



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

EXCAVACIÓN Y SOSTENIMIENTO PRIMARIO EN INTERIOR DEL TÚNEL “EL SINALOENSE”

T E S I S

Para obtener el título de:

INGENIERA GEÓLOGA

Presenta: Mayra Torres López

DIRECTOR: ING. LUIS ARTURO TAPIA CRESPO
MÉXICO D.F. MAYO 2013



CENTRO SCT SINALOA
SUBDIRECCIÓN DE OBRAS
Oficio No. SCT.- 6.24.412.-1181/2012

RESIDENCIA GENERAL
DE CARRETERAS FEDERALES

SECRETARIA DE
COMUNICACIONES Y
TRANSPORTES



Culiacán, Sin., 25 de Septiembre de 2012.

C. MAYRA TORRES LÓPEZ
Presente.

Me refiero al escrito sin número con fecha del 10 de septiembre del año en curso, mediante el cual solicita autorización para hacer uso de información obtenida en campo del Túnel "El Sinaloense" del proyecto Autopista Durango-Mazatlán, para la elaboración de su tesis profesional, que presentará en la Universidad Nacional Autónoma de México.

Sobre el particular, se le autoriza usar la información técnica obtenida en campo sobre el Túnel "El Sinaloense" única y exclusivamente para la elaboración y presentación de su tesis profesional.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente
SUFRAGIO EFECTIVO. NO REELECCIÓN
El Director General

ING. ALFREDO RUBIO RODRÍGUEZ

C.c.p. Ing. José Refugio Ávila Muro, Subdirector de Obras. Edificio
C.c.p. M.I. Lucas Manuel Aguilar Medina, Enc. de la Residencia General de Carreteras Federales. Edificio
C.c.p. Expediente
C.c.p. Minutario

ARR/JRAM/LMAM/msl*

AGRADECIMIENTOS:

Mi eterna gratitud a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por la formación profesional que recibí durante mi estancia.

A mis profesores por su tiempo y dedicación, gracias a todos ellos hoy tengo la oportunidad de presentar éste trabajo, en especial a mis profesores de la División de Ciencias de la Tierra.

A la Secretaria de Comunicaciones y Transportes, al Ing. Alfredo Rubio Rodríguez y Arq. Alberto Ortiz por sus atenciones al facilitar la autorización para el presente trabajo. Arq. Ortiz gracias por su apoyo y por creer en mi trabajo.

Ing. Saúl Soto Sánchez por la oportunidad de trabajo, sus consejos y porque día a día me motivo a seguir adelante y con el ejemplo me enseñó que se puede ser mejor como profesionista y persona.

A mis compañeros de trabajo que hicieron de mi estancia en Sta. Lucía un lugar agradable de trabajo y un hogar. Al Ing. Miguel Rangel, Ing. Laura Téllez, Lic. Luisa Rosas, Ing. Danuario Sánchez, Arq. Cesar Covarrubias e Ing. Oscar Aispuro, por su amistad, su cariño y confianza.

Quiero mencionar de manera especial al Instituto de Geología, donde aprendí las bases para salir al campo de trabajo. A la Ing. Consuelo Macías por sus enseñanzas, tiempo, dedicación y amistad, gracias siempre tienes una palabra de aliento para mí. Al Dr. Fernando Ortega, Dr. Mariano Elías, Dr. José Luis Sánchez y M.C. Margarita Reyes gracias por todo.

Al Ing. Rubén Rodríguez por sus observaciones y aportaciones para escribir el capítulo IV.

AGRADECIMIENTOS:

Le agradezco a dios por darme a los mejores papás a quienes dedico este trabajo, porque gracias a su dedicación y esfuerzo han hecho que nuestra familia salga adelante en todos los ámbitos, a mi mamá Hilaria López y mi papá Roberto Torres lo único que puedo decir es gracias, los amo.

Para mis hermanos: Adriana gracias por tu apoyo incondicional, Pablo eres un ejemplo de vida, siempre tienes una sonrisa y Emilio gracias por ser un excelente hermano, espero éste trabajo te inspire en tus estudios.

A la familia López Torres, en especial a mi abuelo Hipólito López y mi abuela Elísea Torres a mis tíos, Prudencia, Laurencio, Alejandra, Olegario, Elvia, Bertha, Carmelo, Norma, Argelia y Luis, gracias.

A mi tía Francisca Morales por todo el apoyo que me brindo desde pequeña, gracias.

A mi tío Anatolio, por su apoyo incondicional a la familia.

A mis primos y familiares con lo que he convivido y me han apoyado muchas gracias a todos.

A mis amigos de la universidad y porque juntos compartimos momentos inolvidables, en especial a mi caliza favorita, Mariam si no fuera por tus locuras no habiéramos llegado a Sinaloa, gracias por todo, por tu amistad, por los buenos momentos, pero sobre todo porque aún en los malos hemos estado juntas.

Le dedico éste trabajo de manera especial a la persona que me llevo a la universidad el primer día de clases, que motivo mi gusto por la geología, dejándome enseñanzas de vida, el angelito que me cuida en el cielo Fermín Morales Morales.

Gracias por ser parte de mi vida.

Mayra.

ÍNDICE:

Objetivos.....	i
Índice de figuras.....	ii
Índice de tablas.....	iii
Índice fotográfico.....	iv

CAPÍTULO I. GENERALIDADES.

I.1. Reseña histórica.....	1
I.2. Ubicación del proyecto autopista Durango-Mazatlán.....	1
I.3. Localización del túnel “El Sinaloense”.....	2
I.4. Vías de comunicación.....	3
I.5. Fisiografía.....	4
I.6. Geomorfología.....	5
I.7. Clima.....	5
I.8. Geología general.....	5
I.9. Sismicidad.....	7

CAPÍTULO II. ESTUDIOS GEOLÓGICOS.

II. Geología del túnel “EL Sinaloense”.....	8
II.1 Estudios previos.....	10
Topografía del túnel “El Sinaloense”.....	10
Geofísica del proyecto túnel “El Sinaloense”.....	11
Geotecnia del proyecto túnel “El Sinaloense”.....	12

CAPÍTULO III. ESTUDIOS GEOTÉCNICOS.

III.1. Condiciones geológicas.....	14
Resistencia de la matriz rocosa.....	14
Índice de la calidad de la roca. RQD (%).....	15
Separación entre diaclasas.....	15
Estado de las discontinuidades.....	16
Agua freática.....	18
Corrección por orientación de diaclasas.....	18
III.2. Clasificaciones geomecánicas.....	19
Terzaghi.....	19
Stini y Lauffer.....	21
Deere.....	21
Wickham, Tiedemann and Skinner (RSR - Rock Structure Rating).....	23
Bieniawsky.....	24
Barton (Q).....	26
Clasificación ISRM.....	30
González Vallejo.....	30
Hoek.....	32
Romana.....	34

ANTECEDENTES

III.3. Procedimiento constructivo del Túnel “El Sinaloense”.....	37
Condición geotécnica A.....	38
Condición geotécnica B.....	40
Condición geotécnica C ⁽⁺⁾	42
Condición geotécnica C ⁽⁻⁾	44
Condición geotécnica D ⁽⁺⁾	46
Condición geotécnica D ⁽⁻⁾	48
Condición geotécnica E.....	50
Elementos utilizados en el interior del túnel.....	53
Concreto lanzado.....	53
Anclaje.....	55
Marcos metálicos.....	57
Enfilaje.....	59

CAPÍTULO IV. PROCESOS CONSTRUCTIVOS DE LOS PORTALES.

VI.1. Características del Túnel “EL SINALOENSE”.....	61
Procedimiento constructivo.....	61
Metodología de construcción de un túnel.....	62
VI.2. Portal.....	62
Excavación.....	62
Tratamiento.....	63
Concreto lanzado.....	63
Anclas pasivas o de fricción.....	63
Anclas activas o de tensión.....	64
Drenes.....	66
Contracuneta.....	66
VI.3. Excavación de túnel.....	69
VI.4. Revestimiento o tratamiento primario.....	73
Concreto lanzado en interior de túnel.....	74
Anclas radiales (pasivas ó de fricción).....	74
Marcos metálicos.....	76
Enfilaje.....	76
VI.5. Banqueo.....	77
VI.6. Revestimiento definitivo.....	78
Impermeabilización.....	78
VI.7. Obras complementarias.....	81
VI.8. Operación y mantenimiento.....	83

CAPÍTULO V. COMPARTIVO DE RESULTADOS PROYECTADOS Y REALES.

V.1. Túnel “El Sinaloense”.....	84
Geología del túnel “El Sinaloense”.....	84
Descripción de las rocas en interior de túnel.....	84
Comparativo entre la geología de proyecto y la de construcción.....	85
Plano geológico corregido.....	85

CONCLUSIONES

V.2. Condiciones estructurales del túnel.....	87
V.2. Condiciones geotécnicas a lo largo del túnel “El Sinaloense”.....	91
V.4. Comparativo entre los sostenimientos geotécnicos de proyecto y construcción.....	95
Plano geotécnico real.....	100
V.5. Problemas geológicos-geotécnicos en la excavación.....	101
 CONCLUSIONES.....	 104
 BIBLIOGRAFÍA.....	 106

Apéndice 1

Plano geológico proyecto.
Plano geológico real.
Plano geotécnico proyecto.
Plano geotécnico real.

OBJETIVOS:

- Describir de manera general la construcción de un túnel, destacando la importancia de la geología.
- Exponer los trabajos geológicos-geotécnicos realizados durante la construcción del túnel “El Sinaloense”.
- Realizar una comparativa entre los resultados proyectados y reales del túnel “El Sinaloense”.

RESUMEN

La autopista Durango-Mazatlán es la obra de mayor infraestructura de las últimas décadas, dentro de éste proyecto se encuentra la construcción del túnel “El Sinaloense” de 2794 metros de longitud, es el segundo túnel carretero de mayor longitud de la República Mexicana.

En el presente trabajo se describe la construcción del túnel “El Sinaloense” que inicia con los portales en el año 2009. Se describe cada una de las condiciones geotécnicas y el sostenimiento que se aplicó hasta la conexión de la excavación en media sección en diciembre de 2011. Se exponen los métodos utilizados para determinar las condiciones geotécnicas, así como una pequeña reseña de las clasificaciones geomecánicas que fueron la base para determinar los elementos que hoy sostienen al túnel. Se expone un comparativo entre los datos propuestos en proyecto y los trabajos realizados durante la construcción. Como resultado encontramos diferencia en litología, estructuras y en consecuencia en las condiciones geotécnicas. Se presentan las modificaciones realizadas al proyecto constructivo y las dificultades de mayor importancia durante la excavación subterránea.

La parte innovadora de la autopista en el área de túneles, es la dimensión ya que cuenta con túneles de dos y cuatro carriles, los túneles con longitud mayor a 700 metros cuentan con una serie de servicios para el usuario motivo por lo que se les denomino inteligentes. El túnel “El Sinaloense” es un túnel inteligente cuenta con equipos de seguridad que informan al usuario las condiciones dentro del túnel: tráfico de vehículos, temperatura en el interior, la calidad de aire en el interior del túnel, cuenta con un sistema de ventilación que permite despejar los gases tóxicos en su interior, así como un monitoreo las 24hrs que garantizan la seguridad del usuario.

ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA I. 1. Corredor Matamoros - Mazatlán.....	2
FIGURA I. 2. Autopista Durango – Mazatlán.....	3
FIGURA I. 3. Ubicación de Tramo III.....	3
FIGURA I. 4. Zonas sísmicas de la República Mexicana.....	4
FIGURA III. 1. Estado de discontinuidades. (Gonzalez-VallejoLuis, 2006).....	17
FIGURA III. 2. Excavación sin tratamiento.....	21
FIGURA III. 3. Tiempo de estabilidad de la excavación vs longitud libre.....	21
FIGURA III. 4. Método para obtener el RQD.....	22
FIGURA III. 5. Sección transversal de túnel. Condición A.....	39
FIGURA III. 6. Perfil de avance. Condición A.....	39
FIGURA III. 7. Sección transversal. Condición geotécnica B.....	41
FIGURA III. 8. Perfil de avance. Condición B.....	41
FIGURA III. 9. Sección transversal. Condición C ⁽⁺⁾	43
FIGURA III. 10. Planta de avance.....	43
FIGURA III. 11. Perfil de sostenimientos.....	43
FIGURA III. 12. Sección transversal. Condición geotécnica C ⁽⁻⁾	45
FIGURA III. 13. Planta de avance.....	45
FIGURA III. 14. Perfil de sostenimientos. Condición C ⁽⁻⁾	45
FIGURA III. 15. Sección transversal. Condición geotécnica D ⁽⁺⁾	47
FIGURA III. 16. Perfil de avance en planta.....	47
FIGURA III. 17. Perfil de sostenimientos. Condición D ⁽⁺⁾	47
FIGURA III. 18. Sección transversal. Condición geotécnica D ⁽⁻⁾	49
FIGURA III. 19. Planta de avance. Condición geotécnica D ⁽⁻⁾	49
FIGURA III. 20. Perfil de sostenimiento. Condición D ⁽⁻⁾	49
FIGURA III. 21. Vista transversal de los sostenimientos. Condición E.....	51
FIGURA III. 22. Perfil de sostenimientos. Condición E.....	52
FIGURA III. 23. Detalle de concreto lanzado y marcos metálicos en condición E.....	52
FIGURA III. 24. Ancla pasiva de fricción en interior de túnel.....	56
FIGURA III. 25. Vista transversal de anclas.....	56
FIGURA III. 26. Vista en planta de anclas en interior de túnel en patrón 1.0x1.0.....	56
FIGURA III. 27. Sección transversal de marco metálico.....	58
FIGURA III. 28. Detalle de marco metálico, concreto lanzado y enfilaje ligero.....	59
FIGURA III. 29. Perfil de sostenimiento con enfilaje ligero, anclas radiales y marcos metálicos, roca de muy mala calidad.....	59
FIGURA III. 30. Sección transversal de sostenimiento con enfilaje, anclas radiales y marcos metálicos.....	60
FIGURA IV. 1. Anclas pasivas o de fricción (ROBERTO UCAR NAVARRO, 2002).....	64
FIGURA IV. 2. Anclas activas o de tensión (ROBERTO UCAR NAVARRO, 2002).....	65
FIGURA IV. 3. Especificaciones de un dren para talud de túnel.....	66
FIGURA IV. 4. Especificaciones para la construcción de la contracuneta.....	66
FIGURA IV. 5. Enfilaje o paraguas.....	70
FIGURA IV. 6. Condición geotécnica "A".....	71
FIGURA IV. 7. Condición geotécnica "B".....	71
FIGURA IV. 8. Condición geotécnica "C+".....	71
FIGURA IV. 9. Condición geotécnica "D+".....	71
FIGURA IV. 10. Condición geotécnica "D+".....	72
FIGURA IV. 11. Condición geotécnica "D-".....	72
FIGURA IV. 12. Procedimiento para la colocación de un ancla Swellex.....	75
FIGURA IV. 13. Perno de anclaje Swellex, antes y después de la inyección de agua.....	75

FIGURA V. 1. A. Estereograma con polos de los planos de fallas y fracturas, se muestra el plano de la falla que provocó el caído en el kilómetro 668+800, B. Se muestran los planos de las fallas y fracturas en la zona mencionada.....	87
FIGURA V. 2. A. El estereograma muestra los planos donde se alojan las estructuras principales, B. Estereogramas de densidad de las estructuras.....	87
FIGURA V. 3. A. Se muestra los polos, b. Planos de fallas y fracturas de la zona 669+580 a 670+080.....	88
FIGURA V. 4. A. Estereograma se observan los planos donde se encuentran alojadas las estructuras, B. Estereograma de densidades.....	88
FIGURA V. 5. A. Estereograma de polos. B. Planos de fracturamiento y fallas.....	89
FIGURA V. 6. A. Planos principales donde se encuentran alojadas las fallas y fracturas. B. Estereograma de densidades.....	89
FIGURA V. 7. A. Estereograma de polos, B. Estereograma de planos de fallas y fracturas.....	90
FIGURA V. 8. A. Planos donde se encuentran alojadas las fallas y fracturas principales, B. Estereograma de densidades.....	90
FIGURA V. 9. Condición geotécnica "D-" de proyecto y condiciones de construcción, del km 660+445 al 660 a 460.....	95
FIGURA V. 10. Condición geotécnica "D+" de proyecto y condiciones de construcción, del km 667+460 al 667+840.....	96
FIGURA V. 11. Condición geotécnica "C+" de proyecto y condiciones de construcción, del km 668+840 al 669+500.....	96
FIGURA V. 12. Condición geotécnica "D+" de proyecto y condiciones de construcción, del km 669+500 al 669+580.....	96
FIGURA V. 13. Condición geotécnica "C+" de proyecto y condiciones de construcción, del km 669+580 al 670+080.....	97
FIGURA V. 14. Condición geotécnica "C+" de proyecto y condiciones de construcción, del km 670+080 al 670+160.....	97
FIGURA V. 15. Condición geotécnica "B" de proyecto y condiciones de construcción, del km 670+160 al 670+530.....	97
FIGURA V. 16. Condición geotécnica "B" de proyecto y condiciones de construcción, del km 670+530 al 670+620.....	98
FIGURA V. 17. Condición geotécnica "C-" de proyecto y condiciones de construcción, del km 670+620 al 670+185.....	98
FIGURA V. 18. Condición geotécnica "D-" de proyecto y condiciones de construcción, del km 670+185 al 670+202.....	98
FIGURA V. 19. Perfil geotécnico del túnel "El Sinaloense".....	100

INDICE FOTOGRAFICO.

FOTOGRAFÍA III. 1. Metodología para cálculo de RQD.....	15
FOTOGRAFÍA III. 2. Túnel "El Sinaloense", caído de origen estructural, causado por pseudoestratificación y diaclasas.....	16
FOTOGRAFÍA III. 3. Ejemplo del estado de las discontinuidades.....	17
FOTOGRAFÍA III. 4. Salida puntual de agua en clave.....	18
FOTOGRAFÍA III. 5. Ejemplo de condición a. Túnel "El Sinaloense" portal Durango, roca de calidad muy buena, Clase I.....	38
FOTOGRAFÍA III. 6. Ejemplo de condición B. Túnel "El Sinaloense" portal Mazatlán, roca de calidad buena, Clase II.....	40
FOTOGRAFÍA III. 7. Ejemplo de tratamiento en condición C(+). Anclas radiales colocadas en patrón 2.0x2.0.....	42
FOTOGRAFÍA III. 8. Ejemplo condición C(-). Túnel "El Sinaloense", excavación de media sección en 2 etapas, se observa el avance en hastiales y el piloto central.....	44
FOTOGRAFÍA III. 9. Ejemplo de condición D(+). Túnel "El Sinaloense" portal Mazatlán, roca de calidad mala-regular, Clase IV.....	46
FOTOGRAFÍA III. 10. Ejemplo de condición D(-). Túnel "El Sinaloense" portal Mazatlán.....	48
FOTOGRAFÍA III. 11. Ejemplo de condición E. Túnel "El Sinaloense" portal Durango. Avance en dos fases hastiales y piloto central.....	50
FOTOGRAFÍA III. 12. Concreto lanzado en interior de túnel "El Sinaloense" portal Mazatlán.....	54
FOTOGRAFÍA III. 13. Barrenación de anclaje para sostenimiento C.....	57
FOTOGRAFÍA III. 14. Colocación de marcos metálicos, se observa la colocación en secciones.....	58
FOTOGRAFÍA III. 15. Enfilaje colocados en el túnel "El Sinaloense" portal Durango.....	60
FOTOGRAFÍA IV. 1. Tratamiento en talud, concreto reforzado con malla electrosoldada.....	63
FOTOGRAFÍA IV. 2. Barrenación de anclas en portal.....	64
FOTOGRAFÍA IV. 3. Anclas de tensión túnel Cerro Santa Lucia.....	65
FOTOGRAFÍA IV. 4. Portal Durango túnel "El Sinaloense".....	67
FOTOGRAFÍA IV. 5. Portal Mazatlán túnel "El Sinaloense".....	68
FOTOGRAFÍA IV. 6. Enfilaje (paraguas) en inicio de excavación.....	70
FOTOGRAFÍA IV. 7. Inicio de excavación con medios mecánicos, en portal Durango del túnel "El Sinaloense".....	71
FOTOGRAFÍA IV. 8. Ventilación del túnel, gases tóxicos derivados de voladura y equipos de trabajo....	72
FOTOGRAFÍA IV. 9. Equipo que se utiliza para lanzar concreto.....	74
FOTOGRAFÍA IV. 10. Anclas radiales. Interior del túnel "El Sinaloense".....	75
FOTOGRAFÍA IV. 11. Trabes suecas. Túnel "El Sinaloense" portal Mazatlán.....	76
FOTOGRAFÍA IV. 12. Barrenación para enfilaje en túnel "El Sinaloense" portal Durango.....	77
FOTOGRAFÍA IV. 13. Banqueo al fondo se observa un track drill, con éste equipo se realiza la barrenación.....	78
FOTOGRAFÍA IV. 14. Colocación de patas en banqueo.....	78
FOTOGRAFÍA IV. 15. Colocación de geotextil y geomembrana (Impermeabilización).....	79
FOTOGRAFÍA IV. 16. Revestimiento definitivo, construcción de zapata y guarnición.....	80
FOTOGRAFÍA IV. 17. Construcción de revestimiento definitivo en cuerpo de túnel.....	80
FOTOGRAFÍA IV. 18. Construcción de túnel falso.....	80
FOTOGRAFÍA IV. 19. Colocación de concreto hidráulico en pavimentación.....	81
FOTOGRAFÍA IV. 20. Equipos de seguridad; contra incendios, iluminación, cámaras de video.....	82
FOTOGRAFÍA IV. 21. Equipos de ventilación.....	82
FOTOGRAFÍA IV. 22. Equipos de ventilación y señalamiento.....	82
FOTOGRAFIA V. 1. Caído en el kilómetro 668+801, Portal Durango.....	101
FOTOGRAFIA V. 2. Trabajos realizados para estabilizar la zona de caído.....	101
FOTOGRAFIA V. 3. Se observa sobreexcavación derivados de pequeñas cuñas en la clave.....	102

INDICE DE TABLAS.

TABLA II. 1. Condiciones geotécnicas.....	12
TABLA II. 2. Tabla de sostenimientos.....	13
TABLA III. 1. Estimación aproximada y clasificación de la resistencia a compresión simple de suelos y rocas a partir de índices de campo, ISRM 1981 (González-Vallejo Luis, 2006).....	14
TABLA III. 2. (Bieniawski, 1989).....	18
TABLA III. 3. Clasificación de Terzaghi 1946 (Bieniawski, 1989).....	20
TABLA III. 4. Comparación de RQD (Bieniawski, 1989).	22
TABLA III.5. Wickham, Tiedemann and Skinner (Bieniawski, 1989).....	24
TABLA III. 6. Parámetros para obtener el RMR de un macizo rocoso (Bieniawski, 1989).....	25
TABLA III. 7. Sostenimiento primario (bieniawski, 1989).....	26
TABLA III. 8. Q de Barton (González-Vallejo Luis, 2006).....	29
TABLA III. 9. Parámetros del ISRM, (González-Vallejo Luis, 2006).....	30
TABLA III. 10. Parámetros del SRC (González-Vallejo Luis, 2006).....	31
TABLA III. 11. Clasificación de Hoek, (Gianfranco).....	33
TABLA III. 12. Clasificación modificada de Bieniawski (Manuel Romana Ruiz, 2000).....	34
TABLA III. 13. Valores y estimaciones de los parámetros de MRi de Palmström (2000).....	36
TABLA IV. 1. Tabla de sostenimientos para la excavación en interior de túnel.....	73

CAPÍTULO I. **GENERALIDADES**

I.1 Reseña histórica.

La construcción de un túnel inicia de la necesidad de superar un obstáculo natural, generalmente zonas montañosas. También se utiliza para dirigir el curso de agua fluvial o marinas. En zonas urbanas densamente edificadas se necesitan; túneles para vehículos, ferrocarriles, suburbanos, pasos peatonales, abastecimiento de agua, saneamiento, etc.

Los túneles tienen su origen en la minería, donde se desarrollan los métodos y técnicas de excavación y se implementan los primeros elementos para su sostenimiento. El primer método de construcción fue la técnica del fuego, consiste en provocar un incendio en el frente de ataque y sofocarlo bruscamente con agua fría produciendo un brusco gradiente térmico, dando lugar al resquebrajamiento de la roca. En el siglo XIV se utiliza por primera vez la pólvora para la construcción de un túnel. A partir del siglo XIX, los túneles tuvieron gran auge, tras el desarrollo en la construcción de túneles ferroviarios, donde se incorporó progresivamente maquinaria y diversos procedimientos constructivos.

La ingeniería de túneles ha progresado de forma significativa durante el siglo XX y lo que llevamos del XXI. Entre los principales factores que han contribuido decisivamente a este avance se encuentra los explosivos, y la introducción de nuevos equipamientos y maquinaria, las que entran dependiendo de las características del terreno, como son las rozadoras o tuneladoras de ataque puntual, escudos, jumbos, hidrotracks, etc. Los avances en materia de revestimientos son principalmente en concreto estructural y acero de refuerzo, con respecto al terreno, mediante inyecciones a presión, así como el perfeccionamiento de máquinas tuneladoras a sección completa.

I.2. Ubicación del proyecto autopista Durango-Mazatlán.

La autopista Durango-Mazatlán forma parte del corredor Mazatlán-Matamoros, tiene 230 km de longitud y tiene 12 metros de ancho de corona para alojar dos carriles de circulación, destacando del km 156 al km 164 que es de cuatro carriles. Ésta autopista cuenta con 63 túneles, el más largo de ellos "El Sinaloense", de 2,794 metros, así como 115 puentes con longitudes que van desde los 15 a los 1,124 metros.

La estructura más destacada de la autopista es el Puente Baluarte, es el atirantado más largo de América Latina. Se encuentra en el cruce de la autopista con el Río Baluarte, en el límite de los estados de Durango y Sinaloa. El puente Baluarte tiene una longitud de 1,124 metros y una altura sobre la barranca de 394 metros.



FIGURA I. 1. Corredor Matamoros-Mazatlán.

La autopista Durango-Mazatlán se dividió en 5 tramos para su construcción. El tramo I se ubica en el estado de Durango con 22 túneles con un total de 7,387 metros y 13 puentes. El puente Baluarte no está asignado a ninguno de los tramos puesto que es una obra especial. Los tramos II, III, IV y V se encuentran en el estado de Sinaloa, el tramo II con 14 túneles 4,490 metros y 11 puentes, el tramo III con 16 túneles 5,455 metros y 14 puentes, el tramo IV con 6 túneles 1,212 metros, y 6 puentes. El tramo V comprende terracerías y 7 puentes que llegan a la Cd. de Villa Unión.

I.3. Localización del túnel “El Sinaloense”.

El túnel “El Sinaloense” objetivo de éste trabajo se localiza en el estado de Sinaloa en el denominado tramo III.

El tramo III consiste en la construcción de 14.57 km de carretera con sección de 12.00 metros de ancho de corona para alojar 2 carriles de circulación de 3.5 metros cada uno y dos acotamientos laterales de 2.5 metros cada uno. La obra inicia en el km 168+400 y termina en el km 186+300, incluye la construcción de 16 túneles y 13 puentes, siendo los más representativos el túnel “El Sinaloense” con 2,794 metros y los puentes “Santa Lucia” y “El Nacara” con 375 metros de longitud cada uno.

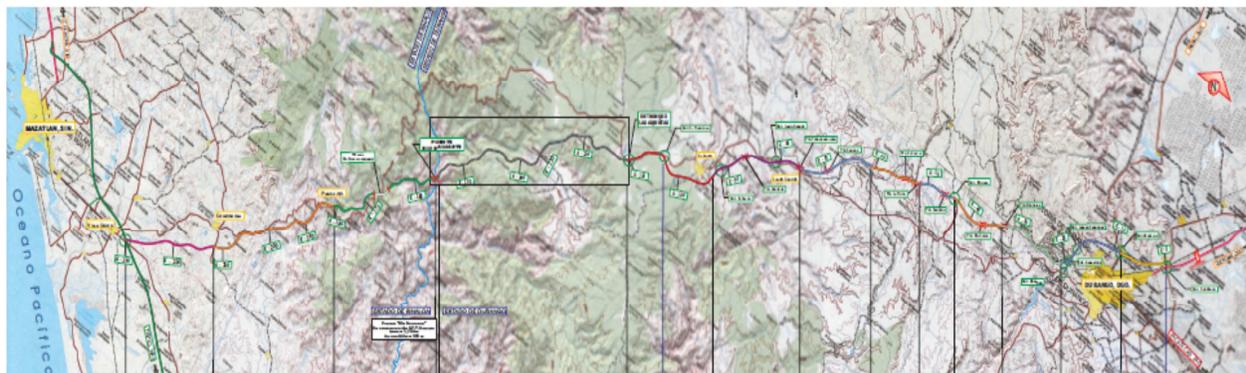


FIGURA I. 2. Autopista Durango – Mazatlán.

I.4. Vías de comunicación.

De la Cd. de Mazatlán, al tramo III se tiene acceso por la carretera México 15 hasta Villa Unión donde entronca con la carretera México 15, México 40 y la autopista a Nayarit. Utilizando la carretera federal México 40, en el km 240 se encuentra la comunidad de La Guayanera, por un camino de terracería se llega al km 186+300 siendo éste el termino del tramo III y el inicio del tramo IV, por éste camino se tiene acceso a los túneles Real de Pánuco, Panuco II y Pánuco. En el km 234 de la carretera México 40 se encuentra el acceso denominado El Nacaral, por ésta terracería se tiene acceso a los túneles, Las Palomas, El Nacaral y Las mesas. En el km 231 de la México 40 se encuentra la comunidad de Santa Lucia, lugar de acceso a los túneles Santa Lucia I, Santa Lucia II, Cerro Reforma, Cerro Santa Lucia y Roblar de la Cueva. En el km 227 se encuentra acceso a los túneles Chirimollos y La Mina. En el km 227 se encuentra el acceso a los túneles Corte Alto, Trópico de Cáncer y el portal Mazatlán del túnel “El Sinaloense”. En el km 218 se encuentra el acceso a la comunidad de El Batel, que se utilizó como camino de acceso al portal Durango del túnel “El Sinaloense”, el cual se encuentra a 6 km de la carretera.

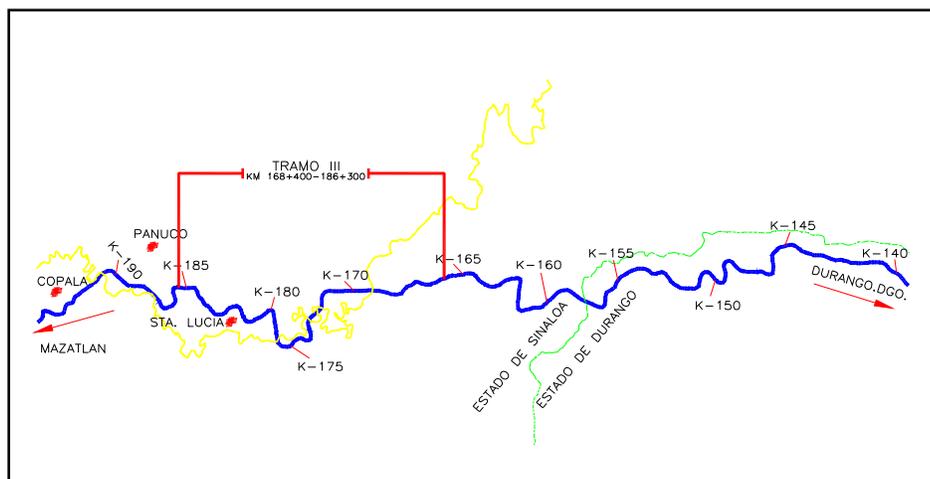


FIGURA I. 3. Ubicación de Tramo III.

I.5. Fisiografía.

El tramo III se ubica dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, dentro de la subprovincia, mesetas y cañadas del sur.

Provincia de la Sierra Madre Occidental.

La provincia de la Sierra Madre Occidental se inicia prácticamente en la frontera con Estados Unidos, dentro de los cuales tiene una muy pequeña penetración y se extiende de NW a SE hasta sus límites en el sur de la provincia del Eje Neovolcánico. Hacia el oeste limita con la provincia del Desierto Sonorense y de la Llanura Costera del Pacífico, y hacia el este con la provincia de Sierras y Bolsones, la extensión occidental de la Sierra Madre Oriental y la Mesa Central.

Abarca parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes y Jalisco. Es un gran sistema montañoso que tiene sus orígenes en el terciario inferior o medio, cuando se inició la extrusión en escala colosal de los materiales volcánicos que lo integran cuyos espesores oscilan entre 1 500 y 1 800 m. Predominan rocas ácidas (altas con sílice) e intermedias (medias en sílice). La sierra, que se levanta hasta los 2 500 o 3 000 m.s.n.m.; presenta, hacia el occidente, una importante escarpa, en tanto que hacia el oriente va bajando gradualmente a las regiones llanas del centro. En esta franja oriental se tienen cadenas y valles de orientación NE-SW, producto de los fallamientos que acompañaron a los procesos de levantamiento del Pleistoceno. Sobre el dorso central de la sierra los materiales volcánicos se encuentran en amplios mantos tendidos que dan conformación a las elevadas mesetas que son típicas de la provincia. Una particular conjunción de actividad tectónica, rasgos litológicos, distribución de fracturas y procesos erosivos hídricos propició la excavación de profundísimos cañones cuyos ejemplos más espectaculares se dan sobre las vertientes occidentales de la sierra.

La provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental (SMO) es la acumulación más grande de ignimbritas silíceas hasta ahora conocida en la Tierra. Sus afloramientos se extienden de manera casi continua por más de 1200 km, desde la frontera México-Estados Unidos hasta la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), cubriendo una superficie de ~300,000 km². Durante el Mioceno, antes de la apertura del Golfo de California y del inicio de la actividad del FVTM, que la disgregaron y sepultaron parcialmente, la provincia magmática de la SMO debió ser considerablemente más extensa y estar unida a la provincia volcánica de Baja California.

I.6. Geomorfología.

Las diversas formas del terreno encontradas en el Estado de Sinaloa son el resultado, por un lado, del tipo de rocas existentes, del clima y la vegetación parámetros que han contribuido por medio de los agentes erosivos a modelar el paisaje que se observa en el territorio. Esta morfología ha regido de manera importante el desarrollo de la actividad económica, social y cultural de la entidad.

I.7. Clima.

En las alturas del extremo norte de la provincia imperan climas secos y semisecos que van, según la elevación, de cálidos a semicálidos, propios estos últimos de los profundos cañones. Los flancos de la sierra presentan condiciones semisecas cálidas y semicálidas en el NW, y subhúmedas cálidas y semicálidas en el centro y SW. Sobre los declives occidentales, el clima varía de subhúmedo a semiseco cálido y semicálido.

I.8. Geología general.

El túnel “El Sinaloense” se encuentra ubicado dentro de la provincia geológica: Faja Ignimbrítica Mexicana, de edad Cenozoico, de origen volcánico y de ambiente geotectónico de arco continental. (F. Ortega, 1992)

Los eventos geológicos más importantes en la región han sido volcanismo y fallamiento. La actividad magmática asociada a la subducción dio origen a la extensa y voluminosa Sierra Madre Occidental (SMO). Conforme cesó la subducción gradualmente, inició el magmatismo intraplaca en la región situada al este de la SMO y una combinación de volcanismo alcalino y toleítico en la región del Golfo de California.

El fallamiento normal formó el extremo meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras. En muchos sitios el volcanismo y fallamiento fueron simultáneos o el inicio del fallamiento siguió después de un lapso breve al del volcanismo. Ambos fenómenos sucedieron en toda la región en al menos cuatro puntos de actividad 32-27 Ma, 24-20 Ma, 12-10 Ma, < 5 Ma. Sin embargo, la intensidad y carácter de estos pulsos variaron de manera sistemática de un lugar a otro. Así, el frente del volcanismo voluminoso asociado a subducción y el fallamiento normal intenso se desplazaron de NE a SW y fueron reemplazados hacia el interior del continente por actividad alcalina intraplaca y por extensión de menor magnitud.

Los magmas dominantes félsicos de la SMO pudieron generarse por fusión parcial de la corteza, o por cristalización fraccionada de magmas provenientes del manto y asimilación simultánea de material cortical.

Una de las controversias acerca de la provincia volcánica de la SMO se centra en la fuente de los magmas que dieron origen al supergrupo volcánico superior, compuesto por una suite basalto-andesita-riolita. La composición silícica dominante de la suite, su espesor medio (~1km) y contenido isotópico (Nd-Sr), similar al de algunos de los xenólitos corticales del centro y norte de México, hacen atractivo considerar a estos magmas como productos de fusión parcial de la corteza, posiblemente causada por emplazamiento de un volumen similar de magmas basálticos provenientes del manto. (ARANDA-GOMEZ, 2000)

Ferrari 2005, define la estratigrafía de la SMO como cinco conjuntos ígneos principales; (1) rocas plutónicas y volcánicas del Cretácico Superior-Paleoceno y (2) rocas volcánicas andesíticas y en menor medida, dacítico-riolíticas del Eoceno, tradicionalmente agrupadas en el denominado “Complejo volcánico Inferior” (CVI); (3) ignimbritas silícicas emplazadas en su mayoría en dos pulsos, en el Oligoceno temprano (32-28 Ma) y en el Mioceno temprano (24-20 Ma) y agrupadas en el Supergrupo Volcánico superior; (4) coladas basáltico-andesíticas transicionales extravasadas después de cada pulso ignimbritico, correlacionadas con las “andesitas-basálticas del sur de la Cordillera” (SCORBA), (5) volcanismo postsubducción constituido por coladas de basaltos alcalinos e ignimbritas emplazados en diferentes episodios del Mioceno tardío, Plioceno y Cuaternario. Los estudios geoquímicos y petrológicos indican que las rocas de la SMO forman un conjunto típicamente calco-alcalino, caracterizado por concentraciones de potasio intermedias a altas y enriquecimiento relativamente bajo en Fe. El volcanismo del Eoceno tardío al Mioceno es claramente bimodal con los miembros silícicos dominantes sobre los máficos.

Por una parte las ignimbritas silícicas se han relacionado a un proceso de cristalización fraccionada de magmas máficos del manto con poca o nula intervención de la corteza; por otra parte, se ha considerado que estas rocas son en gran medida el resultado de fusión parcial de la corteza calentada por el arribo de basaltos del manto.

Los datos geofísicos indican la presencia de una corteza que alcanza los 55 km de espesor en el núcleo relativamente no extendido de la parte norte de la SMO, mientras que más al este el espesor es de ~40 km. El espesor anómalo de la parte central de la SMO sugiere la presencia de una corteza inferior fuertemente intrusionada por magmas máficos.

I.9. SISMICIDAD

La República Mexicana se encuentra dividida en cuatro zonas sísmicas. Esto se realizó con fines de diseño antisísmico. Para realizar esta división (Figura I.4) se utilizaron los catálogos de sismos de la República Mexicana desde inicios de siglo, grandes sismos que aparecen en los registros históricos y los registros de aceleración del suelo de algunos de los grandes temblores ocurridos en este siglo. Estas zonas son un reflejo de que tan frecuentes son los sismos en las diversas regiones y la máxima aceleración del suelo a esperar durante un siglo. La zona A es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores. La zona D es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad. Las otras dos zonas (B y C) son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo



FIGURA I. 4. Zonas sísmicas de la República Mexicana.

CAPÍTULO II. ESTUDIOS GEOLÓGICOS

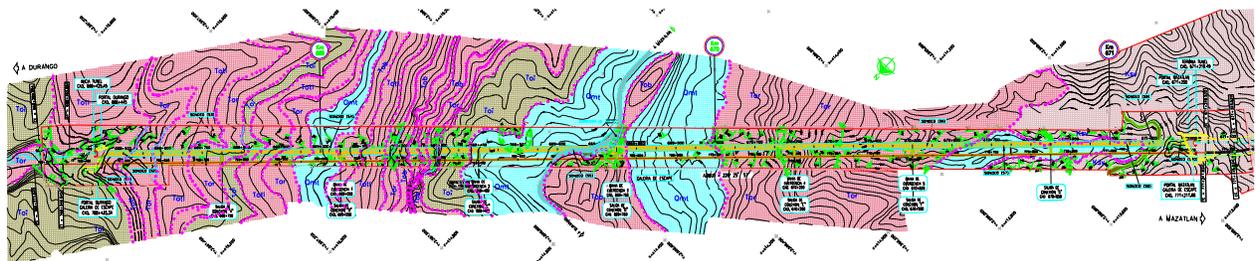
II. Geología del túnel “EL SINALOENSE”.

Se realizó el levantamiento geológico superficial de la zona adyacente al túnel. Se efectuaron barrenos de exploración, los cuales fueron de ayuda para determinar los cambios de litología, estructuras principales (fallas, fracturas, discontinuidades, etc.).

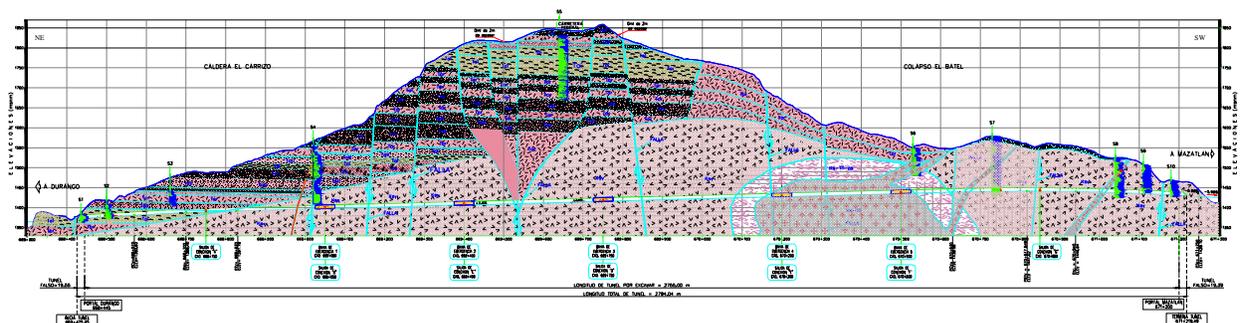
Los trabajos los llevo a cabo la empresa proyectista y observó la siguiente litología.

- Depósitos de talud (Omt). Capas de boleos y arenas de suelos residuales.
- Ignimbrita (Toi) de textura fluidal con estructura brechoide, abundantes fragmentos de roca de distinta composición y tamaños; su porosidad es baja a moderada y presenta abundantes microfracturas selladas.
- Riolita (Tor) textura porfídica; se observan fenocristales de feldespatos, cuarzo y en menor proporción hornblenda y biotita, en una matriz afanítica.
- Toba brechoide o brecha riolítica (Tob). De estructura brechoide y textura piroclástica, en ocasiones ligeramente fluidal, compuesta principalmente por fragmento líticos de riolita. La fracción fina está constituida por cenizas volcánicas consolidadas.
- Toba lítica (Tol). De estructura piroclástica constituida por cenizas volcánicas y lapilli consolidados, con fragmentos angulosos y subangulosos de riolita, andesita, ignimbrita y pumita de distintos tamaños casi totalmente asimilados y también por cristales de feldespato, cuarzo y minerales ferromagnesianos alterados.
- Andesita (Kvs) color verdoso, textura porfídica con matriz afanítica a localmente vítrea, con fenocristales de plagiocasa, hornblenda y otros ferromagnesianos.
- Andesita (Ks-tii-as) de color rojizo alterada por fluidos asociados con calor y presión aportados por los cuerpos intrusivos
- Granito(Ks-Tii). Cuerpos batolíticos de composición granítica. Éste cuerpo fue cortado al termino de los eventos por cuerpos filonianos graníticos y aplíticos. La roca plutónica fue detectada y delimitada mediante los estudios geofísicos.

El PLANO II.1 presenta la topografía y la geología superficial en la zona del túnel, se encuentra bien definida la zona de depósito de talud (azul), ignimbrita (gris) y riolitas (rosas). El PLANO II.2 se muestra el perfil geológico, se observa el cuerpo de granito que fue definido por datos geofísicos, así como la interpretación derivada en superficie.



PLANO II. 1. Planta geológica



UNIDADES LITOLOGICAS			
	Omt		Ksv
	Toi		Ks-Tii-as
	Tor		Ks-Tii
	Tob		
	Totl		

PLANO II. 2 Perfil geológico

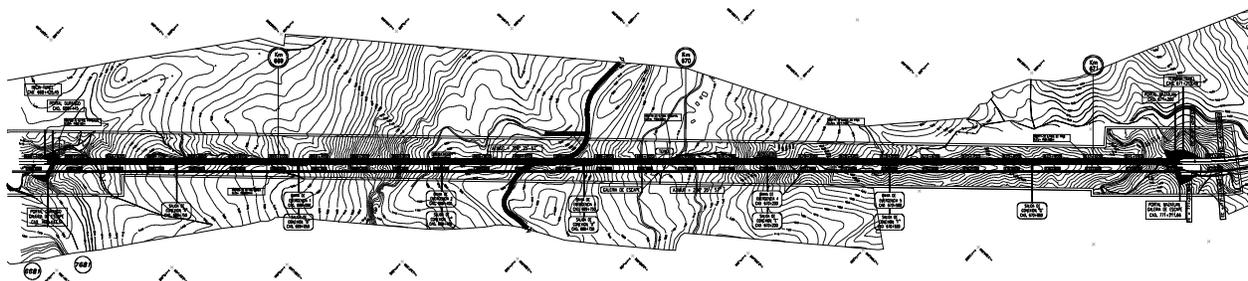
II.1 Estudios previos.

Para tener una visión de la zona donde se realizara la excavación es necesario llevar a cabo una serie de estudios previos como los siguientes; topografía, geología, geofísica y geotecnia; que son fundamentales para adecuar e iniciar la construcción de los caminos de acceso y posteriormente excavar los túneles.

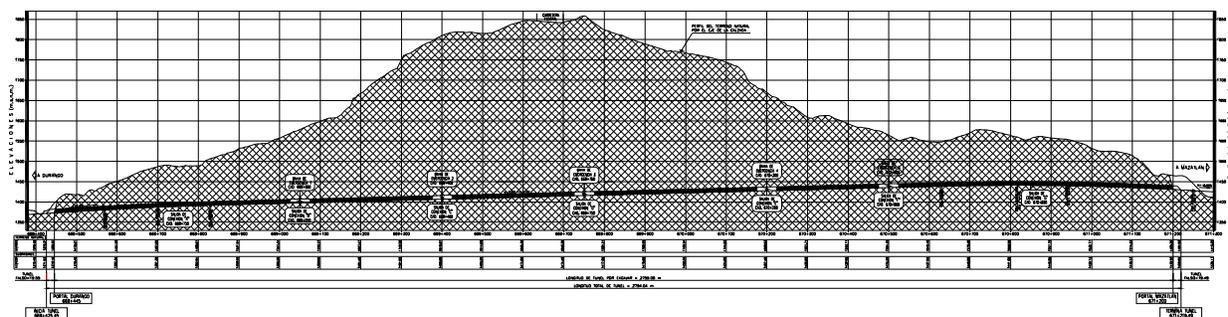
Topografía del túnel “EL SINALOENSE”.

La topografía es una herramienta básica para toda construcción, en el caso de los túneles, se utiliza para la ubicación exacta del túnel, para marcar el inicio del portal, excavación del portal, inicio de túnel, dirección e inclinación del eje carretero y del túnel, PLANO II.3 y PLANO II.4.

Durante el proceso de excavación, además la topografía nos sirve para revisar las deformaciones del macizo rocoso en caso de existir (medidas de convergencia, extensometría) y tomar medidas de prevención en caso de existir movimiento en el interior y exterior del túnel (por ejemplo; los portales).



PLANO II. 3. Planta topográfica.



PLANO II. 4. Perfil topográfico.

Geofísica del proyecto túnel “EL SINALOENSE”.

La geofísica nos ayuda a tener una visión de lo que podemos encontrar en el subsuelo, cambios litológicos, estructurales, etc. En la zona del túnel se aplicó el método eléctrico y sísmico, el PLANO II.5 presenta las cuatro unidades geoelectricas determinadas, datos que sugieren la presencia del granito. Se determina 3 unidades geosísmicas que sugieren el grado de fracturamiento de la roca, PLANO II.6.

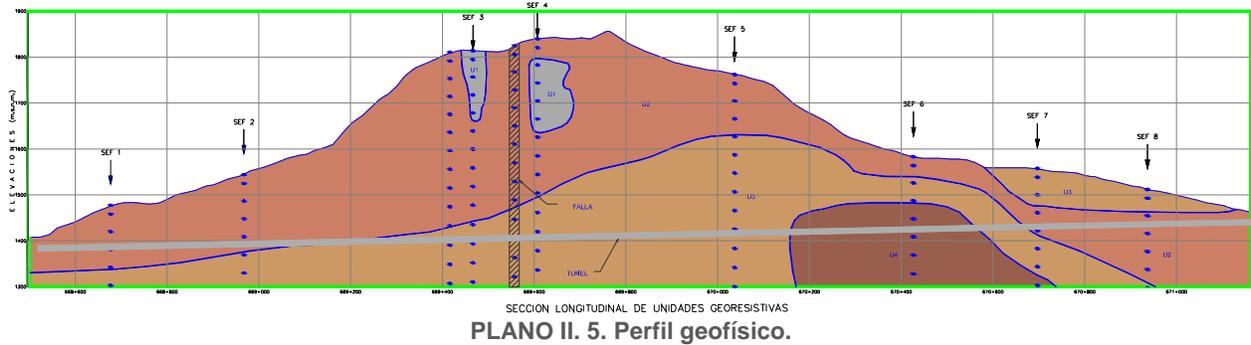
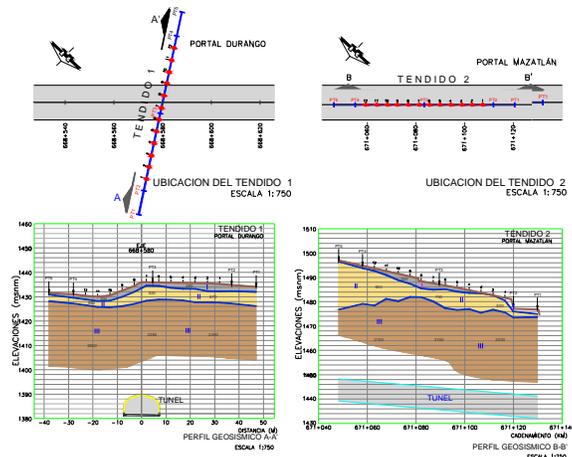


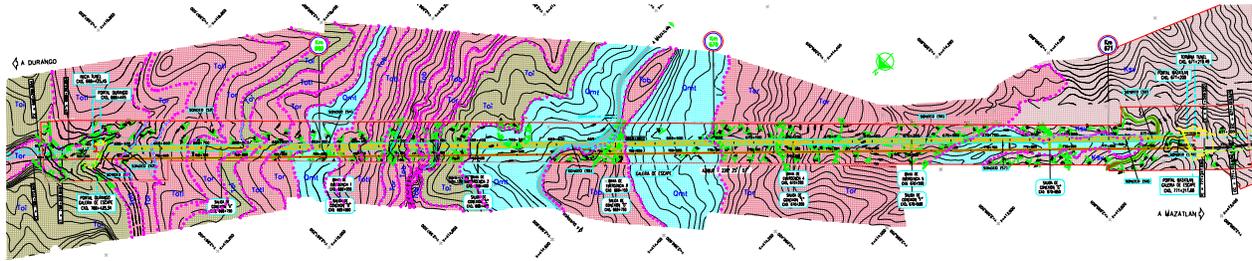
TABLA DE UNIDADES GEOELECTRICAS		
UNIDAD	RESISTIVIDAD ohm-m	MATERIAL ASOCIADO
U1	30-40	ROCA TOBACEA FRACTURADA Y ALTERADA
U2	40-200	ROCA FRACTURADA
U3	200-400	ROCA POCO FRACTURADA
U4	400-800	ROCA MUY POCO FRACTURADA

TABLA DE UNIDADES GEOSISMICAS			
UNIDAD	VELOCIDAD m/seg	ESPESOR (m)	MATERIAL ASOCIADO
I	250-300	0.1-3.0	DEPOSITO DE TALUD O SUELO RESIDUAL POCO COMPACTO Y/O ROCA MUY FRACTURADA Y MUY ALTERADA
II	650-870	1.20-19.50	ROCA FRACTURADA Y LIGERAMENTE ALTERADA, MEDIANAMENTE COMPACTA A COMPACTA
III	2100-2450	INDEFINIDO	ROCA FRACTURADA COMPACTA

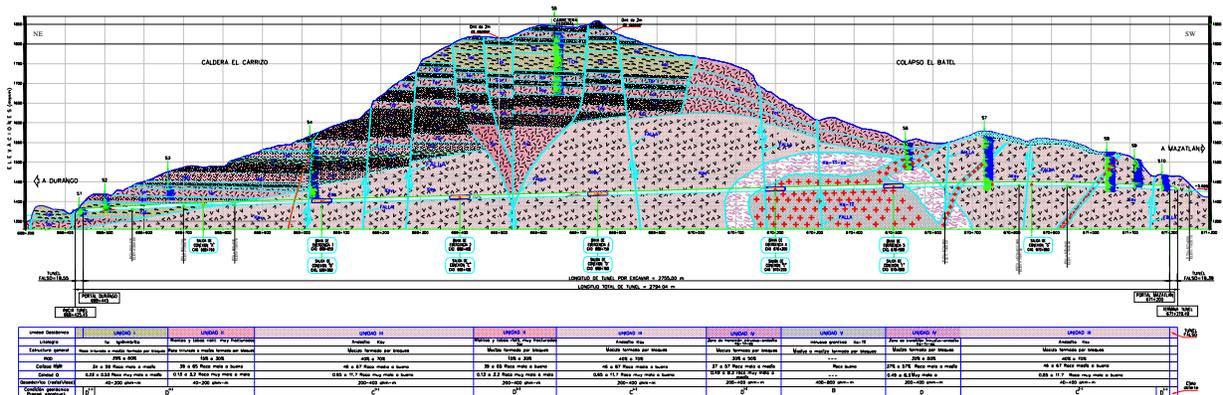


Geotecnia del proyecto túnel “EL SINALOENSE”.

Con los datos topográficos, geológicos y geofísicos se realizó un plano geotécnico, en el cual se expuso las diferentes condiciones geotécnicas del material rocoso a lo largo de los 2,974 metros de túnel. En el PLANO II.7 y II.8 se observan las unidades geotécnicas que se determinaron con los estudios preliminares.



PLANO II. 7. Planta geotécnica.



PLANO II. 8. Perfil geotécnico del túnel.

Para determinar la condición geotécnica de la roca se utiliza los parámetros definidos por Bieniawski 1989, para el RMR. Con los datos de RMR se establece la TABLA II.1 de condiciones geotécnicas exclusiva para el túnel “El Sinaloense” donde se utilizan las clasificaciones de Bieniawski 1989 y Romana 2001, la combinación de estas clasificaciones se realizó para mejorar el sistema de sostenimiento en las zonas complejas.

CONDICIÓN GEOTÉCNICA	RMR	
A	≥ 81 Roca muy buena	(BIENIAWSKI, 1989)
B	61 a 80 Roca buena	(BIENIAWSKI, 1989)
C(+)	51 a 60 Roca de regular a buena	(ROMANA, 2001)
C(-)	41 a 50 Roca regular	(ROMANA, 2001)
D(+)	31 a 40 Roca mala a regular	(ROMANA, 2001)
D(-)	21 a 30 Roca mala a muy mala	(ROMANA, 2001)
E	≤20 Roca muy mala	(BIENIAWSKI, 1989)

TABLA II. 1. Condiciones geotécnicas.

De acuerdo a los estudios previos, se determinó utilizar cuatro elementos principales para el sostenimiento. Para la roca de buena calidad se utiliza concreto lanzado reforzado con fibras de acero, con espesores variables dependiendo de las condiciones de la roca. Para las zonas con fracturamiento se utiliza anclas pasivas de fricción con un patrón de separación a 2.5, 2.0 y 1.5 metros. Para rocas de mala calidad se utilizan marcos metálicos a diferentes distancias de separación y enfilaje. En la TABLA II.2 se expone el tipo de sostenimiento para cada condición geotécnica.

Procedimientos constructivos.

Condición geotécnica	No. De etapas de excavación	Anclas pasivas de fricción	Concreto lanzado (e)	Marcos metálicos(s)	Enfilaje frontal
A	1(m,s,s); 1(b)	P	5	-	-
B	1(m,s,s);1(b)	S(2.5x2.5m)	10	-	-
C ⁽⁺⁾	2(m,s,s);2(b)	S(2.0x2.0m)	10	-	-
C ⁽⁻⁾	2(m,s,s);2(b)	S(1.5x1.5m)	15	-	-
D ⁽⁺⁾	2(m,s,s);2(b)	-	15	1.2m	-
D ⁽⁻⁾	2(m,s,s);2(b)	-	15	0.8m	-
E	1(m,s,s);2(b)	-	10	1.0m	Si

m.s.s.= media sección superior; b=banqueo; S=patrón sistemático; p=puntuales, e=espesor (cm); s =separación(m)

TABLA II. 2. Tabla de sostenimientos.

CAPÍTULO III ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

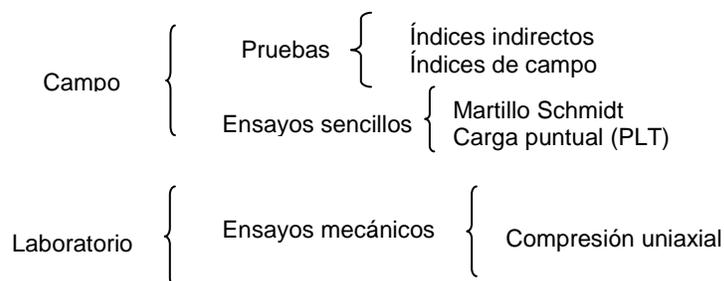
III.1. Condiciones geológicas.

El trabajo de reconocimiento geológico inicia con la descripción de la litología del frente de excavación, donde se describe: el tipo de roca, color, textura, mineralogía, descripción estructural (discontinuidades, estratificación y plegamiento), indicando el rumbo y echado, otro factor importante es la presencia de agua, las condiciones y zonas donde se presenta. Estos parámetros determinan el RMR y nos indica la condición geotécnica de la roca. En seguida se hace una descripción del trabajo realizado en campo para determinar el RMR.

Resistencia de la matriz rocosa.

La resistencia de la matriz rocosa influye de forma decisiva en el método de excavación, y es un factor importante en la estabilidad de la misma. Éste parámetro se puede determinar en campo y en laboratorio.

Métodos para determinar la resistencia a la compresión simple:



Para el valor de la resistencia de la matriz rocosa se aplicó los índices de campo del ISRM, los que se muestran a continuación en la tabla de valores.

Clase	Descripción	Identificación de campo	Resistencia a la compresión (MPa)
S1	Suelo muy blando	El puño penetra fácilmente varios centímetros.	< 0,0025
S2	Suelo blando	El dedo penetra fácilmente varios centímetros.	0,0025 – 0,05
S3	Suelo firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo.	0,05 – 0,10
S4	Suelo rígido	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo.	0,10 – 0,25
S5	Suelo muy rígido	Con cierta presión puede marcarse con la uña.	0,25 – 0,50
S6	Suelo duro	Se marca con dificultad al presionar con la uña.	> 0,50
R0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25 – 1,0
R1	Roca muy blanda	Al golpear con la punta del martillo la roca sedesmenuza. Con navaja se talla fácilmente.	1,0 – 5,0
R2	Roca blanda	Al golpear con la punta del martillo se producen ligeras marcas. Con la navaja se talla con dificultad.	5,0 – 25
R3	Roca moderadamente dura	Con un golpe fuerte del martillo puede fracturarse. Con la navaja no puede tallarse.	25 – 50
R4	Roca dura	Se requiere más de un golpe del martillo para fracturarla.	50 – 100
R5	Roca muy dura	Se requiere muchos golpes del martillo para fracturarla.	100 – 250
R6	Roca extremadamente dura	Al golpear con el martillo sólo saltan esquirlas.	> 250

TABLA III. 1. Estimación aproximada y clasificación de la resistencia a compresión simple de suelos y rocas a partir de índices de campo, ISRM 1981 (GONZALEZ-VALLEJO LUIS, 2006).

Índice de la calidad de la roca. RQD (%).

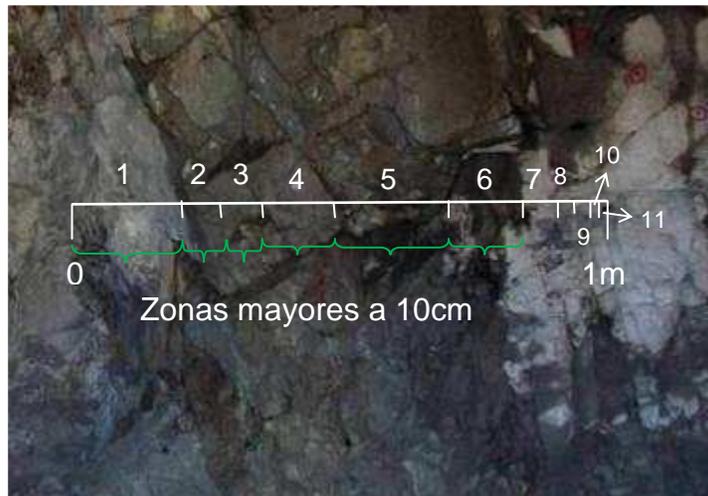
Con la metodología de Deree, se realiza la cuantificación para obtener el índice de calidad de la roca RQD, ésta metodología se aplica a los núcleos de perforación exploratorios. Cuando nose dispone de núcleos de perforación, se estima el RQD por la cantidad de fisuras contenidas en la unidad de volumen, la cantidad de juntas por metro cúbico, en cada sistema de juntas se suman. Se utiliza la relación:

$$RQD= 115-3.3J_v$$

Donde J_v : es la cantidad total de juntas o fisuras por m^3 .

Ésta relación fue utilizada para determinar el RQD durante la excavación ya que no se cuenta con sondeos para cada frente (FOTOGRAFIA III.1 Solo se observa el conteo de fisuras en una sola dirección del cubo). Con el valor del RQD se determina la calidad en la siguiente tabla:

RQD	CALIDAD
100-90 %	Muy buena
90-75 %	Buena
75-50%	Media
50-25%	Mala
<25%	Muy mala



FOTOGRAFIA III. 1. Metodología para cálculo de RQD.

Separación entre diaclasas.

Se determina las condiciones de las diaclasas midiendo directamente la separación entre ellas, se realiza un reconocimiento de cada una de las familias de diaclasas, sobre todo las que afectan directamente la clave, para confirmar la formación bloques, cuñas, o factores que puedan afectar la clave y así prevenir la sobrexcaación o en casos fatales colapsos en el túnel.

De igual manera se realiza un reconocimiento de las fallas o discontinuidades que existen en el frente y afectan de manera directa o indirecta la excavación.



FOTOGRAFIA III. 2. Túnel “El Sinaloense”, caído de origen estructural, causado por pseudoestratificación y diaclasas.

Estado de las discontinuidades.

Para determinar éste parámetro se analiza; la longitud de las discontinuidades, abertura, rugosidad, relleno y alteración(FIGURA III.1).

La mayoría de los problemas de inestabilidad se deben a la intersección de la sección del túnel con planos de discontinuidad(FOTOGRAFIA III.3). Se distinguen las discontinuidades de tipo sistemático y las de tipo singular. Las diaclasas, planos de estratificación y de esquistosidad pertenecen al primer grupo, y están presentes prácticamente en todas las rocas, con mayor incidencia en zonas poco profundas, donde los procesos de meteorización y circulación de agua y los rellenos arcillosos son más frecuentes. A grandes profundidades la presión confinante hace que la apertura de las discontinuidades sea menor, pudiendo llegar a estar muy cerradas.

Sin embargo, las discontinuidades más importantes bajo el punto de vista de la estabilidad son las de tipo singular, como las fallas; al estar sometidas estas estructuras a roturas y deformaciones a lo largo de su historia geológica, su resistencia es muy baja, presentando rellenos miloníticos en el plano de falla que además de tener baja resistencia pueden constituir vías preferentes para la circulación de agua. Por otro lado, las fallas suelen acumular tensiones tectónicas importantes.

El estudio de las fallas y discontinuidades singulares es uno de los aspectos geológicos más importantes en un túnel. Para dicho estudio se requiere:

- Conocer la estructura tectónica regional y local.
- Cartografía geológica y análisis estructural.
- Identificación de fallas y su clasificación en función del origen, edad, tipo y geometría.
- Identificación de rellenos de falla, su resistencia y expansividad.
- Conocer la transmisibilidad hidráulica.
- Estudios sobre las implicaciones tensionales y sobre sismicidad.



FIGURA III. 1. Estado de discontinuidades. (GONZALEZ-VALLEJO LUIS, 2006)



FOTOGRAFIA III. 3. Ejemplo del estado de las discontinuidades.

Agua freática.

Para determinar éste parámetro, se analiza el lugar donde tiene salida el líquido el caudal, la presión y el estado general del frente de excavación. Para dirigir el caudal de agua en (FOTOGRAFIA III.4), éste caso, se colocan drenes temporales, que permitan continuar con el avance,



FOTOGRAFIA III. 4. Salida puntual de agua en clave.

Corrección por orientación de diaclasas.

Orientación de las discontinuidades respecto a la excavación, se determina con la siguiente tabla:

Dirección y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Medias	Desfavorable	Muydefavorable
Valoraciónpara	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-2	-25	-50	-60

TABLA III. 2. (Bieniawski, 1989)

Una vez que se han obtenido los datos de la orientación de las discontinuidades respecto a la excavación se obtiene el RMR corregido, el cual nos permite saber la condición geotécnica de la roca y determinar el sostenimiento primario adecuado para el túnel.

RMR – Corrección por orientación de diaclasas= RMR de sostenimiento

Con el RMR se tiene la condición geotécnica de la roca y a su vez el sostenimiento primario (revestimiento) que se realizará en el interior del túnel.

III.2. Clasificaciones geomecánicas.

Las clasificaciones geomecánicas permiten dividir el macizo en zonas diversas, cada una de ellas representada por un índice de calidad que sirve para definir un tipo de acciones con respecto a la obra a realizar. Son de gran utilidad en problemas contractuales, ya que la compartimentación del macizo en diversas zonas hace que estas puedan ser abordadas de forma distinta a efectos de contratación. Se trata de un punto de partida previo modificable a lo largo del desarrollo de la obra. Aunque sea un principio imperfecto, es evidente que es mejor que partir de un desconocimiento total del macizo.

Los estudios geológicos-geotécnicos son absolutamente necesarios para poder proyectar y construir una obra subterránea. Los objetivos de estudio son los siguientes:

- Conocer las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas del trazo.
- Identificación de puntos singulares o zonas de mayor complejidad geológica, hidrogeológica o geotécnica.
- Clarificación y sectorización geomecánica, propiedades y parámetros de diseño del macizo rocoso.
- Criterios geomecánicos para el cálculo de soportes y métodos de excavación.
- Emplazamiento, excavación y estabilización de boquillas y accesos intermedios.
- Recomendaciones para la excavación, soportes y proceso constructivo el túnel.
- Tratamientos del terreno para la estabilización, refuerzo, drenaje o impermeabilización del terreno.

Terzaghi.

Diferentes autores han dedicado sus estudios a las clasificaciones geomecánicas, Terzaghi fue el primero en desarrollar una clasificación geomecánicas en 1946(TABLA III.3) desarrollo la primera clasificación geomecánica a partir de experiencias en túneles de ferrocarril con marcos de acero y basada únicamente en el tipo de terreno, a partir de la anchura y la altura del túnel proporciona la carga sobre los marcos metálicos, permitiendo así un rápido dimensionamiento(FIGURA III.2). Solo para excavaciones menores a 9m, no confiables para terrenos de comportamiento plástico o expansivo. Define los términos como: Roca inalterada, Roca estratificada, Roca medianamente fisurada, Roca agrietada en bloques, Roca triturada, Roca comprimida, Roca expansiva, utilizando la siguiente relación:

$$P = (H_p) (\gamma) (H)$$

P: Presión de soporte.

H_p: factor de carga.

γ: peso de la masa rocosa.

H: altura de la superficie a la zona del túnel.

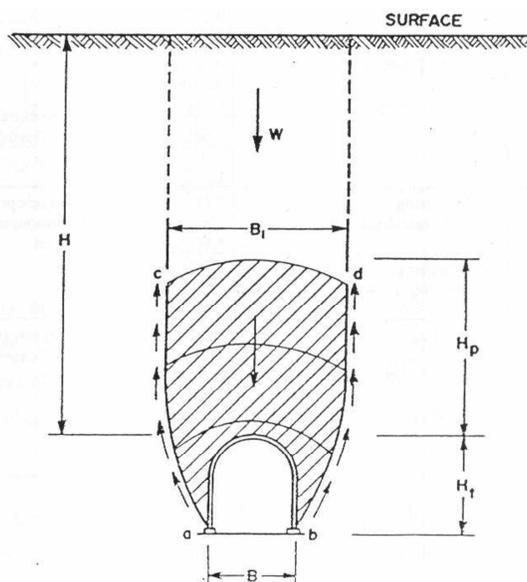


FIGURA III. 2. Teoría de Terzaghi.

Carga de roca H_p en pies de roca sobre el techo del túnel con ancho B (en pies) y altura H_t (en pies) a una profundidad superior de más de $1.5 (B+H_t)$

ESTADO DE LA ROCA	CARGA DE ROCA H_p EN PIES	OBSERVACIONES
Dura y masiva	0	Solo se necesita refuerzo escaso si hay desprendimiento o ruptura
Dura pero estratificada o esquistosa	0-0.5B	Refuerzo escaso como protección contra desprendimientos La carga puede cambiar en forma errática de un punto a otro
Masiva, ligeramente fisurada	0-0.25B	
Medianamente fracturada en bloques algo abiertos	0.25B-0.35(B+ H_t)	No hay presión lateral
Muy fracturada en bloques y las fracturas abiertas	(0.35-1.10) (B+ H_t)	Poca o ninguna presión lateral
Totalmente triturada pero químicamente inalterada	1.10 (B+ H_t)	Presiones laterales considerables. Los efectos de las infiltraciones hacia el piso del túnel requieren apoyo continuo para las partes bajas de los marcos, o bien marcos circulares
Roca comprimida, profundidad moderada	(1.10-2.10) (B+ H_t)	Considerable presión lateral se requiere plantilla apuntalada. Es preferible usar marcos circulares
Roca comprimida a gran profundidad	(2.10-4.50)(B+ H_t)	
Roca expansiva	Hasta 250ft independiente del valor (B+ H_t)	Marcos circulares indispensables. En casos extremos, úsese refuerzo elástico

TABLA III. 3. Clasificación de Terzaghi 1946 (Bieniawski, 1989).

Stini y Lauffer.

Stini (1950), en su manual de geología de túneles, propuso una clasificación de los macizos rocosos y comento muchas de las condiciones adversas que pueden encontrarse en la construcción de túneles. Insistió sobre la importancia de los defectos estructurales de la roca y sugirió que no se excavara paralelo al rumbo de discontinuidades muy inclinadas.

Lauffer llamó la atención sobre la importancia del tiempo de sostén del claro activo en un túnel. El tiempo de sostén es el lapso durante el cual una excavación será capaz de mantenerse abierta sin ademe, mientras que el claro activo es el claro sin ademe más grande en el túnel entre el frente y los refuerzos (FIGURA III.2 Y III.3). Lauffer en 1958 utilizó como sostenimiento primario, el combinado de marcos metálicos, anclaje y concretolanzado (no tiene datos objetivos para el macizo rocoso).

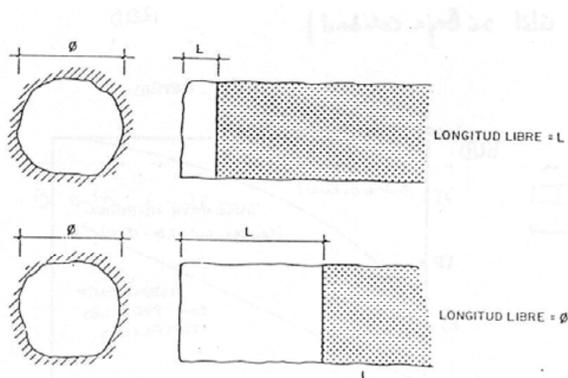


FIGURA III. 2. Excavación sin tratamiento.

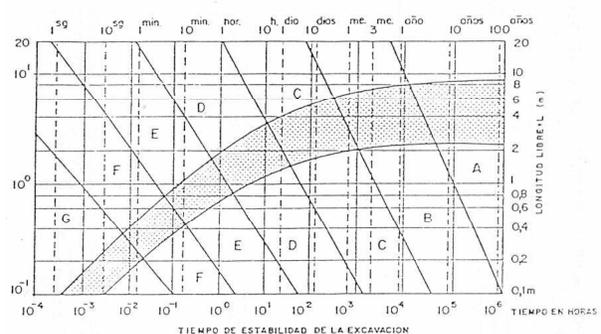


FIGURA III. 3. Tiempo de estabilidad de la excavación vs longitud libre.

Deere.

Deere 1964 propuso un índice cuantitativo de la calidad de la roca basado en la recuperación de núcleos con perforación de diamante. Se llama sistema Rock Quality Designation (RQD)- Índice de calidad de Roca-

La RQD se define como el porcentaje de núcleo que se recupera en piezas enteras de 100mm o más, del largo total del barreno (FIGURA III.4).

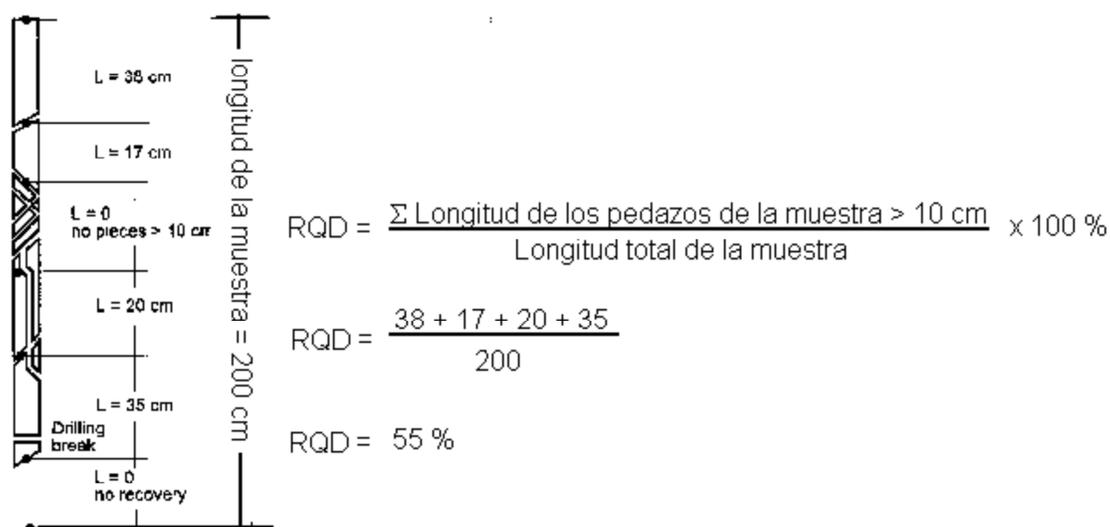


FIGURA III. 4. Método para obtener el RQD.

Deere, realiza una integración de información con los datos de Terzaghi, obteniendo la siguiente tabla.

Apoyo para un túnel de 6m de ancho. Comparación en el RQD

	No support or local Bolts	Pattern Bolts	Steel Ribs
Deere et al. (1970)	RQD 75-100	RQD 50-75 (1.5-1.8m spacing) RQD 25-50 (0.9-1.5m spacing)	RQD 50-75(light ribs on 1.5-1.8m spacing as alternative to bolts. RQD 25-50 (light to medium ribs on 0.9-1.5m spacing as alternative to bolts)
Cecil (1970)	RQD 82-100	RQD 52-82 (alternatively, 40-60mm shotcrete)	RQD 0-52 (ribs or reinforced shot crete)
Merritt (1972)	RQD 72-100	RQD 23-72 (1.2-1.8m spacing)	RQD 0-23

TABLA III. 4. Comparación de RQD (Bieniawski, 1989).

Wickham, Tiedemann and Skinner (RSR - Rock Structure Rating).

La propuesta del índice RSR fue un avance importante en la clasificación de macizos rocosos. Por primera vez se construía un índice a partir de datos cuantitativos de la roca. Era pues, un sistema completo con menos influencia de aspectos subjetivos se calculaba sumando tres contribuciones (A, B Y C) relacionados con aspectos geológicos generales (A), fracturas y dirección del avance (B) y condiciones de agua de las juntas (C). Éste índice y las recomendaciones para el sostenimiento se basaron fundamentalmente en túneles sostenidos mediante marcos. Los autores resumieron en gráficos correspondientes a diferentes diámetros de túnel el sostenimiento necesarios para cada valor de RSR. Bieniawski realizó una actualización a las tablas que realizaron en 1972 Wickham, Tiedeman and Skinner, en 1974, presentó las siguientes tablas. (Salvador Navarro Carrasco)

Parámetro A, Evaluación general de la geología.

- a) Origen de la roca (ígneas, sedimentaria o metamorfoseada).
- b) Dureza de la roca (duro, medio, blando, descompuesto).
- c) Evolución tectónica (masivo, ligeramente fallado/plegado, moderadamente fallado/plegado, intensamente fallado/plegado).

Parámetro B, Geometría, efecto del patrón de discontinuidad con respecto a la dirección

- a) Espaciamiento de las fracturas.
- b) Orientación de las fracturas (rumbo y buzamiento).
- c) Dirección del túnel.

Parámetro C, Efecto del flujo de agua subterránea y la condición conjunta.

- a) La calidad general del macizo rocoso sobre los parámetros A y B en conjunto.
- b) Condición general (bueno, regular, malo).
- c) Cantidad de entrada de agua (en galones por minuto por cada 1000 pies de túnel).

Parámetro A: Evaluación general de la geología.

	BASIC ROCK TYPE				Geological Structure			
	Hard	Medium	soft	decomposed	massive	Slightly faulted or folded	Moderately faulted or folded	Intensely faulted or folded
Igneous	1	2	3	4				
Metamorphic	1	2	3	4				
sedimentary	2	3	4	4				
Type 1					30	22	15	9
Type 2					27	20	13	8
Type 3					24	18	12	7
Type 4					19	15	10	6

^a After Wickham et al. (1974)

Parámetro B: Geometría, efecto del patrón de discontinuidad con respecto a la dirección

	Strike \perp to Axis					Strike \parallel to Axis		
	Direction of drive					Direction of Drive		
	both		With Dip			Both		
	Dip of prominent joints			Against Dip		Dip of Prominent Joints ^b		
Average Joint Spacing	flat	dipping	vertical	dipping	vertical	Flat	Dipping	Vertical
1. Very closely jointed, <2in.	9	11	13	10	12	9	9	7
2. Closely jointed, 2-6 in.	13	16	19	15	17	14	14	11
3. Moderately jointed, 6-12 in.	23	24	28	19	22	23	23	19
4. Moderate to blocky, 1-2 ft	30	32	36	25	28	30	28	24
5. Blocky to massive, 2-4 ft	36	38	40	33	35	36	34	28
6. Massive, >4ft	40	43	45	37	40	40	38	34

^a After Wickham et al. (1974)

^b Dip: flat: 0-20°, dipping: 20-50°, and vertical: 50- 90°.

Parámetro C: Efecto del flujo de agua subterránea y la condición conjunta.

Anticipated Water Inflow (gpm/1000 ft)	Sum of Parameters A + B					
	13 - 44			45 - 75		
	Joint Condition ^b					
	Good	Fair	Poor	Good	Fair	Poor
None	22	18	12	25	22	18
Slight, <200 gpm	19	15	9	23	19	14
Moderate, 200-1000 gpm	15	11	7	21	16	12
Heavy, >1000 gpm	10	8	6	18	14	10

^a After Wickham et al. (1974)

^b Joint condition: good=tight or cemented; fair = slightly weathered or altered; poor = severely weathered, altered, or open.

TABLA III.5. Wickham, Tiedemann and Skinner (Bieniaski, 1989).

Bieniawsky.

Bieniawsky en 1973, propone el RMR (ROCK MASS RATING) el cual se obtiene a partir de:

- Resistencia a la compresión uniaxial. Determinada en laboratorio y ensayos de carga puntual en terreno.
- RQD.
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Condición de las discontinuidades.
- Condición del agua
- Orientación de las discontinuidades.

El resultado se ajusta en función de la orientación del túnel y de las discontinuidades. Con la obtención del RMR es posible obtener:

- Una idea de tiempo de estabilidad de excavaciones sin soporte.
- Se recomienda la forma de arco de herradura de 10m, de ancho utilizando voladura y con un recubrimiento de 10cm (asumiendo que son rocas duras como diorita).
- Correlaciones con otras propiedades del macizo rocoso.

The Rock Mass Rating System (Geomechanics Classification of Rock Masses)

A. Parámetros de clasificación.

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	ENSAYO DE CARGA PUNTUAL	>10	4-10	2-4	1-2	COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)		
		Compresión simple	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
		Puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Puntuación		20	17	13	8	3		
3	Separación entre diaclasas		>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	0.06-0.2m	<0.06m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de discontinuidades	Longitud discontinuidad	< 1.0m	1 – 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	nada	< 0.1 mm	0.1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muyrugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Rellenoduro <5 mm	Rellenoduro >5 mm	Rellenoblando <5 mm	Rellenoblando>5 mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramentealterada	Moderadamentealterada	Muyalterada	Descompuesta		
Puntuación	6	5	3	1	0				
5	Agua freática	Caudal por 10m de túnel	ninguno	<10litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min		
		Ralación: presión de agua / esfuerzo principal mayor	0.0	0.0 - 0.1	0.1 0.2	0.2 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	húmedo	Ligerapresión de agua	Agua fluyendo		
		Puntuación	15	10	7	4	0		

TABLA III. 6. Parámetros para obtener el RMR de un macizo rocoso (Bieniawski, 1989).

B. Corrección por la orientación de las discontinuidades

Dirección y echado		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muydesfavorable
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-2	-25	-50	-60

C. Clasificación

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muybuena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación	100←61	80←61	60←41	40←21	<20

D. Meaning of rock mass classes

Clase	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento y longitud	10 años con 15m de claro	6 meses con 8m de claro	1 semana con 5m de claro	10 horas con 2.5 m de claro	30 minutos con 1m de claro
Cohesión (kg/cm ²)	>4.0	3.0 – 4.0	2.0 – 3.0	1.0 – 2.0	<1.0
Angulo de fricción	>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	<15°

Calculado el RMR, se tiene la clasificación de la calidad del macizo rocoso, Bieniawski propuso la siguiente tabla para los sostenimientos primario dependiendo de la calidad de la roca.

Rock mass class	Excavation	Rock bolts (20 mm diameter, fully grouted)	Shotcrete	Steel sets
I - Very good rock <i>RMR: 81-100</i>	Full face, 3 m advance.	Generally no support required except spot bolting.		
II - Good rock <i>RMR: 61-80</i>	Full face , 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face.	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh.	50 mm in crown where required.	None.
III - Fair rock <i>RMR: 41-60</i>	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face.	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5 - 2 m in crown and walls with wire mesh in crown.	50-100 mm in crown and 30 mm in sides.	None.
IV - Poor rock <i>RMR: 21-40</i>	Top heading and bench 1.0-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face.	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh.	100-150 mm in crown and 100 mm in sides.	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required.
V - Very poor rock <i>RMR: < 20</i>	Multiple drifts 0.5-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting.	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert.	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face.	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert.

TABLA III. 7. Sostenimiento primario (Bieniawski, 1989).

Barton (Q)

Bartón, Lien y Lunde en 1974 proponen el índice Q, el cual se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Donde:

J_n - número de familias de discontinuidad.

J_r -rugosidad de las fracturas.

J_a alteración de las juntas.

J_w -factor asociado con el agua en juntas.

SRF- factor asociado al estado tensional (zonas de corte, fluencia, expansividad, tensiones "in situ").

$\frac{RQD}{J_n}$; Tamaño de bloques.

$\frac{J_r}{J_a}$; Resistencia al corte entre los bloques.

$\frac{J_w}{SRF}$; Representa una tensión activa.

Determinar Q permite la estimación del sostenimiento del túnel.

- Se define el ESR (ExcavationSupport Ratio).
- Se elige el tipo de sostenimiento combinando el índice Q el diámetro o luz libre de la excavación.
- El sistema especifica anclas con diferentes características, concreto proyectado reforzado o no y arco de concreto con encofrado reforzado o no.

Valores de los parámetros características del índice Q

1. Calidad del testigo RQD		RQD (%)
A	Muy mala	0-25
B	Mala	25-50
C	Media	50-75
D	Buena	75-90
E	excelente	90-100

NOTAS:
 1. Cuando se obtienen valores de RQD inferiores o iguales a 10 se toma un valor de 10 para calcular el índice Q
 2. Los intervalos de 5 unidades para el RQD, es decir, 100, 95, 90, etc., tienen suficiente precisión.

2. Índice de diaclasado		J _n
A	Roca masiva, sin diaclasas o con fisuración escasa	0.5-1.0
B	Una familia de diaclasas	2
C	Un sistema y algunas diaclasas aleatorias	3
D	Dos sistemas de diaclasas	4
E	Dos familias de diaclasas y algunas diaclasa aleatorias	6
F	Tres familias de diaclasas	9
G	Tres familias de diaclasas y algunas aleatorias	12
H	Cuatro o más familias, diaclasas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones, etc.	15
I	Roca triturada, terrosa	20

NOTAS:
 1. En intersecciones de túneles se utiliza la expresión (3J_n)
 2. En las bocas de los túneles se utiliza la expresión (2J_n)

3. Índice de rugosidad de las discontinuidades		J _r
a) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad		
b) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10cm		
A	Diaclasas discontinuas	4
B	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares	3
C	Diaclasas onduladas, lisas	2
D	Diaclasas onduladas, perfectamente lisas	1.5
E	Diaclasas planas, rugosas o irregulares	1.5
F	Diaclasas planas, lisas	1.0
G	Diaclasas planas, perfectamente lisas	0.5

NOTA:
 1. Las descripciones se refieren a caracterizaciones a pequeña escala y escala intermedia, por este orden.
 2. En el caso de diaclasas planas perfectamente lisas que presenten lineaciones, y que dichas lineaciones estén orientadas según la dirección de mínima resistencia, se puede utilizar el valor J_r= 0.5

H	Zona que contiene minerales arcillosos con un espesor suficiente para impedir el contacto de las caras de la discontinuidad	1.0
I	Zona arenosa, de grava o triturada con un espesor suficiente para impedir el contacto entre las dos caras de la discontinuidad	1.0

NOTAS:
 1. Si el espaciado de la principal familia de discontinuidades es superior a 3m, se debe aumentar el índice J_r en una unidad.
 2. En el caso de diaclasas planas perfectamente lisas que presenten lineaciones, y que dichas lineaciones estén orientadas según la dirección de mínima resistencia, se puede utilizar el valor J_r= 0.5

4. Índice de alteración de las discontinuidades		ϕ_r	J_a
a) Contacto entre los planos de la discontinuidad (sin minerales de relleno intermedios)			
A	Discontinuidad cerrada, dura, sin reblandecimientos, impermeable, cuarzo	-	0.75
B	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas	25°-35°	1.0
C	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.	25°-30°	2.0
D	Recubrimiento de arcillas limosas o arenosas. Fracción pequeña de arcilla (noblanda)	20°-25°	3.0
E	Recubrimiento de arcillas blandas o de baja fricción, es decir, caolinita o mica. También clorita, talco, yeso, grafito, etc., y pequeñas cantidades de arcillas expansivas	8°-16°	4.0
b) Contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10cm (minerales de relleno en pequeños espesores)			
F	Partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	25°-30°	4.0
G	Fuertemente sobreconsolidados, con rellenos de minerales arcillosos no blandos (continuos, pero con espesores inferiores a 5mm)	16°-24°	6.0
H	Sobreconsolidación media a baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos (continuos, pero de espesores inferiores a 5mm)	12°-16°	8.0
I	Rellenos de arcillas expansivas, es decir, montmorillonita (continuos, pero con espesores inferiores a 5mm). El valor de J_a depende del porcentaje de partículas con tamaños similares a los de las arcillas expansivas	6°-12°	8-12
c) no se produce contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante (rellenos de mineral de gran espesor)			
K L M	Zonas o bandas de roca desintegrada o trituradas y arcillas (ver G, H y J para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6°-24°	6.8 ó 8-12
N	Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no reblandecibles	—	5.0
O P R	Zonas o bandas continuas de arcilla, de espesor grueso (ver G, H y J, para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6°-24°	10,13 ó 13-20
Nota: los valores expresados para los parámetros J_r y J_a se aplican a las familias de diaclasas o discontinuidades que son menos favorables con relación a la estabilidad, tanto por la orientación de las mismas como por su resistencia al coret (eseta resistencia puede evaluarse mediante la expresión $T \sim \sigma_r \text{tg}^{-1}(J_r, J_a)$)			
5. Factor de reducción por la presencia de agua		Presión de agua (kg/cm²)	J_w
A	Excavaciones secas o pequeñas afluencias, inferiores a 5 l/min, de forma localizada	<1	1.0
B	Afluencia a presión media, con lavado ocasional de los rellenos de las discontinuidades	1-2.5	0.66
C	Afluencia importante o presión alta en rocas competentes con discontinuidades sin relleno	2.5-10	0.5
D	Afluencia importante o presión alta, produciéndose un lavado considerable de los rellenos de las diaclasas	2.5-10	0.33
E	Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada en el momento de realizar las voladuras, decreciendo con el tiempo	>10	0.2-0.1
F	Afluencia excepcionalmente alta, o presión elevada de carácter persistente, sin disminución apreciable	>10	0.1-0.05
Notas: 1. Los valores de las clases C, D, E y F son meramente estimativos. Si se acomenten medidas de drenaje, puede incrementarse el valor J_w . 2. no se han considerado los problemas especiales derivados de la formación de hielo.			

6. Condiciones tensionales de la roca		SRF		
a) Las zonas débiles intersectan a la excavación, pudiendo producirse desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel va avanzado				
A	Múltiples zonas débiles, contiendo arcilla o roca desintegrada químicamente, toca de contorno muy suelta (a cualquier profundidad)	10		
B	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación ≤50m)	5		
C	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación >50m)	2.5		
D	Múltiples zonas de fracturas en roca competente (libres de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad)	7.5		
E	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de excavación ≤50m)	5.0		
F	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas)(profundidad de la excavación >50m)	2.5		
G	Terreno suelto, diaclasas abiertas, fuertemente fracturado, en terrones, etc. (a cualquier profundidad)	5.0		
Nota: 1. Se reducen los valores expresados del SRF entre un 20-50% si las zonas de fracturas solo ejercen cierta influencia pero no intersectan a la excavación				
b) Rocas competentes, problemas tensionales en las rocas		σ_c/σ_1	σ_2/σ_1	SFR
H	Tensiones pequeñas cerca de la superficie, diaclasas abiertas	>200	<0.01	2.5
J	Tensiones medias, condiciones tensionales favorables	200-10	<0.01	1
K	Tensiones elevadas, estructura muy compacta. Normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales	10-5	0.3-0.4	0.5-2
L	Lajamiento moderado de la roca después de 1 hora en rocas masivas	5.3	0.5-0.65	5-50
M	Lajamiento y estalido de la roca después de algunos minutos en rocas masivas	3-2	0.65-1	50-200
N	Estallidos violentos de la roca (deformación explosiva) y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas	<2	>1	200-400
Notas: 1. Si se comprueba la existencia de campos tensionales fuertemente anisotropicos: cuando $5 \leq \sigma_2/\sigma_1 \leq 10$, se disminuye el parámetro σ_c hasta $0.75\sigma_c$; si σ_1/σ_3 son las tensiones principales mayor y menor y σ_c es la tensión tangencial máima, estimada a partir de la teoría de la elasticidad). 2. En los casos en que la profundidad de la clave del túnel es menor que la anchura de la excavación, se sugiere aumentar el valor del factor SRF entre 2.5 y 5 unidades (véase clase H)				
c) Rocas deformable: flujo plástico de roca incompetente sometida a altas presiones litostáticas		σ_2/σ_1	SFR	
O	Presión de deformación baja	1-5	5-10	
P	Presión de deformación alta	>5	10-20	
Nota: 1. Los fenómenos de deformación o fluencia de rocas suelen ocurrir a profundidades: $H > 350Q^{1/3}$ (Singh et al., 1992). La resistencia a compresión de macizo rocoso puede estimarse mediante la expresión: $q(\text{MPa}) = 7 \cdot \gamma \cdot Q^{1/3}$, donde γ es la densidad de la roca en g/cm^3 (Singh, 1993).				
d) rocas expansivas: actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua.			SRF	
R	Presión de expansión baja	5-10		
S	Presión de expansión alta	10-20		
$Q = (RQD/J_n) (J_r/J_a)(J_w/SRF)$				

TABLA III. 8. Q de Barton(GONZALEZ-VALLEJO LUIS, 2006).

CLASIFICACIÓN DE BARTON DE LOS MACIZOS ROCOSOS. INDICE DE CALIDAD Q.

TIPO DE ROCA	VOLOR DE Q
Excepcionalmente mala	0.001 – 0.01
Extremadamente mala	0.01 – 0.1
Muy mala	0.1 – 1
Mala	1 – 4
Media	4 – 10
Buena	10 – 40
Muy buena	40 – 100
Extremadamente buena	100 – 400
Excepcionalmente buena	400 - 1000

González Vallejo.

La clasificación geomecánica SRC (González de Vallejo, 1985 y 2003) se basa en la RMR, y se diferencia de ésta por considerar el estado tensional del macizo rocoso, las condiciones constructivas del túnel y la utilización de datos de afloramientos. Los parámetros que intervienen son los siguientes:

- Resistencia de la matriz rocosa.
- Espaciado de las discontinuidades o RQD.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Filtraciones.
- Estado tensional, definido por los siguientes factores:
 - Factor de competencia, F_c .
 - Accidentes tectónicos.
 - Factor de relajación tensional.
 - Actividad sísmica.

Clasificación geomecánica SRC

1.RESISTENCIA MATRIZ ROCOS Carga puntual (MPa) Ensayos compresión simple (MPa) Puntuación.	>8 >250 20	8 a 4 250 a 100 15	4 a 2 100 a 50 7	2 a 1 50 a 25 4	$\frac{25}{2}$ a $\frac{55}{1}$ a $\frac{2}{0}$
2.ESPACIADO ó RQD Espaciado (m) RQD (%) Puntuación.	>2 100 a 90 25	2 a 0.6 90 a 75 20	0.6 a 0.2 75 a 50 15	0.2 a 0.06 50 a 25 8	<0.06 <25 5
3.DISCONTINUIDADES Condiciones Puntuación.	Muy rugosa. Discontinuas Sin separación Bordes poco Alterados y duros 30	Algo rugosas. Discontinuas. Separación Menor 1mm Bordes duros y poco alterados 25	Algo rugosas. Discontinuas. Separación 1 mm Bordes blandos y alterados. 20	Lisas o con Slickensides. Contiuas. Abiertas 1 a 5 mm. Con rellenos. 10	Lisas o con Slickensides. Continuas Abiertas más De 5 mm Con rellenos. 0
4.FILTRACIONES Caudal por 10m de túnel (l/m) Condiciones Puntuación.	Inapreciable Seco 15	<10 Algo húmedo 10	10-25 Algunas Filtraciones 7	25-125 Frecuentes Filtraciones 4	>125 Abundantes Filtraciones 0
5.ESTADO TENSIONAL Factor de competencia (I) Puntuación.	>10 10	10 a 5 5	5 a 3 -5	<3 -10	—
Accidentes tectónicos Puntuación.	Fallas de alcance regional -5		Tectónica Compresiva -2	Tectónica distensiva 0	
Factor de relajación tensional (2) Puntuación.	>200 0	200-800 -5	80 a 10 -8	<10 -10	Zonas afectadas por laderas o taludes 200 a 80 -10
Actividad sísmica Puntuación.	Desestimada o baja 0		Moderada -5		Alta -10
CLASES DE ROCA Clase SCR	I	II	III	IV	V
Calidad de Roca Puntuación.(3)	Muy buena 100 a 81	Buena 80 a 61	Media 60 a 41	Mala 40 a 21	Muy mala ≤20
Notas: 1.Factor de competencia: resistencia uniaxial de la matriz rocosa dividida por la tensión máxima vertical debida al peso del recubrimiento. 2.Factor de relajación tensional: edad geologica de la deformación tectónica principal (en años $\times 10^{-3}$) dividida el máximo espesor de recubrimientos, en metros. 3.Una vez obtenida la puntuación SRC, se utiliza este valor en lugar de RMR par el cálculo de las propiedades del macizo rocoso y los sotenimientos.					

TABLA III. 9. Parámetros del SRC (GONZALEZ-VALLEJO LUIS, 2006).

Hoek.

En 1994, el Doctor Evert Hoek publicó el artículo “Strength of Rock and Rock Masses” en el cual expuso Geological Strength Index, un nuevo Índice de Calidad Geomecánica para los macizos rocosos cuyo rango numérico, comprendido entre 0 y 100, se basa en la identificación y clasificación en campo de dos de las características físico-mecánicas de un macizo rocoso: la macroestructura y la condición de las superficies de las discontinuidades.

Hoek recomienda hacer siempre referencia a un rango numérico y nunca a un solo valor de GSI y también sugiere la posibilidad, a falta de una apreciación directa en campo y solo para macizos rocosos caracterizados por un $GSI > 25$, de estimar este a partir del RMR de Bieniawski, depurándolo del factor orientación de las discontinuidades y asignando 10 al factor agua. Russo (1998), propone estimar el GSI también a partir del índice Q de Barton, depurándolo del factor de tensión (SRF) y asignando 1 al parámetro agua (J_w), obteniendo luego, de acuerdo con la preexistente correlación entre Q y RMR: $GSI = 9 \lg Q' + 44$.

Lo que más hace interesante el GSI, además de su sencillez y agudeza, es su carácter intrínseco a la geomecánica de los macizos rocosos, toda vez que el mismo no depende de factores extrínsecos por ejemplo, la orientación, la pretensión, la humedad, etc. (FIGURA III.11). Así como en cambio sucede para la mayor parte de los otros índices de calidad propuestos y utilizados.

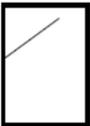
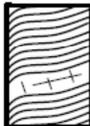
<p>INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI) PARA LAS ROCAS METAMORFICAS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA DE VENEZUELA</p> <p>A partir de la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, seleccionar el intervalo apropiado de esta gráfica. Estimar el valor promedio del Índice de Resistencia Geológica (GSI) de dicho intervalo. No intentar ser tan preciso. Escoger un rango de GSI de 36 a 42 es más aceptable que fijar un GSI = 38. También es importante reconocer que el criterio de Hoek-Brown debería ser aplicado solamente en macizos rocosos donde el tamaño de los bloques o fragmentos es pequeño comparado con el tamaño de la excavación a ser evaluada. Cuando el tamaño de los bloques individuales es aproximadamente mayor a un cuarto de la dimensión de la excavación, generalmente la falla estaría controlada por la estructura y el criterio de Hoek-Brown no debería ser utilizado.</p>		CONDICION DE LA SUPERFICIE				
		<p>MUY BUENA Rugosa, superficies cerradas sin meteorización</p>	<p>BUENA Rugosa, ligeramente meteorizada, abertura < 1mm, rellenos duros</p>	<p>MEDIA Plana, moderadamente meteorizada, abertura 1-5 mm, rellenos duros y blandos</p>	<p>MALA Espejos de falla, superficies muy meteorizadas con abertura > 5 mm, predominan los rellenos blandos</p>	<p>MUY MALA Espejos de falla, superficies muy meteorizadas y abiertas con rellenos blandos</p>
ESTRUCTURA		DISMINUCION EN CALIDAD DE SUPERFICIE 				
 <p>INTACTA O MASIVA – macizo rocoso con pocas discontinuidades, carentes de planos de foliación <i>Ej: Cuarzitas, anfibolitas o mármoles</i></p>	90	80	N/A	N/A	N/A	
 <p>POCO FOLIADA – macizo rocoso parcialmente fracturado con hasta tres sistemas de discontinuidades. Puede contener intercalaciones delgadas de rocas foliadas <i>Ej: Cuarzita fracturada intercalada ocasionalmente con esquistos y/o filitas</i></p>	70	60				
 <p>MODERADAMENTE FOLIADA – macizo rocoso fracturado constituido por intercalaciones de rocas foliadas y no foliadas en proporciones semejantes <i>Ej: Intercalaciones de esquistos y/o filitas con mármoles fracturados en proporción similar</i></p>	50					
 <p>FOLIADA – macizo rocoso plegado y/o fallado, muy fracturado, donde predominan las rocas foliadas, con ocasionales intercalaciones de rocas no foliadas <i>Ej: Esquistos y/o filitas muy fracturadas intercaladas ocasionalmente con mármoles lenticulares</i></p>	40		30			
 <p>MUY FOLIADA – macizo rocoso plegado, altamente fracturado, constituido únicamente por rocas muy foliadas <i>Ej: Esquistos y/o filitas muy fracturadas sin la presencia de mármoles, gneises o cuarzitas</i></p>				20		
 <p>BRECHADA/CIZALLADA – macizo rocoso muy plegado, alterado tectónicamente, con aspecto brechoide. <i>Ej: Brecha de falla o zona influenciada por fallas cercanas</i></p>	N/A	N/A			10	
					5	

TABLA III. 10. Clasificación de Hoek, (GIANFRANCO).

Romana.

Romana realizó estudios enfocados al sostenimiento de taludes proponiendo un sistema SMR para taludes, en 2000 publica un trabajo donde hace recomendaciones a los trabajos de Bieniawski 1989. Donde propone la sustitución del sistema de 5 clases por el de 10 subclases, cada subclase tiene un rango de 10 puntos y, para mantener un cierto grado de correlación con la división anterior, se denomina en el numeral romano de Bieniawski (I, II, III, IV, V) seguido de una letra: a para la mitad superior y b para la mitad inferior de cada clase.

RMR	MODIFICADO		BIENIAWSKI ORIGINAL	
	CLASE	DENOMINACIÓN	DENOMINACIÓN	CLASE
100	la	EXCELENTE	MUY BUENA	I
90	lb	MUY BUENA		
80	II a	BUENA A MUY BUENA	BUENA	II
70	II b	BUENA A MEDIA		
60	III a	MEDIA A BUENA	MEDIA	III
50	III b	MEDIA A MALA		
40	IV a	MALA A MEDIA	MALA	IV
30	IV b	MALA A MUY MALA		
20	V a	MUY MALA	MUY MALA	V
10	V b	PÉSIMA		

Nota: Las clases la (Excelente) y Vb (Pésima) no aparecen prácticamente nunca

TABLA III. 11. Clasificación modificada de Bieniawski (MANUEL ROMANA RUIZ, 2000).

Romana para realizar las recomendaciones, considera las siguientes limitantes:

- túneles y obras subterráneas con ancho de excavación entre 10 y 14 m, utilizados para obras de comunicación.
- La mayoría de estos túneles se excavan por voladuras, se prevé la utilización de túneladoras.
- Solo se utiliza para tensiones verticales, proporcionadas por el peso del macizo rocoso, no está diseñado para tensiones tectónicas horizontales.

PALMSTROM (RMi)

El índice del macizo rocoso (RMi) es un parámetro volumétrico que indica, de manera aproximada, la resistencia a compresión uniaxial de un macizo rocoso. Se puede expresar de dos maneras:

Para rocas diaclasadas:

$$RMi = \sigma_c \times JP = \sigma_c \times 0.2 \sqrt{jC} \times Vb^D; \quad (D = 0.37 jC^{-0.2})$$

Para rocas masivas:

$$RMi = \sigma_c \times f_\sigma = \sigma_c \left[\frac{0.05}{Db} \right]^{0.2} \approx 0.5 \sigma_c$$

Dónde:

σ_c : resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.

jC : factor de condición de las diaclasas.

jL : factor de tamaño y continuidad de las diaclasas.

jR : factor de rugosidad de las diaclasas.

jA : factor de alteración de las discontinuidades.

Vb : volumen del bloque expresado en m^3 .

JP : parámetro del diaclasado.

f_σ : parámetro de pasividad.

En la tabla se muestra la clasificación del macizo rocoso de acuerdo al MRI.

Valor de RMi	Calidad del macizo
<0.01	Muy baja
0.01-0.1	Baja
0.1-1	Moderada
1-10	Alta
>10	Muy alta

PARÁMETROS DE ENTRADA AL R M I						
RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE, σ_c , de la roca intacta		valor (en MPa)		Obtenido de ensayos de laboratorio o estimado de los datos de campo		
VOLUMEN DEL BLOQUE, V_b		valor (en m ³)		Medido físicamente en el sitio o estimado de los datos de campo		
FACTOR DE ESTADO (CONDICIÓN) DE LAS DIACLASAS, j_C		$j_C = j_R \cdot j_A$		Debajo, en las tablas se presentan las valoraciones de j_R y j_A		
FACTOR DE RUGOSIDAD DE LAS JUNTAS (j_R) (las valoraciones de j_R están basadas en J_r del sistema Q)						
Con valoraciones resultantes en sitios con juntas a J_r						
Ondulación del plano diaclasado a gran escala						
		Plano	Ligeramente ondulado	Ondulado	Alineado ondulado	Escalonado o irregular
Subjetivo (sobre la junta a pequeña escala)	Muy rugosa	7	5	3	1	1
	Rugosa	4,5	3	2	1,5	1
	Suave	1	1,5	2	3	4
	Plano o espejo de agua ¹⁾	0,5	1	1,5	2	3
	Para diaclasas (juntas) regulares $J_r=1$. Para diaclasas irregulares se sugiere una valoración $J_r=5$					
¹⁾ Aplicar estos valores a juntas de tipo con juntas irregulares o juntas de juntas						
FACTOR DE ALTERACIÓN DE LAS JUNTAS (j_A) (las valoraciones de j_A se basan en J_a del sistema Q)						
CONDICIÓN DE LAS JUNTAS		CONDICIÓN			Condición de juntas	
Contacto entre las planicies de la junta	DIACLASAS (JUNTAS) DMPAS	Pegadas o juntas	relleno de cuarcita, epóxido, etc.		0,75	
		Roca intacta (fresca)	sin contacto o raras, en caso de contacto a gran escala		1	
		Superficies alteradas	un grado más de alteración que la roca dos grados más de alteración que la roca		2	
	CONTACTO O RELLENO DE FLEJO ESPESOR	Materiales de fricción	arena, limo, caliza, etc. sin contenido de arcilla		3	
	Materiales cohesivos	arcilla, limo, talco, etc.		4		
Presión de la junta en contacto punto a punto	RELLENOS DE:	Tipo		Releno fino (< 5 mm)	Releno grueso	
		Materiales no cohesivos	arena, limo, caliza, etc. con contenido de arcilla	4	5	
	Materiales de juntas cohesivos	relleno compactado de arcilla, limo, talco, etc.	5	6-10		
	Materiales de juntas cohesivos	arcilla de media a baja cohesividad, talco, talco, etc.	8	10		
	Materiales cohesivos y arcillosos	material de relleno que exhibe propiedades especiales	8-10	13-20		
FACTOR DE TAMAÑO Y CONTINUIDAD DE LAS DIACLASAS (JUNTAS) (j_L)						
TIPO	Longitud	Tamaño	Juntas continuas	Juntas discontinuas ¹⁾		
Centro de la redistribución o bloqueo	< 0,5 m	muy corto	3	5		
	0,5 - 1 m	corto o pequeña	2	4		
Diaclasas o juntas	1 - 10 m	mediano	1	2		
	10 - 30 m	grande o largo	0,75	1,5		
Junta (vertical, diagonal o curva) ²⁾	> 30 m	muy grande o largo	0,5	1		
¹⁾ Las juntas discontinuas pueden ser más grandes. ²⁾ El movimiento en una dirección y dentro de una zona de fallas en contacto						
FACTORES DE AJUSTE PARA EL SOSTENIMIENTO EN ROCA						
NIVEL DE TENSIONES	Resistencia de roca deteriorada	Valoración B_L	NÚMERO DE FAMILIAS DE JUNTAS ¹⁾	Valoración N_j	NÚMERO DE FAMILIAS DE JUNTAS ¹⁾	Valoración N_j
Muy bajo (en pozos, etc.)	< 10 m	0,1	Una familia	3	Tres familias	1
Bajo	10 - 30 m	0,5	Una familia + arcillas	2	Una familia + arcillas	0,85
Moderado	30 - 100 m	1	Das familias	1,5	Cuatro familias	0,75
Alto	> 100 m	1,5	Das familias + arcillas	1,2	Cuatro familias + arcillas	0,65
¹⁾ Un alto nivel de tensiones puede ser indicativo para la necesidad de reducir aún más. Valoración propia $B_L = 0,5-0,75$			¹⁾ Significa el número de familias de juntas desde el sitio de observación por el número de juntas discontinuas dentro de una gran zona			
ORIENTACIÓN DE LAS JUNTAS (en relación al eje del tórax)			Valoración C_1 y C_2	INCLINACIÓN DE TECHOS O HASTIALES		Valoración C
EN HASTIALES	EN TECHOS	TÉRMINO		INCLINACIÓN DE TECHOS O HASTIALES		
Horizontal = 30°	Horizontal = 30°	Horizontal	1	Horizontal (recto)	1	
Inclinado = 30°	Inclinado = 30°	Texturable	1,5	30° inclinación	1,5	
Inclinado = 30-45°	Inclinado = 30-45°	Irregular	2	45° inclinación	2,2	
Inclinado = 45°	Inclinado = 45°	Desfavorable	3	60° inclinación	3	
Inclinado = 60°	Inclinado = 60°	Muy desfavorable	3	Vertical (hastiales)	5	

TABLA III. 12. Valores y estimaciones de los parámetros de MRI de Palmström (2000)

III.3. Procedimiento constructivo del Túnel “El Sinaloense”.

Las condiciones geotécnicas de la roca en el Túnel “El Sinaloense”, se determinan calculando el RMR con los métodos propuestos por Bieniawski (1989) y Barton (1974). En el capítulo II se mencionó que la división de las condiciones geotécnicas es una combinación de los trabajos de Bieniawski (1989) y Romana (2001). En la siguiente tabla observamos los parámetros para cada condición geotécnica.

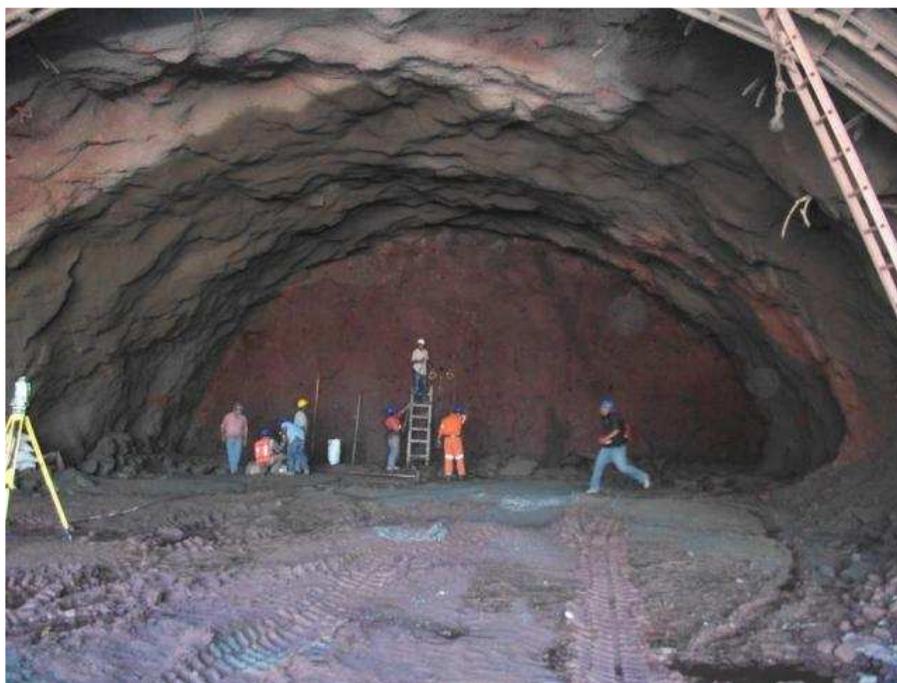
Condiciones geotécnicas para el Túnel “El Sinaloense”.

CONDICIÓN GEOTÉCNICA	RMR (BIENIAWSKI, 1989)	Q(BARTON, 1974)
A	≥ 81 Roca muy buena	≥ 45 Roca muy buena
B	61 a 80 Roca buena	6 a 45 roca regular a buena
C⁽⁺⁾	51 a 60 Roca de regular a buena	4 a 6 Roca mala a regular
C⁽⁻⁾	41 a 50 Roca regular	1 a 4 Roca mala
D⁽⁺⁾	31 a 40 Roca mala a regular	0.4 a 1 Roca muy mala
D⁽⁻⁾	21 a 30 Roca mala a muy mala	0.1 a 0.4 Roca muy mala a extremadamente mala
E	≤20 Roca muy mala	0.01 a 0.1 Roca extremadamente mala

Condición geotécnica A.

RMR >80 Roca de muy buena calidad.

Se tiene una excavación en media sección superior completa, misma que se realiza con explosivos, la buena calidad del macizo rocoso permite un avance de 3 a 4 metros lineales. Una vez concluidos los trabajos de rezaga de material y si es necesario se colocan anclas puntuales, en zonas inestables. El sostenimiento primario en ésta condición geotécnica es primordialmente de 0.05 metros de concreto lanzado reforzado con fibras de acero (FOTO III.5), se coloca de manera homogénea en el perímetro de la excavación. La excavación en media sección inferior se realiza utilizando el mismo procedimiento y sostenimiento.



FOTOGRAFIA III. 5. Ejemplo de Condición A. Túnel “El Sinaloense” portal Durango, roca de calidad Muy buena, Clase I.

CADENAMIENTO	LITOLOGIA	ESTUCTURAS	RMR	SOSTENIMIENTO
668+475.30	Toba lítica con matriz silicificada	Fracturas derivadas de voladura	89	Concreto lanzado reforzado con fibras de acero e=0.05m.

En la FIGURA III.5 se observa la sección de túnel con las dimensiones exactas, se observan las secciones de excavación (superior y banqueo). En la FIGURA III.6 se observa el perfil de avances, la media sección superior se excava completa, dejando el banqueo para su posterior excavación.

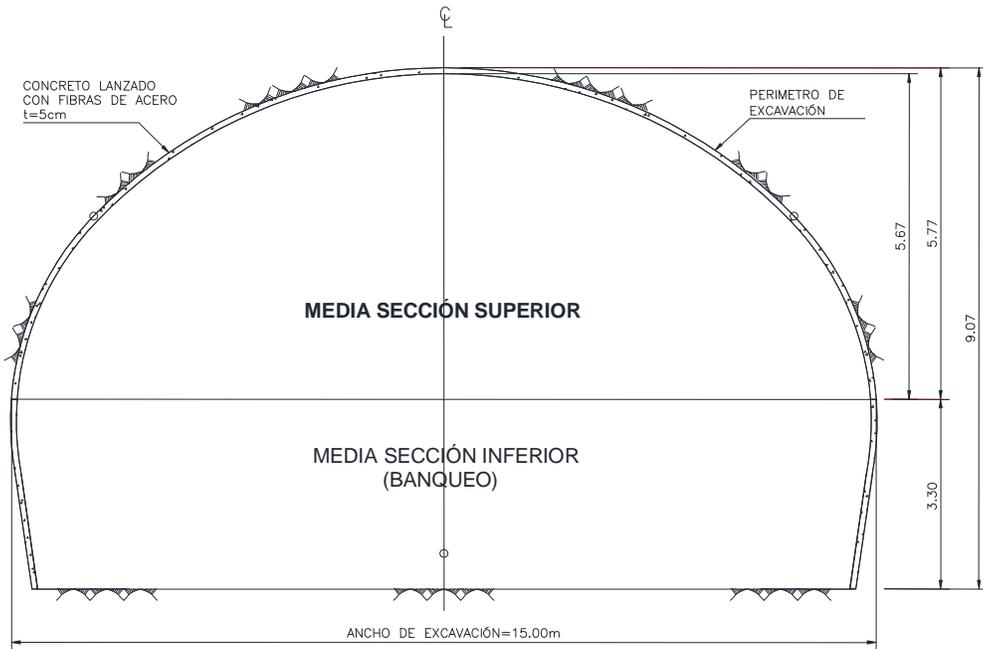


FIGURA III. 5. Sección transversal de túnel. Condición A.

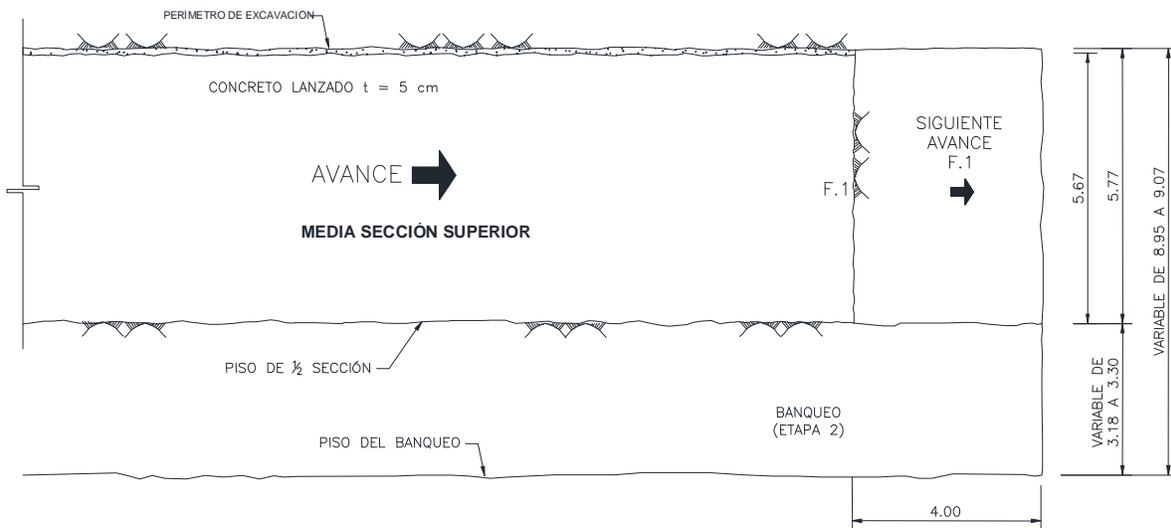


FIGURA III. 6. Perfil de avance. Condición A.

Condición geotécnica B.

RMR: 60-80 Roca de buena calidad.

Se realiza una excavación de media sección superior completa, por medio de explosivos, la buena calidad de la roca permite un avance de 3 a 4 metros lineales (FOTO III.6). Concluidos los trabajos de rezaga se inicia con el sostenimiento, para ésta condición se coloca un anclaje radial sistemático con un patrón a tresbolillo a 2.5 x 2.5 metros de distancia entre anclas. Se colocan 0.10 metros de concreto lanzado en el perímetro de la excavación (FIGURA III.7 Y III.8). La excavación en media sección inferior se realiza con explosivos en sección completa.



FOTOGRAFIA III. 6. Ejemplo de condición B. Túnel "El Sinaloense" portal Mazatlán, roca de calidad buena, clase II.

CADENAMIENTO	LITOLOGIA	ESTUCTURAS	RMR	SOSTENIMIENTO
671+126	Andesita con mineralización secundaria y ligera alteración propilítica	Se observan dos planos de fracturamiento	67	Concreto lanzado reforzado con fibras de acero, e= 0.10 m Anclas radiales 2.5x2.5m

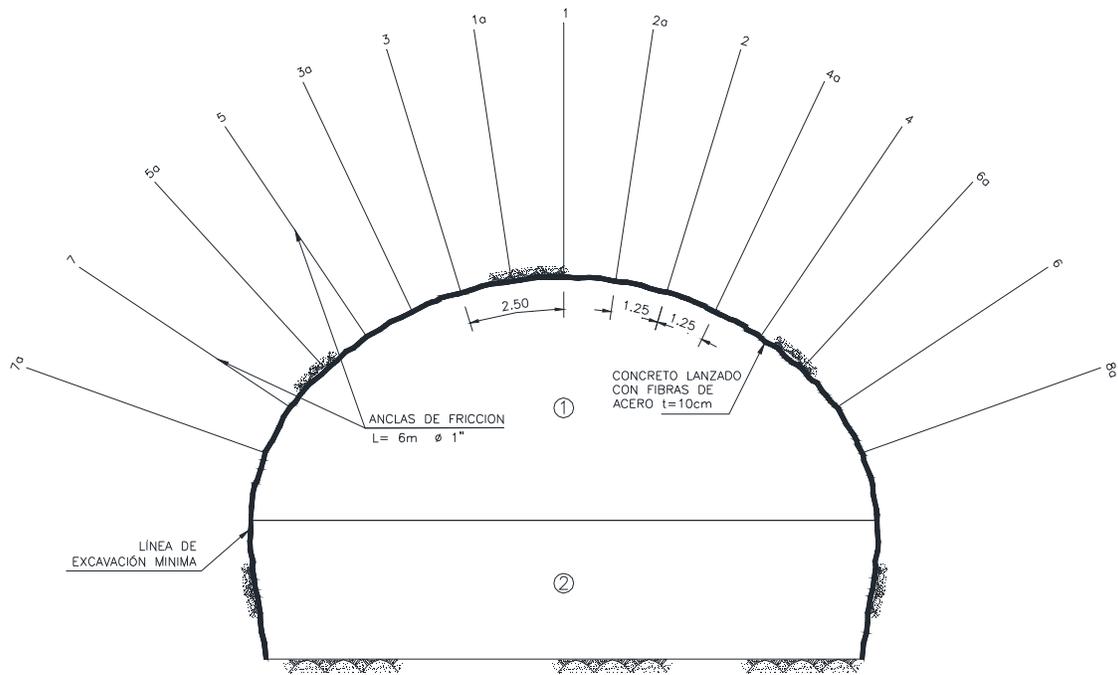


FIGURA III. 7. Sección transversal. Condición geotécnica B.

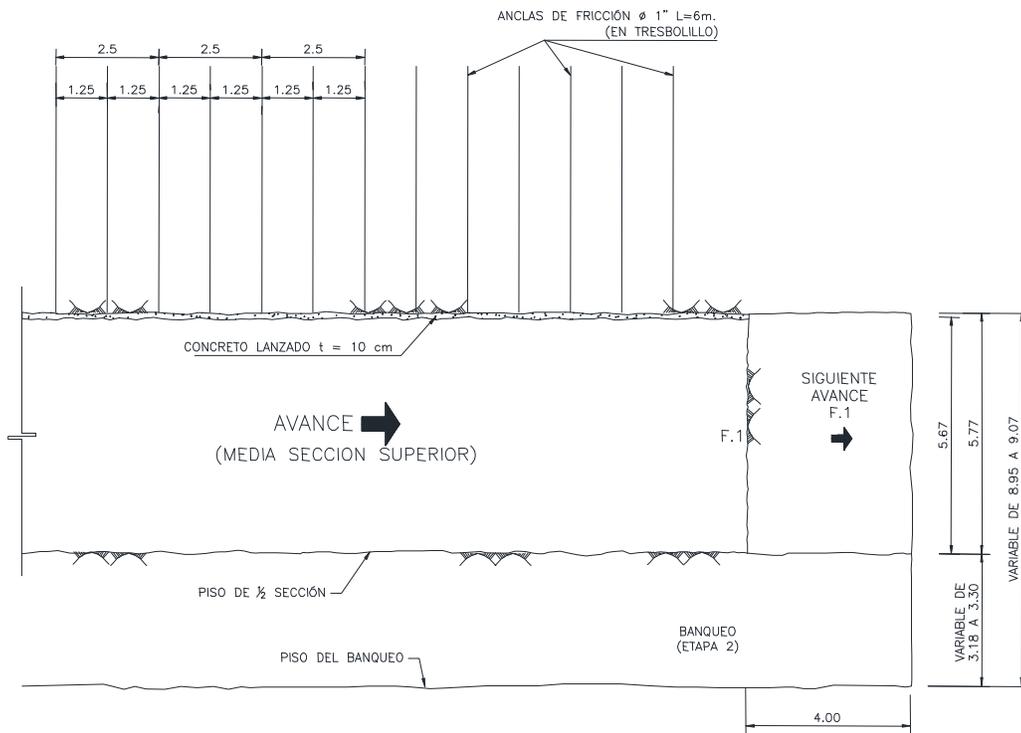


FIGURA III. 8. Perfil de avance. Condición B.

Condición geotécnica C⁽⁺⁾.

RMR: 51 - 60 Roca de regular a buena calidad.

La excavación de la media sección superior se realiza en dos etapas. En la primera etapa se excava la mitad de la sección con medios mecánicos o voladuras controladas, depende de la situación general del frente, la condición regular de la roca permite un avance de 3 a 4 metros lineales en cada etapa. Se ejecutan los siguientes sostenimientos; en la zona de media sección superior se colocan anclas radiales con un patrón a tresbolillo de 2.0 X 2.0 metros de distancia entre anclas (FIGURA III.9, III.10 y III.11) y una capa de concreto lanzado reforzado con fibras de acero de 0.10 metros de espesor, concluidos los tratamientos de sostenimiento (FOTO III.7), se realiza el avance de la segunda etapa de excavación. El banqueo se realiza en dos fases de excavación, con los mismos procedimientos, se colocan 0.10cm de concreto lanzado reforzado.



FOTOGRAFIA III. 7. Ejemplo de tratamiento en condición C⁽⁺⁾. Anclas radiales colocadas en patrón 2.0x2.0.

CADENAMIENTO	LITOLOGIA	ESTUCTURAS	RMR	SOSTENIMIENTO
167+052.7	Andesita con alteración propilítica, en zonas se observan óxidos de Fe.	Se observan tres familias de fracturas principales	56	Concreto lanzado reforzado con fibras de acero e=0.10m Anclas radiales 2.0x2.0m

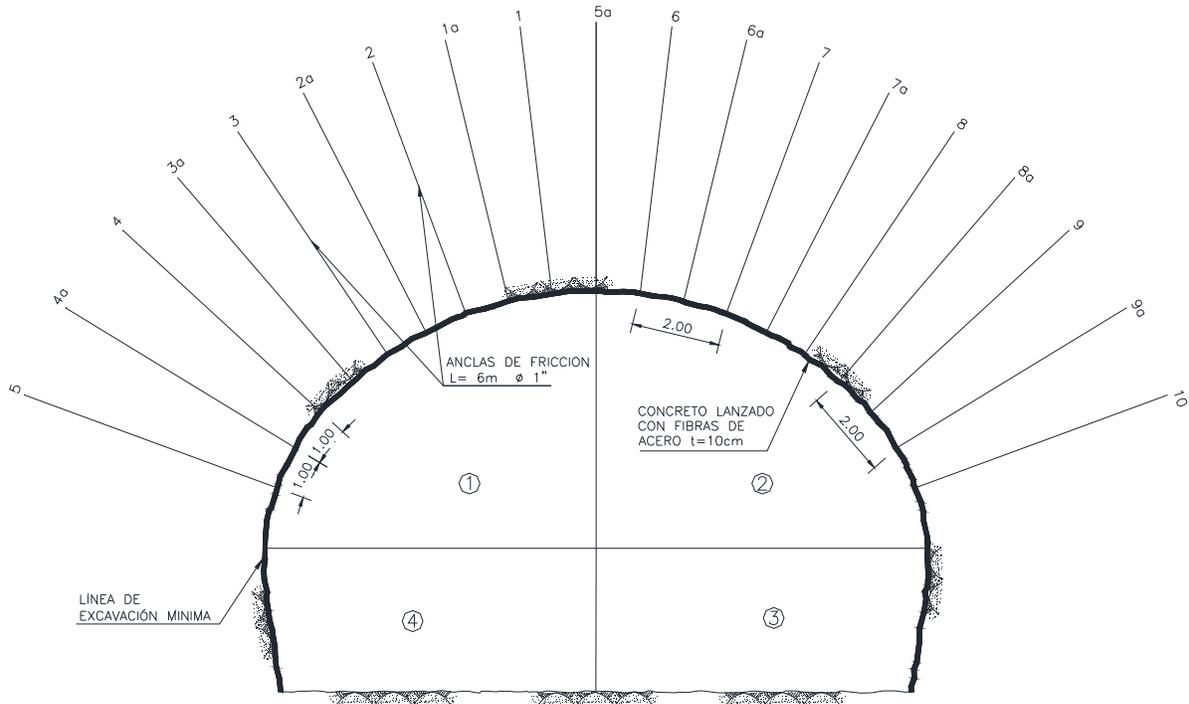


FIGURA III. 9. Sección transversal. Condición C(+).

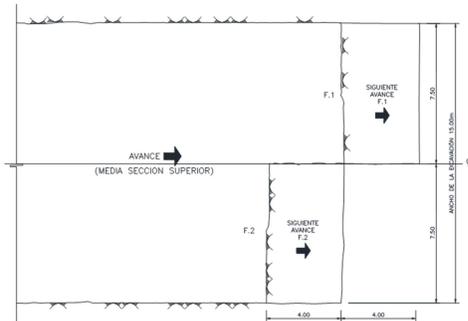
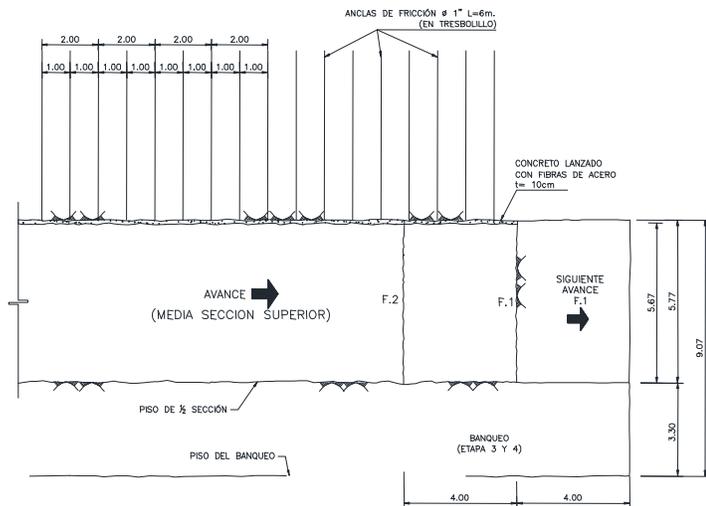


FIGURA III. 10. Planta de avance. Condición C(+).

FIGURA III. 11. Perfil de sostenimientos. Condición C(+).



Condición geotécnica C⁽⁻⁾.

RMR: 41 - 50 Roca de regular calidad.

La excavación de la media sección superior se realiza en dos etapas. En la primera etapa se excavan los hastiales dejando un piloto central de 5 metros de ancho, el avance se realiza por medios mecánicos, la condición regular de la roca permite un avance de 2 a 4 metros lineales. Concluidos los trabajos de excavación y rezaga, se realiza el siguiente sostenimiento en la media sección superior; se colocan anclas radiales con un patrón a tresbolillo de 1.5 X 1.5 metros y una capa de concreto lanzado de 0.15 metros de espesor (FIGURA III.12, III.13 y III.14), concluidos los tratamientos, se realiza el avance de la segunda etapa, se excava la zona del piloto central y se realizan el mismo sostenimiento (FOTOGRAFIA III.8). La excavación de la sección inferior se realiza en dos fases, piloto central y hastiales, se colocan 0.15 metros de concreto reforzado con fibras de acero.



FOTOGRAFIA III. 8. Ejemplo condición C⁽⁻⁾. Túnel “El Sinaloense”, excavación de media sección en 2 etapas, se observa el avance en hastiales y el piloto central.

CADENAMIENTO	LITOLOGIA	ESTUCTURAS	RMR	SOSTENIMIENTO
668+892	Toba lítica, con alteración argílica	Muy fracturada	43	Concreto lanzado reforzado e=0.15m Anclas radiales 1.5x1.5m

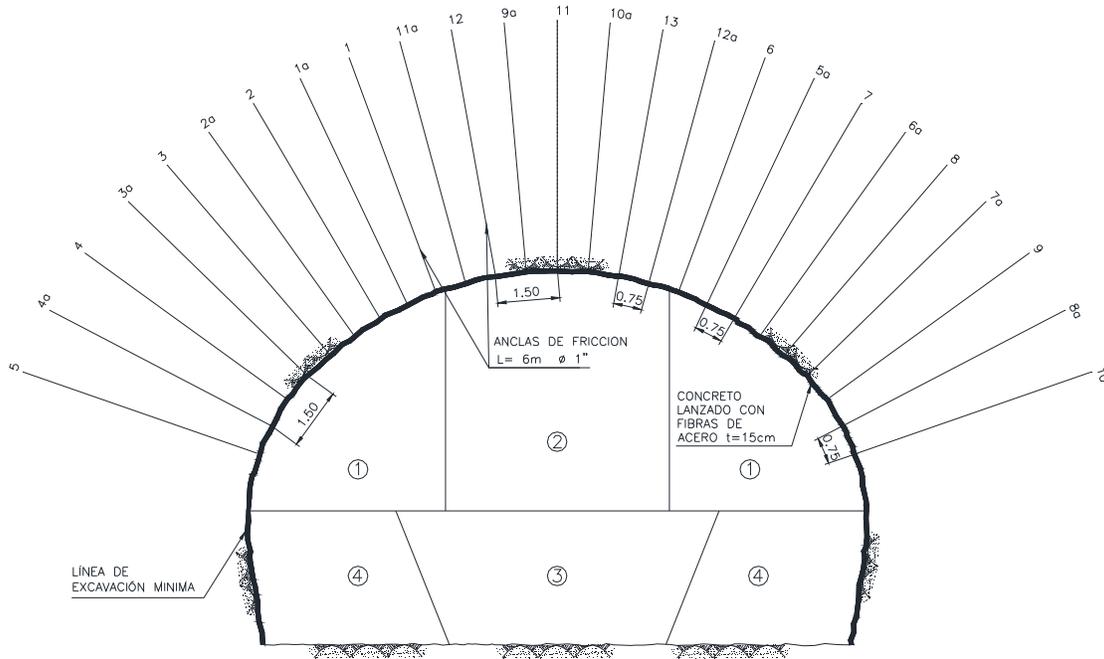


FIGURA III. 12. Sección transversal. Condición geotécnica C⁽⁻⁾.

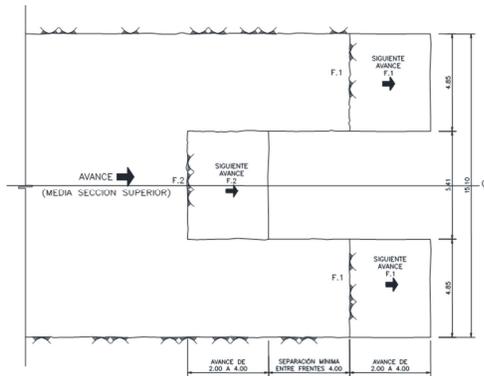
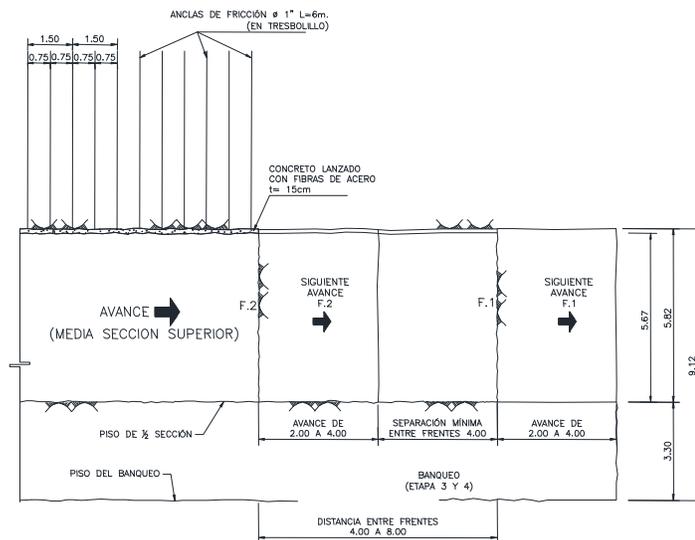


FIGURA III. 13. Planta de avance. Condición C⁽⁻⁾.

FIGURA III. 14. Perfil de Sostenimientos. Condición C⁽⁻⁾.



Condición geotécnica D⁽⁺⁾.

RMR:31 - 40 Roca de mala a regular calidad.

La excavación de la media sección superior se realizó en dos etapas. Primero se excavan con medios mecánicos los hastiales dejando un piloto central de 5 metros de ancho, la condición de la roca fue de mala a regular por lo que solo permite un avance de 1.20 a 2.40 metros máximo. Se ejecuta el siguiente sostenimiento: inmediato a la excavación de la media sección superior se colocan 0.05 metros de concreto reforzado con fibras de acero, se colocan macos metálicos a una distancia de 1.2 m entre cada uno (FIGURA III.15, III.16 y III.17) y sobre los elementos colocados se lanza 0.10 metros de concreto reforzado (FOTO III.10). La excavación en sección inferior se realiza en dos etapas, en la primera se excava los hastiales, se colocan las patas de los marcos y se lanza concreto, en la segunda etapa se trabaja la zona central.



FOTOGRAFIA III. 9. Ejemplo de condición D⁽⁺⁾. Túnel “El Sinaloense” portal Mazatlán, roca de calidad mala-regular, clase IV.

CADENAMIENTO	LITOLOGIA	ESTRUCTURAS	RMR	SOSTENIMIENTO
671+149	Andesita con alteración propilítica,	Se encuentra muy fracturada, con rellenos de clorita.	34	Concreto lanzado Marcos metálicos a 1.20m de distancia

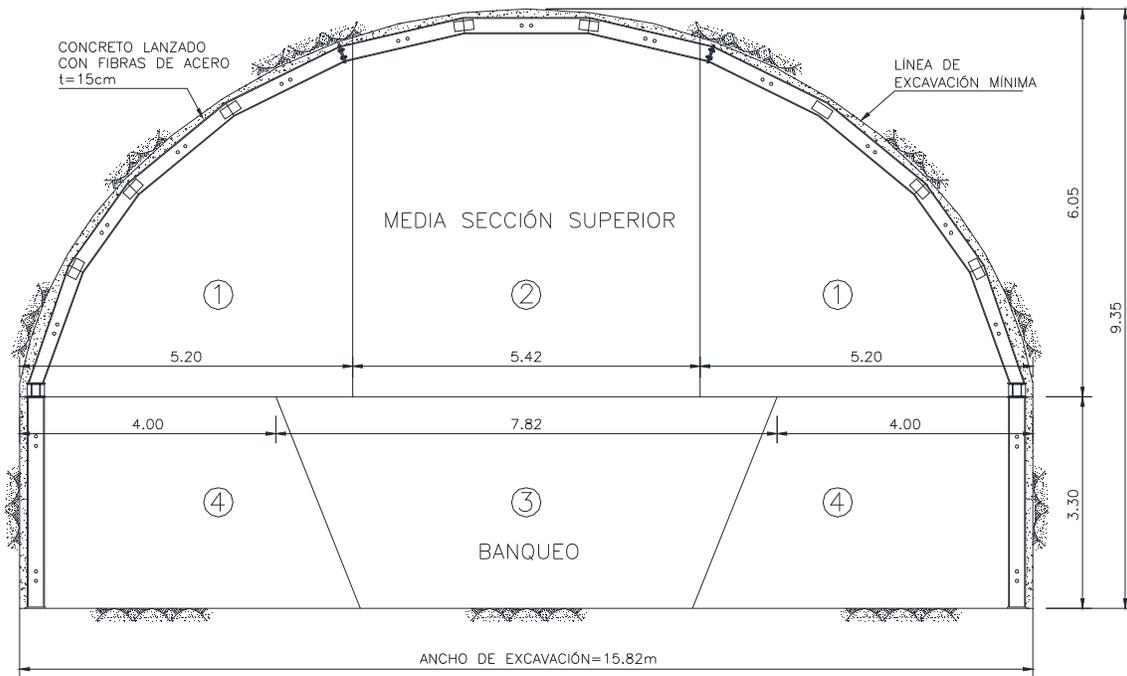


FIGURA III. 15. Sección transversal. Condición geotécnica D(+).

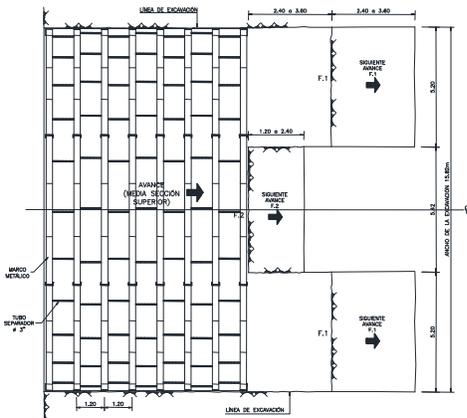
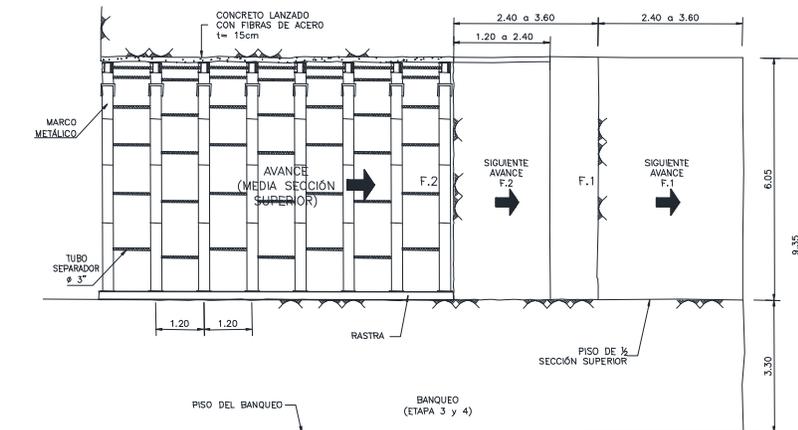


FIGURA III. 16. Perfil de avance en planta. Condición D(+).

FIGURA III. 17. Perfil de sostenimientos. Condición D(+).



Condición geotécnica D⁽⁻⁾.

RMR: 21 - 30 Roca de mala a muy mala calidad.

La excavación de la media sección superior se realiza en dos etapas. En la primera etapa se excavan los hastiales dejando un piloto central de 5 metros de ancho, la excavación se realiza con medios mecánicos(FOTOGRAFIA III.10), se ejecuta el siguiente tratamiento; se colocan marcos metálicos a una distancia de 0.80 m entre cada marco, se colocan 0.15 metros de concreto lanzado, el avance en la excavación es entre 1.60 y 2.40 metros(FIGURA III.18, III.19 y III.20). El banqueo se realiza en dos etapas, en la primera se trabajan los hastiales se colocan las patas de los marcos y se lanza concreto, en la segunda etapa se excava la zona central.



FOTOGRAFIA III. 10. Ejemplo de condición D⁽⁻⁾. Túnel “El Sinaloense” portal Mazatlán.

CADENAMIENTO	LITOLOGIA	ESTUCTURAS	RMR	SOSTENIMIENTO
668+596	Andesita con alteración propilítica, en algunas zonas la roca se encuentra disgregada.	Contacto litológico de andesita con toba lítica, roca en zonas disgregada, con dos familias de fracturas principales	28	Concreto lanzado reforzado con fibras de acero e= 0.15m Marcos metálicos a 0.80m de distancia.

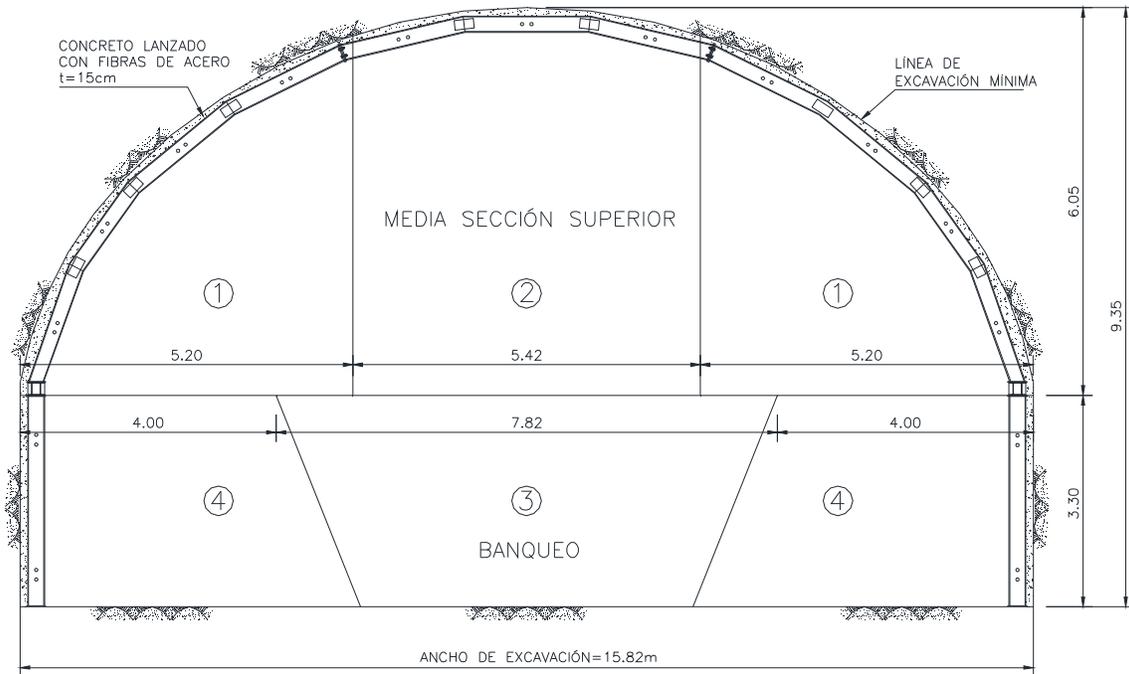


FIGURA III. 18. Sección transversal. Condición geotécnica D⁽⁻⁾.

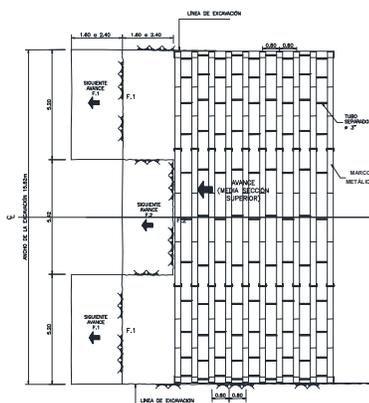
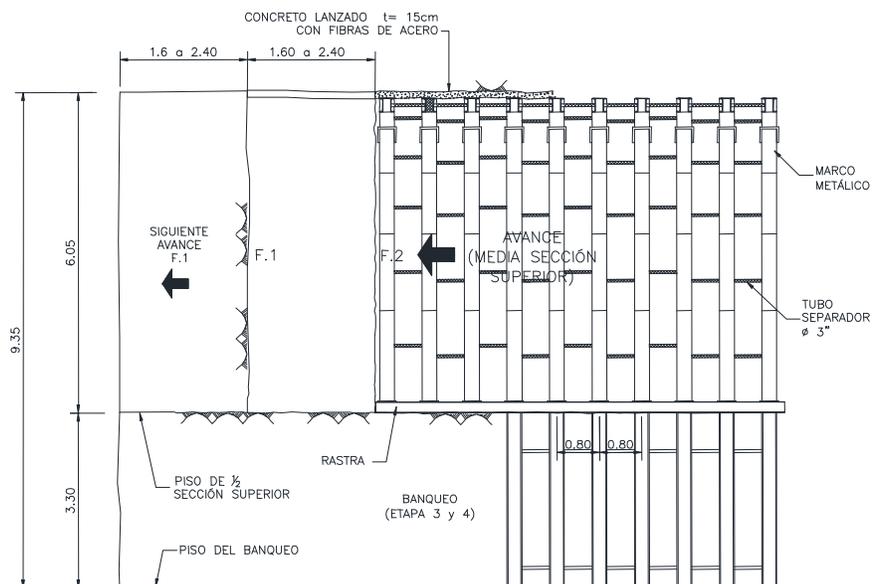


FIGURA III. 19. Planta de avance. Condición geotécnica D⁽⁻⁾.

FIGURA III. 20. Perfil de sostenimiento. Condición geotécnica D⁽⁻⁾.



Condición geotécnica E.

RMR ≤ 20 Roca de muy mala calidad.

La excavación de la media sección se realiza en dos etapas. En la primera etapa se excavan los hastiales dejando un piloto central, la excavación se realiza con medios mecánicos, la condición de muy mala calidad no permite avance mayor a 1 metro. Se utiliza el siguiente sostenimiento; inmediato a la excavación se lanza concreto, una capa de 0.05 metros de espesor, se colocan marcos metálicos a una distancia de 1.0 metro entre cada marco si el macizo rocoso actúa como un suelo puede variar la separación de los marcos se pueden colocar de 0.80 a 0.40 metros de distancia, una vez ubicados los marcos, se coloca 0.10 metros de concreto lanzado, en ésta condición se utiliza un enfilaje ligero en la zona de la clave, colocando anclas de 12m de longitud con un traslape de 1m (FIGURA III.21, III.22 y III.23). Los sostenimientos en esta condición deben de ir pegados al tope de excavación para evitar inestabilidad (FOTOGRAFIA III.11). El banqueo se realiza en dos etapas, en la primera se excava los hastiales, se colocan las patas de los marcos y se lanza concreto, en la segunda etapa se excava la zona central.



FOTOGRAFIA III. 11. Ejemplo de condición E. Túnel “El Sinaloense” portal Durango. Avance en dos fases hastiales y piloto central.

CADENAMIENTO	LITOLOGIA	ESTUCTURAS	RMR	SOSTENIMIENTO
668+805.8	Toba lítica con alteración argílica	Pseudoestratificación, zona con disgregación de la roca	19	Concreto lanzado reforzado con fibras de acero $e=0.15m$. Anclas radiales 1.0×1.0 Marcos metálicos con 1m de separación.

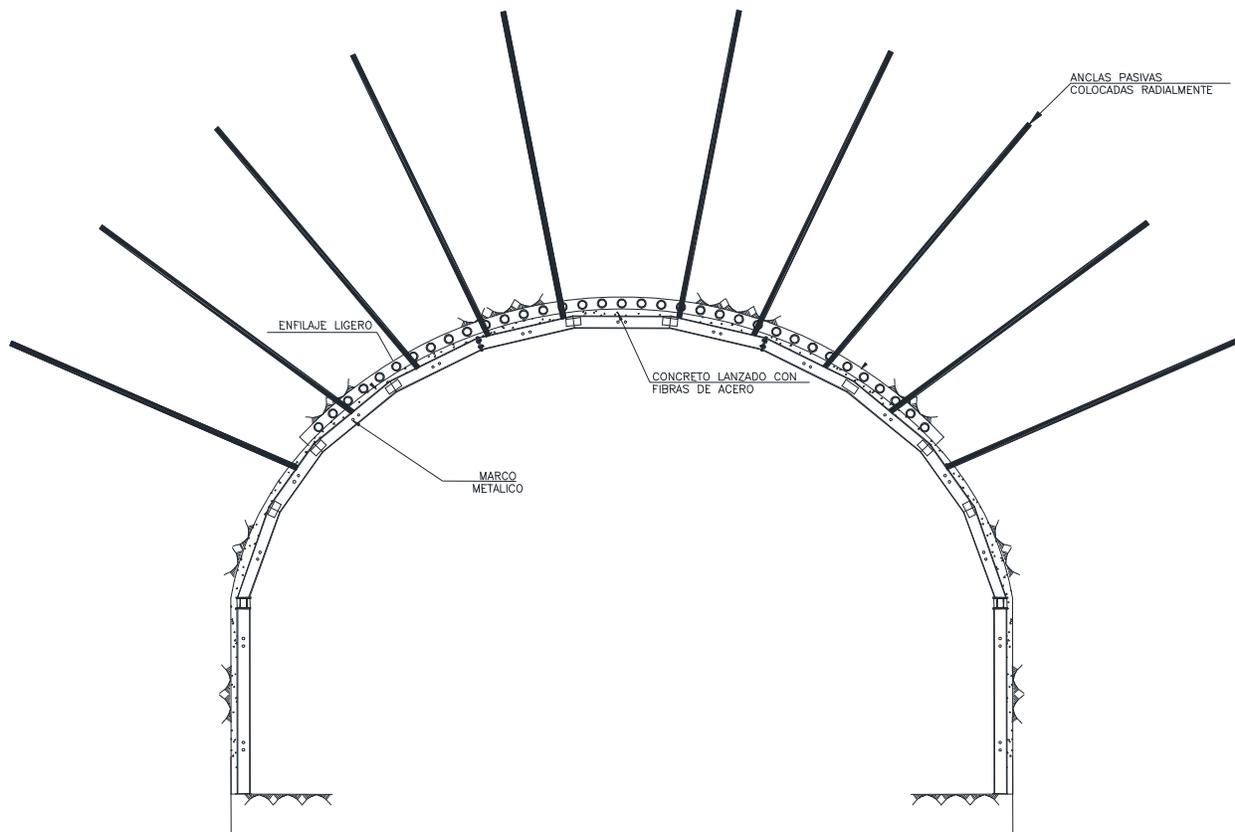


FIGURA III. 21. Vista transversal de los sostenimientos. Condición E.

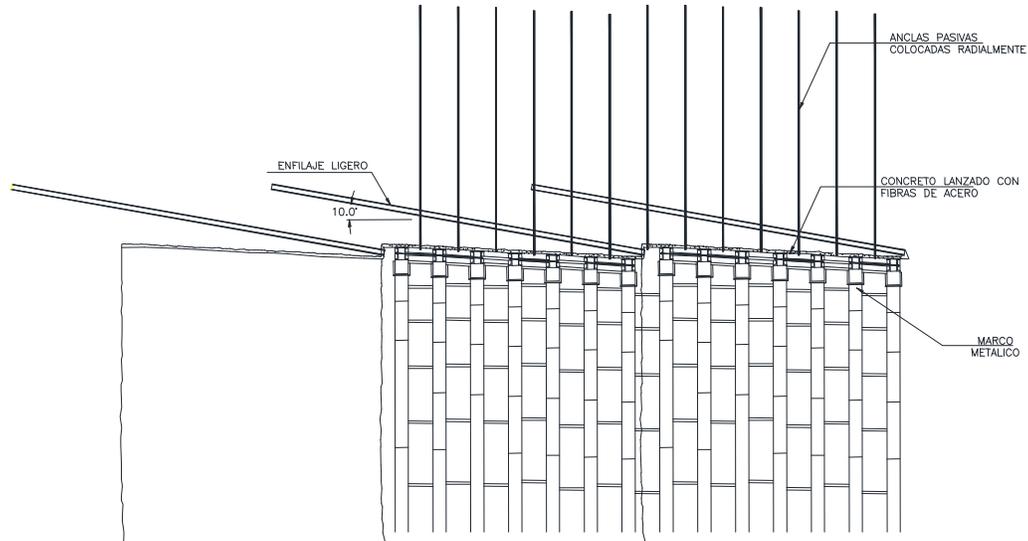


FIGURA III. 22. Perfil de sostenimientos. Condición E.

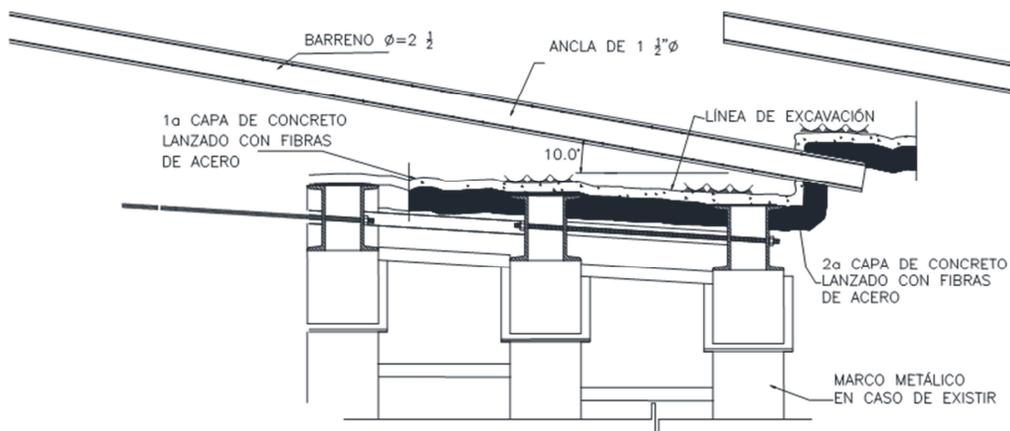


FIGURA III. 23. Detalle de concreto lanzado y marcos metálicos en condición E.

El sostenimiento se refiere a los elementos estructurales de sujeción del terreno, aplicados inmediatamente después de la excavación del túnel, con el fin de asegurar la estabilidad durante la construcción y después de ella, así como garantizar las condiciones de seguridad. En el túnel "El Sinaloense" se utilizaron principalmente 4 tipos de elementos; dos de sujeción concreto lanzado y anclas, y dos elementos de carga, marcos metálicos y enfilaje.

Elementos utilizados en el interior del túnel.

Concreto lanzado.

La técnica de concreto lanzado en el interior de un túnel principalmente es para evitar la erosión e intemperismo de la superficie excavada, es un sostenimiento de sujeción para el terreno, para una roca de buena calidad. Cuando se inicio con ésta técnica se utilizaba malla, para reforzar el concreto, hoy en día se ha mejorado y se ha implementado la utilización de fibras de acero.

En portales se utiliza malla electrosoldada, para reforzar el sostenimiento en taludes, en el interior del túnel se utilizó el concreto lanzado reforzado con fibras de acero, las ventajas que se obtienen con las fibras son las siguientes:

- Distribución homogénea del refuerzo de fibra en el concreto proyectado.
- Incrementando en la ductilidad del concreto proyectado.
- Alta resistencia a la tensión y flexión.
- Mayor seguridad debido a la deformación postfisuración.
- Aumento de la resistencia al impacto.
- Mejora de la adherencia.
- Reducción de la fisuración por retracción temprana.
- Mayor resistencia al fuego.

Los usos y aplicaciones más comunes del concreto lanzado son:

- Estabilización de excavaciones en tunelería y construcción subterránea.
- Revestimiento de túneles y cámaras subterráneas.
- Estabilización en la construcción de minas y galerías.
- Reparación de concreto.
- Restauración de edificios históricos.
- Trabajos de sello de filtraciones.
- Estabilización de zanjas.
- Estabilización de desgaste.
- Estructuras especiales portantes livianas.
- Aplicaciones artísticas.
- Estabilización de taludes.

Existen dos métodos para la colocación del concreto lanzado: la vía seca y vía húmeda.

Vía Húmeda.

El concreto lanzado vía húmeda implica el suministro de una mezcla lista y manejable de concreto proyectado compuesta por agregado, cemento, agua y aditivos de concreto proyectado. Para la proyección por vía húmeda se mezcla con aire y con acelerantes de fraguado(FOTOGRAFIA III.12).

El concreto proyectado vía húmeda es un método moderno y eficiente, aumenta el rendimiento, el nivel de rebote es reducido, menor emisión de polvo, reduce los costos por desgaste en el equipo de proyección, mejor calidad de concreto proyectado colocado.

Vía Seca.

El concreto proyectado vía seca es una mezcla compuesta por agregado, cemento, cualquier aditivo de concreto proyectado sin agua. Para la operación del proyectado, el concreto proyectado vía seca se mezcla con agua y acelerantes de fraguado en la boquilla y luego se aplica.

Es un método tradicional para aplicar el concreto proyectado y el más conocido. Sus ventajas son; alta resistencia muy temprana para sello preliminar o estabilización, tiempo de almacenamiento, sin desperdicio de concreto.



FOTOGRAFIA III. 12. Concreto lanzado en interior de túnel “El Sinaloense” portal Mazatlán.

Anclaje.

El anclaje es un sistema de sujeción de terreno para sostener el macizo rocoso cuando existen bloques o prevención en caso de que la roca se relaje, así se evita caídas o colapso. En el túnel “El Sinaloense”, se utilizaron anclas de fricción en los portales y en el interior de túnel se colocaron anclas de fricción en forma radial (FIGURA III.25 y III.26).

Anclaje tradicional.

Anclas activas; también llamadas anclas de tensión, son tensadas antes de su uso, de modo que se induce una compresión al terreno previa a la actualización de cargas exteriores. Su uso es, por lo tanto, recomendado para la fijación de estructuras al terreno y para la contención de excavaciones en las que debe asegurarse la ausencia de movimientos.

Una ancla está constituida por; un bulbo adherente formado por inyección de lechada de cemento, que funciona como anclaje pasivo de tendón, situado en el extremo más profundo del barreno; el tendón propiamente dicho, situado a lo largo del resto del taladro en lo que se denomina longitud libre y el anclaje activo, fuera del barreno y apoyándose en un elemento repartidor, que puede ser parte de la estructura fijada o un muro de contención, tablestacado o retícula en las excavaciones. El conjunto se protege, después del tensado, con posteriores inyecciones de lechada de cemento u otros fluidos.

Anclas Pasivas; conocidas como anclas de fricción se diferencian esencialmente de las anclas activas en que no son tensadas previamente, si no que reciben su tensión cuando el terreno, al movilizar su empuje activo, las hace trabajar. La diferencia es equivalente a las que existe entre esfuerzo y presfuerzo en las estructuras de concreto. Son utilizadas principalmente en la retención de tierras, excavación de túneles, contención de laderas y similares, en las que la existencia de pequeños movimientos del terreno no afectada la funcionalidad de la obra.

Consta de una varilla corrugada inserta en un barreno que se rellena de lechada de cemento con objeto de formar una adherencia continua del tendón contra el terreno a todo lo largo del ancla (FIGURA III.24).

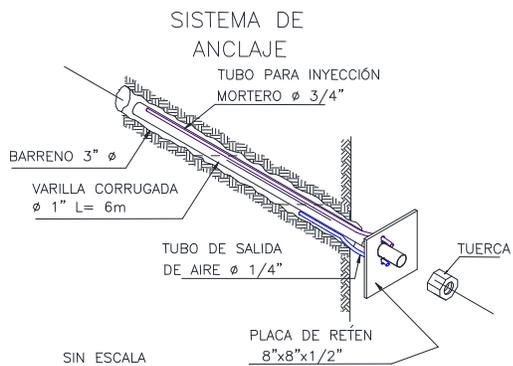


FIGURA III. 24. Ancla pasiva de fricción en interior de túnel.

FIGURA III. 25. Vista transversal de anclas (radiales) en interior de túnel.

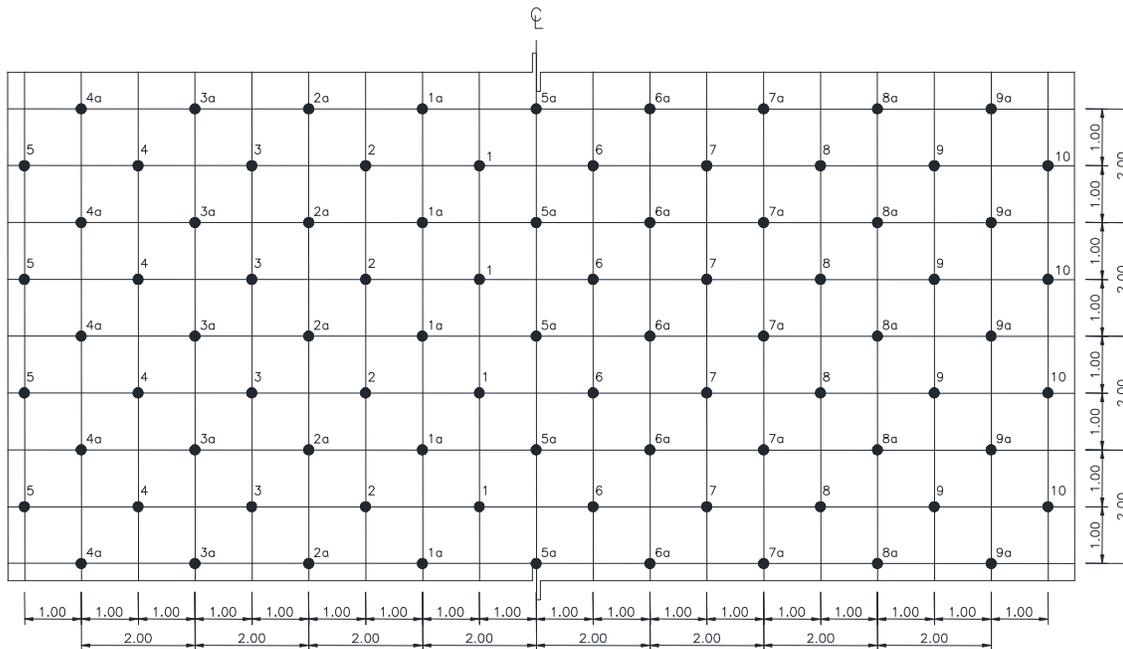
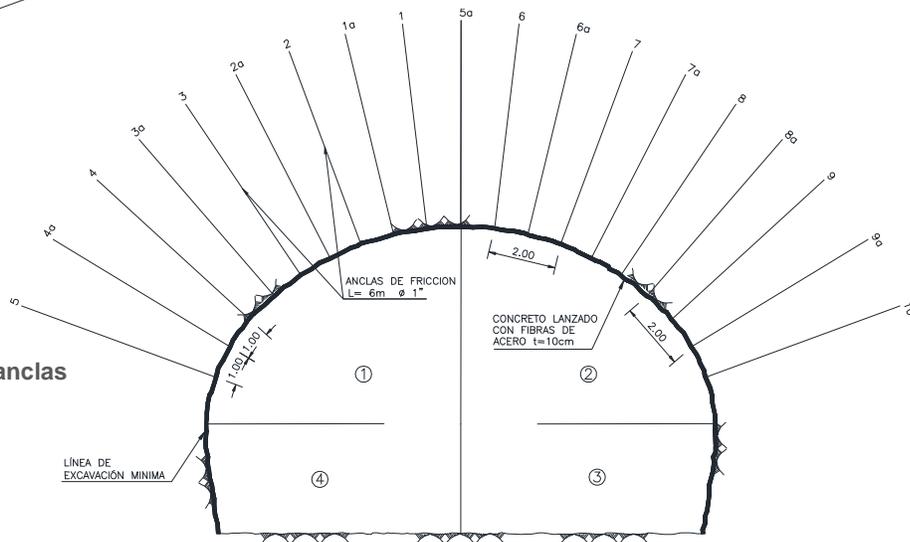


FIGURA III. 26. Vista en planta de anclas en interior de túnel en patrón 1.0x1.0.



FOTOGRAFIA III. 13. Barrenación de anclaje para sostenimiento C.

Marcos metálicos.

Los marcos metálicos son estructuras de carga, éstos reciben y al mismo tiempo transmiten las cargas del macizo rocoso en un movimiento de relajación. El tipo de marcos depende de la calidad del macizo rocoso y del ancho del túnel. (Romana Ruiz, 2001).

En una excavación de media sección superior, se inicia la colocación del marco con una base metálica (rastra), sobre ésta se colocan las secciones laterales y finalmente se coloca la zona central del marco(FIGURA III.27). En las zonas donde no exista contacto roca-marco debe colocarse madera a éste procedimiento se le conoce como retaque o ademe. Con el retaque se asegura el buen funcionamiento del marco respecto a la transmisión de carga. En la zona de banqueo se colocan las patas, que son la continuación del marco metálico.

La separación de los marcos está en función de la condición de la roca, varía entre 0.20, 0.40, 0.80, 1.00, 1.20 metros(FOTO III.14), y si la condición de la roca es muy mala, ese marco va acompañado de enfilaje o anclas radiales, dependiendo el caso.

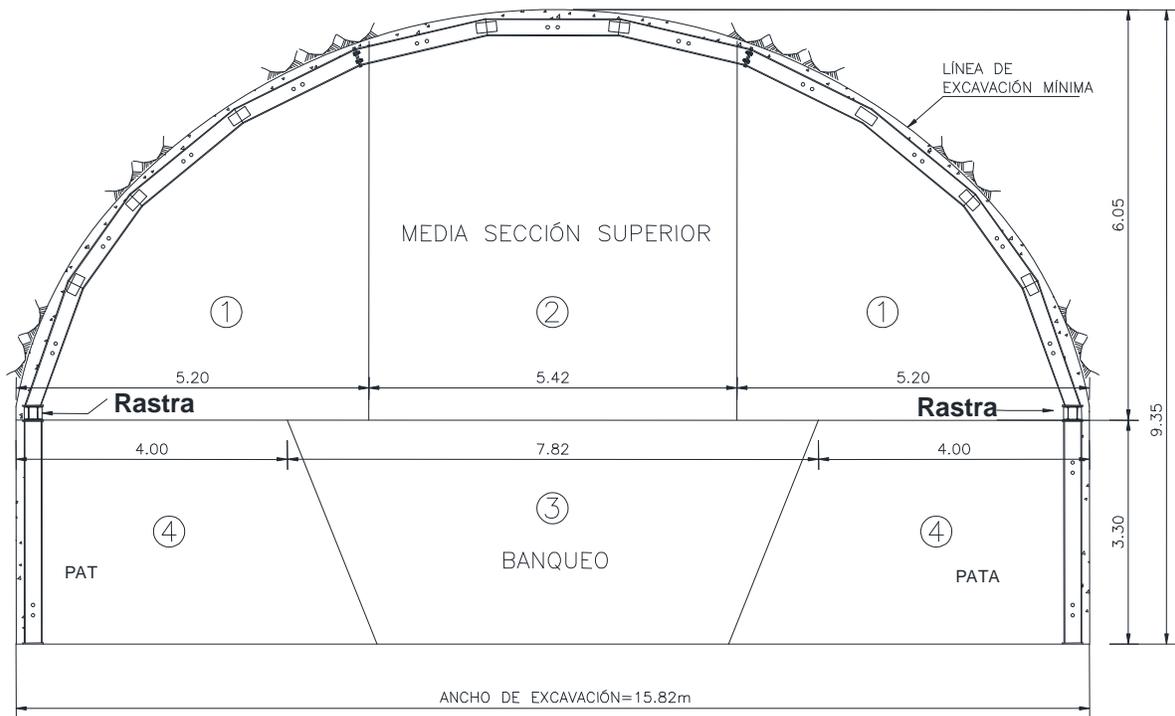


FIGURA III. 27. Sección transversal de marco metálico.



FOTOGRAFIA III. 14. Colocación de marcos metálicos, se observa la colocación en secciones.

Enfilaje.

Este método de sostenimiento también es conocido como paraguas o jaula de ardilla(FIGURA III.28), se colocan anclas de 1 ½ pulgadas en la clave de la excavación, para el sinaloense se utilizó una inclinación de 10° sobre la clave y las anclas de 6, 9 y 12 metros de longitud, dependiendo de la problemática del macizo rocoso.

En casos extremos de mala calidad de la roca se utiliza: enfilaje ligero, anclas radiales, marcos metálicos y concreto lanzado (FIGURA III.29).

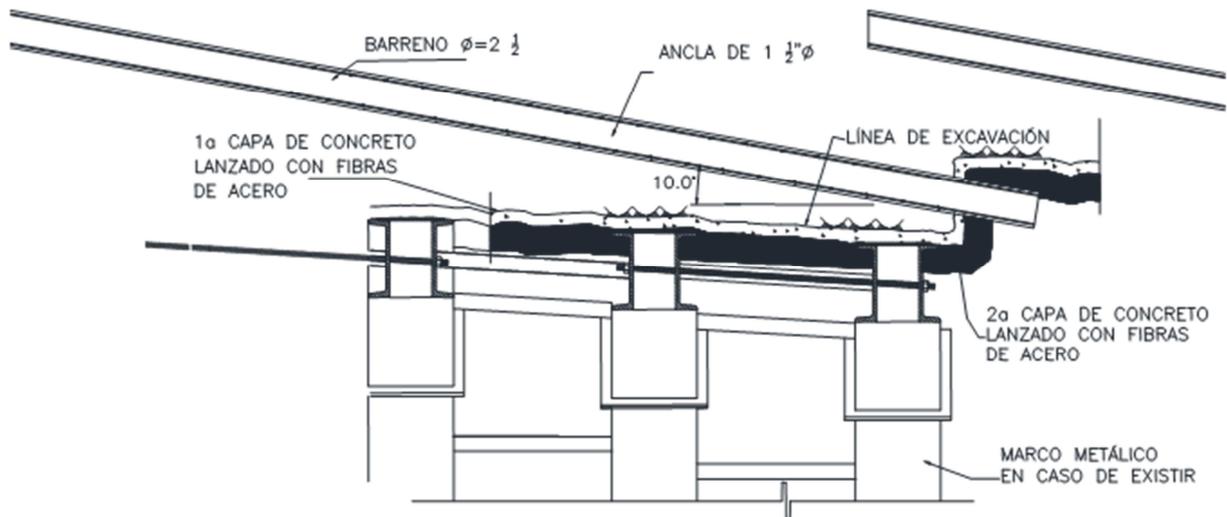


FIGURA III. 28. Detalle de marco metálico, concreto lanzado y enfilaje ligero.

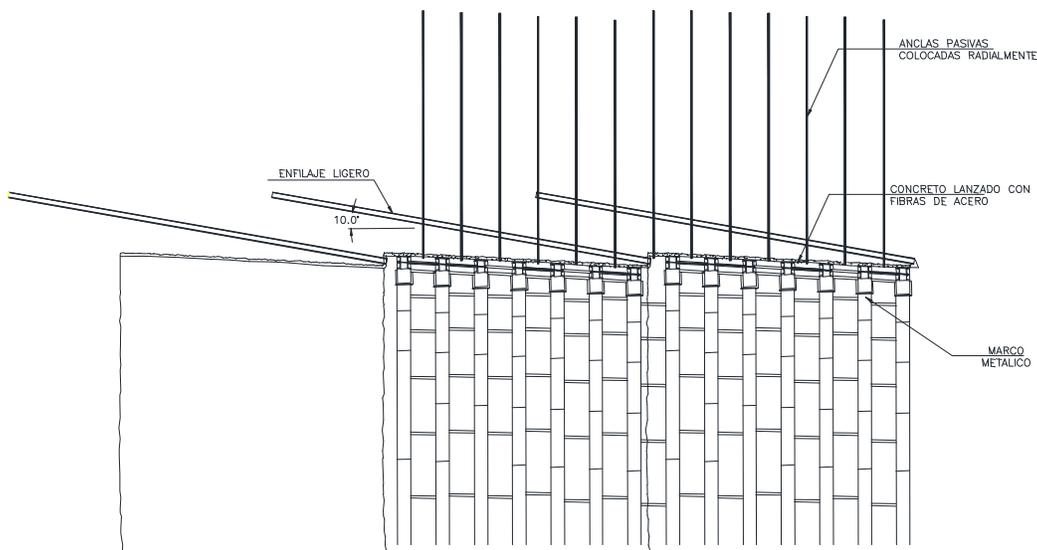


FIGURA III. 29. Perfil de sostenimiento con enfilaje ligero, anclas radiales y marcos metálicos, roca de muy mala calidad.

La FIGURA III.30 muestra la sección transversal de los elementos colocados para un macizo rocoso de muy mala calidad, la FOTOGRAFIA III.15 muestra el enfilaje colocado en el frente Durango del túnel "El Sinaloense" lugar que presentó RMR de 0 a 17.

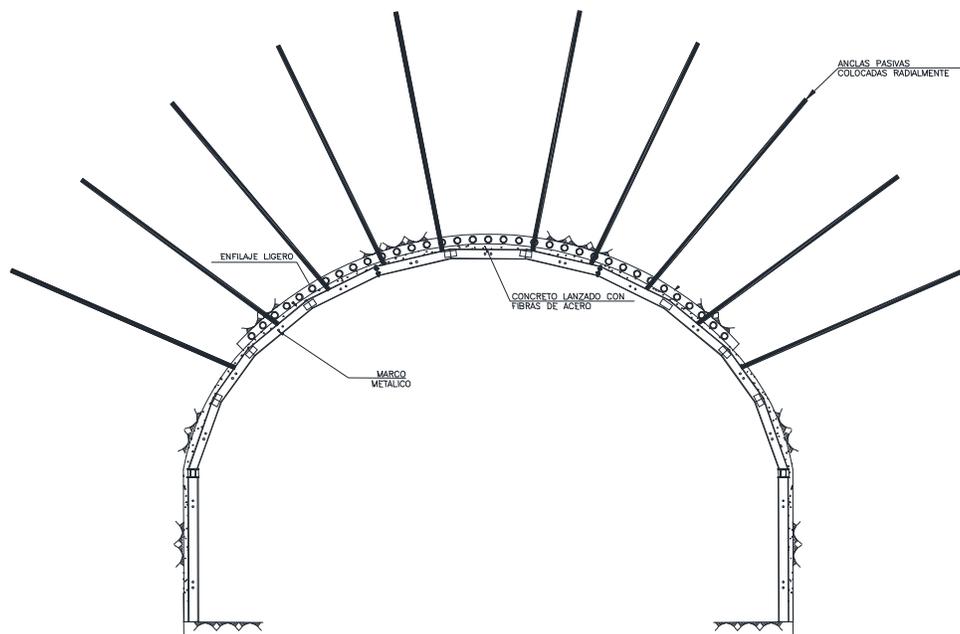


FIGURA III. 30. Sección transversal de sostenimiento con enfilaje, anclas radiales y marcos metálicos.



FOTOGRAFIA III. 15. Enfilaje colocados en el Túnel "El Sinaloense" portal Durango.

CAPÍTULO IV
PROCESOS
CONSTRUCTIVOS DE LOS
PORTALES

VI.1. Características del Túnel “EL SINALOENSE”.

El túnel “El Sinaloense”, es una excavación subterránea de 2,755 metros y 40 metros de obras falsas, iniciando en el kilómetro 668+425 al 671+ 219 que atraviesa la Sierra del Batel, tiene una cobertura rocosa máxima de 450 m sobre la clave. Cuenta con una excavación paralela, nombrada galería de escape o de emergencia, de menor dimensión (4 m x 4 m), tiene 7 conexiones con el túnel. Las 5 conexiones intermedias se encuentran ubicadas dentro de la bahía de emergencia, obra cuyo fin es apoyar al usuario en caso de cualquier contingencia.

Datos generales:

Longitud de túnel excavado	2,755 m
Longitud de túneles falsos	40 m
Carrera tipo	A2 –A4
TDPA ¹ de proyecto	4,500 vehículos
Velocidad de proyecto	90 a 110 km
Pendiente máxima	6%
Tipo de carpeta	Concreto hidráulico
	11.7 m
Ancho de corona	
Ancho de calzada	7.7 m
Espesor de sub-base	0.25 m
Espesor de concreto hidráulico	0.25 m
Sección tipo	Tangente
Abertura inicial de eje central	92.00°
Abertura lateral izquierda y derecho	57.64°
Altura de gálibo ²	5.5 m

Procedimiento constructivo.

La construcción de un túnel es un reto desde el punto de vista ingenieril. El portal es la primera impresión que tiene el usuario de un túnel y es el inicio de construcción del mismo. La excavación en interior de túnel, sostenimiento primario, revestimiento definitivo y la base hidráulica son las principales labores para la construcción. En este capítulo se describe de manera general la metodología de construcción, haciendo referencia a la construcción del “El Sinaloense”.

¹ TDPA Transito diario promedio anual.

² Gálibo: Es la dimensión máxima (alto y ancho) de cualquier vehículo, visto desde la superestructura como un contorno poligonal que deber quedar libre.

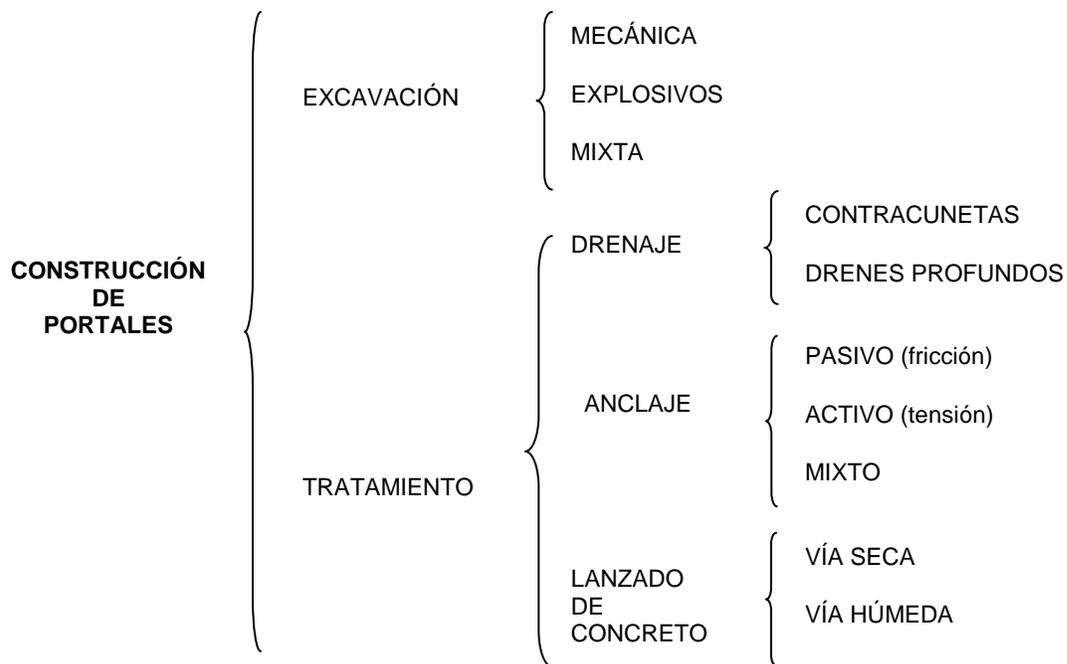
Metodología de construcción de un túnel.

El procedimiento constructivo de un túnel consta de una serie de pasos a seguir que no se pueden omitir debido a que todos juegan un papel importante y consecuente el uno del otro.

1. Construcción de portales.
2. Excavación de media sección superior.
3. Revestimiento primario o tratamiento.
4. Banqueo ó excavación de media sección inferior.
5. Revestimiento definitivo.
6. Obras complementarias.
7. Operación y mantenimiento.

VI.2. Portal.

El siguiente esquema simplifica la construcción de un portal.



Excavación.

La construcción de un portal se inicia con topografía, se marca la línea de inicio de excavación (ceros) del portal, así como de la construcción de la contracuneta, obra importante que permite dirigir el flujo de agua, que en temporada de lluvias puede provocar inestabilidad al portal. La construcción del portal se realiza excavando 6m verticales (altura sujeta a la maquinaria con la que se cuenta) con medios mecánicos, explosivos o ambos dependiendo de las condiciones del terreno.

Tratamiento.

El tratamiento del portal consta de una serie de elementos que trabajan de manera simultánea para sostener el macizo rocoso y protegerlo del intemperismo y la erosión, se inicia con el concreto lanzado reforzado con malla, anclas de fricción, tensión o ambas, drenes y contracunetas.

Concreto lanzado.

El concreto lanzado se utiliza para proteger al macizo rocoso del intemperismo y erosión, también trabaja rellenando fracturas. El concreto lanzado trabaja en el portal con malla electrosoldada que es colocada sobre el terreno antes de lanzar el concreto ó fibra metálica ésta se integra al concreto a razón de 40kg/m^3 (FOTOGRAFÍA IV.1)



FOTOGRAFÍA IV. 1. Tratamiento en talud, concreto reforzado con malla electrosoldada

Anclas pasivas o de fricción.

Las anclas pasivas, sirven para sostener el terreno natural cuando existen movimientos de deslizamiento producidos por fallas, fracturas, saturación por agua, etc. Las anclas de fricción no son tensadas previamente, éstas reciben su tensión cuando el terreno realiza un movimiento de empuje (FIGURA IV.1). Se utilizan en obras de retención de tierras, excavación de túneles, contención de laderas y similares, en las que la existencia de pequeños movimientos del terreno no afectaba la funcionalidad de la obra (FOTOGRAFÍA IV.2).

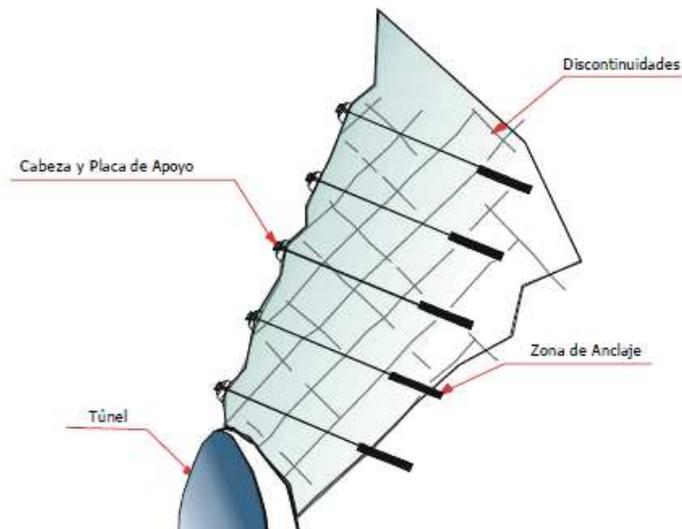


FIGURA IV. 1. Anclas pasivas o de fricción (ROBERTO UCAR NAVARRO, 2002).



FOTOGRAFÍA IV. 2. Barrenación de anclas en portal.

Anclas activas o de tensión.

Como es el caso de las anclas de fricción o pasivas, estas tienen la misma función, lo que las diferencia es la calidad del macizo rocosa a tratar. Las anclas activas, son tensadas antes de su uso, de modo que se induce una compresión al terreno previa a la actuación de cargas exteriores, se utilizan para fijar estructuras al terreno y para la contención de excavaciones en las que debe asegurarse la ausencia de movimientos (FIGURA IV.2 Y FOTOGRAFIA IV.3).

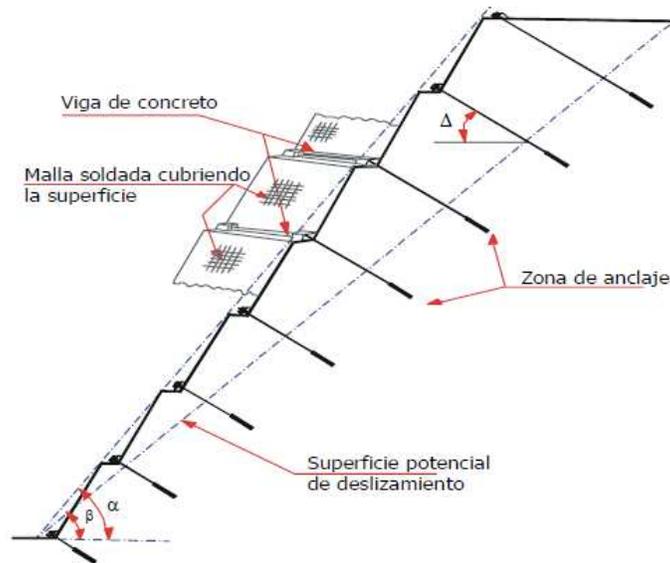
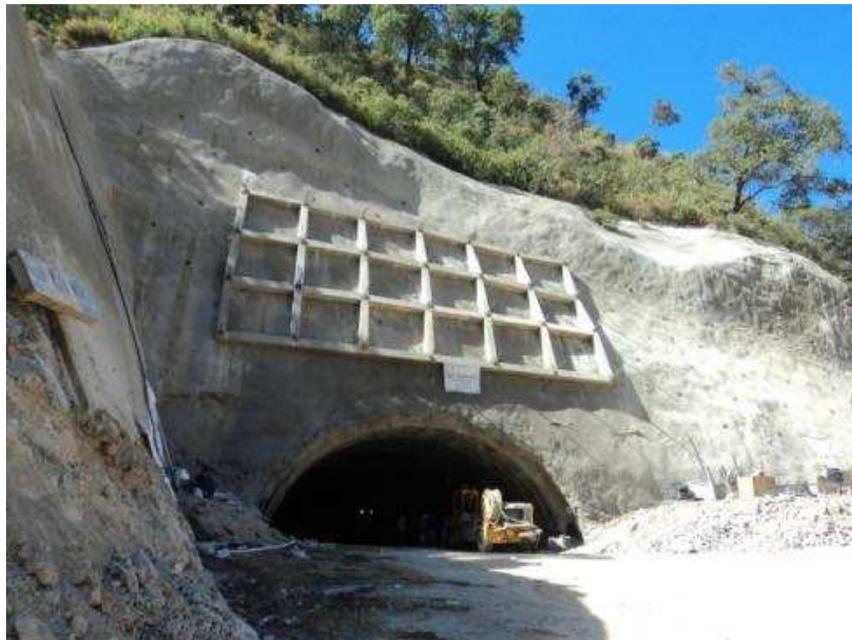


FIGURA IV. 2. Anclas activas o de tensión (ROBERTO UCAR NAVARRO, 2002).



FOTOGRAFÍA IV. 3. Anclas de tensión túnel Cerro Santa Lucia

Drenes.

Los drenes evitan la presión hidrostática producida por filtraciones del macizo rocoso, dan una dirección al flujo de agua subterránea evitando así daños al portal y sus elementos, son de 3m de longitud y 1 pulgada de diámetro (FIGURA IV.3).

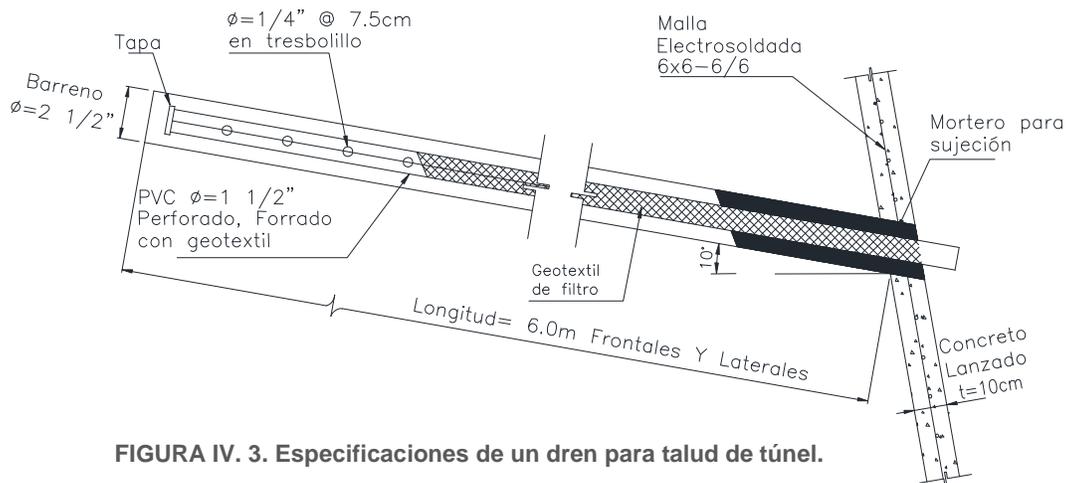


FIGURA IV. 3. Especificaciones de un dren para talud de túnel.

Contracuneta.

Es una obra de drenaje que se encuentra en la zona alta del portal, se construye para dar dirección al flujo de agua y evitar que en temporada de lluvias el agua dañe el portal (FIGURA IV.4).

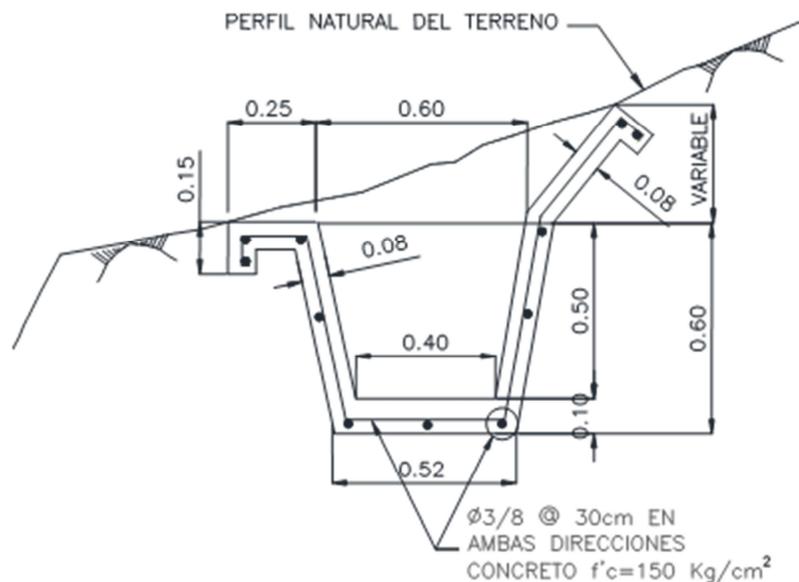
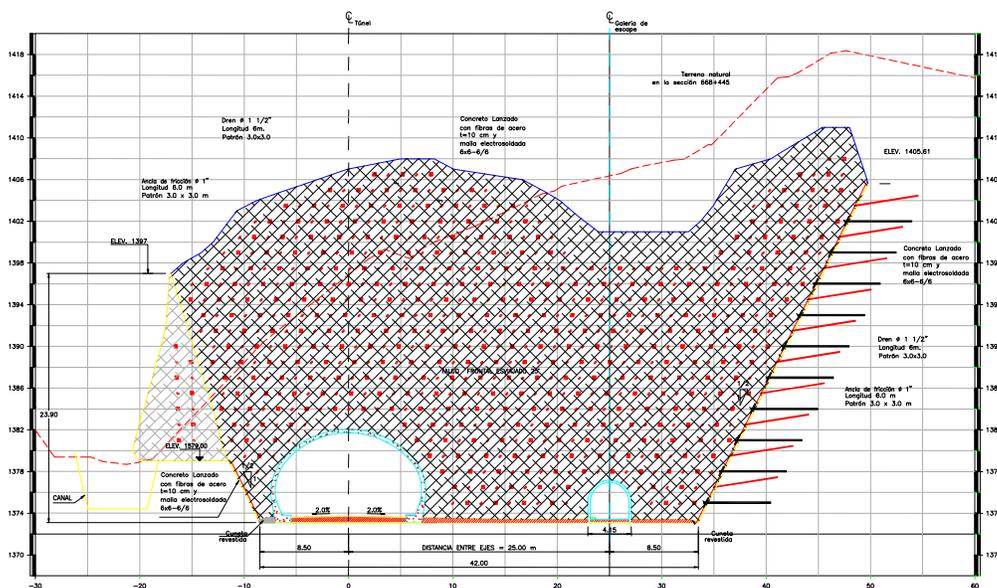


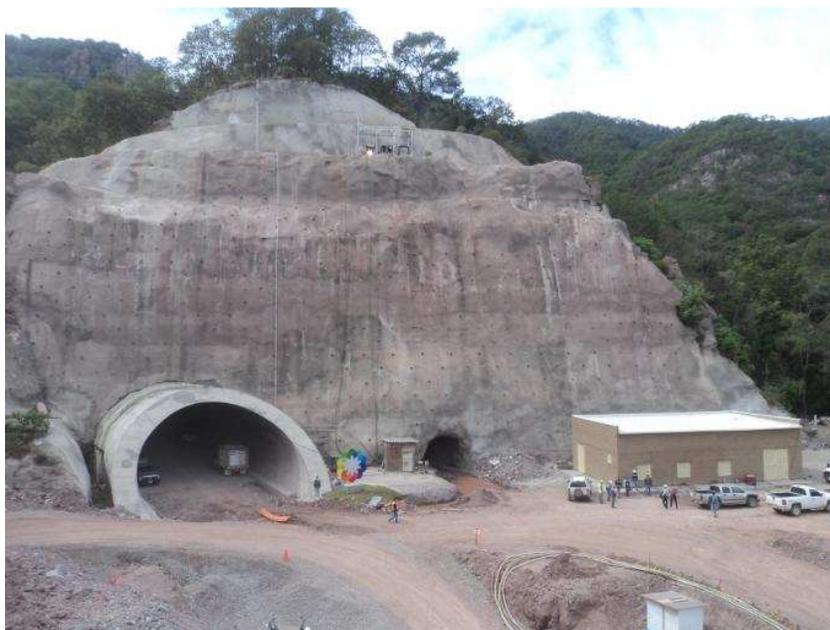
FIGURA IV. 4. Especificaciones para la construcción de la contracuneta.

Tratamiento del portal Durango del túnel “El Sinaloense”.

El Túnel “El Sinaloense” Portal Durango (FOTOGRAFIA IV.4), para el tratamiento del talud frontal se utilizó los siguientes elementos: concreto lanzado reforzado con malla electrosoldada, con un espesor de 0.10 metros, 340 anclas de fricción colocadas en un patrón a tresbolillo de 2x2, aproximadamente 200 drenes intercalados con las anclas (PLANO IV.1). Se construyó una contracuneta que desemboca por el lado izquierdo en una obra de drenaje y por el lado derecho en un arroyo natural.



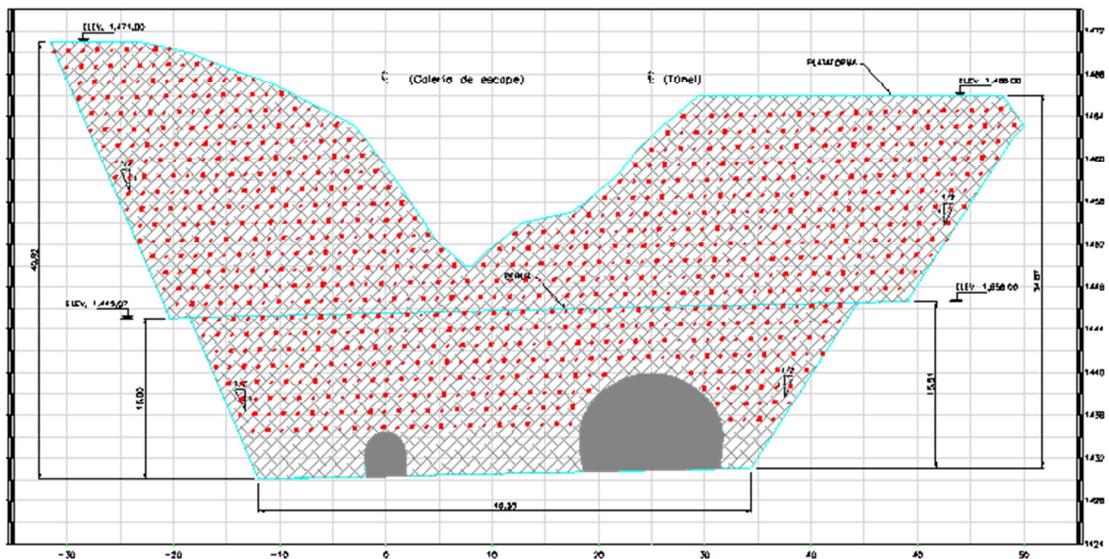
PLANO IV.1. Tratamiento de portal Durango en túnel "El Sinaloense".



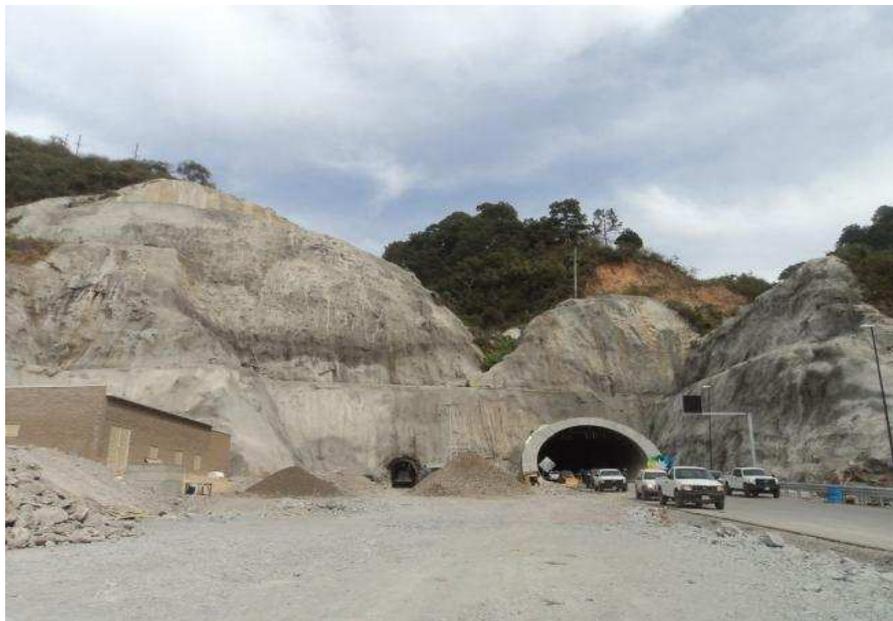
FOTOGRAFIA IV. 4 Portal Durango túnel “El Sinaloense”.

Tratamiento del portal Mazatlán túnel “El Sinaloense”

Túnel “El Sinaloense” Portal Mazatlán (FOTOGRAFIA IV.5) para el tratamiento de los taludes laterales y frontal se utilizó los siguientes elementos: concreto lanzado reforzado con malla electrosoldada con un espesor de 0.10 metros, se colocaron 743 anclas de fricción en un patrón a tresbolillo de 2x2 y drenes (PLANO IV.2). Se construyó una contracuneta, el lado izquierdo desemboca en una obra de drenaje y el lado derecho desemboca en un escurrimiento natural. Debido a la dimensión del portal y la inclinación se construyó una berma.

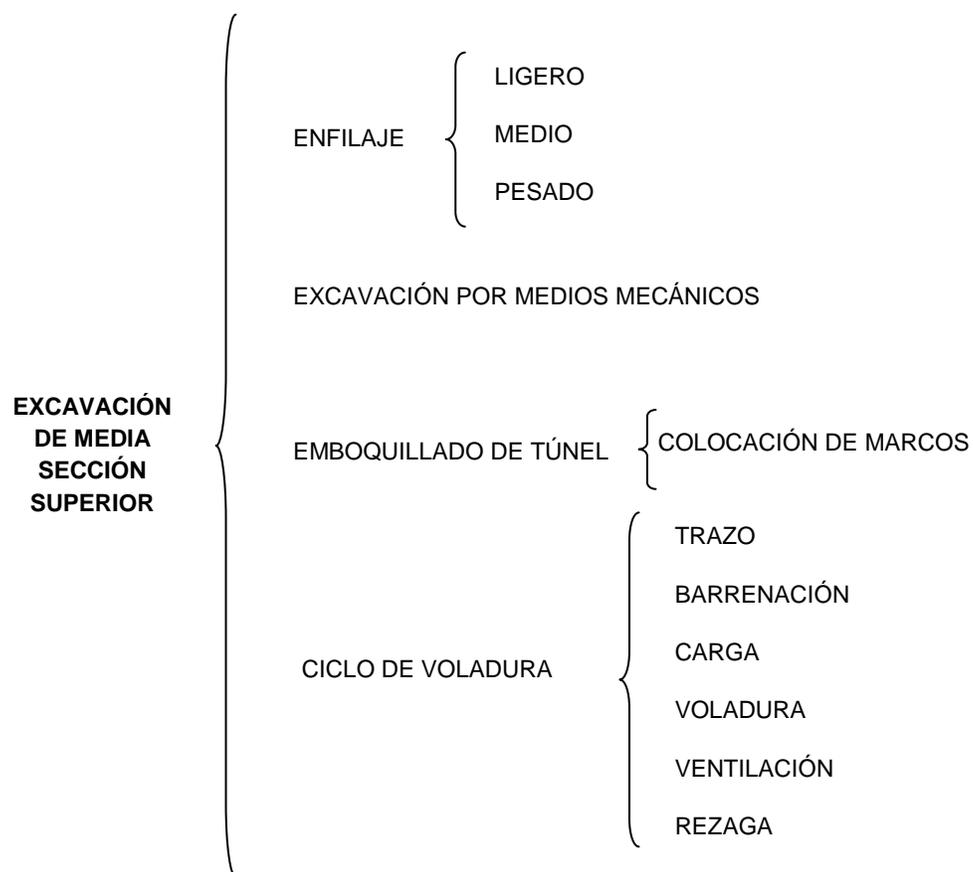


PLANO IV.2. Tratamiento de portal Mazatlán en túnel "El Sinaloense".



FOTOGRAFÍA IV. 5. Portal Mazatlán túnel “El Sinaloense”

VI.3. Excavación de túnel.



Inicio de excavación en túnel (media sección).

Concluidos los trabajos del portal, se inician los trabajos para la excavación en interior de túnel. La excavación se lleva a cabo en dos fases; media sección superior y banqueo. Una vez que se ha determinado la condición geomecánica de la roca y su tratamiento, se inicia la construcción de un sostenimiento denominado enfilaje (paraguas) ligero, medio, pesado o jet grouting, según las condiciones del terreno (FIGURA IV.5). Este enfilaje es de vital importancia para la seguridad del personal que labora en la zona, así como para los equipos, sobre todo en rocas de mala calidad y mantiene la estabilidad de la clave y hastiales del túnel.

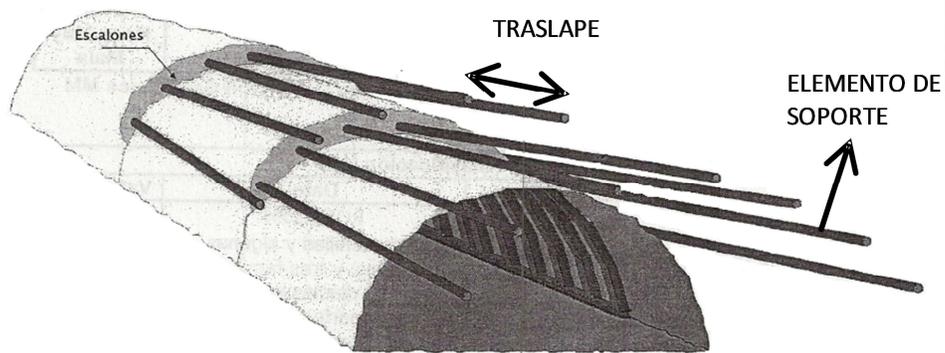


FIGURA IV. 5. Enfilaje o paraguas.



FOTOGRAFÍA IV. 6. Enfilaje (paraguas) en inicio de excavación.

Una vez colocado el paraguas (FOTOGRAFIA IV.6), se inicia la excavación del túnel que generalmente se realiza por medio mecánicos (excavadora con martillo hidráulico, etc.) para proteger la zona de la clave que en éste punto es muy frágil. Para el emboquillado del túnel se colocan marcos metálicos para reforzar la clave, colocados a una distancia efectiva dependiendo de la calidad de la roca.



FOTOGRAFÍA IV. 7. Inicio de excavación con medios mecánicos, en portal Durango del túnel "El Sinaloense".

El avance en la excavación se realiza dependiendo de la calidad geotécnica de la roca, en las figuras IV.6 a la figura IV.11 se muestra como debe llevarse el avance en cada condición geotécnica que se estableció para el túnel "El Sinaloense".

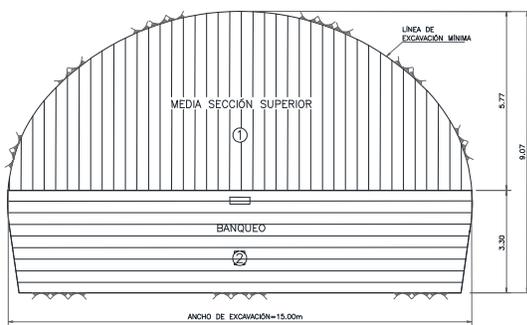


FIGURA IV. 6. Condición geotécnica "A".

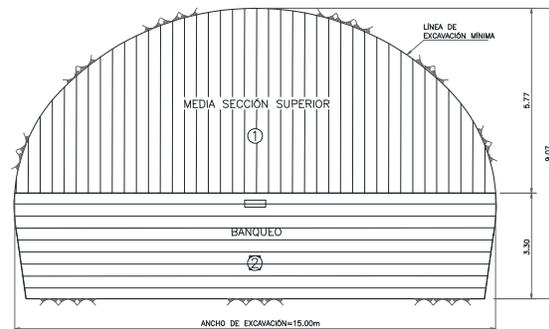


FIGURA IV. 7. Condición geotécnica "B".

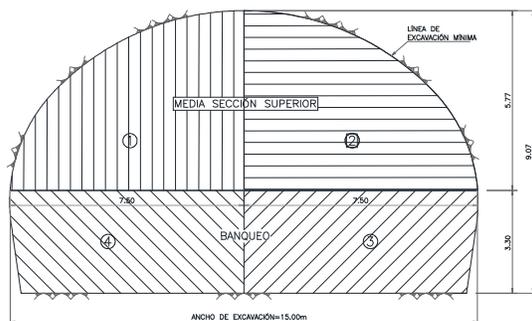


FIGURA IV. 8. Condición geotécnica "C".

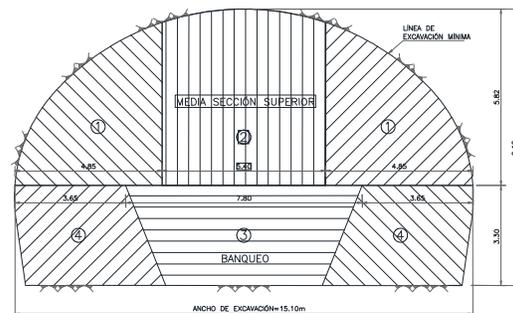
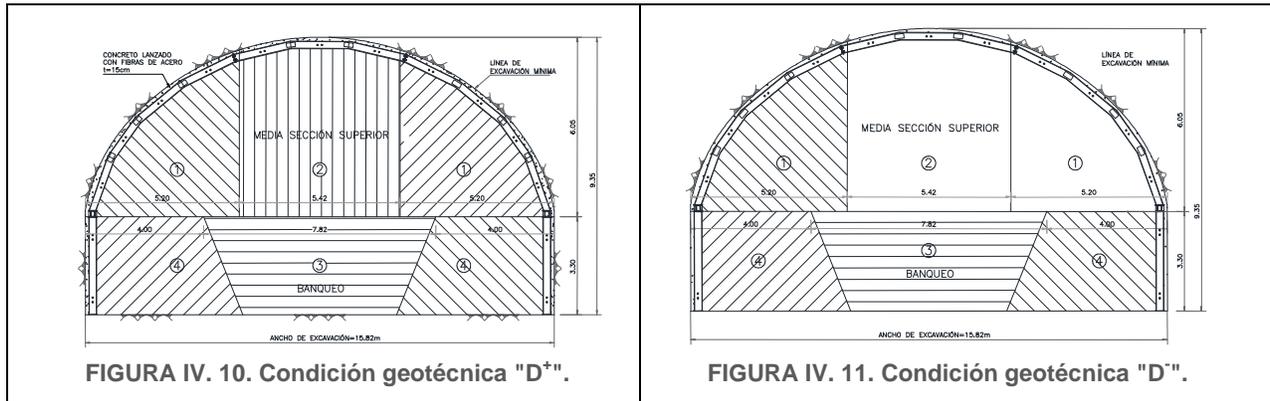


FIGURA IV. 9. Condición geotécnica "D".



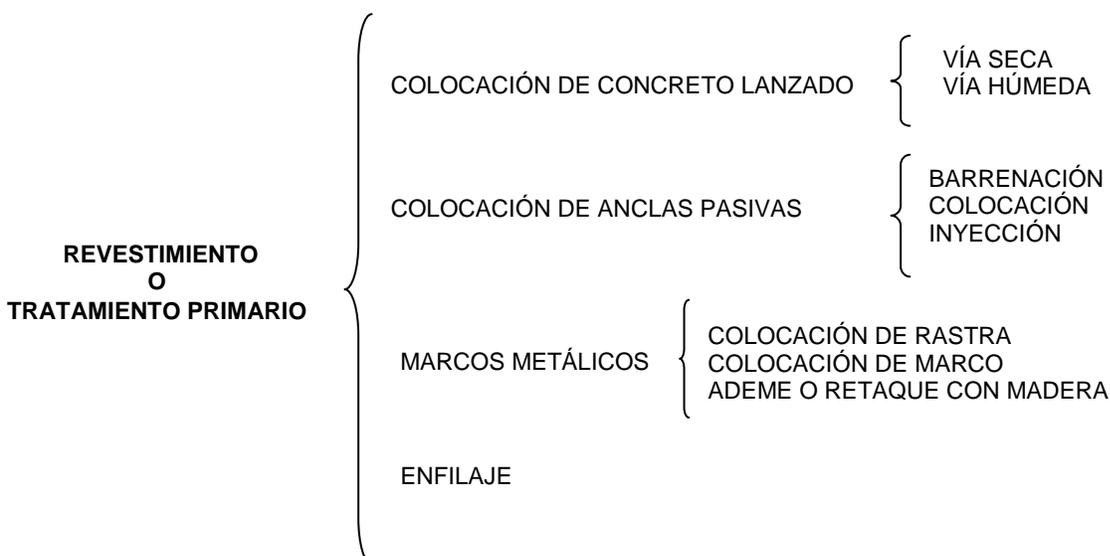
Cuando se ha tenido un avance, el túnel se encuentra estable y los medios mecánicos no son los adecuados para el siguiente avance de la excavación, se recurre al uso de explosivos. El manejo de estos materiales está incluido en un proceso de avance llamado ciclo de voladura, se realiza de la siguiente manera; se calcula la plantilla de barrenación y la cantidad de explosivos para obtener un avance de 2.5 a 3m, se marca el trazo del eje y se inicia con la barrenación utilizando equipos adecuados. Los barrenos, se limpian y se cargan de explosivo (hidrogel y/o ANFO)³ y se hacen detonar. Después de la voladura se da un tiempo alrededor de 30 min para permitir la ventilación (FOTOGRAFIA IV.8), para continuar con la rezaga del material y dar paso al tratamiento primario o revestimiento inicial.



FOTOGRAFÍA IV. 8. Ventilación del túnel, gases tóxicos derivados de voladura y equipos de trabajo.

³ Productos explosivos que depende la marca del proveedor y las capacidades de detonación para el uso requerido.

VI.4. Revestimiento o tratamiento primario.



Para realizar la excavación de un túnel es necesario; primero conocer las condiciones del macizo rocoso por medio de un levantamiento geológico detallado de campo del frente de excavación, donde se determinan las familias de fracturas, fallas, condición geotécnica, etc., éste levantamiento se realiza para corroborar la información de los trabajos previos a la construcción, para determinar si los sostenimientos son correctos o determinar su modificación. Con estos datos se determina las etapas de excavación (media sección completa, dos secciones, piloto central o pilotos laterales), la utilización de explosivos o medios mecánicos, sostenimientos con anclas pasivas, marcos, concreto lanzado o algún otro tipo de sostenimiento.

Para el Túnel El Sinaloense derivado de los trabajos previos se llegó a la siguiente clasificación geotécnica y el revestimiento primario

Condición geotécnica	No. De etapas de excavación	Anclas pasivas de fricción	Concreto lanzado (e)	Marcos metálicos(s)	Enfilaje frontal
A	1(m,s,s); 1(b)	P	5	-	-
B	1(m,s,s);1(b)	S(2.5x2.5m)	10	-	-
C ⁽⁺⁾	2(m,s,s);2(b)	S(2.0x2.0m)	10	-	-
C ⁽⁻⁾	2(m,s,s);2(b)	S(1.5x1.5m)	15	-	-
D ⁽⁺⁾	2(m,s,s);2(b)	-	15	1.2m	-
D ⁽⁻⁾	2(m,s,s);2(b)	-	15	0.8m	-
E	1(m,s,s);2(b)	-	10	1.0m	Si

m.s.s.= media sección superior; b=banqueo, s(anclas) =sistemático (patrón); p=puntual, e=espesor(cm); s(marcos) =separación(m)

TABLA IV. 1. Tabla de sostenimientos para la excavación en interior de túnel.

Concreto lanzado en interior de túnel.

El concreto lanzado se realiza con un robot jet tipo PM500 o similar (FOTOGRAFIA IV.9), se manipula hasta llegar al espesor necesario; 5, 10, 15 cm, el concreto de una resistencia $f'c= 250 \text{ kg/m}^2$ y con fibras metálicas que refuerzan al concreto, en una proporción de 40kg por m^3 . Para comprobar el espesor del concreto se colocan escantillones⁴.



FOTOGRAFÍA IV. 9. Equipo que se utiliza para lanzar concreto.

Anclas radiales (pasivas ó de fricción).

En el interior de túnel las anclas de fricción se colocan de manera radial, a diferencia de lo expuesto en portales, ya que ahí eran en superficie y con una inclinación. Las anclas radiales se colocan trasbolilladas de manera radial con respecto al eje del túnel, trabajan con el movimiento. Detalles expuestos en el capítulo III.

⁴ Escatillon: pieza en forma de T de 0.20 metros de longitud, se colocan en el macizo rocoso, introduciendo 0.10 metros y los 0.10 metros que quedan fuera se utiliza como testigo de espesor del concreto.



FOTOGRAFÍA IV. 10. Anclas radiales. Interior del túnel “El Sinaloense”

En el interior del túnel “El Sinaloense”, se utilizó dos tipos de anclas radiales, las inyectadas con mortero y las anclas tipo Swellex. Ésta es un perno de anclaje hecho de un tubo soldado doblado sobre si y sellado en un extremo. Se expande utilizando un flujo de agua de alta presión entregado por una bomba especial (FIGURA IV.6). El perno se expande al interior de un barreno (FIGURA IV.7).

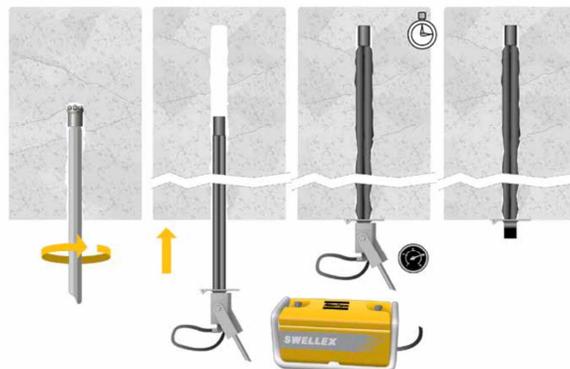


FIGURA IV. 12. Procedimiento para la colocación de un ancla Swellex.



FIGURA IV. 13 Perno de anclaje Swellex, antes y después de la inyección de agua.

Marcos metálicos.

En las zonas donde se presenta roca de mala condición geotécnica se utiliza como sostenimiento primario los marcos metálicos seccionados, en zonas donde se registra caídos o sobrexexcavaciones considerables en éste proyecto se recurrió al método de “trabes suecas”, éstas se construyen pegadas al macizo rocoso para que funcionen como un marco y puedan transmitir la carga. En la FOTOGRAFIA IV.11 se muestra seis trabes, colocadas en el perímetro de la excavación, después de éste proceso se lanza concreto para fijarlas al terreno y puedan transmitir la carga.



FOTOGRAFÍA IV. 11. Trabes suecas. Túnel “El Sinaloense” portal Mazatlán.

Enfilaje.

Se utilizan en suelos y roca, de mala y muy mala calidad, especialmente cuando la sección de avance es de dimensiones considerables y la estabilidad del frente puede estar comprometida.

Está constituido por micropilotes de tubería de acero estructural con una longitud de 12 metros para éste proyecto. Se colocan con una inclinación de 05° con respecto a la clave, ayuda a contener el material para realizar el siguiente avance en la excavación (FOTOGRAFIA IV.12).



FOTOGRAFÍA IV. 12. Barrenación para enfilaje en túnel "El Sinaloense" portal Durango.

VI.5. Banqueo.

BANQUEO
(Excavación de
media sección
inferior)

EXCAVACIÓN POR MEDIOS MECÁNICOS

CICLO DE VOLADURA

LANZADO DE CONCRETO

COLOCACION DE PATAS DE MARCOS METALICOS
(en caso de existir)

ANCLAJE (en caso de ser necesario)

El Banqueo se lleva acabo realizando el mismo procedimiento que en la media sección, si la roca es de mala calidad se utilizan medios mecánicos, para la excavación para roca de buena calidad, se utiliza voladuras. Para realizar la barrenación en banqueo se utiliza un trackdrill (FOTOGRAFIA IV.13) y en algunas ocasiones el jumbo⁵. Una vez que se ha realizado la excavación se realiza el tratamiento primario, se lanza concreto 5, 10, 15 cm de concreto (dependiendo del caso), se colocan las patas del marco metálico en las zonas donde hay marcos y anclaje si el terreno lo requiere (FOTOGRAFIA IV.14).

⁵ Equipo hidroelectro-hidraulico que se utiliza para la barrenación



FOTOGRAFÍA IV. 13. Banqueo al fondo se observa un track drill, con éste equipo se realiza la barrenación.



FOTOGRAFÍA IV. 14. Colocación de patas en banqueo.

VI.6. Revestimiento definitivo.

REVESTIMIENTO
DEFINITIVO

IMPERMEABILIZACIÓN
COLOCACIÓN DE ACERO
COLOCACIÓN DE CIMBRA
COLOCACIÓN DE CONCRETO
CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES FALSOS

Impermeabilización.

En la ubicación geográfica donde se encuentran los túneles de la Carretera Durango-Mazatlán se presentan condiciones climatológicas extremas, las filtraciones de agua dañan los equipos costosos de control y servicios utilizados en el interior de los túneles; frecuentemente las estructuras de concreto armado requieren un tratamiento especial (inyecciones) para evitar que se presenten filtraciones a lo largo de su vida útil.

En la construcción de los túneles se empleó un sistema de geomembrana impermeabilizante y geotextil, que consistió en un método de colocación y fijación mediante anclajes y soldadura térmica de lámina impermeabilizante.

El geotextil es un material textil permeable de estructura planar. Se utilizan como capas filtrantes (FOTOGRAFIA IV.15).

La geomembrana evita el ingreso de líquidos a la estructura dentro del túnel y ayudan a conducirlos a sistemas de drenaje que los evacuen. Se utiliza para la protección de concreto de revestimiento, protección de equipos, protección de la vía por humedad, para aumentar la vida útil del proyecto.



FOTOGRAFÍA IV. 15. Colocación de geotextil y geomembrana (Impermeabilización).

Revestimiento definitivo.

El revestimiento definitivo es el recubrimiento de concreto armado o simple colado en el sitio mediante cimbras, con el fin de proteger las superficies de la cavidad contra la erosión e intemperismo y proveer soporte adicional a la excavación.

El revestimiento definitivo se inicia habilitado el acero, una vez que se han colocado las varillas (diámetro, forma y longitud definida) se inicia la colocación de la cimbra metálica, la cual se construyó especial para la autopista Durango-Mazatlán, se alinea la cimbra para que quede en el lugar exacto. Una vez que se tiene las condiciones mencionadas, se procede al colado del túnel con concreto de resistencia $f_c=250$ kg/cm².



FOTOGRAFIA IV. 16. Revestimiento definitivo, construcción de zapata y guarnición.



FOTOGRAFIA IV. 17. Construcción de revestimiento definitivo en cuerpo de túnel.

El túnel falso se construye con la finalidad de proteger al usuario de la caída de materia vegetal o rocoso que se encuentra en la zona del portal. Se utilizó la cimbra y una contracimbra para construir el túnel falso (FOTOGRAFIA IV.18).



FOTOGRAFÍA IV. 18. Construcción de túnel falso.

VI.7. Obras complementarias.

OBRAS COMPLEMENTARIAS

- DRENAJE PLUVIAL
- COLOCACIÓN DE POZOS DE VISITA Y COLADERAS
- PAVIMENTACIÓN
- ILUMINACIÓN
- VENTILACIÓN
- SEÑALAMIENTO VIAL
- INSTALACIÓN DE VOZ Y DATOS
- EQUIPAMIENTO CONTRA INCENDIOS

Las obras complementarias son necesarias para darle un mejor funcionamiento al túnel, así como darle una mejor vista al usuario. El drenaje pluvial, la colocación de pozos de visita y coladeras son indispensables para evitar los encharcamientos, así como accidentes.

La pavimentación del túnel, es una capa de concreto hidráulico de 25 cm de espesor, la cual será la capa por la que rodaran los vehículos (FOTOGRAFIA IV.19).

Para la correcta operación de un túnel se requiere de iluminación, ventilación, señalamiento vial, instalación de voz y datos, y equipos contra incendios (FOTOGRAFIA IV.20).



FOTOGRAFÍA IV. 19. Colocación de concreto hidráulico en pavimentación.



FOTOGRAFÍA IV. 20. Equipos de seguridad; contra incendios, iluminación, cámaras de video.

En la FOTOGRAFIA IV.21, se observa el sistema de ventilación que se implementó para los túneles de longitud mayor a 700 metros. En la FOTOGRAFIA IV.22 se observa el equipo de señalamiento que se colocó en el interior y exterior del túnel.



FOTOGRAFÍA IV. 21. Equipos de ventilación.



FOTOGRAFÍA IV. 22. Equipos de ventilación y señalamiento.

VI.8. Operación y mantenimiento.

Ésta obra complementa la modernización de la red carretera para librar la zona montañosa de la Sierra Madre Occidental. Se espera que en un plazo de 20 a 25 años se amplíe, esto es, convertir la vialidad A2 en A4. Durante la etapa de operación las únicas actividades que se realizan son la operación de las plazas de cobro, alumbrado de túneles y las de vigilancia y servicio médico emergente, estas últimas mediante la Policía Federal Preventiva. Para el mantenimiento se realiza conservación rutinaria y rehabilitación. La primera básicamente consiste en aplicar riesgos de sello a la carpeta asfáltica, preferentemente antes de la época de lluvias, cortado de vegetación en taludes y mantenimiento de señalamiento.

Durante la operación es necesario el servicio de agua potable, luz, drenaje y comunicaciones, todo ello para el funcionamiento de las plazas de cobro y de los centros de control, en los cuales se conectarán, mediante fibra óptica, todos los servicios inteligentes de los túneles.

CAPÍTULO V.
COMPARATIVO ENTRE
RESULTADOS
PROYECTADOS Y REALES

V.1. Túnel “El Sinaloense”.

En éste capítulo se expone el sostenimiento primario que se encuentra colocado a lo largo de 2,756 metros de excavación del túnel “El Sinaloense”, así como las dificultades geológico-geotécnicas que se presentaron durante la excavación.

Geología del túnel “El Sinaloense”.

Los estudios previos a la construcción de un túnel permiten conocer el terreno de manera general para iniciar los trabajos y tomar precauciones antes, durante y después de la ejecución. Se elaboró un plano geológico-geotécnico con los estudios realizados por métodos geofísicos (sísmico y eléctrico), levantamiento geológico superficial y 6 barrenos exploratorios, de los cuales solo 2 llegaron a la zona del túnel a la altura de los portales.

Durante la excavación del túnel en cada avance, se realiza un levantamiento geológico del frente de excavación para verificar el comportamiento geomecánico del macizo rocoso y cambiar los sostenimientos en caso de ser necesario. Con los datos recabados se realiza el plano geológico real del túnel. A continuación se describe la litología del túnel “El Sinaloense” de manera general de acuerdo a las observaciones de campo.

Descripción de las rocas en interior de túnel.

La litología que se encuentra en los 2,796 metros de longitud del túnel “El Sinaloense”, son rocas ígneas extrusivas. Toba lítica (composición química ácida) es la roca reciente que sobreyace a una andesita (composición química intermedia)

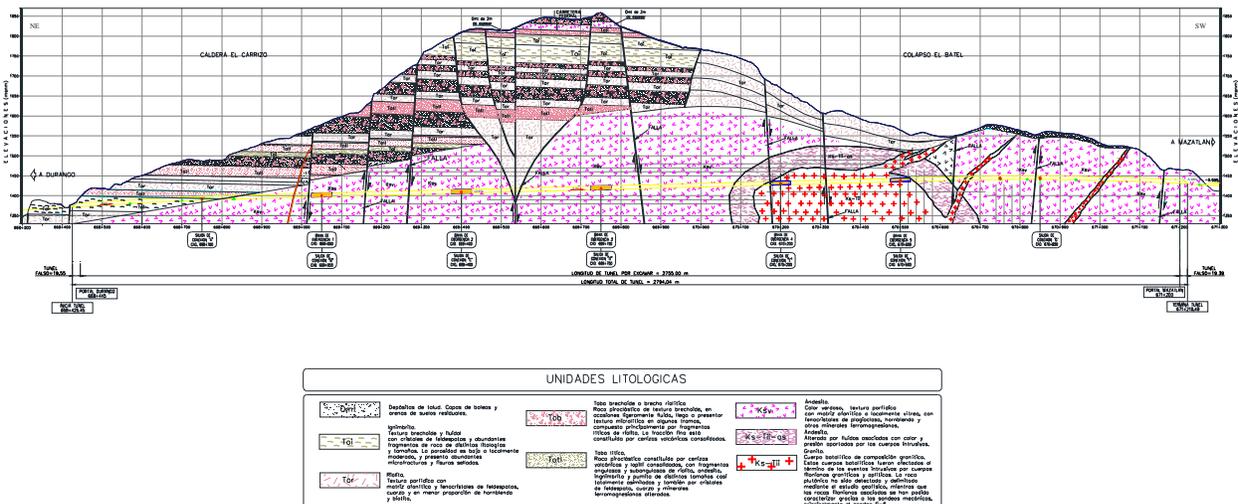
El túnel inicia en el kilómetro 668+445, se observa una toba lítica de color rojizo, con clastos de diversos tamaños variando de subangulosos a redondeados en algunas zonas se encuentra silicificada generando una roca de muy buena calidad geotécnica, en el kilómetro 668+802 se encuentra una falla de tipo normal, se observan indicadores cinemáticos (estrias, espejos, sigmoides), la toba lítica se encuentra muy alterada, con humedad y en algunas zonas con agua fluyendo entre las fracturas, se clasifico como una roca de muy mala calidad geotécnica, lugar de mayor problemática en la excavación. En el km 668+960 la roca sobreyace a una andesita de color verde con textura porfídica, con fenocristales de plagioclasas, el contacto es discordante con una dirección de echado/echado de 100°/45°.

La andesita de color verde y textura porfídica, con fenocristales de plagioclasas, muestra diferentes grados de alteración en diversas zonas dejando coloraciones violetas y blanquecinas. A lo largo de la excavación se observaron diversas texturas siendo la porfídica la más frecuente, en zonas de mineralización de sulfuros se observan cristales de piritita y galena a simple vista, también se presenta una andesita

de hornblenda con textura porfídica los fenocristales son de anfíbol. La andesita se observa hasta el término del túnel en el km 670+202.

Comparativo entre la geología de proyecto y la de construcción.

Con los datos de los estudios geofísicos y geológicos de superficie se realiza el plano geológico del área donde se encuentra proyectado el túnel. Durante la construcción del túnel “El Sinaloense” se realizó un levantamiento geológico en cada avance, dependiendo de la condición geológica los avances variaron entre 0.5 y 4 metros de distancia, con estos levantamientos se construyó el plano geológico de construcción, donde a diferencia del proyecto observamos solo un cambio de litología de toba lítica a andesita, la zona en que el proyecto indica roca intrusiva “granito”, se encuentra una mineralización de sulfuros, la andesita presenta cristales de galena y pirita observados a simple vista.



PLANO V.I. Plano geológico de proyecto

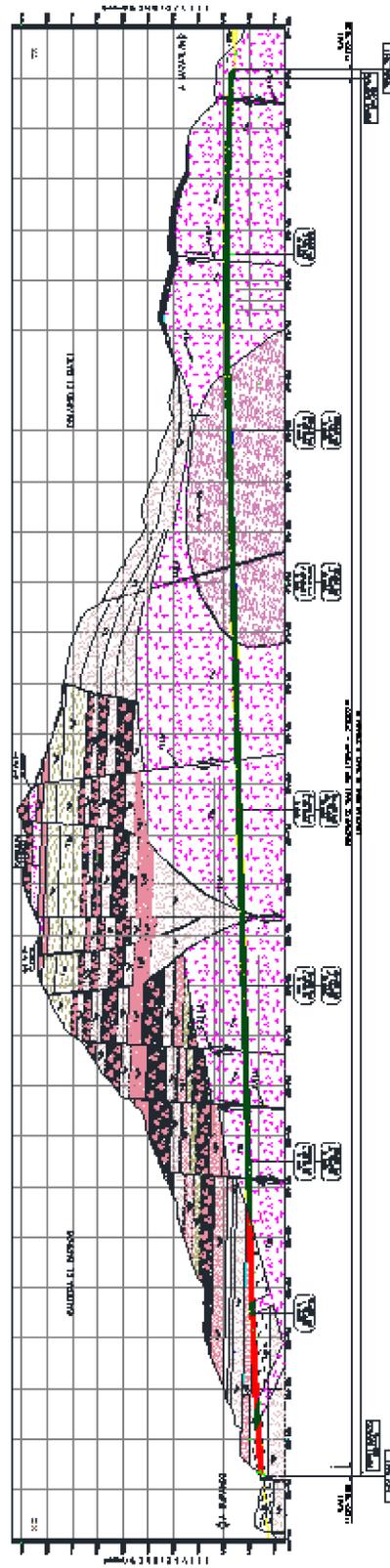
Plano geológico corregido

El plano geológico corregido se realiza, colocando la geología que se levantó durante la excavación del túnel, como se puede observar en el perfil longitudinal, donde se muestran solo dos tipos de litología, una toba lítica y andesita (FIGURA V.I). La toba lítica presenta alteraciones, como silicificación que beneficia a la construcción, alteración argílica, que en zonas disgrega la roca provocando inestabilidad y un caído importante. En la andesita se observaron cambios texturales, fracturamiento y pseudoestratificación en algunas zonas. En el perfil longitudinal se observa los cambios litológicos y en el plano V.2 se observa la reconstrucción de la geología con los datos que se levantaron durante la excavación del túnel.

PERFIL LONGITUDINAL



ILUSTRACION V. 1. Perfil longitudinal de geología del Túnel "El Sinaloense".



ILUSTRACION V. 1. Perfil longitudinal de geología del Túnel "El Sinaloense".

V.2. Condiciones estructurales del túnel.

En el interior del túnel encontramos diversas estructuras que intervienen directamente en el avance de la excavación, pueden llegar a ser perjudiciales al grado de detener el avance de la obra. Durante la excavación encontramos la existencia de fallas, fracturas, pseudoestratificación, discontinuidades, etc. En cada avance de la excavación se colecta la información necesaria de las estructuras; rumbo, echado, estado y composición mineralógica de los rellenos, etc. Con los datos de las estructuras principales se realizaron los siguientes estereogramas.

A continuación se presenta los estereogramas de las zonas donde se presentó mayor problemática en la construcción. Los estereogramas se elaboraron con el programa Dips, herramienta importante para evaluar el seguimiento de la obra.

Kilómetro 668+840 a 669+500, toba lítica roca muy alterada, en éste tramo se presentó un caído importante. En ésta zona se tuvieron condiciones críticas E, D-, D+.

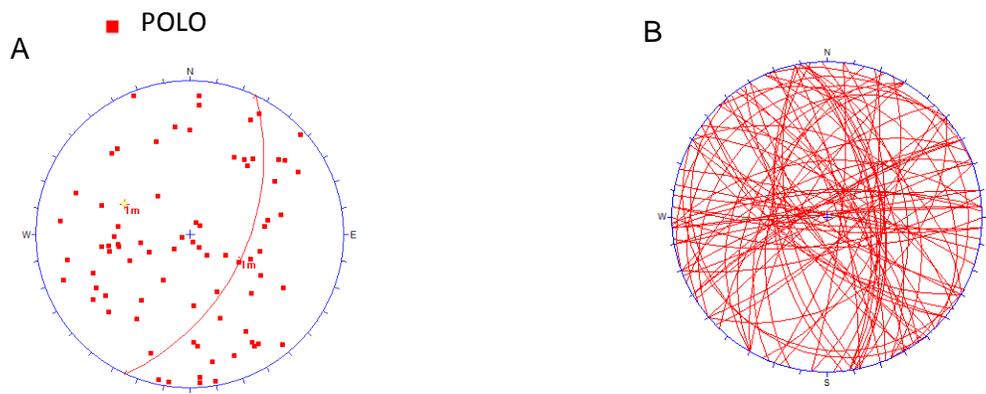


FIGURA V. 1 A. Estereograma con polos de los planos de fallas y fracturas, se muestra el plano de la falla que provocó el caído en el kilómetro 668+800, B. Se muestran los planos de las fallas y fracturas en la zona mencionada.

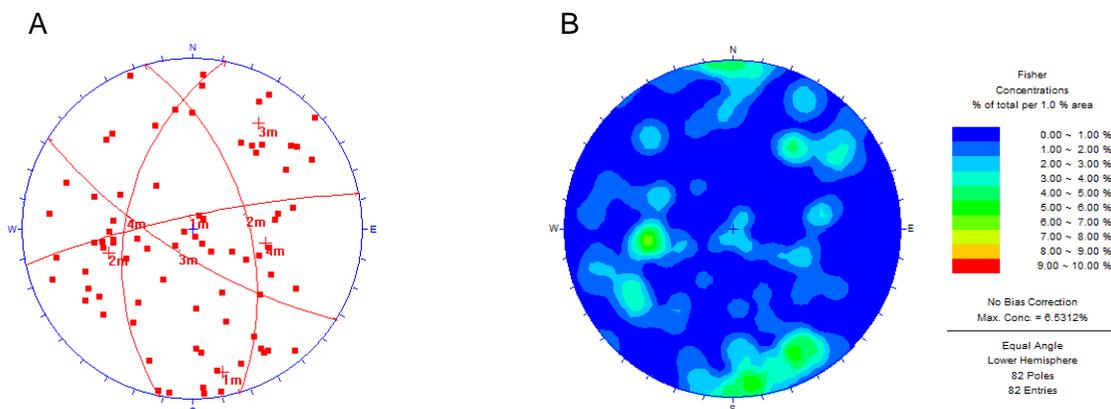


FIGURA V. 2. A. El estereograma muestra los planos donde se alojan las estructuras principales, B. Estereogramas de densidad de las estructuras.

Kilómetro 669+580 a 670+080 zona con condiciones B y C. La roca se encuentra muy fracturada no hay presencia de agua, y las fracturas se encuentran cerradas.

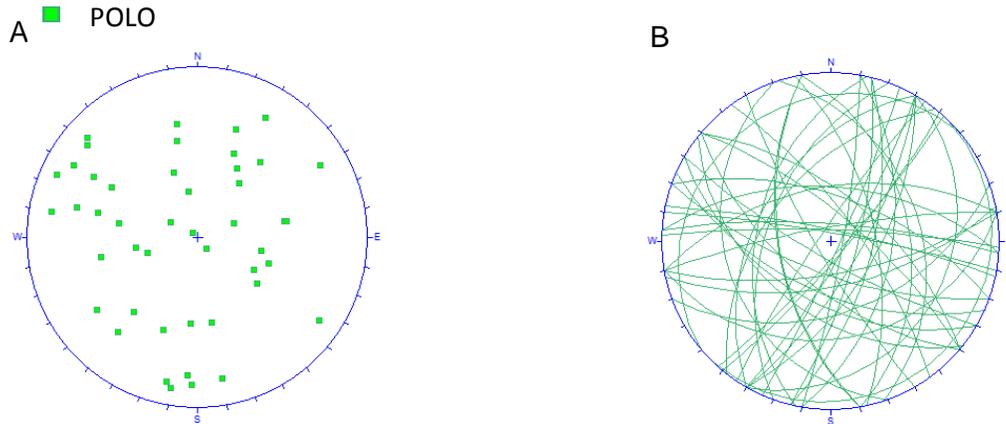


FIGURA V. 3. A. Se muestra los polos, B. Planos de fallas y fracturas de la zona 669+580 a 670+080.

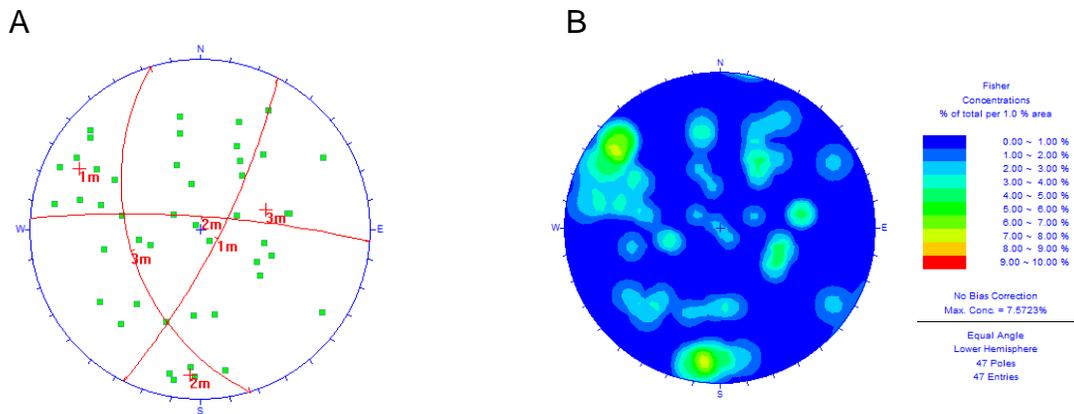


FIGURA V. 4. A. estereograma se observan los planos donde se encuentran alojadas las estructuras, B. Estereograma de densidades

Kilómetro 670+160 a 670+530 se observaron condiciones geotécnicas de D-, D+, C- y C+, 4 se observaron familia de fracturas principales, representadas en los siguientes estereogramas.

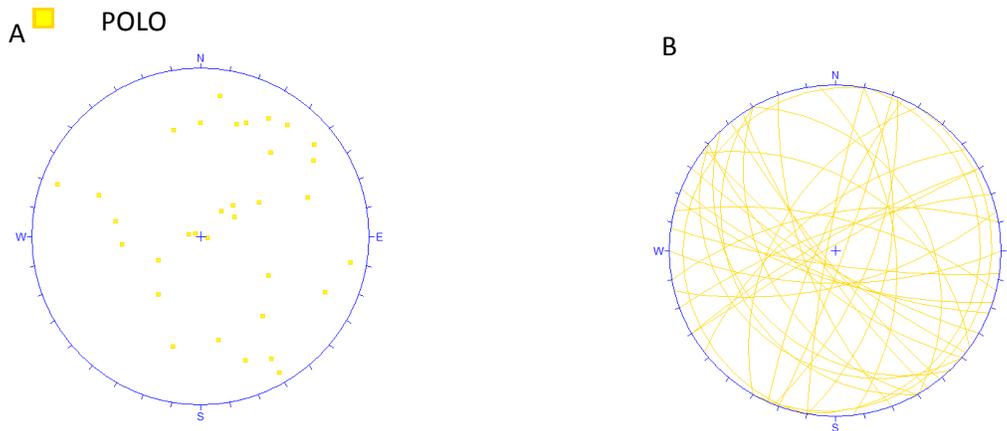


FIGURA V. 5. A. estereograma de polos. B. Planos de fracturamiento y fallas.

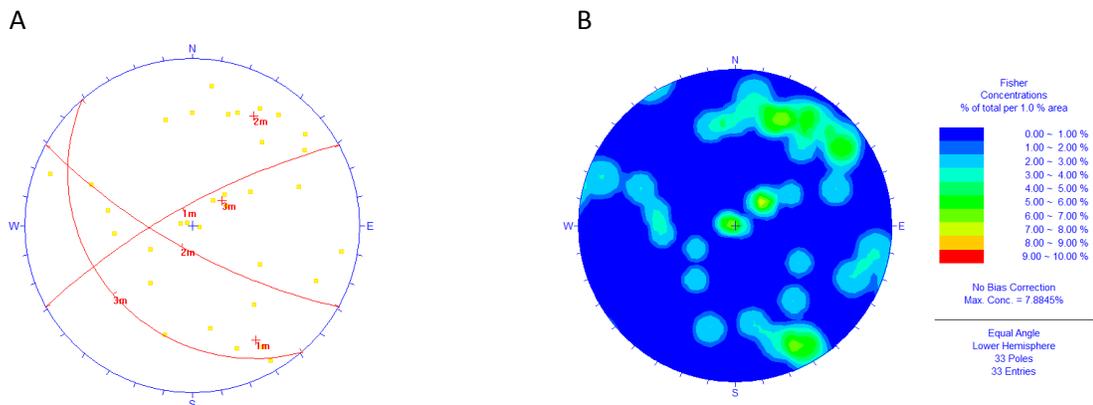


FIGURA V. 6. A. Planos principales donde se encuentran alojadas las fallas y fracturas. B. Estereograma de densidades.

Kilómetro 670+620 a 671+185 se encontraron condiciones geotécnicas de C-, C+, hasta B, en ésta zona se presentaron sobrecavaciones debido a la inclinación del fracturamiento.

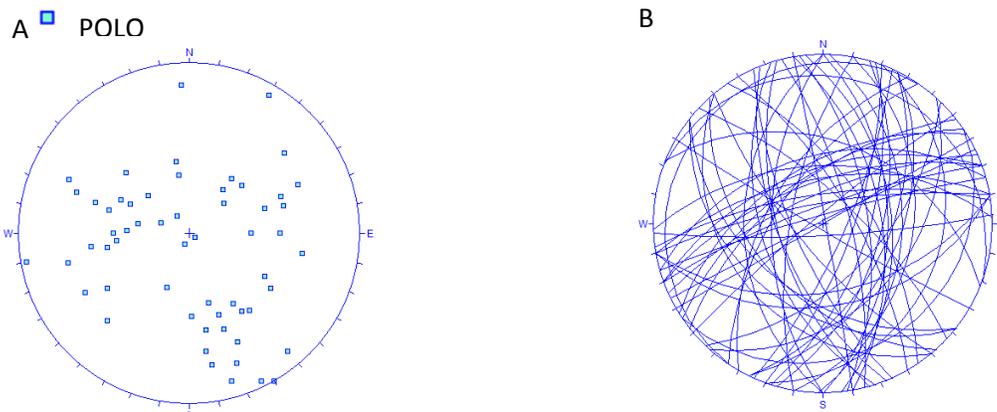


FIGURA V. 7. A. estereograma de polos, B. Estereograma de planos de fallas y fracturas.

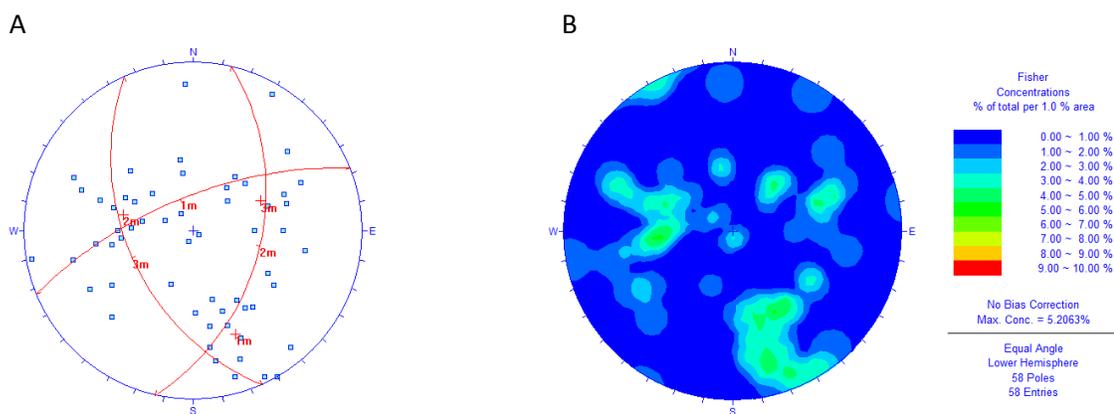


FIGURA V. 8. A. Planos donde se encuentran alojadas las fallas y fracturas principales, B. estereograma de densidades.

Los estereogramas expuestos fueron seleccionados de las zonas con mayor concentración de fallas y fracturas, lugares donde se colocaron sostenimientos para condición geotécnica C, D y E. En los estereogramas se observa la intersección de planos que nos indican posibles cuñas. Utilizar éste programa ayuda a determinar y extrapolar lo que se va a encontrar durante la excavación, así se puede prevenir que el terreno quede inestable.

V.2. Condiciones geotécnicas a lo largo del túnel “El sinaloense”.

En el capítulo III se expuso detalladamente la manera de determinar una condición geotécnica y los elementos necesarios para el sostenimiento primario. De acuerdo a los estudios previos realizados a lo largo de la longitud del túnel, se proyectaron las siguientes unidades geotécnicas.

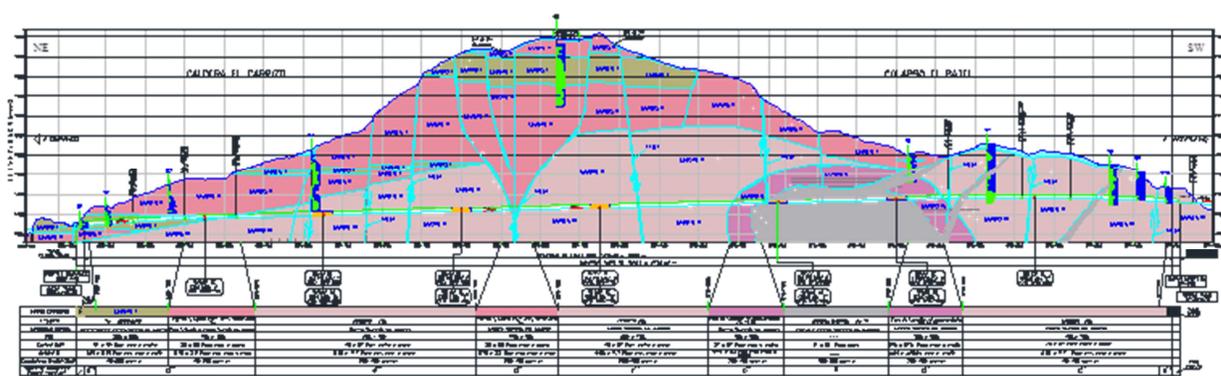
UNIDADES GEOTÉCNICAS	
UNIDAD I	Ignimbrita de calidad geotécnica D. Roca mala a regular.
UNIDAD II	Riolita y tobas riolíticas muy fracturadas, calidad geotécnica D. Roca mala a regular.
UNIDAD III	Andesitas, calidad geotécnica C. Roca regular a buena.
UNIDAD IV	Zona de transición andesita-intrusivo, calidad geotécnica D. Roca mala a regular.
UNIDAD V	Intrusivo granítico, calidad geotécnica B roca Buena.

TABLA V. 1. Unidades geotécnicas de proyecto.

En la tabla V.2 se indican los sostenimientos y la ubicación de los mismos, determinado por los estudios preliminares de proyecto, no se contempla la condición A roca de muy buena calidad, ni la E roca de muy mala calidad.

KILOMETRO	CONDICIÓN GEOTÉCNICA	RMR
668+445 A 668+460	D-	20-30
668+460 A 668+840	D+	30-40
668+840 A 669+500	C+	50-60
669+500 A 669+580	D+	30-40
669+580 A 670+080	C+	50-60
670+080 A 670+160	D+	30-40
670+160 A 670+530	B	60-80
670+530 A 670+620	D+	30-40
670+620 A 671+185	C-	40-50
671+185 A 671+200	D-	20-30

TABLA V. 2. Ubicación de las condiciones geotécnicas.



PLANO V. 3. Plano geotécnico de proyecto del túnel "El Sinaloense".

Con los estudios geológicos-geotécnicos realizados en cada avance en el túnel modificaron los elementos para su sostenimiento, debido a que en algunas zonas los elementos propuestos eran insuficientes. Evaluando en cada avance el RMR y la Q de Barton se encuentra colocado en el interior de túnel los siguientes elementos.

KILOMETRO	RMR	Q	CONDICIÓN GEOTÉCNICA	ELEMENTOS UTILIZADOS EN EL SOSTENIMIENTO
668+445 a 668+458	65	28.5	D-	Marcos metálicos a cada 0.80m, con 0.10m de espesor de concreto lanzado.
668+458 a 668+461	89	430	A	0.05m de espesor de concreto lanzado ¹ y 15 anclas puntuales.
668+461 a 668+556.8	81	430	A	0.05m de espesor de concreto lanzado.
668+556.8 a 668+592.8	35	2.08	D+	Marcos metálicos a cada 1.0m, 0.15m de espesor de concreto lanzado.
668+592.8 a 668+594.3	28	0.1	D-	Marcos metálicos a cada 0.50m, 0.15m de espesor de concreto lanzado.
668+594.3 a 668+642	31	1.39	D+	Marcos metálicos a 1.0m, 0.15m de espesor de concreto lanzado.
668+642 a 668+774.4	68	6.25	B	Concreto lanzado 0.15m de espesor, anclas de fricción puntuales L=6m.
668+774.4 a 668+784	39	1.38	D+	Marcos metálicos a 1.2m, 0.15m de espesor de concreto lanzado.
668+784 a 668+789.2	33	1.25	D+	Marcos metálicos a 1.2m, anclas de fricción (85) L=6, concreto lanzado 0.15m.
668+789.2 a 668+800	33	1.25	D+	Marcos metálicos a 1.2m, concreto lanzado 0.15m.
668+800 a 668+805	>20	0.4	E	Marcos metálicos a 0.50m, primer enfilaje ² de 9m (31 tubos). 0.15m de espesor de concreto lanzado.
668+805 a 668+811	>20	0.4	E	Marcos metálicos a 0.50m, segundo enfilaje de 9m (31 tubos). 0.15m de espesor de concreto lanzado.

¹ El espesor del concreto lanzado se colocó en todo el perímetro de la excavación, en clave, hastiales y banqueo.

² El enfilaje se coloca solo en zona de clave.

COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS PROYECTADOS Y REALES

668+811 a 668+816	34	0.4	D+	Marcos metálicos a 0.80m, 0.15m de espesor de concreto lanzado.
668+816 a 668+844.8	34	0.4	D+	Marcos metálicos a 1.20m, 0.15m de espesor de concreto lanzado.
668+844.8 a 668+869	27	0.1	D-	Marcos metálicos a 0.80m, 0.15m de espesor de concreto lanzado.
668+869 a 668+882	33	1.39	D+	Marcos metálicos a 1.20m, 0.15m de espesor de concreto lanzado.
668+882 a 668+955	43	1.2	C-	Anclas de fricción 1.5 x 1.5m, concreto lanzado 0.15m de espesor.
668+955 a 668+963	39	1	D+	Marcos metálicos 1.0m, concreto lanzado 0.15m de espesor.
668+963 a 668+988	39	1	D+	Marcos metálicos a 1.20m, 0.15m de de espesor concreto lanzado.
668+988 a 668+992	39	1	D+	Trabe sueca 4 a cada 0.20m.
668+992 a 669+998	44	3.5	C-	Anclas de fricción 1.5 x 1.5m, concreto lanzado 0.15m
669+998 a 669+009	37	4	D+	Marcos metálicos a 1.20m, concreto 0.15m
668+009 a 669+014	46	4	C-	Anclas de fricción 1.5 x 1.5m, concreto lanzado 0.15m de espesor
669+014 a 669+030	53	6.8	C+	Anclas de fricción 2.0 x 2.0m, concreto lanzado 0.10m de espesor
669+030 a 669+075	64	35	B	Anclas de fricción y tipo swellex 2.5 x 2.5, concreto lanzado 0.20m de espesor.
669+075 a 669+120	57	35	C+	Anclas de fricción y tipo swellex, a 2.0x2.0, concreto lanzado 0.10m de espesor.
669+092 a 669+142	66	35.7	B	Anclas de fricción 2.5x2.5, concreto lanzado 0.10m de espesor.
669+142 a 669+203	59	35	C+	Anclas de fricción 2.0x2.0, concreto lanzado 0.10m de espesor.
669+203 a 669+425	69	39.8	B	Anclas de fricción 2.5x2.5, concreto lanzado 0.10m de espesor.
669+425 a 669+435	39	1.89	D+	Marcos metálicos 1.20m, concreto lanzado 0.15m de espesor.
669+435 a 669+474	56	4.8	C+	Anclas swellex 2.0x2.0, concreto lanzado 0.10m de espesor.
669+474 a 669+940	69	38.8	B	Anclas swellex 2.5x2.5, concreto lanzado 0.10m de espesor.
669+940 a 670+008	81	48.8	A	Concreto lanzado 0.05
670+008 a 670+074	71	38.7	B	Anclas swellex 2.5x2.5, concreto lanzado 0.05m de espesor.
670+074 a 670+081	58	9.8	C+	Anclas de fricción 2.0x2.0, concreto lanzado 0.05m de espesor.
670+081a 670+123	67	23.8	B	Anclas swellex 2.5x2.5, concreto lanzado 0.05m de espesor.
670+123 a 670+165	62	18.754	B	Anclas swellex 2.5x2.5, concreto lanzado 0.10m de espesor.

670+165 a 670+202	54	4	C+	Anclas de fricción 2.0x2.0, concreto lanzado 0.10m de espesor.
670+202 a 670+229	44	2.5	C-	Anclas de fricción 1.5x1.5, concreto lanzado 0.10m de espesor.
670+229 a 670+245	36	1.5	D+	Marcos metálicos a 1.20m, 0.15m de espesor de concreto lanzado.
670+245 a 670+252	28	0.1	D-	Marcos metálicos a 0.80m, 0.15m de espesor de concreto lanzado.
670+252 a 670+256	32	0.1	D+	Marcos metálicos a 1.20m, 0.15m de espesor de concreto lanzado.
670+256 a 670+258	47	0.1	C-	Trabes y enfilaje, anclas a 1.5x1.5m, 0.15m de espesor de concreto lanzado.
670+258 a 670+269	52	1.2	C+	Anclas de fricción a cada 2.0x2.0m, concreto lanzado 0.10m de espesor.
670+269 a 670+317	63	32.5	B	Anclas de fricción a cada 2.5x2.5m, concreto lanzado 0.10m de espesor.
670+317 a 670+327	53	5.3	C+	Anclas de fricción a cada 2.0x2.0m, concreto lanzado 0.10m de espesor.
670+327 a 670+338	37	0.4	D+	Marcos metálicos a cada 1.0m, concreto lanzado 0.15m de espesor, jaula de ardilla.
670+338 a 670+355	58	8.9	C+	Anclas de fricción a cada 2.0x2.0m, 0.10m de espesor de concreto lanzado.
670+355 a 670+365	63	28.9	B	Anclas de fricción a cada 2.5x2.5m, concreto lanzado 0.10m de espesor
670+365 a 670+378	55	9.8	C+	Anclas de fricción a cada 2.0x2.0m, concreto lanzado 0.10m de espesor.
670+378 a 670+390	43	3.4	C-	Anclas de fricción a cada 1.5x1.5m, concreto lanzado 0.10m de espesor.
670+390 a 670+412	35	3	D+	Marcos metálicos a cada 1.20m, concreto lanzado 0.15m de espesor.
670+412 a 670+424	58	4	C+	Trabes suecas (12) a cada 1.0m
670+424 a 670+475	82	40.8	A	Concreto lanzado de 0.05m de espesor.
670+475 a 670+525	63	40.8	B	Anclas de fricción a cada 2.5x2.5m concreto lanzado 0.10m de espesor.
670+525 a 670+528	82	40.8	A	Concreto lanzado de 0.05m de espesor.
670+528 a 670+556	70	22.7	B	Anclas de fricción a cada 2.5x2.5m concreto lanzado 0.10m de espesor.
670+556 a 670+581	57	8.5	C+	Anclas de fricción a cada 2.0x2.0m concreto lanzado 0.10m de espesor.
670+581 a 671+079	68	6	B	Anclas de fricción a cada 2.5x2.5m concreto lanzado 0.10m de espesor.
671+079 a 671+121	34	2.8	D+	Marcos metálicos a cada 1.0m, concreto lanzado de 0.30m de espesor.
671+121 a 671+133	52	4.13	C+	Anclas de fricción a cada 2.0x2.0m concreto lanzado 0.10m de espesor.
671+133 a 671+144	34	2.8	D+	Marcos metálicos a cada 1.0m, concreto lanzado de 0.15m de espesor.
671+144 a 671+149	60	1.25	B	Anclas de fricción a cada 2.5x2.5m concreto lanzado 0.10m de espesor.
671+149 a 671+158	34	1.25	D+	Marcos metálicos a cada 1.0m, concreto lanzado 0.15m de espesor.

671+158 a 671+161	34	1.25	C-	Anclas de fricción a cada 1.5x1.5m, concreto lanzado 0.10m de espesor.
671+161 a 671+168	36	1.25	D+	Marcos metálicos a cada 1.0m concreto lanzado 0.15m de espesor.
671+168 a 671+183	57	9.38	C+	Anclas de fricción a cada 1.5x1.5m, concreto lanzado 0.10m de espesor.
671+183 a 671+202	49	9.38	D-	Marcos metálicos a cada 0.80m, concreto lanzado 0.15m de espesor.

TABLA V. 3. Ubicación y tipos de sostenimientos colocados en el interior del túnel.

V.4. Comparativo entre los sostenimientos geotécnicos de proyecto y construcción.

En los siguientes esquemas podemos apreciar el comparativo entre los sostenimientos propuestos por proyecto y los colocados en la excavación, se observa una diferencia considerable ya que se utilizaron todas las condiciones geotécnicas A, B, C, D y E, en algunas zonas los cambios fueron radicales y de un avance a otro se modificó la condición geotécnica. Siguiendo los parámetros de Bieniawski y Barton se evaluó cada uno de los avances para realizar las mejoras y modificaciones a la propuesta inicial.

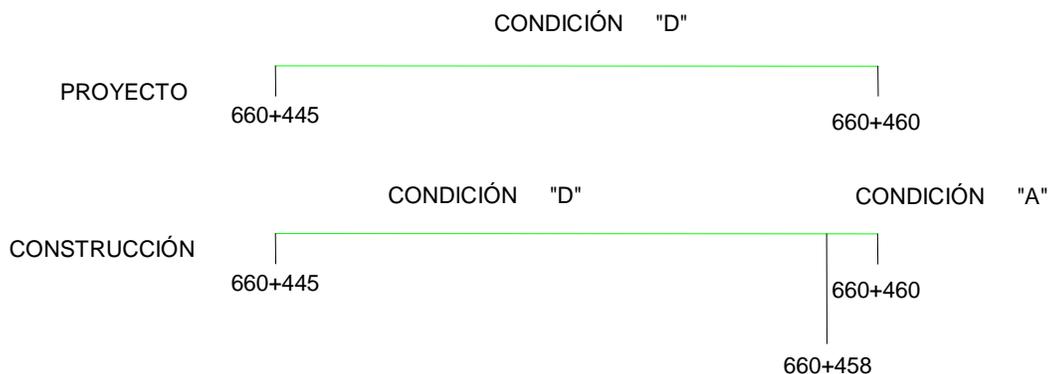


FIGURA V. 9. Condición geotécnica "D" de proyecto y condiciones de construcción, del km 660+445 al 660 a 460.

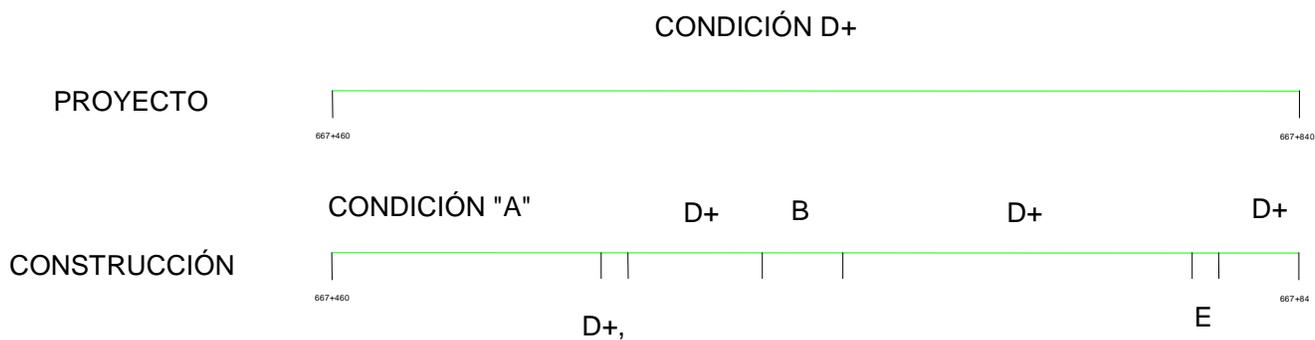


FIGURA V. 10. Condición geotécnica "D+" de proyecto y condiciones de construcción, del km 667+460 al 667+840.

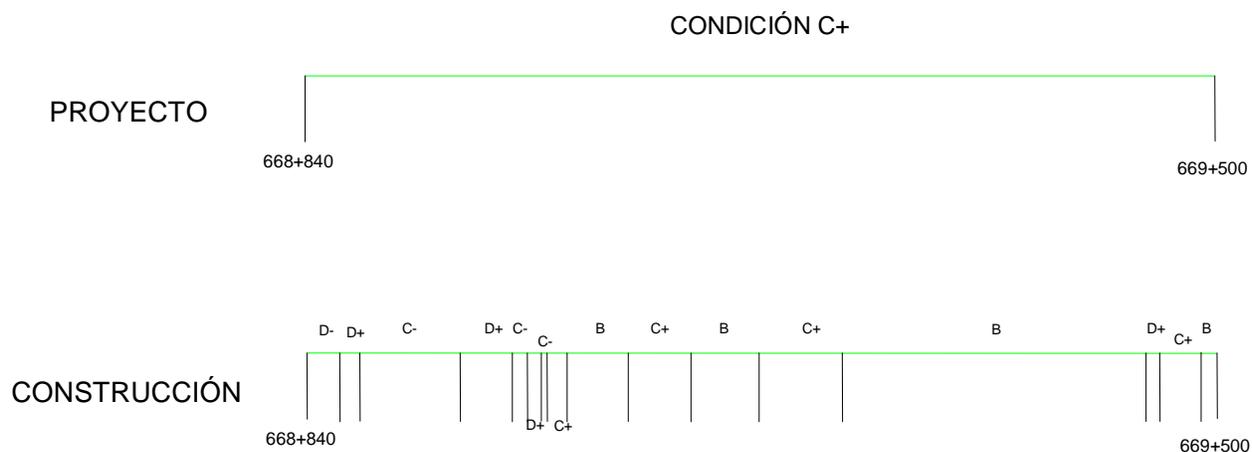


FIGURA V. 11. Condición geotécnica "C+" de proyecto y condiciones de construcción, del km 668+840 al 669+500.

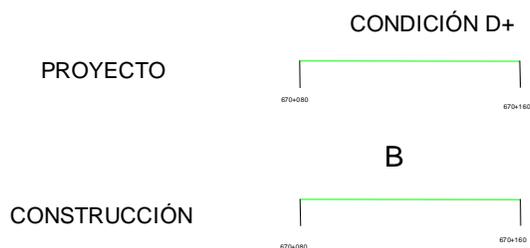


FIGURA V. 12. Condición geotécnica "D+" de proyecto y condiciones de construcción, del km 669+500 al 669+580.

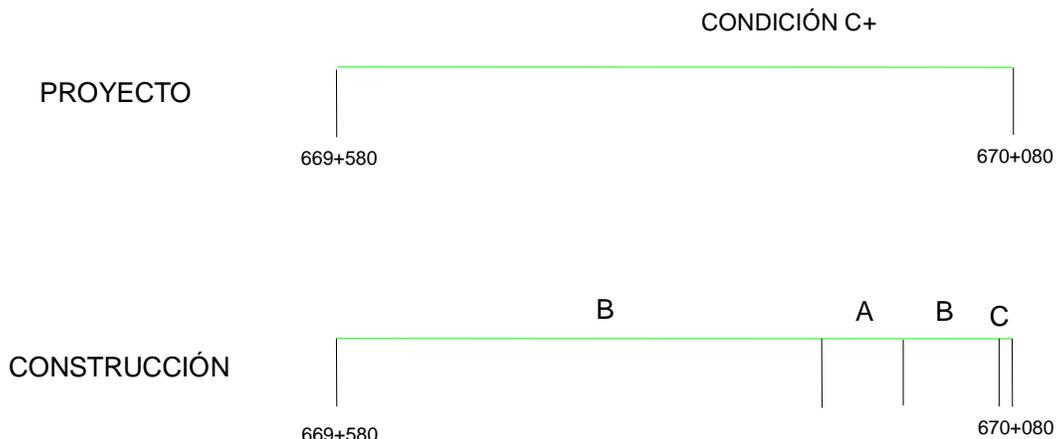


FIGURA V. 13. Condición geotécnica "C+" de proyecto y condiciones de construcción, del km 669+580 al 670+080.

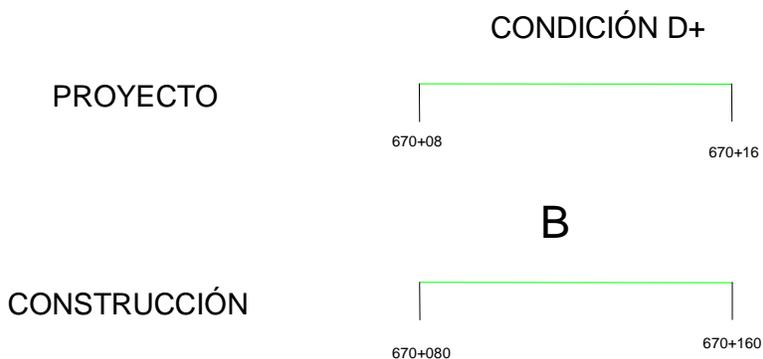


FIGURA V. 14. Condición geotécnica "D+" de proyecto y condiciones de construcción, del km 670+080 al 670+160.

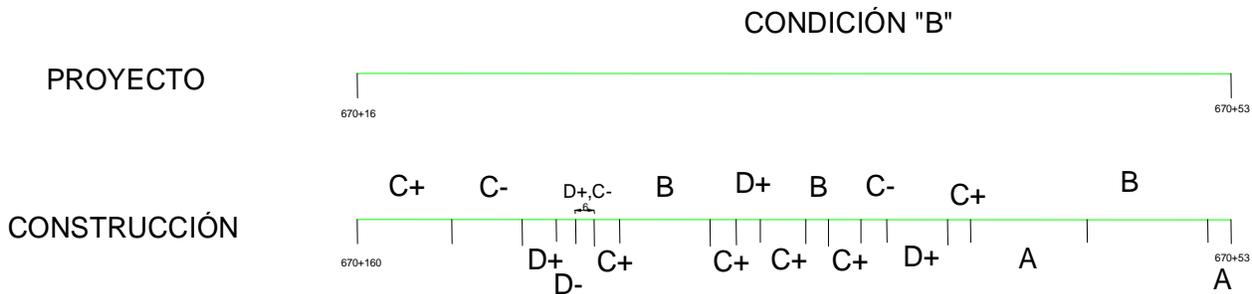


FIGURA V. 15. Condición geotécnica "B" de proyecto y condiciones de construcción, del km 670+160 al 670+530.

V.5. Problemas geológicos-geotécnicos en la excavación.

Durante la excavación del túnel “El Sinaloense” se presentaron dificultades ocasionadas principalmente por las condiciones geotécnicas del macizo rocoso, un ejemplo es el caído en el km 668+801, donde se ubica una falla de tipo normal de 0.50 metros de ancho, la falla se observó desde el piso de la media sección, la roca en ésta zona se encuentra muy alterada, una vez que se avanzó 8 metros después de la falla se colapsó. En ésta zona ya se encontraban colocados 13 marcos metálicos, en el colapso derribó 9 marcos metálicos y relleno con material rocoso aproximadamente 11 metros lineales, afectando equipo y maquinaria que se utiliza en cada avance. Solo presentó daños materiales y no humanos.

La galería de emergencia o escape, se excavo de manera simultánea al túnel, al quedar inactivo el frente Durango, el avance de la galería fue significativo, beneficiando posteriormente la excavación del túnel. Los levantamientos geológicos del frente de excavación realizados a la galería permitieron realizar una interpretación para el túnel, se pudo prever el cambio de litología, la presencia de agua, fallas desfavorables al túnel, etc. La galería de escape sirvió como dren para el túnel, así mismo también fue un ducto de ventilación de la zona central del túnel.

Las dimensiones del colapso no se determinaron con exactitud debido a que el macizo rocoso estuvo en constante movimiento, haciéndose extremadamente peligroso transitar por la zona, no permitiendo que el personal correspondiente tuviera acceso a levantar los datos para tener el dato preciso con los equipos de topografía. La solución a las dificultades geotécnicas se definió después de un análisis constructivo, determinando que para continuar con el avance de excavación se debería inyectar una mezcla de mortero de concreto para llenar los espacios vacíos para formar un monolito sobre la clave del túnel con forma de domo. Adicionado a este, se colocaron marcos metálicos seccionados con una separación de 0.40m para garantizar la estabilidad del macizo haciéndolo más estable y confiable.



FOTOGRAFIA V. 1. Caído en el kilómetro 668+801, Portal Durango.



FOTOGRAFIA V. 2. Trabajos realizados para estabilizar la zona de caído.

Un inconveniente común durante la excavación es la sobrexcaación, generalmente es ocasionada por la intersección de fallas, fracturas, o pseudoestratificación, se forman cuñas en la zona de clave y provocan desprendimientos que si no son tratados a tiempo y se utilizan los elementos adecuados pueden llegar a provocar colapsos. Para poder determinar los elementos necesarios para su sostenimiento, se debe tener el conocimiento del número de fallas, fracturas, la dirección y echado, presencia de agua y el tipo de rellenos.



FOTOGRAFIA V. 3. Se observa sobrexcaación derivados de pequeñas cuñas en la clave.

CONCLUSIONES.

De acuerdo a lo expuesto en éste trabajo, hay tres puntos esenciales, la importancia del seguimiento geológico durante la excavación, la importancia de la condición geotécnica de la roca, y la aplicación correcta de la misma desde el punto de vista económico.

La condición geológica-geotécnica es relevante desde el inicio de la construcción de un túnel ya que se inicia con los portales, dependiendo de las condiciones geotécnicas del terreno se da un tratamiento los taludes, colocando los elementos necesarios para su estabilidad. Una vez que se inicia la excavación en el interior del túnel es necesario conocer las condiciones geológicas-geotécnicas para determinar los elementos que lo sostendrán y evitar cualquier tipo de sobrecavación, caído o en caso crítico el colapso del mismo, siendo eficientes para soporte del macizo rocoso. Si los trabajos se realizan de manera correcta hay un beneficio directo en los consumos para quien construye.

Respecto al proyecto inicial del túnel “El Sinaloense”, se realizaron modificaciones debido a que se encontró diferencia con los datos que se obtuvieron durante la construcción ya que se verificó: la litología, la situación general de cada frente de excavación y la condición geotécnica para su sostenimiento. Con éstos datos se presenta el plano real geológico del túnel, donde se expresa respecto a la litología, que el cuerpo intrusivo granítico inferido por geofísica es erróneo, en ésta zona se encontró la mineralización de sulfuros en la andesita. También se presenta el plano geotécnico real de construcción del túnel, donde se exponen las condiciones geotécnicas y los tipos de sostenimientos que emplearon. Al realizar la comparación de lo proyectado y lo que se construyó, se observan cambios considerables, puesto que no se valoró la situación estructural, que fue en mayor parte el parámetro que obligó a realizar modificaciones. Un ejemplo claro es la zona del kilómetro 668+840 al 669+500, donde se proyectó un sostenimiento de tipo C+, se encontró diversas condiciones geotécnicas y se colocaron sostenimientos de D- hasta B. En el proyecto se planteó una sola condición geotécnica sin tomar en cuenta el contacto entre la toba lítica y la andesita, la dirección del contacto que en este caso era completamente desfavorable a la excavación, así como la condición estructural de la andesita que se presentó con fracturamiento vertical y en zonas se observa pseudoestratificación. En el kilómetro 670+160 al 670+530 se encuentra la misma situación expuesta.

Considerando los resultados de los comparativos de las condiciones geotécnicas concluimos que con los datos obtenidos de cada excavación el proyecto se modificó por completo.

CONCLUSIONES

Desde un punto de vista económico es sumamente importante realizar un seguimiento geológico-geotécnico durante la excavación para que dado el caso de tener cambios en el macizo rocoso se realicen las modificaciones pertinentes, es benéfico para la construcción, puesto que colocar elementos de más para el sostenimiento de un túnel equivale a una inversión innecesaria, de lo contrario, si no se realizan los trabajos mínimos necesarios, el sostenimiento es insuficiente y en caso de registrar un caído de cualquier magnitud significa una inversión doble, en éste caso se tiene la pérdida económica de los elementos colocados, maquinaria si llegara a existir pérdidas o daños y la nueva colocación de elementos para estabilizar la zona del caído. Dentro de las perdidas pueden existir pérdidas humanas, que sería muy lamentable.

La intervención de la geología en obra civil, sobre todo en el campo de ejecución es relativamente nuevo, generalmente la información geológica sólo se utilizaba para proyectar las obras. La construcción de la autopista Durango-Mazatlán se planeó como una obra ecológica, en éste sentido se realizaron estudios geológicos y de impacto ambiental al realizar caminos de acceso, se controlaron las voladuras a cielo abierto, se ubicaron los bancos de desperdicio de material rocoso y principalmente el seguimiento en excavación de túneles.

En los túneles se realizó un seguimiento geológico iniciando en el portal, en interior de túnel se realizó un levantamiento geológico por avance, con las observaciones in situ se realizaron las modificaciones pertinentes, en algunos casos se ignoró la intervención de los geólogos, teniendo como consecuencia caídos en interior de túnel, caídos en portales, así como el colapso de 30m de un túnel (Pánuco I), entre otras dificultades. La geología determina lo que hay en un frente de excavación e infiere lo que se puede encontrar en el siguiente avance, esto ayuda a tener una visión de prevención ante cualquier dificultad, de lo contrario se continuara corrigiendo errores de obra civil.

Recomendaciones

Por la experiencia en la construcción del túnel “El Sinaloense” descrito en éste trabajo, se recomienda para los estudios previos, realizar un levantamiento geológico a detalle en la zona del túnel, los sondeos de extracción de núcleos, deben llegar a la zona del túnel para tener una certeza de la litología que se encuentra y las condiciones de la misma.

Para la determinación de la condición geotécnica en el frente de excavación, se debe tener claro los parámetros y la zona donde se tomaran los datos, ya que debe ser la zona representativa y no perder de vista el perímetro de la clave que es la zona de mayor importancia. Tener una visión clara de la función de los elementos de sostenimiento, para determinar el escenario se colocaran y en qué momento deben cambiar o combinar los elementos.

Hacer conciencia de que excavar un túnel es un trabajo en equipo y se debe tener constante comunicación con todas las áreas que laboran de manera simultánea, ya que de esta forma se puede realizar un trabajo preventivo, evitando llegar a los trabajos correctivos.

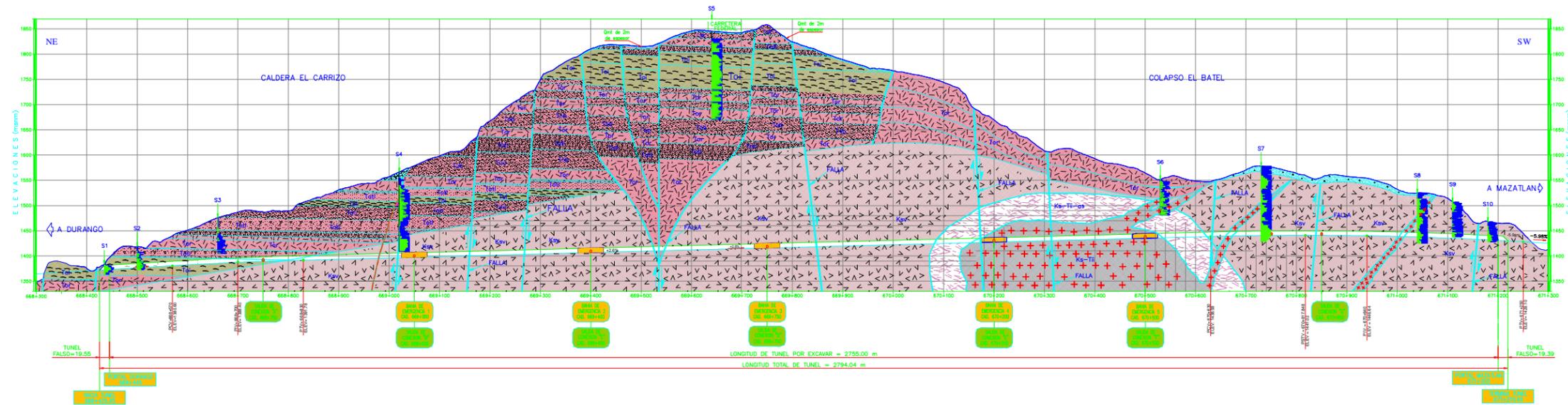
El macizo rocoso nos indica en cada avance sus propiedades y condiciones, por lo que no se debe pasar desapercibido ningún detalle, esto permite un trabajo eficiente, ágil y seguro.

BIBLIOGRAFIA:

- Americas, M. (2009). Swellex. Pernos de anclaje Atlas Copco.
- Aranda-Gómez, H. L. (2000). Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de cuencas y sierras, México. Boletín de la sociedad geologica mexicana, v.liii, 59-71.
- Bieniawski. (1989). Engenering rock mass clasification. A complete manual forengineers and geologist in minning, civil and petroleum engeneering. Wiley.
- Construcciones, M. C. (S.F.). Malla casco construcciones. Recuperado el 10 de enero de 2013, de <http://www.mallacasco.com/anclas-de-tension.html>
- Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, C. Y. (S.F.). Universidad Politecnica de Cataluña. Recuperado el 2012, de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6215/1/00.pdf>
- E. Hoek, E. B. (1980). Excavaciones subterráneas en roca. México: McGraw-Hill de México.
- F. Ortega, I. M. (1992). Texto explicativo de la 5ta. Edición de la carta geológica de la Republica Mexicana. Instituto de Geologia UNAM- Consejo de Recursos Minerales, SEMIP.
- Francisco Javier Torrijo Echarri, R. C. (2007). Los suelos y las rocas en ingeniería geologica: herramientas de estudio. Universidad Politécnica de Valencia.
- Gianfranco, P. (s.f.). Contribución a la caracterización geomecánica de los macizos rocosos en base al GSI de Hoek. Universidad Central de Venezuela.
- Gonzalez-Vallejo Luis, O. A. (2006). Ingnieria geológica. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Inegi. (2011). <Http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/sin/fisio.cfm?c=444&e=28>. Recuperado el septiembre de 2012
- Jürgen Höfler, J. S. (2004). Concreto proyectado en la construcción de túneles. Introducción a la tecnología básica de concreto proyectado. Sika, Putzmeister.
- Luca Ferrari, M. V. M. (2005). Magamatismo y tectónica de la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen Occidental de Norteamerica. Boletín de la Sociedad Geologica Mexicana, Conmemorativo del Centenario(3), 343-387.
- Marinas, J. M. (2006). Geología aplicada a la ingeniería civil. Madrid, España: cie dssat.
- Mexpresa. (S.F.). Barras autoperforantes, del-ischebeck, sistema de anclaje para estabilización de excavaciones. Mexpresa.
- Perri, G. (S.F.). Contribución a la caracterización geomecánica de los macizos rocos en base al GSI de Hoek. Universidad Central de Venezuela.
- Roberto Ucar Navarro, P. H. (2002). Manual de anclaje en obras de tierras. Merida, Venezuela.
- Ruiz Vazquez, G. H. (2007). Geologia aplicada a la ingenieria civil. Mexico, df: Limusa.
- Ruiz M. R. (2000). Recomendaciones de sostenimiento para túneles. Revista de obras publicas.
- Ruiz, M. R. (2002). Nuevas recomendaciones de excavación y sostenimiento para túneles y boquillas.
- Salvador Navarro Carrasco, R. P. (s.f.). Geotecnia Aplicada a la Contruccion de túneles.
- Transportes, S. D. (s.f.). <Http://www.sct.gob.mx>. Recuperado el septiembre de 2012, de http://www.sct.gob.mx/uploads/media/080722_conferencia_de_prensa_-_durango-mazatlan.pdf
- Transportes, S. D. (s.f.). www.sct.gob.mx. Recuperado el octubre de 2012, de www.sct.gob.mx

APÉNDICE 1

PLANO GEOLÓGICO DE PROYECTO

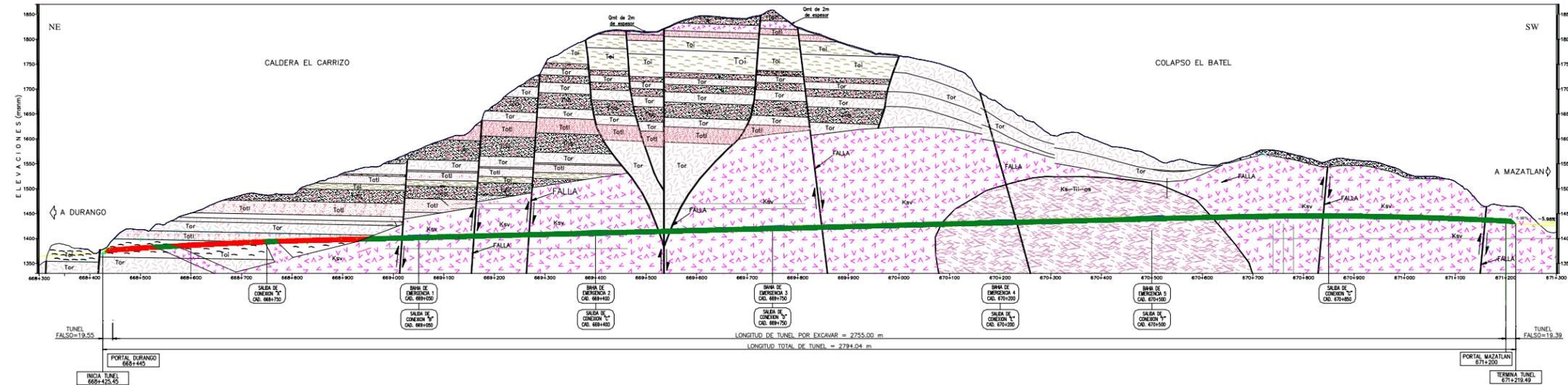


SIMBOLOGIA	
RAMIL Y EJES DE FRACTURAS	
FALDAS	
COLAPSO	
E.E. DE TUNEL	
CURVA DE NIEL PRINCIPAL	
CURVA DE NIEL SECUNDARIA	
CURVA HORIZONTAL	
CONTOUR UTILIZADO	
ANCHO EXPLORADO	
ANCHO	
NIEL DE RESPONDERA Y CALDO DE LA Roca EN EL E	
CURVA DE NIEL PRINCIPAL	
CURVA DE NIEL SECUNDARIA	
ALMUTRE	
NIEL INMEDIATO	

UNIDADES LITOLÓGICAS		
	Depósitos de talud. Capas de boleos y arenas de suelos residuales.	
	Ignimbrita. Textura brechoide y fluidal con cristales de feldespatos y abundantes fragmentos de roca de distintas litologías y tamaños. La porosidad es baja o localmente moderada, y presenta abundantes microfracturas y fisuras selladas.	
	Riolita. Textura porfídica con matriz afanítica y fenocristales de feldespatos, cuarzo y en menor proporción de hornblenda y biotita.	
	Toba brechoide o brecha riolítica. Roca piroclástica de textura brechoide, en ocasiones ligeramente fluida, llega a presentar textura microlítica en algunos tramos, compuesta principalmente por fragmentos líticos de riolita. La fracción fina está constituida por cenizas volcánicas consolidadas.	
	Toba lítica. Roca piroclástica constituida por cenizas volcánicas y lapilli consolidados, con fragmentos angulosos y subangulosos de riolita, andesita, ignimbrita y pumita de distintos tamaños casi totalmente casimilados y también por cristales de feldespatos, cuarzo y minerales ferromagnesianos alterados.	
	Andesita. Color verdoso, textura porfídica con matriz afanítica o localmente vítrea, con fenocristales de plagioclasas, hornblenda y otros minerales ferromagnesianos.	
	Andesita. Alterada por fluidos asociados con calor y presión aportados por los cuerpos intrusivos.	
	Granito. Cuerpo batolítico de composición granítica. Estos cuerpos batolíticos fueron afectados al término de los eventos intrusivos por cuerpos filonianos graníticos y apilíticos. La roca plutónica ha sido detectada y delimitada mediante el estudio geofísico, mientras que las rocas filonianas asociadas se han podido caracterizar gracias a los sondeos mecánicos, principalmente el sondeo S-6.	

ELABORÓ: EMPRESA PROYECTISTA

PLANO GEOLÓGICO REAL



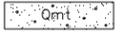
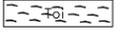
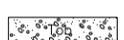
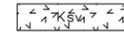
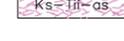
SIMBOLOGIA	
RAMO Y SENSORES DE FRACTURAS	
FALLOS	
COLAPSO	
EJE DE TUNEL	
CURVA DE INEL PRINCIPAL	
CURVA DE INEL SECUNDARIA	
CURVA HORIZONTAL	
CONTRO LITOLÓGICO	
SOMEROS EXPLORADOS	
ARREGLO	
REDES DE RESPONDER Y CALIBRO DE LA ROCA (RCD) EN E	
CURVA DE INEL PRINCIPAL	
CURVA DE INEL SECUNDARIA	
ALINEAMIENTO	
DOSE SIMPLICI	

PERFIL LONGITUDINAL.

 **TOBA LÍTICA**

 **ANDESITA**

LITOLOGIA EN EL INTERIOR DEL TÚNEL

UNIDADES LITOLÓGICAS	
 Orit	Depósitos de talud. Capos de boleos y arenas de suelos residuales.
 Ignimbrita	Textura brechoide y fluidal con cristales de feldespatos y abundantes fragmentos de roca de distintas litologías y tamaños. La porosidad es baja a localmente moderada, y presenta abundantes microfracturas y fisuras selladas.
 Riolita	Textura porfídica con matriz afanítica y fenocristales de feldespatos, cuarzo y en menor proporción de hornblenda y biotita.
 Toba brechoide	Roca proclástica de textura brechoide, en ocasiones ligeramente fluida, llega a presentar textura microlítica en algunos tramos, compuesta principalmente por fragmentos líticos de riolita. La fracción fina está constituida por cenizas volcánicas consolidadas.
 Toba lítica	Roca proclástica constituida por cenizas volcánicas y lapilli consolidados, con fragmentos angulosos y subangulosos de riolita, andesito, ignimbrita y pumita de distintos tamaños casi totalmente osmitados y también por cristales de feldespatos, cuarzo y minerales ferromagnesianos alterados.
 Andesito	Andesito. Color verdoso, textura porfídica con matriz afanítica a localmente vítreo, con fenocristales de plagioclaso, hornblenda y otros minerales ferromagnesianos.
 Andesito alterado	Andesito. Alterado por fluidos asociados con calor y presión aportados por los cuerpos intrusivos.

MODIFICACIONES REALIZADAS CON LOS DATOS OBTENIDOS EN CAMPO Y AUTORIZADOS POR SCT PARA EL PRESENTE TRABAJO

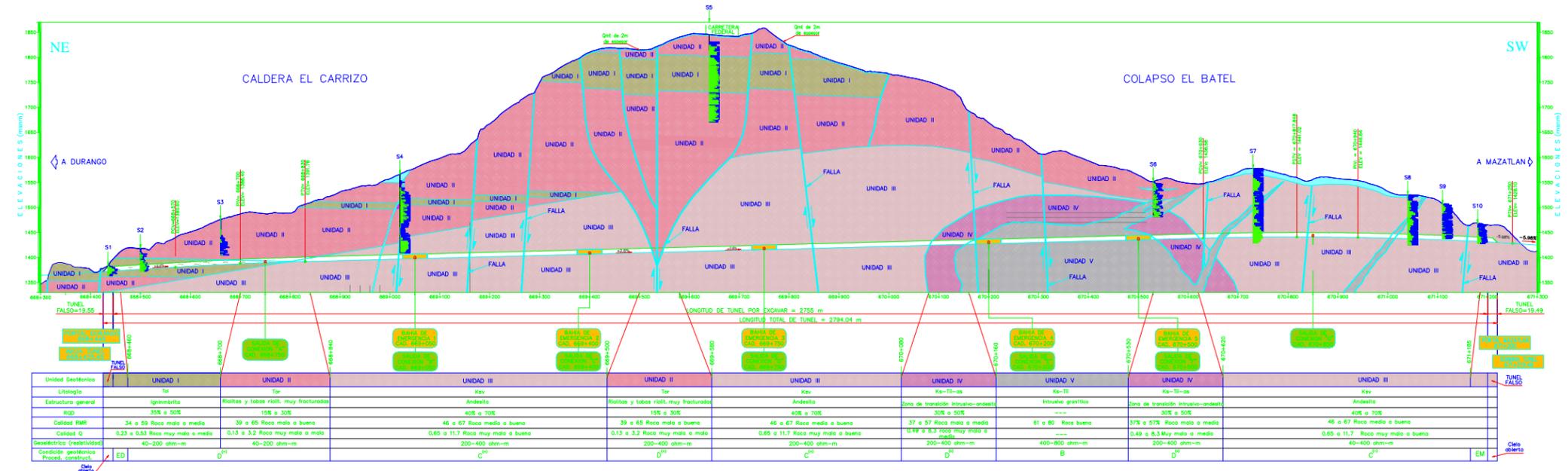
PLANO GEOTÉCNICO DE PROYECTO

UNIDADES GEOTÉCNICAS

- UNIDAD I** Ignimbrita de calidad geotécnica "D"
Roca mala a regular
- UNIDAD II** Riolita y tobas riolíticas muy fracturadas, calidad geotécnica "D"
Roca mala a regular
- UNIDAD III** Andesitas, calidad geotécnica "C", Roca regular a buena
- UNIDAD IV** Zona de transición andesito-intrusivo
Calidad geotécnica "D"
Roca mala a regular
- UNIDAD V** Intrusivo granítico
Calidad geotécnica "B"
Roca buena

CONDICIONES GEOTÉCNICAS

CONDICION GEOTECNICA	RMR (Bieniawski, 1989)	Q (Barton et al., 1974)
A	≥ 81 Roca muy buena	≥ 45 Roca muy buena
B	61 a 80 Roca buena	6 a 45 Roca regular a buena
(+) C	51 a 60 Roca de regular a buena	4 a 6 Roca mala a regular
(-) C	41 a 50 Roca regular	1 a 4 Roca mala
(+) D	31 a 40 Roca mala a regular	0.4 a 1 Roca muy mala
(-) D	21 a 30 Roca mala a muy mala	0.1 a 0.4 Roca muy mala a extremadamente mala
E	≤ 20 Roca muy mala	0.01 a 0.1 Roca extremadamente mala



Unidad Geotécnica	UNIDAD I	UNIDAD II	UNIDAD III	UNIDAD IV	UNIDAD V	UNIDAD IV	UNIDAD III
Litología	Tal	Tor	Kav	Tor	Kav	Ka-Ti-os	Kav
Estructura general	Ignimbrita	Riolitas y tobas riolíticas muy fracturadas	Andesitas	Riolitas y tobas riolíticas muy fracturadas	Andesitas	Zona de transición intrusivo-andesito	Andesitas
ROD	35% a 50%	15% a 30%	40% a 70%	15% a 30%	40% a 70%	30% a 50%	40% a 70%
Calidad RMR	34 a 59 Roca mala a media	39 a 65 Roca mala a buena	46 a 67 Roca media a buena	39 a 65 Roca mala a buena	46 a 67 Roca media a buena	37 a 57 Roca mala a media	46 a 67 Roca media a buena
Calidad Q	0.23 a 0.53 Roca muy mala a media	0.13 a 3.2 Roca muy mala a mala	0.65 a 11.7 Roca muy mala a buena	0.13 a 3.2 Roca muy mala a mala	0.65 a 11.7 Roca muy mala a buena	0.49 a 8.3 Muy mala a media	0.65 a 11.7 Roca muy mala a buena
Geotécnicas (Presión)	40-200 ohm-m	40-200 ohm-m	200-400 ohm-m	200-400 ohm-m	200-400 ohm-m	200-400 ohm-m	40-400 ohm-m
Condición geotécnica (Proced. construct.)	ED	D ¹	C ¹	D ¹	C ¹	D ¹	C ¹

ELABORÓ: EMPRESA PROYECTISTA

PLANO GEOTECNICO REAL. Perfil longitudinal del túnel.



PERFIL ELABORADO CON LOS DATOS OBTENIDOS EN CAMPO Y
AUTORIZADOS POR LA SCT PARA EL PRESENTE TRABAJO.