



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Construcción del Túnel San
Sebastián de la autopista
Barranca – Larga Ventanilla**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Ulises Salvador Cedillo Miranda

ASESORA DE INFORME

M.C. Edith Fuentes Guzmán



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a las personas que han sido fundamentales en mi camino hacia la obtención del título de Ingeniero Geólogo. Sin su apoyo y sacrificio, este logro no habría sido posible.

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, Salvador Cedillo y Janeth Miranda. Su amor incondicional, orientación y constante apoyo a lo largo de este arduo viaje académico han sido invaluable. Sus sacrificios y la firme creencia en mi capacidad me han inspirado a superar cada desafío.

A mis queridas hermanas, Diana y Candi, les agradezco por su apoyo y comprensión durante los momentos en que mi dedicación a los estudios me mantuvo ocupado. Su apoyo emocional y ánimo constante han sido un faro de luz en los momentos más oscuros.

También quiero extender mi gratitud a la empresa COCONAL S.A.P.I por brindarme la oportunidad de poner en práctica mis conocimientos y habilidades. Agradezco al Ing. Alberto González, al Ing. Fernando de la Rosa y al Ing. Isaac Núñez, por su mentoría y guía durante mi estancia en la empresa. Su experiencia y sabiduría han enriquecido mi formación y mi comprensión de la geología aplicada a la ingeniería civil.

A mi asesora la M.C. Edith Fuentes Guzmán, y mis sinodales por su valioso tiempo.

A todos los que han sido parte de este viaje, mi más sincero agradecimiento.

INDICE.

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN.

1.1. Objetivo general -----	5
1.2. Objetivos particulares -----	6
1.3. Antecedentes -----	6
1.3.1. Descripción de la empresa-----	6
1.3.2. Autopista Barranca Larga -Ventanilla -----	7
1.3.3. Ubicación del túnel San Sebastián -----	8
1.3.4. Descripción del proyecto -----	8

CAPITULO 2 GEOLOGÍA

2.1. Geología regional -----	11
2.2. Geología en la zona del túnel -----	13
2.3. Geología estructural -----	15

CAPITULO 3 SEGUIMIENTO GEOTECNICO DEL TÚNEL

3.1. Caracterización geotécnica -----	19
--	----

CAPITULO 4 METODOLOGÍA

CAPITULO 5 RESULTADOS

5.1. Condición geotécnica E -----	26
5.2. Condición geotécnica D (-) -----	29
5.3. Condición geotécnica D (+) -----	31

CAPITULO 6 INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

6.1. Instrumentación geotécnica superficial	34
6.1.1. Inclínómetro	35
6.1.1.1. Metodología	36
6.1.1.2. Resultados	38
6.1.2. Extensómetros	43
6.1.2.1. Metodología	45
6.1.2.2. Resultados	47
6.1.3. Mojoneras	52
6.1.3.1. Metodología	52
6.1.3.2. Resultados	54
6.2. Instrumentación geotécnica al interior del túnel	55
6.2.1. Convergencias	55
6.2.2. Metodología	56
6.2.1.2. Resultados	58

CAPITULO 7 CONCLUSIONES

REFERENCIAS	62
ANEXOS	63

Resumen.

El trabajo que a continuación presento tiene como objetivo informar acerca de mis actividades relacionadas con mi carrera de ingeniería geológica durante la construcción de la autopista Barranca Larga – Ventanilla en el estado de Oaxaca, específicamente en el túnel San Sebastián. Además, se abordará el contexto geológico en el que se desarrolló la construcción del túnel, el cual tuvo un impacto significativo en el proceso constructivo.

El túnel San Sebastián se encuentra ubicado en los límites del complejo metamórfico Xolapa, caracterizado por la presencia de ortogneis y paragneis cuarzo feldespáticos. El conocimiento de la naturaleza geológica de la zona de construcción fue fundamental para determinar las propiedades mecánicas del terreno y, en consecuencia, proponer un método de sostenimiento que se alineara con la evaluación geotécnica realizada en el campo.

Dado que la zona se encuentra en una región sísmica y la calidad mecánica de la roca no era óptima, se llevó a cabo una inspección geotécnica para evaluar la estabilidad del terreno. Contamos con instrumentación geotécnica que proporcionó información valiosa sobre las condiciones dentro del túnel. Esta instrumentación incluyó un inclinómetro, dos extensómetros de barra y dianas en la periferia de ambos portales. Además, en el interior del túnel, se utilizaron convergencias distribuidas de acuerdo con las condiciones geotécnicas específicas.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Objetivo general

El propósito de este trabajo es describir las tareas que desempeñé en la empresa constructora COCONAL, específicamente en el proyecto de la carretera hacia la costa desde el centro de Oaxaca, en la construcción del Túnel San Sebastián. Durante mi participación en este proyecto, apliqué mis conocimientos para evaluar la calidad mecánica de la roca, con el objetivo de proponer un método de sostenimiento adecuado a las características del terreno. Siempre

mantuvo una estricta conformidad con el método constructivo establecido por el proyectista, garantizando de esta manera la eficiencia y la seguridad en la ejecución de la obra.

1.2. Objetivos particulares.

Durante el desarrollo de este proyecto, se propuso alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un mapeo geomecánico en cada frente de excavación, desde el tajo de acceso del portal Oaxaca hasta el tajo de acceso del portal Puerto Escondido, con el fin de caracterizar las propiedades mecánicas de la roca en cada zona.
- Utilizar los resultados del mapeo geomecánico para establecer una condición geotécnica y, a partir de esta, proponer un método de sostenimiento que se ajuste a las pautas definidas en el proyecto ejecutivo.
- Llevar a cabo mediciones de la instrumentación geotécnica en el exterior del túnel, la cual incluyó la utilización de un inclinómetro, dos extensómetros de barra y la medición de dianas en la periferia de ambos portales, con el propósito de evaluar la estabilidad del terreno en las áreas circundantes al túnel.
- Realizar mediciones de la instrumentación geotécnica al interior del túnel, compuesta por convergencias instaladas en diferentes condiciones geotécnicas, para obtener información valiosa sobre la estabilidad en el interior del túnel.

Estos objetivos particulares se plantearon con el fin de asegurar un adecuado control y manejo de la geotecnia durante la construcción del proyecto.

1.3. Antecedentes.

1.3.1 Descripción de la empresa.

La Compañía Contratista Nacional (COCONAL) es una empresa cuyo propósito es la construcción y desarrollo de infraestructura carretera, aeroportuaria, marítima, hidráulica e industrial; con tecnología, confiabilidad, calidad y personal calificado. Así como, el diseño y operación de



proyectos de autopistas concesionadas integrales y económicamente viables. (COCONAL 2023). El capital Humano es la base fundamental de la gestión de negocios de la empresa; por ello, aplicamos políticas y procedimientos para capacitar, desarrollar y motivar permanentemente a nuestros colaboradores; con retribuciones competitivas y justas.



Figura 1. COCONAL, 2023. Descripción de las obras realizadas por la empresa. COCONAL. <https://coconal.com/servicios/#module83>.

Misión.

Somos una organización que promueve, contrata y realiza la construcción y concesión de proyectos de infraestructura con calidad en tiempo y costo; cumpliendo con las expectativas de satisfacción y rentabilidad de nuestros usuarios, clientes, y accionistas (COCONAL 2023).

Visión.

Incrementar nuestra participación en los servicios de infraestructura con tecnología, confiabilidad, calidad y personal calificado, preservando el medio ambiente para contribuir al bienestar de la sociedad (COCONAL 2023).

Política.

Los que integramos COCONAL nos comprometemos a ser una empresa competitiva en la administración y construcción de proyectos de infraestructura, de manera eficiente y rentable, bajo el concepto de sustentabilidad basado en nuestro sistema de gestión. A través de una visión preventiva, nos enfocamos en mitigar y prevenir impactos ambientales, riesgos y enfermedades laborales (COCONAL 2023).

Objetivos.

Cumplir con los requisitos contractuales, organizacionales y legales, a través de nuestro sistema de gestión integral. Diseñar y ejecutar los programas de capacitaciones en cada uno de los proyectos para asegurar el desarrollo y actualización de nuestros colaboradores. Mantener maquinaria, equipo y herramientas en buen estado de operación, asegurando su disponibilidad y óptimo rendimiento. Cumplir con los requisitos legales en materia de medio ambiente, seguridad y salud (COCONAL 2023).

1.3.2 Autopista Barranca Larga – Ventanilla.

La obra de 104.3 kilómetros tiene una inversión superior a los 8 mil 234 millones de pesos y contará con 10 puentes, 3 túneles, 2 casetas, 2 viaductos y 15 entronques, beneficiará a más de 100 mil habitantes de 11 comunidades de la región y se concluirá a inicios del 2024, el proyecto genera más de 5 mil 300 empleos directos e indirectos y disminuirá los tiempos de recorrido de 6 a 2 horas y media (Secretaria de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, Autopista Barranca Larga – Ventanilla, 2023).

El desarrollo de las labores se dividió en cuatro tramos, mismos que presentan importantes avances: el tramo 1, del kilómetro 100+000 al kilómetro 135+000; el tramo 2, del kilómetro 135 al kilómetro 154+000; el T3, del kilómetro 154+000 al kilómetro 178+000, y el T4, del kilómetro

178+000 al kilómetro 204+300. En donde COCONAL cuenta con 2 contratos vigentes correspondientes al Tramo I y al Tramo II y las casetas de cobro en Barranca Larga y Ventanilla.

1.3.3. Ubicación del túnel San Sebastián.

La zona del túnel se encuentra en el tramo Barranca Larga–Ventanilla en el estado de Oaxaca, entre los cadenamientos 151+703 (portal Oaxaca) y 151+879.47 (portal Puerto Escondido) en el estado de Oaxaca.



Figura 1. Croquis de localización del Túnel San Sebastián.

1.3.4. Descripción del proyecto.

La excavación realizada para conformar el túnel tiene una longitud de 140 m, un ancho máximo de 14.8 m y una altura de 8.8 m al eje e incluye dos túneles falsos de 16.9 y 19.41 m (al nivel de la rasante) en los portales Oaxaca y Puerto Escondido, respectivamente. El alineamiento horizontal es en curva izquierda y el alineamiento vertical tangente, con pendiente descendente

de 6 %. Las elevaciones de la rasante al inicio y término del túnel excavado son 1432.1 y 1423.5 msnm respectivamente. La cima del cerro en el eje de trazo se encuentra en la elevación 1482.7 msnm, por lo que el techo máximo de roca arriba de la clave será en este punto del orden de los 45 m.

Las condiciones geológico-geotécnicas son de vital importancia en la construcción del túnel, ya que influyen en la estabilidad de la obra. Un conocimiento preciso del terreno donde se va a excavar el túnel, incluyendo la estructura geológica, la composición de los materiales y las propiedades mecánicas de las rocas, es fundamental para definir el método de excavación, los sistemas de soporte y los tiempos de construcción. Además, una buena comprensión de las condiciones geológico-geotécnicas permite anticipar posibles riesgos y problemas que puedan presentarse durante la construcción y, de esta manera, planificar las medidas necesarias para mitigarlos o prevenirlos.



Figura 2. Túnel San Sebastián portal Puerto Escondido.

Para evaluar de manera precisa las condiciones geológico - geotécnicas desde el inicio de la construcción del túnel San Sebastián, se llevó a cabo un minucioso mapeo de las características geomecánicas de la roca que afloraba en cada avance de excavación, lo que permitió determinar la condición geotécnica de la roca correspondiente a dicho avance, para verificar así, que las condiciones físicas coincidieran con proyecto y poder aplicar el método constructivo correspondiente a dicha condición resultante. Además, se realizó un riguroso monitoreo por medio de la instrumentación geotécnica tanto en la superficie como en el interior del túnel, tal y como se había previsto en el proyecto ejecutivo. Este monitoreo continuo permitió obtener información en tiempo real sobre el comportamiento del terreno, deformación, presiones de aflojamiento en la roca y demás factores que pudieran afectar la estabilidad del túnel, lo que facilitó la toma de decisiones oportunas para prevenir o corregir cualquier problema. Gracias a estos trabajos, se logró garantizar la eficiencia y seguridad de la obra.



Figura 3. Túnel San Sebastián portal Puerto Escondido antes de la excavación.

2. Geología

2.1 Geología regional.

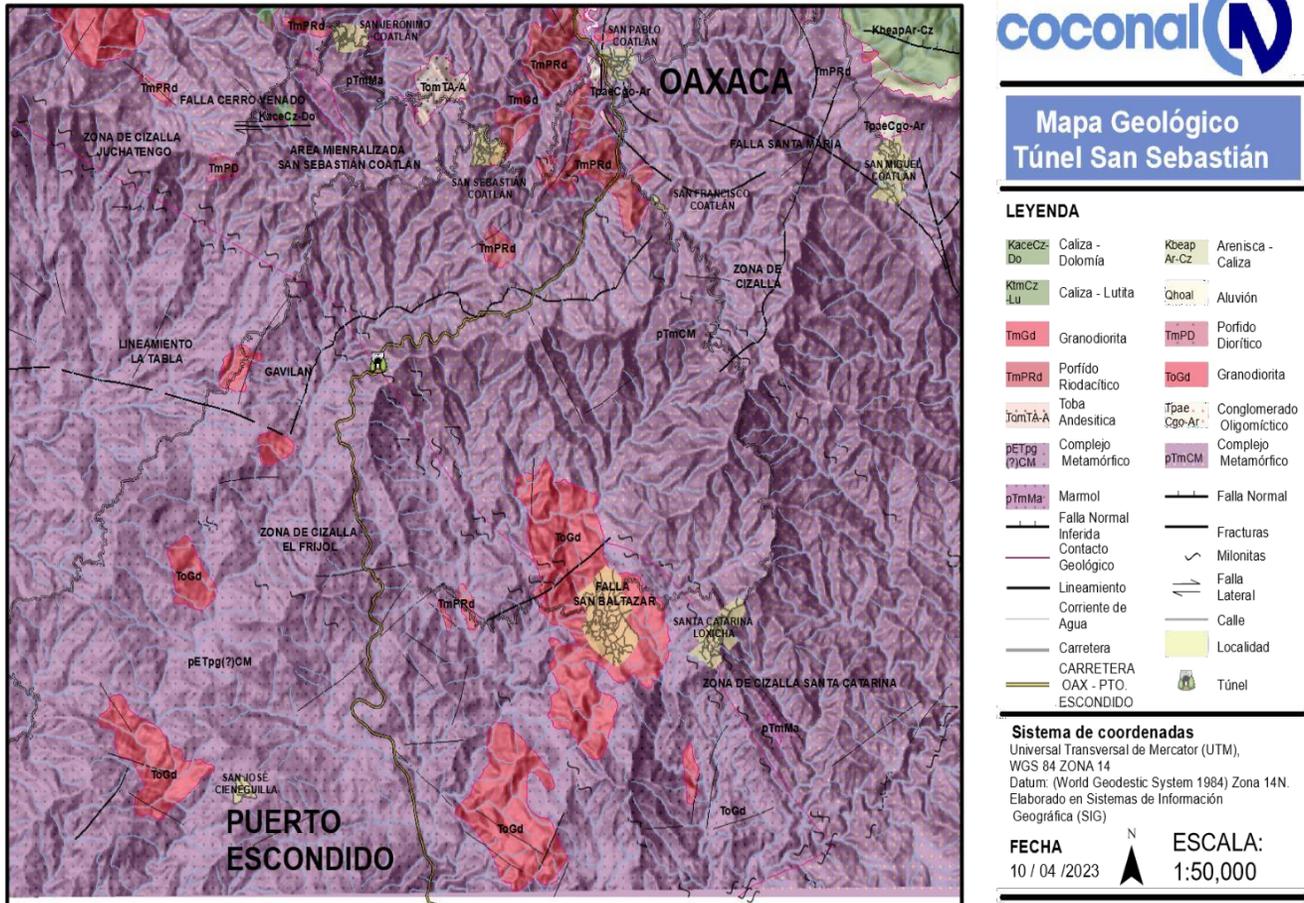


Figura 4. Mapa geológico regional de la ubicación del túnel San Sebastián (Modificado SGM 2016, E14-D87)

El complejo basal metamórfico aflora ampliamente en la zona de estudio y se han investigado ampliamente las zonas de Nochixtlán, Huitzio, Telixtlahuca y Miahuatlán, faltando por estudiar prácticamente el resto de la región; su distribución ocurre en una franja de dirección NW-SE, dentro de la Provincia Geológica Zapoteca (Terreno Oaxaca), desde las inmediaciones de Nochixtlán, límite septentrional, hasta su límite meridional en la localidad de Pluma Hidalgo. Las rocas más antiguas corresponden al Complejo Oaxaqueño (pTmCM), compuesto por tres conjuntos principales: Ensamble Coatlán, constituido por los litodemas de ortogneis de hornblenda y ortogneis hornblenda y granate; Ensamble Coatlán-Loxicha, compuesto por

paragneis de biotita y grafito, paragneis de hornblenda y biotita; Ensamble Loxicha, conformado por ortogneis cuarzo feldespático; el grupo de litodemas presenta deformación Grenvilliana de facies de granulita y un proceso retrogrado de facies anfibolita y en menor proporción de esquistos verdes.

De los ensambles mencionados, solamente afloran cuerpos irregulares de mármol cipolino ($pTmMa$), entre San Sebastián y San Gerónimo Coatlán, agrupados en el Ensamble Coatlán-Loxicha y tienen una burda actitud estructural de intrusiones.

Las rocas del Complejo Xolapa ($pETpgCM$) se agrupan en tres litodemas principales: Ensamble La Lana, compuesto por ortogneis cuarzo feldespático y milonita; Ensamble Comitlán, por paragneis de hornblenda con biotita y el Ensamble La Cieneguilla por ortogneis, gneis milonítico y granito de anatexis. El conjunto de litodemas del Complejo Xolapa presenta facies de anfibolita.

Este Complejo, evolucionó como una raíz de arco magmático continental desde el Jurásico hasta el Cretácico, con metamorfismo que muestra facies de anfibolita, cortado por plutones de granito.

Al nororiente del área, en la región de Santa María Coatlán y sobre las rocas del Complejo Oaxaqueño, se desarrolló la cuenca de Tlaxiaco, en la que se depositó una secuencia representada por la formación San Isidro, compuesta por una alternancia de arenisca y caliza del Cretácico inferior ($KbeapAr-Cz$) afectada por sistemas de fracturas. En el Albiano-Cenomaniano, se depositó



Figura 5. Gneis cuarzo – feldespático

caliza y dolomía de la Formación Teposcolula ($KaceCz-Do$), cuya localidad tipo se identificó en el cerro Yagaley, en San Miguel Coatlán y en San Gerónimo Coatlán.

Los sedimentos más recientes que se localizan en los valles como el de San Sebastián Coatlán son del Holoceno ($Qhoal$) y se componen de grava, arena, limo y arcilla, sin consolidar.

2.2 Geología en la zona del túnel.



Figura 6. Gneis – Augengneis.

Durante la fase de excavación del Túnel San Sebastián, se caracterizaron las propiedades geológicas de la roca para posteriormente establecer las condiciones mecánicas de la misma. El túnel San Sebastián se ubica con precisión según la carta de San Baltazar Loxicha E14-D87 del Servicio Geológico Mexicano (SGM), dentro del complejo metamórfico Xolapa. Concordando con las características geológicas identificadas en la zona del túnel.

La litología en la zona del túnel está constituida principalmente por un gneis – augengneis cuarzo feldespático, con una textura granoblástica y una estructura bandeada donde hay una distinción mineralógica entre minerales leucráticos y melanocráticos. La facie metamórfica correspondiente de la roca va desde la facie de anfibolita a la facie de granulita, propiciada por un metamorfismo regional de alto grado.



Figura 7. Migmatitas

La mineralogía está constituida principalmente por cuarzo y feldespato, como minerales accesorios se identificó, anfíboles, biotita, muscovita, pirita, galena y como minerales secundarios se tiene clorita, hematita, calcopirita, pirita y grafito. El grado de alteración de la roca varía de acuerdo al cadenamiento en túnel, en los portales se tiene un grado de alteración IV la longitud del a V y al interior del túnel se tiene incluso un grado de alteración de II a



Figura 8. Vetillas de cuarzo con pirita.

III, el grado varía de acuerdo a que tan expuesta estuvo la roca a los agentes externos de intemperismo, al contacto con las estructuras ígneas intrusivas en la zona del túnel y a la deformación, frágil - dúctil de la roca sometida a esfuerzos tectónicos de subducción. Los esfuerzos tectónicos generaron zonas de falla y fracturas principalmente con una dirección prácticamente paralela al eje del túnel NE – SW.

Debido al alto grado de metamorfismo de formación del gneis – augengneis, principalmente por temperaturas altas, ocurre la fusión parcial de la roca generando migmatitas donde se identifica como parte del leucosoma a una roca ígnea de composición granítica y a un melanosoma



Figura 9. Diques ígneos al interior del túnel.

compuesto por el gneis – augengneis cuarzo feldespático. En el túnel, se ha identificado que el gneis augengneis está cortado por un intrusivo ígneo con una geometría principalmente de diques. Estos diques presentan un espesor variable que va desde poco menos de un metro

hasta diques de incluso 7 u 8 metros de longitud, la textura es fanerítica, la composición de estos diques es principalmente félsica a intermedia, con contenidos altos de cuarzo y feldespatos en los diques de composición granítica, en los diques de una composición más diorítica



Figura 10. *Vetas de cuarzo.*

se tiene un porcentaje menor de cuarzo y feldespatos y en proporción un porcentaje mayor de minerales ferromagnesianos como piroxenos y biotita, teniendo una coloración de la roca más oscura, la variabilidad en la composición de los intrusivos ígneos se debe a la ocurrencia de diferentes pulsos magmáticos en la intensa actividad tectónica de la región. Debido a la temporalidad de formación de los intrusivos ígneos el grado de alteración de los diques es menor clasificándola con un grado de alteración de II a III.

La circulación de fluido hidrotermal a través de las rocas puede generar que las fracturas actúen como conductos para la deposición de minerales disueltos en el fluido. En el caso particular de esta zona, se han identificado vetas y vetillas rellenas principalmente de fenocristales de cuarzo y calcita, pero también se han observado otros minerales accesorios como pirita, clorita, hematita y galena. Estas fracturas rellenas se han formado debido a la actividad geotérmica de la región y al paso de fluidos hidrotermales a través de las rocas, los cuales han depositado los minerales disueltos en las fisuras de la roca. El espesor promedio de estas vetas y vetillas varía desde 1 centímetro hasta aproximadamente 30 centímetros, lo cual sugiere una intensa actividad hidrotermal en la zona.

2.3 Geología estructural.

El límite tectónico entre los complejos Oaxaqueño y Xolapa está caracterizado por zonas de milonitas de la zona de cizalla Juchatengo como se muestra en la figura 3, que corresponde a una fase de deformación dúctil-frágil de alta presión y baja temperatura que se desarrolló durante el Oligoceno y cuya manifestación pudo observarse en las cercanías de Santo Domingo Coatlán.

En la fase de excavación del túnel cada frente de excavación se censaban un promedio un total de 25 datos estructurales, de esta forma se tenía información detallada de cómo es que afectaba la



Figura 11. Falla normal con dirección prácticamente paralela al eje de túnel.

orientación e inclinación de las discontinuidades del terreno a la excavación. Por lo tanto, para describir primeramente las condiciones estructurales del terreno se tomará en cuenta a partir de los datos estructurales medidos en campo un

total de 100 datos en el Portal Oaxaca, 100 datos a la mitad del túnel y 100 datos en el Portal Puerto Escondido, y así tener un panorama mejor de cómo es la configuración de las discontinuidades en el terreno donde está ubicado el túnel San Sebastián.

Las tablas 1, 2 y 3 indican las características

físicas de las familias de discontinuidades de la secuencia metamórfica en cada portal, así como su rumbo azimutal del buzamiento y el buzamiento (inclinación de máxima pendiente del plano de discontinuidad).

FAMILIA	DIP DIRECTION	RUMBO AZIMUTAL	BUZAMIENTO	CARACTERISTICAS
1	19	289	35	Fracturas poco onduladas y rugosas, espaciadas entre 10 y 50 cm, de continuidad, predominando los planos cerrados a ligeramente abiertos < 1 mm en superficie, con relleno limo arenoso y trazas de óxidos de hierro, hematita. Sin presencia de agua.
2	35	305	55	
3	302	212	68	
4	127	37	79	
5	244	154	46	

Tabla 1. Discontinuidades censadas en la zona del Portal Oaxaca.

FAMILIA	DIP DIRECTION	RUMBO AZIMUTAL	BUZAMIENTO	CARACTERISTICAS
1	23	293	41	Fracturas planares, poco onduladas y rugosas, espaciadas entre .20 y 1.5 m, de continuidad poco visible, predominando los planos cerrados y siendo escasos los que están ligeramente abiertos de 1 a 3 mm en superficie, con relleno limo arenoso y trazas de óxidos de hierro, hematita. No se observó presencia de agua. Se identificó el relleno de cuarzo en algunas discontinuidades.
2	359	269	86	
3	69	339	80	
4	286	196	73	
5	215	125	61	

Tabla 2. Discontinuidades censadas en la zona central del túnel.

FAMILIA	DIP DIRECTION	RUMBO AZIMUTAL	BUZAMIENTO	CARACTERISTICAS
1	181	91	55	Fracturas planares, poco onduladas y rugosas, espaciadas entre .20 y 1.5 m, de continuidad poco visible, predominando los planos cerrados y siendo escasos los que están ligeramente abiertos de 1 a 3 mm en superficie, con relleno limo arenoso y trazas de óxidos de hierro, hematita. No se observó presencia de agua.
2	325	235	78	
3	2	272	80	
4	34	304	42	
5	263	173	76	

Tabla 3. Discontinuidades censadas en la zona del portal Puerto Escondido.

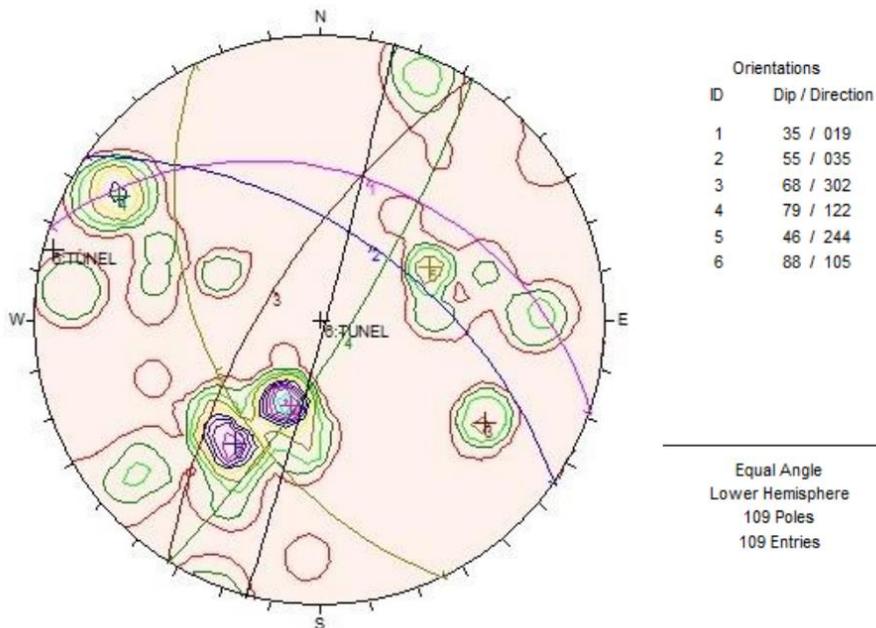


Figura 12. Diagrama estereográfico en red de Schmidt representando espacialmente las principales familias de discontinuidades sobre la secuencia metamórfica, en la zona del portal Oaxaca.

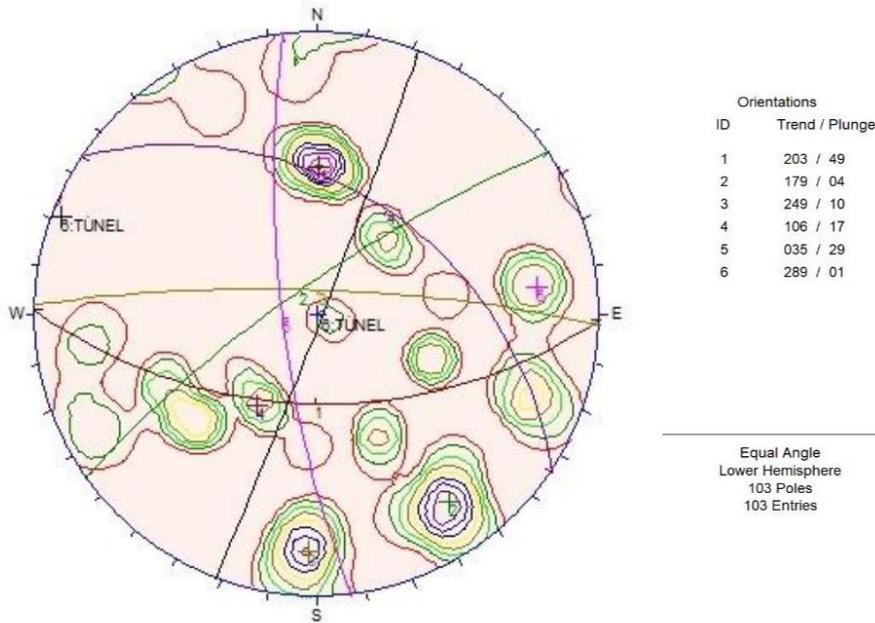


Figura 13. Diagrama estereográfico en red de Schmidt representando espacialmente las principales familias de discontinuidades sobre la secuencia metamórfica, en la zona media del túnel

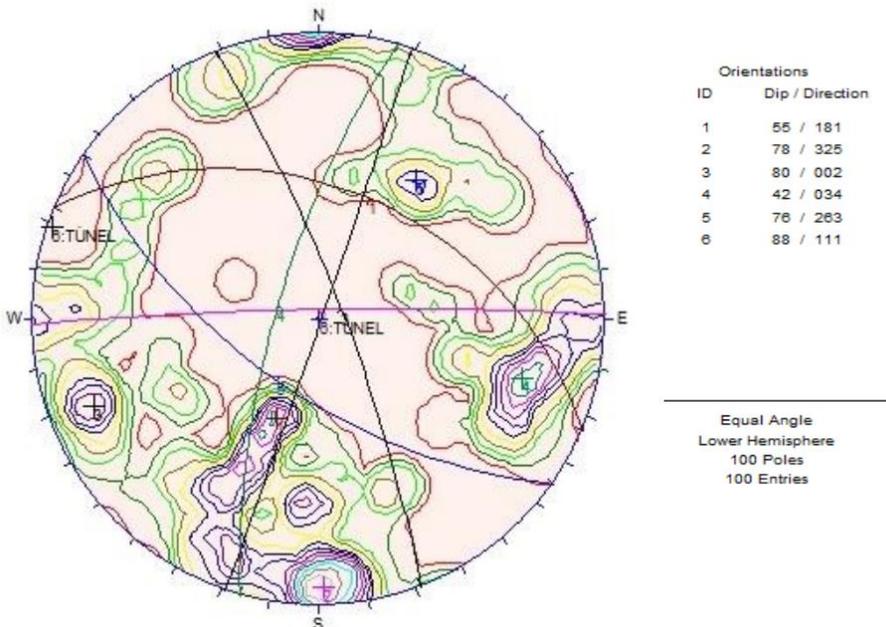


Figura 14. Diagrama estereográfico en red de Schmidt representando espacialmente las principales familias de discontinuidades sobre la secuencia metamórfica, en la zona del portal Puerto Escondido.

3. Seguimiento geotécnico en el túnel.

El seguimiento geotécnico es fundamental para el monitoreo y control de la estabilidad de las estructuras subterráneas. El túnel San Sebastián está situado en una zona geológicamente compleja, requiere de un monitoreo constante para garantizar la correcta ejecución de la obra, definiendo las condiciones geotécnicas del terreno y evaluando en todo momento la estabilidad

del terreno. Por ello, se ha llevado a cabo un seguimiento geotécnico que ha incluido un mapeo que evalúa las características mecánicas de la roca y del terreno circundante realizado cada frente de excavación y una medición de la estabilidad del terreno tanto superficial como al interior del túnel. Este seguimiento permitirá obtener información precisa y actualizada sobre el comportamiento del terreno y la estructura del túnel, lo que permitirá detectar posibles problemas y tomar medidas para garantizar su estabilidad y seguridad. El presente informe detallará los resultados obtenidos en el seguimiento geotécnico del túnel San Sebastián, así como las acciones tomadas en base a ellos.

3.1 Caracterización geotécnica.

Las condiciones geotécnicas del túnel San Sebastián están íntimamente relacionadas con sus características geológicas por lo tanto es importante conocer la naturaleza geológica del terreno para definir posteriormente sus características mecánicas. Desde la excavación de los taludes de acceso hacia el túnel en ambos portales, se dio un seguimiento de las propiedades mecánicas de la roca presentes en cada afloramiento de roca expuesta en los frentes de excavación del túnel. Este seguimiento nos brindaba información de cómo se tenía que ejecutar la obra apeándose siempre al método constructivo descrito en el proyecto ejecutivo.

El mapeo geomecánico se enfocó en evaluar la calidad mecánica de la roca mediante las clasificaciones RMR (Bieniawski) y Q (Barton), que son las principales utilizadas en la actualidad para macizos rocosos. Para ello, se tomaron en cuenta los parámetros necesarios para cada clasificación y se evaluó cada frente de excavación. En base a los resultados obtenidos en cada frente, se determinó la condición geotécnica correspondiente, la cual el proyecto ejecutivo contempla un procedimiento constructivo y su correspondiente método de sostenimiento.

Los procedimientos se nombran como Condición Geotécnica “A” que sería la condición cuyas características mecánicas del terreno son las más favorables, Condición Geotécnica “B”, hasta Condición Geotécnica “E” que sería la condición donde las características mecánicas son las más desfavorables. Cada condición geotécnica se subdivide en dos partes a excepción de la condición A, B y E como se puede observar en la tabla 4. Se anexarán las fichas geológicas generadas en

cada frente de excavación, en donde en primera instancia se calculan los valores de caracterización mecánica RMR (Bieniawski) y Q (Barton), en la segunda hoja se establecen las principales familias de discontinuidades medidas en el frente de excavación, y en la tercer hoja un reporte fotográfico representando las características mecánicas de la roca en el frente descritas en el reporte en la primer hoja y por último una comparativa entre la línea de excavación generada, con la línea de excavación “A” y “B”. y los posibles volúmenes adicionales que sobrepasaron dichas líneas de excavación propiciado por las condiciones del terreno.

TIPO DE CONDICIONES GEOTÉCNICAS			SOSTENIMIENTOS	Condición geotécnica prevista en proyecto	Condición geotécnica presente en el túnel
CONDICIÓN GEOTÉCNICA	RMR (Bieniawski, 1989)	Q (Barton et al., 1974)	DESCRIPCIÓN		
A	≥81 Roca muy buena	≥ 45 Roca muy buena	Anclas puntuales de fricción $\phi=1"$ y L=6m y concreto lanzado con fibras de acero e=5cm de $f'c=300$ kg/cm ² (ocasional).	✗	✗
B	61 a 80 Roca buena	6 a 45 Roca regular a buena	Anclas puntuales de fricción $\phi=1"$ y L=6m y concreto lanzado con fibras de acero e=10cm de $f'c=300$ kg/cm ² .	✗	✗
C(+)	51 a 90 Roca regular a buena	4 a 6 Roca mala a regular	Anclas de fricción $\phi=1"$ y L=6m en patrón 2.5 x 2.5m al tresbolillo y concreto lanzado con fibras de acero e=10cm de $f'c=300$ kg/cm ² .	✗	✗
C(-)	41 a 50 Roca regular	1 a 4 Roca mala	Anclas de fricción $\phi=1"$ y L=6m en patrón 2.0 x 2.0m al tresbolillo y concreto lanzado con fibras de acero e=15cm de $f'c=300$ kg/cm ² .	✓	✗
D(+)	31 a 40 Roca mala a regular	0.4 a 1.0 Roca muy mala	Marcos metálicos IR 10" separación entre marcos a 1.5m, concreto lanzado con fibras de acero e=20cm de $f'c=300$ kg/cm ²	✓	✓
D(-)	21 a 30 Roca mala a muy mala	0.1 a 0.4 Roca muy mala a extremadamente mala	Marcos metálicos IR 10" separación entre marcos a 1.0m, concreto lanzado con fibras de acero e=20cm de $f'c=300$ kg/cm ²	✓	✓
E	≤20 Roca muy mala (Túnel)	0.01 a 0.10 Roca extremadamente mala	Enfilaje con tubo de acero $\phi=4"$ y L=12m, a cada 0.4m. Marcos metálicos IR 10" separación entre marcos a 1.0m, concreto lanzado con fibras de acero e=20cm de $f'c=300$ kg/cm ²	✓	✓
	≤30 Roca muy mala (Emportalamiento)	≤0.4 Roca muy mala a extremadamente mala		✓	✓

Tabla 4. Descripción de las condiciones geotécnicas que considera el proyecto ejecutivo, donde se compara las condiciones geotécnicas presentes en el túnel vs las condiciones geotécnicas previstas en el proyecto.

4. Metodología.

El mapeo geomecánico que se realiza como parte fundamental para el seguimiento geotécnico del túnel, tomando en cuenta los principales sistemas de caracterización mecánica RMR

(Bieniawski) y Q (Barton). Dichos sistemas de caracterización toman en consideración la recaudación de la información geológica en primera instancia, tomando en cuenta los distintos parámetros tales como tipo de roca, resistencia a la compresión simple, discontinuidades principales y sus características, presencia de agua, etcétera.

Durante los recorridos geológicos de campo se tomaron datos estructurales de los diferentes sistemas de discontinuidades tales como rumbo y echado, así como las condiciones en las que se encontraban las discontinuidades, persistencia, rugosidad, apertura, espaciamiento, relleno, presencia de agua, como se muestra en la tabla 5 y 6 con objeto de contar con los elementos necesarios e indispensables para realizar las clasificaciones geomecánicas.

Sistema RMR (BIENIAWSKI, 1989)										
PARÁMETROS				RANGO					VALOR	
Resistencia a la compresión uniaxial (Mpa)				>250 (15)	100-250 (12)	50-100 (7)	25-50 (4)	<25(2)<5(1)<1(0)		
RQD (%)				90-100 (20)	75-90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)		
Espaciamiento de discontinuidades (m)				> 2m (20)	0.6-2m (15)	0.2 - 0.6m (10)	0.06 - 0.2m (8)	< 0.06m (5)		
Familia	Dirección	Echado	Dirección del echado							
1	147	54	237							
2	339	36	69							
3	314	87	44							
Persistencia				>1m de longitud (6)	1-3 m de longitud (4)	3-10 m (2)	10-20 m. (1)	>20m (0)		
Abertura				cerrada (6)	0.1 ap long (5)	0.1 - 1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	>5 mm (0)		
Rugosidad				Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Espejo de Tabla (0)		
Relleno				Limpia (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Suave < 5 mm (2)	Suave > 5 mm (0)		
Alteración				Sana (6)	Lig. Intemp (5)	Mod. Intemp (3)	Muy Intemp (1)	Descompuesta (0)		
Agua Subterránea				Seco (15)	Húmedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)		
Orientación				Rumbo perpendicular al eje de la excavación			Rumbo paralelo al eje de la excavación			Echado de 0° a 20° independientemente del rumbo
				Dirección con el buzamiento		Dirección contra el buzamiento				
				Bz		Bz	Bz			
				45° - 90°	20° - 45°	45° - 90°	20° - 45°	45° - 90°	20° - 45°	
Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	Regular	Desfavorable				
0	-2	-5	-10	-12	-5	-10				
				Familia de discontinuidades más desfavorable:						
				RMR89 (Básico)						
				RMR89 (Corregido)						
				RMR	100-81	80-60	60-41	40-21	20-0	
				DESCRIPCIÓN	MUY BUENA	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA	
				DESCRIPCIÓN						

Tabla 5. Formato utilizado para la obtención de RMR (Bieniawski 1989).

Se realizó una caracterización mecánica del terreno en cada frente de excavación donde la roca afloraba. Esto permitió definir las propiedades mecánicas del terreno y establecer su condición geotécnica. En el anexo 1 se incluyen los valores de RMR (Bieniawski 1989) y Q (Barton 1974) obtenidos en cada cadenamamiento donde se encontraba un frente de excavación, en los anexos 1, 2, 3 y 4 se pueden observar las propiedades mecánicas de la roca que obtuvo el proyectista a partir de la exploración de campo que realizó

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN Q (BARTÓN ET. AL. 1974)										
PARÁMETROS							RANGO			VALOR
RQD (%)				RQD (%)			1			
Número de discontinuidades				Jn			F			
Número de rugosidad				Jr			C			
Número de alteración				Ja			C			
Número de agua subterránea				Jw			A			
Factor de reducción de esfuerzos (estado tensional)				SRF			C			
$Q = (RQD/Jn) * (Jr/Ja) * (Jw/SRF)$										
Q	1000-400	400-100	100-40	40-10	10-4.0	4.0-1	1-0.1	0.1-0.01	0.1-0.001	
DESCRIPCIÓN	EXCEPCIONALMENTE BUENA	EXTREMADAMENTE BUENA	MUY BUENA	BUENA	REGULAR	POBRE	MUY POBRE	EXTREMADAMENTE POBRE	EXCEPCIONALMENTE POBRE	

Tabla 6. Formato utilizado para la obtención de Q (Barton et., al 1974).

Condición prevista en el proyecto.

Unidad Geotécnica	Unidad 1		Unidad 2		Unidad 3		Unidad 2	Unidad 1		Unidad 2	
	Unidad 2		Unidad 2		Unidad 2			Unidad 2			
Litología	Augengneis muy alterado		Augengneis muy alterado y fracturado		Augengneis fracturado y compacto		Augengneis muy alterado y fracturado	Augengneis muy alterado y fracturado		Augengneis muy alterado y fracturado	
Estructura general	Suelo		Roca muy fracturada Bloques pequeños y lascas		Bloques de tamaño decimétrico y lascas		Roca muy fracturada. Bloques pequeños y lascas	Suelo en el tercio superior de la sección y bloques pequeños y lascas en el resto		Roca muy fracturada Bloques pequeños y lascas	
RQD	0%		0% a 5%		15% a 30%		0% a 5%		0% a 5%		
CALIDAD Q	No aplica		0.04 a 0.93		1.22 a 2.23		0.04 a 0.93		0.04 a 0.93		
Calidad RMR	No aplica		23 a 42		44 a 49		23 a 42		23 a 42		
Condición Geotécnica	Corte a cielo abierto	E		D ⁽⁻⁾	D ⁽⁺⁾	C ⁽⁻⁾		D ⁽⁺⁾	D ⁽⁻⁾	E	Corte a cielo abierto
Tratamiento	Enfilaje ϕ 4" L=12.0m Marcos ϕ 1.0m concreto lanzado e=20cm		Marcos ϕ 1.0m concreto lanzado e=20cm	Marcos ϕ 1.50m concreto lanzado e=20cm	Anclas de fricción ϕ =1" y L=6m en patrón 2.0x2.0m y concreto lanzado e=15cm de f'c=300 kg/cm ²		Marcos ϕ 1.50m concreto lanzado e=20cm	Marcos ϕ 1.0m concreto lanzado e=20cm	Enfilaje con tubo de acero ϕ =4" y L=12.0m. Marcos metálicos IR 10" ϕ 1.0m y concreto lanzado e=20cm f'c=300 kg/cm ² .		
	151+703.65	21.00	10.00	12.00	30.00		12.00	10.00	48.00		151+879.41
	151+717	151+738	151+748	151+760	151+790	151+790	151+802	151+812	151+860		

Tabla 7. Condiciones geotécnicas previstas en el proyecto ejecutivo del portal Oaxaca al portal Puerto Escondido (GEOSA, Integración geotécnica, 2020).

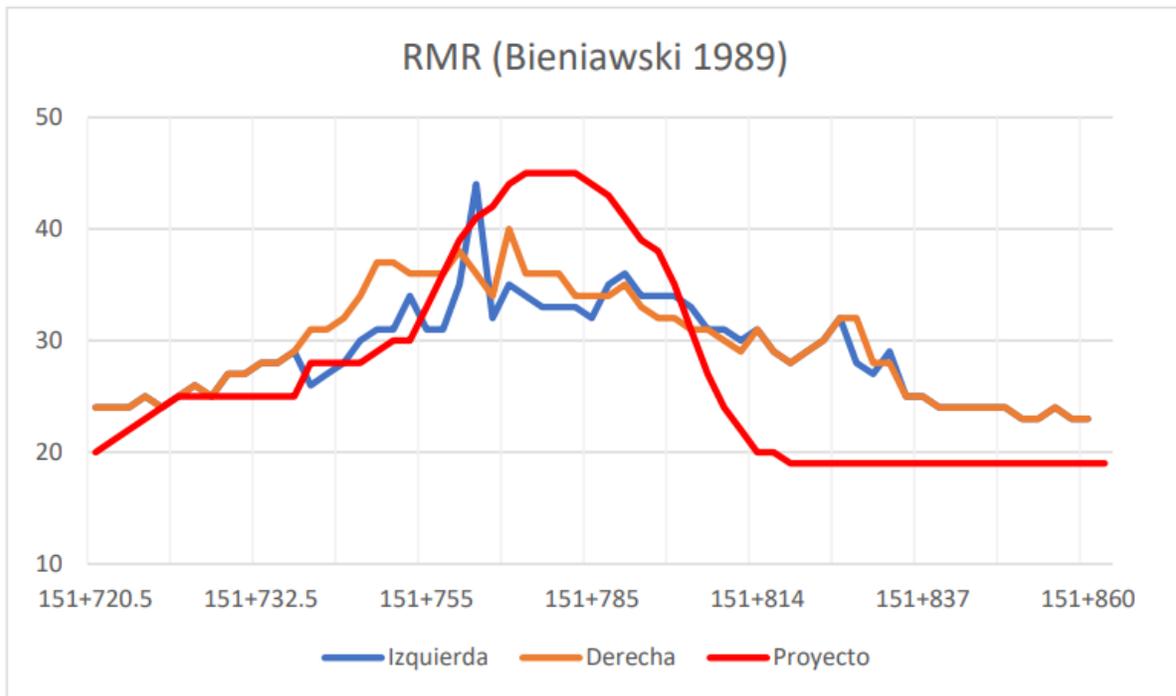
5. Resultados

Unidad Geotécnica	Unidad 1	Unidad 2		Unidad 3	Unidad 2		
Litología	Augengneis	Augengneis muy alterado y fracturado		Augengneis fracturado y compacto	Augengneis muy alterado y fracturado		
Estructura general	Suelo	Roca muy fracturada Bloques pequeños y lascas		Bloques de tamaño decimétrico y lascas	Roca muy fracturada Bloques pequeños y lascas		
RQD	0%	0% a 5%		15% a 30%	0% a 5%		
CALIDAD Q	No aplica	0.04 a 0.93		1.22 a 2.23	0.04 a 0.93		
Calidad RMR	No aplica	23 a 32		32 a 40	23 a 32		
Condición Geotécnica	Corte a cielo abierto	E	D ⁽⁻⁾	D ⁽⁺⁾	D ⁽⁻⁾	E	Corte a cielo abierto
Tratamiento		Enfilaje ϕ 4" L=12.0m Marcos ϕ 1.0m concreto lanzado e=20cm	Marcos ϕ 1.0m concreto lanzado e=20cm	Marcos ϕ 1.50m concreto lanzado e=20cm	Marcos ϕ 1.0m concreto lanzado e=20cm	Enfilaje ϕ 4" L=12.0m Marcos ϕ 1.0m concreto lanzado e=20cm	
	151+703.65						
		151+720.5	151+738.5 151+747.5	151+803	151+839	151+860	151+879.41

Tabla 8. Condiciones geotécnicas definidas de acuerdo con el mapeo geomecánico del portal Oaxaca al portal Puerto Escondido (COCONAL 2023)

A partir de la comparación entre las condiciones geotécnicas previstas por el proyecto y las reales, se evidenciaron algunas diferencias significativas. Por ejemplo, en el proyecto se había estimado una calidad de roca de RMR superior a 40 que establecía la condición geotécnica C (-), pero en la medición real no se obtuvieron esos valores y no se pudo establecer un cambio en la condición geotécnica en los cadenamientos correspondientes. Estas diferencias entre las condiciones geotécnicas previstas y las reales evidencian la importancia de realizar una adecuada caracterización mecánica del terreno y de adaptar el método constructivo y de sostenimiento a las condiciones reales del mismo.

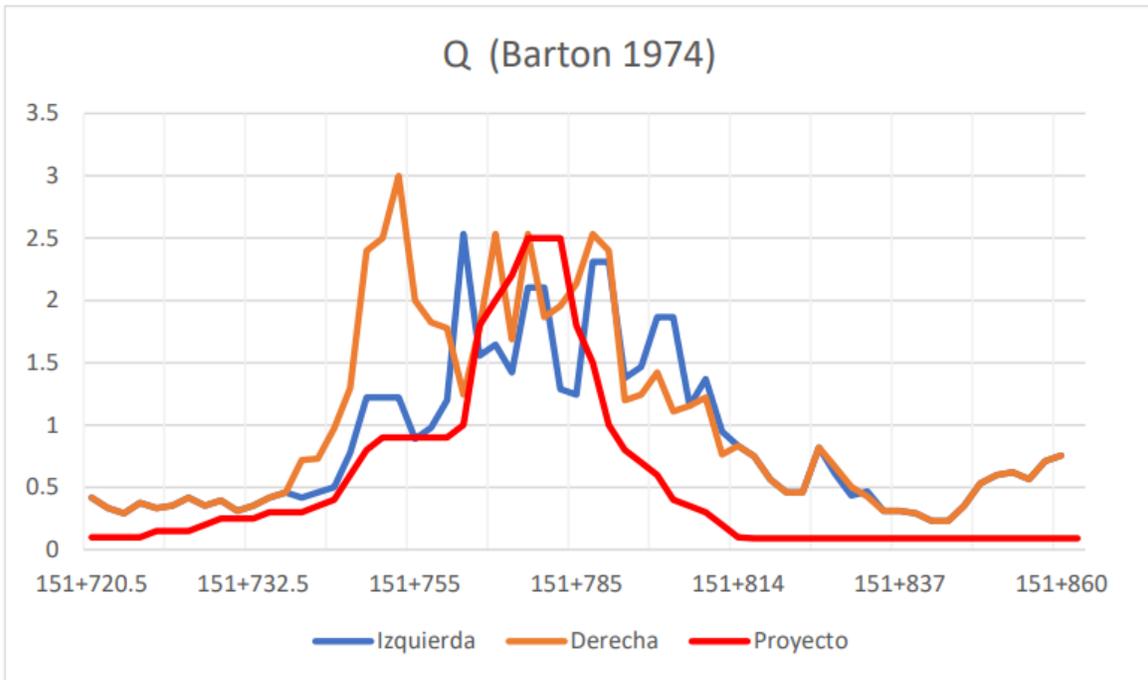
A continuación, la gráfica 1 y 2 muestran los resultados de las mediciones de los valores de RMR y Q en relación con el cadenamiento del frente de excavación. Debido a la variabilidad de la calidad mecánica de la roca en el frente de excavación, se subdividió en dos ventanas: izquierda y derecha. De esta manera, se logra una representación más precisa de las condiciones mecánicas del terreno.



Gráfica 1. Gráfica comparativa de los valores de RMR (Bieniawski 1989) con respecto al cadenamiento de cada frente de excavación, ventana izquierda y derecha.

Las gráficas 1 y 2 muestran que la calidad mecánica de la roca a lo largo de la excavación del túnel San Sebastián es desfavorable, en el anexo 4 al final del documento se detalla el valor geomecánico para cada frente de excavación en los cuales se tienen valores máximos de RMR = 44 y Q = 3, correspondientes con la condición geotécnica D (+). Estos valores máximos corresponden a la calidad mecánica de los intrusivos ígneos, que debido a su temporalidad de formación y a la poca intemperización, presentan una calidad mecánica de la roca mayor. Sin embargo, debido a su espesor y variabilidad en su longitud, no se pudo definir en base a ellos una condición geotécnica. Los valores mínimos que se pueden identificar en las gráficas 1 y 2, están por arriba de un valor de RMR = 20 y Q = 0.1, lo que indica que las propiedades mecánicas de la roca nunca tuvieron un valor muy bajo que tuviera características similares a las de un suelo. Por

lo tanto, la condición geotécnica E solo se estableció para los portales ya que en la excavación es la fase más crítica. Mas adelante se explicarán las características de cada condición geotécnica que se presentó en el túnel.



Grafica 2. Gráfica comparativa de los valores de Q (Barton et. al.,) con respecto al cadenamiento de cada frente de excavación, ventana izquierda y derecha.

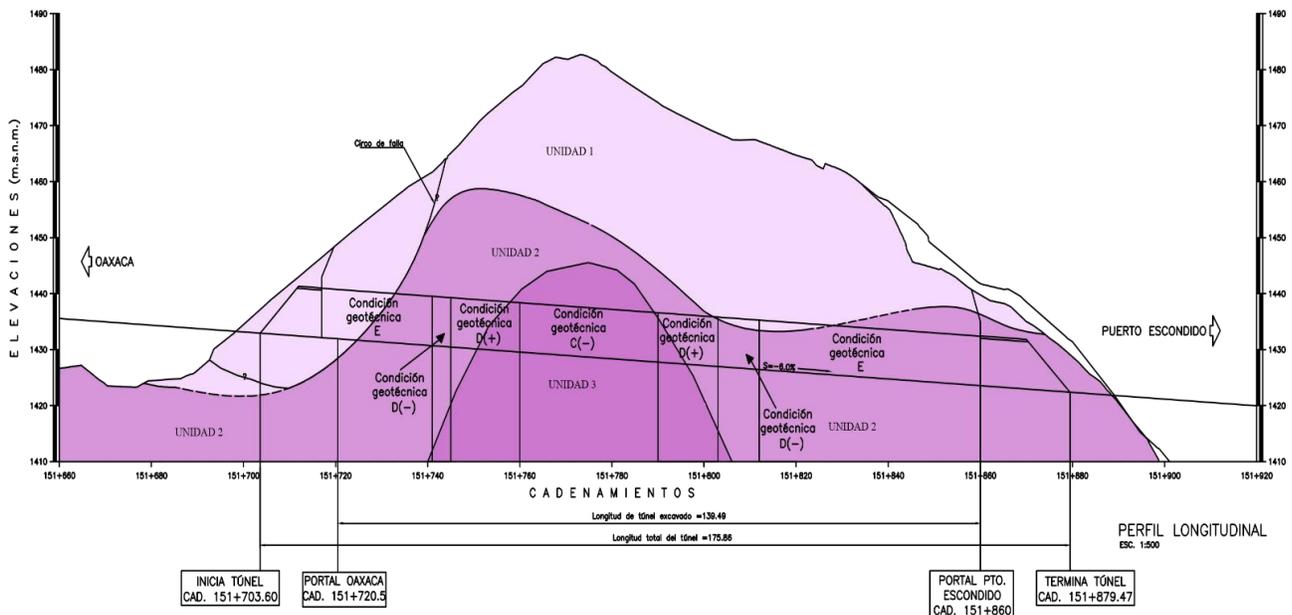


Figura 15. Perfil longitudinal del túnel, considerando las condiciones geotécnicas previstas en el proyecto ejecutivo.

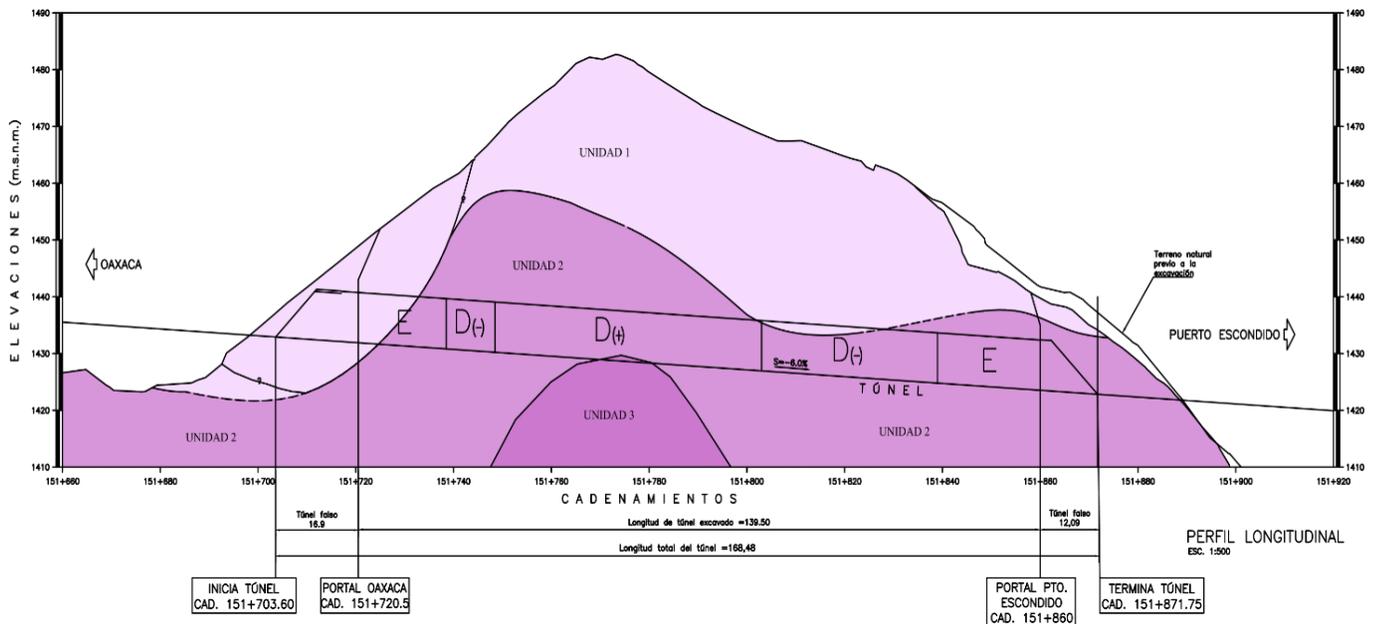


Figura 16. Perfil longitudinal del túnel, considerando las condiciones geotécnicas reales del túnel.

5.1. Condición geotécnica E.

Durante la medición de los valores de caracterización mecánica de la roca y la definición de la condición geotécnica a lo largo del túnel, se observaron diferencias significativas con lo previsto en el proyecto ejecutivo. En particular, se encontró que la condición geotécnica E estaba presente en dos tramos a lo largo del túnel. El primer tramo se extiende desde el portal Oaxaca (cadenamiento 151+720.5) hasta el cambio de condición geotécnica a D (-) en el cadenamiento 151+738.5. El segundo tramo corresponde al inicio de la excavación desde el portal Puerto Escondido (cadenamiento 151+860) hasta el cadenamiento 151+842. Esta condición geotécnica se estableció principalmente debido a las condiciones críticas que se presentan en la fase inicial de la excavación, donde las presiones de aflojamiento de la roca son mayores y el terreno puede volverse inestable, véase la tabla 4.

La litología predominante es el gneis-augengneis cuya mineralogía corresponde con cuarzo feldespato, anfíbol y biotita principalmente, se encuentra altamente intemperizada en algunas zonas. La textura es granoblástica con una estructura bandeada típica del gneis. La resistencia a la compresión simple es baja, y en algunos casos la roca puede ser desintegrada con la mano. El

RQD es menor al 25% y el espaciamiento de las discontinuidades oscila entre los 6 y 20 cm. Las discontinuidades tienen una persistencia mayor a 20 m, una abertura mínima que varía entre 0.1 y 1 mm, una rugosidad prácticamente lisa y ondulante, y en algunas ocasiones se encontraron rellenas de cuarzo y calcita. El grado de alteración es alto y se encontró humedad en el frente de excavación.

En algunas zonas, la calidad mecánica de la roca es alta debido a la presencia de estructuras ígneas intrusivas con geometría de diques, principalmente de composición granodioríticos. Debido a su temporalidad de formación, estas rocas se encuentran menos intemperizadas y presentan una resistencia a la compresión simple mayor, así como una condición de las discontinuidades más favorable. Sin embargo, la condición geotécnica no se puede establecer en función de los valores de caracterización mecánicos de los diques, ya que presentan un espesor variable y no son estructuras continuas. Por lo tanto, se tomó en cuenta la calidad de la roca del gneis, que es la roca que cortan dichas estructuras ígneas.

Debido a las condiciones descritas anteriormente, la línea de excavación máxima de cobro puede ser sobrepasada por el desprendimiento de bloques de roca y otras características del terreno. Estas situaciones se detallan en cada ficha geológica generada a lo largo de la longitud de la condición.

En las próximas figuras se presentan los ejemplos más representativos de las condiciones del terreno en esta condición geotécnica. Cada figura incluye un esquema representativo del frente de excavación, con la línea de excavación generada en el frente.

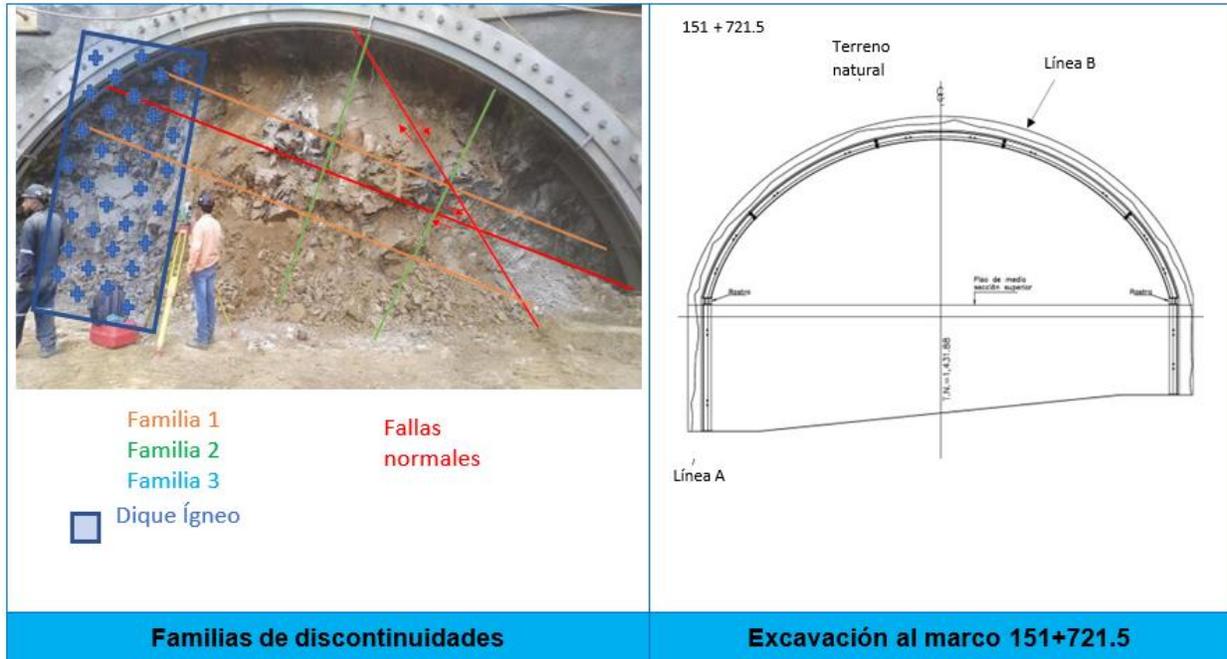


Figura 17. Condición del terreno en el Portal Oaxaca y un esquema representativo entre la línea de excavación generada y la línea máxima en la condición E.

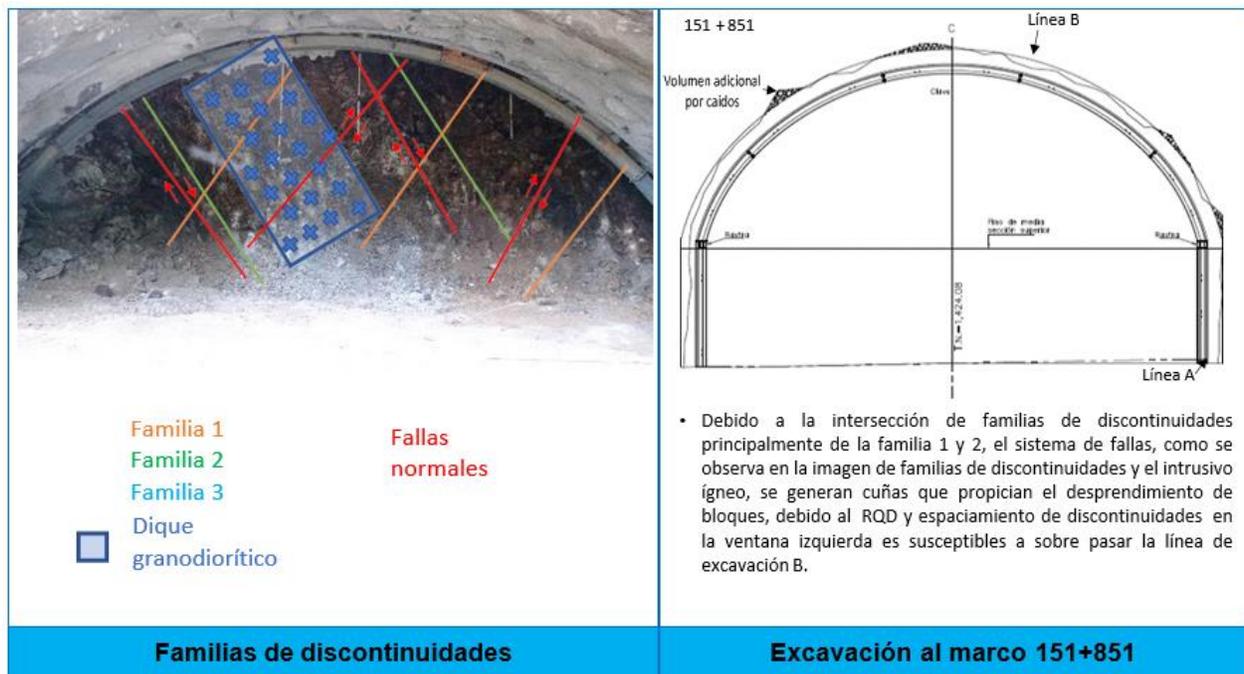


Figura 18. Condición del terreno en el Portal Puerto Escondido y un esquema representativo entre la línea de excavación generada y la línea máxima en la condición E.

5.2. Condición geotécnica D (-).

La condición geotécnica D (-) se divide en dos tramos a lo largo del túnel: el primer tramo corresponde desde el cadenamiento 151+738.5 hasta el 151+747.5, mientras que el segundo tramo está ubicado entre los cadenamientos 151+842 y 151+803. La tabla 4 describe los valores correspondientes a esta condición y su método de sostenimiento respectivo.

La litología consiste en gneis-augengneis cuarzo feldespático, cuya mineralogía principal es cuarzo, feldespato, muscovita y biotita. También se han identificado minerales secundarios como pirita, clorita, grafito, calcita y hematita. La alteración de la roca se puede definir como III a IV, con una resistencia a la compresión simple que oscila entre 25 y 50 MPa ya que la roca tiende a fracturarse con uno o dos golpes del martillo geológico. El RQD puede llegar a ser mayor del 25% en algunos casos donde se producirá el cambio de condición geotécnica a D (+), pero generalmente el valor es inferior al 25%. El espaciamiento de discontinuidades oscila entre 6 y 20 cm, con una persistencia de más de 20 m y una abertura de 0.1 a 1 mm. La rugosidad se define como ligeramente lisa, y el relleno es suave con contenido de arcillas y a veces duro de cuarzo y calcita. La roca se encuentra con presencia de humedad.

En la longitud que comprende esta condición, también se encuentran diques ígneos de composición granodiorítica que presentan una mayor calidad, ya que tienen un espesor variable y no son estructuras continuas. Por lo tanto, se consideró la calidad de la roca del gneis, que es la roca que cortan dichas estructuras ígneas.

Es posible que se sobrepase la línea de excavación máxima de cobro debido a las condiciones del terreno descritas y a la interacción de la orientación de las discontinuidades con las estructuras geológicas. En tales circunstancias, pueden ocurrir caídas importantes de bloques que superen dicha línea. Las fichas geológicas generadas durante la excavación del túnel describen las condiciones de cada frente en los que se sobrepasó esta línea de excavación máxima.

En las próximas figuras, se presentan los ejemplos más representativos de las condiciones del terreno en esta condición geotécnica, incluyendo un esquema representativo del frente de excavación con la línea de excavación máxima.

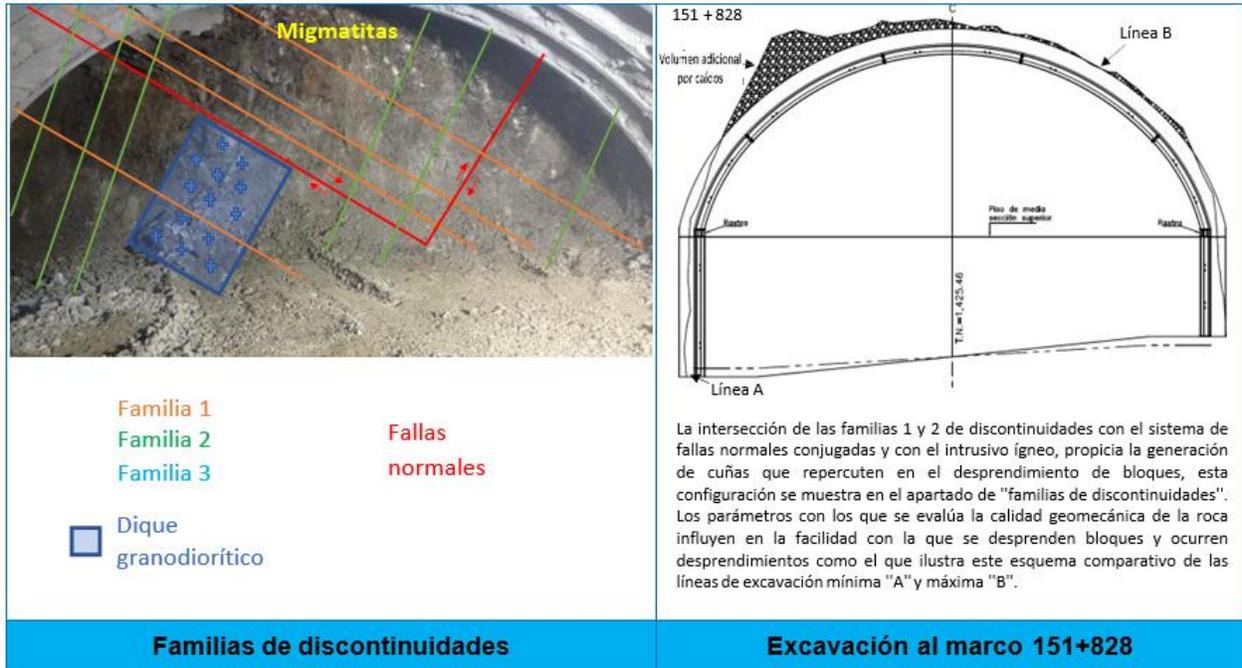


Figura 19. Condición del terreno y un esquema representativo entre la línea de excavación generada y la línea máxima en la condición D (-).

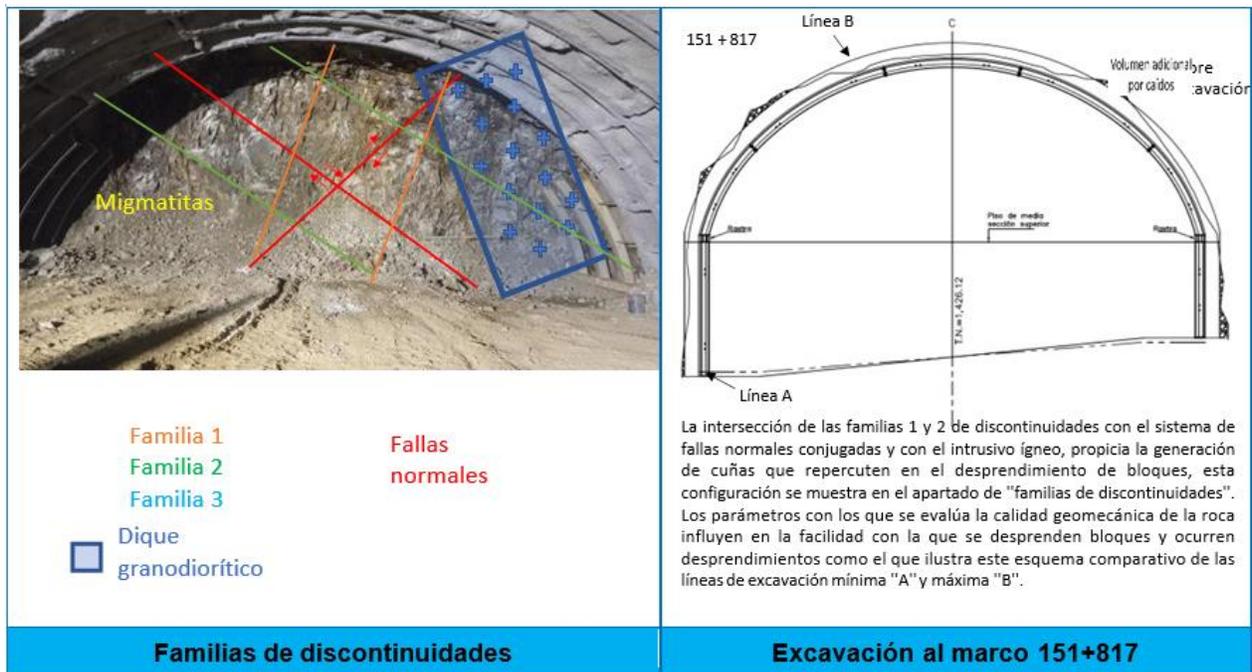


Figura 20. Condición del terreno y un esquema representativo entre la línea de excavación generada y la línea máxima en la condición D (-).

5.3. Condición geotécnica D (+).

La condición geotécnica D (+) se encuentra entre los cadenamientos 151+747.5 y 151+800. En la tabla 4 se describen los valores de caracterización mecánica correspondientes a esta condición. La litología está compuesta principalmente por gneis augengneis y la mineralogía está compuesta por cuarzo, feldespato, muscovita, biotita y anfíboles. También se identificó la presencia de minerales secundarios como pirita, clorita, grafito, hematita y granate. La alteración de la roca se define como III y tiene una resistencia a la compresión simple mayor a 50 MPa, ya que la roca tiende a fracturarse después de varios golpes con el martillo geológico.

En esta condición, el RQD siempre es mayor al 25%, con un espaciamiento en las discontinuidades de 6 a 20 cm y una persistencia de las discontinuidades en el rango de 10 a 20 m. Las discontinuidades tienen una abertura de 0.1 a 1 mm y los planos de discontinuidad son ligeramente rugosos. El relleno es suave con un espesor menor a 1 mm, aunque en algunas ocasiones puede estar relleno de cuarzo y calcita. La presencia de agua es mínima y solo se presenta humedad en algunas zonas. También se identificaron vetas y vetillas de cuarzo con pirita, clorita y hematita.

Además, se identificaron estructuras ígneas en forma de diques principalmente de composición granodiorítica. El espesor de los diques puede aumentar hasta 5 m, lo cual puede confundirse con un aumento en la calidad mecánica de la roca. Sin embargo, debido a la variabilidad del espesor de los diques y la falta de continuidad en estas estructuras, se tomó como calidad mecánica del terreno el gneis augengneis.

Durante los trabajos de excavación, es posible que se supere la línea de excavación máxima establecida en el proyecto debido a la interacción de las discontinuidades con las condiciones en general del terreno y los intrusivos ígneos, lo que puede propiciar el desprendimiento de bloques que sobrepasen la línea de excavación máxima.

En las próximas figuras se presentan ejemplos representativos de las condiciones del terreno en esta condición geotécnica, incluyendo un esquema donde se representa la línea de excavación generada con la línea de excavación máxima de cobro.

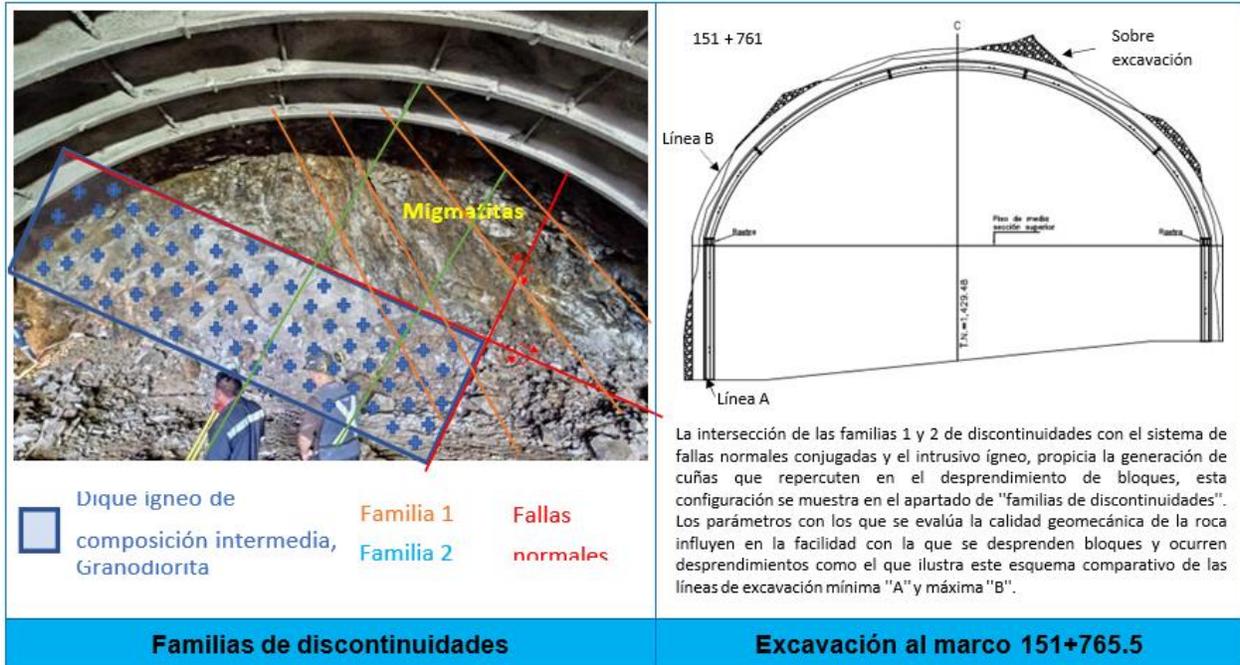


Figura 21. Condición del terreno y un esquema representativo entre la línea de excavación generada y la línea máxima en la condición D (+).

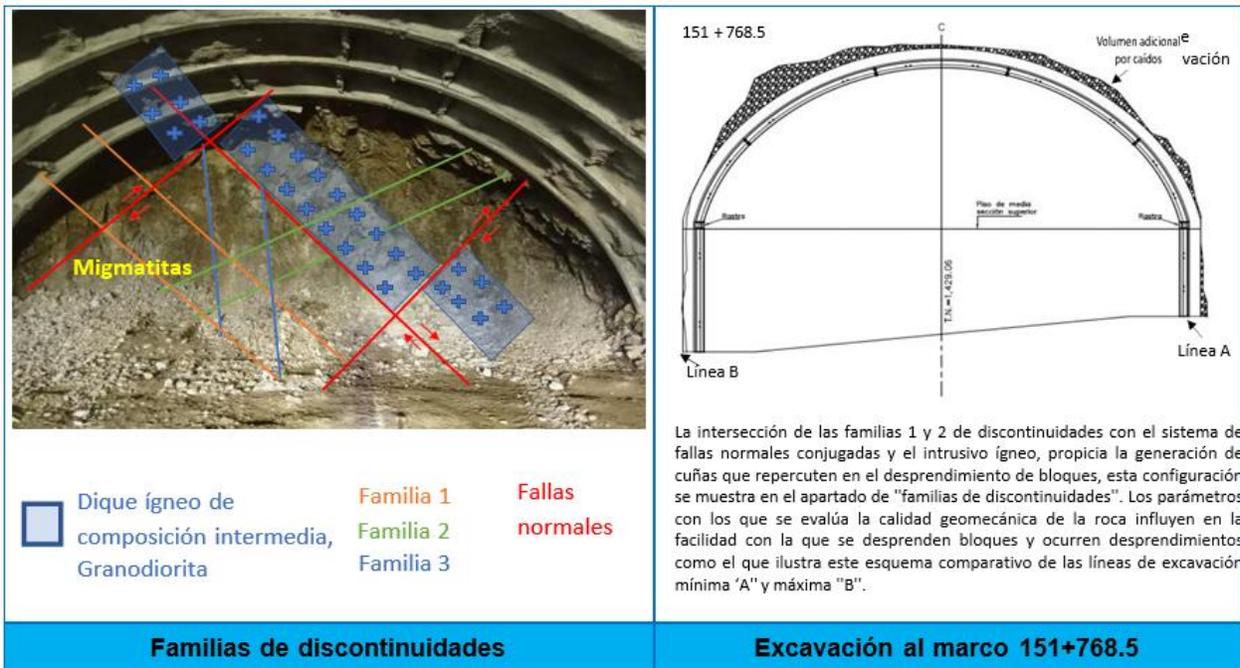


Figura 22. Condición del terreno y un esquema representativo entre la línea de excavación generada y la línea máxima en la condición D (+).

La longitud de la condición geotécnica D (+) no correspondía con lo previsto en el proyecto ejecutivo. Según éste, se esperaba encontrar una calidad de roca regular con valores de RMR mayores a 40 y Q mayores a 1. Sin embargo, en los cadenamientos correspondientes a esta condición geotécnica se observaron características que correspondían a la condición geotécnica D (+), que se caracteriza por una calidad de roca moderada a mala con valores de RMR entre 31 y 40 y Q entre 0,5 y 1. Por lo tanto, para garantizar que se aplicara el método de sostenimiento adecuado a las características mecánicas del terreno, no se estableció un cambio de condición geotécnica a C (-), sino que se mantuvo la condición D(+). La longitud de la condición geotécnica D (-) en el segundo tramo que abarcaba del cadenamiento 151+803 al 151+842 también presentó diferencias con lo previsto en el proyecto. Según éste, se esperaba que en el cadenamiento 151+812 se produjera un cambio en la condición geotécnica a E, que se caracteriza por una calidad de terreno con características similares a las de un suelo. Sin embargo, las características mecánicas de la roca observadas en este tramo no correspondían con estas características, por lo que no se estableció el cambio de condición geotécnica hasta el cadenamiento 151+839, ya que se había iniciado la excavación en el portal Puerto Escondido se consideraba igualmente la fase crítica debido al aumento en las presiones de aflojamiento en la roca, por lo tanto, para los valores de RMR y Q que se obtenían se consideraba como condición geotecnia E. En el tramo donde no se produjo el cambio de condición geotécnica como lo preveía el proyecto, se aplicó el procedimiento correspondiente a la condición geotécnica D (-) y su método de sostenimiento correspondiente, tal y como se indica en la tabla 4.

Durante la fase de excavación del túnel San Sebastián, la caracterización mecánica del terreno mediante los sistemas de clasificación RMR (Bieniawski) y Q (Barton et. al.) nos proporcionó una sólida base para determinar las condiciones geotécnicas presentes en el terreno y comprender las razones por las cuales la excavación se extendía más allá de la línea de excavación máxima de cobro "línea B".

Para explicar la razón de la sobre excavación, en el mapeo geomecánico que se realizó en cada frente de excavación contiene cada zona específica en la que se presentaba este fenómeno. La figura 16, 17, 18, 19 y 20 describen los factores geológicos y geotécnicos que contribuyeron a la sobre excavación, permitiendo una mejor comprensión de la complejidad del terreno y su influencia en el proceso de excavación. De esta manera, se pudo tomar medidas adecuadas, asegurando una excavación segura y eficiente del túnel San Sebastián.

En definitiva, establecer las condiciones geotécnicas del terreno en el túnel fue un proceso fundamental en la construcción, ya que permitió adaptar el método constructivo y de sostenimiento a las características mecánicas del terreno, asegurando la eficiencia de la excavación. La utilización de sistemas de clasificación geotécnica por medio de sistema de caracterización mecánica como lo son: RMR y Q, permitió obtener

una descripción precisa de las características geotécnicas presentes en el terreno, lo que a su vez permitió entender los factores que influían en la extensión de la línea de excavación generada. En resumen, establecer las condiciones geotécnicas fue un proceso clave para la construcción exitosa del túnel San Sebastián.

6. Instrumentación geotécnica.

La construcción de un túnel es una obra de ingeniería compleja que requiere de una evaluación constante del comportamiento geotécnico del terreno. Por esta razón, la instrumentación geotécnica se convierte en una herramienta indispensable para el monitoreo y control de las variables que influyen en la estabilidad del túnel. En el caso del Túnel San Sebastián, se ha implementado un monitoreo mediante equipos de instrumentación geotécnica en la superficie como en el interior del túnel. La instrumentación superficial comprende un inclinómetro, 2 extensómetros y dianas de instrumentación ubicadas en los taludes de acceso del túnel. Por otro lado, en el interior del túnel se han instalado convergencias en la media sección superior y en el banqueo. Todo esto permitió el monitoreo constante de las variables geotécnicas relevantes, lo que permitió una construcción segura y eficiente del túnel San Sebastián.

6.1 Instrumentación superficial.

El monitoreo geotécnico en el túnel es esencial para garantizar la seguridad en la estabilidad el terreno durante la construcción. En el Túnel San Sebastián, se han instalado instrumentos de monitoreo en la superficie para evaluar la estabilidad del terreno, dichos instrumentos son: Un inclinómetro, dos extensómetros de barras y mojoneras con dianas en ambos portales del túnel. Esta instrumentación permite medir los desplazamientos y deformaciones del terreno, lo que permite detectar cualquier cambio en la estabilidad del túnel y tomar medidas preventivas en caso de ser necesario. En este sentido, la instrumentación superficial es una herramienta crucial en el monitoreo geotécnico del túnel.

Para evaluar una posible inestabilidad tanto en el interior como en el exterior del túnel, es necesario correlacionar las propiedades mecánicas de los materiales presentes con los posibles

movimientos en la instrumentación. Por lo tanto, para los trabajos de construcción del túnel San Sebastián, se definieron unidades geotécnicas, cada una de las cuales presenta características mecánicas similares.

Unidad 1: Gneis augengneis muy intemperizado con características similares a las de un suelo. La mayoría de la mineralogía original ya no es reconocible y ha sido reemplazada por materiales limosos y arcillosos. Pueden encontrarse algunos fragmentos de roca alterada que mantienen la estructura típica del gneis. Generalmente, esta unidad se clasifica geomecánicamente como E.

Unidad 2: Gneis augengneis con un grado de alteración de moderado alto a intermedio. La mineralogía está constituida principalmente por cuarzo y feldespatos. Algunos minerales han sido reemplazados por efecto del intemperismo, pero en su mayoría se conserva la estructura y mineralogía original de la roca. En algunas zonas, el grado de fracturamiento es alto, pero la resistencia a la compresión uniaxial varía entre 25 y 75 MPa, dependiendo del grado de alteración de la roca. Las clasificaciones mecánicas definidas por el proyectista se determinan como D(-) y D(+).

Unidad 3: Gneis augengneis cuarzo-feldespático con un grado de alteración de intermedio a bajo. La resistencia a la compresión uniaxial es alta, superando los 70 MPa. Esta unidad se presenta en grandes bloques de roca, por lo que es necesario emplear explosivos para la excavación. El proyectista clasifica esta unidad geomecánica como C(-) y C(+).

6.1.1 Inclinómetro.

El inclinómetro se utiliza para medir la deformación de la roca o el suelo que rodea al túnel durante su construcción. Es una de las herramientas más importantes, ya que mide las deformaciones del terreno a una profundidad determinada en dos ejes ortogonales entre sí. Esto garantiza la estabilidad de la obra y la seguridad del personal que trabaja o circula dentro del

túnel. Se adjuntará un informe de cada lectura realizada con el inclinómetro, el cual incluye un análisis en el eje Ax y otro en el eje Bx.

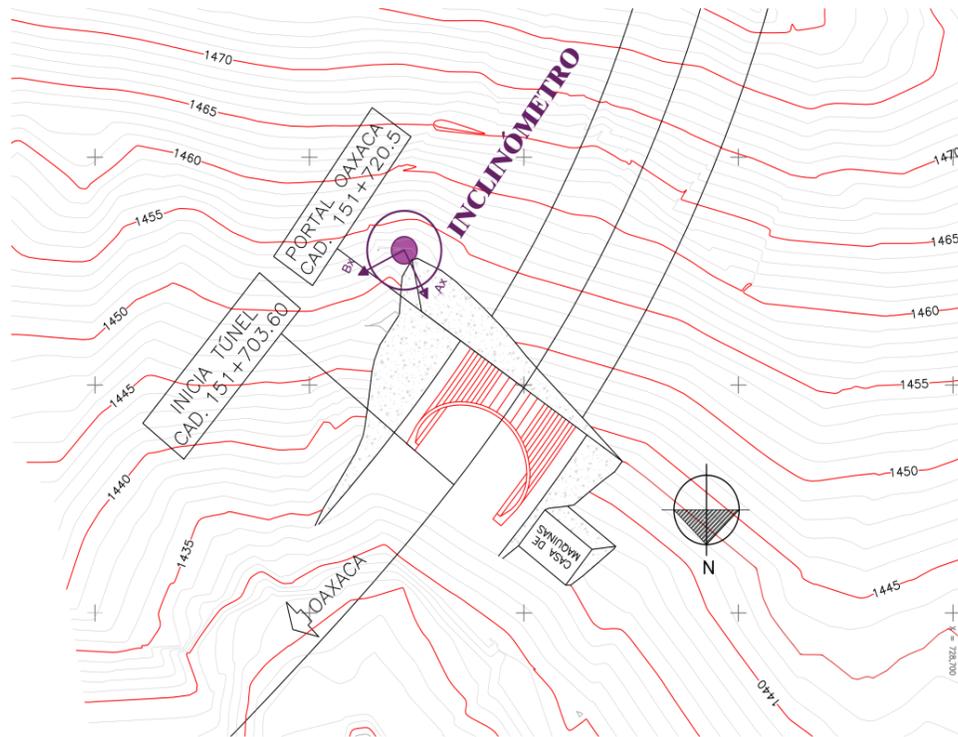


Figura 23. Ubicación en planta del inclinómetro y la dirección en la que los ejes del mismo están orientados

6.1.1.1. Metodología.



Figura 24. Instalación del inclinómetro

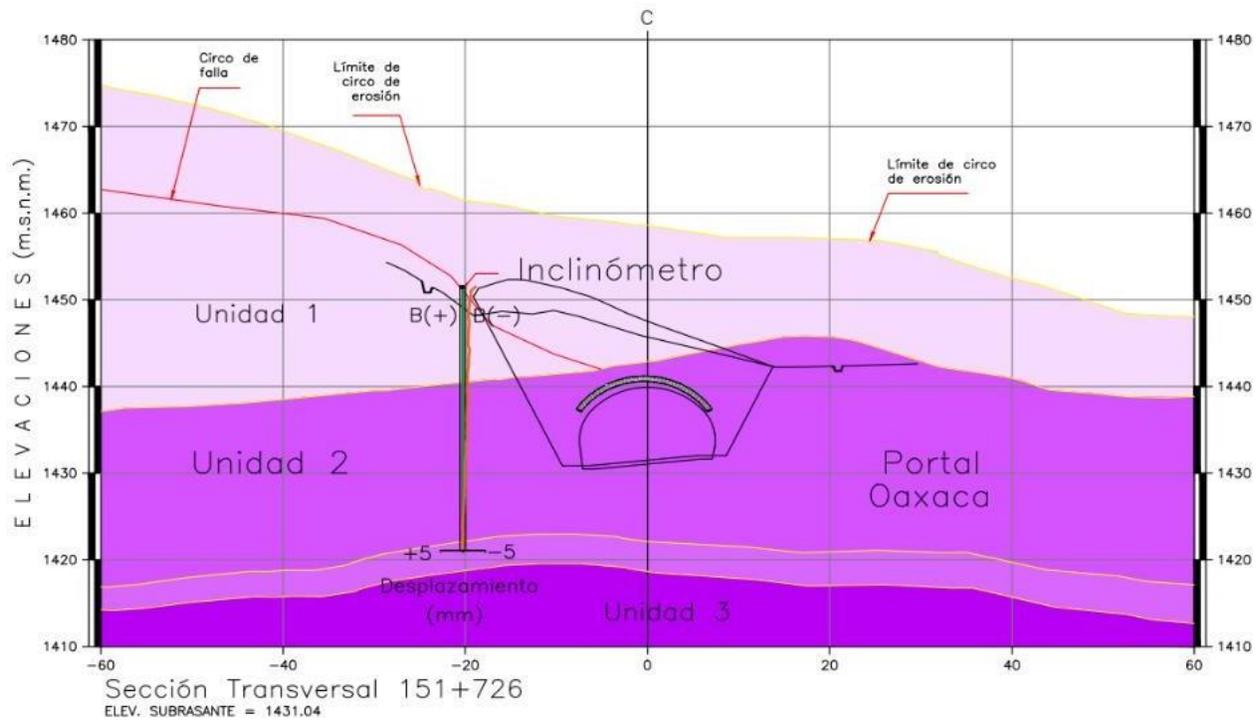
Para este proyecto se instaló un inclinómetro de barra de acero inoxidable con un intervalo de lecturas de 0.5m a una profundidad de 30m. La orientación preferente de deslizamiento al que se orientó la tubería es de 331° con respecto al norte. Los acelerómetros Ax del torpedo se colocarán paralelos a la dirección preferencial de deslizamiento, mientras que los acelerómetros Bx estarán ubicados ortogonalmente a los Ax para detectar cualquier abatimiento en las paredes del túnel en esa dirección. Para garantizar la estabilidad del terreno, es necesario



Figura 25. Lectura del inclinómetro en el túnel San Sebastián.

realizar un monitoreo constante durante la construcción del túnel. Al principio, se debe realizar una revisión diaria de las lecturas hasta asegurarse de que el terreno se encuentra estable. Posteriormente, se cambió el periodo de medición a una vez por semana ya que haya asegurado que el terreno había llegado a una cierta estabilidad. En caso de que se hubiese detectado algún movimiento importante, se debió cambiar el periodo de medición nuevamente a una medición por jornada, hasta que se hubiese logrado encontrar la estabilidad del terreno de nuevo, durante el periodo que se

realizaron las mediciones no fue necesario cambiar el periodo de medición. Las características geológicas y geotécnicas de un terreno son factores que impactan en su estabilidad, por lo que se llevaron a cabo sondeos mixtos con el fin de instalar el inclinómetro y definir las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Durante estos sondeos, se identificaron suelos areno-limosos y una litología compuesta por un gneis cuarzo feldespático muy intemperizado y fracturado, así como un gneis-augneis con una intensidad menor de fracturamiento. Mediante la observación de las muestras obtenidas durante los sondeos, fue posible establecer un perfil detallado de la configuración de las unidades geotécnicas, lo que permite correlacionar cualquier movimiento o inestabilidad del terreno con estas características geotécnicas. El fondo de la perforación del barreno o profundidad de desplante para la instrumentación del inclinómetro es de 10 m por debajo del nivel de subrasante del eje del túnel. En este caso la profundidad máxima de la perforación será de 30 m. En la Figura 21 se muestra la sección transversal del cadenamiento 151+726 con la ubicación del inclinómetro cercano a la excavación del túnel.



Unidad geotécnica	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3
Litología	Augengneis muy alterado	Augengneis muy alterado y fracturado bloques pequeños y lajas	Augengneis fracturado y compacto bloques de tamaño decimétrico

Figura 25. Sección transversal de la instalación del inclinómetro.

6.1.1.2. Resultados.

Durante un período comprendido entre el 23 de diciembre de 2021 y el 03 de marzo de 2023, se realizaron un total de 55 mediciones para evaluar la estabilidad del terreno en el túnel San Sebastián. Para cada medición realizada, se elaboró un informe correspondiente a los resultados obtenidos. Durante las etapas iniciales de la fase de excavación de la media sección superior del túnel San Sebastián, fue la fase más crítica en la medición del inclinómetro, se observó un desplazamiento máximo en las lecturas del instrumento debido al aumento de las presiones de aflojamiento de la roca, provocado por el inicio de la excavación en el portal Oaxaca.

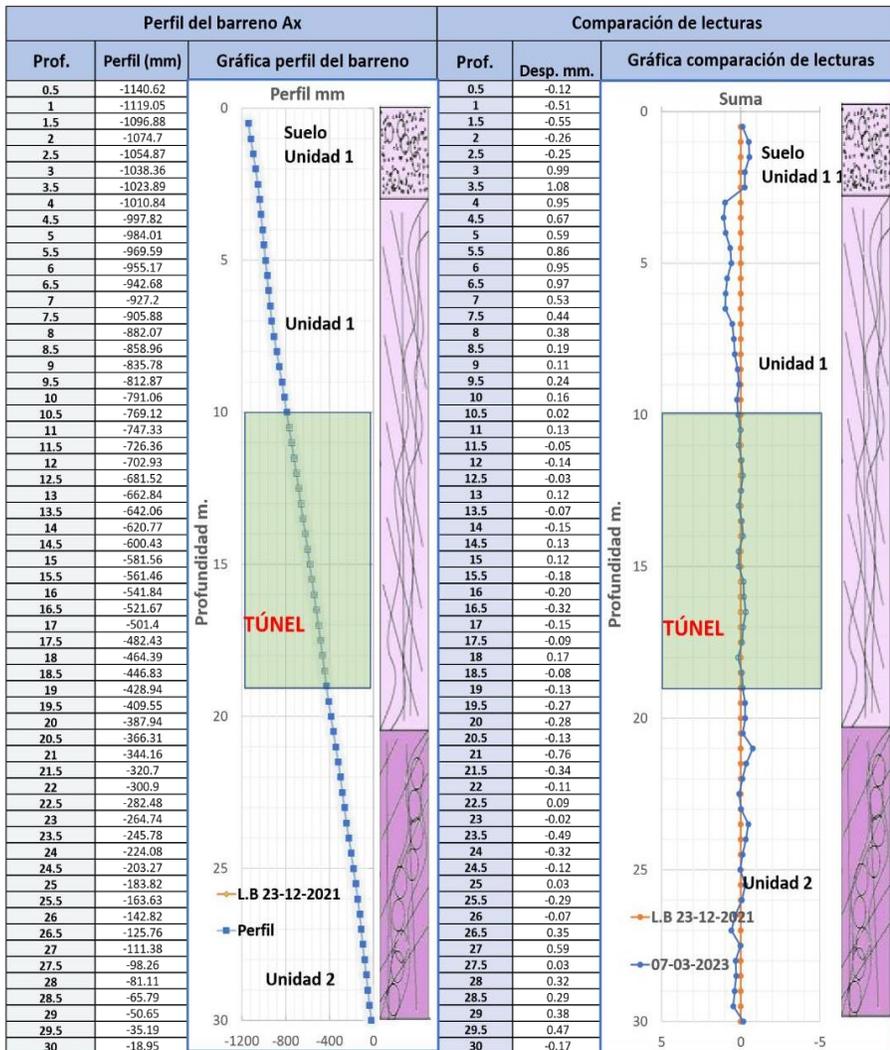
No obstante, es importante señalar que este desplazamiento no representó un riesgo significativo para la estabilidad del terreno, ya que las velocidades y aceleraciones de desplazamiento registradas fueron prácticamente nulas.

La otra fase crítica en las mediciones del inclinómetro se presentó durante la excavación de la fase de banqueo, la cual también podría haber generado inestabilidad en el terreno. Sin embargo, en las mediciones realizadas en esta etapa tampoco se registró un desplazamiento significativo en las lecturas del inclinómetro. En consecuencia, podemos concluir que el monitoreo mediante el inclinómetro no registró desplazamientos significativos en ninguna de las etapas de la excavación del túnel, lo que sugiere que el terreno ha alcanzado la estabilidad deseada.

En las tablas 11 y 12 se presentan los desplazamientos registrados en los ejes Ax y Bx, respectivamente, de la última lectura. Los resultados de ambas mediciones indican que no se ha registrado un movimiento significativo en el terreno, lo que sugiere que se ha alcanzado la estabilidad deseada. Al comparar las lecturas actuales con las anteriores del 22-02-2023, se observa una diferencia en los valores máximos de desplazamiento, los cuales fueron de 0.04mm en el eje Ax y 0.02mm en el eje Bx.

Para el monitoreo de la velocidad de desplazamiento se presentan unas gráficas acumulativas de las mediciones realizadas, véase grafica 3 y 4 las cuales indican una velocidad prácticamente nula de movimiento en el terreno.

Dirección: Ax



Litología:

Gneis

Fecha:

07/03/2023

Elevación: 1423 msnm

Lecturas: 60

Intervalo lectura: 0.5

Profundidad: 30

Sensor SN: 2139194

N.F: No

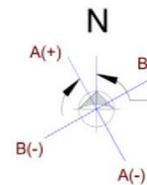
Equipo: Durham Geo



Dirección A+ y B+

Dirección máxima de deslizamiento:

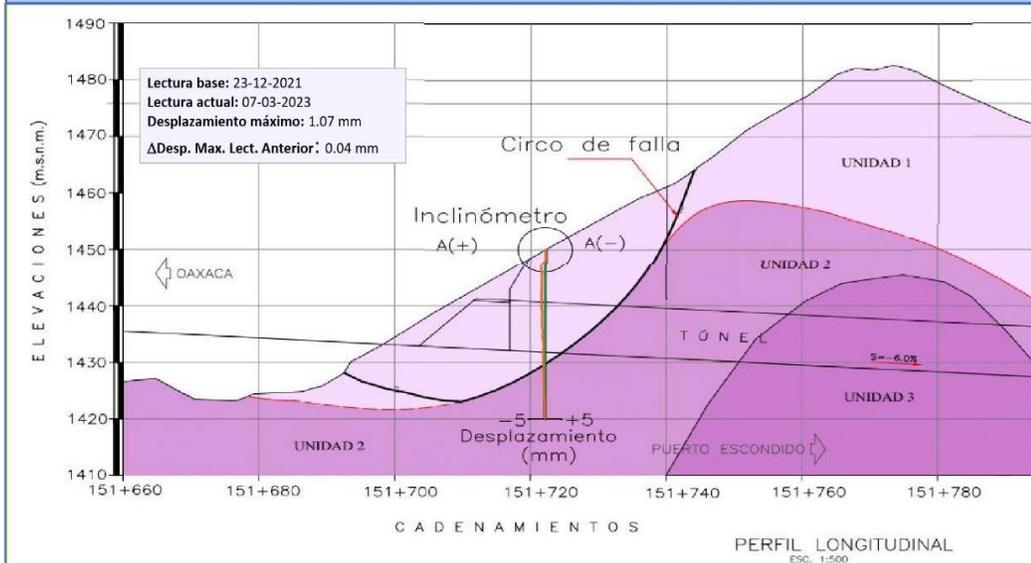
N 29° W



Unidad geotécnica	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	
Litología	Augengneis muy alterado	Augengneis muy alterado y fracturado bloques pequeños y lajas	Augengneis fracturado y compacto bloques de tamaño decimétrico	
Condición geotécnica	Corte a cielo abierto	E	D(-) D(+)	C(-)

Desplazamiento en comparativa con la sección geológica

Observaciones



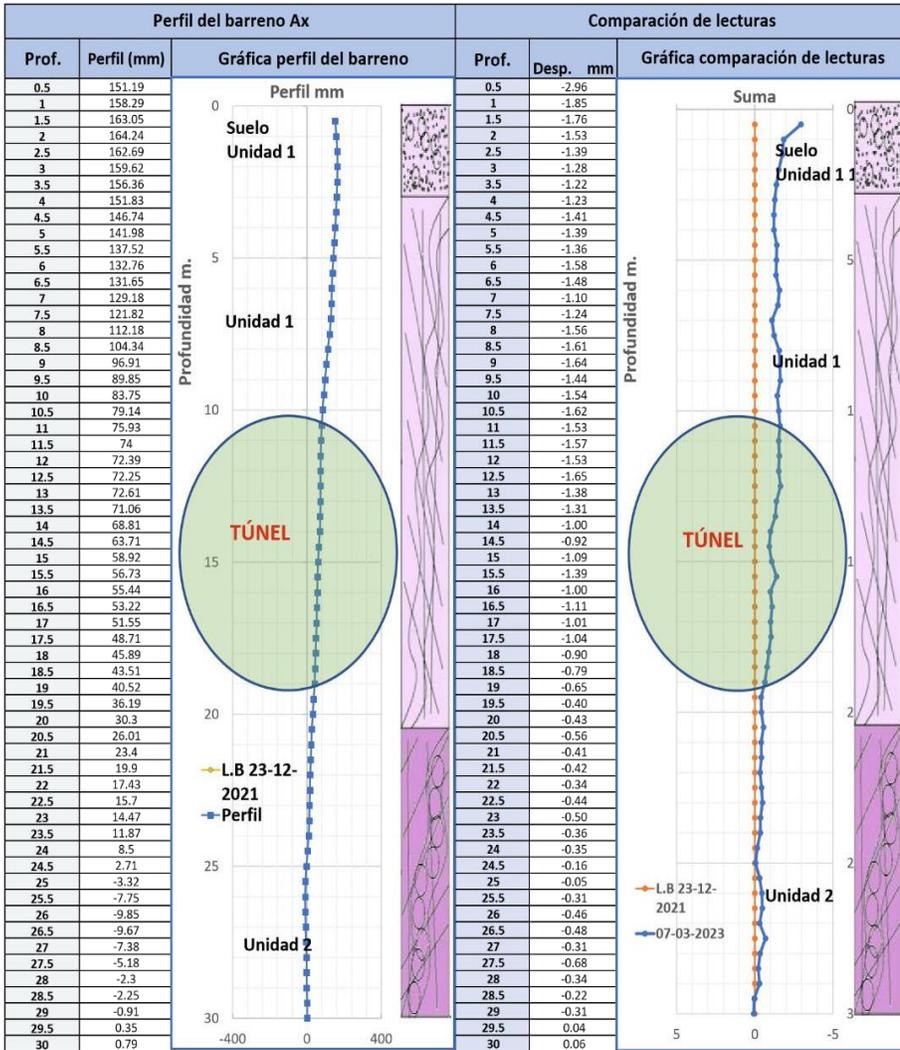
La variación que tenemos en las lecturas en el inclinómetro, se encuentra dentro de los rangos permitidos, ya que no hay evidencia de una deformación o inestabilidad en el talud, en la dirección Ax que están alineada preferencialmente al círculo de falla.

Consideraciones

Ax: Dirección del acelerómetro paralelo al eje de las ruedas que fue orientado en dirección preferencial de deslizamiento.
Bx: Dirección del acelerómetro ortogonal al eje Ax que es la dirección preferencial de deslizamiento.

Tabla 11. Resultados de la última medición del Inclinómetro en la dirección Ax.

Dirección: Bx



Litología:

Gneis

Fecha:

07/03/2023

Elevación: 1423 msnm

Lecturas: 60

Intervalo lectura: 0.5

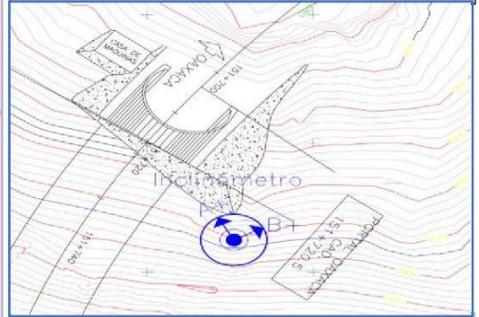
Profundidad: 30

Sensor SN: 2139194

N.F: No

Equipo: Durham Geo

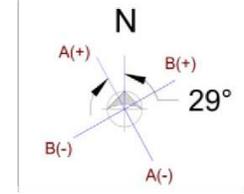
Croquis de localización



Dirección A+ y B+

Dirección máxima de deslizamiento:

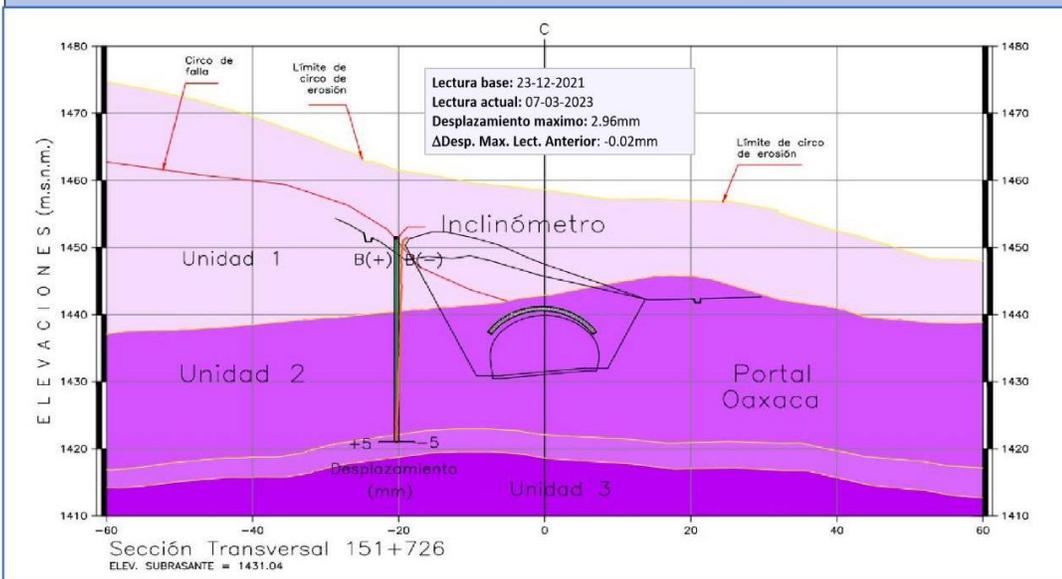
N 29° W



Unidad geotécnica	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3
Litología	Augengneis muy alterado	Augengneis muy alterado y fracturado bloques pequeños y lajas	Augengneis fracturado y compacto bloques de tamaño decimétrico
Condición geotécnica	Corte a cielo abierto	E	D(-) D(+)
			C(-)

Desplazamiento en comparativa con la sección geológica

Observaciones

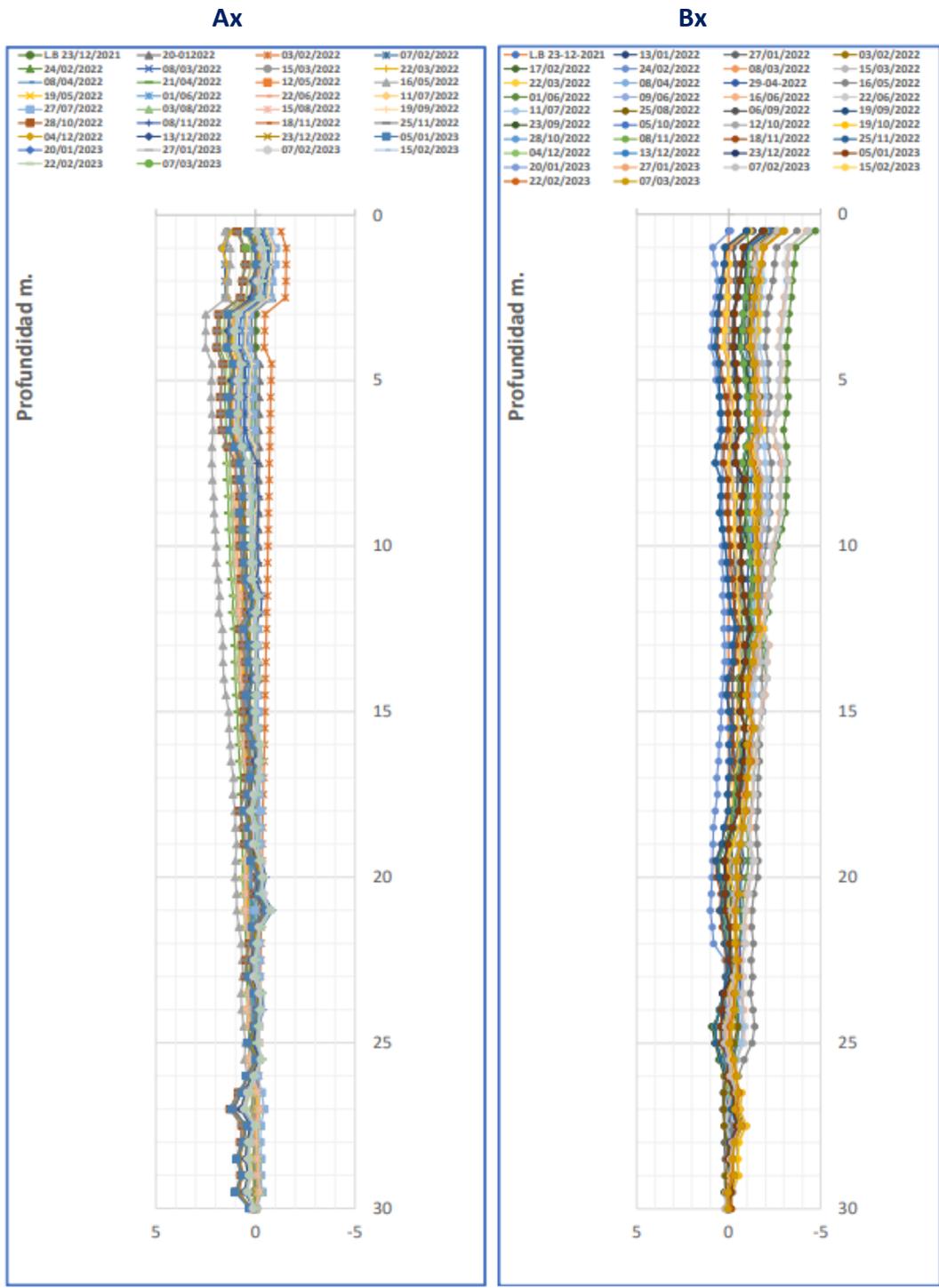


La variación que tenemos en las lecturas en el inclinómetro, se encuentra dentro de los rangos permitidos, ya que no hay evidencia de una deformación o inestabilidad en el talud, en la dirección Ax que están alineada preferencialmente al circo de falla.

Consideraciones

AX: Dirección del acelerómetro paralelo al eje de las ruedas que fue orientado en dirección preferencial de deslizamiento.
 BX: Dirección del acelerómetro ortogonal al eje Ax que es la dirección preferencial de deslizamiento.

Tabla 12. Resultados de la última medición del Inclinómetro en la dirección Bx



Grafica 3. Desplazamiento desde la lectura inicial a la final en el eje Ax.

Grafica 4. Desplazamiento desde la lectura inicial a la final en el eje Bx.

El inclinómetro es el dispositivo más importante de la instrumentación contemplada en el proyecto, ya que mide los desplazamientos que pueden ocurrir en los taludes del portal Oaxaca o al interior del túnel.

En el caso del túnel San Sebastián, se instaló un inclinómetro de barra a una profundidad de 30 metros, lo que permitió monitorear la estabilidad del terreno a lo largo del tiempo y tomar medidas preventivas en caso de que se hubiesen detectado deformaciones o desplazamientos significativos. Además, se realizó un monitoreo constante durante la construcción del túnel.

La correlación geotécnica con la instalación del inclinómetro fue crucial para garantizar la estabilidad del terreno, ya que permitió establecer un perfil detallado de la configuración de las unidades geotécnicas y correlacionar cualquier movimiento o inestabilidad del terreno con estas características.

Finalmente, los resultados obtenidos durante el monitoreo del inclinómetro en el túnel San Sebastián mostraron que, aunque hubo fases críticas durante la excavación, no se registraron desplazamientos significativos en las lecturas del instrumento, lo que permitió establecer que el terreno se mantuvo estable durante la ejecución de los trabajos en el túnel lo cual nos indica que las lecturas del inclinómetro fueron efectivas para garantizar la estabilidad del terreno.

6.1.2. Extensómetros de barra.

Debido a las condiciones geotécnicas desfavorables que están íntimamente relacionadas con la estabilidad del terreno en el Portal Oaxaca, y a una posible activación de un mecanismo de falla, el proyecto estableció un constante monitoreo de instrumentación geotécnica, el monitoreo se realiza tanto de forma superficial y al interior del túnel. El monitoreo superficial contempla la instalación de 2 extensómetros de barras con 4 puntos de anclaje distribuidos a diferentes profundidades. Se anexarán los reportes generados en cada lectura de los cuatro puntos de los extensómetros.

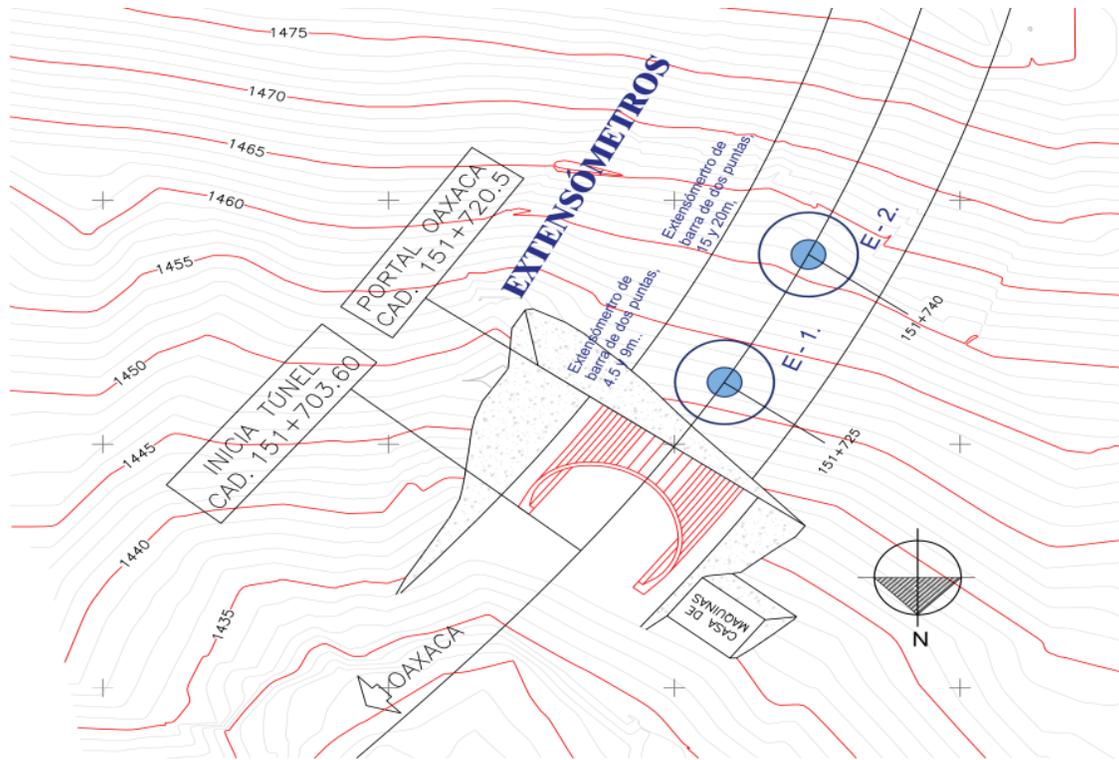


Figura 26. Ubicación en planta de los extensómetros de barra.

Para este proyecto se consideró la instalación de 2 extensómetros de barra conformado por dos puntos de medición o anclajes, dentro del barreno se colocarán las barras de acero inoxidable de 3/16" encamisadas por una tubería de PVC de 1/4" a todo lo largo, en la base de cada punta o barra, se colocó un ancla de acero corrugado de 3/4" de diámetro y 50 cm de longitud. Cada barra estará compuesta en la parte superior por un cabezal conformado por una brida, un cople y una placa metálica, los cuales sirven como base para las mediciones.

Las características geológicas y geotécnicas de un terreno son factores que impactan en su estabilidad, por lo que se llevaron a cabo sondeos mixtos con el fin de instalar los extensómetros de barras y así definir las propiedades físicas y mecánicas del suelo y de la roca. Durante estos sondeos, se identificaron suelos areno- limosos y una litología compuesta por un gneis cuarzo feldespático muy intemperizado y fracturado, así como un gneis-augegneis con una intensidad menor de fracturamiento. Mediante la observación de las muestras obtenidas durante los sondeos, fue posible establecer un perfil detallado de la configuración de las unidades

geotécnicas, lo que permite correlacionar cualquier desplazamiento vertical ya sea negativo (asentamiento) como positivo (bujamiento) con la estabilidad del terreno.



Figura 27. *Instalación del extensómetro - 1a a una profundidad de 9m.*

El extensómetro EXT-1, ubicado en el cadenamiento 151+725 se instaló de la siguiente forma: la primera punta, se instaló a una profundidad de 9 m medida a partir del nivel de terreno, la segunda barra se instaló a una profundidad de 4.5 m medida a partir del nivel de terreno.

El extensómetro EXT-2, ubicado en el cadenamiento 151+740 se instaló de la siguiente forma: la primera punta, se instaló a una profundidad de 15 m medida a partir del nivel de terreno; la segunda barra se instaló a una profundidad de 20 m medida a partir del nivel de terreno.

6.1.2.1. Metodología.

El fondo de la perforación del barreno o profundidad de desplante para la instrumentación del extensómetro 1 a una profundidad de 9 m con un anclaje de varilla corrugada a una profundidad de 4.5 metros. En la Figura 28 se muestra la sección transversal del cadenamiento 151+730 con la ubicación del extensómetro.

El fondo de la perforación del barreno o profundidad de desplante para la instrumentación del extensómetro 2 a una profundidad de 20 m con un anclaje de varilla corrugada a una profundidad de 15 metros. En la figura 29 se muestra la sección transversal del cadenamiento 151+740 con la ubicación del extensómetro.

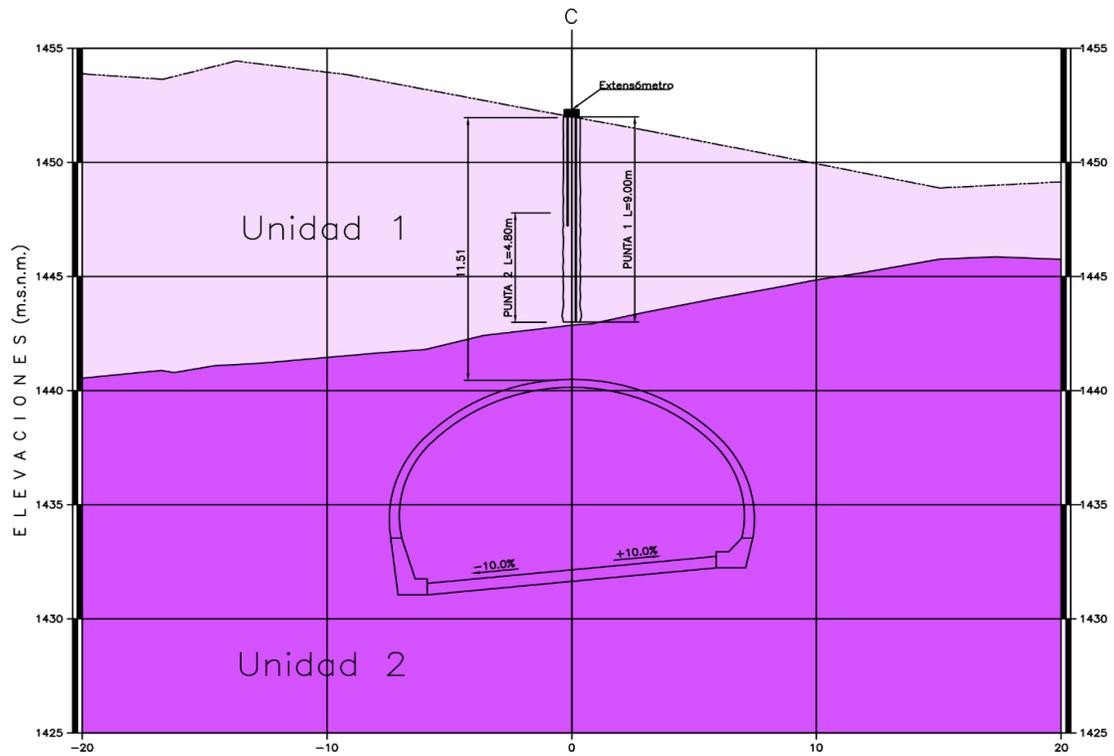


Figura 28. Sección transversal de la instalación del extensómetro a 4.5 y 9 metros.

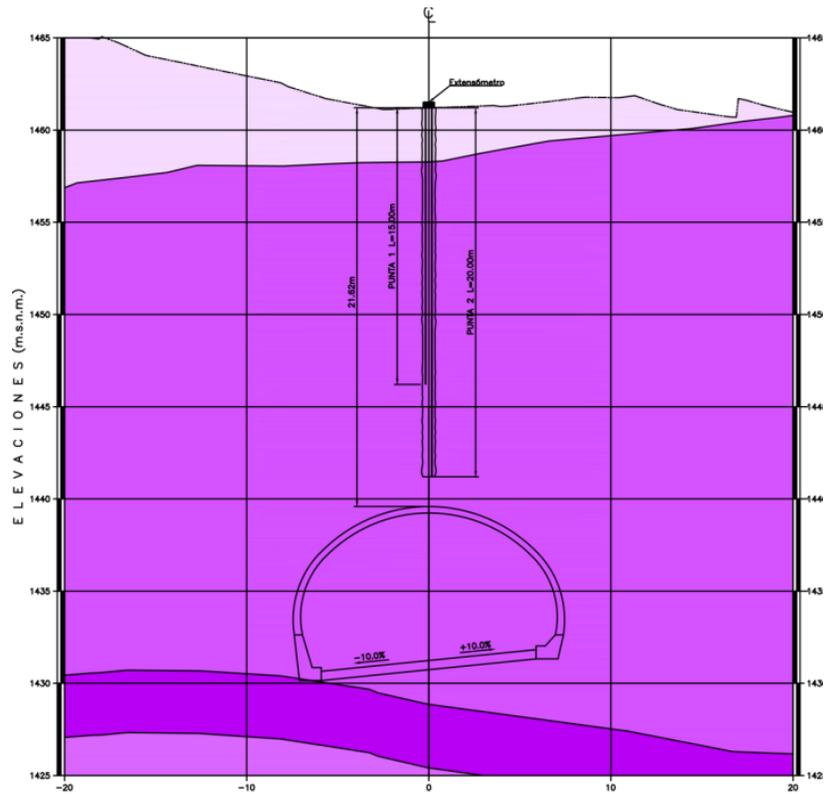


Figura 29. Sección transversal de la instalación del extensómetro a 15 y 20 metros.

Se puede apreciar que la Unidad 1 antes descrita ejerce una influencia significativa en la longitud total del extensómetro. Esta unidad presenta características mecánicas muy similares a las de un suelo, ya que se trata de una roca gneis-augegneis altamente alterada y fracturada. Esto aumenta la probabilidad de que ocurra un asentamiento o un bufamiento en el espesor de esta unidad.

6.1.2.2. Resultados.

Después de realizar 47 mediciones de la longitud, que se extiende desde la punta de la barra de acero inoxidable de 3/16" hasta la tapa metálica en el cabezal del extensómetro, con la extensión de un micrómetro de alta precisión, no se pudo determinar un importante desplazamiento positivo o negativo.

En la tabla 13, 14, 15, 16 y 17 se muestran los resultados de las mediciones desde la lectura inicial hasta la última lectura con su respectiva grafica donde se ubican los desplazamientos en función del tiempo. Por lo tanto, se concluye que el terreno se encuentra estable.

EXTENSOMETRO DE BARRA					
Extensómetro	Anclaje	Longitud inicial cm	Longitud final cm	Extensión añadida al micrómetro mm	o Longitud mm (inicial -final)
1	4.5	12.02	12.174	0	-1.54
1	9	9.702	9.866	0	-1.64
2	15	6.101	6.692	5	-0.91
2	20	2.537	2.718	0	-1.81

Tabla 13. Diferencia entre las longitudes inicial y final, que se mide desde el cabezal del extensómetro hasta la punta de varilla de acero inoxidable.

Nombre del Proyecto: **Túnel San Sebastián**

Portal: **Oaxaca**

Cadenamiento: **151+ 740**

Profundidad (m): **20**

Anclaje (m): **15**

Punto de referencia (PR):
 x: **728737.819**
 y: **1786380.326**
 z: **1461.218**

Distancia PI -PR (cm): **22.5**

Extensión del micrómetro (cm): **6.692**

Litología: **Gneis**

Elevación: **1461.15 msnm**

h1 final - h0 inicial: **-2.51**

Fecha	Punto inicial (PI)			h ₀ (mm)	h ₁ (mm)	Δh(mm)	Punto final		
	x	y	z				x	y	z
10/04/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15108	6.990	6.990	0.000	728740.7969	1786358.0239	1461.15108
20/04/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15108	6.990	6.970	-0.020	728740.7969	1786358.0239	1461.15110
17/05/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15110	6.970	6.960	-0.010	728740.7969	1786358.0239	1461.15111
16/06/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15111	6.960	6.960	0.000	728740.7969	1786358.0239	1461.15111
27/07/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15000	6.980	5.010	-1.970	728740.7969	1786358.0239	1461.15200
25/08/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15198	5.010	5.040	0.030	728740.7969	1786358.0239	1461.15195
02/09/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15195	11.640	11.640	0.000	728740.7969	1786358.0239	1461.15195
14/09/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15195	11.640	11.620	-0.020	728740.7969	1786358.0239	1461.15197
22/09/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15197	11.620	11.600	-0.020	728740.7969	1786358.0239	1461.15199
29/09/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15199	11.600	10.800	-0.800	728740.7969	1786358.0239	1461.15279
10/10/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15279	10.800	10.500	-0.300	728740.7969	1786358.0239	1461.15309
20/10/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15309	10.500	10.250	-0.250	728740.7969	1786358.0239	1461.15334
02/11/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15334	10.250	10.250	0.000	728740.7969	1786358.0239	1461.15334
10/11/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15334	10.250	10.250	0.000	728740.7969	1786358.0239	1461.15334
20/11/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15334	10.250	10.760	0.510	728740.7969	1786358.0239	1461.15283
30/11/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15283	10.760	10.840	0.080	728740.7969	1786358.0239	1461.15275
08/12/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15275	10.840	10.900	0.060	728740.7969	1786358.0239	1461.15269
16/12/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15269	10.900	11.020	0.120	728740.7969	1786358.0239	1461.15257
22/12/2022	728740.7969	1786358.0239	1461.15257	11.020	11.030	0.010	728740.7969	1786358.0239	1461.15256
10/01/2023	728740.7969	1786358.0239	1461.15256	11.030	11.040	0.010	728740.7969	1786358.0239	1461.15255
18/01/2023	728740.7969	1786358.0239	1461.15255	11.040	11.040	0.000	728740.7969	1786358.0239	1461.15255
25/01/2023	728740.7969	1786358.0239	1461.15255	11.040	11.030	-0.010	728740.7969	1786358.0239	1461.15256
08/02/2023	728740.7969	1786358.0239	1461.15256	11.030	11.020	-0.010	728740.7969	1786358.0239	1461.15257
15/02/2023	728740.7969	1786358.0239	1461.15257	11.020	11.050	0.030	728740.7969	1786358.0239	1461.15254
22/02/2023	728740.7969	1786358.0239	1461.15254	11.050	11.030	-0.020	728740.7969	1786358.0239	1461.15256
02/03/2023	728740.7969	1786358.0239	1461.15256	11.030	11.050	0.020	728740.7969	1786358.0239	1461.15254
08/03/2023	728740.7969	1786358.0239	1461.15254	11.050	11.080	0.030	728740.7969	1786358.0239	1461.15255

OBSERVACIONES:

El valor actual está por debajo de los límites de advertencia, alarma y peligro. Las lecturas previas y actuales indican que la velocidad y aceleración del desplazamiento están tendiendo a cero, lo que sugiere que el terreno ha alcanzado la estabilidad. Sin embargo, se continuará monitoreando constantemente para detectar cualquier posible inestabilidad en el futuro. Es importante mencionar que el 02/09/2022 se produjo un cambio en la extensión del micrómetro, lo que afectó la longitud de la punta de la barra de acero inoxidable a él cabezal del extensómetro.

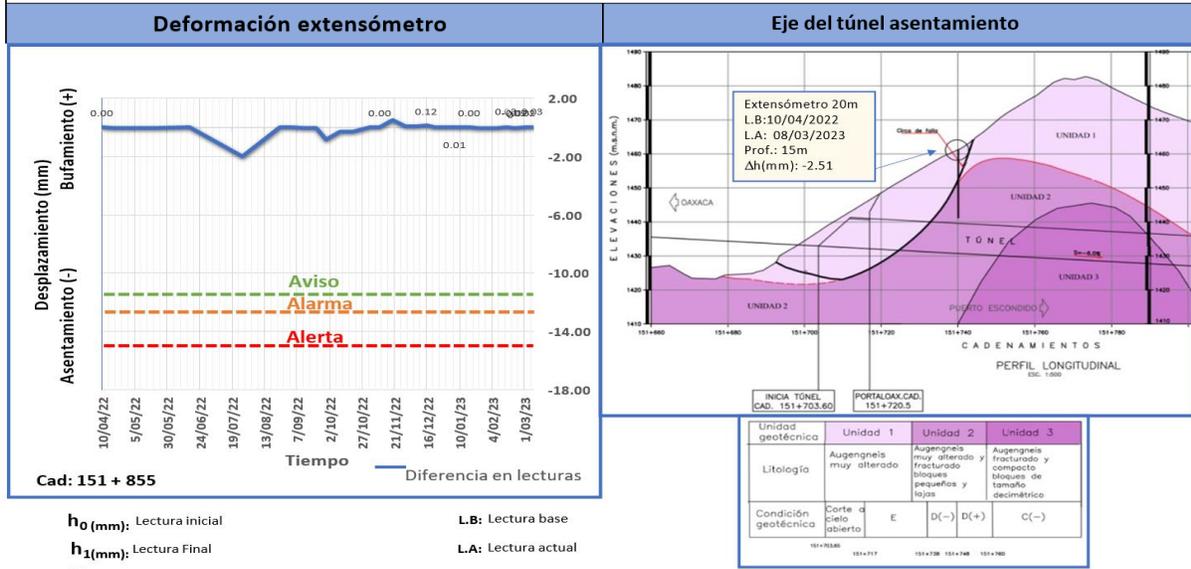


Tabla 16. Resultados de la última medición del extensómetro 2 a un anclaje de 15m.

Nombre del Proyecto: **Túnel San Sebastián**

Distancia PI -PR (cm): **27.5**

Portal: **Oaxaca**

Extensión del micrómetro (cm): **2.718**

Cadenamiento: **151+ 740**

Litología: **Gneis**

Profundidad (m): **20**

Elevación: **1461.19 msnm**

Anclaje (m): **20**

Punto de referencia (PR):
 x: **728737.819**
 y: **1786380.326**
 z: **1461.218**

h1 final - h0 inicial: **-3.27**

Fecha	Punto inicial (PI)			h ₀ (mm)	h ₁ (mm)	Δh(mm)	Punto final		
	x	y	z				x	y	z
10/04/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.19082	2.630	2.630	0.000	728741.4587	1786353.0679	1461.19082
20/04/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.19082	2.630	2.640	0.010	728741.4587	1786353.0679	1461.19081
17/05/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.19081	2.640	2.520	-0.120	728741.4587	1786353.0679	1461.19009
16/06/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.19093	2.520	2.540	0.020	728741.4587	1786353.0679	1461.19009
27/07/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.2461	2.570	0.560	-2.010	728741.4587	1786353.0679	1461.2481
25/08/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24807	0.560	0.650	0.090	728741.4587	1786353.0679	1461.24798
02/09/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24798	12.110	12.110	0.000	728741.4587	1786353.0679	1461.24798
14/09/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24798	12.110	11.600	-0.510	728741.4587	1786353.0679	1461.24849
22/09/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24849	11.600	11.550	-0.050	728741.4587	1786353.0679	1461.24854
29/09/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24854	11.550	11.600	0.050	728741.4587	1786353.0679	1461.24849
10/10/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24849	11.600	11.300	-0.300	728741.4587	1786353.0679	1461.24879
20/10/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24879	11.300	11.1100	-0.190	728741.4587	1786353.0679	1461.24898
02/11/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24898	11.110	11.1100	0.000	728741.4587	1786353.0679	1461.24898
10/11/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24898	11.110	11.020	-0.090	728741.4587	1786353.0679	1461.24907
20/11/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24907	11.020	11.040	0.020	728741.4587	1786353.0679	1461.24905
30/11/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24905	11.040	11.040	0.000	728741.4587	1786353.0679	1461.24905
08/12/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24905	11.040	11.030	-0.010	728741.4587	1786353.0679	1461.24906
16/12/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24906	11.030	10.900	-0.130	728741.4587	1786353.0679	1461.24919
22/12/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24919	10.900	10.860	-0.040	728741.4587	1786353.0679	1461.24923
10/01/2023	728741.4587	1786353.0679	1461.24923	10.860	10.860	0.000	728741.4587	1786353.0679	1461.24923
18/01/2023	728741.4587	1786353.0679	1461.24923	10.860	10.900	0.040	728741.4587	1786353.0679	1461.24919
25/01/2023	728741.4587	1786353.0679	1461.24919	10.900	10.860	-0.040	728741.4587	1786353.0679	1461.24923
08/02/2023	728741.4587	1786353.0679	1461.24923	10.860	10.840	-0.020	728741.4587	1786353.0679	1461.24925
15/02/2023	728741.4587	1786353.0679	1461.24925	10.840	10.880	0.040	728741.4587	1786353.0679	1461.24921
22/02/2023	728741.4587	1786353.0679	1461.24921	10.880	10.860	-0.020	728741.4587	1786353.0679	1461.24923
02/03/2023	728741.4587	1786353.0679	1461.24923	10.860	10.860	0.000	728741.4587	1786353.0679	1461.24923
08/03/2022	728741.4587	1786353.0679	1461.24923	10.860	10.820	-0.040	728741.4587	1786353.0679	1461.24903

OBSERVACIONES:

El valor actual está por debajo de los límites de advertencia, alarma y peligro. Las lecturas previas y actuales indican que la velocidad y aceleración del desplazamiento están tendiendo a cero, lo que sugiere que el terreno ha alcanzado la estabilidad. Sin embargo, se continuará monitoreando constantemente para detectar cualquier posible inestabilidad en el futuro. Es importante mencionar que el 02/09/2022 se produjo un cambio en la extensión del micrómetro, lo que afectó la longitud de la punta de la barra de acero inoxidable a el cabezal del extensómetro.

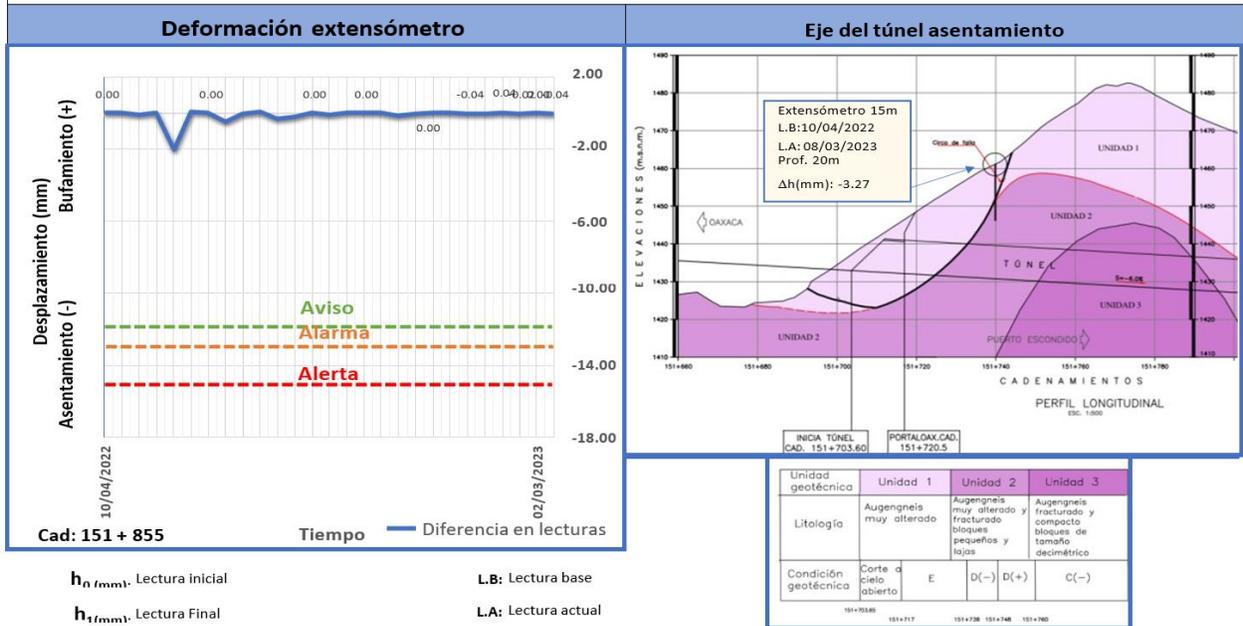


Tabla 17. Resultados de la última medición del extensómetro 2 a un anclaje de 20m.

Se observó que las fases más críticas en las que hubo variaciones en las longitudes medidas desde la punta de la barra de acero inoxidable de 3/16" al cabezal del extensómetro, fueron el comienzo de la excavación de la media sección superior en el portal Oaxaca y la fase de excavación del banqueo. En la primera fase se midió un desplazamiento negativo promedio mayor a 1 mm en todos los extensómetros, lo que indica un asentamiento, este desplazamiento se encuentra dentro de los rangos aceptables y sin representar un riesgo de inestabilidad en el túnel. En la segunda fase, no se observó una variación perceptible en las longitudes medidas de los extensómetros, lo que sugiere que el terreno se mantuvo estable durante esta fase de excavación del túnel.

En conclusión, se realizaron un total de 47 mediciones para determinar cualquier desplazamiento positivo o negativo en el terreno del túnel. Los resultados indicaron que el terreno se encuentra estable. Este monitoreo geotécnico es crucial para garantizar la estabilidad en el túnel y poder tomar las medidas correspondientes en caso de alguna inestabilidad.

6.1.3. Mojoneras en el portal Oaxaca y en portal Puerto Escondido.

Las mojoneras son elementos fundamentales en la instrumentación superficial de un túnel. Su función principal es la de establecer una referencia en la superficie del terreno sobre el que se encuentra el túnel para monitorear el comportamiento del suelo y del macizo rocoso circundante. Consistió en la colocación de pilares verticales que se colocaron en la superficie, en puntos estratégicos, y así permitir la medición de desplazamientos horizontales y verticales en el terreno. La medición de desplazamientos en el terreno es crucial para detectar cualquier deformación o movimiento anómalo que pueda afectar la estabilidad del túnel y así tomar medidas preventivas, tales como la instalación de sistemas de soporte o la implementación de trabajos de refuerzo en el túnel.

6.1.3.1. Metodología.

Es importante destacar que las mojoneras deben ser instaladas de manera adecuada para garantizar su correcto funcionamiento y una medición precisa de los desplazamientos. Para ello,

se deben tener en cuenta factores como la geología y la topografía de la zona, la distancia entre las mojoneras.

Cada punto de medición donde está ubicada la mojonera tiene una lectura inicial con coordenadas x, y, z ya que sucesivamente se iban comparando semanalmente detectando cualquier inestabilidad en el terreno.

Se anexarán los reportes de cada lectura que se realizó de las mojoneras en comparativa con la lectura inicial y así se fue monitoreando el posible desplazamiento de la instrumentación.

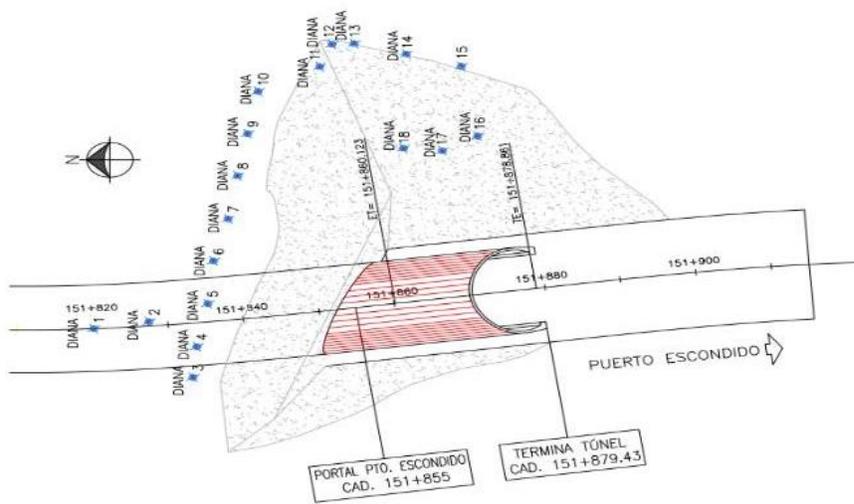


Figura 30. Distribución de las mojoneras instaladas en el portal Puerto Escondido.

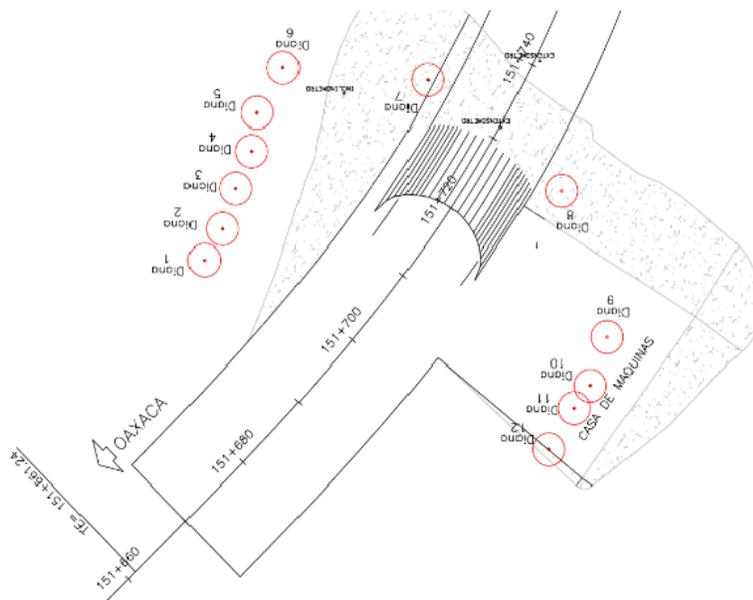


Figura 31. Distribución de las mojoneras instaladas en el portal Oaxaca.

6.1.3.2. Resultados.

Después de realizar mediciones periódicas semanales de las coordenadas x, y, z de las mojoneras o puntos de referencia, no se ha observado ningún desplazamiento significativo en ninguno de los puntos de medición después del corte del 15 de marzo, que marcó el inicio de la excavación en el Portal Oaxaca. Previamente, se detectó un desplazamiento en las dianas del Portal Puerto Escondido, cuya lectura inicial se tomó en el mes de septiembre y el desplazamiento ocurrió en el mes de diciembre, provocando inestabilidad en el macizo rocoso en dicho portal. Por lo tanto, se puede concluir que el terreno no a presentado inestabilidad ni se ha activado algún mecanismo de falla que pueda comprometer la estabilidad de la obra. La tabla 16 y 17 muestran los valores obtenidos en cada punto de medición y los desplazamientos registrados entre la lectura inicial al corete de marzo y la final.

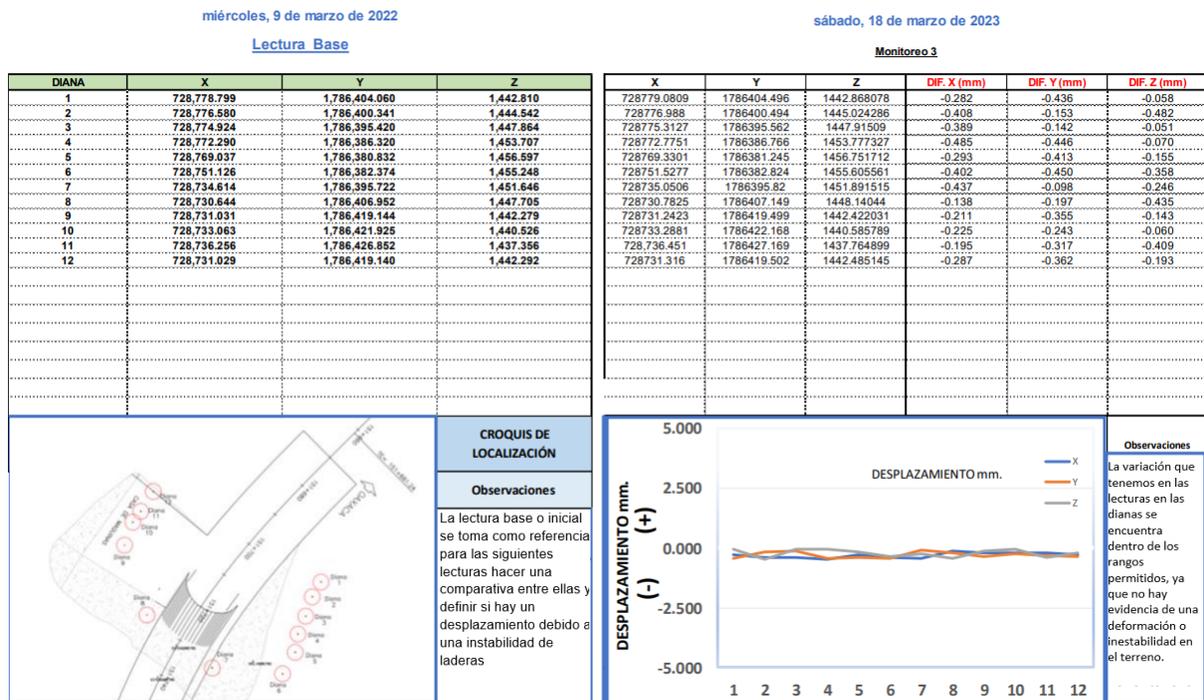


Tabla 18. Resultados de la última medición de la posición de las mojoneras en el portal Oaxaca.

Lectura Base

viernes, 20 de agosto de 2021

miércoles, 15 de marzo de 2023

DIANA	X	Y	Z	X	Y	Z	DIF. X (mm)	DIF. Y (mm)	DIF. Z (mm)
1	728,723.669	1,786,317.489	1,468.939	728723.623	1786317.492	1468.948	0.046	-0.003	-0.007
2	728,723.226	1,786,310.417	1,465.988	728723.216	1786310.43	1465.984	0.010	-0.013	0.004
3	728,722.465	1,786,302.828	1,463.344	728722.46	1786302.839	1463.339	0.005	-0.011	0.005
4	728,723.669	1,786,295.572	1,461.975	728723.673	1786295.572	1461.968	-0.004	0.000	0.007
5	728,714.018	1,786,289.782	1,454.243	728714.017	1786289.772	1454.228	0.001	0.010	0.015
6	728,719.340	1,786,289.271	1,457.040	728719.341	1786289.252	1457.014	-0.001	0.019	0.026
7	728,726.800	1,786,287.841	1,459.245	728726.783	1786287.795	1459.194	0.017	0.046	0.051
8	728,734.222	1,786,287.083	1,461.068	728734.199	1786287.052	1461.025	0.023	0.031	0.043
9	728,741.516	1,786,285.157	1,464.468	728741.513	1786285.163	1464.454	0.003	-0.006	0.014
10	728,749.009	1,786,283.901	1,467.591	728749.997	1786283.911	1467.581	0.012	-0.010	0.010
11	728,756.319	1,786,282.594	1,471.987	728756.322	1786282.604	1471.965	-0.003	-0.010	0.022
12	728,763.665	1,786,281.214	1,475.588	728763.658	1786281.222	1475.579	0.007	-0.008	0.009
13	728,767.966	1,786,273.120	1,472.641	728767.965	1786273.131	1472.634	0.001	-0.011	0.007
14	728,771.846	1,786,271.502	1,471.914	728771.848	1786271.513	1471.907	-0.002	-0.011	0.007
15	728,771.994	1,786,268.580	1,469.981	728771.99	1786268.596	1469.979	0.004	-0.016	0.002
16	728,770.164	1,786,261.739	1,465.974	728770.161	1786261.75	1465.968	0.003	-0.011	0.006
17	728,768.037	1,786,254.503	1,462.603	728768.039	1786254.511	1462.599	-0.002	-0.008	0.004
18	728,755.920	1,786,252.351	1,451.746	728755.936	1786252.357	1451.731	-0.016	-0.006	0.015

CROQUIS DE LOCALIZACIÓN		Observaciones
		<p>La lectura base o inicial se toma como referencia para las siguientes lecturas hacer una comparativa entre ellas y definir si hay un desplazamiento debido a una inestabilidad de laderas</p>

Observaciones
<p>La variación que tenemos en las lecturas en las dianas se encuentra dentro de los rangos permitidos, ya que no hay evidencia de una deformación o inestabilidad en el terreno.</p>

DESPLAZAMIENTO mm.

Tabla 19. Resultados de la última medición de la posición de las mojoneras en el portal Puerto Escondido.

6.2. Instrumentación al interior del túnel.

La instrumentación geotécnica al interior del túnel es crucial para detectar y evaluar cualquier posible afectación que pueda sufrir la estructura del túnel causada por la inestabilidad del terreno, como un abatimiento en las paredes o una deformación en el sostenimiento. En este sentido, el proyecto ejecutivo del túnel contempla la instalación de instrumentación geotécnica en el interior del túnel, que incluye la medición de convergencias ya que es una técnica que permite detectar el alargamiento o acortamiento del sostenimiento del túnel en mina, lo que proporciona información crítica sobre la estabilidad de la obra.

6.2.1. Convergencias.

Es vital contar con el conocimiento de las variaciones de las convergencias como única herramienta dentro del túnel. Durante la fase de excavación, esto nos permitió detectar cualquier desplazamiento en las paredes del túnel o en la zona crítica, que es la clave. Por lo tanto, la

monitorización y el análisis de las variaciones de las convergencias son esenciales para garantizar la seguridad y la estabilidad del túnel a lo largo de su construcción.

6.2.2. Metodología.

La instalación de las convergencias implica la colocación de argollas en agujeros perforados en las paredes del túnel y en la clave, que están sujetas al terreno natural. La medición se realiza en tres puntos establecidos en cada estación, dos en las paredes y uno en la clave, mediante una cinta extensométrica se realizan las mediciones de la longitud que hay entre cada uno de estos puntos. La variación en la longitud entre los puntos de medición se utiliza para detectar cualquier inestabilidad dentro del túnel. La separación entre las estaciones está definida en función de la condición geotécnica presente en el cadenamamiento donde se instalará dicha estación, así como lo marca el proyecto ejecutivo.

En resumen, la instalación de las convergencias es un proceso clave para garantizar la seguridad y la estabilidad al interior del túnel. Se anexa los reportes de las lecturas que se generaron en cada lectura de cada estación la comparativa entre la lectura inicial y cada medición.

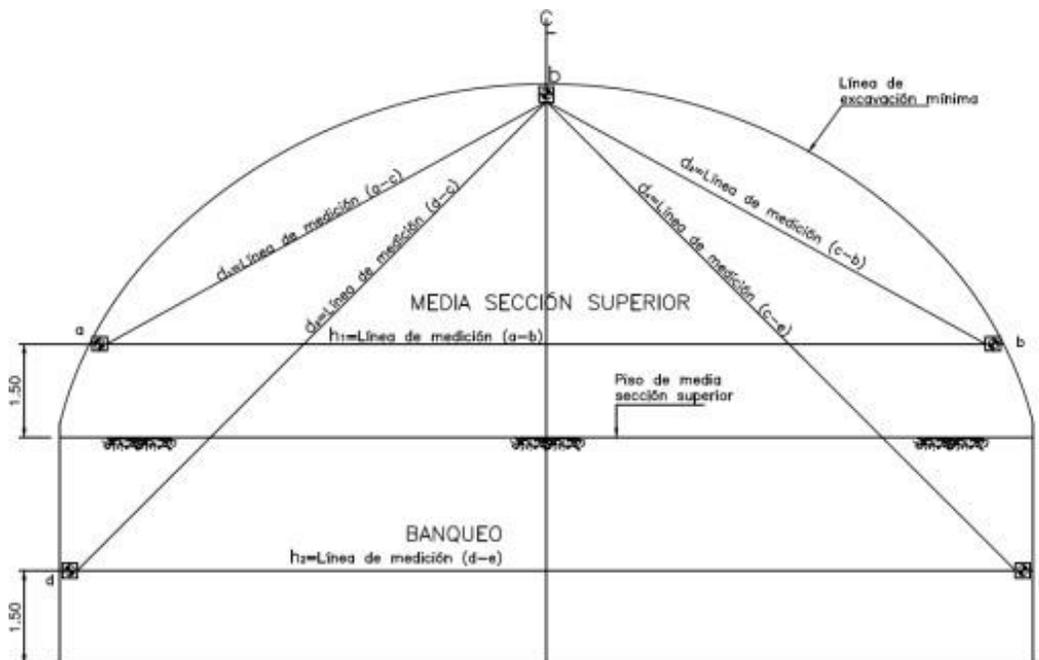


Figura 32. Ubicación donde se colocaron las convergencias en el túnel San Sebastián.



Figura 33. Cinta extensométrica.



Figura 34. Lectura inicial de convergencias en el portal Puerto Escondido.

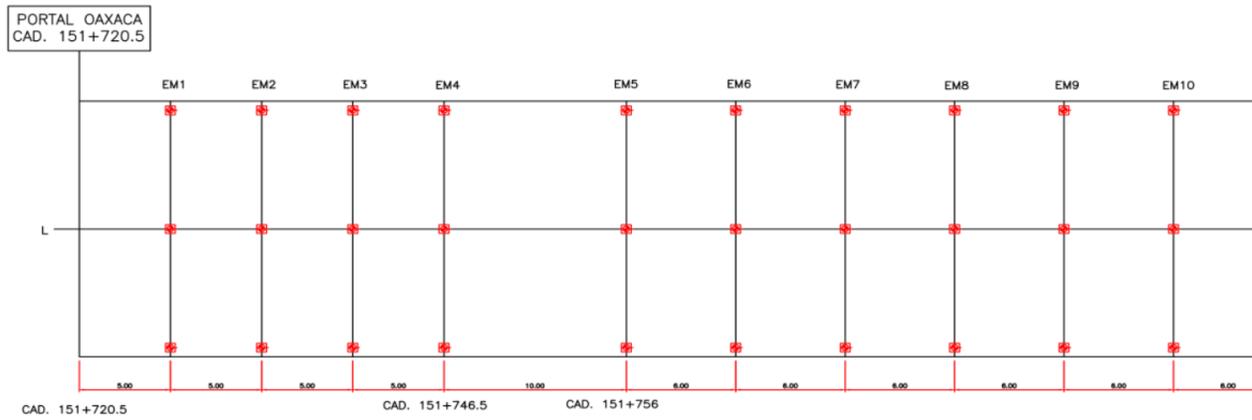


Figura 35. Estaciones instaladas al interior del túnel distribuidas de acuerdo con la condición geotécnica que se definió del cadenamiento 151+720.5 al 151+786

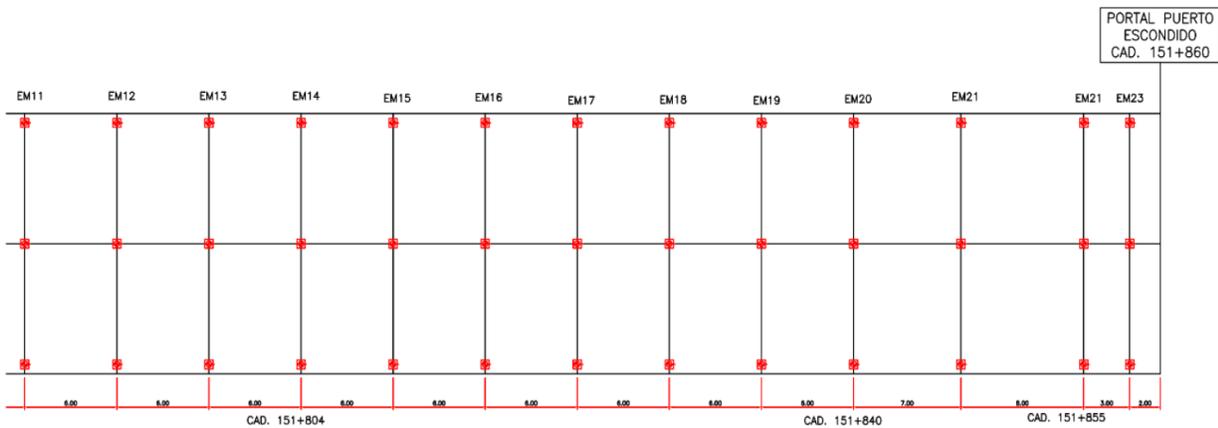


Figura 36.

Estaciones instaladas al interior del túnel distribuidas de acuerdo con la condición geotécnica que se definió del cadenamiento 151+786 al 151+860

6.2.1.2 Resultados.

Para monitorear la excavación del túnel, se han instalado estaciones de convergencia en las fases de excavación de la media sección superior y banqueo. Debido a la conexión del túnel y la fase de excavación en su totalidad, se han colocado un total de 31 estaciones de medición de convergencias, las cuales han arrojado un total de 437 lecturas. A continuación, se detallan las estaciones instaladas junto con su correspondiente valor máximo de desplazamiento contemplando que hubo movimientos de la instrumentación debido a la exposición con la maquinaria al interior del túnel. Ser han instalado las estaciones siguientes:

Media sección superior:

Estación	Distancia con la variación máxima.	Valor (mm)
151+726	A-C	3
151+731	A-C	3
151+736	A-C	4
151+741	B-C	3
151+746	A-C	6.5
151+756	A-B	2.5
151+762	A-C	0.8
151+768	B-C	0.8
151+774	A-C	3
151+780	A-B	0.7

Tabla 20. Variación máxima en la distancia de los puntos de cada estación en la media sección superior

Estación	Distancia con la variación máxima.	Valor (mm)
151+786	A-C	0.8
151+792	B-C	0.8
151+798	A-C	0.7
151+804	B-C	0.8
151+810	A-B	0.7
151+816	B-C	1
151+822	A-B	0.5
151+828	A-B	0.8
151+834	A-C	0.6
151+840	B-C	0.8
151+847	A-C	0.8
151+855	B-C	9.7
151+858	A-B	0.8

Tabla 21. Variación máxima en la distancia de los puntos de cada estación en la media sección superior.

Banqueo:

Estación	Distancia con la variación máxima.	Valor (mm)
151+726	A-D	0.5
151+731	D-E	2.8
151+736	A-D	0.4
151+741	D-E	0.6
151+746	A-E	1
151+756	A-D	1
151+855	A-D	0.9
151+858	D-E	0.9

Tabla 22. Variación máxima en la distancia de los puntos de cada estación en el banqueo.

La convergencia corresponde al corte de febrero del 2023. Este informe indica que, en términos generales, el túnel no ha sufrido inestabilidades en su construcción debido a la correcta ejecución de los trabajos de excavación y sostenimiento, sin activación de ningún mecanismo de falla. Sin embargo, la instrumentación superficial deberá continuar siendo monitoreada hasta que se completen los trabajos del revestimiento definitivo.

4. Conclusiones.

Durante la construcción del túnel San Sebastián, se llevó a cabo un riguroso reconocimiento geológico- geotécnico de la obra para garantizar la correcta ejecución de los trabajos, este reconocimiento geológico geotécnico contempla la caracterización mecánica de la roca y la colocación de instrumentación geotécnica para monitorear la estabilidad del terreno en el túnel.

Este proceso comenzó con la caracterización de la roca en cada frente de excavación, lo que permitió definir con precisión las propiedades mecánicas de la roca y establecer una condición geotécnica, para poder así aplicar el correspondiente método constructivo para dicha condición. Además, para comprender de forma clara el por qué la línea de excavación generada puede sobrepasar la línea de excavación máxima en determinadas condiciones mecánicas del terreno.

La instrumentación geotécnica utilizada en el túnel San Sebastián ha sido clave para garantizar la seguridad y el buen funcionamiento de la infraestructura. Los datos obtenidos por los instrumentos instalados, tanto en la instrumentación superficial como al interior del túnel, han permitido controlar y monitorizar las deformaciones, presiones y movimientos del terreno y la estructura del túnel en tiempo real.

La instrumentación superficial utilizada en el túnel incluyó dos extensómetros de barras, un inclinómetro y la colocación de puntos de referencia del terreno mediante mojoneras, lo que permitió detectar cualquier movimiento o inestabilidad del terreno y tomar medidas preventivas. El monitoreo con el inclinómetro y los extensómetros de barra no registraron

desplazamientos importantes, lo que confirma la estabilidad del terreno, y la ubicación espacial de las mojoneras nos indicó un desplazamiento mínimo, indicando que se alcanzó la estabilidad en el terreno.

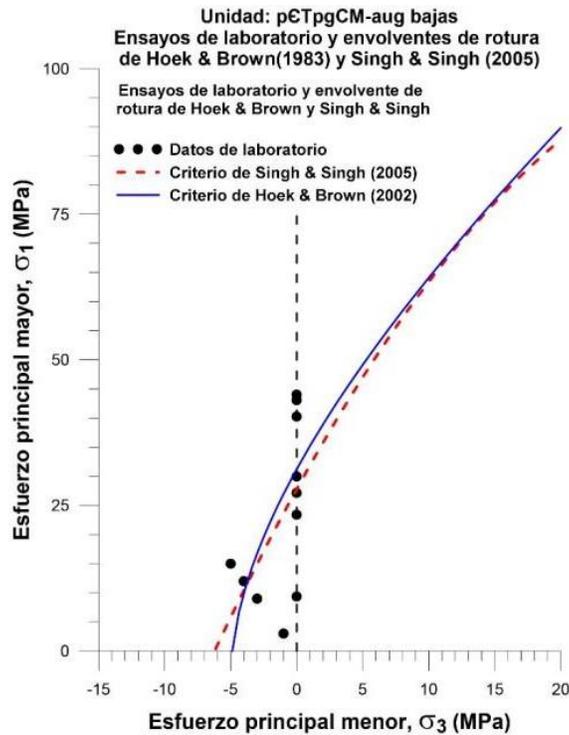
En el interior del túnel, se instalaron estaciones de convergencias para medir con precisión la distancia entre los puntos de medición y obtener información valiosa sobre la convergencia del túnel. La separación de las estaciones fue definida de acuerdo a las condiciones geotécnicas presentes en el lugar, lo que permitió obtener datos precisos sobre la estabilidad adentro del túnel. Las convergencias no registraron un desplazamiento significativo, lo cual indica la estabilidad en el interior del túnel.

En conclusión, la combinación de un riguroso reconocimiento geológico y la implementación de una instrumentación geotécnica adecuada permitió garantizar la seguridad y calidad de la obra del túnel San Sebastián. La instrumentación superficial y al interior del túnel proporcionó información valiosa en tiempo real, permitiendo detectar cualquier inestabilidad del terreno y tomar medidas preventivas para garantizar la estabilidad de la estructura.

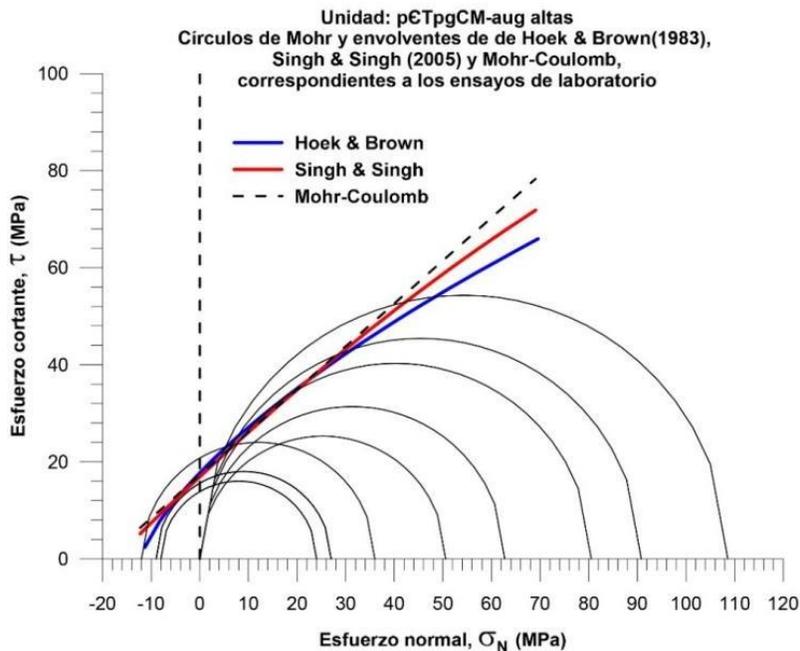
Referencias.

- Barton, N. (1974). A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. *Rock Mechanics*, 6(3), 57-68.
- Coconal. (n.d.). *Constructora de confianza en México*. Coconal. Retrieved October 6, 2024, from <https://coconal.com/>
- COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD, IIE. “Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo”, Edición 2015.
- Durham Geo-Enterprises. (n.d.). *Inclinometers, inclinometer casing, inclinometer systems*. Durham Geo-Enterprises. Retrieved October 6, 2024, from <https://durhamgeo.com/product-category/geotechnical-instrumentation/geotechnical-sensors/inclinometer-systems/>
- GEOSA. (2020). *Proyecto ejecutivo túnel San Sebastián*.
- INEGI “Carta Topográfica E14D87 San Baltazar Loxica” Esc: 1,50.000, 2016.
- INEGI, “Síntesis de Información Geográfica del Estado de Oaxaca”, Primera edición 2002.
- Servicio Geológico Mexicano. “Carta Geológico – Minera E14D87 San Baltazar Loxica” Esc:1,50.000, 2004
- Z.T. Bieniawski “Engineering Rock Mass Classifications” John Wiley and Sons. 1989. Table 4.1. pp. 54-55.

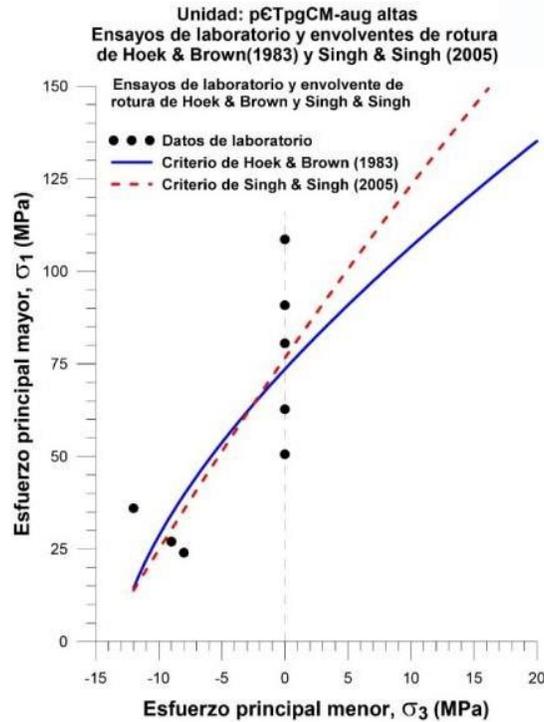
Anexo 1. Envoltentes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de los esfuerzos principales para la roca metamórfica (muestras de resistencia alta). (GEOSA, 3.0 Integración geotécnica, pp 13, 2023).



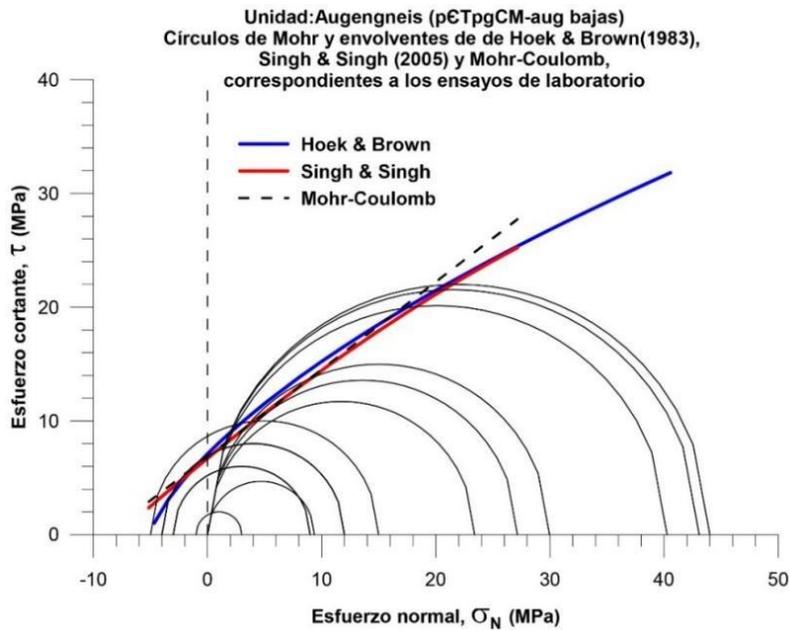
Anexo 2. Envoltentes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de Mohr-Coulomb para la roca metamórfica (muestras de resistencia alta). (GEOSA, 3.0 Integración geotécnica, pp 14, 2023).



Anexo 3. Envoltentes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de Mohr-Coulomb para la roca metamórfica (muestras de resistencia alta). (GEOSA, 3.0 Integración geotécnica, pp 14, 2023).



Anexo 4. Envoltentes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de Mohr-Coulomb para la roca metamórfica (muestras de resistencia alta). (GEOSA, 3.0 Integración geotécnica, pp 15, 2023).



Anexo 5. Valores geomecánicos en cada frente de excavación

CADENAMIENTO DEL FRENTE DE EXCAVACIÓN	RMR		Q		CONDICION GEOTÉCNICA
	Izquierda	Derecha	Izquierda	Derecha	
151+720.5	24	24	0.4167	0.4167	E
151+721.5	24	24	0.333	0.333	E
151+722.5	24	24	0.2917	0.2917	E
151+723.5	25	25	0.375	0.375	E
151+724.5	24	24	0.3333	0.333	E
151+725.5	25	25	0.3542	0.3542	E
151+727.5	26	26	0.4167	0.4167	E
151+729.5	25	25	0.3542	0.3542	E
151+730.5	27	27	0.3958	0.3958	E
151+731.5	27	27	0.3125	0.3125	E
151+732.5	28	28	0.3542	0.3542	E
151+733.5	28	28	0.4167	0.4167	E
151+736.5	29	29	0.4583	0.4583	E
151+738.5	26	31	0.4167	0.7192	E
151+740.5	27	31	0.4583	0.7292	D(-)
151+742.5	28	32	0.5	0.9722	D(-)
151+744.5	30	34	0.7778	1.2963	D(-)
151+746.5	31	37	1.2222	2.4	D(+)
151+749	31	37	1.22222	2.5	D(+)
151+753	34	36	1.222	2.9999	D(+)
151+755	31	36	0.888	2	D(+)
151+758	31	36	0.9778	1.8234	D(+)
151+761	35	38	1.2	1.7778	D(+)
151+765.5	44	36	2.5333	1.244	D(+)
151+768.5	32	34	1.5556	1.7778	D(+)
151+771.5	35	40	1.6444	2.5333	D(+)
151+774.5	34	36	1.4222	1.6889	D(+)
151+777.5	33	36	2.1022	2.53333	D(+)
151+779	33	36	2.1022	1.8667	D(+)
151+782	33	34	1.2889	1.9556	D(+)
151+785	32	34	1.2444	2.1333	D(+)
151+788	35	34	2.31111	2.5333	D(+)
151+791	36	35	2.3111	2.4	D(+)
151+794	34	33	1.3778	1.2	D(+)
151+797	34	32	1.4667	1.2444	D(+)
151+800	34	32	1.8667	1.422	D(+)
151+803	33	31	1.8667	1.11111	D(-)
151+806	31	31	1.1556	1.1556	D(-)
151+809	31	30	1.3689	1.2222	D(-)
151+812	30	29	0.9472	0.7639	D(-)
151+814	31	31	0.8333	0.8333	D(-)
151+817	29	29	0.75	0.75	D(-)
151+819	28	28	0.5625	0.5625	D(-)
151+821	29	29	0.4583	0.4583	D(-)
151+823	30	30	0.4583	0.4583	D(-)
151+825	32	32	0.8194	0.8194	D(-)
151+828	28	32	0.61111	0.6667	D(-)
151+830	27	28	0.4354	0.5042	D(-)
151+832	29	28	0.4667	0.425	D(-)
151+834	25	25	0.3125	0.3125	D(-)
151+837	25	25	0.3125	0.3125	D(-)
151+839	24	24	0.2917	0.2917	E
151+841	24	24	0.2292	0.2292	E
151+843	24	24	0.2292	0.2292	E
151+845	24	24	0.3542	0.3542	E
151+851	24	24	0.5333	0.5333	E
151+853	23	23	0.6	0.6	E
151+854	23	23	0.6222	0.6222	E
151+855	24	24	0.5657	0.5667	E
151+858	23	23	0.7111	0.711	E
151+860	23	23	0.7556	0.7556	E