16).



Fotografía 16. Excavación del Túnel de Aspiración No. 2, cadenamiento 0+016,00 en donde se observan las características de la roca

## FRACTURAMIENTO

En la excavación de los dos túneles de aspiración sobresale que no se haya identificado un solo plano de falla con estrías de movimiento, excepto al intersecarse con la pared de aguas abajo de casa de máquinas, donde apareció un solo plano de falla que no causó problemas de estabilidad. Respecto al fracturamiento tanto en la tubería de aspiración 1 como en la 2 es poco denso, una fractura a cada metro o a mayor distancia, aunque son continuas, la mayoría son cerradas y algunas tienen relleno generalmente de calcita con espesor de 2 a 5 mm, es importante mencionar que no se identificó relleno de arcilla en ningún caso; las orientaciones de este fracturamiento se anotan en la tabla 19.

|                             | S1               | S2               |
|-----------------------------|------------------|------------------|
| Túneles de aspiración 1 y 2 | N 77° W / 81° SW | N 10° W / 54° NE |

Tabla 19. Sistemas de fracturamiento en los túneles de aspiración

## **I.8. GALERÍA DE OSCILACIÓN**

### **I.8.1. LOCALIZACIÓN Y GEOMETRÍA**

La galería de oscilación es una estructura subterránea que se localiza aguas abajo de la casa de máquinas, conecta los túneles de aspiración de las dos unidades con el túnel de desfogue de salida al río, su función es controlar los cambios de presión (golpe de ariete) provocados por un cambio brusco de gasto por rechazos de la turbina, la galería cambia las ondas de presión en oscilaciones o fluctuaciones en masa mucho más lentas.

Es una excavación de 16 m de ancho, 66,70 m de largo y 51,95 de altura máxima, con una bóveda a la elevación 255,50. Sus paredes son rectangulares, las dos más largas se orientan al N 35°W, en la parte inferior de la pared de aguas arriba (elevación 212,50) se conectan los dos túneles de aspiración, en la de aguas abajo, también en la parte baja, se inicia el túnel de desfogue (elevación 203,55) y en la parte alta del tímpano sur se intercepta el túnel de acceso, lugar por donde se inició la excavación de la galería.

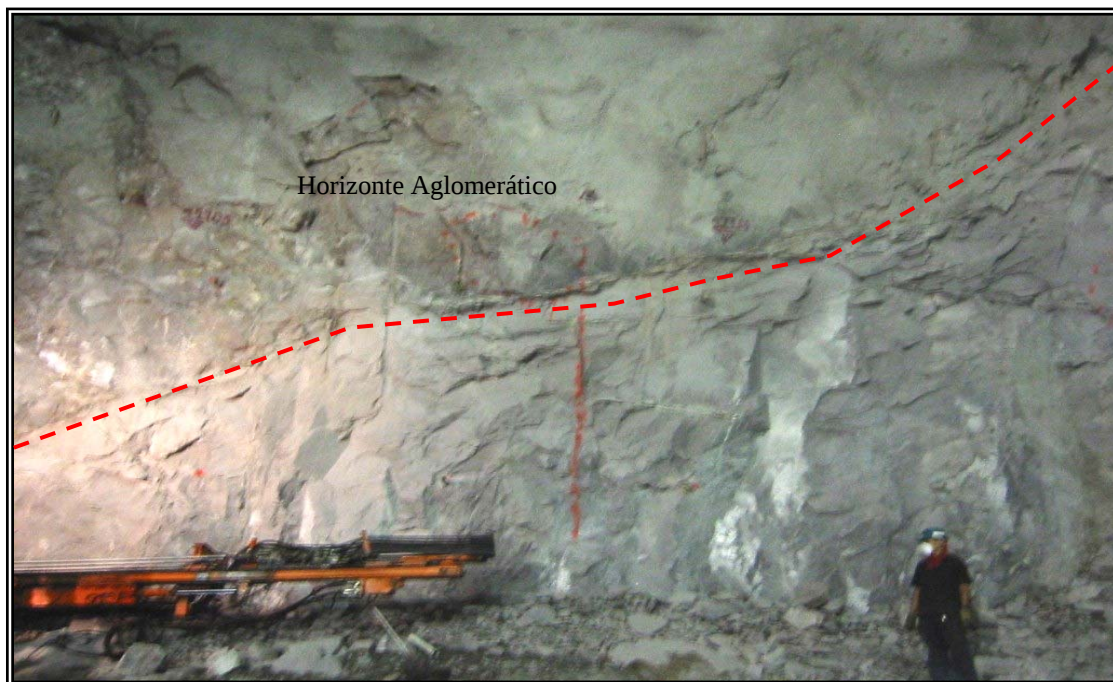
Es probable que en la parte media de la excavación se atravesase de madera perpendicular a su eje mayor una falla importante, que sería una bifurcación de la Falla Crucero con una inclinación promedio de 70°; la zona de falla está representada por una zona densamente fracturada y en tramos cizallada, que ocupa un espesor de 10 m y ocasionalmente puede presentar arcilla, por lo que habrá que tener vigilancia geológica durante el desarrollo de los trabajos con objeto de confirmar o no su aparición y evaluar el tratamiento correspondiente a la Falla Crucero. El fracturamiento en esta obra puede asociarse a los mismos resultados de la estadística que se presenta en la Figura III.2, los cuales corresponden también a la casa de máquinas, donde se menciona que los sistemas F1 = N 42° W / 70° NE y F2 = N 26° W / 57° NE se pueden asociar a las orientaciones de los diques y los sistemas F3 = N 62° E / 72° NE y F5 = N 50° E / 49° SE aparentemente lo hacen con la zona de cizallamiento-Lagarto.

### **I.8.2. CONDICIONES GEOLÓGICAS ENCONTRADAS**

#### **LITOLOGÍA**

La excavación de la bóveda y la parte superior de las paredes de la galería de oscilación fue en roca dura de buena calidad de la unidad ignimbrítica TicU3, de composición riodacítica de color gris claro, de textura piroclástica; constituida por cuarzo, feldespatos, líticos de composición andesítica y fiammes de pómez de 0,5 a 1 cm de diámetro, todo sostenido en una matriz tobácea vitrocristalina bien soldada, en general se presentó ligeramente alterada, dura y con poco fracturamiento y este con poca continuidad.

El resto de la excavación de las paredes de la galería de oscilación fue en la unidad 2 (TicU2) incluyendo su horizonte aglomerático de 5 m de espesor que marca el contacto entre las unidades ignimbríticas TicU3 y TicU2, en general se presenta de buena calidad con poco fracturamiento y cuando existe tiene poca continuidad; hacia niveles inferiores la ignimbrita se presentó aglomerática, como una roca dura, poco fracturada e incipientemente alterada, en general de buena calidad, tiene líticos angulosos de andesita hasta de 5 cm en una matriz tobácea con soldamiento moderado (fotografía 17).



Fotografía 17. Contacto entre el aglomerado, en la parte superior y la ignimbrita aglomerática en la parte inferior, las dos de la unidad TicU2 en el tímpano norte

## PRINCIPALES DISCONTINUIDADES

Tanto en la bóveda como en las paredes de la galería de oscilación fueron identificadas pocas discontinuidades, como planos continuos con estrías de movimiento, fracturas con poca frecuencia (una a cada metro), con poca continuidad, cerradas y algunas con relleno de arcilla o calcita.

Se puede decir que en las paredes las discontinuidades geológicas más importantes fueron el contacto entre el aglomerado volcánico y las Unidades TicU3 y TicU2. Respecto al fracturamiento, se presentó poco denso (una fractura a cada uno o dos metros) y con poca continuidad, las pocas que son continuas por lo general son en su mayoría cerradas, las que llegan a tener relleno generalmente es de calcita con espesor de 2 a 5 mm y lo relevante es que en su intersección no formaron cuñas o condiciones inestables en las paredes (fotografía 18). De acuerdo con el análisis del fracturamiento, se observa que existe una orientación dominante y uno secundario cuyos datos se enlistan en la tabla 20.

| PARED         | S1               | S2                                     | OBSERVACIONES                                                   |
|---------------|------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Bóveda        | N 08° E / 72° NW | N 83° E / 83° NW                       | Estos sistemas tuvieron su variación por tramos.                |
| Aguas arriba  | N 07° W / 48° NE | N 85° W / 85° NE                       | Los sistemas y su intersección sin salidas hacia la excavación. |
| Aguas abajo   | N 03° W / 54° NE | N 86° E / 85° SE                       | El sistema S1 y la intersección con salida a la excavación.     |
| Tímpano Norte | N 10° W / 54° NE | N 77° E / 54° SE                       | La intersección de los sistemas con salida hacia la excavación. |
| Tímpano Sur   | N 53° W / 78° SW | N 08° E / 78° SE y<br>N 62° E / 72° NW | La intersección S1 y S2 con salida hacia la excavación.         |

Tabla 20. Sistema de fracturamiento en las paredes de la galería de oscilación.



Fotografía 18. Pared de aguas arriba de la galería de oscilación a la elevación 211,00 donde se aprecia la disposición de las fracturas, su frecuencia, orientación e inclinación hacia dentro de la pared y lo cerrado de éste.

## **I.9. TÚNEL DE DESFOGUE**

### **I.9.1. LOCALIZACIÓN Y DIMENSIONES**

El túnel de desfogue, inicia a partir de la galería de oscilación y desemboca en el río inmediatamente después de la ataguía de aguas abajo de la presa. El túnel tiene 310,00 m de longitud, y una pendiente cero, se localiza todo a la elevación 212,50 a nivel de piso terminado, la sección del túnel es de tipo portal de 15,30 m de diámetro. Su trazo empieza con un tramo recto de 14,15 m de longitud, después un tramo en curva con un radio de 66,6 m y 76°, para terminar en otro tramo recto de 229,00 m de longitud hasta el portal de salida. En la salida tiene una rampa ascendente para alcanzar el nivel del río a la elevación 216,00 (figura 1 y 2).

### **I.9.2. CONDICIONES GEOLÓGICAS ENCONTRADAS**

#### **LITOLOGÍA**

Ya en la excavación del Túnel de Desfogue quedaron expuestas dos unidades de roca, la Tic U3 y Tic U2 de la ignimbrita El Cajón, incluyendo el aglomerado superior que marca la separación entre las dos. La ignimbrita de la unidad 3 (Tic U3) se presentó parcialmente alterada y fracturada, mejorando su calidad hasta inalterada, masiva, dura y con un poco de fracturamiento; en general de muy buena a excelente calidad, en pocos tramos varió a calidad regular, sobre todo en la zona de afectación de la Falla Crucero-Lagartos, donde se presentó alterada y afectada por numerosos planos de falla con estrías de movimiento y fracturas continuas con relleno de arcilla, esta roca en muestra de mano se observa de color gris verdoso variado a café claro y su textura es piroclástica-eutaxítica.

El horizonte aglomerático de la Tic U2 está constituido por fragmentos subangulosos y subredondeados cuyo tamaño varía de 10 a 15 cm, en su mayoría de pórfidos andesíticos, empacados en una matriz de aspecto tobaceo y brechoide. Por lo que respecta a la fase

ignimbrítica aglomerática de la unidad 2 (Tic U2) tiene aspecto masivo, es dura, compacta, esta ligeramente alterada y en los planos de fracturas tiene relleno de calcita, en general se presentó de buena calidad. En muestra sana, la roca es de color gris claro, tiene textura piroclástica-eutaxítica, cuyo tamaño varía de 0,2 a 4 cm de diámetro de flammes y de pómez alargados de 0,4 a 3 cm de ancho, también tiene fragmentos líticos angulosos de andesita hasta 5 cm en una matriz fina bien soldada (Fotografía 19).



Fotografía 19.- Vista del túnel de desfogue por la media sección superior en el cadenamiento 0+254,00 donde se observa el aspecto masivo de la roca y el escaso fracturamiento, en esta zona, con relleno de calcita.

## FALLAS

La única zona de falla que cruzó el túnel fue la Crucero-Lagartos, cuya afectación alcanzó una longitud de 42 m, entre los cadenamientos 0+106,00 al 0+148,00, intervalo dentro del cual se colocaron marcos como soporte provocando que el avance de la excavación fuera lento, ya que también se tuvo que reducir la sección de excavación a  $\frac{1}{4}$  para evitar derrumbes previos a la colocación de los marcos. En esta zona de afectación también se incrementaron las fracturas continuas rellenas de arcilla, de hasta 10 cm de espesor y una disminución en la calidad de la roca, formando condiciones inestables, provocando desprendimientos en la bóveda por la formación de cuñas; una de estas se derrumbó, entre los cadenamientos 0+128,00 y 0+132,00, con un volumen aproximado de 250 m<sup>3</sup> (Fotografía 20).



Fotografía 20.- vista del derrumbe en el cadenamiento 0+132,00 del túnel de desfogue, donde las condiciones geológicas provocaron la inestabilidad por la presencia de la falla Crucero-Lagartos.

El espesor de la Falla Crucero-Lagartos fue de 5,50 m de roca triturada con arcilla (milonita), tiene un rumbo de N 50° E inclinada 46° hacia el SE, asociada siempre con la presencia de numerosos planos de falla, fracturas continuas con relleno de arcilla hasta de 10 cm y zonas de fracturamiento intenso.

#### FRACTURAMIENTO

El fracturamiento que se presentó en este túnel fue poco denso, una fractura por metro, con algunos planos con estrías de movimiento y pocas franjas de fracturamiento, éste es cerrado y con relleno de calcita y arcilla (Fotografía 21), sobre todo en la zona de afectación de la Falla Crucero-Lagartos y su combinación de estas provocaron la formación de cuñas inestables en la bóveda de calcita; la orientación de estas discontinuidades se anota en la tabla 21.

| Cadenamientos        | S1               | S2               | S3                                            |
|----------------------|------------------|------------------|-----------------------------------------------|
| 0+000,00 al 0+190,00 | N 04° E / 63° NW | N 58° W / 88° NE | N 48° E / 46° SE<br>(Falla Crucero-Lagartos). |
| 0+190,00 al 0+311,00 | N 77° W / 81° SW | N 26° E / 86° NW | N 26° E / 86° NW                              |

Tabla 21.- Sistema de discontinuidades en el túnel de desfogue



Fotografía 21.- Vista del tope del túnel de desfogue en el cadenamiento 0+231,00, obsérvese el color café claro que muestra la arcilla que rellena las fracturas, con espesores de 5 a 10 cm.

#### **I.10. PORTAL DEL DESFOGUE**

En el portal de salida del túnel de desfogue se detectó la presencia de grandes cuñas rocosas, en la saliente topográfica y vestigios de otras deslizadas en la cárcava inmediatamente aguas abajo. Destaca la presencia de una macro cuña, que comprende la zona desde la base de la salida del desfogue hasta poco más arriba de los cortes del camino 7-MD; con por lo menos tres diferentes líneas de intersección o fuga, dependiendo de la combinación de fallas, teniendo siempre como la principal a la Falla Lagartos (SE). En la figura 7 se muestra la cuña que afecta directamente la salida del desfogue.





Fotografía 22.- Vista hacia aguas abajo del cantil de la parte superior de la salida del desfogue, donde se aprecia el intenso fracturamiento del macizo rocoso y su fuerte proceso de relajamiento de su borde superior (problema independiente a la estabilidad general del macro bloque).

## **I.11. LUMBRERAS**

### **I.11.1. LOCALIZACIÓN Y GEOMETRÍA**

En las obras de generación se excavaron ocho lumbreras, tres de ventilación, dos de buses, una de cables y dos auxiliares para construcción, todas se comunican a la superficie en la plataforma de la subestación, a la elevación 340,00 excepto una de construcción (Figuras 1 y 2).

Las tres lumbreras de ventilación se ubican a 8m dentro de la pared de aguas arriba de casa de máquinas, son de 3,10m de diámetro, con una longitud de 109,50 m y llegan hasta la elevación 230,50 sitio de la galería auxiliar de ventilación la cual fue excavada ex profeso. Estas lumbreras fueron excavadas con una contrapocera y una rima especial de 3,10 m de diámetro desde la plataforma de la subestación.

Las dos lumbreras de buses se excavaron dentro de la pared de aguas abajo de casa de máquinas, la de la unidad uno a 11,05 m y la de la unidad dos a 18,85 m. Son de sección

circular con un diámetro de 2,40 m, con una contrapocera, para posteriormente ampliarse a 5,80, mediante perforaciones y voladuras.

También dentro de la pared de aguas debajo de casa de máquinas, a 6 m, se excavó la lumbrera de cables. Tiene 2,40 m de diámetro y se conecta con un ramal horizontal tipo portal de 3,50 m libres en el piso de generadores; su función es la de conducir todos los cables de control y de corriente de la casa de máquinas hacia la plataforma de la subestación.

Por último se excavaron dos lumbreras auxiliares de construcción de 2,40 m de diámetro para ventilar las obras de generación subterránea durante la etapa de excavación, una de 88,50 m llega a la bóveda de la galería de oscilación en el cadenamiento 11,80.

### **I.11.2. CONDICIONES GEOLÓGICAS ENCONTRADAS**

#### **LITOLOGÍA**

En la excavación las condiciones geológicas de las lumbreras (ventilación, buses, cables y auxiliares) por su cercanía, fueron similares, los accidentes geológicos afectaron a todas variando solo en elevación, las características de estas condiciones se describen a continuación.

Las ocho lumbreras fueron excavadas en dos unidades de roca, la mayor parte fue echa en la Unidad 3 (Tic U3) de la ignimbrita El Cajón y en la Unidad 2 (Tic U2) de la misma ignimbrita, incluyendo su horizonte aglomerático que marca el contacto entre las dos unidades. Estas rocas fueron intrusionadas por varios diques diabásicos de regular a mala calidad asociadas a fallas. En general las rocas se presentaron de regula a buena calidad, excepto en la zona donde se cruzaron las Falla y/o diques cuya afectación provocó que se formaran franjas de roca de muy mala calidad.

#### **FALLAS**

En la excavación de las lumbreras se cortaron 8 fallas, cuatro de estas aparecieron en las lumbreras de ventilación asociadas a diques muy alterados y cuatro en las lumbreras de buses y de cables. De estas destaca la Falla Crucero, que se cortó en 7 de las 8 lumbreras; en los tramos que se cortó, las condiciones geológicas se presentaron inestables con zonas de roca de muy mala calidad; el material de relleno presentó alteración avanzada, por la influencia de la percolación de agua meteórica y/o por procesos hidrotermales, está compuesta por roca triturada y arcilla plástica con espesores de hasta 5 m con una alo de afectación mayor (hasta de 5 m) manifestada por una zona de roca densamente fracturada (de 15 a 20 fracturas por metro); el rumbo promedio medido en sus respaldos fue de N 42° E / 48° SE. Esta falla provocó serios problemas de estabilidad en todas las lumbreras y en algunas zonas provocó derrumbes que formaron oquedades de sobre-excavación (Fotografía 23). El resto de las fallas se anotan en la tabla 22.



Fotografía 22.- Vista de una de las paredes de la lumbrera de cables a la elevación 280,00, en donde se muestra parte de la zona de Falla Crucero- Lagartos y un dique alterados que provocó un derrumbe formándose esta sobre-excavación.

| Falla |                                | Lumbrera de ventilación No. 1 |                 | Lumbrera de ventilación No. 2 |                 | Lumbrera de ventilación No. 3 |                 |
|-------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|
|       |                                | Afectación                    | Elevación       | Afectación                    | Elevación       | Afectación                    | Elevación       |
| 1     | FD-3                           | 1 m                           | 340,00 a 339,00 | 14 m                          | 340,00 a 326,00 | 19 m                          | 340,00 a 321,00 |
| 2     | F-IV                           | 4.5 m                         | 311,50 a 307,00 | 3,50 m                        | 290,00 a 286,50 | 4 m                           | 280,00 a 276,00 |
| 3     | F-DL                           | 9 m                           | 304,50 a 295,50 | -                             | -               | -                             | -               |
| 4     | Crucero-Lagartos               | 12.5 m                        | 284,50 a 272,00 | 11.5 m                        | 315,50 a 304,00 | 13 m                          | 333,00 a 320,00 |
|       |                                | LUMBRERA DE BUSES 1           |                 | LUMBRERA DE BUSES 2           |                 | LUMBRERA DE CABLES            |                 |
|       |                                | Afectación (m)                | Elevación       | Afectación (m)                | Elevación       | Afectación (m)                | Elevación       |
| 4     | Crucero Lagartos               | 29                            | 316 a 287       | 33.00                         | 340,00 a 307,00 | 26,50                         | 299,50 a 273,00 |
| 5     | Dique-Falla – 1 (Sistema F-IV) | 22,50                         | 332 a 309,50    | No aflora                     | No aflora       | 23                            | 280,00 a 257,00 |
| 6     | Dique-Falla – 2 (Sistema F-IV) | 22,00                         | 312,00 a 290,00 | 4,00                          | 340 a 336       | 6                             | 284,00 a 278,00 |
| 7     | Dique-Falla 3 (Sistema F-IV)   | 4                             | 254,50 a 250,50 | No aflora                     | No aflora       | 2,50                          | 247,50 a 245,00 |
| 8     | Dique-Falla 4                  | 6,00                          | 240,50 a 234,50 | 8                             | 257,00 a 249,00 | 3,50                          | 231,50 a 228,00 |

Tabla 22.- Principales fallas expuestas en las lumbreras.

## FRACTURAMIENTO

Las discontinuidades que incluyen planos de fractura con estrías de movimiento, franjas de fracturamiento (concentración de fracturas) y fracturas que forman costras de roca en las paredes (Fotografía 23) y en la cercanía de las fallas o los diques que presentaron relleno arcilloso; las orientaciones de estas se agruparon en tres sistemas de acuerdo a la tabla 23.

| S1               | S2               | S3               |
|------------------|------------------|------------------|
| N 83° E / 81° NW | N 45° W / 71° NE | N 05° E / 65° SE |

Tabla 23.- Sistemas de discontinuidades de las lumbreras.

La combinación de los sistemas de discontinuidades, a lo largo de la lumbrera, formó cuñas con salida a la excavación cuya geometría se muestra anexa en la figura 8.



Fotografía 23.- Vista de la pared de la lumbrera de buses 1, a la elevación 283,50 en donde se observa la orientación del sistema del fracturamiento principal.

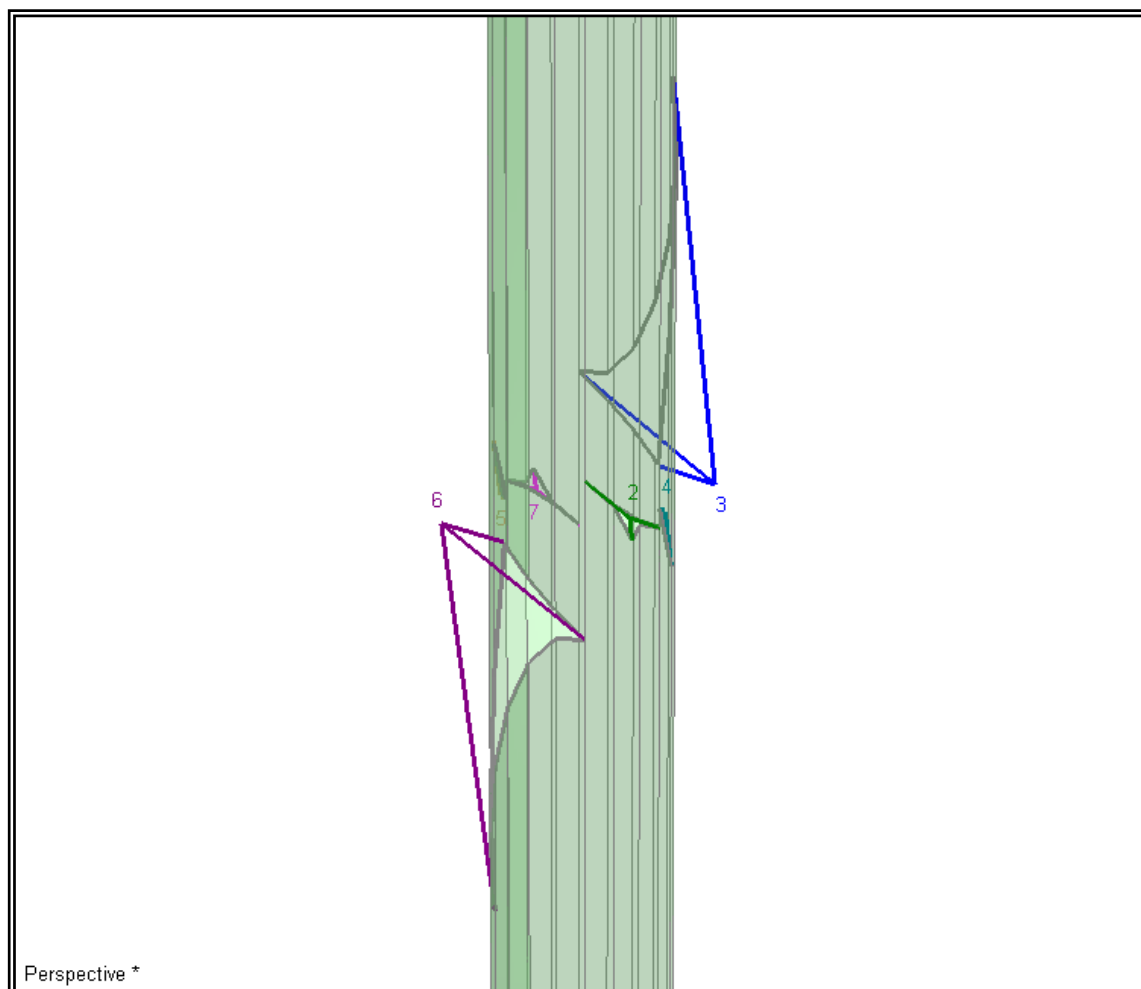


Figura 8.- Geometría de las cuñas tipo que se generaron en las lumbreras

## I.12. SUBESTACIÓN

### I.12.1. LOCALIZACIÓN Y GEOMETRÍA

Dentro de las obras de generación del Proyecto Hidroeléctrico “El Cajón”, se ha considerado la construcción de una subestación, la cual, albergará el edificio de control de la central hidroeléctrica y además recibirá la electricidad generada por las turbinas, para su conducción y distribución.

Esta obra se encuentra en la margen derecha, aguas abajo el eje de la cortina y consiste en una plataforma a la elevación 340,00 de 177 X 76 m, recientemente excavada, que colinda en un extremo con el muro izquierdo del canal de descarga del vertedor, en el lado SE de esta plataforma y 40 m más abajo se localiza el camino de construcción denominado 7-MD y en el lado NE esta limitada por tres taludes inclinados 0,5:1 entre dos bermas en las elevaciones 352,00 y 363,00 (Figura 9).

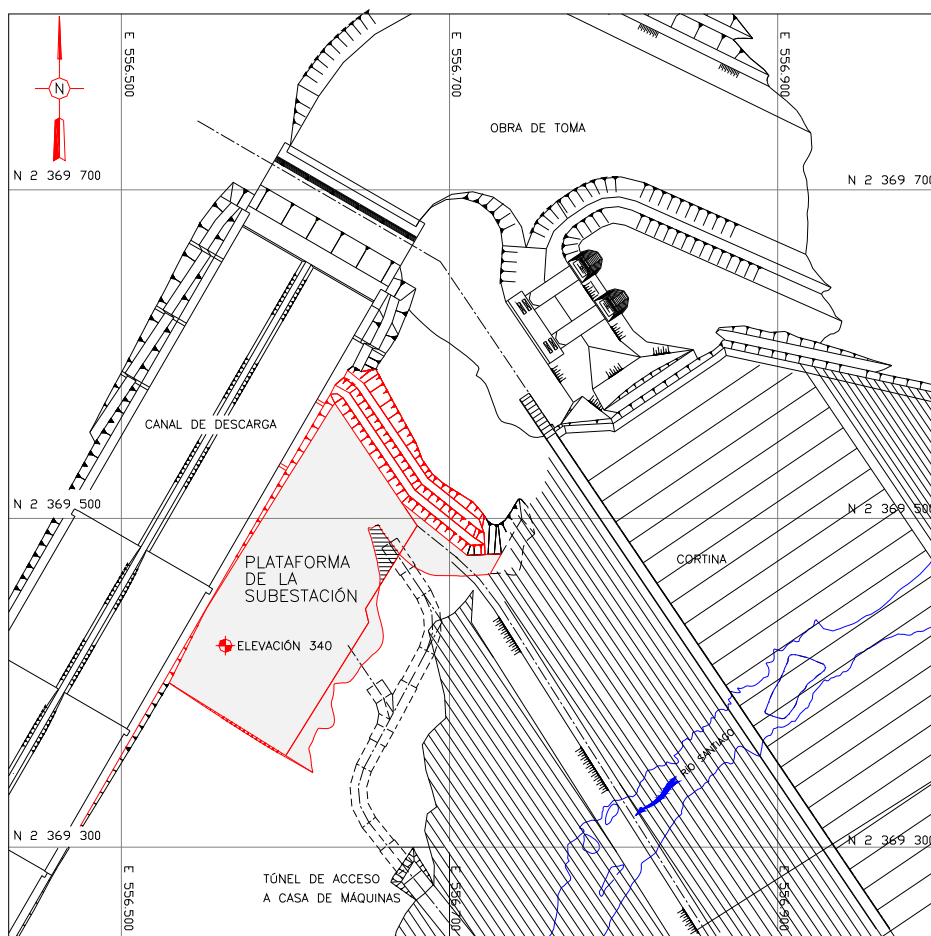


Figura 9.- Croquis de localización de la plataforma de la subestación del P.H. El Cajón, Nay.

## I.12.2. CONDICIONES GEOLÓGICAS ENCONTRADAS

### LITOLOGÍA

La excavación de la plataforma de la subestación se realizó en la Unidad 3 (Tic U3) de la ignimbrita El Cajón, la cual esta intrusionada por varios diques diabásicos de regular a mala calidad asociadas a fallas. En general las rocas se presentaron de regular a buena calidad, excepto en la zona donde se cruzaron las Falla y/o los diques cuya afectación provocó que se formaran franjas de roca de muy mala calidad e inclusive provocaron derrumbes.

En la excavación de la plataforma y de los taludes, tanto los NE separados por des bermas y los que limitan el canal de descarga del vertedor, la roca de esta unidad se presentó de color gris, masiva, al romperse forma bloques , poco fracturada, dura, de textura piroclástica, con fragmentos líticos de color oscuro, de forma angulosa a subredondeada, con algunas zonas con fracturamiento denso, en general, de buena calidad; sin embargo cercana a las falla o a los diques-falla disminuyó notablemente esta, mostrando una franja de alteración de espesor variable de mala calidad (Fotografía 24).



Fotografía 24.- Excavación de la plataforma de la subestación, en el lado izquierdo el talud NW que separa del canal de descarga, en el centro los taludes NE que la separan de la obra de toma.

Otro tipo de roca que se excavó en la plataforma de la subestación fueron 8 diques deabásicos, los cuales se presentan con bifurcaciones y espesores variables de 0,50 a 5 m, su orientación es variable, de N 30° a 80° W, con inclinación generalmente de 62 a 70° al NE, tienen un comportamiento irregular, algunos disminuyen su espesor hasta acuñarse, otros se juntan aumentando su espesor o cambian de dirección introduciéndose en fallas preexistentes, en general están asociadas a planos y zonas de falla. Generalmente se presentan alterados, sus respaldos tienen relleno arcilloso, son de mala calidad y muy susceptibles al intemperismo, son de composición diabásica, su color varía de verde a café oscuro, sus características se describen en la tabla 24.

|   | Falla                | Rumbo y echado                       | Espesor (m) | Observaciones                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---|----------------------|--------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Cañada de los diques | N 26° W / 55-66° NE                  | 1,00 a 2,00 | De manera general, los diques de la falla IV, afectaron al piso de la plataforma de la subestación y al talud del camino 7-MD en donde provoco problemas de estabilidad, los diques son de composición diabásica, de mala calidad, presentan bifurcaciones con espesores variables de 0,50 a 5 m, con orientaciones variables, y ocasionalmente suelen acuñarse ó se juntan aumentando su espesor. |
| 2 | Cañada de los diques | N 50° W / 58° NE                     | 1,50 a 3,00 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 3 | Dique (Falla IV)     | N 30° W / 66° SW<br>N 55° W / 77° SW | 1,50 a 2,50 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 4 | Dique (Falla IV)     | N 20° W / 67° NE                     | 1,50        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 5 | Dique (Falla IV)     | N 27° W / 63 – 75° NE                | 1,00 a 5,00 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 6 | Dique (Falla IV)     | N 19° W / 40° NE<br>N 35° W / 78° NE | 0,50 a 1,50 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 7 | Dique (Falla IV)     | N 39° W / 59° NE<br>N 46° W / 76° NE | 1,50 a 2,00 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 8 | Dique (Falla IV)     | N 45° W / 64° NE                     | 1,00        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

Tabla 24.- Principales diques expuestos en la plataforma de la subestación

## FALLAS

En la excavación de la plataforma de la subestación se descubrieron 5 fallas y numerosos planos con reliz de movimiento, de las zonas de falla destacan dos por al afectación que provocó en la plataforma.

Una de ellas es la llamada Falla Lagartija SE que no había sido reportada por encontrarse oculta y que se descubrió a consecuencia de un derrumbe del talud del camino 7-MD, 4384 m<sup>3</sup> que afectó los taludes del camino y mutiló la plataforma, antes de que se iniciara la excavación de la subestación, lo cual obligó a modificar el arreglo de la subestación (Fotografía 25 y 26).



Fotografía 25.- Vista del plano de la Falla Lagartija SE que provocó el derrumbe, obsérvese la roca alterada e intemperizada.



Fotografía 26.- Grietas de tensión generadas por el derrumbe en la zona de la subestación provocadas por la Falla Lagartija SE.

La presencia del plano de la Falla Lagartija SE con inclinación desfavorable hacia la excavación del camino 7-MD, la mala calidad de la roca provocada, por la alteración de la zona de falla, los numerosos dique diabásicos alterados uno de los cuales formó junto con la falla una cuña inestable y el intemperismo de la roca provocaron el derrumbe (Figura 9).

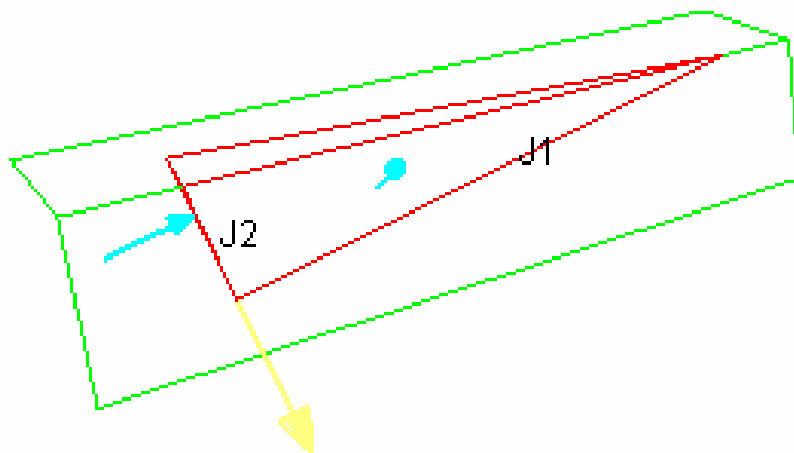
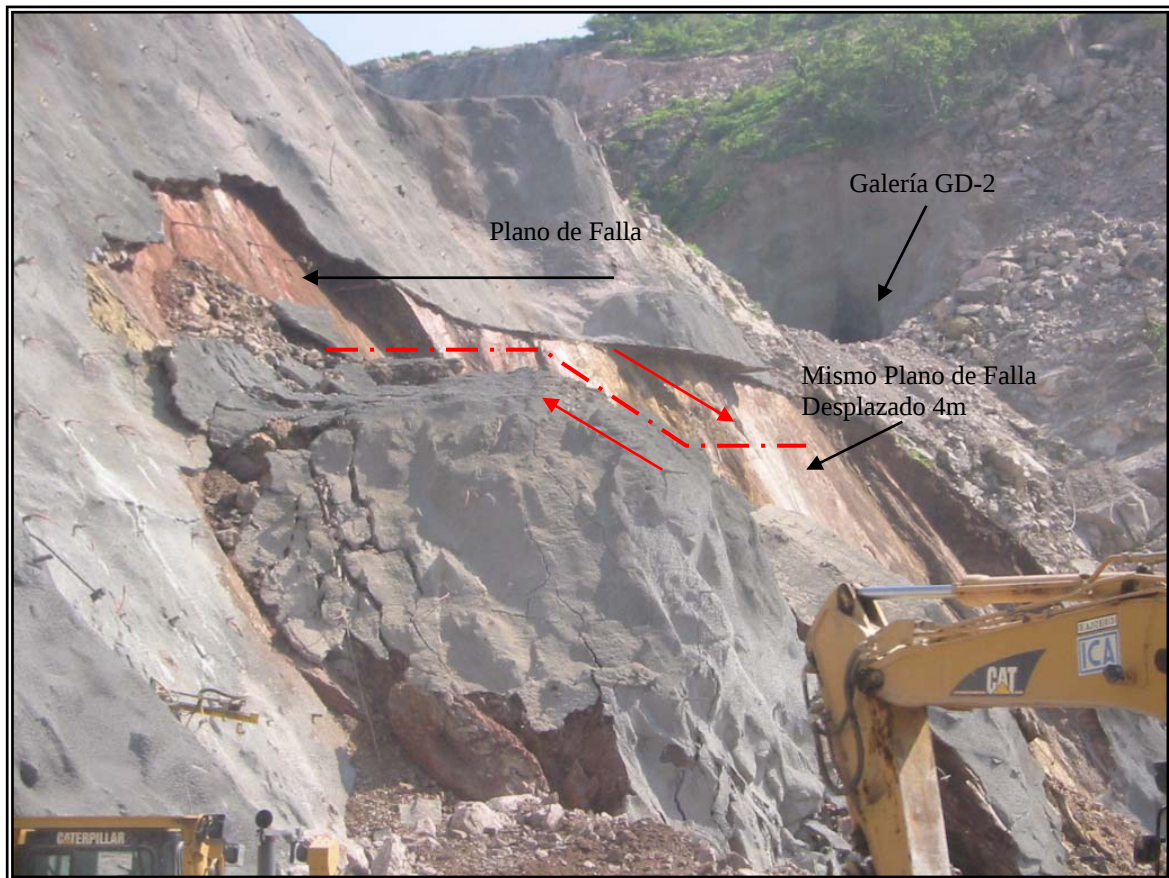


Figura 9.- Modelo de la cuña inestable que se derrumbó, entre la subestación y el camino 7-MD

Esta misma falla en niveles cercanos al camino 7-MD, provocó otro desprendimiento de roca. El material que se derrumbó en esa ocasión, formaba parte de una berma pequeña que no se retiró en su momento, considerando que el plano de falla no la afectaría.

Las condiciones geológicas que se combinaron: la mala calidad de la roca, la presencia de la zona de diques-falla del sistema del al falla IV, la influencia del agua infiltrada por la recientes

lluvias, así como la excavación para alcanzar el nivel final del camino, provocaron que este bloque fallara. Sin embargo, el deslizamiento no afectó el área de la subestación a la elevación 340,00 (Fotografía 27).



Fotografía 27.- Vista del derrumbe ocurrido entre la subestación y el camino 7-MD (elev. 340,00 a la 311,00). Nótese la zona del plano de la Falla Lagartija SE desplazada 4m hacia el frente por una de las fallas-dique.

La otra falla importante es la expuesta en parte del talud NW de la subestación, se trata de la Falla Crucero-Lagartos que ha afectado numerosas zonas del vertedor como el muro alabeado, el talud izquierdo de la zona de estructuras y el muro izquierdo del canal de descarga. Esta falla en la subestación esta representada por numerosos planos de falla de rumbo N 35° E/54° SE los cuales forman cuñas inestables; uno de estos planos combinado con la zona de falla de la cañada de los diques, provocó un derrumbe de una parte del talud NW de la subestación (Fotografía 28). Las características de las demás fallas se describen en la tabla 25.



Fotografía 28.- Vista del derrumbe ocurrido en la subestación a la elevación 363,00. Nótase el desprendimiento del material alterado y triturado formado por la convergencia de las fallas Crucero-Lagartos y Fd3 (falla cañada de los diques).

|   | Falla            | Rumbo y echado        | Espesor (m) | Observaciones                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---|------------------|-----------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | FD-3             | N 55° E / 55 a 70° SE | 1,00        | Roca triturada con arcilla y se profundiza a niveles inferiores.                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 2 | F-IV             | N 31° W / 66° NE      | 2,50        | Fue identificada en las tres zanjas de exploración, roca triturada con arcilla.                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 3 | F-DL             | N 31° E / 60° NW      | 1,00        | Roca triturada con arcilla y se profundiza a niveles inferiores.                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 4 | Crucero-Lagartos | N 35° E / 54° SE      | 8,00        | Esta expuesta en parte del talud NW de la subestación, esta representada por numerosos planos de falla los cuales forman cuñas inestables; una de estas se derrumbó                                                                                                                                                                                        |
| 5 | Lagartija SE     | N 35° E / 50° SE      | 0,10 a 1,00 | Zona de roca triturada con arcilla con el plano se falla con estrías de movimiento con inclinación desfavorable hacia el camino 7-MD, la mala calidad de la roca provocada, por alteración de la zona de falla, los numerosos diques diabásicos alterados formo junto con la falla una cuña inestable y el intemperismo de la roca provocaron el derrumbe. |

Tabla 25.- Principales fallas descubiertas en la plataforma de la subestación.

## FRACTURAMIENTO

Con objeto de diferencia varias zonas de fracturamiento preferencial se dividieron tres zonas, una representa el fracturamiento de la plataforma (en base a las discontinuidades expuestas tres zanjas que se realizaron para investigación del derrumbe de parte de la plataforma de la subestación, otra de los taludes NE y la última del talud NW en la plataforma de la subestación, las cuales se sintetizan en la tabla 26.

|   | Falla            | Rumbo y echado        | Espesor (m) | Observaciones                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---|------------------|-----------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | FD-3             | N 55° E / 55 a 70° SE | 1,00        | Roca triturada con arcilla y se profundiza a niveles inferiores.                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 2 | F-IV             | N 31° W / 66° NE      | 2,50        | Fue identificada en las tres zanjas de exploración, roca triturada con arcilla.                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 3 | F-DL             | N 31° E / 60° NW      | 1,00        | Roca triturada con arcilla y se profundiza a niveles inferiores.                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 4 | Crucero-Lagartos | N 35° E / 54° SE      | 8,00        | Esta expuesta en parte del talud NW de la subestación, esta representada por numerosos planos de falla los cuales forman cuñas inestables; una de estas se derrumbó                                                                                                                                                                                        |
| 5 | Lagartija SE     | N 35° E / 50° SE      | 0,10 a 1,00 | Zona de roca triturada con arcilla con el plano se falla con estrías de movimiento con inclinación desfavorable hacia el camino 7-MD, la mala calidad de la roca provocada, por alteración de la zona de falla, los numerosos diques diabásicos alterados formo junto con la falla una cuña inestable y el intemperismo de la roca provocaron el derrumbe. |

Tabla 26.- Sistemas de discontinuidades en la plataforma de la subestación.

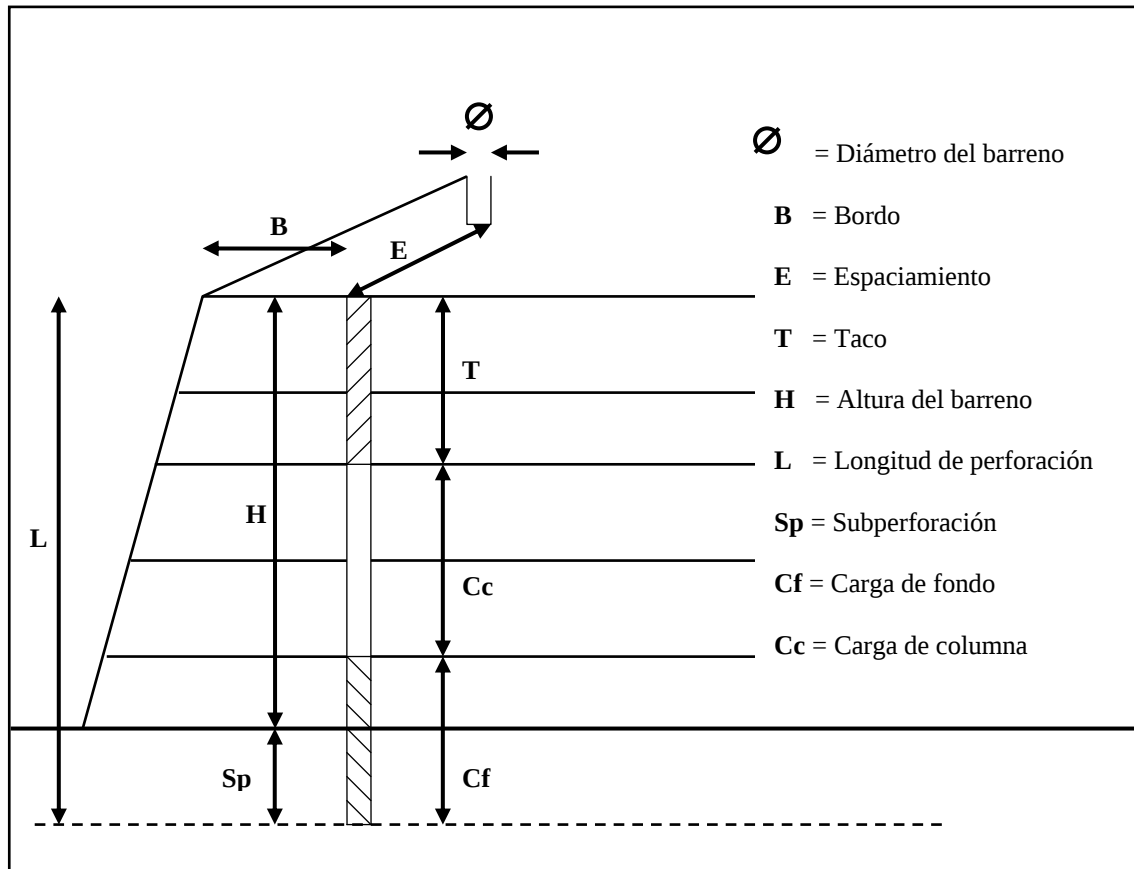
| Lugar                                          | Condiciones Geológicas Descritas en las Bases de Licitación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Condiciones Geológicas de la Excavación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Diferencias                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Túnel de Acceso a Casa de Máquinas             | No menciona algún pronóstico de este túnel, por ser un túnel de acceso.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | La excavación fue en rocas de la TicU3, excepto en los últimos 35 m que fueron en la TicU2, cortó la falla Crucero-Lagartos con una zona de afectación en la roca de 20 m, además se cortaron otras 9 fallas, 13 diques y varios sistemas de fracturas, la mayoría con relleno arcillos; estas condiciones geológicas provocaron problemas de estabilidad en varios tramos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Las condiciones geológicas no eran previsibles por la falta de exploración y por la inaccesibilidad de la zona.                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Túnel de Acceso a Galería de Oscilación        | No menciona algún pronóstico de este túnel, por ser un túnel de acceso.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Las condiciones geológicas del túnel provocaron que el 78% de la excavación fuera en condiciones de riesgo; la roca fue la TicU3 muy alterada, fracturada y con franjas de fracturamiento muy denso (cerca de la falla Crucero-Lagartos), en general, de regular a mala calidad provocando problemas de estabilidad en la bóveda lo que obligó a colocar marcos de acero y a excavar con sección reducida.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Las condiciones geológicas no eran previsibles por la falta de exploración y por la inaccesibilidad de la zona.                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Túnel Auxiliar a la Bóveda de Casa de Máquinas | No menciona algún pronóstico de este túnel, por ser un túnel auxiliar.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Las malas condiciones geológicas en este túnel provocaron que la excavación fuera lenta y accidentada, la roca fue la TicU3, se presentó fracturada, muy alterada y blanda, afectada por franjas de intenso fracturamiento, en general de regular a mala calidad. Un dique-falla paralelo al rumbo del túnel, provocó la formación de cuñas inestables en la bóveda. Se cortaron 20 m de afectación de falla Crucero-Lagartos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Las condiciones geológicas no eran previsibles por la falta de exploración y por la inaccesibilidad de la zona.                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Túnel Auxiliar de Construcción                 | No presentó ningún pronóstico, sin embargo CFE menciona que en el tramo horizontal de las tuberías a presión, vecino a una parte del túnel, cruzarían en forma transversal las fallas F-IV, así como, al menos seis diques diabásicos de menor resistencia que la ignimbrita, que pueden provocar zonas inestables locales.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | La roca excavada fue la TicU2 incluidos los dos aglomerados, en general de buena calidad, está afectada por dos zonas de fallas importantes. El sistema de fallas IV, en donde se intrusionan varios diques geológicos, que al inicio del túnel provocaron problemas de estabilidad y que presentaron permanente goteo de agua y la falla Crucero-Lagartos que no provocó problemas de estabilidad pero si disminución en la calidad de la roca.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Los primeros metros del túnel fueron con inestabilidad en la bóveda, lejos de las tuberías de presión y cerca de estas no hubo problemas de estabilidad. Es importante el aporte de agua de los diques geológicos que no se mencionó.                                                                                                                                                                        |
| Tuberías a Presión                             | CFE pronosticó que la parte superior de los túneles se alojaría en rocas de la unidad TicU3 y entre las elevaciones 213 a la 300 en rocas de la unidad TicU2, y se presentarían zonas muy fracturadas. El tramo inclinado de ambos túneles se vería afectado por la Falla Crucero y se podrían presentar condiciones de inestabilidad. En general la calidad de ambos aglomerados es buena. En el tramo horizontal se cruzarían las fallas F-IV y F-VI y al menos seis diques diabásicos de menor resistencia que la ignimbrita.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | En las dos tuberías a presión quedaron expuestas las unidades ignimbriticas TicU3 y TicU2 en sus fases aglomerática e ignimbritica de buena calidad, excepto donde se cruzan la falla Crucero-Lagartos. Fueron intrusionadas por varios diques diabásicos de regular a mala calidad en el tramo inclinado. La falla Crucero-Lagartos provocó que las condiciones geológicas se presentaran inestables por la disminución en la calidad de la roca en 20 m de afectación en ambas tuberías, manifestada por roca densamente fracturada (de 15 a 25 fracturas por metro).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | La diferencia entre el pronóstico y las condiciones reales fue la presencia de agua en forma de goteo en los diques diabásicos, el resto de las condiciones geológicas fueron similares a las encontradas                                                                                                                                                                                                    |
| Casa de Máquinas                               | CFE pronosticó que la roca sería una Ignimbrita bien soldada, de regular a buena calidad, dura, compacta, y poco fracturada con un RQD de 73 a 100% y en el piso quedaría el aglomerado inferior de buena calidad bien compacta y poco fracturada con un RQD de 92 a 99%. En los primeros metros de la esquina SW de la caverna, se presentaría un dique de composición diabásica de 1,20 m de espesor con un RQD de 0% alterado con arcilla deleznable. Otro dique diafásico pasaría por la pared de aguas debajo de casa de máquinas, el cual tendría un espesor 0,45 m y presentaría excelente calidad, sería compacto, bien soldado y de alta dureza, con un RQD de 100%, de acuerdo al barreno BS-2.                                                                                                                                                                                                                                                                                      | En la playa de montaje, la ignimbrita de la unidad TicU3 se presentó de muy mala calidad, con intenso fracturamiento y alteración formando condiciones inestables en la bóveda por la presencia de la falla Crucero-Lagartos. La unidad TicU2 se presentó dura con mucho menos alteración y con poca densidad de fracturamiento, en general de buena calidad. El aglomerado superior se presentó de buena calidad. En la bóveda de casa de máquinas la única zona inestable se ubicó entre los cadenamientos 0+000,00 y 0+012,00 por la presencia de la falla Crucero-Lagartos. Sin embargo los constantes goteos de agua estaban relacionados con los diques geológicos ubicados en la bóveda y en la pared izquierda de esta caverna. También se cortaron cinco diques diabásicos de forma tabular, dos relacionados con la falla Crucero-Lagartos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | No se consideró la presencia de la falla Crucero-Lagartos, sin embargo ya en la construcción se tomó la decisión de ampliar la casa de máquinas hacia el lugar donde está la falla.<br><br>Otra diferencia fue la presencia de agua en la bóveda, relacionada con los diques y la falla Crucero-Lagartos, que obligó a diseñar un plafón en la bóveda de la casa de máquinas, no considerado en el proyecto. |
| Galería de Oscilación                          | CFE pronosticó que se excavaría en la TicU3 y en la TicU2 incluyendo el aglomerado superior de buena a excelente calidad. Que en la esquina SW de la bóveda existiría la posibilidad de cortar diques y que en la parte media se atravesaría una falla importante, representada por una zona densamente fracturada y en tramos cizallada, con un espesor de 10 m, con arcilla.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Las unidades ignimbriticas TicU3 y TicU2, junto con el horizonte aglomerático, se presentaron de buena calidad, ligeramente alteradas y duras. Tanto en la bóveda como en las paredes de la galería de oscilación fueron identificadas pocas discontinuidades, como fracturas continuas con estrías de movimiento, fracturas con poca frecuencia (1 a cada metro), poca continuidad, cerradas y algunas con relleno de arcilla o clacita.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Las condiciones geológicas encontradas en la excavación fueron acordes con lo pronosticado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Túnel de Aspiración                            | No menciona algún pronóstico de este túnel.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Se excavó en la Ignimbrita de la TicU2, de buena calidad, dura, masiva, compacta, poco fracturada, una fractura a cada metro o a mayor distancia, aunque eran continuas, eran cerradas y algunas tenían relleno generalmente de calcita con espesor de 2 a 5 mm.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | No hay manera de poder establecer una comparación.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Túnel de Desfogue                              | CFE pronosticó que el túnel se excavaría en rocas de la TicU3 y TicU2 de regular a buena calidad y el aglomerad de excelente calidad afectadas por la falla Crucero-Lagartos. No se tendrían estructuras geológicas relevantes, la pseudostratificación presentaba echados hacia aguas abajo, por lo que podría haber pequeñas cuñas en la bóveda. Mencionaba que el cadenamiento 0+156,00 se inferiría la presencia de la falla Crucero-Lagartos, por lo que era importante prever su tratamiento y que la zona de afectación se aproximaría a los 20 m de espesor de roca densamente fracturada y con presencia de arcilla que en ocasiones sería plástica.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | La excavación fue en las ingnimbitas de la TicU3, de la TicU2 y el horizonte aglomerático, en general de buena a excelente calidad, en la zona de afectación de la falla Crucero-Lagartos, se presentó alterada de regular calidad, con numerosos planos con estrías de movimiento y fracturas continuas con relleno de arcilla. La zona de falla Crucero-Lagartos afectó 42 m, entre los cadenamientos 0+106,00 al 0+148,00 intervalo dentro del cual se colocaron marcos como soporte provocando que el bañase de la excavación fuera lento porque se redujo la sección de excavación. Se formaron condiciones inestables, provocando desprendimientos en la bóveda por la formación de cuñas; una de estas se derrumbó, entre los cadenamientos 0+128,00 y 0+132,00, con un volumen aproximado de 250 m³.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Se duplicó la afectación de la falla Crucero-Lagartos, la CFE pronosticó 20 m y la realidad fue de 42 m.<br><br>La CFE no identificó la macro-cuña potencialmente inestable, sin embargo mandó colocar dos inclinómetros, uno de los cuales no cruzó el plano de falla por lo que lamentablemente no proporcionará información sobre la cuña.                                                                |
| Lumbreras                                      | CFE pronosticó en la posición original que en las lumbreras de la TicU3 variaría de muy mala a mala calidad, ocasionalmente se presentaría dura, compacta, masiva y con fracturamiento denso, asociado a la influencia de los diques y fallas. La TicU2 aglomerática sería de regular a excelente, con intervalos con calidad inferior, la TicU2 sería de buena calidad. Las estructuras más relevantes serían los diques, que alterarían las propiedades de las rocas; se formarían cuñas importantes debido a estos en la pared de aguas abajo, por lo que habría de prever su tratamiento. Tendría problemas constructivos por malas condiciones de roca en el tramo que sería cruzado por las zonas de diques, entre las cotas 260 a 334. En la nueva posición, se evitaría en gran parte el cruce de la zona de diques; sin embargo los problemas de estabilidad se podrían presentar al atravesar la falla Crucero-Lagartos dentro de los primeros 40 m de profundidad de las lumbreras. | Las 8 lumbreras fueron excavadas en dos unidades de roca, en la TicU3 y en la TicU2, incluyendo su horizonte aglomerático; se presentaron de regular a buena calidad, excepto en la zonda donde se cruzaron las fallas y/o diques cuya afectación provocó que se formaran franjas de roca de muy mala calidad. Fueron intrusionadas por varios diques diabásicos de regular a mala calidad asociados a fallas. Se cortaron 8 fallas, 4 de estas aparecieron en las lumbreras de ventilación asociadas a diques muy alterados y 4 en las lumbreras de buses y de cables. De estas destaca la falla Crucero-Lagartos que se cortó en las y de las 8 lumbreras; en los tramos que se cortó las condiciones geológicas se presentaron inestables con zonas de roca de muy mala calidad; el material de relleno presentó alteración avanzada, por la influencia de la percolación de agua meteórica y/o por procesos hidrotermales. Esta falla provocó serios problemas de estabilidad en todas las lumbreras y en algunas zonas provocó derrumbes que formaron oquedades de sobre-excavación. La combinación de los sistemas de discontinuidades a lo largo de las lumbreras formó cuñas con salida a la excavación. | La CFE analizó dos posiciones, la actual mención que se iba a evitar el cruce de los diques, sin embargo no fue así y estos provocaron serios problemas de estabilidad en las lumbreras.<br><br>Se cortaron 8 fallas, la CFE menciona solamente una.<br><br>La falla y los diques son vías de flujo de agua que obligaron a incrementar el drenaje.                                                          |
| Subestación                                    | CFE describió que la excavación sería en Ingnimbita de la unidad TicU3, muy fracturada con un RQD menor al 25%. En los taludes NE se preveía la aparición de diques diabásicos alterados y algunos de ellos cruzarían en el piso de la plataforma y podrían provocar inestabilidad al intersectarse con la pseudostratificación.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Se excavó en ignimbrita de la TicU3 intrusionada por 8 diques diabásicos de regular a mala calidad asociadas a fallas; donde se cruzaron las fallas y/o los diques provocó que se formaran franjas de roca de muy mala calidad que provocaron derrumbes; sobresalen dos, una de ellas la falla Crucero-Lagartos se cortó el talud NW de la subestación y en el muro izquierdo del canal de descarga combinado con la zona de falla de la cañada de los diques, provocó un derrumbe. La otra es la falla Lagartija SE, con inclinación desfavorable hacia la excavación del camino 7-MD; provocó un derrumbe de 4384 m³ que afectó los taludes del camino y mutiló la plataforma, antes de que se iniciara la excavación lo que obligó a modificar el arreglo de la subestación.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | No se previó la presencia de las dos fallas sobre todo la falla Lagartija SE la cual estaba oculta y no era posible descubrirla, solo hasta la excavación.<br><br>No se consideró que los diques fueran vías de agua para la casa de máquinas, por lo que fue necesario impermeabilizar esta plataforma.                                                                                                     |

Tabla 27.- Resumen comparativo de las Obras de Generación Subterráneas (Condiciones de Licitación VS Reale



## II. EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO

### II.1. PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN UNA VOLADURA A CIELO ABIERTO.



### II.2. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LAS VOLADURAS A CIELO ABIERTO

#### 1) Tipo de roca

El comportamiento de las ondas provocadas por la detonación de un explosivo en un barreno es diferente para cada tipo de roca.

La propagación de las ondas es más rápida en una roca dura que en una roca blanda.

La composición de la roca también tiene gran influencia en la fragmentación. Por ejemplo: muchas rocas duras se rompen con mayor facilidad que una roca suave.

#### PROPIEDADES DE LAS ROCAS Y SU INFLUENCIA EN LOS RESULTADOS DE LAS VOLADURAS.

Los materiales que constituyen los macizos rocosos poseen ciertas características físicas que son función de su origen y de los procesos geológicos posteriores que sobre ellos han actuado.

## PROPIEDADES DE LA ROCA

### Densidad

Las densidades y resistencias de las rocas presentan normalmente una buena correlación.

En general, las rocas de baja densidad se deforman y rompen con facilidad, requiriendo un factor de energía relativamente bajo, mientras que las rocas densas precisan una mayor cantidad de energía para lograr una fragmentación satisfactoria, así como buen desplazamiento y abundamiento.

### Porosidad

Existen dos tipos de porosidad

- 1) La intergranular o de formación y
- 2) De disolución o post-formación

La primera, cuya distribución en el macizo puedes considerarse uniforme provoca dos efectos:

- a) Disminución en la energía de la onda de choque.
- b) Reducción de la resistencia dinámica a la compresión y consecuentemente, incremento de la trituración y porcentaje de finos.

El trabajo de fragmentación de rocas muy prosas se realiza casi en su totalidad, por la energía de burbuja, por lo que deberán observarse las siguientes recomendaciones:

- Utilizar explosivo tipo Anfo.
- Implementar es desacoplamiento de cargas en caso de Alto Explosivo.
- Retener los gase de voladuras a alta presión con una longitud y un taco adecuado.
- En barrenaciones de banco, es conveniente tener una buena simetría y paralelismo a lo largo del barreno en cara libre.

La porosidad de post-formación es la causada por los huecos y cavidades que resultan de la disolución del material rocoso por las aguas subterráneas.

Los espacios vacíos son mucho mayores y su distribución es menos uniforme que la de la porosidad intergranular.

Las cavidades intersectadas por los barrenos no solo dificultan la perforación con la pérdida de penetración y atoramiento de la barra y broca, sino incluso la eficiencia de la voladura, especialmente cuando se utilizan explosivos a granel o bombeables (emulsión-Anfo). (Figura 1).

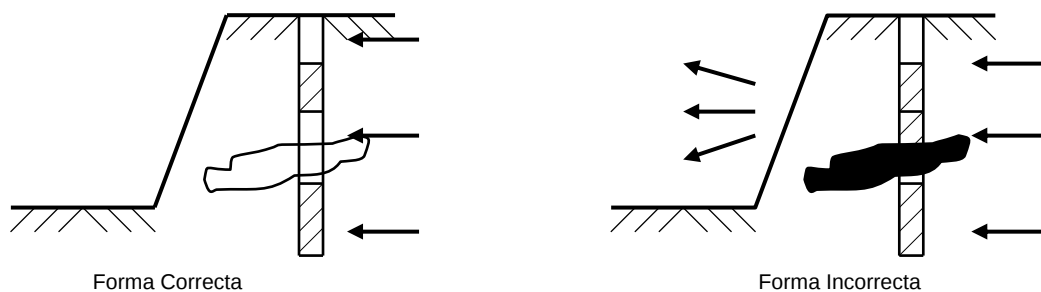


Figura 1.

Si los barrenos no intersectan a las cavidades (choyas) el rendimiento de la voladura también disminuye por:

- La prematura terminación de las grietas radiales al ser interrumpidas en su propagación por los huecos existentes.
- La rápida caída de presión de los gases al intercomunicarse el barreno con las cavidades y por ello el franado de la apertura de grietas radiales al escapar los gases hacia los espacios vacíos.

## 2) Tipo de explosivo

Es importante conocerlos tipos de explosivos disponibles y las características de éstos antes de utilizarlos (por ejemplo: densidad, velocidad de detonación, resistencia al agua, energía disponible, etc.) como se mencionó anteriormente.

## 3) Factores de carga

Se define como una cantidad de explosivo utilizado por cada  $m^3$  o por cada tonelada de roca y se expresa en  $g/m^3$  ó  $g/ton$ .

El factor de carga que se utilice varía, dependiendo del tipo de roca, grado de intemperismo, geología del yacimiento o del tamaño del equipo de carga y acarreo. (Tabla 1)

| Rocas Ígneas              |                               |
|---------------------------|-------------------------------|
| Roca                      | Factor de carga ( $kgs/m^3$ ) |
| Riolita y dacita          | 0.530 a 0.715                 |
| Granodiorita              | 0.590 a 0.800                 |
| Andesita                  | 0.530 a 0.715                 |
| Diorita                   | 0.530 a 0.770                 |
| Basalto                   | 0.590 a 0.770                 |
| Gabro, dolerita o diabasa | 0.530 a 0.715                 |
| Rocas Metamórficas        |                               |
| Roca no foliada           | Factor de carga ( $kgs/m^3$ ) |
| Mármol                    | 0.475 a 0.770                 |
| Hornfels                  | 0.475 a 0.715                 |
| Taconita                  | 0.475 a 0.770                 |
| Gneiss                    | 0.475 a 0.715                 |
| Roca Foliada              |                               |
| Pizarra                   | 0.290 a 0.475                 |
| Esquisto de clorita       | 0.350 a 0.600                 |
| Micaesquisto              | 0.350 a 0.600                 |
| Rocas Sedimentarias       |                               |
| Roca                      | Factor de carga ( $kgs/m^3$ ) |
| Conglomerado              | 0.350 a 0.660                 |
| Brecha                    | 0.350 a 0.600                 |
| Arenisca                  | 0.475 a 0.770                 |
| Caliza                    | 0.230 a 0.475                 |
| Dolomita                  | 0.290 a 0.475                 |

Tabla 1. Factores de carga

#### 4) Factor de energía

Depende del tipo de explosivo que se esté utilizando. Este factor se mide en unidades de energía por volumen ( $\text{UE}/\text{m}^3$ ) o unidades de energía por tonelada ( $\text{UE}/\text{ton}$ ).

En algunas aplicaciones puedes ser necesario considerar la distribución de energía en el barreno, cuando las condiciones geológicas del terreno lo requieran.

#### 5) Geología estructural

Las estructuras geológicas, tales como fisuras, oquedades, fallas, potencia y posición de los estratos, etc. Juegan un papel muy importante en los resultados de las voladuras.

En rocas fisuradas, las voladuras deben planearse tomando en cuenta la magnitud de las fisuras, los patrones de barrenación no deben ser muy amplios y se debe utilizar explosivo tipo Anfo.

En rocas estratificadas las voladuras deben ser planeadas tomando en cuenta la dirección de la estratificación.

Cuando la estratificación tiende a la horizontal, es conveniente que la inclinación de los barrenos permita atravesar los planos de contacto en los estratos para optimizar el funcionamiento de los explosivos.

Si la estratificación tiene a la vertical, es conveniente disponer las voladuras de tal forma que el barreno rompa un ángulo recto con los planos de estratificación.

#### 6) Simetría de la barrenación

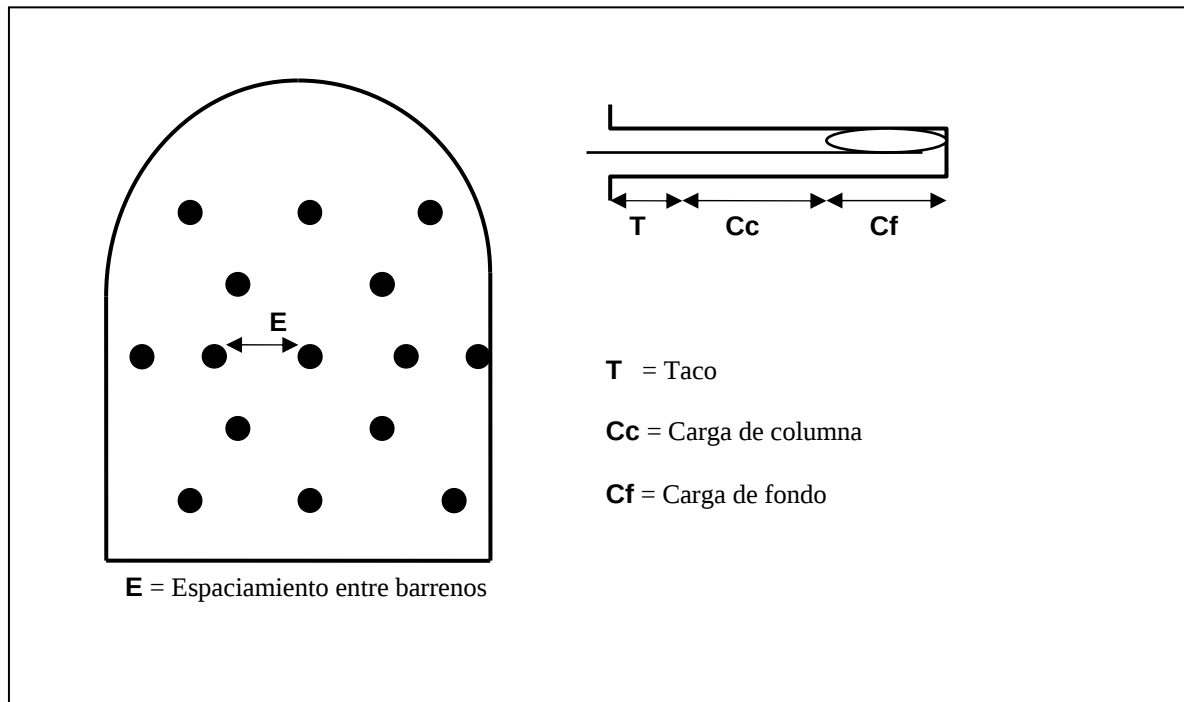
El paralelismo de barrenos, así como la simetría del patrón de barrenación, son factores que intervienen en la homogeneidad de la fragmentación de una voladura.

Cuando no se tienen en cuenta estos factores, los resultados que se esperan no podrán ser homogéneos, pudiendo presentar en algunos lugares excelentes resultados y en otros muy malos, debido a las diferentes concentraciones de carga explosiva provocados por la desviación de los barrenos.

### III. EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS

Los túneles son operaciones altamente especializadas dentro de la industria de la construcción. Requieren de supervisores con amplia experiencia y trabajadores bien entrenados. La roca removida de la excavación de un túnel, es generalmente material de desperdicio. Por lo tanto el énfasis está en el avance de la cara con la mayor velocidad posible, compatible con la seguridad y eficiencia.

#### III.1. PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN UNA VOLADURA SUBTERRÁNEA



#### III.2. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LAS VOLADURAS SUBTERRÁNEAS

Al igual que para las voladuras a cielo abierto los factores para las voladuras subterráneas se mantienen igual:

1. Tipo de roca
2. Tipo de explosivo
3. Factor de carga
4. Factor de energía
5. Geología estructural
6. Simetría de barrenación

Estos factores se comportan del mismo modo para los casos a cielo abierto como para los casos en que se realiza voladura subterránea.

### **III.3. MÉTODO DE FRENTE SUPERIOR Y BANQUEO**

Este método consiste en perforar una rente en la parte superior del túnel que toma una porción de la altura terminada y la anchura completa. La porción inferior se ataca en uno o más barrenos verticales, generalmente se disparan filas múltiples en secuencia con retardos en milisegundos. O se utiliza el “Sequential Timer” en forma similar.

La frente superior se puede desarrollar con una barrenación usando cualquiera de las cuñas estándar. Normalmente, la frente se completa e inclusive puede ser recubierta antes de remover el fondo.

#### IV. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

La excavación de los túneles de las obras de generación se llevó a cabo por varios frentes simultáneos, empezando primero con dos en las cotas inferior y superior.

Los trabajos a cielo abierto se hicieron en paralelo y conforme se fueron terminando se dio paso a la excavación de los túneles.

Cada túnel se fue excavando en sección completa con longitudes de avance que variaron de 1.00 a 3.20 metros, de acuerdo a las condiciones de la roca. Conforme se fue excavando se hicieron los tratamientos a la roca (barrenación, colocación e inyección de anclas, colocación de concreto lanzado, colocación de marcos metálicos, drenes, etc.).

Para la excavación de los túneles se utilizó un Jumbo de barrenación de tres brazos, cargador frontal y camiones con caja roquera de 7 a 14 m<sup>3</sup>. Es importante mencionar que todo el personal que laboró en la elaboración de las excavaciones era altamente calificado.

Ciclo de trabajo:

Topografía.- Actividad que se encarga de trazar en el frente de excavación los niveles y contorno de la excavación en todas las obras.

Barrenación.- Se barrena de acuerdo a una plantilla de barrenación y voladura autorizada.

Carga.- Se limpian los barrenos por medio de aire comprimido y posteriormente se colocan los explosivos con sus correspondientes noneles, en cada barreno de acuerdo a la plantilla de barrenación y voladura, utilizando una grúa con canastilla.

El cálculo de explosivos y artificios se registran en la "plantilla de barrenación y voladura", que se entrega al cliente para su autorización.

Antes de iniciar la carga de explosivos se notifica al personal de seguridad para que proteja el área y vigile que únicamente se encuentre en el frente el personal necesario para la operación.

Conexión y voladura.- Se retira el equipo y personal del frente, procediendo al amarre de los noneles y la conexión del iniciador.

Verificada la conexión, se prende la mecha de seguridad y se efectúa la voladura.

El personal de seguridad será el encargado de dar la orden de voladura, una vez verificado que no exista ningún equipo y personal en la zona de influencia de la voladura.

Ventilación.- Se da el tiempo necesario para la evacuación de los gases y polvo producto de la voladura, para ello se utilizan ventiladores industriales de 1.20 m de diámetro.

Amacize.- Después de la ventilación, se revisa que no haya quedado ningún barreno sin detonar, se rocía de agua el frente, el tramo excavado y la rezaga y se procede a retirar el material suelto o inestable (amacize) de la clave y paredes del túnel, utilizando equipo manual o mecánico.

Rezaga.- Posteriormente se procede al retiro del material producto de la voladura, utilizando un cargador frontal sobre neumáticos y camiones con caja roquera. El material se lleva a los bancos de desperdicio o de acopio designados por el cliente.

Geología.- Durante el proceso de rezaga, se realiza un levantamiento geológico (mapeo) para conocer las condiciones del macizo rocoso y determinar el siguiente ciclo de excavación, de común acuerdo con el cliente.

Tratamientos de la roca.- Estos consisten en la colocación de marcos metálicos, concreto lanzado, anclaje, etc., definidos durante el levantamiento geológico.

Lineamientos de seguridad y medio ambiente.

El personal de estas actividades, debe utilizar el equipo de protección personal determinado en el análisis de riesgo de la actividad.

Se cuida que el agua utilizada durante la excavación así como el agua de infiltración, sea debidamente canalizada a las fosas de decantación, para evitar el aceite que pueda contener, se vierta directamente al río.

Se cuida que la ventilación sea la adecuada para que el personal trabaje en un ambiente limpio y agradable.

Previo a la voladura (de preferencia con un día de anticipación para no obstruir o retrasar el calendario de ejecución) se debe hacer un recorrido en el área para verificar que no exista algún nido, madriguera o algún individuo que pueda resultar afectado por la ejecución de las actividades.

En caso de encontrarse con alguno de los casos previamente señalados o similares se debe dar aviso inmediatamente al personal de Medio Ambiente y en la medida de lo posible se deberá mover al individuo o en caso contrario esperar la llegada del personal capacitado para tal maniobra.

El sobrestante deberá hacer énfasis en que esta prohibido cazar o comercializar con cualquier especie animal o vegetal.

## **V. EJECUCIÓN DE OBRA**

|                        |                                                                                                                |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Enero 2004</b>      | Se inician los trabajos de excavación con los túneles de acceso a casa de máquinas y la galería de oscilación. |
| <b>Marzo 2004</b>      | Se abren los frentes del canal de llamada de la obra de toma y las conducciones a presión.                     |
| <b>Abril 2004</b>      | Se inician los trabajos en el frente de desfogue.                                                              |
| <b>Mayo 2004</b>       | Se inician los trabajos en lo que será el recinto de la casa de máquinas.                                      |
| <b>Septiembre 2004</b> | Se inician los trabajos en la galería de oscilación.                                                           |
| <b>Noviembre 2004</b>  | La excavación en lo que será el túnel de aspiración comienza.                                                  |
| <b>Abril 2005</b>      | El frente de la estructura de control inicia sus operaciones.                                                  |
| <b>Julio 2005</b>      | Las excavaciones de las obras de generación llegan a su fin.                                                   |

## VI. CONCLUSIONES

Las condiciones geológicas registradas en el PH El Cajón difirieron en algunos puntos de lo establecido en las bases de licitación, generándose por tanto una desviación respecto a las previsiones originales de proyecto. Ello originó que en algunos casos se emplearan métodos constructivos distintos a los proyectados, trabajos adicionales y solución de problemas emergentes en la etapa de construcción.

Tanto para los túneles de acceso, como los auxiliares y los de aspiración, en las bases de licitación CFE no mencionaba algún pronóstico geológico, posiblemente porque el lugar era inaccesible y no había exploración, por lo que no es posible hacer un comparativo de estas excavaciones, sin embargo en los túneles de acceso y el auxiliar a la bóveda de casa de máquinas hubo serios problemas de estabilidad.

Para las tuberías de presión, la casa de máquinas y galería de oscilación, en general las condiciones geológicas encontradas fueron similares a lo pronosticado en las bases de licitación, sin embargo en la casa de máquinas no fue prevista la falla Crucero-Lagartos.

En el túnel de desfogue se duplicaron las condiciones geológicas desfavorables a lo pronosticado, como la zona afectada por la falla Crucero-Lagartos y no se tenía identificada la macro-cuña potencialmente inestable en el portal de salida.

En las lumbreras de ventilación se cortaron 7 fallas más de las previstas asociadas con los diques, las cuales son vías de agua hacia la casa de máquinas, y en las bases de licitación se menciona que la casa de máquinas en la posición origina no se cortarían los diques.

En la subestación no se consideró la existencia de la Falla Crucero-Lagarto ni se sabía de la existencia de la falla Lagartija SE por estar oculta, ésta provocó el derrumbe que mutiló la plataforma de la subestación. Tampoco se consideró que los diques eran vías de agua para la casa de máquinas por lo que dicha plataforma tuvo que ser impermeabilizada.

El tiempo total que tomó para la excavación de las obras fue de año y medio, cabe mencionar que para la casa de máquinas, el tiempo empleado fue sólo de nueve meses, esto a pesar de que el proyecto original tuvo que ser modificado debido a la falla geológica que afectaba su integridad.

La correcta valoración de las condiciones geológicas es crucial en cualquier proyecto, máxime cuando se trata de proyectos de esta magnitud. Ello requiere no únicamente una campaña de exploraciones adecuada, sino también una adecuada interpretación geofísica que otorgue una línea base confiable sobre la cual diseñar y cotizar.

Las desviaciones respecto a las condiciones proyectadas requiere de soluciones de ingeniería que hagan posible la ejecución del proyecto, pero también de una valoración de riesgos y contingencias contractuales adecuadas. Para una constructora asumir el riesgo geológico es muy delicado, y en general cualquier proyecto debe considerar una repartición de responsabilidades (técnicas y contractuales) eficiente, es decir, que absorba el riesgo quien en mejores condiciones está de manejarlo (cliente o constructor). Una decisión errónea al respecto puede conducir al fracaso de un proyecto, mientras que un manejo adecuado hace posibles las grandes obras de ingeniería que el país requiere.

## BIBLIOGRAFÍA

### Informes

|                   |                                                                                                       |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CD-H038-IF-001-00 | Informe Geológico de las Vialidades Subterráneas - Acceso a casa de Máquinas y Galería de Oscilación. |
| CD-H038-IF-003-00 | Vialidades Subterráneas - Informe Geológico - Túnel Auxiliar de construcción.                         |
| CD-H033-IF-002-00 | Informe Geológico de las Tuberías a Presión (Conducción A Presión).                                   |
| CD-H034-IF-001-00 | Informe Geológico de la Bóveda de Casa de Máquinas.                                                   |
| CD-H034-IF-013-00 | Informe Geológico de las Paredes de Casa de Máquinas.                                                 |
| CD-H036-IF-001-01 | Informe Geológico de la Bóveda de Galería de Oscilación.                                              |
| CD-H036-IF-004-00 | Informe Geológico de las Paredes de la Galería de Oscilación.                                         |
| CD-H035-IF-011-00 | Informe Geológico de los Túneles de Aspiración.                                                       |
| CD-H034-IF-015-00 | Informe Geológico de las Lumbreras de ventilación, de Buses y Cables.                                 |
| CD-A051-IF-003-00 | Informe Geológico de la Subestación.                                                                  |
| CD-H037-IF-002-00 | Informe Geológico del Túnel de Desfogue.                                                              |

### Planos

|                   |                                                                                 |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| CD-H038-PL-040-00 | Vialidades Subterráneas – Geología de detalle del Túnel de Acceso a C.M. y G.O. |
| CD-H038-PL-041-00 | Vialidades Subterráneas – Geología de detalle del Túnel de Acceso a C.M. y G.O. |
| CD-H038-PL-042-00 | Secciones geológicas del Túnel de Acceso a C.M. y Túnel de Acceso a G.O.        |
| CD-H038-PL-043-00 | Vialidades Subterráneas - Planta geológica - Túnel Auxiliar de construcción.    |
| CD-H038-PL-044-00 | Vialidades Subterráneas - Secciones geológicas -Túnel auxiliar de construcción. |
| CD-H033-PL-131-00 | Conducción a Presión - Planta Geológica de detalle.                             |
| CD-H033-PL-133-00 | Conducción a Presión - Sección Geológica por el Eje de la Tubería a Presión 1.  |
| CD-H033-PL-134-00 | Conducción a Presión - Sección Geológica por el Eje de la Tubería a Presión 2.  |
| CD-H034-PL-771-00 | Planta Geológica - Bóveda de Casa de Máquinas.                                  |
| CD-H034-PL-772-00 | Sección Geológica - Bóveda de Casa de Máquinas.                                 |
| CD-H034-PL-772-00 | Geología de detalle - Pared de Aguas Arriba de Casa de Máquinas.                |
| CD-H034-PL-773-00 | Geología de detalle - Pared de Aguas Abajo de Casa de Máquinas.                 |
| CD-H036-PL-625-00 | Geología de detalle - Bóveda de la Galería de Oscilación.                       |
| CD-H036-PL-626-00 | Secciones Geológicas de la Galería de Oscilación.                               |
| CD-H036-PL-632-00 | Geología de detalle - Pared aguas arriba – Galería de Oscilación.               |
| CD-H036-PL-623-00 | Geología de detalle - Pared aguas abajo – Galería de Oscilación.                |
| CD-H035-PL-070-00 | Casa de Máquinas - Planta Geológica de Detalle de los Túneles de Aspiración.    |
| CD-H035-PL-071-00 | Casa de Máquinas - Sección Geológica de Detalle de los Túneles de Aspiración.   |
| CD-H034-PL-901-00 | Planta y Secciones Geológicas de las Lumbreras de Ventilación.                  |
| CD-H034-PL-902-00 | Secciones Geológicas de las Lumbreras de Buses y Cables.                        |
| CD-A051-PL-015-00 | Subestación - Geología de detalle Planta.                                       |
| CD-A051-PL-016-00 | Obras asociadas -Subestación - Geología de detalle secciones.                   |
| CD-H037-PL-304-00 | Túnel de Desfogue - Geológica de detalle Planta                                 |
| CD-H037-PL-307-00 | Túnel de Desfogue - Geológica de detalle Sección                                |