

EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS DE SOSTENIMIENTO Y DE IMPERMEABILIZACIÓN EN LAS GALERÍAS DEL BITUNEL DEL TREN INTERURBANO MÉXICO – TOLUCA (TIMT)

EVALUATION OF SUSTAINING AND WATERPROOFING TREATMENTS AT THE GALLERIES OF THE BITUNEL OF THE INTER-BANK TRAIN MEXICO - TOLUCA (TIMT)

Julio CHABLE¹, Ulises TALONIA² y Jorge LÓPEZ³

^{1,3} Ingenieros de Proyectos, Comisión Federal de Electricidad, GEIC, Mecánica de Rocas e Inyecciones

² Jefe de Oficina, Comisión Federal de Electricidad, GEIC, Mecánica de Rocas e Inyecciones

condiciones topográficas, las condiciones hidrológicas y las condiciones geológico – geotécnicas. En este artículo se muestra el proceso y los resultados de la caracterización geomecánica de un sitio seleccionado para la construcción del bitúnel de 4.7 km, el cual forma parte de dicho Proyecto. Después de introducirse en la condición geológica del sitio, se enuncian los tipos y el procedimiento realizado para evaluar los tratamientos de sostenimiento e impermeabilización que deberán colocarse en las excavaciones en las galerías que conforman el bitúnel para su estabilidad, de acuerdo a las características geomecánicas de materiales y a las condiciones geohidrológicas que conforman el macizo rocoso.

ABSTRACT: The construction of the Mexico-Toluca Interurban Train project depends fundamentally on three aspects: the topographic conditions, the hydrological conditions and the geological-geotechnical conditions. This article shows the process and the results of the geomechanical characterization of a selected site for the construction of the 4.7 km bitunnel, which is part of said Project. After entering the geological condition of the site, the types and the procedure performed to evaluate the support and waterproofing treatments that should be placed in the excavations in the galleries that make up the bitumen for its stability, according to the geomechanical characteristics of materials and the geohydrological conditions that make up the rock mass.

1 ASPECTOS GENERALES

1.1 Antecedentes

Como parte de los trabajos de los “Servicios de asistencia técnica de “CFE” durante la construcción del tramo 2, referente a la construcción del túnel ferroviario “Portal poniente del túnel al portal oriente del túnel” de 4.634 kilómetros de longitud, con inicio en el kilómetro 036+150.00 y terminación en el kilómetro 040+784, en la Ciudad de México, el cual forma parte del proyecto integral de transporte de pasajeros “Tren Interurbano México - Toluca”, para la Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal (DGTFM) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

La participación de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el Tramo II continúa con la presencia permanente en sitio del personal de las disciplinas de Geología, Geotecnia, Instrumentación y Geohidrología con actividades de campo y gabinete.

1.2 Localización de la zona de estudios

La obra del bitúnel se encuentra conformada dentro del arreglo de obras del proyecto del Tren Interurbano México-Toluca (TIMT), el cual regionalmente se localiza en la Sierra de Las Cruces en el límite entre los bloques Norte y Central, en este sitio, con base en la interpretación geológico-estructural, a la vez entre la sub-bloques de Fosa Las Lomas y Fosa la Marquesa-Salazar, en dirección a la carretera libre Toluca-México No. 15 y de la autopista No. 15D. (Figura 1).

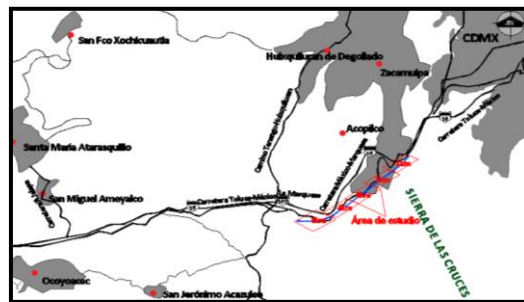


Figura 1. Localización del trazo de los túneles en el Tramo II, TIMT.

1.3 Descripción de la obra civil (bitúnel)

La obra del bitúnel del TIMT está constituida por dos túneles sección circular, ambos con dimensiones de un diámetro interior de 7.5 m, el túnel derecho tiene una longitud de 4,741.06 m y el túnel izquierdo una longitud de 4,720.04 m aproximadamente. A lo largo del bitúnel se tiene programada la construcción de 5 galerías técnicas y 10 de evacuación (aunque en el proyecto inicial estaban contempladas 20 de evacuación), con una sección tipo herradura con dimensiones de 5.5 x 4.5 m para la galería técnica y de 4.0 x 3.5 m para la galería técnica, de una longitud de 16 m aproximadamente, Figura 2.

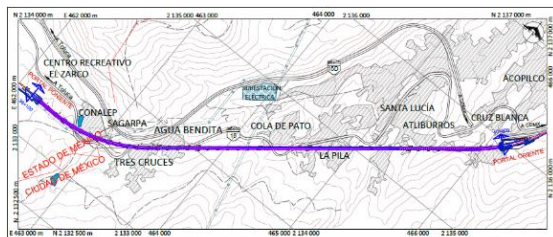


Figura 2. Planta de localización del bitúnel proyecto TIMT.

2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL PROYECTO

2.1 Geología Regional

La zona de estudio se ubica en la Sierra de las Cruces, en la parte oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano. Esta sierra representa un límite morfológico entre las cuencas de México y Toluca, cuyas elevaciones son 2,240 msnm y 2,400 msnm, respectivamente. La Sierra de Las Cruces tiene longitud de 110 km, en la parte noroeste tiene dirección NW-SE con una anchura de 47 km, y aproximadamente en la parte intermedia, entre los volcanes Salazar y San Miguel, cambia a dirección N-S, continuando con 27 km de ancho (Figura 2). Particularmente, la zona de estudio se localiza en la parte NW del Complejo Volcánico San Miguel (CVSM), cuya estructura principal cuenta con una elevación de 3,870 msnm, la cual representa la elevación máxima de los volcanes que conforman La Sierra Las Cruces.

En la zona donde cambia la orientación de la sierra de Las Cruces se ubica el área de estudio donde se excavarán los túneles del Tren Interurbano.

En esta Sierra existen ocho estratovolcanes traslapados denominados de norte a sur La Bufa, La Catedral, Iturbide, Chimalpa, Salazar, San Miguel, La Corona y Zempoala, los cuales tuvieron periodos de actividad volcánica efusiva desde el Plioceno hasta el Pleistoceno.

2.2 Litología del bitúnel

En el entorno del sitio de estudio se llevaron a cabo levantamientos geológicos de semidetalle en los afloramientos de roca que se observaron en las principales cañadas y cortes de la carretera libre Toluca-México No. 15 y de la autopista No. 15D. La zona se caracteriza por tener una cobertura de suelo residual e importantes zonas de bosques, en las que se identificaron algunas unidades litológicas tales como: traquiandesitas (Tran), brechas consolidadas (brc), brechas tobáceas (brt), brechas de bloques (brb), derrames andesíticos intercalados con horizontes brechoides (Qan-br). A continuación se hace la descripción de las rocas y depósitos expuestos que definen la columna litológica del área de estudio y que se esquematiza en la Figura 3.

ERA PERIODO GEOLOGICO/EPISODIO	LITOLOGIA	DESCRIPCIÓN
CENOZOICO CUATERNARIO PLEISTOCENO	Qsr	Suelo residual (Qsr). Material limo-arcilloso de color pardillo oscuro a negro, producto del intemperismo de las rocas expuestas en la región.
	Qdt	Depósitos de talud (Qdt). Constituidos por fragmentos de roca mal clasificados, angulosos a subangulosos y de composición andesítica, embebidos en material limo-arcilloso de color pardillo oscuro.
	Depósitos piroclásticos de tobas y brechas:	
	tbt	Toba lítica (tbt). De color pardillo y ocre, con tonalidad roja, constituida por fragmentos líticos andesíticos, de tamaño ≤ 0.02 m. Al alterarse, la roca puede presentar las siguientes condiciones: arcilloso, limo-arcilloso y arcillo-arenoso.
	tbc	Toba de ceniza (tbc). De color gris a gris verdoso, poco consolidada, conformada por escasos fragmentos líticos de andesita, pómez y cristales micólicos. Al alterarse, la condición del material es arcilloso y arcillo-arenoso.
	brb	Brecha de bloques (brb). Constituida por bloques angulosos y subangulosos de composición andesítica y con tamaños que varían de 0.25 a 1.00 m, embebidos en una matriz limo-arenosa (0.06 a 0.43 mm) de color gris con tonalidad pardilla, donde el porcentaje de bloques es mayor con respecto a la matriz. Se presentan horizontes de tobas líticas.
	brt	Brecha tobácea (brt). Constituida por fragmentos angulosos a subredondeados de composición andesítica y de tamaño variable de 0.02 a 0.08 m y ocasionalmente se observan bloques mayores a 1 m, embebidos en una matriz arena fina a gruesa (0.08 a 4.8 mm) de color gris claro, donde el porcentaje de fragmentos es mayor con respecto a la matriz. Se presentan horizontes de tobas líticas.
NEOGENO PLIOCENO	brc	Brecha consolidada (brc). Constituida por clastos andesíticos de color gris oscuro y rojo, de forma subredondeada a subangulosos y de tamaño de 0.01 a 0.10 m y esporádicamente fragmentos de hasta 1.50 m, empaquetados en una matriz compacta de arena fina (0.08 a 0.43 mm) y de color gris oscuro con tonalidades pardillas. La relación entre la matriz y los clastos se presenta en la misma proporción. Se presentan horizontes de tobas líticas.
	an	(Qan-br) Andesita y brechas andesíticas. Derrames de andesita porfídica de color gris con tonalidad roja, que alternan con brechas andesíticas, de color pardillo con tonalidad roja, sus fragmentos varían de 0.01 a 0.07 m y están empaquetados en una matriz vítreo, que al alterarse presenta una consistencia limo-arcillosa.
	Tran	Traquiandesita (Tran). Conjunto de rocas constituidas por traquiandesitas, dacitas y vitrófidos. Son de color gris con tonalidades rosáceas y rojas, de estructura compacta; constituidas por abundantes cristales de plagioclasa, anfíboles y piroxenos, embebidos en una matriz vítreo.

Figura 3. Columna litológica de la zona de estudio.

2.3 Condición geológica del bitúnel

Como indica la referencia 1, estructuralmente en la zona del bitúnel se han reconocido principalmente tres sistemas de fallas que son: N-S, NE-SW y E-W (Salinas et al., 2014). El sistema N-S es considerado el sistema más antiguo y ha sido reactivado en diferentes tiempos, seguido del sistema NE-SW relacionado con la zona de cizallamiento Tenochtitlán (De Cserna et al., 1988), el tercero y último sistemas de fallas se caracteriza por la presencia de fosas tectónicas delimitadas por la fosa de Chapa, Cuitzeo, Acambay, Barrientos (Mooser, 1992).

Con los datos obtenidos en la zona, se realizó el estereograma de la Figura 4, en este se puede observar que los sistemas de fallas y fracturas del sitio, coinciden con las orientaciones de los sistemas dominantes a nivel regional.

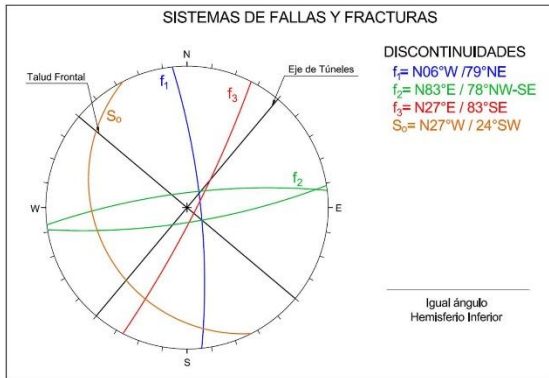


Figura 4. Estereograma con las orientaciones de los sistemas principales de fallas y fracturas del bitúnel.

3 OBJETIVOS

El objetivo principal de este artículo son de describir y evaluar los tipos de tratamientos de sostenimiento e impermeabilización de las galerías de la obra del bitúnel de acuerdo a las características geomecánicas de materiales y a las condiciones geohidrológicas que conforman el macizo rocoso.

4 LOCALIZACIÓN DE LAS GALERÍAS

Para determinar la ubicación y el número de salidas de emergencia que se requieren a lo largo del tramo del túnel del Tren Interurbano Toluca-México, se realizó en base a la normativa en materia de seguridad para sistemas de transportes ferroviarios en México, además de estar apoyado también en normativas europeas que tratan en particular de sistemas ferroviarios.

En el proyecto se identificaron dos tipos de galerías distribuidas en el bitúnel, las de Evacuación y las Técnicas.

Las galerías se ubicaron en los puntos geológicos e hidrológicos más convenientes, con un total de 10 galerías de evacuación a cada 500 m de separación y 5 galerías técnicas con separación de 1 km.

5 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS GALERIAS

De acuerdo a la referencia 1, debido a los diferentes tipos de materiales y características que conforman el macizo rocoso, se definieron dos zonas de materiales, zona de roca y zona de brechas.

La zona de rocas está conformada por las unidades geotécnicas Ug3a y U3b de material de Andesita (referencia 1), las cuales tienen una resistencia a compresión simple (RCS) mayor a 30 MPa y un índice de calidad de roca (RQD) > 40.

De igual manera de acuerdo a la referencia 1 y 2, en la zona de brechas se encuentran las unidades geotécnicas Ug2d y Ug3c, las cuales la matriz que los conforma tiene una resistencia menor a los 30 MPa.

Para cada una de estas zonas (roca y brechas), con el propósito de estabilizar el frente de excavación de las galerías, se definieron tratamientos de sostenimiento y de impermeabilización los cuales se describen en los capítulos siguientes.

6 TRATAMIENTOS EN ZONA DE ROCA

De acuerdo a la referencia 1, esta zona se encuentra dentro de la unidad litológica de andesitas Qan-br, conformada por las unidades geotécnicas Ug3a y U3b, los tipos de tratamientos en la zona de roca están considerados como tipo 1, y de acuerdo a las sus condiciones geohidrológicas (filtraciones) que se presentan en el macizo rocoso a través de los sistemas de fracturamiento, se definieron dos conjuntos de tratamientos, los de sostenimiento y de impermeabilización.

El propósito de ambos tipos de tratamientos es estabilizar la sección de la galería durante su excavación, los cuales se describen a continuación.

6.1 *Tratamientos de sostenimiento*

La función principal de los tratamientos de sostenimiento, como su nombre lo indica es estabilizar el perímetro de la sección proporcionando el soporte de la misma, la cual se divide en dos etapas, la primera previa al corte de las dovelas y durante el proceso de excavación, las cuales se describen a continuación.

6.1.1 *Etapas previa al corte de las dovelas*

El tipo de tratamiento para esta etapa se aplicó en ambos tipos de galerías (Evacuación y Técnicas), la finalidad de este tratamiento es el de aportar soporte y adherencia de las dovelas hacia el terreno.

El tratamiento consistió en un arreglo de anclas de fricción con varilla corrugada de 1" de diámetro de 4 m de longitud, en el perímetro de la sección, inyectadas con lechada de cemento en barrenos de 2" de diámetro y finalmente la colocación de un marco metálico en el perímetro de la sección, con drenes en la parte superior de tubo de PVC de 1 ½" de diámetro y 12 m de longitud.

El diseño propuesto para cada tipo de galería se describe a continuación, (tabla 1 y figura 5).



Figura 5. Diseño para las galerías de evacuación tipo GE-I, en la etapa previa al corte de las dovelas, referencia 3.

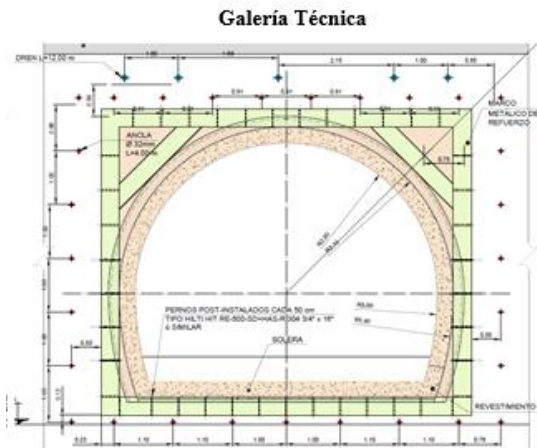


Figura 6. Diseño para las galerías técnicas tipo GT-I, en la etapa previa al corte de las dovelas, referencia 3.

6.1.2 Etapa durante el proceso de excavación

Para esta etapa se consideró un material con una resistencia a compresión > 30 MPa y un índice de calidad de Roca (RQD) > 40, y de igual manera se aplicó para ambos tipos de galerías (evacuación y técnica)

En base a lo anterior se determinó un tratamiento en la bóveda conformado por anclas de fricción de varilla de acero corrugada de 1” de diámetro y de 4 m de longitud, con aureolas de 45 grados a cada 1.5 m y una capa de concreto lanzado de $f'c=300$ kg/cm² con fibras de acero 30 kg/m³, de 0.30 m de espesor.

La excavación se realizó por métodos mecánicos usando martillos con cuñas de alto impacto para romper el material durante la excavación.

También se utilizaron productos expansivos no explosivos, pero no dieron buenos resultados debido a la dureza de la roca, la cual en general tiene una resistencia a compresión simple > 50 MPa.

El diseño propuesto para esta etapa se describe a continuación, (figura 7 y tabla 1).

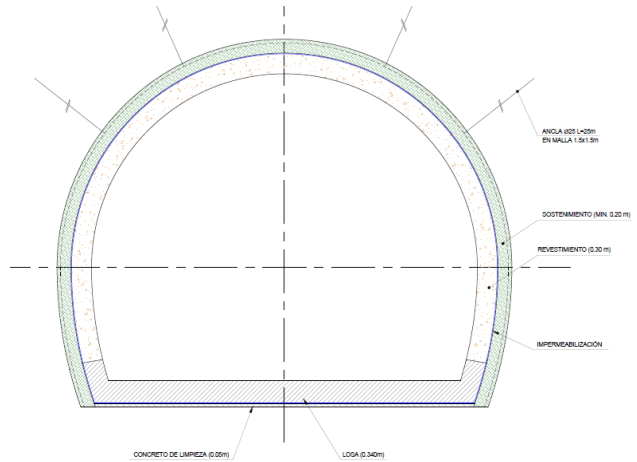


Figura 7. Diseño de arreglo de anclas y concreto lanzado para las galerías de evacuación y técnicas tipo GE-I y GT-I, referencia 3.

Las características para los tratamientos de sostenimiento en la zona de roca se enuncian en la siguiente tabla.

Tabla 1. Tratamientos de sostenimientos en zona de roca para galerías de evacuación y técnicas tipo GE-I y GT-I.

MARCOS METÁLICOS			
TIPO	GALERÍA	CARGA (t/m ²)	SEPARACIÓN (m)
TRATAMIENTOS DE SOSTENIMIENTO EN ZONA DE ROCA			
Etapa previa al corte de las dovelas			
T1	GT-05		
	GE-18	NR	NR
	GE-12		
Etapa durante el proceso de excavación			
T1	GT-05		
	GE-18	NR	NR
	GE-12		
ANCLAJE			
VARILLA			
DIÁMETRO (Pulg.)	LONGITUD (m)	ARREGLO (m)	

TRATAMIENTOS DE SOSTENIMIENTO EN ZONA DE ROCA

Etapa previa al corte de las dovelas

1	4	0.75
---	---	------

Etapa durante el proceso de excavación

1	4	1.5x1.5
---	---	---------

CONCRETO LANZADO

FIBRAS	ESPESOR
kg/m ³	(m)

TRATAMIENTOS DE SOSTENIMIENTO EN ZONA DE ROCA

Etapa previa al corte de las dovelas

NR	NR
----	----

Etapa durante el proceso de excavación

30	0.3
----	-----

*NR, No se requiere.

6.2 Tratamientos de impermeabilización

De acuerdo a las condiciones geohidrológicas (filtraciones) que se presentan en el macizo rocoso a través de los sistemas de fracturamiento, de igual manera se determinaron dos etapas para los tratamientos de impermeabilización, previo al corte de las dovelas y durante el proceso de excavación, los cuales se presentan a continuación.

6.2.1 Etapa previa al corte de las dovelas

Derivado una considerable aportación de agua en la sección de entronque, para ambos tipos de galerías además de la colocación de anclas se determinó un tratamiento en base a una inyección de consolidación en el perímetro de la sección los cuales deberán inyectarse alternadamente, (figura 8).

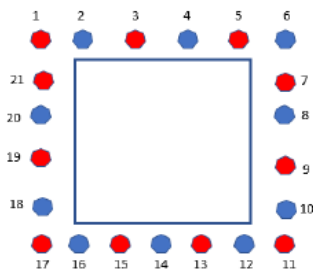


Figura 8. Diseño de plantilla de barrenos de inyección para tratamiento de impermeabilización previo al corte de las dovelas, referencia 2.

6.2.2 Etapa de revestimiento final

Para garantizar la estanqueidad en ambos tipos de galerías es indispensable colocar una membrana impermeable a base de geotextil de 500gr/m² y de geomembrana de polietileno de alta densidad de con un espesor de 1.5 mm, entre el revestimiento primario y el secundario (definitivo de concreto hidráulico). El revestimiento definitivo es a base de armado de varilla de acero de 5/8” y 1/2” de diámetro, (figura 8 y tabla 2).



Figura 9. Tratamiento de impermeabilización con geotextil y geomembrana, referencia 3.

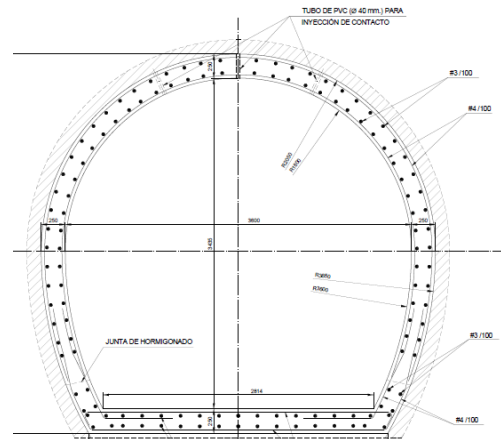


Figura 10. Sección de tratamiento de impermeabilización con geotextil y geomembrana, referencia 3.

Las características para los tratamientos de sostenimiento en la zona de roca se enuncian en la siguiente tabla.

Tabla 2. Tratamientos de impermeabilización en zona de roca para galerías de evacuación y técnicas tipo GE-I y GT-I.

GALE- RÍA	GEOTEX- TIL	GEOMEN- BRANA	BARRENOS DE INYEC- CIÓN	
			DIAMETRO	SEPARA- CIÓN
			(g/m ²)	(mm)
TRATAMIENTOS DE IMPERMEABILIZACIÓN EN ZONA DE ROCA (T1)				
Etapas previas al corte de las dovelas				
GE-18	NR	NR	NR	NR
GE-12				
GT-05			2	0.8
Etapas de revestimiento final				
GE-18				
GE-12	500	1.5 (Alta densidad)	NR	NR
GT-05				

ANCLAJE		CONCRETO LANZADO		
VARILLA		SEPARACIÓN	FIBRAS	ESPESOR
DIÁMETRO	LONGITUD			
(Pulg.)	(m)	(m)	kg/m ³	(m)
TRATAMIENTOS DE IMPERMEABILIZACIÓN EN ZONA DE ROCA (T1)				
Etapas previas al corte de las dovelas				
1	4	1	NR	NR
Etapas de revestimiento final				
	16			
1/2"	(longitud de la galería)	0.2 (Horizontal y vertical)	30	0.30

*NR, No se requiere.

7 TRATAMIENTOS EN ZONA DE BRECHA

Esta zona se encuentra dentro de la unidad litológica de brechas andesitas (Qan-br) y tobáceas o de alteración, de los tipos de tratamientos para esta zona están considerados como tipo 2, en esta zona al igual que la anterior se definieron dos conjuntos de tratamientos, los de sostenimiento y de impermeabilización, los cuales se describen a continuación

7.1 Tratamientos de sostenimiento

La función principal de los tratamientos de sostenimiento, es estabilizar el perímetro de la sección proporcionando el soporte de la misma, la cual se divide en dos etapas, las cuales se describen a continuación.

7.1.1 Etapas previas al corte de las dovelas

El tipo de tratamiento para esta etapa se aplicó en ambos tipos de galerías (Evacuación y Técnicas), la finalidad de este tratamiento es de aportar soporte en la bóveda de la sección y adherencia de las dovelas hacia el terreno.

El tratamiento consistió en colocar en la zona de los hastiales y el piso un arreglo de anclas de fricción con varilla corrugada de 1" de diámetro de 4 m de longitud, en el perímetro de la sección, inyectadas con lechada de cemento en barrenos de 2" de diámetro.

En la parte de la bóveda para su soporte, se colocó un paraguas de micropilotes con tubos de acero de 4" de diámetro y de 9 m de longitud con una separación de 0.35 m, inyectados con lechada de cemento, con drenes en la parte superior de tubo de PVC ranurado de 1 1/2" de diámetro y 12 m de longitud. Finalmente en el perímetro de la sección de entronque se colocó un marco metálico, El diseño propuesto para cada tipo de galería se describe a continuación, (figura 11 y 12).



Figura 11. Diseño para las galerías de evacuación tipo GE-II, en zona de brechas, referencia 3.



Figura 12. Diseño para las galerías técnicas tipo GT-II, en zona de brechas, referencia 3.

En la galería GT-04 se presentó una variación en relación al tratamiento para su sostenimiento, ya que debido a la altura del paraguas de enfilaje programado, resulta realizar maniobras muy complicadas para conservar la pendiente del 3%, en la perforación de los barrenos y la colocación del enfilaje.

Por esta razón se modificó el arreglo del enfilaje con una fila adicional en posición horizontal de 5 micropilotes en ambos hastiales, el cual se ilustra a continuación en la figura 13.

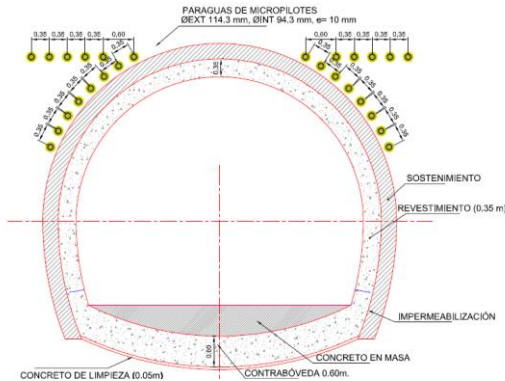


Figura 13. Diseño de sostenimiento tipo 2 en la galería técnica tipo GE-II, en zona de brechas.

7.1.2 Etapa durante el proceso de excavación

Para esta etapa se consideró un material con una resistencia a compresión simple en la matriz < 30 MPa y de también se aplicó el tratamiento para ambos tipos de galerías (evacuación y técnica).

En base a lo anterior se determinó un tratamiento a base de marcos metálicos a cada metro con un revestimiento de concreto lanzado de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ con fibras de acero 30 kg/m^3 , de 0.30 m de espesor, con un avance de excavación máximo de 1 m.

La excavación se realizó por métodos mecánicos usando martillo de regular impacto, el diseño propuesto para esta etapa se describe a continuación, (figura 14).

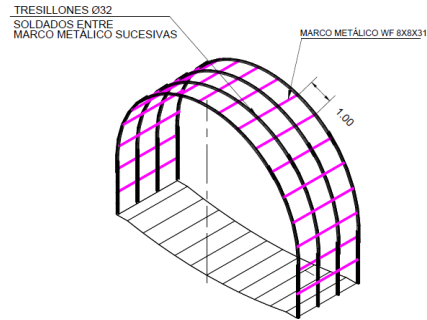


Figura 14. Diseño de marcos metálicos para las galerías de evacuación y técnicas tipo GE-II y GT-II, en zona de brechas, referencia 3.

Las características para los tratamientos de sostenimiento en la zona de roca se enuncian en la siguiente tabla.

Tabla 3. Tratamientos de sostenimiento en zona de brechas para galerías de evacuación y técnicas tipo GE-II y GT-II.

TIPO	GALERÍA	MARCOS METÁLICOS	
		CARGA (t/m^2)	SEPARACIÓN (m)
TRATAMIENTOS DE SOSTENIMIENTO EN ZONA DE BRECHAS			
Etapa previa al corte de las dovelas			
T2	GE-20		
	GE-16		
	GE-14	NR	NR
	GT-03		
	GE-10		
	Etapa durante el proceso de excavación		
T2	GE-20		
	GE-16		
	GE-14	17	1
	GT-03		
	GE-10		

ANCLAJE			ENFILAJE		
VARILLA		SEPARACIÓN	MICROPILOTES		SEPARACIÓN
DIÁMETRO	LONGITUD		DIÁMETRO	LONGITUD	
(Pulg.)	(m)	(m)	(Pulg.)	(m)	(m)
TRATAMIENTOS DE SOSTENIMIENTO EN ZONA DE BRECHAS					
Etapa previa al corte de las dovelas					
1	4	1	4	9	0.35
Etapa durante el proceso de excavación					
NR	NR	NR	NR	NR	NR
CONCRETO LANZADO					
FIBRAS			ESPESOR		
kg/m ³			(m)		
NR			NR		
30			0		

*NR, No se requiere.

7.2 Tratamiento de impermeabilización

De acuerdo a las condiciones geohidrológicas que aportan filtraciones en el macizo rocoso a través del material de roca con alto diaclasamiento o de brecha con una matriz medianamente permeable, se determinaron tratamientos similares para la impermeabilización el capítulo 5.2, los cuales se dividen en dos etapas, previa al corte de la dovelas y de revestimiento final.

En la etapa previa al corte de las dovelas la diferencia al aplicar este procedimiento en un material más permeable, es un mayor consumo de la lechada de cemento.

Las características para los tratamientos de sostenimiento en la zona de brecha se enuncian en la siguiente tabla.

Tabla 4. Tratamientos de impermeabilización en zona de brechas para galerías de evacuación y técnicas tipo GE-II y GT-II.

GALERÍA	BARRENOS DE INYECCIÓN			
	GEOTEX-TIL	GEOMENBRANA	DIÁMETRO	SEPARACIÓN
	(g/m ²)	(mm)	(t/m ²)	(m)
IMPERMEABILIZACIÓN EN ZONA DE BRECHA				
Etapa previa al corte de las dovelas				
GE-20				
GE-16				
GE-14	NR	NR	2	0.5
GE-10				
GT-03				
Etapa de revestimiento final				
GE-20		1.5		
GE-16		(Alta densidad)		
GE-14	500		NR	NR
GE-10				
GT-03				

ANCLAJE		CONCRETO LANZADO		
VARILLA		SEPARACIÓN	FIBRAS	ESPESOR
DIÁMETRO	LONGITUD			
(Pulg.)	(m)	(m)	kg/m ³	(m)

IMPERMEABILIZACIÓN EN ZONA DE BRECHA

Etapa previa al corte de las dovelas

1	4	0.8	NR	NR
---	---	-----	----	----

Etapa de revestimiento final

	16			
1/2"	(longitud de la galería)	0.2	30	0.3

*NR, No se requiere.

8 EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS

Derivado de la información recabada de los levantamientos geotécnicos realizados en campo (fichas geotécnicas) se realizó una evaluación de los tratamientos realizados a la fecha, para asegurar la estabilidad del frente de excavación, dicha evaluación se realizó para la zona de roca y en brecha.

8.1 Evaluación de tratamientos en roca

Para el caso de los tratamiento de sostenimiento, se realizó una revisión de las posibles cuñas generadas por la intersección de los sistemas de fracturamiento citados la referencia 1, para cada una de las galerías que se encuentran en la zona de roca (GT-05, GE-18 y GE-12) a lo largo del bitúnel, los cuales se describen a continuación (figura 11).

Los resultados del análisis de cuñas, para la cuña máxima se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Resultados de análisis de cuñas para las galerías GT-05, GE-12 y GT-18.

Galería	Ápice Máximo (m)	Peso (Ton)	Volumen (m ³)	F.S.
GT-05	1.41	1.75	0.65	2.3
GE-12	2.77	1.01	0.37	1.5
GE-18	1.47	0.09	0.03	0.6

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de cuñas, los tratamientos de sostenimiento aplicados en la zona de roca siguen vigentes, ya que se encuentran dentro de las condiciones observadas en campo.

Únicamente para el caso de la galería GT-05, no había la necesidad de colocar las anclas de fricción, pues los sistemas de fracturamiento no tenían una continuidad mayor a 2 m.

Las cuñas máximas que se forman en las galerías en zona de roca se presentan a continuación.

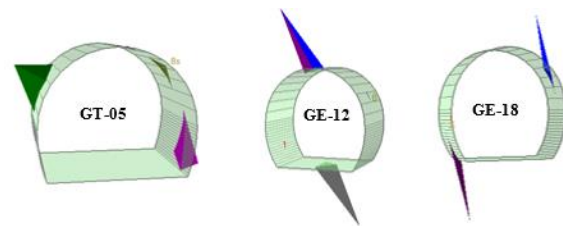


Figura 15. Análisis de cuñas para las galerías GT-05, GE-12 y GT-18.

8.2 Evaluación de tratamientos en zona de brecha

Para el caso de los tratamientos de sostenimiento, se realizaron levantamientos geotécnicos en las galerías en la zona de brecha por el método de Bimrock, en los cuales se determinó en campo las características geomecánicas de la matriz y la de los bloques que contiene.

Con los resultados obtenidos en los materiales de la zona de brecha se presentan condiciones estables en el frente.

Por las características geomecánicas de los materiales en el frente de excavación los tratamientos sugeridos por la proyectista siguen vigentes, ya que van de acuerdo con las condiciones para el sostenimiento en el frente de excavación.

Para la etapa previa al corte de las dovelas, de acuerdo a lo anterior se determinó que la longitud de los enfilajes que tengan como mínimo un traslape mínimo de 2 m, para dar el soporte a la clave de la galería.

Para la excavación en la zona de brecha, el avance se puede dar a dos metros con la colocación inmediata de concreto lanzado y posteriormente la colocación de los marcos metálicos a cada metro como lo indica el tratamiento.

A continuación se describen las características geomecánicas de los levantamientos de campo (Bimrock) en las galerías en la zona de brechas.

Tabla 6. Características geomecánicas de las galerías en la zona de brechas.

GALERÍA	LITOLOGÍA		MATRIZ	
	UNIDAD GEO-TÉCNICA	DESCRIPCIÓN	TIPO	DUREZA (MPa)
GALERÍAS DE EVACUACIÓN				
GE-20	Ug-3c	Brecha andesítica	Limo-arenosa	1-5
GE-16	Ug-3c	Brecha andesítica	Limo-arenosa	1-5
GE-14	Ug-3c	Brecha andesítica	Limo-arenosa	1-5
GE-10	Ug-2d	Brecha tobácea	Limo-arenosa	1-5
GALERÍAS DE TÉCNICAS				
GT-03	Ug-3c	Brecha andesítica	Limo-arenosa	1-5
GT-04	Ug-3c	Brecha andesítica	Limo-arenosa	1-5

8.3 Tratamientos de impermeabilización

Para la etapa previa al corte de las dovelas, por medio de las lecturas de los piezómetros ubicados en superficie y la observada en el sitio (durante la perforación de barrenos para la colocación de anclaje), se registró un flujo de agua máximo de 2 l/s, para el caso de esta aportación constante de agua se realizó un tratamiento de inyección de lechada de cemento para disminuir el gasto. La galería que presento aportaciones de agua mayores a 2 l/s y que se dio tratamiento de impermeabilización fue la GT-05.

Actualmente la GT-02 presenta el mismo gasto y ya se están realizando barrenos para dicho tratamiento.

9 CONCLUSIONES

En el caso de la evaluación de tratamientos de sostenimiento en roca se determina a partir de los resultados obtenidos en el análisis de cuñas, y de acuerdo a la cuña máxima se determina el tratamiento y arreglo de anclaje.

En la evaluación de tratamientos en zona de brecha, para el caso de los tratamientos de sostenimiento, se realizaron levantamientos geotécnicos en las galerías en la zona de brecha por el método de Bimrock, para determinar las características geomecánicas de la matriz y la de los bloques que contiene.

Para los tratamientos de impermeabilización se determinó la etapa previa al corte de las dovelas, por medio de las lecturas de los piezómetros ubicados en superficie y

la observada en el sitio durante la perforación de barrenos para la colocación de anclaje, si se presenta un gasto constante > 1 l/s, se procede a un tratamiento de inyección como en el caso de la galería GT-05 con un gasto > 2 l/s.

REFERENCIAS

1. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, Estudio para el modelo geológico y geotécnico y sistemas de auscultación Tren Interurbano Toluca-México (TIMT), Condiciones Geológicas Geohidrológicas y Geotécnicas en los Túneles del Tramo II, 2017.

2. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, Análisis y recomendaciones para el acondicionamiento de terreno con aditivos en el frente de excavación, considerando las características geológicas, geotécnicas y geohidrológicas de los tramos donde se encuentran las formaciones geológicas correspondientes a brechas para prevenir daños en la cabeza de corte y ayudar a evitar en lo posible afectar el flujo en manantiales, 2017.

3. SENER, Adecuaciones, actualizaciones y modificaciones al proyecto ejecutivo del Tren Interurbano México – Toluca que se requieran durante la etapa constructiva., 2017.

4. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, Manual de Diseño de Obras Civiles, Tomo B.3.4. Pruebas de campo y laboratorio.

5. GONZÁLEZ DE VALLEJO, LUIS I., Ingeniería Geológica, Editorial Pearson Prentice Hall, 2002, Pearson Educación. Madrid, España

6. BIENIAWSKI, Z. T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons, 1989.

7. PALMTRÖM A. RMI - a rock mass characterization system for rock engineering purposes. Testis de Doctorado Universidad de Oslo, 1995.

8. ARILD PALMTRÖM. Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). Tunnels and Underground Space Technology, 2005.

9. BARTON, N. & CHOUBEY, V. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics 1/2:1-54, 1977.

10. HOEK, E., CARTER, T.G., DIEDERICHS. Quantification of the Geological Strength Index Chart. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, 2013, San Francisco, CA, USA.

11. HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C.T., and Corkum, B. (2002): Hoek-Brown failure criterion, edition. Proc. North American Rock Mechanics Society, 2002.

12. DEERE, D. U., & MILLER, R. P. Engineering classification and index properties for intact rock. Illinois Univ. At Urbana Dept. Of Civil Engineering, 1966.