



## **II. DISEÑO DE EXCAVACION Y SECUENCIA CONSTRUCTIVA**

Para el desarrollo del diseño geotécnico de construcción definitivo de los túneles de Huauchinango, se ejecutaron las siguientes actividades y procedimientos:

- Recopilación y análisis de información existente del proyecto ya mencionado. Se revisó la siguiente información:
  - Registros de perforación de sondeos S-1 y S-2 presentados en las Bases por la SCT.
  - Perfiles geofísicos y geoelectrónicos (campañas 2002 (SCT) y 2006 (ICA-FCC)).
  - Informes geológico-COPEI S.A. de C.V.
  - Perfiles geofísicos-EPC 2007.
  - Información geológica y geotécnica de diseños anteriores de la SCT y que forman parte de las Bases para licitación.
  
- Visitas y reconocimientos de campo a las zonas de portales, vía existente y sector donde quedará ubicado el trazo de los túneles.
- Información topográfica y cartográfica preparada para el diseño ejecutivo, elaborada por ICAFCC.
- Revisión de resultados de investigaciones geotécnicas adicionales relacionadas con tres perforaciones ubicadas cerca del alineamiento de los túneles denominadas SM-01 (PT-01), SM-02 (PT-02) y SM-03 (PT-03). Ejecución de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos y rocas relacionados con: propiedades índices (límites de Atterberg), granulometrías, ensayos de compresión simple, tensión indirecta (método brasileño), compresión confinada, ensayos de resistencia triaxial entre otros. Análisis detallado de aspectos litológicos como de aspectos geomorfológicos.
- Análisis de la información geológica y geotécnica existente y adicional complementada con fotointerpretación y reconocimientos de campo para clasificación y sectorización geotécnica. Análisis de mecanismos de falla de los túneles gemelos durante el proceso de excavación. Se analizaron mecanismos de falla generados por cargas de desprendimiento (fallas en materiales de suelo o roca), efecto de empujes por redistribución de esfuerzos de magnitud mayor a la resistencia del macizo.
- Revisión y definición de tipos de terreno y de soporte, con una definición de longitud esperada para cada túnel, teniendo en cuenta los aspectos geológicos (perfil estratigráfico) y de comportamiento del túnel, apoyados en la sectorización y la clasificación geotécnica.



- Diseños geométricos relacionados con: localización y trazado de los túneles, secciones geométricas y tamaño, cumpliendo con los estándares definidos por la SCT (gálibos mínimos verticales y horizontales, espacios para ventilación, andenes, etc). Los diseños geotécnicos siguen en un todo los criterios de diseño establecidos para el proyecto ejecutivo de túneles viales.
- Preparación de planos de localización y trazado, secciones de excavación y soporte, secciones de revestimiento, estructura del pavimento y de túneles, sistemas de enfilaje, sistemas de impermeabilización y sistemas de drenaje, sistemas de emboquille y detalles de soporte con marcos de acero, planos de excavación de portales, sistemas de protección y medidas de estabilización y drenaje.
- Análisis y diseño del revestimiento de los túneles, así como de los sistemas de drenaje e impermeabilización. Diseño de la instrumentación geotécnica durante excavación, tanto internamente dentro de los túneles como en la zona de portales.
- Preparación de la memoria de diseños. Cálculo de cantidades de obra y preparación de especificaciones técnicas incluidas en los planos.

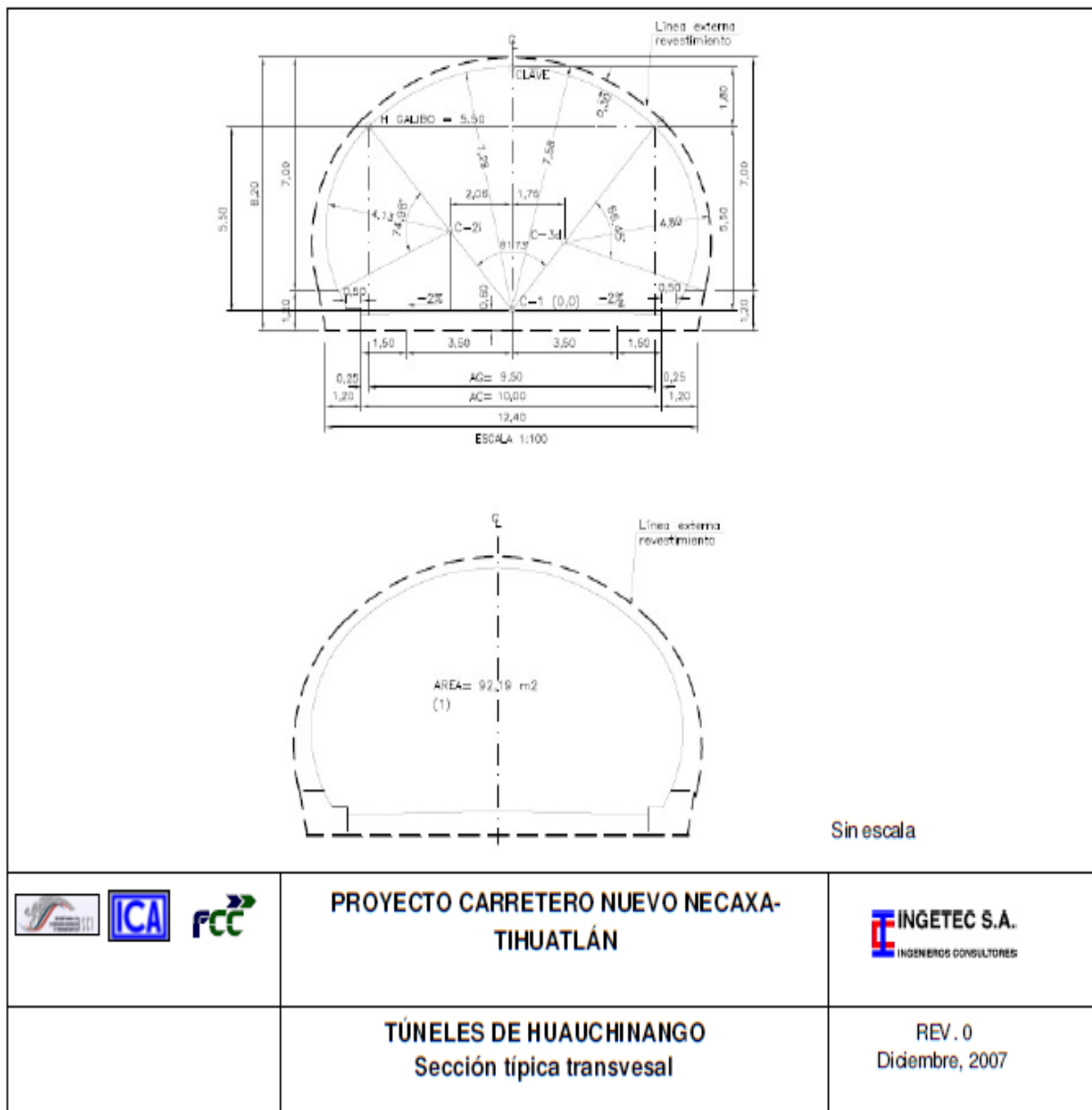


## 2.1. ASPECTOS GEOMÉTRICOS DE DISEÑO DEL TÚNEL

Se presenta un resumen de las características geométricas básicas generales adoptadas en el diseño ejecutivo de construcción de los túneles de Huauchinango:

- Tipo de túnel: Flujo de tráfico unidireccional (dos túneles)
- Velocidad de diseño: 90 kph
- Longitudes: 105,45 m (túnel derecho) y 89,00 m (túnel izquierdo)
- Pendiente general: 0,73% (túnel derecho) y 0,96% (túnel izquierdo)
- Cota de entrada (rasante): 1217,45 (túnel derecho) y 1218,18 (túnel izquierdo)
- Cota de salida (rasante): 1216,68 (túnel derecho) y 1217,32 (túnel izquierdo)
- Peralte o bombeo: Túnel derecho (2,0% uniforme a ambos costados de la calzada) y túnel izquierdo (6,21% hacia el costado derecho)
- Ancho de calzada: 10,0 m
  
- Gálibo vertical mínimo: 5,50 m
- Sección transversal: Semicircular con doble radio con paredes curvas cortas.
- Radios de excavación (m): 7,73 m y 5,04 m respectivamente
- Altura de pared (m): 2,63 m
- Altura total del túnel (m): 8,35 m
- Ancho total de excavación (m): 13,60 m
- Área de excavación en (m<sup>2</sup>): 99,45 m<sup>2</sup> cada uno.

En la imagen 6, se presentan detalles de la sección transversal considerada para diseño.



**Imagen 6. Plano de la sección transversal considerada para diseño**





## ***2.2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS***

A continuación se muestra la información geológica desarrollada por ICA-FCC a través de COPEI S.A. de C.V. Esta información comprende la geología regional y tectónica, fisiografía, geomorfología, estudio de fotointerpretación y geología estructural entre otros.

### ***RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN***

La información geológica recopilada es la disponible de la zona del trazo y área de estudio, incluyendo los estudios realizados por la SCT, de geología, geofísica y sondeos de exploración directa, los estudios geológicos realizados por ICA-FCC durante la etapa de elaboración del concurso, información de publicaciones oficiales (INEGI, Servicio Geológico Mexicano y PEMEX), así como artículos publicados por instituciones de investigación en México.

Esta información fue ordenada, depurada y analizada con la finalidad de obtener, junto con el trabajo de fotointerpretación, un modelo geológico razonable de la zona de estudio.

### ***FOTOINTERPRETACIÓN GEOLÓGICA***

El análisis fotogeológico fue realizado a lo largo de la zona de estudio, empleando fotografías aéreas proporcionadas por la SCT en escala 1:11 000 y 1:30 000. Posteriormente, el estudio fue verificado con fotografías a escala 1:5000, las cuales fueron analizadas para complementar el estudio geológico.

La finalidad del estudio de fotointerpretación fue definir con mayor precisión los contactos entre las diferentes formaciones geológicas, los rasgos estructurales principales: fallas, fracturas, pliegues, etc., así como las zonas con evidencia de antiguos deslizamientos, reptación y zonas potencialmente inestables.

Con la información recopilada y analizada, así como la deducida de esta fotointerpretación geológica, se elaboró un plano fotogeológico a escala 1:25 000, y una memoria geológica, en donde se describieron brevemente las condiciones geológicas de la zona.



## 2.2.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

### GEOLOGÍA GENERAL DEL TRAMO

#### *Aspectos generales*

Este texto complementa al Mapa Geológico Regional a escala 1:25 000, el cual fue elaborado con base en un estudio fotogeológico inicial y precedido de una visita de verificación para normar los criterios fotogeológicos.

Durante los trabajos de fotointerpretación de las fotografías a escala 1:30 000 se definieron las unidades litológicas principalmente con base en criterios fotogeológicos, tales como el tono, textura, erosión, drenaje y morfología, mientras que de las fotografías a escala 1:5000 se definieron con mayor precisión los detalles morfológicos de cada unidad litológica y algunas características estructurales locales.

#### *Estratigrafía*

A continuación se presenta una descripción más detallada de las formaciones geológicas que se encontrarán a lo largo de este primer tramo estudiado. El objetivo es que el lector se familiarice con el origen y las características de cada una de las unidades litológicas, ya que sus propiedades y comportamiento geotécnico están íntimamente asociados a ellas.

En la tabla 2. Se presenta la columna estratigráfica que será atravesada en el primer tramo estudiado del km 839+600 al km 854+000.

**Tabla 2. Columna estratigráfica**

Edad	Formación	Símbolo	TIPO DE ROCA
Reciente Q	Suelo residual	Sr	Capas de suelo arcilloso, saprolito y roca muy intemperizada de rocas volcánicas y sedimentarias
	Depósitos de aluvión	Qal	Gravas y arenas de origen fluvial
	Depósitos de terraza	Qte	Gravas, arenas y limos de origen fluvial y coluvial
	Depósitos de talud	Qta	Suelos de composición y granulometría variable localizados al pie de laderas



Cuaternario Q	Depósitos volcánicos	Qb	Brechas, tobas y derrames volcánicos de composición basáltica pseudoestratificados
Terciario Paleoceno P	Chicontepec	Pchi	Areniscas calcáreas de grano fino a medio en estratos de 3,0 cm a 80 cm y lutitas laminadas color gris verdoso en estratos de 2,0 cm a 5,0 cm.
Cretácico Superior Ks	Méndez	Ksm	Margas y calizas arcillosas grises con estratos de 20 cm a 30 cm.
	San Felipe	Kssf	Calizas arcillosas gris a verde oscuro, laminadas, estratos de 25 cm a 30 cm con intercalaciones de lutitas bentónicas delgadas, contiene nódulos de hematina.
	Agua Nueva	Ksan	Calizas gris claro en estratos de 15 cm a 50 cm y calizas arcillosas en estratos de 15 cm a 25 cm, con bandas de pedernal negro de 3,0 cm a 5,0 cm, ocasionalmente presenta intercalaciones de lutita color negro.
Cretácico Inferior Ki	Tamaulipas Superior	Kits	Calizas gris claro y crema en estratos de 30 cm a 50 cm, con nódulos y bandas de pedernal negro, ocasionalmente presenta calizas arcillosas laminadas y lutitas en capas de 5,0 cm a 10 cm de espesor.
	Tamaulipas Inferior	Kiti	Calizas gris claro densas de grano fino en estratos ondulados de 20 cm a 70 cm, con nódulos de pedernal blanco.
	Pimienta	Jspg	Calizas gris oscuro y negro en estratos medianos de 14 cm a 60 cm, con interestratificación de lutitas carbonosas muy delgadas.
Jurásico Superior Js		Jspd	Calizas arcillosas en estratos delgados de 10 cm a 12 cm, con interestratificación de lutitas carbonosas delgadas.
	Tamán	Jst	Lutitas calcáreas color negro y calizas arcillosas color gris oscuro, estratificación delgada menor a 10 cm y ocasionalmente estratos lenticulares. Con pirita diseminada.
	Santiago	Jss	Calizas arcillosas gris oscuro en estratos ondulados y laminados de 2,0 cm a 60 cm con lutitas calcáreas y carbonosas color negro de 2,0 cm a 15 cm de espesor. Presenta nódulos y concreciones calcáreas de 15 cm a 30 cm de diámetro.





## ***DEPÓSITOS DEL RECIENTE***

Se reconocieron cuatro tipos de depósitos recientes en el área con base en su emplazamiento y en su morfología; se trata de depósitos de suelo residual, de talud, de terraza fluvial y aluvión. Cuya edad se considera del Cuaternario Reciente por su posición estratigráfica y su reciente proceso de formación.

### *Suelo residual (Sr)*

*Litología y espesor.* Son suelos derivados del intemperismo de rocas volcánicas y sedimentarias arcillosas. Están constituidos principalmente por capas de limos y arcillas que cerca de la superficie están saturados. En las rocas volcánicas generalmente se presentan como saprolito (conserva la estructura original de la roca). Conforme aumenta la profundidad gradualmente pasan a la composición de la roca madre, presentándose más compactos y con menor grado de saturación.

*Distribución.* Se presentan cubriendo la mayor parte del área donde afloran las rocas volcánicas (Qb) y las sedimentarias de composición arcillosa (Jspd y Ks).

### *Depósitos de Aluvión (Qal)*

*Litología y espesor.* Consisten en acumulaciones de materiales granulares sin consolidar, incluyen bloques, gravas y arenas de caliza, pedernal, rocas ígneas y algunos de areniscas, estos líticos se presentan subredondeados y formas que varían de equidimensionales a tabulares. Los clásticos proceden de las distintas unidades expuestas en la región.

*Distribución.* Se presentan a lo largo de los cauces de los ríos, en forma de cintas fluviales sobre todo en los valles de los ríos San Marcos y, sobre todo a partir de la terminación de los afloramientos de las unidades cretácicas, en donde se amplían los valles fluviales labrados en la unidad del Paleoceno.

Los depósitos aluviales cubren en forma discordante a las diferentes unidades estratigráficas expuestas en el área.

### *Depósitos de Terraza (Qte)*

*Litología y espesor.* Consisten en acumulaciones de materiales granulares sin consolidar, incluyen bloques, gravas y arenas de caliza, pedernal, rocas ígneas y algunos de areniscas, estos líticos se presentan subredondeados y formas que varían de equidimensionales a tabulares. Los clásticos proceden de las distintas unidades litoestratigráficas expuestas en la región.

*Distribución.* Las terrazas fluviales se observan en los valles de los ríos San Marcos y Totolapa.



### *Depósitos de talud (Qta)*

*Litología.* La composición de los depósitos de talud es muy diversa y está influenciada por el tipo de roca que aflora en las laderas al pie de las cuales está depositado, está formado por acumulaciones de materiales granulares sin consolidar, de formas angulares a subredondeados.

*Distribución.* Se reconocieron varios depósitos de talud susceptibles de dibujarse en el mapa geológico como los que se localizan entre los km 850 y 852 al pie de laderas formadas por rocas calcáreas.

## **CUATERNARIO**

### *Rocas volcánicas del Cuaternario (Qb)*

*Litología y espesor.* Consiste en derrames extensos de basaltos con intercalaciones de tobas y brechas volcánicas basálticas (denominadas *mesas*), que en general presentan una estructura pseudoestratificada más o menos dispuestas en capas horizontales (dependiendo de la inclinación de la superficie sobre la que se depositaron), son de color gris oscuro y negro en superficies frescas y color verdoso, amarillo y rojizo en condición alterada.

Debido al clima que prevalece en la región, frecuentemente la parte superior del terreno donde afloran estos depósitos piroclásticos y los derrames de basalto, se observan muy meteorizados, dejando estructuras de forma esferoidal en los basaltos y suelos residuales (Sr), con estructuras heredadas en las brechas y tobas.

En algunas *mesas*, la unidad presenta espesores de cientos de metros, sin embargo esta característica es muy variable porque son depósitos que fueron acumulados sobre superficies erosionadas y muy irregulares, algunas veces rellenando cañadas y cauces de ríos (cauces sepultados).

Las brechas y tobas son materiales de más fácil intemperismo que los basaltos, por lo que con frecuencia se encuentran capas de arcilla color amarillo o café claro bajo los derrames, capas que funcionan como delantales impermeables y delimitan niveles de agua colgados.

*Distribución.* La unidad forma las mesas sobre las cuales están edificados los poblados de Huauchinango y Xicotepec, otras mesas formadas por la unidad se encuentran al norte y al sur de Ávila Camacho; además se observan otros afloramientos aislados.

*Relaciones estratigráficas.* Las rocas volcánicas se encuentran sobreyaciendo de manera discordante a las diferentes unidades geológicas reconocidas en la región. Sobreyace a las unidades Jurásico medio, Jurásico superior y Paleoceno, como se puede ver en el mapa geológico.



## ***TERCIARIO, PALEOCENO***

### *Formación Chicontepec (Pchi)*

*Definición.* Dumble (1918) definió como formación Chicontepec a la sucesión de areniscas arcillosas de grano fino, alternadas con limolitas y lutitas de color gris verdoso, de estratificación rítmica con intercalaciones delgadas de margas arenosas gris oscuro, expuestas a 2,5 km al este de Chicontepec.

*Litología y espesor.* La formación Chicontepec consiste de una sucesión de areniscas calcáreas y lutitas, de color gris oscuro al fresco y gris verdoso y ocre en superficie meteorizada. Las areniscas son de grano fino y medio, se presentan en estratos con espesores entre 3,0 cm y 80 cm, las areniscas de granulometría más gruesa, contienen marcas de base tales como *flute cast* y estratificación gradada granodecreciente, también se observan intraclastos de areniscas de grano fino y de lutitas; se encuentra interestratificado con lutitas laminadas finamente, las cuales están dispuestas en estratos de 2,0 cm a 5,0 cm de espesor. Al sur de Tepetzintla afloran unas turbiditas con bloques de areniscas calcáreas en una matriz de lutitas y areniscas con laminación convoluta.

Los estratos de la unidad frecuentemente presentan icnofósiles. En los trabajos de exploración petrolera se subdivide a la formación Chicontepec en tres unidades que en conjunto tienen un espesor total de aproximadamente 1200 m (Hernández de la Fuente, 1990).

*Edad.* Hernández de la Fuente (1990) reporta en la Formación Chicontepec conjuntos de microfósiles que la ubican con una edad que comprende del Paleoceno al Eoceno temprano.

*Distribución.* La unidad está expuesta ampliamente en el sector noreste del área, donde aparece cubierta parcialmente por los derrames basálticos del Cuaternario. Se observó un afloramiento no cartografiable al sur de Tepetzintla de Galeana.

## ***CRETÁCICO SUPERIOR***

### *Formación Méndez (Ksm)*

*Definición.* Su localidad tipo se ubica al oriente de la Estación Méndez, en el kilómetro 629 del ferrocarril San Luis Potosí - Tampico. Fue propuesta inicialmente por Jeffrey (1910) como formación Méndez, pero es De Golyer (1916) quien la define formalmente como una sucesión de margas grises y azules estratificadas en capas de distinto espesor, que van desde unos centímetros hasta uno o más metros, observando un fracturamiento concoidal muy particular.

*Litología y espesor.* Está constituida por margas y calizas arcillosas grises con tono verdoso en capas de 20 cm a 30 cm de espesor que intemperizan a verde claro; hacia la cima presenta margas café rojizo en estratos de 10 cm a 50 cm. Las calizas arcillosas contienen bioclastos y arcillas.



Comúnmente se encuentran medianamente oxidadas. Presentan un crucero bien definido e intemperismo nodular. Zozaya-Saynes (1973) midió un espesor promedio de 90 m. Son rocas poco competentes por lo que se observan fuertemente deformadas con pliegues de segundo orden.

*Edad.* Se le asigna una edad de Conaciano-Campaniano temprano con base en su contenido de microfósiles planctónicos.

*Relaciones estratigráficas.* Sobreyace a la Formación San Felipe de manera concordante y transicional.

*Distribución.* Aflora en el sector suroccidental del mapa, al sur del poblado de Ozomatlán en el núcleo de un sinclinal buzante hacia el sur. También aflora al norte de Xicotepec en dos regiones separadas por el río San Marcos; al oriente como parte de un anticlinal, se pueden observar excelentes afloramientos a lo largo de la carretera federal, principalmente en el poblado de Las Pilas. Al poniente del río San Marcos aflora en el núcleo del pliegue sinclinal en el poblado de Jericó, así como en el camino que va de Tacubaya a San Antonio.

*Formación San Felipe (Kssf)*

*Definición.* Jeffreys (1910) define a la formación San Felipe como una alternancia de calizas y lutitas de color gris verdoso, de estratificación delgada con pequeñas capas de bentonita verde; correspondiente al Conaciano-Santoniano Inferior. Ubica la localidad tipo al occidente del poblado de San Felipe en el estado de S.L.P.

*Litología y espesor.* Consiste en wackestone gris verdoso, en estratos de 10 cm a 50 cm de espesor, con intercalaciones de lutitas bentónicas gris verdoso y horizontes arcillosos. La caliza presenta líticos de cuarzo e intercalaciones de tobas finas y bentonita de 5,0 cm a 10 cm de espesor. Se observan estructuras de carga e intraclastos de areniscas de grano medio en las lutitas, así como algunos icnofósiles.

De acuerdo con Dunham corresponden a wackestone y packstone de microfósiles. En general la unidad se encuentra muy fracturada, presentando algunas fracturas rellenas de gilsonita. El espesor de la unidad es de aproximadamente 90 m (Zozaya-Saynes, 1973), en algunos pozos petroleros se ha reportado un espesor hasta de 200 m. Son rocas poco competentes por lo que se observan fuertemente deformadas con pliegues de segundo orden.

*Edad.* Se le asigna una edad de Conaciano-Campaniano temprano con base en su contenido de microfósiles planctónicos.

*Relaciones estratigráficas.* Sobreyace a la formación Agua Nueva de manera concordante y transicional. Subyace de igual forma a la formación Méndez, contacto que se observa en la bajada de Cuaxicala.



*Distribución.* En el camino entre Cuaxicala y San Agustín Atlihuacán se atraviesa esta formación, presentan calizas arcillosas en estratos de 25-30 cm, gris oscuro con nódulos de hematita, se presentan laminadas finamente; alternan con horizontes de lutitas.

*Formación Agua Nueva (Ksan)*

*Definición.* El nombre de Agua Nueva fue mencionado inicialmente por Stephenson (1921), para referirse a una sucesión calcáreo-arcillosa que aflora en el Cañón de la Borrega, en el flanco oeste de la Sierra de Tamaulipas. Posteriormente Muir (1936), le asignó el rango de formación y la dividió en dos miembros: uno inferior que consiste en capas de estratificación media a gruesa, de calizas arcillosas con laminaciones de lutita; en la parte media más arcillosa contiene impresiones de *Inoceramus labiatus*; mientras que el miembro superior consiste en calizas de estratificación media y delgada. El espesor medido en la sección tipo es de 127 m.

*Litología y espesor.* Consiste principalmente de wackestone de microfósiles de color gris claro en estratos de 15 cm a 50 cm de espesor, interestratificadas con calizas arcillosas de 15 cm a 25 cm de espesor, con bandas de pedernal negro de 4,0 cm a 5,0 cm y nódulos de hierro ocasionalmente presenta intercalaciones de lutitas negras que en superficie meteorizada adoptan color a gris con tonos de verde y con abundantes estilolitas. Son rocas poco competentes por lo que se observan fuertemente deformadas con pliegues de segundo orden.

El espesor mínimo reportado en el subsuelo para esta formación es de 20 m en el Pozo Gachupinate No. 1, y el máximo es de 202 m en el Pozo Tecuntepec No. 1.

*Edad.* Con base en el contenido de microfósiles se le asigna una edad del Turoniano (Aguilar-Hernández y Sarmiento- Altamirano, 1998).

*Relaciones estratigráficas.* Sobreyace de manera concordante y transicional a la Formación Tamaulipas Superior, contacto que se observa con claridad en la Finca Dalías, al borde de la carretera federal, entre los poblados Las Pilas y San Lorenzo. Subyace de manera concordante y transicional a la Formación San Felipe.

*Distribución.* Aflora en el sector suroccidental del mapa, entre Nueva Necaxa y Xicotepec, como una franja de casi este-oeste y una franja que bordea a los poblados de Ozomatlán y Tepetzintla en los flancos de un sinclinal buzante hacia el sur. También aflora al norte de Xicotepec en dos regiones separadas por el río San Marcos; al oriente como parte de un anticlinal, se pueden observar excelentes afloramientos a lo largo de la carretera federal, principalmente en el poblado de Las Pilas. Al poniente de río San Marcos aflora en el núcleo del pliegue sinclinal en el poblado de Jericó, así como en el camino que va de Tacubaya a San Antonio.



## ***CRETÁCICO INFERIOR***

El Cretácico Inferior está representado por una sola unidad fotogeológica, conformada por las unidades estratigráficas denominadas formaciones Tamaulipas Inferior y Tamaulipas Superior, formaciones que para fines cartográficos frecuentemente se agrupan como Grupo Tamaulipas, derivada de su carácter calcáreo y su aspecto prominente desde el punto de vista morfológico.

### *Formación Tamaulipas Superior (Kits)*

*Definición.* Como Formación Tamaulipas Superior se reconoce a la sucesión de calizas claras con pedernal blanco, intercaladas con calizas arcillosas grises con pedernal negro en capas de 30 cm a 50 cm de espesor, que afloran en el cañón de la Borrega en la Sierra de Tamaulipas.

*Litología y espesor.* La formación consiste en calizas gris claro y crema en estratos de 30 cm a 50 cm y hasta 1,0 m de espesor, algunas veces laminadas, con nódulos y bandas de pedernal negro de bordes irregulares, son frecuentes las texturas wackestone y mudstone. Presenta estilolitas, fracturas rellenas de gilsonita y vetillas de calcita, ocasionalmente se presentan intercalaciones de caliza arcillosa y horizontes de lutitas calcáreas de color gris oscuro en paquetes laminados de 5,0cm a 10 cm de espesor. En algunas superficies de estratificación y de fractura se observan desarrollo de dendritas de pirolusita. Los espesores reportados para esta formación en pozos cercanos al área, varían entre 143 m y 316 m.

*Edad.* Con base en su contenido de microfósiles, a la sucesión del Grupo Tamaulipas se le asigna una edad comprendida entre el Albiano y el Cenomaniano.

*Distribución.* La unidad presenta sus afloramientos más extensos al norte de la Presa Necaxa, donde aparece como la unidad expuesta más antigua. También se le reconoció en los flancos de las estructuras anticlinales como se observa a la largo del Río San Marcos y en la estructura al sureste de Xicotepec.

### *Formación Tamaulipas Inferior (Kiti)*

*Definición.* Muir (1936) describe como formación Tamaulipas Inferior, a una sucesión de calizas densas de grano fino, ligeramente cretosas, de color crema amarillento en estratos ondulados, con espesores de 20 cm a 25 cm hasta más de 50 cm, con nódulos esferoidales y elongados de pedernal amarillo. La localidad tipo se encuentra en el Cañón de la Borrega de la Sierra de Tamaulipas, en la cual está expuesto un espesor de 400 m. Como la sucesión calcárea en cuestión está fraccionada por la presencia de un paquete calcáreo-arcilloso intermedio denominado Horizonte Otates, Muir (1936) considera más adecuado denominar Formación Tamaulipas Inferior a los estratos que se encuentran abajo de dicho horizonte, y propone denominar como formación Tamaulipas Superior a la sucesión calcárea que se encuentra arriba. Sin embargo en la región no es posible establecer esa división tripartita y se considera como Grupo Tamaulipas a la



sucesión calcárea comprendida entre las formaciones Pimienta (Jurásico Superior) y Agua Nueva (Cretácico tardío).

*Litología y espesor.* Calizas gris claro con tonos amarillos; en estratos de 20 cm a 70 cm, en ocasiones alcanzan hasta 1,0 m de espesor. Hacia la base de la sucesión se presentan algunos horizontes bentoníticos con espesores entre 1,0 mm y 5,0 mm. Las calizas de la formación contienen lentes y bandas de pedernal de color negro a gris, sobre todo cerca de la base; hacia la cima el pedernal se presenta como nódulos. Se observan estilolitas y fracturas rellenas de calcita con materia orgánica, así como nódulos de pirita frecuentemente oxidados (Aguilar-Hernández y Sarmiento-Altamirano, 1998).

El espesor mínimo reportado para el área es de 129 m, cortado en el Pozo Xalostoc No. 1, mientras el máximo es de 400 m, en el Pozo Tecuantepec No. 1.

*Edad.* Con base en su contenido de microfósiles, a la sucesión del Grupo Tamaulipas se le asigna una edad comprendida entre el Huateriviano y Berremiano.

*Distribución.* La unidad presenta sus afloramientos más extensos al norte de la Presa Necaxa, donde aparece como la unidad expuesta más antigua. También se le reconoció en los flancos de las estructuras anticlinales como se observa a la largo del río San Marcos y en la estructura al sureste de Xicotepec.

## ***JURÁSICO SUPERIOR***

La sucesión estratigráfica calcáreo-arcillosa correspondiente al Jurásico superior se subdividió en dos unidades estratigráficas: La unidad más antigua incluye a las Formaciones Santiago y Tamán; en tanto que la segunda unidad representa a la Formación Pimienta, que en conjunto presentan una expresión morfológica distintiva y tonos fotogeológicos claros.

### *Formación Pimienta (Jsp)*

*Definición.* Heim (1926) denomina como Formación Pimienta a la sucesión calcárea que aflora en el rancho Pimienta en el Valle del río Moctezuma (km 337-338 de la carretera México-Laredo). La describe como calizas densas de color negro, café claro y gris oscuro, en estratos delgados con abundantes horizontes de pedernal negro.

*Litología y espesor.* La unidad está constituida por calizas gris oscuro y negro al fresco con tonos grises en superficie meteorizada, en estratos *gruesos* de 14 cm a 60 cm (*Jspg*), se trata de wackestone fosilífero formado por foraminíferos y pellets en una matriz de micrita, por lo que se puede clasificar también como biomicrita variando a pelmicrita.



Hacia su parte media se compone de calizas arcillosas de color negro en superficie fresca y tonos rojizos a gris verdoso a la intemperie en estratos *delgados* de 10 cm a 20 cm (*Jspd*), formadas por foraminíferos, pellets e intraclastos en una matriz de micrita y arcillas, se encuentran interestratificadas con lutitas carbonosas con influencia calcárea de color negro, con tonos pardos y grises al intemperismo, de aspecto laminar en estratos de 10 cm a 30 cm; se presentan además lentes delgados y bandas de pedernal (Aguilar-Hernández y Sarmiento- Altamirano, 1998). Las rocas presentan contenido notable de materia orgánica, se encuentran cortada por vetillas de calcita y se observan microestilolitas rellenas de arcilla. La calizas de la unidad se caracterizan por la presencia de nódulos de óxido de hierro y por su fracturamiento concoideo. Los espesores que se han cortado en los pozos varían de 72 m a 150 m. Balam y Canché (1992) reportan para la región de Chiconcuautila un espesor de 278 m. La parte más arcillosa de esta unidad es poco competente, por lo que se observa fuertemente deformada con pliegues de segundo orden.

*Edad.* La unidad tiene un abundante contenido de macrofósiles y microfósiles que atestiguan una edad del Tithoniano tardío al Berriasiano, esto de la parte más joven del Jurásico tardío a la base del Cretácico temprano.

*Distribución.* La unidad presenta sus afloramientos más extensos al norte de la Presa Necaxa, donde aparece como la unidad expuesta más antigua. También se le reconoció en los flancos de las estructuras anticlinal como se observa a la largo del río San Marcos y en la estructura al sureste de Xicotepec.

Es la unidad más ampliamente distribuida en el área del proyecto, aflora al norte de Huauchinango en la localidad de Patoltecoya en el camino que conduce a Alseseca y Cuaxicala. En este camino se observa el contacto estructural por falla inversa con las rocas calcáreo arcilloso de la formación San Felipe del Cretácico Superior. También aflora por debajo de la mesa basáltica a la altura del Túnel Xicotepec II, así como en el camino a Tlapehuala. A pesar de que se encuentra fuertemente meteorizada, todavía hay bastantes afloramientos en los que se puede apreciar su composición original.

#### *Formación Tamán (Jst)*

*Definición.* Heim (1926) propone como "Capas Tamán" a una sucesión que describe como calizas negras microcristalinas bien estratificadas alternando con lutitas negras. Reyes Domínguez (1964) reporta una sección tipo de la Formación Tamán en el río Moctezuma, sucesión que divide en tres unidades: la unidad inferior denominada miembro arcilloso de la Formación Tamán corresponde a la Formación Santiago.

*Litología y espesor.* Constituida por una sucesión interestratificada de calizas y lutitas calcáreas; la caliza presenta estratos con espesor promedio de 10 cm, en ocasiones presenta estratos lenticulares; color gris oscuro al fresco y en superficie meteorizada adquiere tonos rojizos, con textura wackestone con abundante micrita y foraminíferos, por lo que se clasifica también como





una biomicrocrista. Las lutitas son negras al fresco con tonos rojizos a la intemperie, en estratos de 3,0 cm a 25 cm; de carácter calcáreo; se observa gilsonita en las fracturas. Presenta pirita diseminada (algunas veces oxidada), vetillas irregulares de calcita y notoria fisilidad.

En la exploración petrolífera regional, se han cortado espesores que varían de 51 m a 139 m en distintos los pozos. Son rocas poco competentes, por lo que se observan fuertemente deformadas con pliegues de segundo orden.

*Edad.* Por su contenido de *Idoceras sp.* y *Aspidoceras sp.* se le asigna una edad Kimmeridgiano temprano-Tithoniano temprano.

*Distribución.* Se observan buenos afloramientos en el sector central del mapa, al norte de San Agustín Atlihuacán y el camino a Temaxcalapa, en donde la unidad consiste de calizas arcillosas gris oscuro con nódulos de hasta 1,0 m de diámetro con estructura de septaria, las cuales se encuentran intercaladas con lutitas negras, los nódulos presentan textura wackestone con abundantes cristales de pirita diseminados. En la primera localidad se observan dendritas de manganeso en las superficies de los estratos de lutitas. En general se presenta en estratos delgados de 15 cm a 30 cm de espesor.

#### *Formación Santiago (Jss)*

*Definición.* Reyes-Domínguez (1964) describe originalmente como miembro de la Formación Tamán a una sucesión de lutitas calcáreas de color gris oscuro con intercalaciones delgadas de calizas arcillosas del mismo color. Posteriormente, Cantú-Chapa (1969) le asignó formalmente este nombre describiéndola como: "una sucesión sedimentaria compuesta por limonitas de color café grisáceo y gris, que gradúan hacia la parte superior a lutitas calcáreas gris oscuro y negras"; su localidad tipo se encuentra en el Arroyo Santiago cerca de Tamán, S.L.P.

*Litología y espesor.* La formación consiste en una intercalación de caliza arcillosa y lutita calcárea; la caliza arcillosa es de color blanco a la intemperie y gris oscuro al fresco, presenta manchas y vetillas de gilsonita y microestilolitas rellenas de arcilla; se presenta en estratos ondulados, frecuentemente laminados con espesores desde 2,0 cm hasta 60 cm intercalados con lutitas carbonosas y calcáreas en estratos de 2,0 cm a 18 cm; son de color negro, con tonos que varían de pardos a rojos y amarillos; la unidad presenta algunos horizontes arenosos con los líticos de toba subangulosos a subredondeados. La unidad incluye nódulos y concreciones calcáreas de formas elíptica y esférica de 15 cm de diámetro y cuarzos diagenéticos de 1,0 cm a 2,0 cm de largo. De acuerdo con el reporte de Balam y Canché (1992) la Formación Santiago tiene un espesor que varía entre 85 m y 355 m.

Son rocas poco competentes por lo que se observan fuertemente deformadas con pliegues de segundo orden.

*Distribución.* Similar a la Formación Tamán.



### ***2.2.2 PREPARACIÓN DE ESTUDIO GEOLÓGICO FINAL***

Con toda la información obtenida se elaboró el informe y los planos geológicos finales de la primera parte del trazo y resumidas las que incluyen:

- Mapa geológico regional, GR-1, escala 1:25 000.
- Plantas geológicas del trazo, G-1, escala 1:5000.
- Perfiles longitudinales geológicos del trazo, PGL 1 V-1:500, H-1:2500.
- Perfiles longitudinales geológicos de los túneles, PGT-1.

### ***2.2.3 ASPECTOS GEOTÉCNICOS RESUMIDOS E INTERPRETADOS***

De acuerdo con la información geológica preparada para el diseño y resumida anteriormente, los túneles de Huauchinango se excavarán en rocas volcánicas del Cuaternario (Qb), constituidas por depósitos volcánicos. Estos depósitos están compuestos por brechas, tobas y basaltos fracturados en la parte inferior. En la parte superior o más superficial de la ladera, se presentan materiales de saprolito y/o suelo residual.

Los basaltos presentan intercalaciones de tobas y brechas volcánicas basálticas, con una estructura pseudo-estratificada, dispuesta en capas más o menos horizontales, de color gris oscuro.

De acuerdo con la información de exploración geotécnica prevista en las Bases y la nueva adquirida con la exploración para el proyecto ejecutivo, se resume a continuación:

- De la información suministrada por las Bases, existen dos sondeos denominados S-1 y S-2, ejecutados en los estudios previos a la licitación, ubicados hacia los portales México y Tuxpán, de 45 m y 38 m de profundidad respectivamente, en los cuales se identificaron tobas brechoides, con RQD promedio de 50%. Igualmente en etapa de estudios anteriores, se identificaron velocidades de ondas compresionales con líneas de ensayos geofísicos de 97 m/s a 143 m/s y de 541 m/s a 840 m/s, indicando que los materiales presentan condiciones geomecánicas regulares a pobres.



Adicionalmente, existen resultados de ensayos geoelectricos de información suministrada por las bases. Con esos resultados se identificaron al menos cuatro capas de contraste, con resistividad en la parte superior de 336-677 ohmios-m, con capas intermedias de 8-63 ohmios-m y una capa de material mucho más resistente en la parte inferior de la ladera de 2599-9244 ohmios-m, ubicada entre 10 m y 30 m de profundidad.

- Durante la etapa del diseño ejecutivo, se realizaron por parte de ICA-FCC (EPC) tres perforaciones exploratorias de 35 m las dos primeras y de 13,5 m la última, denominadas SM-1 (PT-1), SM-3 (PT-3) y SM-2 (PT-2).

En estas perforaciones, se identificaron varias capas de material que se resumen a continuación:

- Un material limo arenoso arcilloso de color café rojizo de alta plasticidad clasificado según el SUCS como (MH), ubicado en la parte superior de la ladera de consistencia media, con contenido de humedad del orden de 60% a 70%, con límite líquido del orden de 70% y límite plástico de 45% e índice plástico del orden de 25%. Esta primera capa es del orden de 5,0 m a 10 m de espesor.

Según el registro de pruebas SPT de campo realizadas en las perforaciones, se obtuvo en promedio 12 golpes/pie, siendo de consistencia media. El material clasificó según el SUCS, como MH (limo de alta plasticidad). El peso unitario es del orden de 1,59 t/m<sup>3</sup>.

- Debajo de la capa anterior se determinó que habría una capa de material compuesto por roca basáltica, gris oscura, fracturada, con RQD variable de 40% a 60% (calidad media a baja).

Esta roca presenta una resistencia a la compresión inconfiada del orden de 1525 kg/cm<sup>2</sup> (149,6 MPa), un módulo de Young de 143 512 kg/cm<sup>2</sup> (14,08 GPa), un peso unitario de 2,8 t/m<sup>3</sup> y una resistencia a la tensión indirecta (método brasilero) de 130 kg/cm<sup>2</sup> (12,75 MPa). El espesor de esta capa es variable. Según el registro de la perforación SM-1, se estimó en 4,0 m a 5,0 m.



- Debajo de la capa de derrame basáltico, se determinó que había un material limo arenoso, de alta plasticidad, de color café oscuro a rojizo, con humedad del 50%, límite líquido del orden de 50% y límite plástico 30%, con índice de plasticidad del 20%. Este material fue clasificado según el sistema UCSC, como MH (limo de alta plasticidad). Según las pruebas de SPT, el material presenta de 10 a 20 golpes/pie, considerándose como una capa de consistencia media a firme. El peso unitario es del orden de 1,60 t/m<sup>3</sup>. Esta capa tiene un espesor variable pero se puede decir que es del orden de 3,0 m según la perforación SM-1 (PT-1).
- Debajo de la capa anterior, se estimó que había una capa de material denominado como saprolito caracterizada por limo arenoso, de baja plasticidad, de color café oscuro. El límite líquido es del orden de 40% y el límite plástico de 30%, con un índice de plasticidad de 10%. Este material fue clasificado como un suelo tipo ML (limo de baja plasticidad) según el SUCS. Según las pruebas de SPT en campo, se registró de 25 a 50 golpes/pie en esta capa. El peso unitario del material es del orden de 1,7 t/m<sup>3</sup> y esta capa tiene un espesor del orden de 5,0 m a 6,0 m según el registro de la perforación SM-1 (PT-1).
- Según ensayos de mecánica de suelos (triaxial Cu) en la perforación SM-3 (PT-3), a 13,05 m se obtuvo 0,30 kg/m<sup>2</sup> de cohesión y 35° de ángulo de fricción.
- Debajo del material anterior se detectó una secuencia de roca compuesta por basalto fracturado y alterado de color gris oscuro, con abundantes vesículas, con RQD muy bajo, con intercalaciones de brecha volcánica muy fracturada, de color negro, con un RQD del orden de 0 al 20% (de calidad mala).

Estas rocas presentan valores de propiedades mecánicas y elásticas de la roca intacta o matriz deducidos con ensayos de laboratorio. Véase tabla 3.



**Tabla 3. Resumen de resultados de ensayos de laboratorio.**

Perforación	Profundidad (m)	$\sigma_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	E (kg/cm <sup>2</sup> )	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )
	5,4 – 6,6		1549,2	138 029,0	2,82
	5,4 – 6,6		1000,0	63 981,1	2,72
	6,6 – 8,0	130,0			
	18,5 – 20,0		1556,7	158 114,0	2,75
	21,5 – 23,0	142,3	452,9	25 303,0	2,39
	21,5 – 23,0	84,4			
	27,0 – 29,0		872,2	57 093,0	2,71
	32,0 – 32,5		17,01	825,0	1,78
	<b>Valor medio</b>	<b>118,9</b>	<b>1086,2 (1)</b>	<b>88 504,0 (1)</b>	<b>2,68 (1)</b>

Nota (1): Se excluyo el ultimo valor de la tabla

De acuerdo con lo anterior, la roca basáltica presenta un valor promedio de resistencia a la tensión indirecta (Método Brasilerero), de 118,9 kg/cm<sup>2</sup> (11,7 MPa), una resistencia a la compresión inconfiada de 1086 kg/cm<sup>2</sup> (106,5 MPa), un módulo de Young de 88 504 kg/cm<sup>2</sup> (8,68 MPa) y un peso unitario del orden de 2,68 t/m<sup>3</sup>. Según la clasificación de Deere & Miller, la roca intacta clasifica como roca de resistencia media y módulo relativo bajo (MR = 82).



## ***PARÁMETROS GEOTÉCNICOS PARA DISEÑO***

De acuerdo con la caracterización geotécnica, los túneles de Huauchinango se excavarán en dos tipos de materiales principalmente: suelo donde domina el saprolito y roca fracturada, descompuesta (basáltica combinada con tobas brechosas).

Desde el punto de vista de parámetros geotécnicos para diseño del material de suelo, se obtuvieron los siguientes valores de parámetros con base en los ensayos de laboratorio y campo:

- Según la perforación SM-3 (PT-3), se realizaron ensayos de compresión uniaxial presentando los siguientes valores:
  - La capa superficial con una resistencia a la compresión uniaxial  $q_u = 0,44 \text{ kg/cm}^2$  (pico) y un módulo de deformación de  $43 \text{ kg/cm}^2$  (42 MPa). El peso unitario es del orden de  $1,59 \text{ t/m}^3$ .
  - En las demás capas de material limo-arenoso, se reportaron según ensayos de laboratorio resistencia a la compresión inconfiada de  $0,62 \text{ kg/cm}^2$  a  $1,06 \text{ kg/cm}^2$  (pico) y módulos de deformación de  $37 \text{ kg/cm}^2$  a  $52 \text{ kg/cm}^2$ , con un valor promedio de  $42,5 \text{ kg/cm}^2$  (4,17 MPa). El peso unitario promedio fue de  $1,74 \text{ t/m}^3$ .

En la imagen 8, se presenta resultados del estimativo de parámetros de resistencia al corte con base en datos de pruebas de SPT (número de golpes/pie) obtenido de las perforaciones.

Perforación SM 1(PT-01)										Po 100			
Profundidad - m	NF	IP	Valor de N <sub>PT-1</sub>	CN	N corr	$s_u$ -KN/m <sup>2</sup>	$c_u$ - KN/m <sup>2</sup>	$S_u$ - KN/m <sup>2</sup>	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	0	34	10	1,73	17	15,0	15,90	153,80	33,22	32,0	45,9	38,4	
2	0	34	6	1,52	9	15,0	31,80	97,29	28,78	29,8	38,0	33,4	28,0
3	0		6	1,36	7	15,0	47,70	30,80	27,66	29,2	34,2	31,8	
4	0	14	50			28	112,00						34,0
5	0		50			28	140,00						
6	1		50			28	158,00						
7	1		50			28	176,00						
8	1		50			28	194,00						
9	1		50			28	212,00						
10	1	8	20	0,59	12	16,0	239,60	52,80	30,45	30,6	29,9	35,5	35,0
11	1	8	15	0,53	8	16,0	274,10	35,20	28,22	29,5	25,8	32,6	
12	1	9	16	0,48	8	16,0	315,50	35,20	28,22	29,5	24,9	32,6	36,0
13	1	31	14	0,43	6	16,0	363,80	72,66	27,10	28,9	22,0	31,0	30,0
14	1	11	50	0,32	16	27	516,80	70,40	32,67	31,8	26,9	37,9	
15	1	11	50	0,32	16	27	533,80	70,40	32,67	31,8	26,7	37,9	33,0
16	1	10	50	0,31	15	27	550,80	66,00	32,12	31,5	26,0	37,3	34,0
17	1	30	50	0,30	15	27	567,80	100,50	32,12	31,5	25,8	37,3	29,0
18	1	30	50	0,29	15	27	584,80	100,50	32,12	31,5	25,6	37,3	
19	1		50			27	601,80						
20	1		50			27	618,80						
21	1		50			27	635,80						
22	1		50			27	652,80						
23	1		50			27	669,80						
24	1		50			27	686,80						
25	1		50			27	703,80						
26	1		50			27	720,80						
27	1		50			27	737,80						
28	1		50			27	754,80						
29	1		50			27	771,80						
30	1		50			27	788,80						
31	1		50			27	805,80						
32	1		50			27	822,80						
33	1		50			27	839,80						
34	1		50			27	856,80						
35	1		50			27	873,80						

Notas

1. Meyerhof-1965
- 2.- Pock, Hanson y Thorburn-1974
3. Shemertmann-1975
4. Hatanaka y Uchida-1995

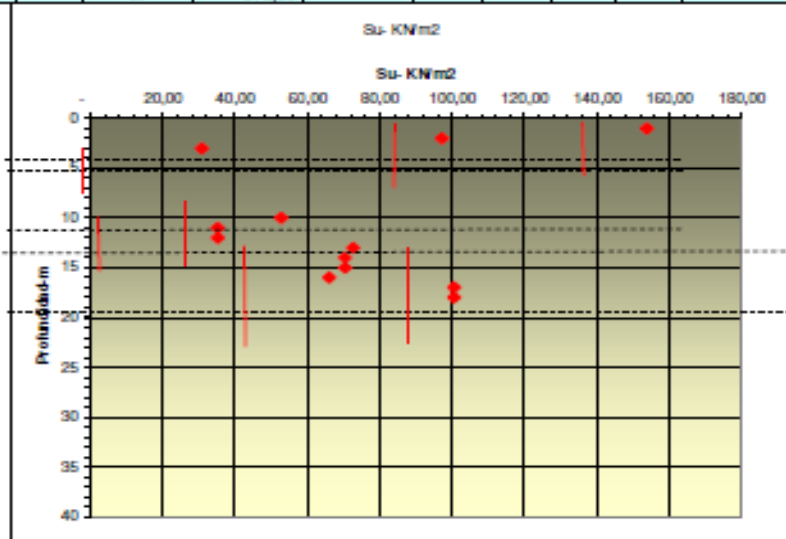


Imagen 8. Estimativo de parámetros de resistencia al corte



Según ensayos triaxiales en la perforación SM-3 (PT-3) a profundidades de 13,05, 16,35, 18,65 y 19,65, que corresponde con el material de saprolito se obtuvieron resultados de ángulos de fricción entre  $24^\circ$  y  $45^\circ$ , y cohesión entre 3,0 t/m<sup>2</sup> y 7,5 t/m<sup>2</sup>.

Los parámetros finales adoptados fueron concertados después de analizar los resultados obtenidos con correlaciones con pruebas de SPT (golpes/pie) que existen en la literatura geotécnica, como de revisar resultados de ensayos de laboratorio (prueba triaxial) y de haber realizado análisis de sensibilidad de coeficientes de seguridad versus parámetros de resistencia al corte de las laderas naturales y del talud del corte de la vía en el sitio de entronque que muestra una altura de 42 m, con inclinación 0,75H:1,0V y sin refuerzo (sólo drenaje). La información analizada bajo este enfoque mostró que el 80% de los datos de pendientes de la ladera natural tenían inclinaciones por encima de los  $45^\circ$ , indicando que el material en conjunto presenta valores de resistencia al corte relativamente altos, pues de otra forma no explicarían las pendientes ni la estabilidad de las laderas y del corte existente en el entronque que está conformado en materiales similares.

Finalmente de toda la información analizada se estableció que los diseños de los túneles de Huauchinango y taludes de corte de los portales en este material (saprolito), se puede adoptar conservadoramente como ángulo de fricción interno del material  $35^\circ$  y una cohesión aparente de 3,0 t/m<sup>2</sup> a 4,0 t/m<sup>2</sup> (29,4 kPa a 39,2 kPa).

Para el material limo arcilloso superficial (espesor máximo de 5,0 m), se adoptó  $f = 28^\circ$  y una cohesión del orden de 10 t/m<sup>2</sup> (98,1 kPa).

## ***ANÁLISIS PARA EL MACIZO ROCOSO***

### *Calidad del macizo*

Debido que hacia el sector Tuxpan se observaron varios afloramientos de roca basáltica, se consideró conveniente caracterizar ese sector como si se tratara de un macizo rocoso.

La calidad del macizo rocoso se analizó con base en registros de las perforaciones SM-1 (PT-1), SM-2 (PT-2) y SM-3 (PT-3) y revisando algunos afloramientos de roca en las laderas y quebradas cercanas al sitio donde se ubicarán los túneles de Huauchinango. De los registros de las perforaciones no se tienen datos de valores de RQD, no obstante con base en la frecuencia (1) de discontinuidades medidas en una longitud revisada de un metro, se estableció el valor de RQD, aplicando criterios de Palmstron.

De acuerdo con lo observado en afloramientos, el RQD es bastante bajo en la roca basáltica y tobas brechosas, por lo que se ha estimado que éste no es mayor al 20%. Ese valor corresponde con una frecuencia de discontinuidades espaciadas cada 5,0 cm, en una longitud de 1,0 m.





**Fotografía 1 .Detalle de afloramientos de roca en el sector Tuxpan, niveles de roca basáltica detectado en la parte baja de la ladera por el sector Tuxpan.**



**Fotografía 2 .Detalle de muestras recuperadas de roca basáltica de la perforación SM-01.**



**Fotografía 3. Detalle de excavaciones en corte abierto en la zona en materiales similares a los del portal de entrada México – Túneles Huachinango.**

Desde el punto de vista de discontinuidades del macizo rocoso, se presentan varias fracturas en forma aleatoria generadas por enfriamiento de derrame basáltico. Según la información y el detalle presentado en la parte de geología estructural, como lo que puede apreciarse en afloramientos en superficie, es posible establecer el número de discontinuidades y parte de sus características, véase registro fotográfico. De la información se estima que existen al menos tres sistemas ortogonales de fracturas que forman bloques.

### ***CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO***

#### *Aspectos generales*

Como una primera aproximación para establecer el comportamiento del terreno durante la excavación y con el fin de estimar los parámetros geomecánicos de diseño en el sector que comprenderá la roca basáltica fracturada hacia el sector Tuxpan, se efectuó la clasificación geomecánica del macizo, aplicando tres metodologías empíricas y siguiendo en un todo lo solicitado por la SCT. Se aclara que las metodologías propuestas permiten obtener una apreciación de las condiciones del terreno y definir parámetros del macizo en forma indirecta y aproximada para los diseños.



Las clasificaciones geomecánicas utilizadas siguiendo las recomendaciones de la SCT, fueron utilizadas para el sector hacia Tuxpan y parte del piso y paredes del túnel que se encontrará en roca basáltica.

Las clasificaciones aplicadas para el macizo rocoso fueron las propuestas por: Hoek, definida como GSI (Geotechnical Strength Index), la de Barton definida como Q (Q-System) y la de Bieniawski-76 definida por el RMR (Rock Mass Rating).

Para poder efectuar la clasificación geomecánica del macizo rocoso, se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Una zonificación dependiendo del cuerpo de roca basáltica. En el cuerpo de roca basáltica se diferenciaron los materiales donde existe la presencia de niveles u horizontes IC (saprolito) y IIA, según la denominación de perfiles de meteorización establecidos por Deere & Patton. El material denominado IIA, corresponde con el perfil de meteorización que subyace al nivel IC (saprolito) según la denominación dada por Deere y Patton (1971), en su artículo “Slope Stability in Residual Soils Proceedings of the 4th Panamerican Conference in Soils Mechanics and Foundation Engineering. Según estos autores el nivel IC se reconoce por evidencias de la estructura original de la roca y es un material entre suelo y roca, donde la estructura de la misma incluye discontinuidades, minerales con orientaciones similares a los de la roca madre. A esto se le denomina saprolito porque corresponde con un material que mantiene relictos de la roca madre. Esta clasificación es ampliamente utilizada a nivel mundial.

La zona denominada IIA o de transición, corresponde a roca alterada que según Deere y Patton puede ser dividida en dos capas; la superior o IIA que es la transición de saprolito a roca meteorizada y la zona IIB que es parcial o ligeramente alterada o meteorizada. La zona IIA se caracteriza por disponer de un gran rango de las propiedades físicas de sus componentes. Para este nivel los autores de esa publicación especifican que pueden ser observados núcleos o pedazos de roca, que varían desde un 10% a 95% del volumen en la zona de transición.

- Aplicación de algunos parámetros mecánicos y elásticos del material rocoso intacto para clasificación definidos por: resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta o matriz (valor promedio), valor promedio de RQD definido con base en lo visto en los registros de las perforaciones o visualmente en afloramientos de roca en superficie. También se tuvieron en cuenta las características, número de discontinuidades prevaecientes dentro del macizo analizadas con base en reconocimientos en superficie y revisión de ellas sobre



los registros de las perforaciones. Para los valores adoptados de RQD; sí bien los registros de las perforaciones en la zona profunda no presentan valores de este parámetro geotécnico, éste fue estimado de afloramientos y de analizar los pedazos de roca de las perforaciones. Para esto se aplicaron conceptos del ISRM, 1981 en función de la frecuencia de discontinuidades. Conservativamente se adoptó para el nivel IIA un valor de RQD de 20% con base en lo observado en las perforaciones y que corresponde con un espaciamiento de 5,0 cm de las fracturas promedio observado de núcleos vistos de las perforaciones. Detalles de la curva que relaciona RQD versus frecuencias se presenta en el Anexo G. Allí se detalla un valor adoptado más conservador que lo previsto en diseños de las Bases y otros que había sido del orden del 50%.

- Aspectos recomendados para ajuste de las clasificaciones sugeridas por Hoek en relación con la normalización de las clasificaciones propuestas por Barton (1974) y Bieniawski (1976) para el caso de macizos en roca dura y su afinidad con el índice GSI.
- De acuerdo con lo anterior, se determinaron los valores establecidos para cada tipo de clasificación geomecánica. Todos los valores obtenidos de la clasificación fueron normalizados al valor de RMR según lo expresado en los criterios de diseño.
- Se aclara que la clasificación se hizo para el nivel de transición buscando encontrar parámetros del macizo fracturado que fue evidenciado en varios afloramientos de roca en el sector Tuxpan principalmente. Este material se encontrará en la mayor parte del trayecto de los dos túneles, el cual será excavado en las paredes y piso. El nivel IC sólo fue identificado como parte del ejercicio realizado, pero los parámetros finales para ese material son estimados a partir de las correlaciones con ensayos de campo y laboratorio como son: pruebas de SPT y ensayos triaxiales. Además son verificados realizando análisis de sensibilidad y retrocálculo de las laderas naturales como del talud de corte alto que existe cerca del entronque. Detalles de la sensibilidad de la estabilidad de ese corte versus parámetros de resistencia al corte del material se presentan a continuación.

CUADRO 3. ANEXO G. RQD -ISRM -1981.

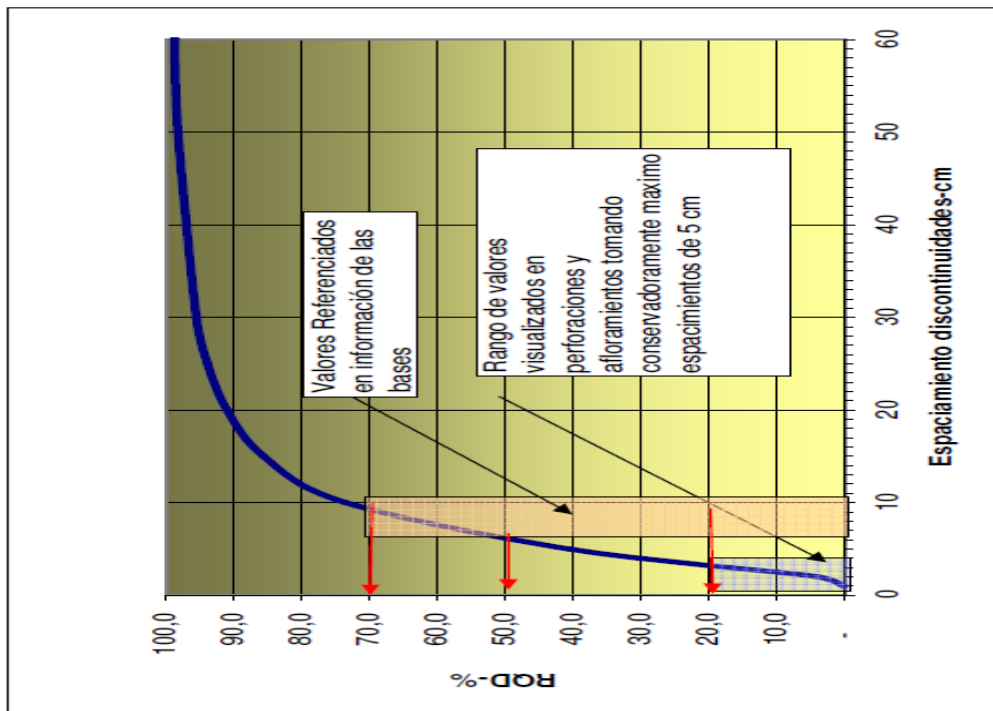


Tabla de RQD versus espaciamientos de discontinuidades

cm	$\lambda$	RQD
1	100,00	0,0
2	50,00	4,0
5	20,00	40,6
10	10,00	73,6
15	6,67	85,6
20	5,00	91,0
25	4,00	93,8
30	3,33	95,5
50	2,00	98,2
60	1,67	98,8
100	1,00	99,5

Imagen 9. Tabla de RDQ Vs. Espaciamientos

Nivel de meteorización	Barton		Bieniawski RMR	GSI RMR	Valor promedio RMR
	Q	RMR			
RMR	0,05	17	21	20	19



### ***GEOPARÁMETROS DEL MACIZO ROCOSO***

Con base en los resultados de ensayos de laboratorio, así como las clasificaciones geomecánicas y la metodología propuesta por Hoek, se estimaron los valores de parámetros del macizo rocoso fracturado que se puede presentar en las paredes y piso de los túneles, como en la parte inferior de los taludes de corte de portales.

El valor  $D$  que es el factor de perturbación o daño que pueda tener la masa de roca fue introducido por Hoek, el cual tiene un significado importante en la estimación del módulo de deformación del macizo y su aplicación está en concordancia con las observaciones prácticas y el razonamiento ingenieril tal como esos autores lo mencionan. Ese factor depende de la redistribución de esfuerzos alrededor de la excavación como del efecto que inducen los procesos constructivos durante excavación.

Los autores (Hoek & Diederichs) recomiendan que en el caso de túneles con un alto grado de confinamiento (p.e. para túneles profundos) para diseño se adopte el límite superior, es decir usando  $D = 0$ , y en túneles superficiales, taludes o fundaciones, recomienda aplicar el efecto de alteración  $D$ . Para el caso de los túneles de Huauchinango se utilizó un valor de 0,25 que resulta de la experiencia y el juicio del diseñador apoyado en medidas de instrumentación de túneles similares y análisis de retrocálculo.