



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Estudio de caracterización geológico-geotécnica  
de un corte sobre la autopista Durango-  
Mazatlán, Estado de Durango**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Geólogo**

**P R E S E N T A**

José Guillermo Hernández Arellanes

**ASESOR DE INFORME**

Dr. Moisés Dávila Serrano



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Estudio de caracterización geológico-geotécnico de un corte sobre la autopista Durango-Mazatlán,  
Estado de Durango.

JUNIO 2019

## **CONTENIDO**

<b>RESUMEN.....</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Localización y aspectos generales .....	2
1.2. Situación problemática.....	8
1.3. Objetivos .....	8
<b>2. GENERALIDADES.....</b>	<b>10</b>
2.1. Fisiografía y geomorfología .....	10
2.2. Marco geológico regional .....	12
2.3. Riesgo sísmico .....	17
<b>3. ACTIVIDADES REALIZADAS .....</b>	<b>20</b>
3.1. Recopilación y análisis de información .....	20
3.2. Actividades desarrolladas en campo y gabinete .....	21
3.3. Exploración geofísica .....	29
3.4. Procesamiento de la información e integración de resultados....	33
<b>4. CONDICIONES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DEL CORTE .....</b>	<b>34</b>
4.1. Unidades litológicas .....	34
4.2. Condiciones estructurales .....	49
4.3. Elementos inestables .....	53
4.4. Zonificación geológica-geotécnica .....	59
4.5. Clasificaciones geomecánicas .....	71
4.6. Representación estereográfica de las discontinuidades.....	84
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>92</b>
5.1. Conclusiones .....	92
5.2. Recomendaciones.....	99
<b>6. REFERENCIAS .....</b>	<b>100</b>

## Índice de Figuras

Figura 1.1. Localización general de la zona de estudio. (Elaborado en Qgis 2.18, con archivos .shp de CONABIO, 2018).....	2
Figura 1.2. Modelo tridimensional del relieve en la zona del corte. Imagen tomada y modificada de Google Earth Pro, 2018 .....	4
Figura 2.1. Localización de la zona de estudio en un mapa de Provincias fisiográficas Fuente propia con archivos shp de CONABIO,2018 .....	11
Figura 2.2. Geomorfología de la zona a través de una imagen satelital de Google Earth Pro, 2018 .....	11
Figura 2.3. Columna estratigráfica regional de la zona de estudio (SGM, 2009) .	15
Figura 2.4. Mapa geológico regional de la zona de estudio. (Modificado de SGM, 2009).....	16
Figura 2.5. Regionalización sísmica y tabla de cálculo de la aceleración máxima horizontal (PGA), de acuerdo con CFE, 1993, en nuestro caso se tendrían valores de 0.14 g.....	18
Figura 2.6. Visualización de PRODISIS en línea con valores de aceleración máxima y factores de sitio y de respuesta para el corte en cuestión .....	19
Figura 2.7. Visualización de PRODISIS en línea con gráfica de espectro de respuesta de referencia (ER).....	19
Figura 3.1. Gráfica para la correlación entre el valor de rebote y la resistencia a la compresión simple .....	25
Figura 3.2. Esquema de relaciones entre dimensiones de las muestras a ensayar y el diámetro de núcleo equivalente .....	27
Figura 3.3. Distribución de los tendidos sísmicos realizados en el corte. La figura fue dividida debido a la longitud del corte.....	30
Figura 4.1. Distribución de las unidades litológicas que conforman la zona del corte .....	35
Figura 4.2. Distribución de los elementos inestables identificados en el corte....	56
Figura 4.3. Simbología de las secciones geológico-geotécnicas .....	64
Figura 4.4. Sección geológico-geotécnica que ilustra la presencia de la unidad UG-IIb en la parte alta, al borde noreste del corte.....	64
Figura 4.5. Sección geológico-geotécnica próxima al sondeo C4-S-02 (sondeo proyectado).....	65
Figura 4.6. Sección geológico-geotécnica próxima al sondeo C4-S-03 (sondeo proyectado).....	65
Figura 4.7. Sección geológico-geotécnica próxima al sondeo C4-S-04 (sondeo proyectado). Se aprecia la morfología controlada por la pseudoestratificación .....	66

Figura 4.8. Sección geológico-geotécnica que muestra el detalle del horizonte de Ttb <sub>ac</sub> al igual que la disminución en la altura del corte .....	68
Figura 4.9. Sección geológico-geotécnica donde se conjuga información del terraplén situado entre los km 144+120 y 144+720 .....	69
Figura 4.10. Sección geológico-geotécnica que muestra información del terraplén situado entre los km 144+120 y 144+720 .....	69
Figura 4.11. Sección geológico-geotécnica que atraviesa la zona de una falla; se observa que su orientación no implica riesgo a la estabilidad del talud ...	70
Figura 4.12. Cuadro que ilustra la clasificación GSI para el corte. (modificado de González, 2004) .....	82
Figura 4.13. Mecanismos de rotura y análisis cinemático (modificado de González, 2004) .....	85
Figura 4.14. Estereogramas de la porción inicial (noreste) del corte .....	87
Figura 4.15. Estereogramas en zona noreste, posterior a una curva en el corte .	88
Figura 4.16. Estereogramas en la parte media del corte, mayor inclinación de 'se' .....	89
Figura 4.17. Estereogramas de la zona con menor altura del corte.....	90
Figura 4.18. Estereogramas de la porción final del corte (al suroeste), se aprecia la similitud con el estereograma de la Figura 4.15 .....	91

## Índice de Tablas

Tabla 3.1. Características de los sondeos exploratorios realizados. (Coordenadas en UTM, zona 14 N, Datum: WGS84).....	23
Tabla 3.2. Tabla de características de cada tendido de refracción sísmica (TRS) realizado.....	31
Tabla 4.1. Características de las discontinuidades en el corte.....	50
Tabla 4.2. Rango de inestabilidad según el patrón de color.....	54
Tabla 4.3. Lista de elementos inestables en el corte.....	57
Tabla 4.4. Tabla geológico-geotécnica del corte.....	61
Tabla 4.5. Tabla con distintos valores de resistencia a la compresión simple en el corte.....	72
Tabla 4.6. Resultados obtenidos del ensayo PLT en una muestra de roca del corte.....	73
Tabla 4.7. Valoración del parámetro de Resistencia a la compresión simple (RCS).....	75
Tabla 4.8. Valoración del parámetro RDQ.....	76
Tabla 4.9. Valoración del parámetro Espaciamiento.....	76
Tabla 4.10. Valoración de las condiciones de discontinuidades.....	78
Tabla 4.11. Valoración del parámetro Agua.....	78
Tabla 4.12. Valoración del parámetro Orientación respecto a obra.....	79
Tabla 4.13. Clasificación geomecánica (RMR) del corte; con las puntuaciones asignadas a cada parámetro.....	79
Tabla 4.14. Clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), en verde resalta la clasificación geomecánica del corte estudiado.....	80
Tabla 4.15. Clasificación GSI del corte.....	81
Tabla 4.16. Parámetros considerados en el criterio de Hoek y Brown.....	83
Tabla 4.17. Cohesión y ángulo de fricción interna del criterio de Mohr-Coulomb obtenidos a partir del criterio de Hoek-Brown.....	83
Tabla 4.18. Orientación de discontinuidades presentes en el corte.....	86
Tabla 4.19. Mecanismos de falla en el corte.....	91

## **RESUMEN**

La autopista Durango – Mazatlán 40D representa una de las obras de comunicación terrestre más importante en los últimos años. Significó superar diversos retos ingenieriles como la apertura de cortes y túneles en formaciones rocosas de la Sierra Madre Occidental, así como el levantamiento de diversos puentes, entre los que destaca el Puente Baluarte.

Entre los km 143+160 y 144+720 se encuentra el corte carretero correspondiente al presente trabajo, presenta longitud mayor a los 1,000 m y alturas variables desde 20 hasta 70 m. El principal problema que presenta este corte es la caída de bloques de roca de diversos tamaños.

Este estudio fue realizado en tres etapas: recopilación de información; trabajo en campo; procesamiento y análisis de información para la obtención de resultados finales. Fueron realizados levantamientos geológicos de campo, toma de datos geotécnicos con martillo Schmidt y máquina de carga puntual (PLT), tendidos sísmicos de refracción y sondeos exploratorios.

La geología que impera en la zona está conformada por rocas volcánicas extrusivas, como tobas, riolitas e ignimbritas; mismas que predominan a lo largo de la Sierra Madre Occidental. En la zona de estudio hay rocas principalmente riolíticas; con poca alteración, son resistentes y moderadamente fracturadas; no hay grandes rasgos estructurales que incidan en la estabilidad del corte.

El corte presenta cuatro familias de discontinuidades. La familia de mayor relevancia es la correspondiente con la pseudoestratificación, cuya dirección de inclinación es hacia la cara del talud. Con base en la densidad del fracturamiento, grado de alteración y posible afectación a la vía fueron

identificados diversos elementos con grados de inestabilidad bajo, moderado y elevado.

Los parámetros geotécnicos obtenidos indican que el macizo rocoso es resistente; con valores de Resistencia a la Compresión Simple mayores a 55 MPa. De igual forma, la clasificación geotécnica mediante RMR y GSI muestran que el macizo rocoso es regular a bueno, con generación de bloques regulares.

Es recomendable realizar estudios de mayor detalle para evaluar la resistencia al corte en el plano de pseudoestratificación, a fin de diseñar apropiadamente el tratamiento para su remediación.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El desarrollo de infraestructura carretera en México es parte vital de la economía y crecimiento del país. La generación de nuevas y mejores carreteras siempre es un reto a la ingeniería debido a las condiciones geomorfológicas que imperan en casi la totalidad de la República Mexicana; condiciones producto de la diversidad geológica que tiene el país.

Claro ejemplo es la carretera de cuota 40D Durango – Mazatlán, que fue construida para reducir el tiempo de traslado entre las ciudades de Victoria de Durango, Durango y Mazatlán, Sinaloa. Esta autopista representa una obra de ingeniería de gran envergadura; pues consta de diversos túneles y puentes, incluyendo al puente Baluarte, uno de los puentes atirantados más altos del mundo; que en conjunto atraviesan la Sierra Madre Occidental de Este a Oeste.

Asimismo, la autopista Durango – Mazatlán consta también de varios cortes, o taludes, generalmente hechos en rocas volcánicas. Estas obras pueden generar que la roca quede expuesta a efectos erosivos, degradando sus propiedades físicas al punto en que se fragmenta, lo que puede ocasionar que bloques de diversos tamaños caigan hacia la autopista.

Conocer la geología que existe en la zona, es el primer paso para la evaluación de un talud; con ello es posible conocer el posible riesgo que las rocas de la zona representan hacia la autopista y sus usuarios.

### 1.1. Localización y aspectos generales

La zona de estudio se encuentra en el estado de Durango, casi en su límite suroccidental con el estado de Sinaloa. El corte cuyo cadenamamiento central es en el km 144+000 se ubica sobre la nueva autopista 40D Durango – Mazatlán, dentro del municipio Pueblo Nuevo; las localidades más cercanas son Chavarría Nuevo y Pino Gordo (Figura 1.1).

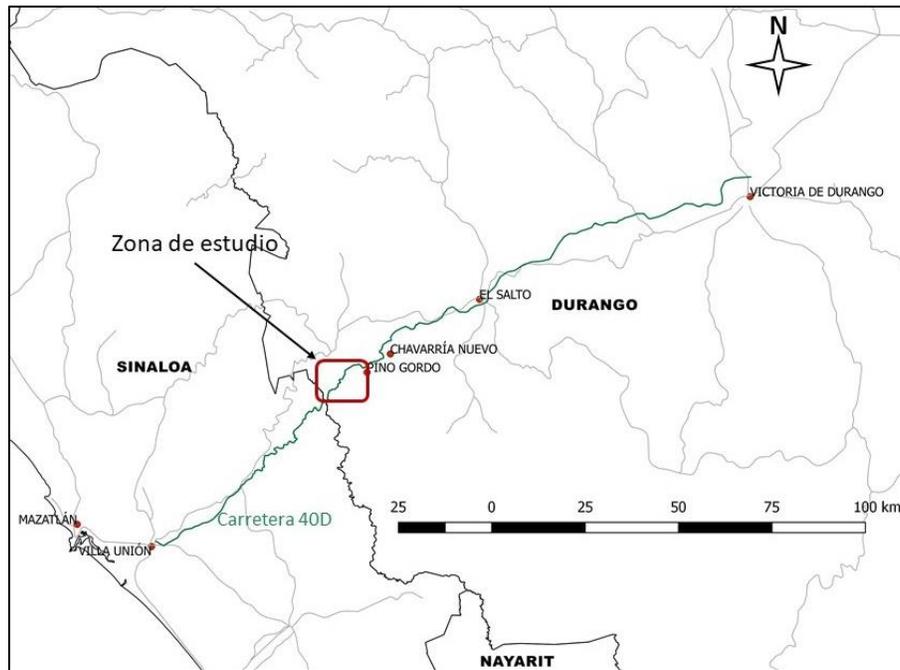


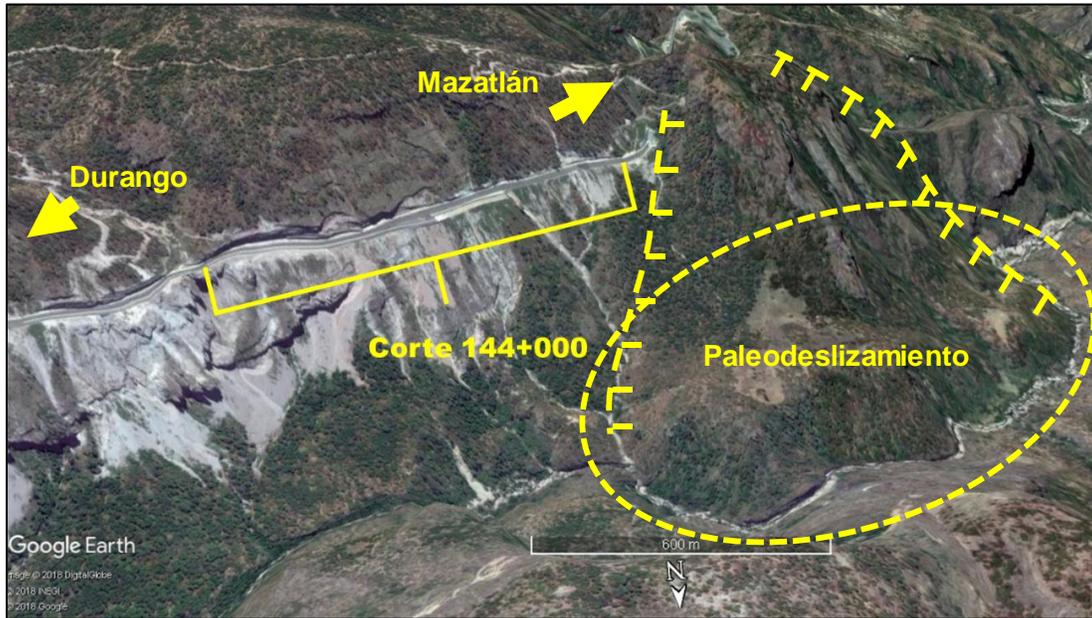
Figura 1.1. Localización general de la zona de estudio. (Elaborado en Qgis 2.18, con archivos .shp de CONABIO, 2018)

Para llegar a la zona de estudio, es necesario arribar primero a la ciudad de Mazatlán o la ciudad de Durango. Desde Mazatlán hay que salir con rumbo al sureste, por la carretera federal número 15 hacia la localidad de Villa Unión; posteriormente tomar la desviación a la carretera de cuota 40D Durango – Mazatlán, sobre la cual deberá recorrerse aproximadamente 80 km para llegar a la ubicación del corte. Desde la ciudad de Durango hay que salir con rumbo al oeste, hacia la carretera de cuota 40D Durango – Mazatlán; sobre ésta se debe recorrer un aproximado de 120 km para llegar a la ubicación del corte.

La morfología en la zona de estudio es generalmente abrupta, con pendientes del terreno que superan los  $45^\circ$ . Asimismo, en la parte norte y casi paralelo al trazo de la carretera, se encuentra el inicio del Río Baluarte, por lo que existe una cañada con más de 200 m de profundidad. Cabe señalar que existen expresiones morfológicas que indican paleodeslizamientos. (Figura 1.2).

El corte en estudio tiene alturas de entre 20 y 70 m, con longitud aproximada de 1,560 m, puesto que se extiende del km 143+160 al km 144+720; sin embargo, para su identificación le fue asignado como cadenamiento central el km 144+000. Morfológicamente posee pendientes elevadas, inclusive algunos frentes como escarpes además de huecos que manifiestan deslizamientos antiguos. Hacia el extremo noreste está limitado por un arroyo; al suroeste está limitado por otro arroyo y la entrada al túnel “Tortuga” (Fotografía 1.1).

Aproximadamente tres cuartas partes de las laderas donde se efectuaron los cortes para la autopista, manifiesta claramente planos de pseudoestratificación que buzan hacia la vialidad, confiriendo a la ladera forma aplanada con inclinaciones variables entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$ .



*Figura 1.2. Modelo tridimensional del relieve en la zona del corte.  
Imagen tomada y modificada de Google Earth Pro, 2018*



*Fotografía 1.1. Panorámica del corte donde se observa la morfología y dimensiones del talud. Mosaico fotográfico obtenido con dron*

Los taludes del corte 144+000 tienen algunos tratamientos previos en algunos sectores, como malla de triple torsión entre los km 144+020 y 144+120 aproximadamente; igualmente en este sector existe un recubrimiento de concreto lanzado, que cubre una menor superficie que la malla, como se observa en la Fotografía 1.2.



*Fotografía 1.2. Porción del corte, entre los km 144+020 y 144+120; destaca la zona de concreto lanzado y malla de triple torsión.*

Otro sector con malla de triple torsión se sitúa entre los cadenamientos 144+420 a 144+500. Sin embargo, parte de la malla se encuentra rota y desprendida de la cara del talud, probablemente por algún desprendimiento de roca anterior. Cabe señalar que esta malla sólo cubre una banda de 30 m desde el hombro del talud (Fotografía 1.3).



*Fotografía 1.3. Zona del corte con presencia de malla de triple torsión (círculo amarillo); la malla está rota y desprendida de la parte inferior*

La apertura de este corte probablemente fue realizada de forma escalonada, lo que se traduce en taludes de gran altura que poseen forma de escalones (ver Fotografía 1.1), estos pueden presentar bermas en algunos sectores; no obstante, son muy escasas para la magnitud del corte.

Es importante señalar que no existen otras obras de drenaje, lo que también propicia que la cara del talud esté sujeta al intemperismo y erosión constante, pues el flujo de agua escurre principalmente hacia la cara del talud.

## **1.2. Situación problemática**

Desde la construcción de la carretera 40D los cortes o taludes realizados han sido propensos a desprendimientos de bloques de diferentes tamaños, siendo éste el principal problema, ya que diariamente se requiere hacer limpieza en la carretera para remover los bloques caídos y evitar accidentes.

Los principales problemas que se presentan son debido a la intersección de discontinuidades del macizo rocoso que favorecen el desprendimiento de bloques. Estas discontinuidades son susceptibles a la infiltración de agua, mayor intemperismo y en ocasiones mayor erosión.

Particularmente, la dirección del corte implica que la pseudoestratificación de las rocas volcánicas influya de manera determinante en la estabilidad de los taludes, aproximadamente en  $\frac{3}{4}$  partes de su longitud.

## **1.3. Objetivos**

El objetivo general del estudio es determinar las características geológico-geotécnicas del corte, así como obtener parámetros geotécnicos para con ello realizar el análisis de estabilidad. Con lo anterior, diseñar los tratamientos a implementar para garantizar su estabilidad.

Para cumplir con el objetivo general del estudio, fueron propuestos los siguientes particulares:

- Definir la distribución y características físicas de las unidades litológicas que conforman los taludes.
- Realizar levantamientos geológico-estructurales detallados de las discontinuidades que afectan el macizo rocoso, que permitan definir el número de familias y las principales características ingenieriles de cada una de ellas. Así como identificar y caracterizar zonas de falla.

- Efectuar análisis de estabilidad cinemáticos con base en proyecciones estereográficas de las discontinuidades.
- Evaluar la calidad del macizo rocoso por medio de clasificaciones geomecánicas.
- Determinación de propiedades de resistencia de las rocas, con base en ensayos geotécnicos de campo (esclerómetro o martillo Schmidt y el índice de carga puntual).
- Identificación y ubicación de zonas potencialmente inestables

## **2. GENERALIDADES**

En este capítulo se abordan los temas que conforman el marco físico regional de la zona de estudio, tales como los aspectos fisiográficos, geomorfológicos, geológicos, estructurales, entre otros, además de situar a la zona de estudio dentro de la regionalización sísmica de la República Mexicana, lo cual hoy en día es un requisito para cualquier estudio de estabilidad de taludes.

Con la descripción de este capítulo se pretende ofrecer aspectos geológicos más generales que sirvan como preludeo a la información específica del corte.

### **2.1. Fisiografía y geomorfología**

La zona donde se sitúa el corte se localiza fisiográficamente dentro de la provincia Sierra Madre Occidental, dentro de la subprovincia Barrancas y Meseta Lábrica (Figura 2.1).

La zona de estudio está inmersa en una serie de elevaciones topográficas, varias de ellas a manera de mesetas, que son disectadas por profundos y angostos cañones, algunos de ellos generados por fallas cuya traza coincide con el cauce de algunos ríos, otros causados por la erosión de corrientes fluviales. (Figura 2.2).



Figura 2.1. Localización de la zona de estudio en un mapa de Provincias fisiográficas  
Fuente propia con archivos shp de CONABIO, 2018



Figura 2.2. Geomorfología de la zona a través de una imagen satelital de Google Earth Pro, 2018

## **2.2. Marco geológico regional**

La zona de estudio está situada dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental, que a su vez conforma una provincia geológica del mismo nombre en la cual predominan rocas volcánicas de los periodos Paleógeno y Neógeno.

### *Geología regional*

De acuerdo con información del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2009), así como de Aranda-Gómez et al. (1997), el basamento de la zona de estudio corresponde con rocas del Terreno Guerrero, conformado por una secuencia de meta-areniscas y pizarras (Jt Mar-Pz) de edad Jurásico (Tithoniano).

Sobreyace de manera discordante un conjunto de rocas conocido como Secuencia Volcánica Inferior, dentro del que se hallan andesitas, brechas volcánicas andesíticas, riolitas, tobas riolíticas, sedimentos volcanoclásticos e intrusiones hipabisales (Tpae A BvA), con edad de Paleoceno y Eoceno. Existen algunas intrusiones graníticas-granodioríticas (Te GrGd) del Eoceno Medio.

Por encima de la Secuencia Volcánica Inferior se encuentra su homónimo, pero Superior, de edad Oligoceno. Este grupo de rocas está conformado por ignimbritas, tobas riolíticas, brechas volcánicas riolíticas con horizontes basalto-andesíticos, así como domos y troncos riolíticos (To PR), domos exógenos y derrames lávicos de composición riolítica (To R).

En última instancia, sobreyacen de forma discordante a las unidades antes mencionadas rocas pertenecientes al denominado Grupo El Salto-Espinazo; conforman una secuencia de tobas riolíticas e ignimbritas (Tm TR-Ig).

Tectónicamente se piensa que la región está formada por la acreción de los terrenos Alisitos y Guerrero con Norteamérica durante el Mesozoico Tardío al Cenozoico Temprano.

Con la apertura del Golfo de México, en el Jurásico Superior, inició un periodo de transgresión marina que cubrió gran parte del territorio mexicano; posteriormente, la acreción de un arco magmático contra México da inicio a un periodo de deformación compresiva conocido como Orogenia Laramide. Asimismo, la subducción en la costa oeste por parte de la placa de Farallón debajo de la placa Norteamérica generó vulcanismo abundante. En Oligoceno Tardío - Mioceno Temprano el origen de potentes secuencias de rocas ignimbríticas, tobas riolíticas, así como algunas rocas de composición básica, dan lugar a lo que se considera Orogenia del Cenozoico Medio.

### Geología estructural

En la zona de estudio y alrededores, el Servicio Geológico Mexicano (SGM) ha cartografiado diversas fallas regionales cuyas características generales se describen a continuación. La ubicación de estas estructuras geológicas con respecto a la zona de estudio se muestra en la Figura 2.4.

En el oeste de México se han presentado muchos episodios importantes de extensión cortical que comenzaron en el Oligoceno y que continúa hasta el presente. La extensión probablemente empezó hace 30 o 32 millones de años (Oligoceno Temprano). En el sur de Sinaloa, diques con rumbo N-NW se piensa que se emplazaron hace 32 millones de años y de manera perpendicular a la extensión E-NE, aunque el fallamiento que puede reconocerse no se presentó antes de 17 millones de años atrás. El fallamiento importante parece haber comenzado hace 28 a 29 millones de años cerca de Rodeo y Nazas en el norte de Durango. Muchos sistemas de

vetas en el noroeste de México tienen rumbo N-NW y se formaron en el intervalo entre 26 y 31 millones de años.

Dentro de las principales fallas reportadas, aledañas a la zona de estudio, se tiene que prácticamente todas son normales, con orientaciones preferenciales de tipo NW-SE y E-NE-W-SW; destaca lo siguiente:

Las fallas La Huerta y El Frijolar muestran dirección casi E-W, con el bloque caído hacia el norte, muestran una longitud aproximada de 2.7 y 6 km respectivamente. De igual orientación, la falla El Remo presenta bloque caído hacia el sur, con una extensión de aproximadamente 2 km. Estas fallas son las más cercanas al corte de estudio (ver Figura 2.4) y por tanto, las de mayor relevancia. Adicionalmente, con orientación NW-SE se presentan las fallas El Abrevadero y Las Palmas, de tipo normal y con bloque caído hacia el oeste y este, respectivamente.

### Pseudoestratificación

La condición de depósito de las rocas que predominan en la zona tiene un papel importante en la estabilidad del corte. Considerando la información cartográfica del SGM, existen varios sitios en donde la pseudoestratificación de las rocas que conforman la unidad de tobas y brechas riolíticas (To TR-BvR) pudo medirse. La dirección de la inclinación es variable entre NE 5° y NW 60° con magnitudes entre 10° y 68°, de acuerdo con lo reportado por el SGM. La dirección de la pseudoestratificación reportada por el SGM tiende a ser perpendicular al trazo de la autopista con inclinación desfavorable para la vía.

A continuación, la columna estratigráfica regional sintetizada de la zona de estudio, así como un recorte de la carta F13-A27 de la zona aledaña al corte (Figura 2.3 y Figura 2.4).

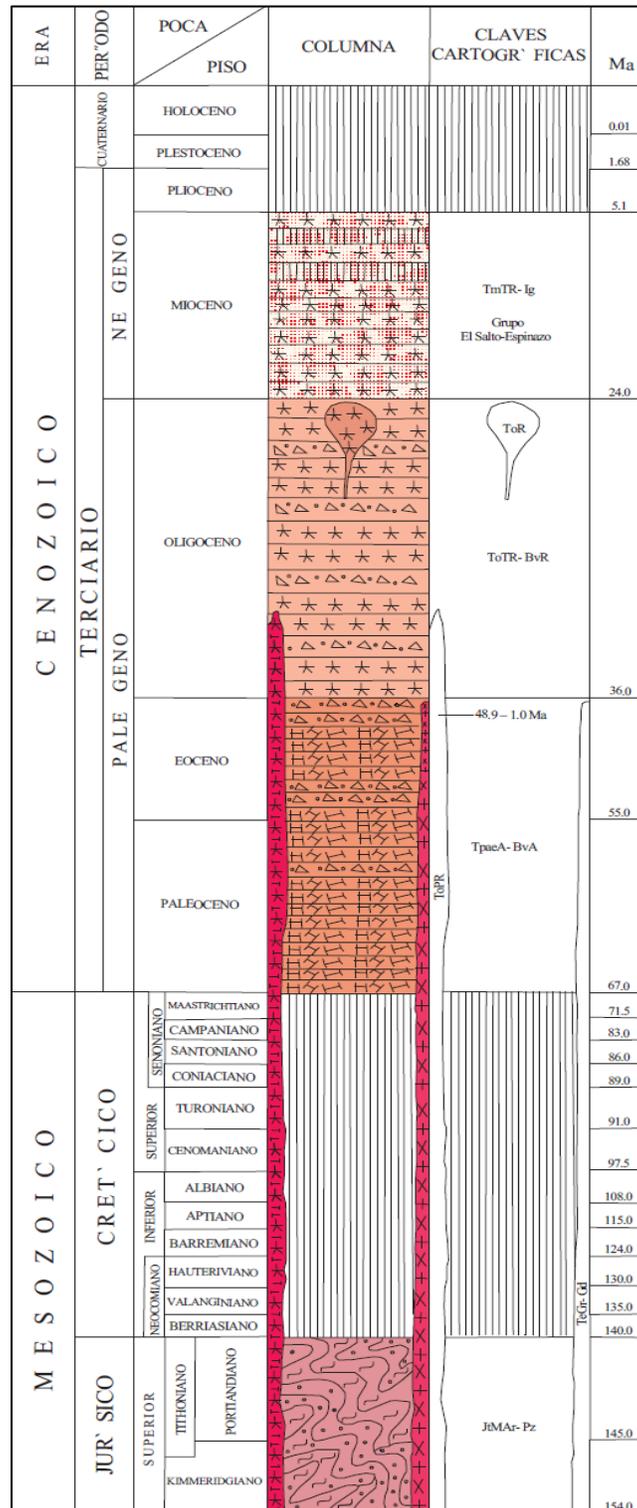


Figura 2.3. Columna estratigráfica regional de la zona de estudio (SGM, 2009)

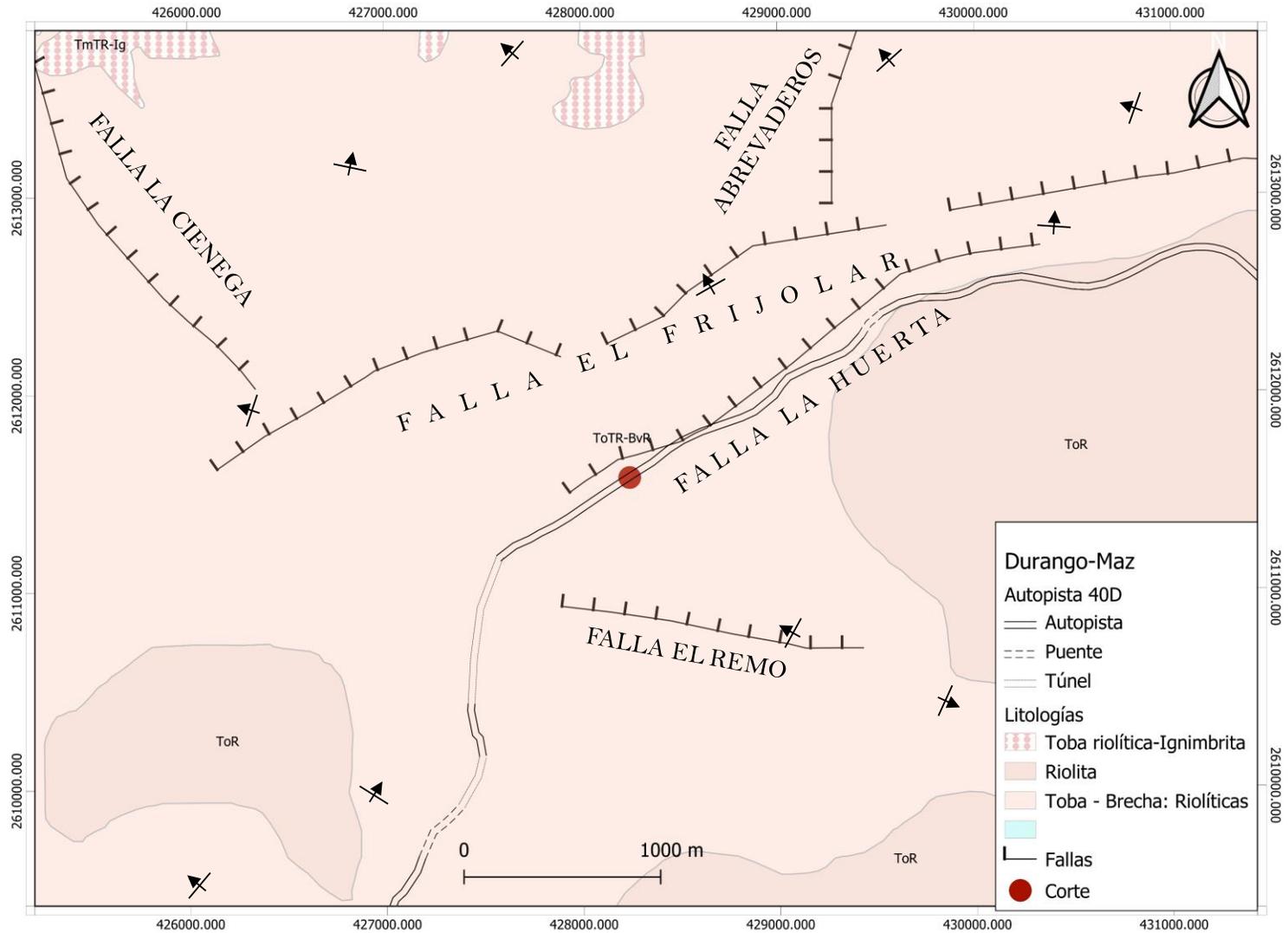


Figura 2.4. Mapa geológico regional de la zona de estudio. (Modificado de SGM, 2009)

### **2.3. Riesgo sísmico**

Para evaluar el riesgo sísmico se usan espectros de diseño que dependen entre otros aspectos, de la cercanía del sitio de estudio a las fuentes que ocasionan los temblores y de las condiciones locales del terreno.

En el pasado (CFE, 1993), de una manera práctica se tomaba la regionalización sísmica del territorio mexicano que consistía en cuatro zonas y a una clasificación en tres tipos de terreno (I firme, II intermedio y III blando), ver Figura 2.5. De esta manera se consideraban cinco parámetros del espectro consignados en una tabla en que se atendía a la zona sísmica y al tipo de terreno.

El usuario determinaba la zona sísmica en una carta de Regionalización Sísmica de la República Mexicana (B en nuestro caso). Se procedía con una clasificación del tipo de terreno en función de dos parámetros: el periodo dominante y la velocidad de propagación de ondas de corte en el sitio.

Como resultado para la República Mexicana se tenían doce espectros de diseño regionales, que cubrían grandes sectores y una gran variedad de condiciones del terreno, en el caso que aquí nos ocupa se tendrían valores de alrededor de 0.14 g.

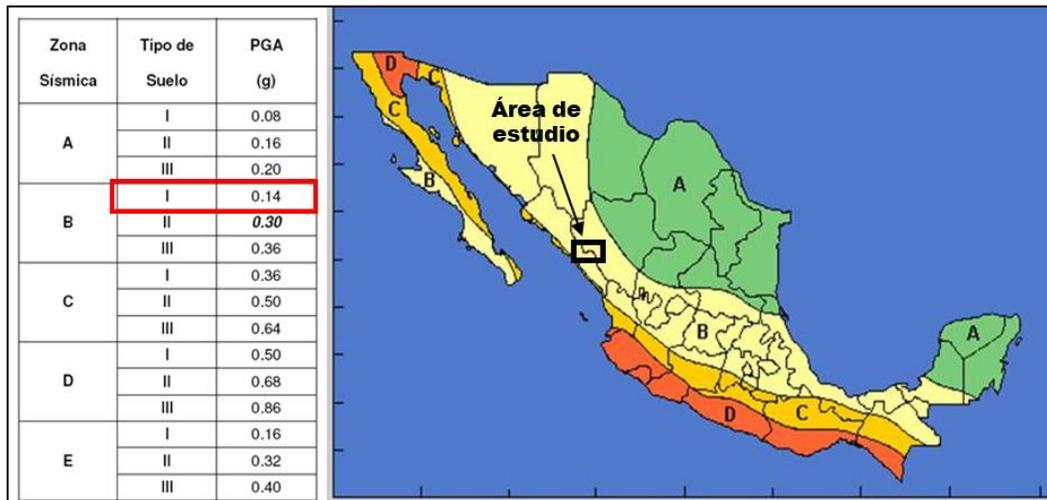


Figura 2.5. Regionalización sísmica y tabla de cálculo de la aceleración máxima horizontal (PGA), de acuerdo con CFE, 1993, en nuestro caso se tendrían valores de 0.14 g.

Fue utilizada la versión en línea del programa PRODISIS, disponible en la página electrónica del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), para el cálculo de algunos parámetros de diseño. En esta página se introducen las coordenadas del sitio de interés y son devueltos los valores de: 1) aceleración máxima ( $\text{cm/s}^2$ ), 2) factor de sitio, 3) factor de respuesta, 4) una gráfica del espectro de respuesta de referencia.

Para el caso de la zona donde se ubica este corte, la aceleración máxima es de **52.07 ( $\text{cm/s}^2$ )**, un factor de sitio de **1** y un factor de respuesta de **2.47**.

Derivado de estos resultados la aceleración máxima horizontal (PGA) tendría un valor de 0.052 y no 0.14 como la tabla sugerida por CFE.

Las siguientes imágenes (Figura 2.6 y Figura 2.7) muestran los resultados antes mencionados.

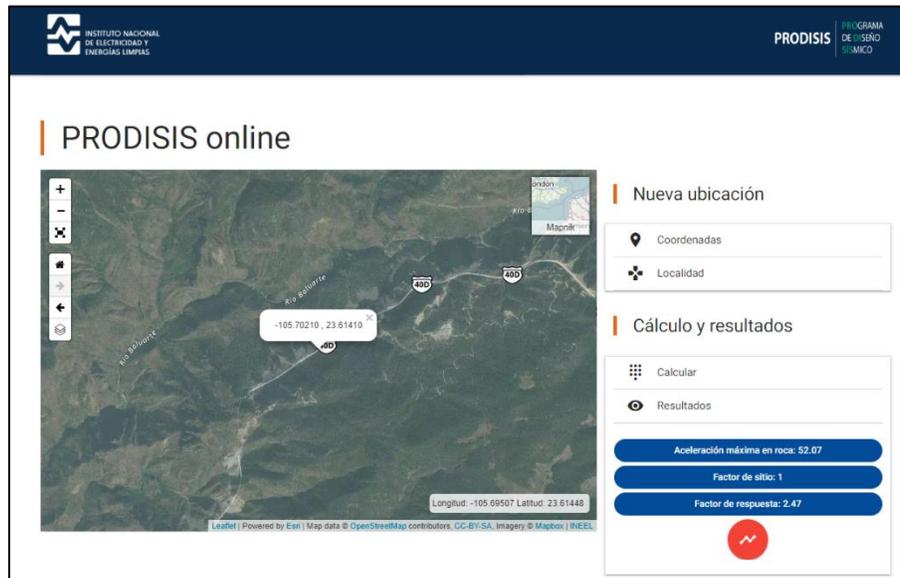


Figura 2.6. Visualización de PRODISIS en línea con valores de aceleración máxima y factores de sitio y de respuesta para el corte en cuestión

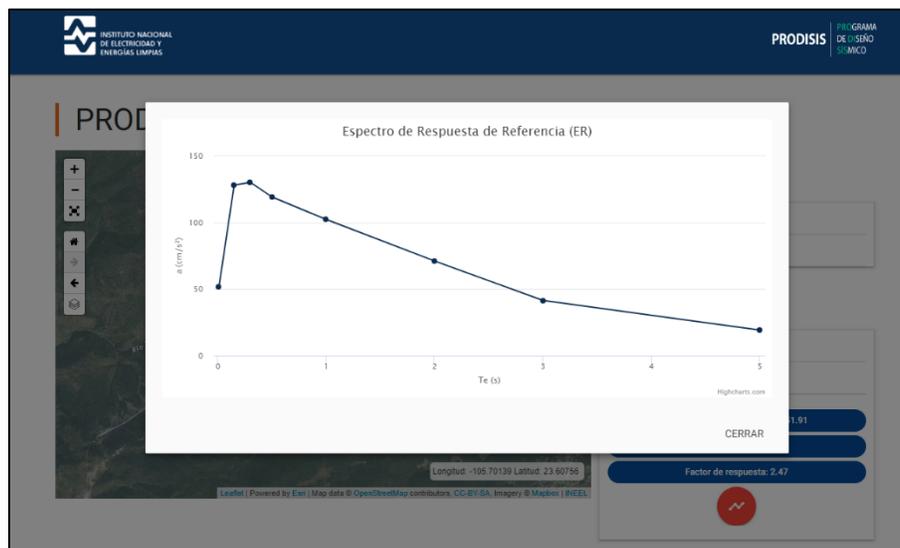


Figura 2.7. Visualización de PRODISIS en línea con gráfica de espectro de respuesta de referencia (ER)

### **3. ACTIVIDADES REALIZADAS**

Enseguida se describe de manera breve y concisa la metodología con la que se efectuó el estudio.

#### **3.1. Recopilación y análisis de información**

Fue revisada la información disponible sobre la geología de la zona. Esta información fue obtenida del Servicio Geológico Mexicano (SGM), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), entre otras fuentes.

La revisión de estos documentos ayudó a entender de mejor manera las condiciones geológicas regionales presentes, descritas en el capítulo previo.

De igual manera, fueron de gran utilidad para conocer las condiciones problemáticas que se han presentado a lo largo de la construcción y operación de la carretera 40D.

##### *Análisis fotogeológico*

Mediante el programa Google Earth Pro, fueron realizados análisis geológicos preliminares y regionales de la zona de estudio. El programa provee de imágenes satelitales con resolución aceptable para identificar de manera general, litologías, estructuras geológicas, patrones de drenaje, entre otros aspectos. El uso de esta herramienta permitió un primer acercamiento visual a las condiciones del sitio en cuestión, como su morfología y vías de acceso.

Posteriormente se efectuó un análisis fotogeológico de mayor detalle a través de fotografías y videos obtenidos mediante un vuelo con DRON en la zona del corte. Estas imágenes fueron de gran ayuda en la identificación de zonas inestables en las partes altas de los taludes en donde la observación a nivel del terreno en campo era imposible o en sitios en donde el acceso al sitio era prácticamente nulo.

### **3.2. Actividades desarrolladas en campo y gabinete**

Con el objetivo de conocer con mayor detalle las características del macizo rocoso presente en el corte, se llevaron a cabo levantamientos geológicos superficiales.

De las unidades litológicas presentes se identificaron las siguientes características:

- Origen, color, textura, mineralogía y clasificación petrológica del macizo rocoso.
- Relaciones estratigráficas cuando aplica.
- Distribución superficial y espesores aproximados.
- Clasificación del macizo rocoso con base en los parámetros geológico-geotécnicos relativos a los grados de alteración, consistencia y fracturamiento.
- Características de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso

En lo concerniente a las discontinuidades en el macizo rocoso se identificaron los siguientes aspectos:

- Tipo de discontinuidad, es decir, falla, fractura, pseudoestratificación, o deslizamiento.
- Dirección y buzamiento de los planos que definen las discontinuidades
- Estado que presentan: continuidad espacial, espaciamiento, abertura, alteración de las superficies de la estructura, existencia de relleno y sus características, presencia de humedad.

También fueron identificados aspectos de gran relevancia en la estabilidad del corte como:

- Presencia de zonas potencialmente inestables

- Estado de tratamientos previos.

La Fotografía 3.1 y Fotografía 3.2 ilustran parte de las actividades antes descritas.



*Fotografía 3.1. Muestreo del macizo rocoso en cara del talud*



*Fotografía 3.2. Medición de discontinuidades del macizo rocoso en parte superior del corte*

Se tomaron muestras de roca representativas del corte, con la finalidad de efectuar ensayos de carga puntual y contar con parámetros necesarios para la clasificación geomecánica del macizo rocoso.

### Sondeos exploratorios

Como parte de las actividades de exploración, en la zona del corte fueron realizados cinco (5) sondeos exploratorios con la finalidad de conocer el estado en que se encuentra el macizo rocoso que conforma al corte. La Tabla 3.1 ilustra las características generales de cada sondeo efectuado en el corte; principalmente hechos en la parte alta de la ladera; excepto el sondeo C4-S-06, realizado al pie del talud para evaluar las condiciones en la zona de afectación por falla (Ver Capítulo 4).

Los sondeos exploratorios fueron realizados con broca de diámetro NQ, con recuperación continua de núcleos; lo que permitió obtener muestras de roca que fueron descritas geológicamente.

Las labores concernientes a esta actividad dieron como resultado perfiles estratigráficos de cada sondeo, con una gráfica de recuperación y RQD.

Tabla 3.1. Características de los sondeos exploratorios realizados.  
(Coordenadas en UTM, zona 14 N, Datum: WGS84)

<b>Sondeo</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Inclinación</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Observaciones</b>
C4-S-01	15.00	90°	427,754	2,612,381	Sondeos realizados en la parte alta de la ladera
C4-S-02	17.00	90°	427,845	2,612,376	
C4-S-03	19.55	90°	428,053	2,612,350	
C4-S-04	20.12	90°	428,161	2,612,331	
C4-S-05	10.00	45°	427,929	2,611,848	Sondeo situado al pie del talud

### Estimación de Resistencia a la Compresión Simple

Algunos de los trabajos realizados en campo y oficina, fue realizar pruebas para estimar la resistencia a la compresión simple de la roca en el corte. Los ensayos efectuados en campo fueron mediante el esclerómetro (o martillo Schmidt) y en oficina se llevaron a cabo pruebas de carga puntual (PLT) a muestras de roca irregulares colectadas durante el reconocimiento geológico superficial.

También fueron estimados los parámetros de cohesión (C) y ángulo de fricción interna ( $\Phi$ ) del macizo rocoso para condiciones superficiales, mediante el uso del programa computacional especializado denominado RocLab v1.010, a partir de los otros parámetros como la resistencia a la compresión simple, las clasificaciones geomecánicas, altura del corte, densidad de la roca, entre otros.

A continuación, se describe brevemente la metodología y funcionamiento para la obtención de los citados parámetros.

#### *Esclerómetro o martillo Schmidt*

El esclerómetro es un instrumento que consta de un pequeño cilindro metálico que dispone de un muelle en su interior y una punta retráctil. Al presionar contra la roca el instrumento, la punta hace que el muelle se dispare, lo que genera un golpe a la roca y una marca de rebote; este valor de rebote es mostrado a un costado del instrumento. El valor de rebote se correlaciona con un estimado de resistencia a la compresión simple mediante una gráfica que acompaña al equipo (Figura 3.1), el valor obtenido se encuentra en  $\text{kg/cm}^2$ , el cual es posible convertir a MPa fácilmente.

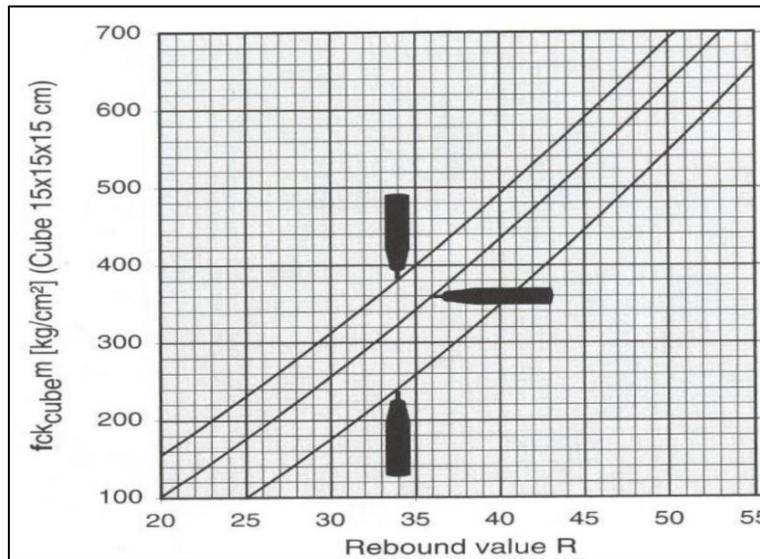


Figura 3.1. Gráfica para la correlación entre el valor de rebote y la resistencia a la compresión simple

Para fines del estudio fueron tomadas varias lecturas con el esclerómetro; en este caso se usó un martillo Schmidt de tipo N marca Proceq; con lo que se obtuvo un valor de rebote promedio (R) en el frente del corte, así como en los planos de las tres principales familias de discontinuidades.

El rebote promedio fue transformado a un valor estimado de la resistencia a la compresión simple de acuerdo con la gráfica de la Figura 3.1.

Las pruebas efectuadas en el corte se llevaron a cabo en la parte inferior del talud, dada la imposibilidad de realizar mediciones en la porción superior de manera segura.



*Fotografía 3.3. Valoración del macizo rocoso en el frente del talud antes de hacer en ensaye con el esclerómetro*

### *Ensayo de carga puntual (PLT)*

El ensayo de carga puntual (PLT) permite conocer un aproximado del valor de resistencia a la compresión simple ( $\sigma$ ) a partir del índice de resistencia a la carga puntual ( $I_s$ ). Este ensayo se efectuó a muestras de roca del talud obtenidas en el reconocimiento geológico superficial.

El equipo utilizado consta de una cámara semicerrada que en su interior tiene una prensa con dos puntas cónicas, las cuales son las responsables de ejercer presión hacia una muestra de roca, que puede ser de distinta geometría (Figura 3.2), la presión es ejercida por un gato hidráulico conectado a la misma prensa.

El funcionamiento de esta prueba es romper una muestra de roca, a partir de la presión ejercida en ella con las puntas cónicas. Está basado en conocer el índice de resistencia a la carga puntual ( $I_s$ ) y con ello obtener un aproximado del índice de resistencia a la compresión simple ( $\sigma$ ).

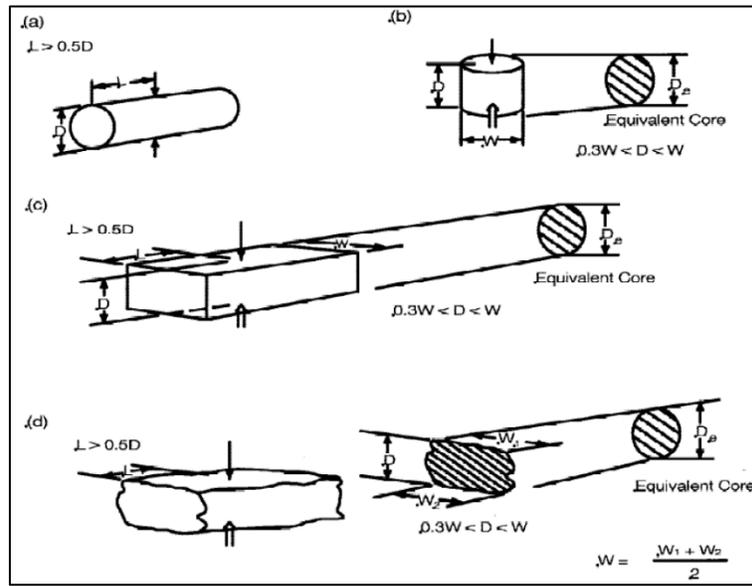


Figura 3.2. Esquema de relaciones entre dimensiones de las muestras a ensayar y el diámetro de núcleo equivalente

Para hacer la correlación entre los valores de resistencia de carga puntual y compresión simple ( $I_s$  y  $\sigma$ ) es necesario utilizar un ajuste que considera la resistencia a la carga puntual en muestras diametrales de 50 mm, conocido como índice de resistencia a la carga puntual corregido ( $I_{s[50]}$ ), este valor es obtenido por la máquina misma, o en su defecto, calculado a partir del valor  $I_s$ . La relación que conjuga ambos valores es la siguiente:

$$\sigma = 23 * I_{s[50]}$$

- $\sigma$  = índice de resistencia a la compresión simple
- $I_{s[50]}$  = índice de resistencia a la carga puntual corregido

El equipo utilizado para este trabajo es de la marca GCTS Testing Systems, modelo PLT-2W el cual incorpora un programa computacional que permite la obtención del índice de resistencia a la carga puntual corregido ( $I_{s[50]}$ ).



Fotografía 3.4. Equipo utilizado para ensayos de carga puntual

*Estimación de cohesión ( $C$ ) y ángulo de fricción interna ( $\Phi$ ) del macizo rocoso mediante el programa RocLab*

Como una primera aproximación en la obtención de la cohesión y el ángulo de fricción interna del macizo rocoso, a falta de ensayos de compresión triaxial, se utilizó el programa especializado RocLab v. 1.010 desarrollado por la empresa Rocscience.

Este programa hace uso del criterio de rotura para macizos rocosos propuesto por Hoek y Brown, incorporando parámetros como:

- Resistencia a la compresión simple de la roca intacta
- Valor del Índice de Resistencia Geológica (GSI)
- Valor de la constante  $m_i$
- Factor de perturbación  $D$  (debido al método y forma de excavación de la roca)
- Peso volumétrico de la roca
- Altura del talud

Con estos valores de entrada, el programa calcula la cohesión y ángulo de fricción interna del criterio de Mohr-Coulomb.

Los resultados obtenidos se tratan en el subcapítulo 4.5.

### **3.3. Exploración geofísica**

Fueron realizados 10 tendidos de refracción sísmica (TRS), de los que 9 tienen longitud de 120 m y uno de 60 m. Su distribución está basada en lo observado durante el reconocimiento geológico en campo.

Como se aprecia en la Figura 3.3, 4 TRS fueron de manera vertical sobre el corte, metros arriba del hombro del talud; los tendidos TSC4-01, TSC4-02 y TSC4-03, situados en la parte oriental del corte; son los tendidos realizados a mayor altura. El tendido TSC4-09 se encuentra hasta la parte poniente del corte, a una altura de 30 m aproximadamente. Estos tendidos se efectuaron sobre o cerca de zonas con problemas de estabilidad y donde se pudiera tener acceso, situación no común en la zona de estudio. Con ello se buscó principalmente definir los espesores y distribución en el subsuelo de los materiales no consolidados o macizo rocoso descomprimido, susceptibles a la inestabilidad.

De igual forma, la Figura 3.3 muestra que los 6 TRS restantes fueron realizados de modo horizontal, en la cara del talud y a una altura de entre 1.5 y 2 m. El tendido TSC4-04 está situado hacia la parte más oriente. Los tendidos TSC4-05, TSC4-06, TSC4-07, TSC4-08 y TSC4-10 se presentan con orden numérico ascendente de oriente a poniente, siendo el tendido TSC4-07 el único que mide 60 m de longitud. Con ellos se buscó tener información de las condiciones del macizo rocoso hacia el interior del talud.

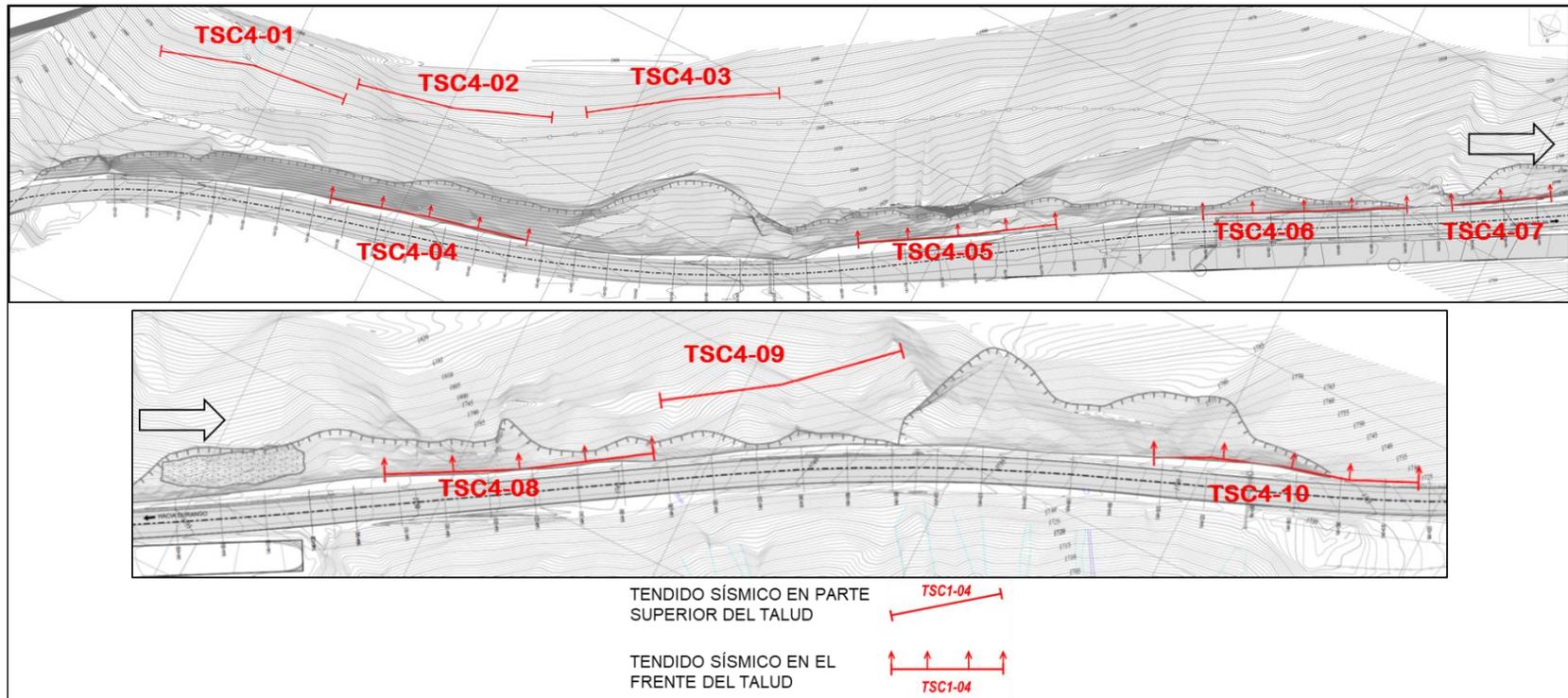


Figura 3.3. Distribución de los tendidos sísmicos realizados en el corte. La figura fue dividida debido a la longitud del corte.

La siguiente tabla resume las características de los tendidos realizados y en seguida algunas fotografías que ilustran estas actividades.

Tabla 3.2. Tabla de características de cada tendido de refracción sísmica (TRS) realizado

<b>Tendido sísmico</b>	<b>Tipo</b>	<b>Longitud (m)</b>
TSC4-01	Vertical	120
TSC4-02	Vertical	120
TSC4-03	Vertical	120
TSC4-04	Horizontal	120
TSC4-05	Horizontal	120
TSC4-06	Horizontal	120
TSC4-07	Horizontal	60
TSC4-08	Horizontal	120
TSC4-09	Vertical	120
TSC4-10	Horizontal	120



*Fotografía 3.5. Colocación de geófono para el tendido TSC4-01*



*Fotografía 3.6. Obtención de datos para el tendido TSC4-03*



*Fotografía 3.7. Obtención de datos para el tendido TSC4-09*

### **3.4. Procesamiento de la información e integración de resultados**

Una vez obtenidos los resultados de las actividades antes descritas, fue realizada la integración y análisis de todos los datos recabados, con los que se elaboró el informe final del estudio.

La información recopilada y revisada, el análisis fotogeológico, el reconocimiento geológico superficial, los datos de la exploración geofísica efectuada, los datos de los sondeos exploratorios, fue integrada y analizada para la obtención del modelo geológico local y una zonificación geológico-geotécnica del talud, con base en sectores que tienen diferente grado de inestabilidad.

Asimismo, el análisis de los parámetros de resistencia obtenidos, en conjunto con los datos medidos en campo de las discontinuidades, permitieron la clasificación del macizo rocoso en el talud. También fueron elaborados estereogramas de las discontinuidades y analizados en conjunto con el rumbo e inclinación del talud para determinar los mecanismos de falla cinemáticamente posibles.

Para el mejor entendimiento y presentación del estudio, el informe final entregado al cliente estuvo acompañado de Anexos y Planos.

#### **4. CONDICIONES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DEL CORTE**

Este capítulo aborda de manera más precisa las características geológico-geotécnicas del corte bajo estudio; se muestran únicamente los resultados a los que se llegó con la realización y análisis de todas las actividades descritas en los capítulos previos.

##### **4.1. Unidades litológicas**

El reconocimiento geológico superficial permitió la identificación de elementos inestables; como son bloques de roca, zonas y franjas del macizo rocoso que fueron clasificados en diferentes grados de inestabilidad. Este tema se abordará más adelante.

Las muestras obtenidas de los sondeos exploratorios auxiliaron a corroborar las unidades litológicas del corte, y el estado en que se encuentran.

Enseguida se exponen de manera breve los materiales observados en la zona de interés en secuencia temporal con respecto a su depósito; esto es, del más antiguo al más reciente. En la Figura 4.1 se aprecia de manera general la distribución de las unidades litológicas definidas en la zona del corte.

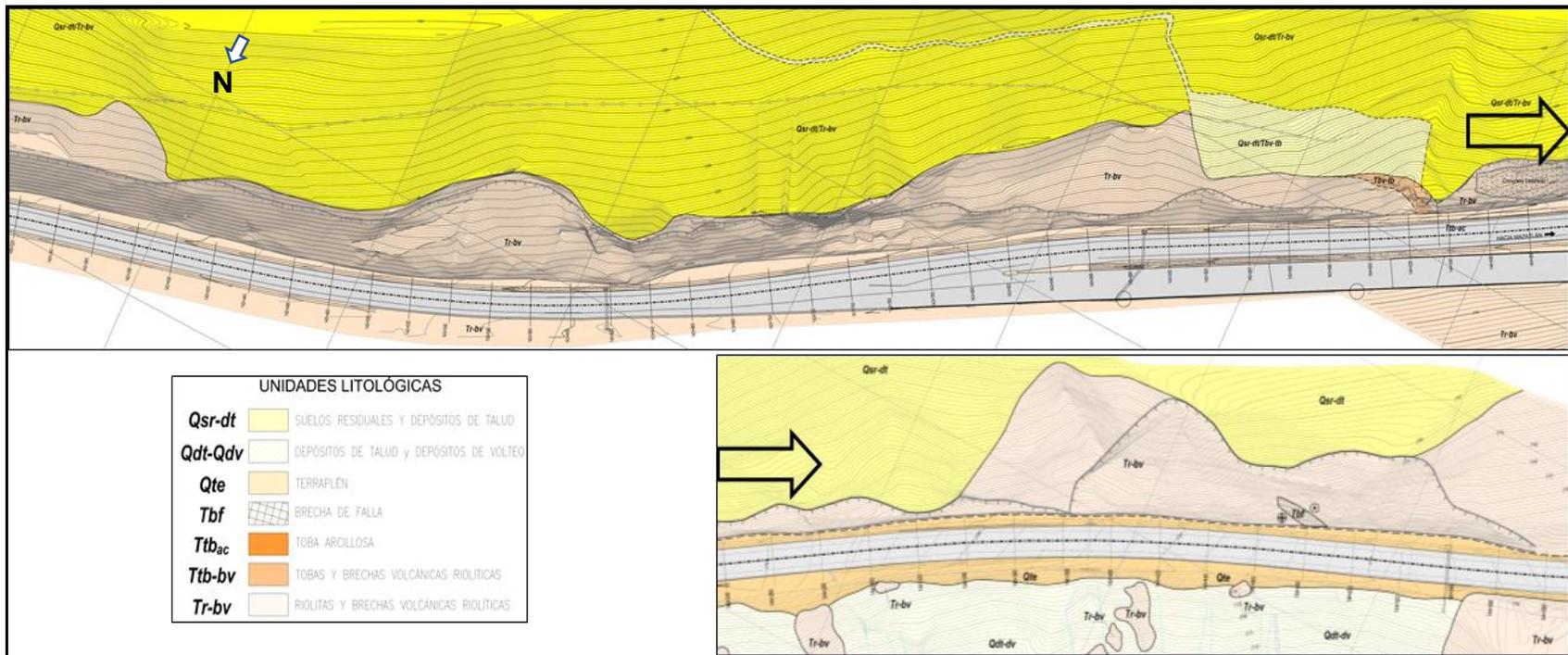


Figura 4.1. Distribución de las unidades litológicas que conforman la zona del corte

**Unidad: Tr-bv**

**Litología: Riolitas y brechas volcánicas riolíticas**

#### Edad y origen

Rocas generadas mediante el enfriamiento de flujos lávicos provenientes de volcanes o fisuras en la corteza terrestre; flujos de composición ácida, lo que indica un alto contenido de sílice. De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM), esta unidad corresponde con la llamada Secuencia Volcánica Superior de la Sierra Madre Occidental y data del Terciario: Paleógeno–Oligoceno.

#### Relaciones estratigráficas

Al ser la unidad litológica que conforma al corte, únicamente se encuentra por debajo de la unidad de suelos residuales y depósitos de talud (Qsr-dt).

#### Distribución

Son los materiales que conforman al corte, por lo tanto, se distribuyen en toda la zona.

#### Características

Son rocas de color rosa pálido a gris claro, de textura semifluidal, constituidas de feldespatos, cuarzo y vidrio volcánico; en una matriz afanítica, principalmente vítrea; presenta cambio a una textura de brecha; con fragmentos de roca, angulosos a subangulosos, de 0.5 a 3 cm de diámetro, en mayor proporción que los minerales antes mencionados; así como un color gris claro y mayor porosidad. En general son rocas en estado sano a poco alterado, consistentes y con moderado fracturamiento, lo que genera bloques que constantemente caen hacia la carretera.



*Fotografía 4.1. Macizo rocoso conformado por riolitas y brechas riolíticas.*



*Fotografía 4.2. Detalle del cambio textural y de color que presenta la unidad Tr-by*



*Fotografía 4.3. Muestra de la unidad Tr-bv obtenida de un sondeo exploratorio. La roca se muestra sana y con fracturas ocasionales, algunas de ellas con relleno de sílice*

**Unidad: T tb-bv**

**Litología: Tobas y brechas volcánicas riolíticas**

#### Edad y origen

Unidad que engloba intercalaciones de tobas y brechas volcánicas, ambas de composición riolítica. Son producto del enfriamiento y depósito de material piroclástico derivado de explosiones volcánicas. De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM), esta unidad corresponde con la llamada Secuencia Volcánica Superior de la Sierra Madre Occidental y data del Terciario: Paleógeno–Oligoceno.

#### Relaciones estratigráficas

La unidad es básicamente un paquete de rocas que se encuentra dentro de la unidad de riolitas y brechas riolíticas (T r-bv), por tanto, las subyace y sobreyace al mismo tiempo. En superficie, las tobas y brechas volcánicas riolíticas (T tb-bv) son cubiertas por una delgada capa de suelo residual y depósitos de talud (Q sr-dt).

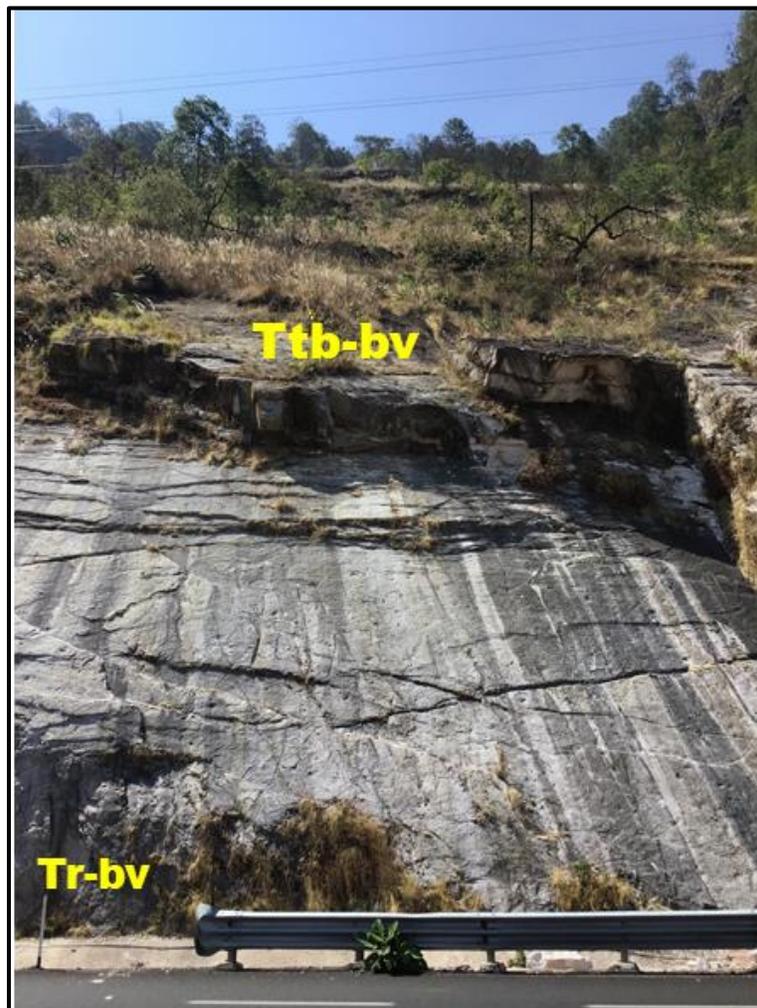
#### Distribución

Están distribuidos en la parte alta del corte, morfológicamente generan algunos escarpes con diferentes alturas, producto de antiguos desprendimientos de roca. Se sitúa principalmente entre el km 143+910 y 144+040; aunque se infiere su extensión hacia ladera arriba y en mayor área.

#### Características

Son rocas de color gris claro a oscuro, de textura tobácea a semifluidal, constituidas de vidrio volcánico, fragmentos de roca, así como algunos cristales de feldespato y cuarzo; en una matriz de grano fino, moderadamente a bien consolidada, principalmente vítrea. Presenta

cambio a una textura de brecha; con fragmentos de roca, angulosos a subangulosos, de 0.5 a 3 cm de diámetro, en mayor proporción que otros componentes antes mencionados; al igual que una matriz más soldada. En general muestran estructura de pseudoestratos, que al desprender bloques forman escarpes (Fotografía 4.5). Son rocas en estado poco a moderadamente alterado; moderadamente consistentes a consistentes y con fracturamiento moderado.



*Fotografía 4.4. Detalle de los pseudoestratos en que se presentan las tobas y brechas riolíticas, Se observa el plano sobre el que hubo un deslizamiento*



*Fotografía 4.5. Vista lateral de la zona donde hay mayor presencia de la unidad Ttb-bv. Es visible la morfología y los escarpes que forman*



*Fotografía 4.6. Muestra de la unidad Ttb-bv obtenida de un sondeo exploratorio. La roca se aprecia poco a moderadamente fracturada y con poca alteración; así como una predominante textura de brecha*

**Unidad: T tb<sub>ac</sub>**

**Litología: Toba arcillosa**

#### Edad y origen

Es un horizonte dentro de la secuencia de tobas y brechas volcánicas riolíticas, son rocas expelidas por algún volcán.

#### Relaciones estratigráficas

Se encuentra en sobreyaciendo a otros horizontes de brechas y tobas (T tb-bv) y subyaciendo a la secuencia de riolitas y brechas volcánicas (T r-bv).

#### Distribución

Su distribución es restringida a un horizonte de aproximadamente 50 cm de espesor y cuya longitud observable es de alrededor de 20 m. Se sitúa alrededor del Km 144+020 (Fotografía 4.7).

#### Características

Se trata de una roca color blanco a amarillo muy claro, en superficie es de consistencia muy blanda que es fácilmente surcada por los dedos de la mano. Se percibe aún la estructura de una toba, sin embargo, casi todos sus componentes han sido alterados a arcillas. Tiene remanentes de fragmentos de roca angulosos, de color negro, usualmente menores a 1 cm de diámetro. Fue registrada por el sondeo C4-S-05 a los 14 m de profundidad aproximadamente; donde el estado de esta unidad mejora considerablemente, se aprecia sana y consistente (Fotografía 4.8).



Fotografía 4.7. Estrato de toba arcillosa en las inmediaciones del Km 144+020, se observa limitado por líneas amarillas segmentadas



Fotografía 4.8. Muestra del horizonte de toba registrado en el sondeo C4-S-05. Se aprecia que la roca es sana y consistente; contrario a su aspecto en superficie.

**Unidad: T bf**

**Litología: Brecha de falla**

Edad y origen

Esta unidad se originó como resultado de los esfuerzos tectónicos a los que estuvieron sujetas las rocas del área, particularmente la unidad T r-bv, en la zona de influencia de una falla. De acuerdo con la literatura y considerando la edad de las rocas en las que está la falla, se puede asignar una edad del Neógeno-Mioceno.

Relaciones estratigráficas

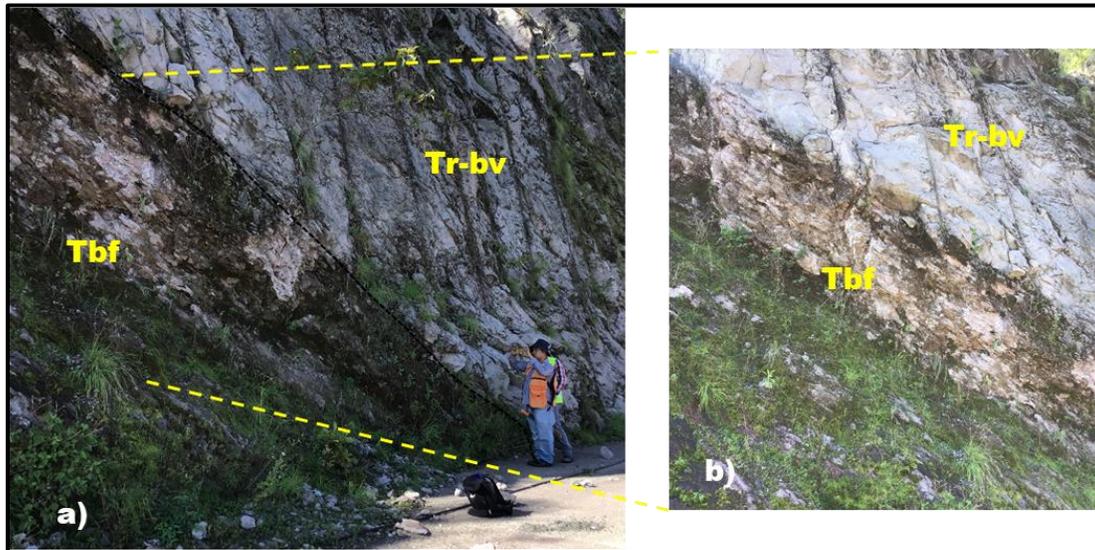
Al ser resultado de los esfuerzos tectónicos dentro de una falla en la misma unidad litológica, esta unidad está contenida dentro de la unidad T r-bv.

Distribución

Solamente se distribuye en los alrededores de la zona de la falla, esto es alrededor del Km 144+480, en un ancho de aproximadamente 7 m y hasta una altura de 15 m aproximadamente.

Características

Se compone de fragmentos de riolitas y brechas riolíticas, triturados, con diámetros que usualmente no sobrepasan los 5 cm. Los fragmentos están inmersos en una matriz de arcilla con arena. En general se aprecia como un material de color amarillo muy claro con tonos rojo pálido (Fotografía 4.9). Los materiales están extremadamente alterados y su consistencia es muy baja a nula.



Fotografía 4.9. a) Vista de la brecha de falla alrededor del Km 144+490.

b) Detalle de la brecha de falla



Fotografía 4.10. Muestra de roca obtenida en el sondeo C4-S-06. Es notable que en los primeros tramos la roca está muy fracturada y el material más fino fue lavado durante la perforación

**Unidad: Q sr-dt**

**Litología: Suelos residuales y depósitos de talud**

Edad y origen

Materiales que se forman de la alteración y disgregación del macizo rocoso, ya sea *in situ* o transportadas de las partes altas. Hoy en día continúa su depósito, por lo que la edad asignada es del Cuaternario-Holoceno.

Relaciones estratigráficas

Sobreyacen a las unidades que conforma el macizo rocoso; T r-bv, T bv-tb y T tb<sub>ac</sub>.

Distribución

Estos depósitos muestran presencia generalizada en la parte superior del corte y ladera, usualmente por arriba del hombro con espesores de entre 1 y 2.5 m.

Características

Materiales constituidos principalmente de limos-arenosos color marrón oscuro, con bloques de roca riolítica que alcanzan los 50 cm de diámetro. También presentan una ligera capa de materia orgánica. Son materiales sin consolidar.



*Fotografía 4.11. Vista panorámica del corte en donde se observa la cubierta de suelo y depósitos de talud en la parte superior del talud*



*Fotografía 4.12. Depósitos de talud en ladera próxima al hombro del corte*

Adicionalmente fueron cartografiadas unidades que no forman parte del corte, estas unidades corresponden con depósitos fluviales y material producto de las excavaciones y utilizadas para la conformación del terraplén (Rezaga).



*Fotografía 4.13. Depósitos de talud y volteo situados por debajo de la cota de la autopista*



*Fotografía 4.14. Depósitos fluviales en parte superior de arroyo que limita el inicio del corte*

## **4.2. Condiciones estructurales**

En el subcapítulo 1.2 (Problemática) se hizo hincapié en que los problemas que afectan al corte se deben principalmente a las discontinuidades presentes. De manera especial, la pseudoestratificación representa un plano desfavorable para el corte, ya que es a través de esta discontinuidad por donde el agua se infiltra en el macizo rocoso, y hay evidencias de grandes deslizamientos antiguos por medio de este plano.

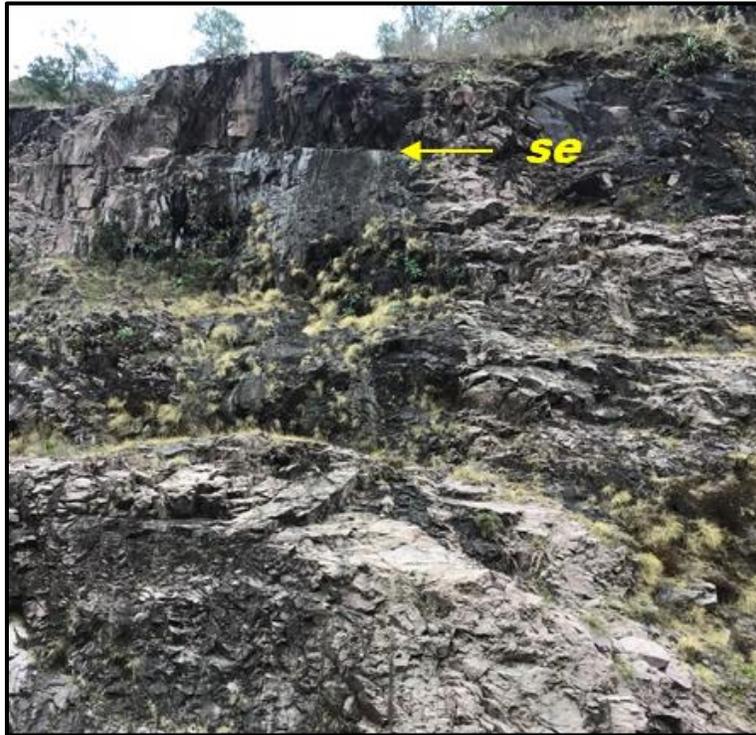
Debido a la naturaleza de las rocas presentes en el corte, descritas en el capítulo anterior, la discontinuidad que más persiste es aquella que corresponde a la pseudoestratificación (*se*). Aunado a ello, fueron observadas 3 familias de discontinuidades (*fr1*, *fr2* y *fr3*) de las cuales se obtuvo toda información posible.

La siguiente tabla (Tabla 4.1) presenta de manera resumida la orientación y características de las discontinuidades que afectan al macizo rocoso. Esta información fue de gran aporte para la generación de la clasificación geomecánica del corte; tema tratado en el subcapítulo 4.5. Asimismo, fue realizado el análisis cinemático de las discontinuidades a fin de conocer los posibles mecanismos de falla que se pueden suscitar sobre el corte; tema que se aborda con más detalle en el subcapítulo 4.6.

Tabla 4.1. Características de las discontinuidades en el corte

Familia	Discontinuidad			
	se	fr1	fr2	fr3
<b>Rumbo</b>	NE-SW42 <sup>a</sup>	NW-SE07 <sup>a</sup>	NW-SE50 <sup>a</sup>	NE-SW77 <sup>a</sup>
<b>Buzamiento</b>	40 <sup>a</sup> a NW	69 a NE <sup>a</sup>	75 <sup>a</sup> a SW	83 <sup>a</sup> a SE
<b>Dip</b>	40	69	75	83
<b>Dip direction</b>	312	083	220	167
<b>Espaciamiento (m)</b>	0.2 - 2	0.2 - 2	0.6 - 2	0.2 - 2
<b>Continuidad (m)</b>	>20	3 - 20	10 - 20	1 - 10
<b>Rugosidad</b>	Plana-ondulada rugosa	Plana rugosa		
<b>Abertura (mm)</b>	0.5 - 10 (abierta - ancha)	0.5 - 5 (abierta)		0.25 - 2.5 (cerrada - abierta)
<b>Relleno</b>	s/r		s/r ocasional sílice	
<b>Filtraciones</b>	húmedo-flujo	Seco - húmedo		

Estas discontinuidades fueron enlistadas según la frecuencia y relevancia sobre el talud. De tal forma que la pseudoestratificación (se) es la más relevante para el corte; pues es la discontinuidad que más afecta al macizo rocoso, además de ser una discontinuidad muy desfavorable dada la situación de infiltración de agua que presenta (Fotografía 4.15).



Fotografía 4.15. Humedad en el frente del talud; evidencia de flujo de agua por discontinuidad *se*-(*fr1*)



Fotografía 4.16. Vista lateral de la pseudoestratificación (*se*); se aprecia la orientación desfavorable hacia la vialidad

De manera subsecuente fueron enlistadas las familias *fr1*, *fr2* y *fr3* (fracturas), que en conjunto con la familia de pseudoestratificación (*se*) generan elementos inestables, como bloques y zonas que pueden significar

un riesgo a la seguridad de los usuarios de la autopista. Como lo muestra la Fotografía 4.17, la conjugación de las discontinuidades secciona bloques, los cuales posteriormente tienden a deslizar debido al plano de pseudoestratificación; como evidencia queda una pared de roca o cárcava en el macizo rocoso.



*Fotografía 4.17. Zona donde se aprecia el hueco o cárcava que quedó por un caído*

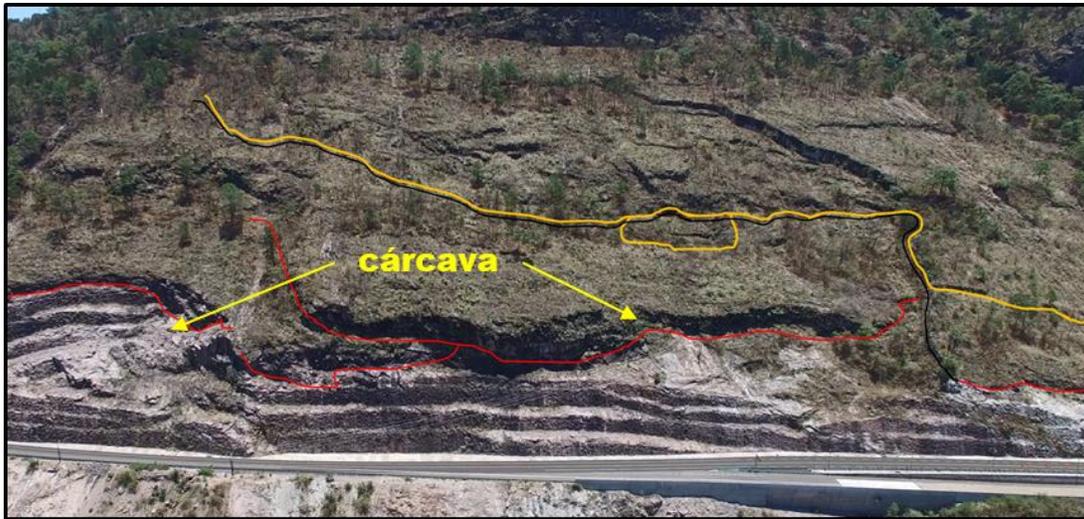
Algunos elementos inestables son propensos a caer con relativa prontitud; por lo que se realizó la identificación y clasificación de estos elementos; tema tratado con más detalle en el subcapítulo 4.3. Asimismo, la ubicación y delimitación de estos cuerpos es tratado con mayor detalle en dicho inciso.

### **4.3. Elementos inestables**

Elementos que obedecen principalmente a los sistemas de fracturamiento presentes en el corte y no a una mala calidad de los materiales que lo conforman.

Con base en el reconocimiento geológico superficial, así como el análisis de imágenes obtenidas mediante dron, fueron determinados diversos elementos inestables a lo largo del corte; elementos que son generados debido a las características de las discontinuidades, descritas en el subcapítulo anterior.

Debido a la naturaleza de las litologías que conforman la parte superior del macizo rocoso, el plano de pseudoestratificación (se) representa una estructura de condiciones desfavorables para el talud en casi tres cuartas partes de su longitud; en conjunto con las otras discontinuidades inherentes al corte seccionan grandes extensiones de terreno que pueden ser propensos a deslizar; esto es apreciable en la morfología de la parte superior del corte, donde hay evidencias de antiguos deslizamientos. Como lo muestra la Fotografía 4.18, los escarpes presentes en la parte alta de la ladera son trazas de alguna discontinuidad que seccionó al macizo rocoso (línea roja y amarilla); que aunado al plano de pseudoestratificación propiciaron el deslizamiento de grandes franjas de roca.



Fotografía 4.18. Panorámica de los escarpes en la parte alta de la ladera; se aprecian cárcavas de antiguos deslizamientos

De igual forma, las fotografías 4.19 y 4.20 muestran algunos de los elementos inestables presentes en el corte. Estos elementos tienden a estar en la parte alta del talud, incluso por detrás de la línea de hombro.

Los diferentes colores que se observan corresponden con una clasificación del grado de inestabilidad de cada elemento (Tabla 4.2); esta clasificación fue realizada, principalmente, con base en la densidad del fracturamiento a lo largo del corte, al igual que el grado de alteración de la roca y el riesgo que puede representar a la carretera y sus usuarios. En el caso de la Fotografía 4.18, la zona comprendida entre la línea roja y la línea amarilla corresponde a toda una franja que puede ser propensa a seccionar bloques y que estos caigan debido al plano de pseudoestratificación.

Tabla 4.2. Rango de inestabilidad según el patrón de color

Color	Grado de inestabilidad
Rojo	Elevado
Amarillo/Naranja	Moderado
Verde	Bajo



*Fotografía 4.19. Panorámica que muestra la diversidad de elementos inestables en el corte en la porción noreste*



*Fotografía 4.20. Panorámica que ilustra los elementos inestables en el corte hacia el extremo suroeste*

Es importante reiterar que estos elementos son generados por las discontinuidades que afectan al macizo rocoso y el estado que éstas guardan; de tal forma que, hay elementos que requieren mayor atención.

De manera particular, debe prestarse atención a las zonas altas de la ladera, especialmente la que muestra la Fotografía 4.19; ya que en esta porción del corte hay varios indicios de deslizamientos previos, así como de infiltración de agua a través de la pseudoestratificación.

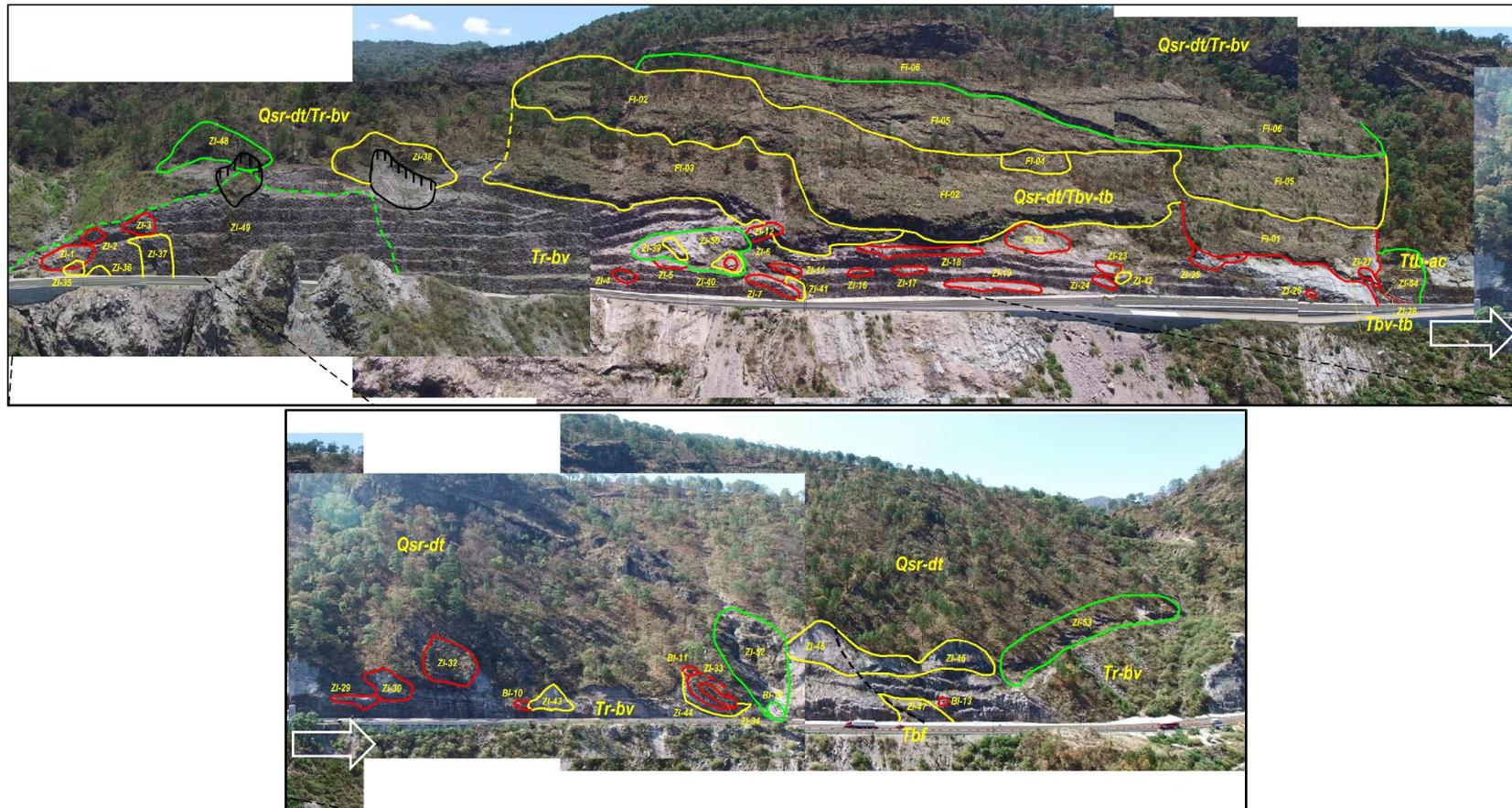


Figura 4.2. Distribución de los elementos inestables identificados en el corte.

La totalidad de elementos inestables identificados en el corte fue plasmada en planos entregados al cliente.

La Tabla 4.3 enlista el total de estos elementos inestables; mientras que la Figura 4.2 ilustra la distribución general de los elementos detectados a lo largo del corte.

Tabla 4.3. Lista de elementos inestables en el corte

<b>Bloques (BI)</b>		<b>Zonas (ZI)</b>						<b>Franjas (FI)</b>
BI-01	BI-11	ZI-01	ZI-11	ZI-21	ZI-31	ZI-41	ZI-51	FI-01
BI-02	BI-12	ZI-02	ZI-12	ZI-22	ZI-32	ZI-42	ZI-52	FI-02
BI-03	BI-13	ZI-03	ZI-13	ZI-23	ZI-33	ZI-43	ZI-53	FI-03
BI-04	BI-14	ZI-04	ZI-14	ZI-24	ZI-34	ZI-44	ZI-54	FI-04
BI-05	BI-15	ZI-05	ZI-15	ZI-25	ZI-35	ZI-45		FI-05
BI-06		ZI-06	ZI-16	ZI-26	ZI-36	ZI-46		FI-06
BI-07		ZI-07	ZI-17	ZI-27	ZI-37	ZI-47		
BI-08		ZI-08	ZI-18	ZI-28	ZI-38	ZI-48		
BI-09		ZI-09	ZI-19	ZI-29	ZI-39	ZI-49		
BI-10		ZI-10	ZI-20	ZI-30	ZI-40	ZI-50		

El deslizamiento más reciente (probablemente en etapa de construcción) es el que se muestra en la Fotografía 4.21. Es posible ver que el plano que generó este deslizamiento (pseudoestratificación) muestra continuidad ladera arriba; por lo que los pseudoestratos rotos aún pueden seccionar elementos con potencial caída a la carretera.



*Fotografía 4.21. Zona de deslizamiento más reciente, se aprecia el plano de deslizamiento y los pseudoestratos seccionados en la parte alta*

Algunos de estos elementos están en estado de reposo debido a la acción de la gravedad, la fricción de la superficie de contacto con el macizo rocoso y puentes de roca formados entre los pseudoestratos.

#### **4.4. Zonificación geológica-geotécnica**

En este subcapítulo se conjugan principalmente, la información obtenida del reconocimiento geológico superficial y los resultados de la exploración geofísica; con ello fue realizada la zonificación geológico-geotécnica del corte. Lo anterior, con la finalidad de proveer un modelo que muestre la condición geotécnica de los materiales que conforman al corte; al igual que su distribución. Esta zonificación fue realizada con base en las propiedades físicas del macizo rocoso y con ello se logró determinar unidades geológico-geotécnicas dentro del corte, cada una con características físicas distintivas y asociadas a las unidades litológicas que conforman al corte.

Fueron realizados diez (10) tendidos de refracción sísmica (TRS) para conocer las condiciones físicas del macizo rocoso. De estos tendidos, cuatro (4) fueron realizados de forma vertical en la parte superior del corte, tres de ellos en el extremo noreste y uno más hacia el borde suroeste del corte. Otros seis (6) tendidos fueron realizados en la parte baja del talud, de manera horizontal; asimismo, casi todos los tendidos tuvieron longitud de 120 m, sólo uno fue hecho a 60 m de longitud.

A fin de tener una mejor correlación de la información geofísica también son retomados los resultados de los tendidos de refracción sísmica realizados en la zona del Terraplén, situado entre los km 144+120 y km 144+720 de la autopista Durango-Mazatlán. Se trata de cuatro (4) tendidos realizados de forma vertical, con longitudes de 60 m (3) y 120 m (1).

Además, fueron considerados los sondeos exploratorios realizados en el corte; mismos que fueron descritos en el subcapítulo 3.2 (Tabla 3.1). Estos sondeos fueron de gran utilidad para conocer el estado del macizo rocoso que conforma al corte, especialmente ladera arriba donde se hallan

elementos inestables importantes, así como aquellas zonas con descompresión y mayor fracturamiento. De forma particular, el sondeo C4-S-05 tuvo como objetivo identificar la continuidad del horizonte de toba arcillosa ( $T_{tb_{ac}}$ ) detectado en superficie; horizonte que en el subsuelo mejora notablemente su estado y consistencia.

La Tabla 4.4 presenta las características de las diferentes unidades geológico-geotécnicas presentes en el corte. Adicionalmente fueron construidas secciones transversales al corte, a fin de mostrar la distribución de las unidades geológico-geotécnicas hacia los lados y el interior del talud. Algunas de estas secciones son presentadas de la Figura 4.4 a la Figura 4.11; para tales secciones, la simbología corresponde con la mostrada en la Figura 4.3

Tabla 4.4. Tabla geológico-geotécnica del corte

Unidad Geotécnica	Unidad litológica	Velocidad promedio onda Vp (m/s)	Espesor (m)	Grado de alteración	Grado de consistencia	Grado de fracturamiento	Características litológicas	Mecanismo de falla
UG-Ia	Qsr-dt	300 - 513*	1 - 2.5	NA	Materiales sueltos	NA	Suelos limo-arcillosos con abundante materia orgánica y algunos fragmentos de roca de hasta 50 cm de diámetro.	Erosión y deslizamiento
UG-Ic	Tbf	ND	1 - 5	Extremadamente alterado	Sin consistencia	NA	Roca triturada, muy alterada, mezclada con arena y arcilla plástica. Se distribuye entre los planos que delimitan la falla situada entre los Km 144+460 a 144+490.	Erosión
	Ttb <sub>ac</sub>	ND	0.5 - 1	Muy alterada	Sin consistencia	NA	Toba arcillosa con fragmentos de roca angulosos, negros, menores a 1 cm. Con alteración que la hace deleznable e inconsistente. Está entre dos pseudoestratos de brecha volcánica riolítica. Esta unidad representa un plano de debilidad del macizo rocoso.	Erosión y falla plana
UG-IIa	Ttb-bv	714 - 1,075	1.5 - 5	Moderadamente a poco alteradas	Moderadamente consistente	Moderadamente fracturada	Intercalaciones de tobas en pseudoestratos de 0.1 a 0.5 m de espesor con brechas volcánicas riolíticas en pseudoestratos de 0.5 a	Falla plana y cuñas

Unidad Geotécnica	Unidad litológica	Velocidad promedio onda Vp (m/s)	Espesor (m)	Grado de alteración	Grado de consistencia	Grado de fracturamiento	Características litológicas	Mecanismo de falla
							2 m de espesor. Las tobas tienen menos resistencia que las brechas, por lo que conforman planos de debilidad.	
UG-IIb	Tr-bv	1,287 - 2,397 (601*)	1.5 - 16	Poco alterada	Consistente a muy consistente	Moderadamente fracturada	Riolitas y brechas volcánicas riolíticas descomprimidas en la cara del corte. Los planos de discontinuidades se observan usualmente abiertos (0.5 a 5 mm), poco alterados a sanos, sin relleno u ocasionalmente relleno de sílice duro. En general se observan secos, salvo la pseudoestratificación que manifiesta goteo en algunas zonas.	
UG-IIc	Tr-bv	2,287 - 3,800	9 - 25	Sana	Muy consistente	Moderada a poco fracturada	Riolitas y brechas volcánicas riolíticas con cierto grado de descompresión cuando está cerca de la cara del talud. Los planos de discontinuidad están usualmente cerrados (0.1 a 0.5 mm), sanos y ocasionalmente tienen relleno duro de sílice. De manera usual, los planos de discontinuidades están	Falla plana y cuñas

<b>Unidad Geotécnica</b>	<b>Unidad litológica</b>	<b>Velocidad promedio onda Vp (m/s)</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>Grado de alteración</b>	<b>Grado de consistencia</b>	<b>Grado de fracturamiento</b>	<b>Características litológicas</b>	<b>Mecanismo de falla</b>
							secos, salvo la pseudoestratificación que tiene goteo en algunos sectores.	
UG-IIId		3,168 - 5,561	Indeterminado	Sana	Muy consistente	Poco a ocasionalmente fracturada	Riolitas y brechas volcánicas con planos de discontinuidad cerrados, sanos ocasionalmente con relleno duro de sílice.	

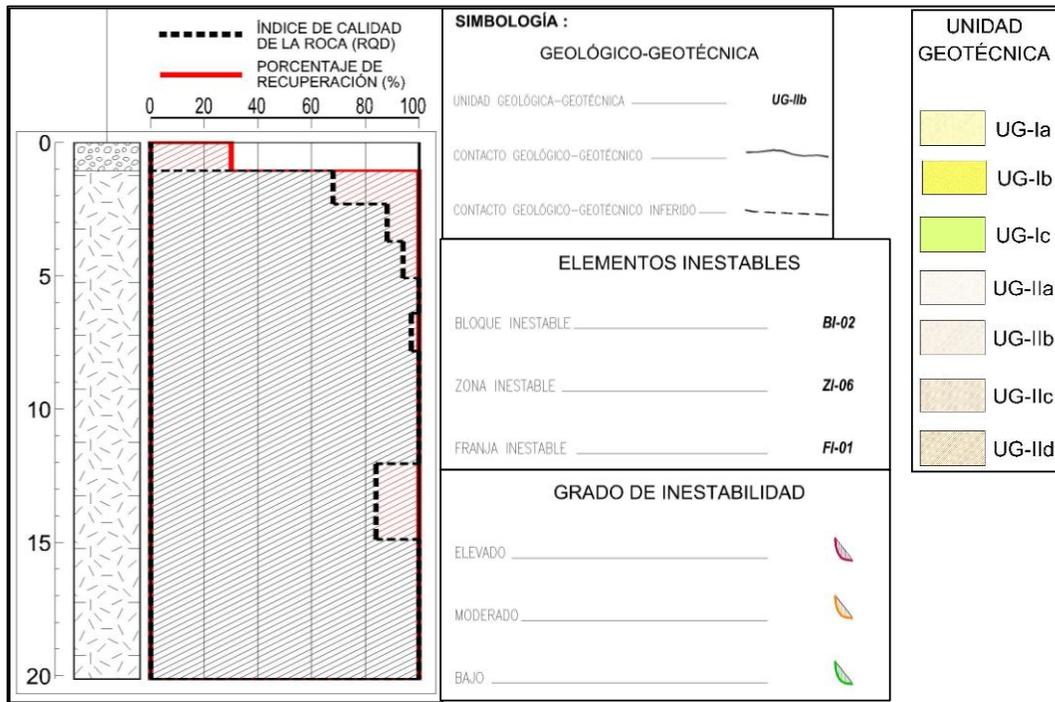


Figura 4.3. Simbología de las secciones geológico-geotécnicas

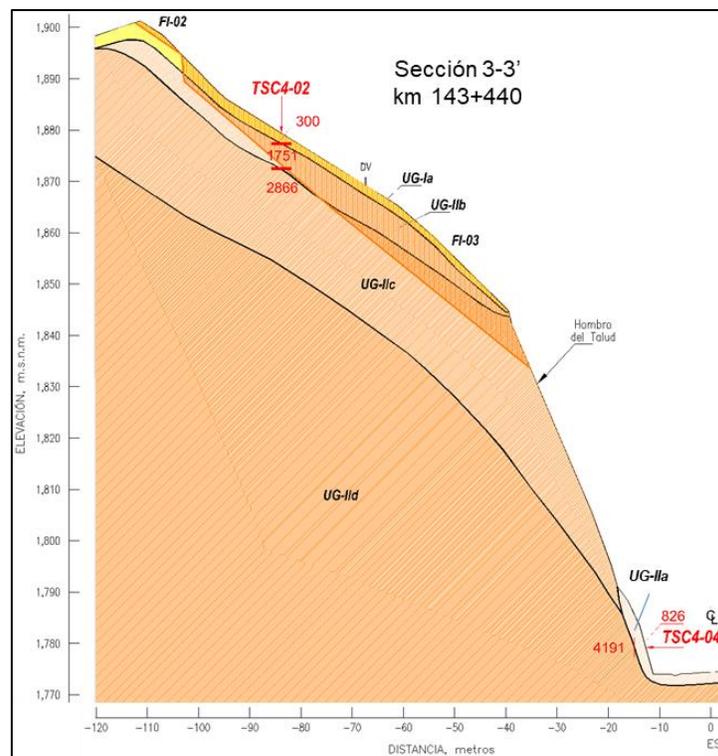


Figura 4.4. Sección geológico-geotécnica que ilustra la presencia de la unidad UG-IIb en la parte alta, al borde noreste del corte

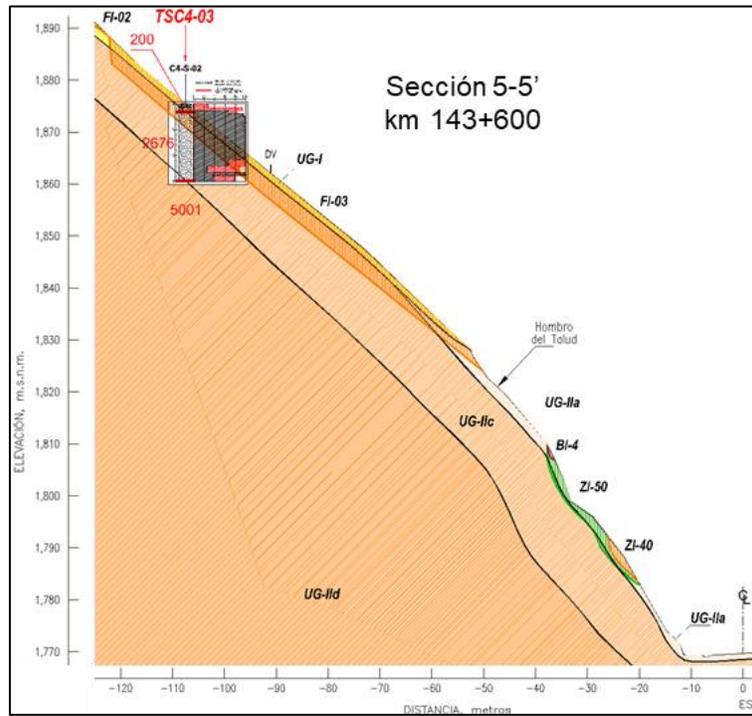


Figura 4.5. Sección geológico-geotécnica próxima al sondeo C4-S-02 (sondeo proyectado)

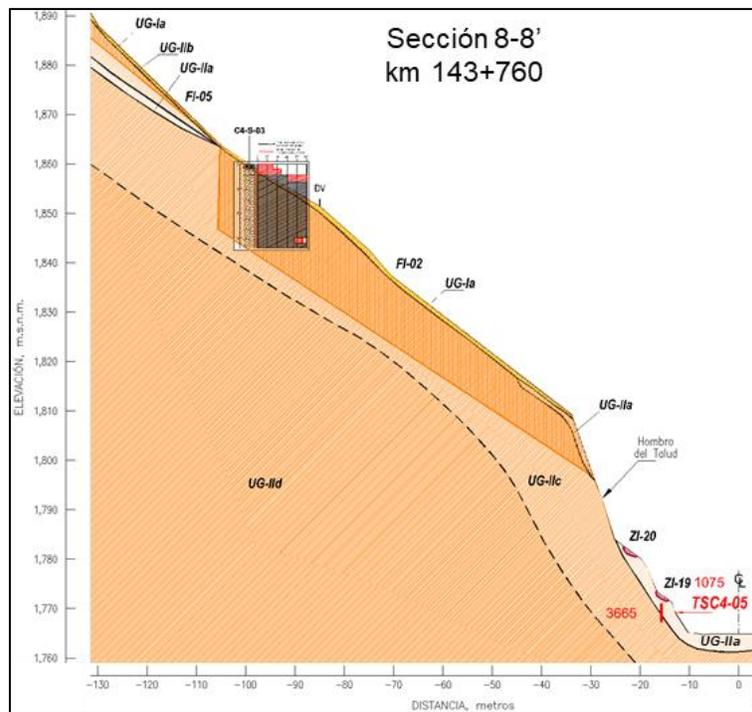


Figura 4.6. Sección geológico-geotécnica próxima al sondeo C4-S-03 (sondeo proyectado)

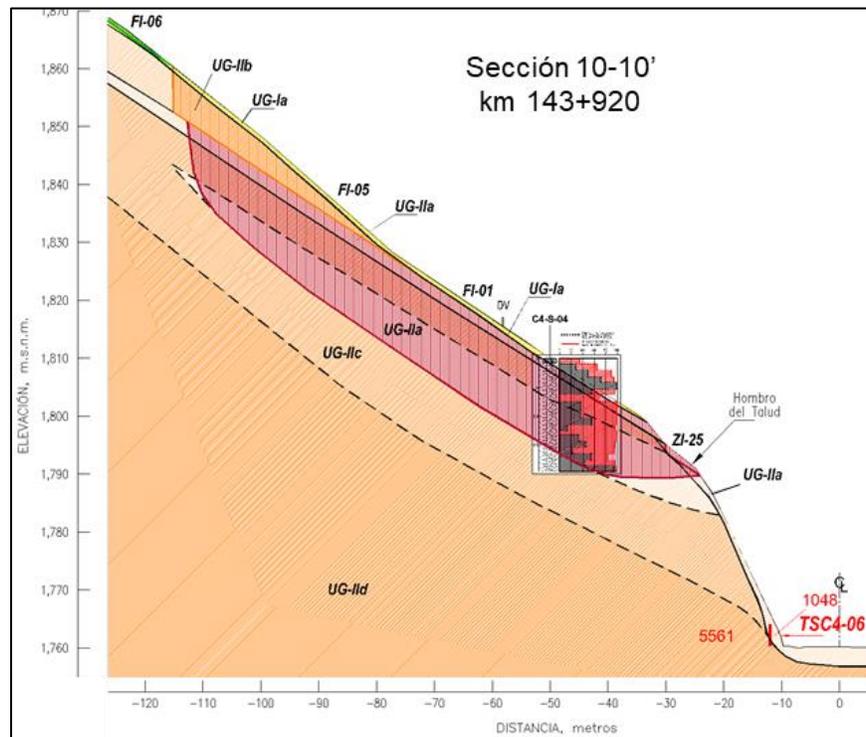


Figura 4.7. Sección geológico-geotécnica próxima al sondeo C4-S-04 (sondeo proyectado). Se aprecia la morfología controlada por la pseudoestratificación

Las secciones de la Figura 4.4 a la Figura 4.7 muestran la distribución lateral e interna de las diferentes unidades geotécnicas que componen al corte en su primera mitad, así como a gran parte de la ladera.

Es posible apreciar que la primera mitad del corte (km 143+160 a km 144+040) presenta mayor altura; al igual que una notoria presencia de las franjas inestables (FI-01 a FI-06). Las unidades geológico-geotécnicas que predominan son la unidad UG-IIc y UG-IId; que corresponden al macizo rocoso en buenas condiciones, hacia el interior y la base del corte.

Como lo muestra la Figura 4.4, la unidad UG-IIb aparece de manera discreta en el corte, en la porción noreste, con poco espesor y por debajo de la unidad UG-Ia; lo que obedece a una zona en que la roca está siendo más afectada por descompresión e intemperismo a través de las discontinuidades que la afectan.

Las secciones de la Figura 4.5 y Figura 4.6, muestran la correlación que hay entre los sondeos exploratorios C4-S-02 y C4-S-03, con la unidad UG-IIc, la cual corresponde a materiales en buenas condiciones geotécnicas; donde el mayor riesgo que existe es la conjunción de discontinuidades, especialmente la pseudoestratificación

Durante el reconocimiento geológico de campo se observó que este horizonte de tobas es más susceptible al intemperismo, debido a la infiltración de agua, y ello puede generar deslizamientos; por tal motivo se asignó su clasificación como unidad UG-IIa. Lo anterior tiene repercusión en lo que muestra la sección de la Figura 4.7, donde el sondeo exploratorio C4-S-04 registró un horizonte de roca alterada e inconsistente, este horizonte posa debajo de roca en mejor estado, de consistente a moderadamente consistente, por lo que puede generar un plano de debilidad. De igual forma, y debido a las condiciones de inestabilidad que puede representar este horizonte de unidad UG-IIa para el talud, fue englobado como parte de la franja inestable FI-01: de alta inestabilidad.

La sección de la Figura 4.8 muestra el horizonte de toba arcillosa ( $Ttb_{ac}$ ) que fue identificado durante el reconocimiento geológico superficial, este horizonte muestra características de baja consistencia y mucha alteración, por lo que se asignó como unidad UG-Ic. Asimismo, la sección tiene relevancia debido a que, desde ese cadenamiento, las alturas del corte disminuyen, por lo que las unidades que ahora predominan son la unidad UG-IIb y UG-IIc.

Dentro de esta sección se encuentra proyectado el sondeo C4-S-05, en el que fue hallado un horizonte de roca en mal estado, al igual que en el sondeo C4-S-04, subyaciendo a un horizonte de roca en mejores condiciones. Lo anterior es clara evidencia de la afectación que genera el flujo de agua en el subsuelo, especialmente a través del plano de pseudoestratificación y con gran repercusión en las litologías de tobas y

brechas riolíticas; pues es en el contacto entre pseudoestratos donde la alteración e inconsistencia son mayores.

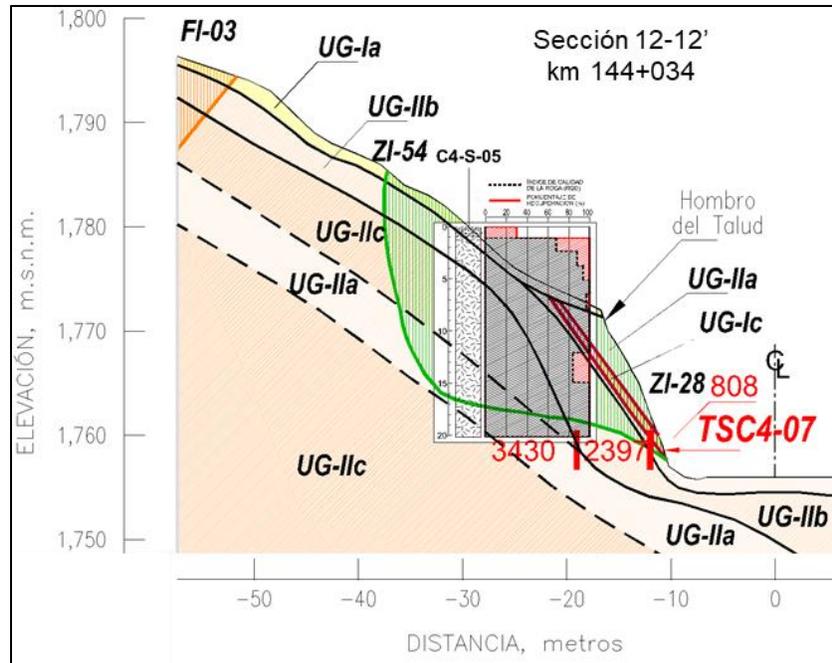


Figura 4.8. Sección geológico-geotécnica que muestra el detalle del horizonte de  $Ttb_{ac}$  al igual que la disminución en la altura del corte

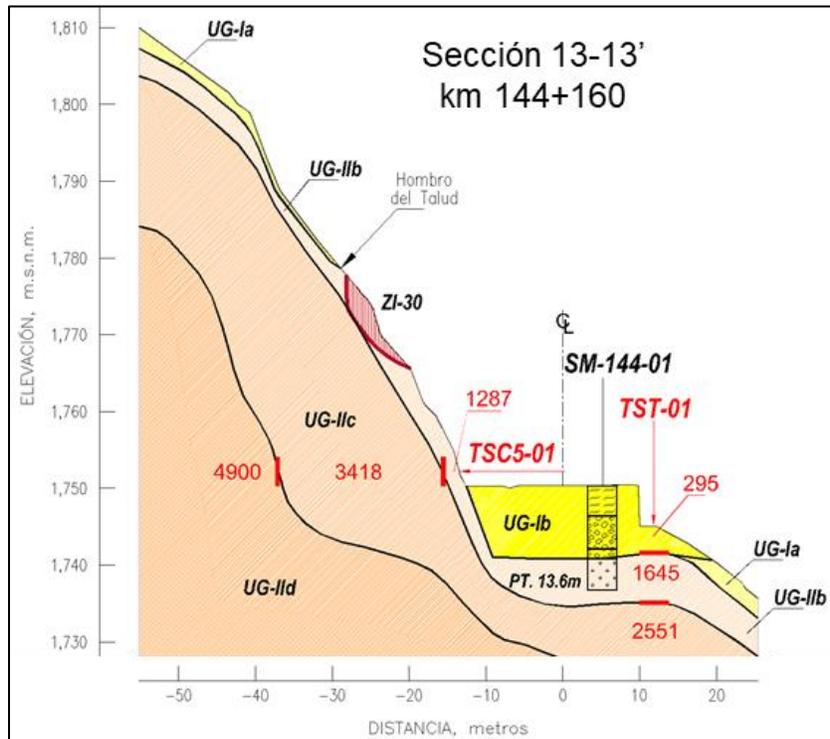


Figura 4.9. Sección geológico-geotécnica donde se conjuga información del terraplén situado entre los km 144+120 y 144+720

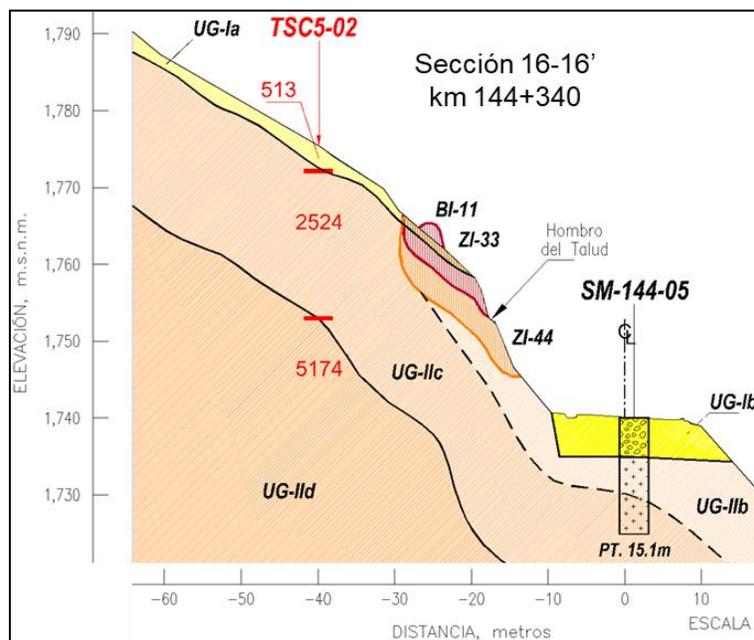


Figura 4.10. Sección geológico-geotécnica que muestra información del terraplén situado entre los km 144+120 y 144+720

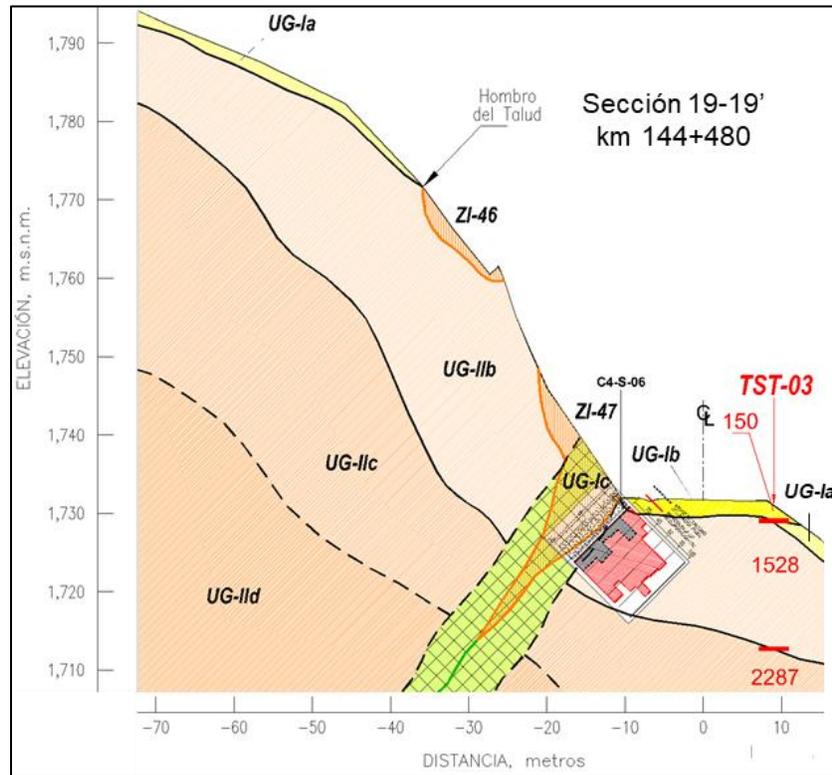


Figura 4.11. Sección geológico-geotécnica que atraviesa la zona de una falla; se observa que su orientación no implica riesgo a la estabilidad del talud

En las figuras 4.7 a 4.10 se presentan la forma en que las unidades geológico-geotécnicas se distribuyen en la segunda mitad del corte (km 144+040 a km 144+720). Es posible apreciar que esta porción del corte coexiste con el Terraplén situado entre los km 144+120 y 144+720; por lo que la unidad UG-Ib (material de terraplén) es notoria. Como lo muestra la Figura 4.9, esta unidad está contenida por un muro que abarca desde el km 144+150 al km 144+240.

Estas secciones ilustran que las unidades que más relevancia adquieren son la unidad UG-IIb y UG-IIc, por lo que la unidad UG-IId se halla hacia el interior del corte.

La Figura 4.11 corresponde a la sección que atraviesa la zona de la falla situada en el km 144+480; es posible observar que, en esta zona, debido a la falla, se encuentra la unidad UG-Ic hacia el interior del corte; sin

embargo, la falla no representa un riesgo importante para la carretera; la realización del sondeo C4-S-06 atravesó parte de esta estructura y con ello se pudo corroborar que el espesor que tiene la zona de afectación es bajo, además de que su orientación es oblicua a la de la vialidad; sólo las condiciones de alteración y erosión podrían suscitar con el tiempo caída de bloques de la zona inestable (ZI-47). Igualmente, la unidad UG-IIb adquiere mayor espesor en esta zona, debido también a la presencia de la falla y la alteración que ésta puede propiciar en el macizo rocoso.

#### **4.5. Clasificaciones geomecánicas**

Para el estudio de este corte, la obtención de la clasificación geomecánica se realizó con base en las mediciones hechas en campo sobre las discontinuidades presentes en la zona superficial del corte. Ensayos con esclerómetro y pruebas de carga puntual (PLT) fueron usadas para definir el parámetro correspondiente a la resistencia a la compresión simple (RCS).

Con base en las clasificaciones geomecánicas, los parámetros de resistencia y las condiciones del macizo rocoso en superficie, se obtuvieron la cohesión y el ángulo de fricción interna del macizo rocoso, mediante el programa RocLab.

En el subcapítulo 3.2 se dio a conocer la metodología y funcionamiento de las pruebas con esclerómetro, PLT; así como la obtención de la cohesión y el ángulo de fricción interna. Enseguida serán presentados únicamente los resultados y su relevancia.

##### Ensayos con esclerómetro (Martillo Schmidt)

Los ensayos con esclerómetro fueron realizados en diversas zonas a lo largo del corte donde la roca presentaba mayor descompresión, así como

en otras donde el macizo rocoso se presentaba sano y consistente; con esto fue posible estimar valores de resistencia a la compresión simple en el corte.

La tabla siguiente (Tabla 4.5) ilustra la correlación realizada con esclerómetro para la obtención de la resistencia a la compresión simple en las diferentes zonas del corte. Es importante señalar que el valor mostrado es resultado del análisis de diez (10) ensayos realizados en el corte.

Tabla 4.5. Tabla con distintos valores de resistencia a la compresión simple en el corte

	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>MPa</b>	<b>Valor de rebote (R)</b>
<b>Valores generales, frente del corte (Tr-bv)</b>	570-590	56-58	44 – 48
<b>Valores generales, zonas de descompresión (Tr-bv)</b>	220	22	28
<b>Valores generales para la unidad Ttb-bv</b>	<150 - 270	15 - 26	19 - 31

#### Ensayos realizados con equipo PLT

Con las muestras obtenidas durante el reconocimiento geológico superficial fue posible llevar a cabo seis (6) pruebas de carga puntual, a fin de estimar la resistencia a la compresión simple de la roca en una muestra inalterada. En el subcapítulo 4.1 se hizo descripción de las litologías que conforman al corte, por lo que los ensayos de carga puntual fueron realizados a las litologías de mayor relevancia como son: Riolitas y brechas riolíticas (Tr-bv); Tobas y brechas volcánicas riolíticas (Ttb-bv). La litología correspondiente al horizonte de Toba arcillosa (Ttb<sub>ac</sub>) no fue sometido a prueba, ya que su consistencia es muy baja.

Para realizar la prueba PLT se buscó que las muestras a obtener presentaran condiciones de consistencia y sanidad óptimas. Los resultados de la prueba efectuada son presentados en la Tabla 4.6. De igual forma, como se mencionó en el subcapítulo 3.2, fue obtenido el parámetro ( $I_{s[50]}$ ), el cual es utilizado para la obtención de la resistencia a la compresión simple, de acuerdo a la ecuación descrita en el mencionado inciso.

Tabla 4.6. Resultados obtenidos del ensayo PLT en una muestra de roca del corte

<b>Promedio de índice de resistencia a carga puntual corregido (<math>I_{s[50]}</math>)</b>	<b>Promedio de resistencia a la compresión simple (MPa)</b>	<b>Litología</b>
3.284	75.532	Riolitas y brechas riolíticas (Tr-bv)
0.5141	11.4283	Tobas y brechas riolíticas (Ttb-bv)

Los resultados obtenidos de las pruebas antes mencionadas muestran lo siguiente: Por un lado, los ensayos con esclerómetro a las dos litologías más relevantes en el corte dejan ver que aquella litología que conforma al macizo rocoso del corte (Tr-bv) tiende a ser en general de buena resistencia. Sin embargo, en las zonas donde se presenta un mayor fracturamiento debido a la descompresión, esta litología decrece en casi 20 MPa su resistencia, de acuerdo con los resultados del esclerómetro.

Lo anterior es consistente con el hecho de que en las zonas de mayor descompresión y fracturamiento el macizo rocoso es más afectado por agentes que alteran la matriz rocosa, esto reduce levemente su consistencia; a diferencia de las condiciones que muestra el macizo rocoso en zonas donde se aprecia sano y poco fracturado, algunas fracturas incluso con relleno de sílice.

Por otro lado, los ensayos con esclerómetro que lograron efectuarse a la litología que predomina en la parte alta de la ladera (Ttb-bv) muestran que esta unidad litológica es menos resistente que la litología de riolitas y brechas riolíticas (Tr-bv). Esta menor resistencia se debe a que son litologías de características distintas, las condiciones de consistencia inherentes son menores a las de aquellas rocas que conforman al talud del corte. Asimismo, cubren la parte alta de la ladera, con lo que han estado expuestas al intemperismo y erosión desde su formación, por lo que la alteración que muestran es poco mayor que la del macizo rocoso que conforma al corte.

En cuanto a los ensayos realizados con carga puntual (PLT), estos muestran que las rocas de la unidad Tr-bv, que conforma al corte, son de buena resistencia; lo anterior deriva de promediar resultados de cuatro (4) muestras obtenidas del corte; algunas de ellas con rasgos de alteración en sus componentes.

De igual forma, dos (2) muestras de la litología de tobas y brechas riolíticas (Ttb-bv) fueron sometidas a ensayo de carga puntual (PLT); cuyos resultados muestran claramente que son de menor resistencia respecto de la litología Tr-bv; hecho que también fue observado en los ensayos con esclerómetro.

Cabe aclarar que los resultados obtenidos con cada método no son del todo correlacionables; pues el ensayo tipo PLT estima un valor de resistencia a la compresión simple sobre un espécimen en el mejor estado posible, sin alteraciones ni discontinuidades que lo afecten. En contraparte, el ensayo con esclerómetro considera afectaciones al macizo rocoso por fracturamiento y alteración, ya que las pruebas son realizadas en la parte superficial del corte.

Derivado de los ensayos realizados con esclerómetro y PLT es posible determinar que la roca que conforma al macizo rocoso del corte (Tr-bv) es dura y consistente; pues a pesar de tener afectaciones por discontinuidades, no muestra zonas relevantes de alteración. En cuanto a las rocas presentes por encima del corte y en toda la ladera (Ttb-bv), los resultados obtenidos muestran que son rocas de menor dureza y menor consistencia que las de la unidad Tr-bv; lo que se debe a las propias características geológicas de la roca y a que tienden a estar un poco alteradas.

### Clasificación geomecánica de Bieniawski

Fue utilizada la clasificación RMR de Bieniawski (1989), la cual conjuga información sobre las discontinuidades del macizo rocoso y de consistencia de la roca. Esta clasificación asigna un valor numérico entre 1 y 100 para conocer la calidad de un macizo rocoso. Las tablas siguientes muestran las puntuaciones de cada parámetro que conforma a la clasificación geomecánica.

#### 1. Resistencia de la roca intacta

Este parámetro puede ser obtenido de distintas maneras, usualmente con pruebas de laboratorio o de campo, como lo son los ensayos de carga puntual y con esclerómetro.

Tabla 4.7. Valoración del parámetro de Resistencia a la compresión simple (RCS)

<b>Compresión simple (MPa)</b>	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	< 1
<b>Carga puntual (MPa)</b>	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2			< 1
<b>Puntuación</b>	15	12	7	4	2	1	0
<b>Descripción</b>	Extremadamente dura	Muy dura	Dura	Moderadamente dura	Blanda a muy blanda		

## 2. Índice de calidad de la roca (RQD por sus siglas en inglés)

Parámetro que puede obtenerse en campo mediante perforación, recuperación y medición de núcleos, o de manera teórica con base en el número de discontinuidades que atraviesan un volumen de roca.

Tabla 4.8. Valoración del parámetro RDQ

<b>RQD (%)</b>	100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	< 25
<b>Puntuación</b>	20	17	13	8	3
<b>Descripción</b>	Excelente	Buena	Regular	Mala	Muy mala

Para estimar el parámetro RQD en el presente trabajo, se realizó un análisis volumétrico de las discontinuidades en el macizo rocoso, utilizando la siguiente expresión matemática.

$$RQD = 115 - 3.3 Jv$$

- El valor  $Jv$  corresponde al número de fracturas que se hallan en un metro, medidas sobre una pared del macizo rocoso.

$$Jv = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_3} \dots \frac{1}{s_n}$$

- El parámetro 'S' corresponde al espaciamiento de cada una de las familias de discontinuidades que afectan al macizo rocoso.

## 3. Espaciamiento de las discontinuidades

Tabla 4.9. Valoración del parámetro Espaciamiento

<b>Espaciamiento (m)</b>	> 2	2 - 0.6	0.6 - 0.2	0.2 - 0.06	< 0.06
<b>Puntuación</b>	20	17	13	8	3
<b>Descripción</b>	Muy	Separada	Moderadam	Juntas	Muy

Estudio de caracterización geológico-geotécnico de un corte sobre la autopista Durango-Mazatlán,  
Estado de Durango.

	separada		ente juntas		juntas
--	----------	--	-------------	--	--------

#### 4. Condición de las discontinuidades

Este rubro está conformado por diversos factores como la abertura de las discontinuidades, su continuidad, alteración, rugosidad y relleno.

Tabla 4.10. Valoración de las condiciones de discontinuidades

<b>Continuidad (m)</b>	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20
<b>Puntuación</b>	6	4	2	1	0
<b>Abertura (mm)</b>	0	< 0.1	0.1 – 1	1 - 5	> 5
<b>Puntuación</b>	6	5	4	1	0
<b>Rugosidad</b>	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Plana
<b>Puntuación</b>	6	5	3	1	0
<b>Relleno</b>	Ninguno	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Blando < 5 mm	Blando > 5 mm
<b>Puntuación</b>	6	4	3	2	0
<b>Alteración</b>	Sana	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta
<b>Puntuación</b>	6	5	3	1	0

#### 5. Presencia de agua

Parámetro que evalúa la presencia del agua en el corte.

Tabla 4.11. Valoración del parámetro Agua

<b>Condiciones</b>	Seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo
<b>Puntuación</b>	15	10	7	4	0

## 6. Orientación de discontinuidades respecto a la obra

Este parámetro relaciona la orientación de la discontinuidad principal con respecto del eje de la obra en cuestión; sin embargo, puede variar para cada caso, siendo túneles, taludes o fundaciones.

Tabla 4.12. Valoración del parámetro Orientación respecto a obra

<b>Orientación respecto al eje de la obra</b>	Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable
<b>Puntuación</b>	0	-2	-5	-10	-12

La Tabla 4.13 muestra los valores obtenidos durante el estudio y análisis de información del corte en cuestión. Esta clasificación fue obtenida con el promedio del cálculo de RMR en siete (7) estaciones a lo largo del corte, donde se observó mínimas variaciones en el valor obtenido.

Tabla 4.13. Clasificación geomecánica (RMR) del corte; con las puntuaciones asignadas a cada parámetro

#	Parámetro	Puntuación
1	RCS	6
2	RQD	12
3	Espaciamiento	12
4	Continuidad	1.5
	Abertura	3
	Rugosidad	5
	Relleno	5
	Alteración	5
5	Agua	4.5
6	Orientación respecto a obra	-12
<b>Total</b>		<b>42</b>

El resultado obtenido (42) corresponde con la clasificación **III** de Bieniawski (1989), la cual otorga al macizo rocoso una calidad **regular**, como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 4.14. Clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), en verde resalta la clasificación geomecánica del corte estudiado

<b>Puntuación</b>	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
<b>Clase</b>	I	II	III	IV	V
<b>Calidad</b>	Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala

Es importante mencionar que esta clasificación es una generalidad del corte, no evalúa propiamente las zonas de mayor descompresión del macizo y los elementos inestables identificados.

#### Índice Geológico de Resistencia (GSI)

Complementario a la clasificación RMR, el Índice de Resistencia Geológica (GSI), desarrollado por Hoek y Brown (1995) permite hacer una rápida evaluación del macizo rocoso en términos del grado y características del fracturamiento, así como de la estructura geológica y tamaño de bloque.

De acuerdo con las observaciones hechas durante el reconocimiento geológico superficial, fue posible determinar un valor de GSI para tres condiciones:

- 1) Sectores del macizo rocoso que no son afectadas por alto grado de descompresión y que están fuera de los elementos inestables identificados,
- 2) Sectores del macizo rocoso que corresponden con las zonas de mayor descompresión e incluyen los elementos inestables.

- 3) Sectores del macizo rocoso donde existen intercalaciones de tobas y brechas riolíticas, donde las rocas tienen mayor debilidad y su densidad es menor,

Con base en la estructura del macizo rocoso y las características de sus discontinuidades, las clasificaciones GSI son las que se muestran en la Tabla 4.15 y el cuadro que proporciona el valor, aparece en la Figura 4.12.

Tabla 4.15. Clasificación GSI del corte

<b>Estado del macizo rocoso</b>	<b>Valor</b>	<b>Condiciones de superficie</b>	<b>Estructura</b>
<b>1)</b> Sectores con mayor descompresión y elementos inestables	50 - 55	BR-M	Macizo rocoso parcialmente alterado, con bloques en contacto de forma cúbica. Discontinuidades con superficies rugosas, moderadamente alteradas.
<b>2)</b> Sectores fuera de zonas de descompresión y elementos inestables, con macizo rocoso de mejor calidad	60 - 65	BR-B	Macizo rocoso poco alterado o sin alteraciones, con bloques en contacto de forma cúbica. Discontinuidades con superficies rugosas, ligeramente alteradas.
<b>3)</b> Sectores del macizo rocoso donde existen intercalaciones de tobas y brechas	40-45	BR-P	Macizo rocoso poco alterado con bloques en contacto en forma cúbica. Rocas de menor resistencia y propensas a alterarse con mayor facilidad. Discontinuidades con superficies rugosas moderadamente alteradas a muy alteradas.

INDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI ( <i>geological strength index</i> )  A partir de la clasificación obtenida en la Figura 3.94 seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI.		CONDICIÓN DEL FRENTE				
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con patinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arillosos
	<b>BLOQUES REGULARES (BR)</b> Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	80 70	Estado 2	Estado 1	Estado 3	
	<b>BLOQUES IRREGULARES (BI)</b> Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.		60 50			
	<b>BLOQUES Y CAPAS (BC)</b> Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.			40	30	
	<b>FRACTURACIÓN INTENSA (FI)</b> Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.				20 10	

Figura 4.12. Cuadro que ilustra la clasificación GSI para el corte. (modificado de González, 2004)

### Cohesión (C) y ángulo de fricción interna ( $\Phi$ ) del macizo rocoso

Como fue indicado en el subcapítulo 3.2, estos parámetros se obtuvieron a través del programa RocLab, como una primera aproximación de éstos en condiciones superficiales. Las siguientes Tablas incluyen los valores utilizados en el cálculo, así como los resultados obtenidos.

Se recuerda que el análisis se hace a partir de los parámetros del criterio de rotura de Hoek y Brown, mediante los que el programa calcula la cohesión y el ángulo de fricción interna del criterio de Mohr-Coulomb.

También es importante recalcar que las características del macizo rocoso empleadas son las observadas a nivel superficial.

Tabla 4.16. Parámetros considerados en el criterio de Hoek y Brown

<b>RCS (MPa)</b>	56
<b>RCS en zonas de mayor descompresión (MPa)</b>	28
<b>RCS en intercalación de tobas y brechas (MPa)</b>	25
<b>GSI general del corte</b>	60
<b>GSI en zonas de mayor descompresión</b>	50
<b>GSI en zonas intercalación de tobas y brechas</b>	40
<b>Constante mi</b>	20
<b>Constante mi en intercalación de tobas y brechas</b>	13
<b>Factor de perturbación D general del corte</b>	0.7
<b>Factor de perturbación D en zonas de mayor descompresión</b>	1
<b>Altura máxima del corte (m)</b>	57
<b>Altura promedio en los extremos del corte (m)</b>	30
<b>Altura promedio en zona de tobas y brechas (m)</b>	28
<b>Peso volumétrico de la roca que prevalece (riolitas y brechas) (MN/m<sup>3</sup>)</b>	0.0226
<b>Peso volumétrico de tobas y brechas (MN/m<sup>3</sup>)</b>	0.019

Tabla 4.17. Cohesión y ángulo de fricción interna del criterio de Mohr-Coulomb obtenidos a partir del criterio de Hoek-Brown

<b>Valores asociados a sectores con mayor descompresión y elementos inestables del corte</b>		<b>Valores asociados a sectores donde el macizo rocoso es de mejor calidad</b>		<b>Valores asociados a sectores donde existe intercalación de tobas y brechas (Km 143+920 a 144+080)</b>	
<b>Cohesión (C) (MPa)</b>	<b>Ángulo de fricción interna (<math>\Phi</math>) (°)</b>	<b>Cohesión (C) (MPa)</b>	<b>Ángulo de fricción interna (<math>\Phi</math>) (°)</b>	<b>Cohesión (C) (MPa)</b>	<b>Ángulo de fricción interna (<math>\Phi</math>) (°)</b>
0.181	42.25	0.64	53.18	0.134	41.75

#### **4.6. Representación estereográfica de las discontinuidades**

En el presente inciso se muestra un análisis estereográfico llevado a cabo para las discontinuidades presentes en el corte. Esto con la finalidad de mostrar los posibles mecanismos de falla que se puedan presentar en el talud; ya que, como se ha hecho mención, la conjugación de las discontinuidades y sus características representan el principal problema de inestabilidad en el corte.

Hay que destacar que el principal problema es el causado por la pseudoestratificación, que suscita el mecanismo de falla plana, explicado más adelante.

Para llevar a cabo esta actividad fueron hechos estereogramas que representan la orientación e inclinación de las discontinuidades, así como del corte y la ladera. Con ello se analizó el comportamiento de cada discontinuidad, al igual que la de intersecciones generadas por dos o más de ellas; para cada caso, la orientación del corte se tomó en consideración. La Figura 4.13 muestra un esquema de los diferentes tipos de falla que se pueden presentar en un talud.

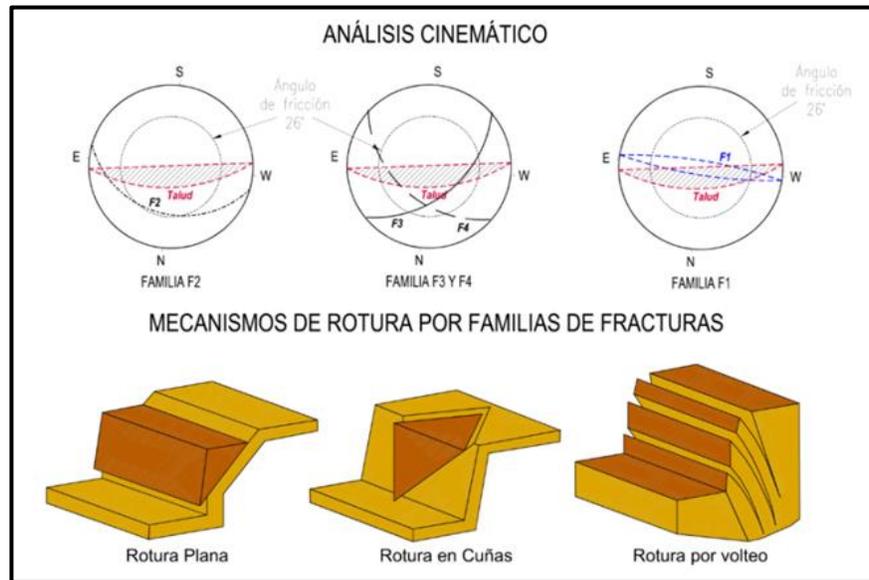


Figura 4.13. Mecanismos de rotura y análisis cinemático (modificado de González, 2004)

De acuerdo con la Figura 4.13 existen tres tipos de rotura que se pueden presentar en los taludes; debido al tipo y características de discontinuidades puede tratarse de:

Falla plana: Mecanismo de rotura en el que bloques o masas del macizo rocoso se desprenden a través del plano de alguna discontinuidad, que usualmente presenta una orientación paralela a la del corte; con ángulo de inclinación menor que el talud del corte, y hacia el mismo sentido que la dirección de inclinación del corte.

Cuña: Mecanismo de rotura en el que se desprenden bloques o masas del macizo rocoso, producto de la intersección de dos o más planos de discontinuidades, y esta intersección presenta dirección de inclinación en el mismo sentido que la dirección de inclinación del corte.

Volteo: Mecanismo de rotura en el que el desprendimiento de bloques o masas sucede por el paralelismo entre la orientación de la discontinuidad y el corte, sin embargo, las inclinaciones de los planos son opuestas

En este corte existen 4 familias principales de discontinuidades, siendo una de ellas la pseudoestratificación (*se*), que presenta la mayor continuidad dentro del corte. Las características de estas discontinuidades han sido descritas en el subcapítulo 4.2; por lo que este capítulo únicamente retoma su orientación; como lo muestra la Tabla 4.18.

Tabla 4.18. Orientación de discontinuidades presentes en el corte

<b>Discontinuidad</b>	<b>Familia</b>	<b>Rumbo</b>	<b>Buzamiento</b>
<b>Fractura</b>	<i>fr1</i>	NW-SE07 <sup>a</sup>	69 <sup>a</sup> a NE
	<i>fr2</i>	NW-SE50 <sup>a</sup>	75 <sup>a</sup> a SW
	<i>fr3</i>	NE-SW77 <sup>a</sup>	83 <sup>a</sup> a SE
<b>Pseudoestratificación</b>	<i>se</i>	NE-SW42 <sup>a</sup>	40 <sup>a</sup> – 55 <sup>a</sup> a NW

Los estereogramas presentados muestran cómo las posibles cuñas, generadas entre las discontinuidades que afectan al macizo rocoso, cobran diferente relevancia según la orientación del mismo corte. No obstante, es posible apreciar que la pseudoestratificación determina un plano casi paralelo y muy similar al que representa la parte de la ladera por encima del hombro del talud; esto es debido a que la morfología de este corte es en gran medida controlada por la presencia de la pseudoestratificación.

Los estereogramas de la Figura 4.14 a la Figura 4.18 fueron realizados a manera de pares; uno para el talud del corte, y otro para la ladera; ya que varios elementos inestables se sitúan sobre la ladera. Los bloques que se pueden suscitar varían en tamaños desde 0.008 m<sup>3</sup> hasta 8 m<sup>3</sup>.

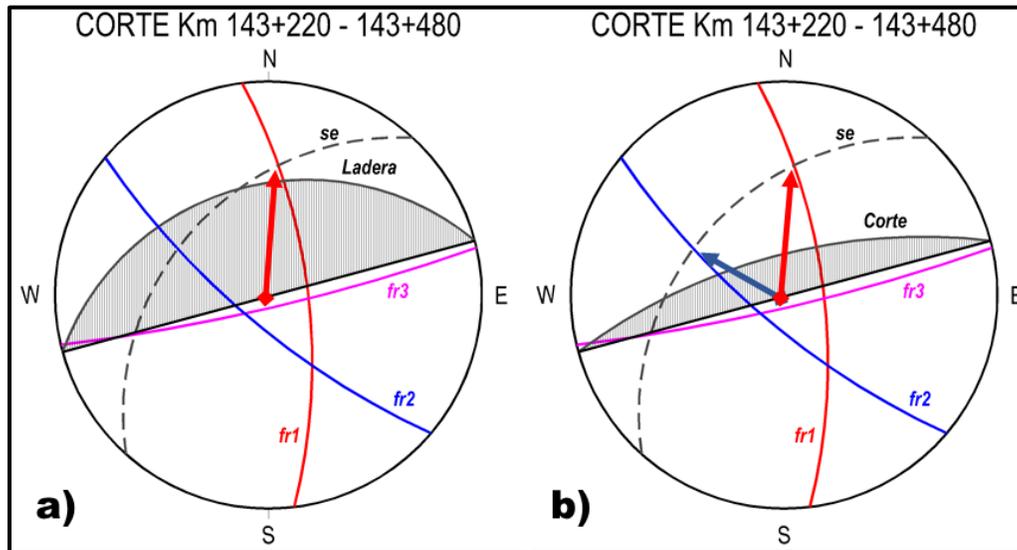


Figura 4.14. Estereogramas de la porción inicial (noreste) del corte

Los estereogramas de la Figura 4.14 muestran la zona inicial del corte (al noreste) donde la orientación del talud (NE75SW/69 a NW) y la ladera (NE75SW/35 a NW) evita que la pseudoestratificación propicie mecanismo de falla plana; aun así, se pueden suscitar cuñas.

Es notable que la cuña principal que se puede generar es aquella formada por las familias *fr1* y *se*, que muestra dirección de salida al NE04<sup>a</sup> con inclinación de 27<sup>a</sup> (flecha roja). En la Figura 4.14,b) puede verse que la intersección entre las familias *fr2* y *se*, puede suscitar cuñas con salida de bloques en dirección NW63<sup>a</sup> e inclinación de 39<sup>a</sup> (flecha azul); cuñas que tienen relevancia sobre el corte únicamente. La familia *fr3* se muestra paralela a la orientación del corte, estas discontinuidades pueden suscitar volteo, aunque más bien, son responsables de seccionar bloques del macizo rocoso.

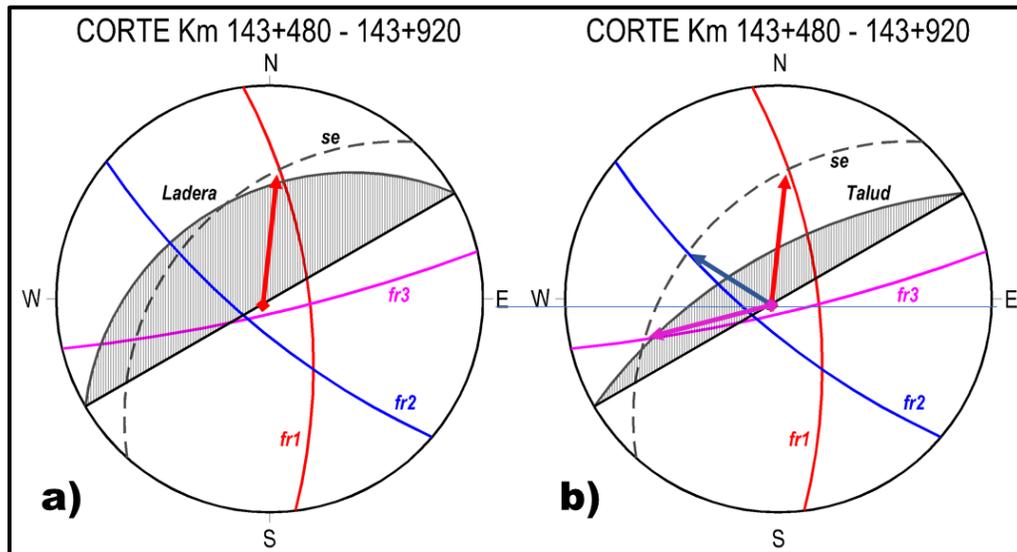


Figura 4.15. Estereogramas en zona noreste, posterior a una curva en el corte

La Figura 4.15 muestra estereogramas en los que se aprecia el cambio de dirección del talud (NE60SW/66 a NW), lo que genera que la pseudoestratificación dibuje un semicírculo casi paralelo al que representa la ladera (NE60SW/37 a NW) por encima del corte (Figura 4.15,a)); como se mencionó, esto evidencia que dicha ladera sea propensa a desprendimientos por falla plana, sumado al seccionamiento de bloques por la intersección entre las discontinuidades.

En cuanto al talud del corte, el estereograma de la Figura 4.15,b) muestra la presencia de tres (3) cuñas; dos de las cuales ya se ha hecho mención (flecha roja y azul), siendo ahora la cuña entre las familias  $fr2$  y  $se$ , la de mayor relevancia, ya que la dirección de salida (NW63<sup>a</sup>/39<sup>a</sup>) es casi paralela a la dirección de inclinación del talud. Con menor relevancia se encuentran las cuñas que se pueden obtener de la intersección entre las familias  $fr3$  y  $se$  (flecha rosa), ya que la dirección de salida que muestran es oblicua al corte (SW74<sup>a</sup>/24<sup>a</sup>).

Es posible observar que la discontinuidad *fr3* ya no muestra paralelismo con la dirección del corte, por lo que mecanismos de falla por volteo son descartados.

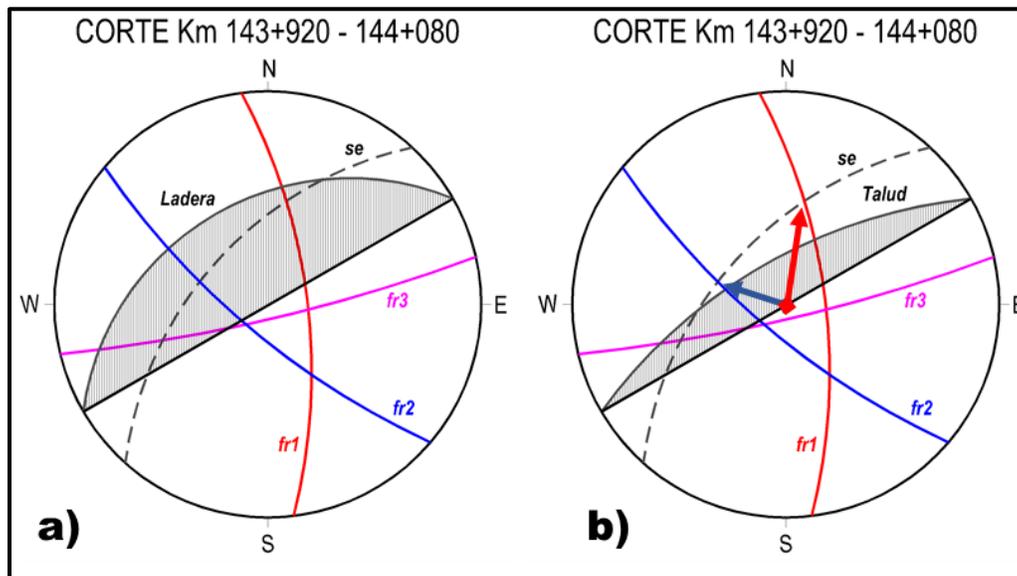


Figura 4.16. Estereogramas en la parte media del corte, mayor inclinación de 'se'

Los estereogramas previos (Figura 4.16) son muy similares a los antes descritos; sin embargo, para la zona que representan se tomó en cuenta al plano de pseudoestratificación por el cual se infiere sucedió el deslizamiento más reciente. Es posible ver que debido al cambio en el buzamiento de la pseudoestratificación (ahora de  $55^{\circ}$ ) las cuñas formadas por la intersección de las familias *fr1* y *se* (flecha roja), así como *fr2* y *se* (flecha azul) muestran una ligera diferencia en sus orientaciones; la primera con salida de bloques al  $NE10^{\circ}/37^{\circ}$ , mientras que la segunda con salida al  $NW71^{\circ}/53^{\circ}$ . Para este caso las orientaciones del talud y ladera son las siguientes:  $NE60SW/66$  a NW y  $NE60SW/38$  a NW, respectivamente.

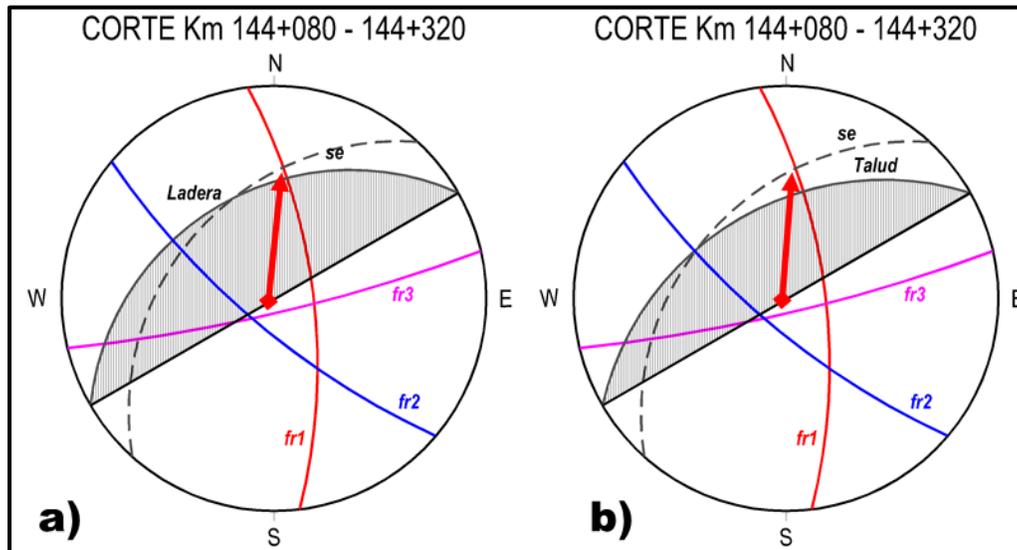


Figura 4.17. Estereogramas de la zona con menor altura del corte

La Figura 4.17 muestra el par de estereogramas correspondientes a una zona donde el corte adquiere bajas alturas y menor inclinación, por lo que el corte se dibuja como un semicírculo muy similar al de la ladera (talud: NE60SW/36 a NW; ladera: NE60SW/43 a NW). Esto repercute de dos formas; por un lado, la generación de cuñas se reduce sólo a la formada por las familias *fr1* y *se* (flecha roja) cuya salida de bloques es hacia el NE04<sup>a</sup>/27<sup>a</sup>. Sin embargo, como lo muestra la Figura 4.17,b), la similitud entre los semicírculos de la pseudoestratificación y el talud pueden propiciar mecanismos de falla plana con mayor posibilidad de ocurrencia.

Para representar la porción final del corte (al suroeste) se realizaron los estereogramas de la Figura 4.18. en esta zona el corte vuelve a tener alturas mayores; lo que propicia que se generen las cuñas descritas para la Figura 4.15; las cuales muestran las siguientes direcciones de salida: NE04<sup>a</sup>/27<sup>a</sup> (flecha roja); NW63<sup>a</sup>/39<sup>a</sup> (flecha azul); SW74<sup>a</sup>/24<sup>a</sup> (flecha rosa).

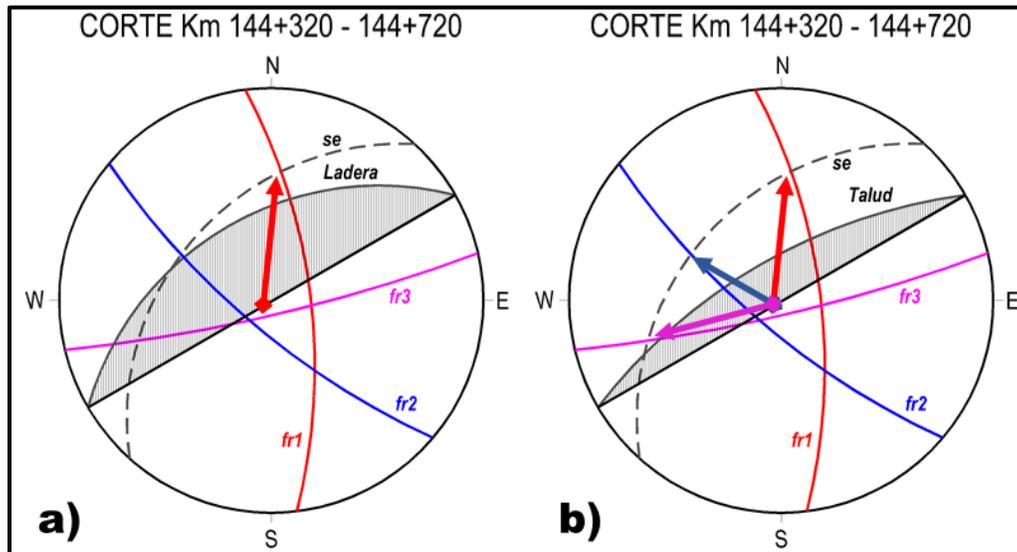


Figura 4.18. Estereogramas de la porción final del corte (al suroeste), se aprecia la similitud con el estereograma de la Figura 4.15

A manera de síntesis, la Tabla 4.19 describe las características de cada mecanismo de falla que se puede suscitar, una vez realizado el análisis cinemático de las discontinuidades.

Tabla 4.19. Mecanismos de falla en el corte

<b>Mecanismos de falla</b>		
<b>Falla plana</b>	<b>Cuña</b>	<b>Volteo</b>
<b>SÍ</b>	<b>SÍ</b>	<b>NO</b>
Debido a la familia se, representa el mayor riesgo, especialmente sobre la ladera	Por la intersección de discontinuidades, sobre todo las familias fr1 y fr2, que conjugan con 'se'	Únicamente la familia fr3 tiene características de generar volteo en la parte inicial del corte

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

De acuerdo con lo descrito en los capítulos anteriores que conforman este informe se presentan las conclusiones y recomendaciones pertinentes del trabajo.

### **5.1. Conclusiones**

- Este corte se sitúa entre los Km 143+160 y 144+720, sobre el lado izquierdo de la autopista. La longitud del corte es de 1,560 m con alturas de entre 20 y 70 m. Asimismo, es limitado al noreste por un arroyo; mientras que al suroeste se halla la entrada del túnel “Tortuga”.
- Como tratamientos previos, el talud cuenta con los siguientes:
  - Malla de triple torsión, y concreto lanzado entre cadenamientos km 144+020 y km 144+120.
  - Malla de triple torsión entre cadenamientos 144+420 y km 144+500; con algunas partes rotas y/o desprendidas.
  - Bermas a diferentes alturas y de continuidad lateral limitada; distribuidas entre el km 143+480 y km 143+960.
- La morfología presente en casi todo el corte permite ver evidencias de antiguos deslizamientos, suscitados por medio de un plano asociado a pseudoestratificación.
- La geología de la zona del corte es poco variable. Consta principalmente de dos unidades (Capítulo 4; subcapítulo 4.1)
  - Riolitas y brechas volcánicas riolíticas (Tr-bv) que datan del Terciario – Oligoceno. Estas rocas muestran una textura generalmente fluidal, porfírica, con cristales de cuarzo, feldespatos, vidrio volcánico y fragmentos de roca en una

matriz afanítica; la cual, en el caso de las brechas volcánicas, tiende a ser más porosa.

- Tobas y brechas volcánicas riolíticas (Ttb-bv) de la misma edad que unidad anterior. Son rocas de color gris claro a oscuro, con textura tobácea a semifluidal, poco porosa; poco soldadas y moderadamente consistentes; con fragmentos de roca y escasos cristales de feldespatos, cuarzo y vidrios.
- Dentro de la unidad litológica Ttb-bv existe un horizonte de Toba arcillosa (Ttb<sub>ac</sub>); muy alterada e inconsistente; de aproximadamente 50 cm de espesor; en los alrededores del km 144+020. De suma importancia para la estabilidad del corte dadas las características que muestra.
- Las rocas que conforman al macizo rocoso (Tr-bv) en general están sanas o poco alteradas; son consistentes y con moderado fracturamiento, en especial hacia los bordes del corte y algunas zonas al frente por descompresión. Muestran evidencia de flujo de agua a través de la pseudoestratificación.
- Existe una falla en los alrededores del km 144+480, inferida como falla lateral derecha; muestra una zona de influencia de 7 m sin gran relevancia para la estabilidad del corte.
- El macizo rocoso que conforma al talud muestra 4 familias de discontinuidades, las cuales son clasificadas como: *fr1*, *fr2* y *fr3* (fracturas) y *se* (pseudoestratificación) enumeradas según la frecuencia y continuidad que tiene cada una. No obstante, es de resaltar que la pseudoestratificación es la discontinuidad con mayor relevancia para la inestabilidad del corte (Capítulo 4; subcapítulo 4.2).

- Las discontinuidades en general se aprecian ligeramente alteradas; con superficies planas a onduladas y rugosas; generalmente abiertas (0.5 a 5 mm); en algunos sectores con ocasional relleno de sílice y sólo en algunas ocasiones materiales finos. Algunas discontinuidades muestran humedad, mientras que el frente del corte tiene evidencia de flujo de agua a través de la pseudoestratificación.
- Las discontinuidades que afectan al macizo rocoso son el principal problema, generan elementos inestables que pueden caer a la autopista; en especial debido al plano de pseudoestratificación.
- Existen diversos elementos inestables en el corte, como bloques, zonas y franjas con potencial salida hacia la carretera (debido a la pseudoestratificación), por lo que son el principal factor de riesgo para la seguridad de los usuarios. (Capítulo 4; subcapítulo 4.3)
- Con apoyo de la exploración geofísica y de los sondeos exploratorios se realizó la zonificación del corte en siete (7) unidades geológico-geotécnicas diferentes. En primera instancia, tres (3) unidades que corresponden a materiales en estado suelto o de nula consistencia; complementando, cuatro (4) unidades relacionadas al macizo rocoso (Capítulo 4; subcapítulo 4.4; Tabla 4.4)
  - Unidad UG-Ia que corresponde a materiales sueltos por detrás de la línea del hombro del talud, así como en la parte baja de la ladera, lado derecho de la carretera.
  - Unidad UG-Ib: definida a partir de la integración de información sobre el terraplén (km 144+120 a 144+720), corresponde a materiales controlados, usados para relleno y nivelación.

- Unidad UG-Ic: roca en estado muy alterado y sin consistencia, asociado a materiales de brecha de falla y a horizonte de toba arcillosa (Ttb<sub>ac</sub>)
- Unidad UG-IIa que corresponde al macizo rocoso en condiciones de descompresión, sobre todo en el frente, bordes del corte y en la ladera; es asociada también a la unidad Ttb<sub>bv</sub>.
- Unidad UG-IIb: corresponde al macizo rocoso por detrás de la zona de descompresión, se infiere es de calidad moderada.
- Las unidades UG-IIc y UG-IId que corresponden al macizo rocoso en buenas condiciones hacia el interior del corte. En la primera mitad del corte es mayor su presencia debido a la altura del talud.
- Derivado de la revisión a los sondeos exploratorios en la parte superior del corte, se destacan los siguientes aspectos:
  - El macizo rocoso en la parte superior de la ladera, entre los cadenamientos 143+400 y 143+900, se encuentra en buenas condiciones; ya que los sondeos C4-S-02 y C4-S-03 registraron una litología homogénea, sana y consistente; únicamente afectada por la intersección de discontinuidades, en especial la pseudoestratificación.
  - El macizo rocoso que conforma a la ladera entre los cadenamientos 143+900 y 144+040 muestra afectación por la infiltración de agua en las discontinuidades.
  - El sondeo C4-S-04 registró un horizonte de roca en mal estado (alterada e inconsistente) subyaciendo a otro horizonte de roca en condiciones regulares a buenas. El sondeo C4-S-05 registró una condición similar en el contacto entre pseudoestratos de tobas y brechas volcánicas riolíticas. Esto se debe a que el

- plano de pseudoestratificación, principalmente, permite el flujo de agua; asimismo, la litología de tobas y brechas es susceptible a mayor alteración ante la saturación de agua
- Lo observado en el sondeo C4-S-04 y C4-S-05, en conjunción con las evidencias de campo, dieron pauta a definir los elementos inestables FI-01 y ZI-54; para el elemento FI-01 existe un horizonte de roca alterada e inconsistente que puede suponer un plano de debilidad para la roca que le sobreyace; el elemento ZI-54 muestra que las condiciones de infiltración de agua pueden alterar y degradar a la roca en un periodo de tiempo relativamente corto.
  - La zona de falla situada en los alrededores del km 144+480, y registrada por el sondeo C4-S-06, no adquiere gran espesor hacia el interior del macizo rocoso.
  - Es importante señalar que los sondeos exploratorios dieron información muy importante para corroborar que el plano de pseudoestratificación es la estructura que permite el mayor paso de agua; con gran afectación para el corte y ladera entre los cadenamientos 143+900 y 144+040.
  - De acuerdo con las clasificaciones geomecánicas obtenidas en este trabajo (RMR y GSI; Subcapítulo 4.5; Tabla 4.15 y Tabla 4.15), se tienen tres condiciones:
    - 1) Donde el macizo rocoso está muy descomprimido (usualmente en los bordes del corte) y donde existen bloques y zonas inestables. Ahí, el macizo es de mala a regular calidad (GSI= 50 a 55).
    - 2) Sectores del macizo rocoso fuera de las zonas de mayor descompresión y elementos inestables, donde es de regular a

buena calidad, condición de mayor presencia en el corte (RMR= clase III, GSI= 60-65).

- 3) Sectores del macizo rocoso donde existen intercalaciones de tobas y brechas, donde la roca es menos resistente, es más proclive al intemperismo (GSI= 40-45).
- Con base en las observaciones superficiales del macizo rocoso y a través del programa computacional RocLab se obtuvieron los parámetros de cohesión (C) y ángulo de fricción interna ( $\Phi$ ) del criterio de falla de Mohr-Coulomb, a partir de parámetros del criterio de Hoek y Brown, en las dos condiciones señaladas en el inciso anterior:
    - 1) En zonas de mayor descompresión del macizo rocoso y en elementos inestables:  $C= 0.181$  MPa,  $\Phi= 42^\circ$ .
    - 2) Fuera de las zonas antes señaladas, en macizo rocoso de mejor calidad:  $C= 0.64$  MPa,  $\Phi= 53^\circ$ .
    - 3) Sectores con presencia de tobas y brechas:  $C= 0.134$  MPa,  $\Phi= 42^\circ$ .
  - El análisis cinemático realizado muestra que el principal mecanismo de falla que se puede suscitar en el corte es por falla plana, lo cual es consistente con la presencia de la pseudoestratificación (Capítulo 4; subcapítulo 4.6; Tabla 4.19).
  - Con base en el análisis cinemático se concluye que podrían ser generadas dos (2) cuñas por la intersección de las discontinuidades; además del mecanismo de falla plana.
    - Una cuña que se puede generar muestra salida de bloques hacia el NE04<sup>a</sup> con 27<sup>a</sup> de inclinación (NE04<sup>a</sup>/27<sup>a</sup>), misma que podría variar en orientación debido al cambio en el

buzamiento de la pseudoestratificación. Esta variación sería a NE10<sup>a</sup>/37<sup>a</sup>

- Otra cuña de posible generación presenta salida de bloques en dirección NW63<sup>a</sup> con 39<sup>a</sup> de inclinación; igualmente puede tener variación según el plano de pseudoestratificación, siendo a NW71<sup>a</sup>/53<sup>a</sup>.
- Es importante recalcar que, a pesar de los análisis cinemáticos realizados, el principal mecanismo de falla que puede ocurrir es el de falla plana; debido a la pseudoestratificación que muestran las rocas que conforman al corte y la ladera, así como las condiciones en que se encuentra esta discontinuidad.

## 5.2. Recomendaciones

- Es importante colocar contracunetas para que el flujo de agua pluvial sea canalizado hacia los costados del corte, ya que no existe drenaje alguno y la infiltración del agua a través de la pseudoestratificación genera alteración sobre dicho plano de debilidad.
- De igual forma, colocar malla de triple torsión a lo largo del corte ayudaría a reducir el constante problema de “graneo”, que representa un riesgo a la seguridad de los usuarios de la vía.
- Para complementar de mejor manera el presente estudio se recomienda la ejecución de estudios más detallados en la zona del corte. Tal como estudios detallados de mecánica de rocas, a fin de determinar con mayor precisión la posible generación de bloques, así como la resistencia al cortante de los planos de pseudoestratificación con dirección de salida hacia el corte y el tratamiento que pueda ser aplicado para su remediación.
- De acuerdo con lo observado durante la ejecución de estos trabajos, es prácticamente nula la presencia de bermas, por lo que su construcción en zonas de mayor riesgo sería benéfica para el corte.

## 6. REFERENCIAS

**Aranda-Gómez, J.J. et al., 1997**, Cenozoic vulcanism and tectonics in NW Mexico – a transect across the Sierra Madre Occidental volcanic field and observations on extension-related magmatism in the southern basin and range and gulf of California tectonic provinces, en: Magmatism and tectonics in the central and northwestern Mexico, Aguirre-Díaz, G.J. et al., México, D.F., UNAM, Instituto de Geología, excursión 11, p. 41-84.

**Bieniawski, Z.T., 1975**, *The point-load test in geotechnical practice*, Engineering Geology 9, 1-11, Holanda.

**Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad CONABIO, 2008**, Metadatos de las provincias fisiográficas de México, recurso disponible en línea. Enlace: [http://conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rfisio4mgw.xml?\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rfisio4mgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)

**Dr. Gabriel Auvinet Guichard**, IX Conferencia Alfonso Rico Rodríguez, Presentación en Power Point

**Gonzalez de Vallejo, Luis, et al., 2005**, *Ingeniería Geológica*, 1a ed., 1a reimp., Madrid, Pearson Educación.

**Hoek, E., Brown, E.T., 1988**, *The Hoek-Brown failure criterion*, Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. (ed. J.C. Curran), 31-38. Toronto, Dept. Civil Engineering, University of Toronto.

**Hoek, E., 1990**, *Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, Vol. 27, No 3. Pp 227-229.

**Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 1988**, *Carta geológica F13-2 El Salto, escala 1:250,000*, recurso disponible en línea. Enlace: <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>

**Servicio Geológico Mexicano SGM, 2009**, *Carta geológico-minera F13-A27 La Ciudad*, escala 1:50,000, recurso disponible en línea. Enlace: <https://www.sgm.gob.mx/CartasDisponibles/>

**Torres López, Mayra, 2013**, Excavación y sostenimiento primario en interior del túnel “El Sinaloense”, México, UNAM, Facultad de Ingeniería, Tesis de licenciatura, director de tesis: Ing. Luis Arturo Tapia Crespo