

# Evaluación de tratamientos de sostenimiento y de impermeabilización en las galerías del Bitúnel del tren interurbano México – Toluca (TIMT)

JULIO CHABLE <sup>a,1</sup>, JORGE LÓPEZ <sup>b</sup> y ULISES TALONIA <sup>c</sup>

<sup>a,b</sup> *Ingenieros de Proyectos, Mecánica de Rocas, Comisión Federal de Electricidad, GEIC.*

<sup>c</sup> *Jefe de oficina, Mecánica de Rocas, Comisión Federal de Electricidad, GEIC.*

**Resumen.** La construcción del proyecto del Tren Interurbano México-Toluca, depende fundamentalmente de tres aspectos: las 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.

Palabras clave: Bitúnel, litología, galería, anillo, dovela, zonificación, tratamiento, sostenimiento, zona de roca, zona de brechas, impermeabilización, revestimiento, membrana, geotextil, análisis de cuñas.

## 1. Aspectos generales

### 1.1. Antecedentes

Como parte de los trabajos de los “Servicios de asistencia técnica de “CFE” durante la construcción del tramo II, 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

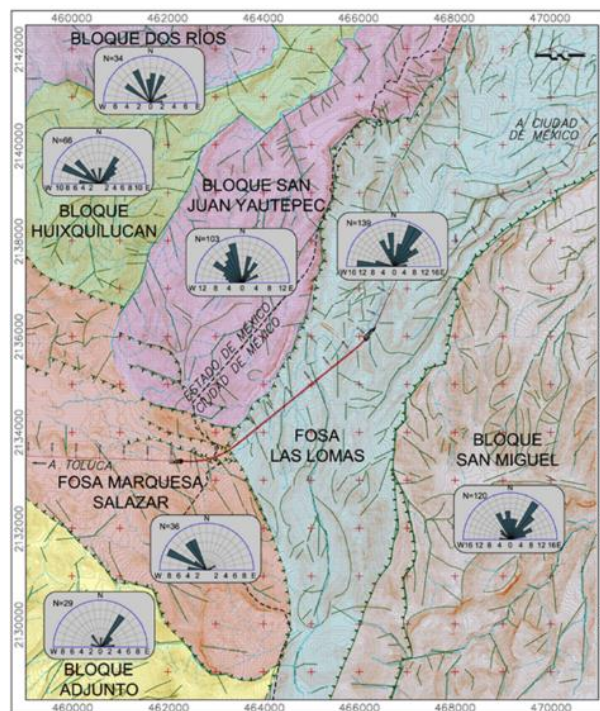
---

<sup>1</sup> Julio C. Chable Moreno, Mecánica de Rocas, Comisión Federal de Electricidad-GEIC, Augusto Rodin 265, Col. Noche Buena C.P. 03720, Ciudad de México; E-mail: julio.chable01@gmail.com.

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.** Disposición estructural de los sub-bloques en los que se localiza el 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 7.5 m de diámetro, 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 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.

Para la construcción del bitúnel fue por medio de dos tuneladoras de 8.5 m de diámetro, operando simultáneamente a modo cerrado las 24 horas del día durante un periodo de 2 años aproximadamente.

El interior del túnel fue revestido un anillo formado por seis dovelas de concreto armado con una resistencia de aproximadamente 350 kg/cm<sup>2</sup>, de un espesor de 0.35 cm.

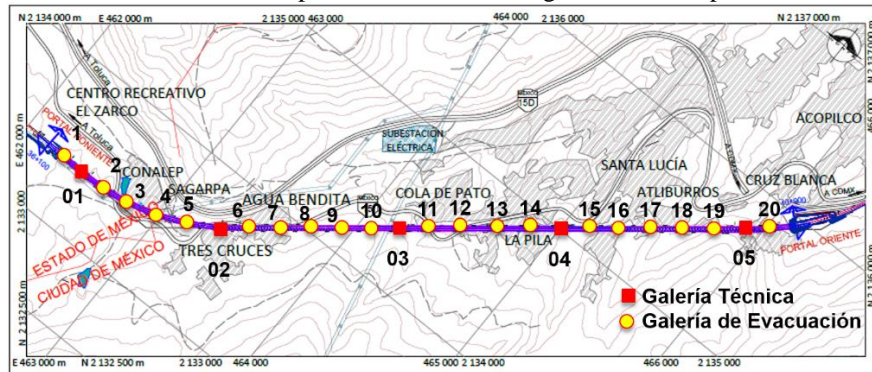
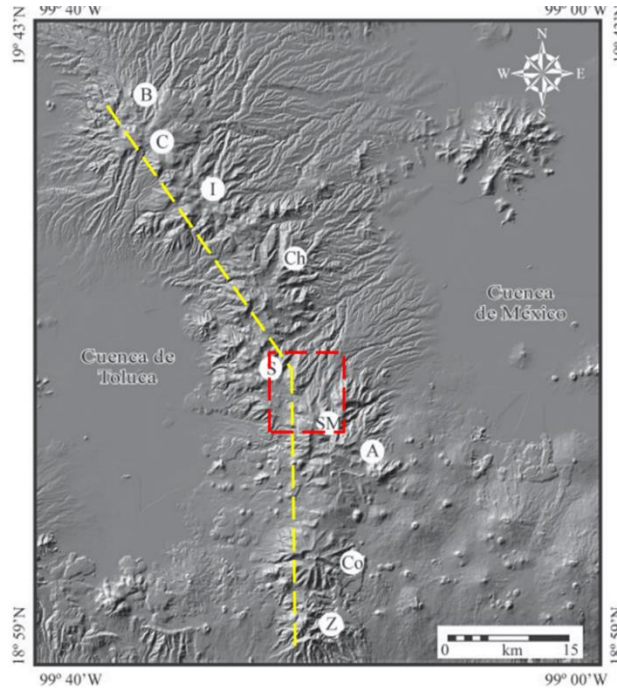


Figura 2. Planta de localización del bitúnel proyecto TIMT.

## 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 (B), La Catedral (C), Iturbide (I), Chimalpa (Ch), Salazar (S), San Miguel (SM), Ajusco (A), La Corona (Co) y Zempoala (Z), los cuales tuvieron periodos de actividad volcánica efusiva desde el Plioceno hasta el Pleistoceno, figura 3, referencia 2.



**Figura 3.** Alineamiento de los aparatos volcánicos que conforman La Sierra de Las Cruces y la inflexión de la misma en dirección sur en la zona de estudio del Tren Interurbano, (Imagen tomada de García Palomo et al., 2008).

## 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 4, referencia 2.

ERA PERIODO ÉPOCA	LITOLOGÍA		DESCRIPCIÓN
	Qsr	Qdt	
CENOZOICO			<b>Suelo residual (Qsr).</b> Material limo-arcilloso de color pardo oscuro a negro, producto del intemperismo de las rocas expuestas en la región.
			<b>Depósitos de talud (Qdt).</b> Constituidos por fragmentos de roca mal clasificados, angulosos a subangulosos y de composición andesítica, embebidos en material areno-arcilloso de color pardo oscuro.
			<b>Depósitos piroclásticos de tobas y brechas.</b>
		tbl	<b>Toba lítica (tbl).</b> De color pardo y ocre, con tonalidad rojiza, constituida por fragmentos líticos andesíticos, de tamaño $\leq 0,02$ m. Al alterarse, la roca puede presentar las siguientes condiciones: arcilloso, limo-arcilloso y arcillo-arenoso.
		tbc	<b>Toba de ceniza (tbc).</b> De color gris a gris verdoso, poco consolidadas, conformada por escasos fragmentos líticos de andesita, pómez y cristales máficos. Al alterarse, la condición del material es arcilloso y arcillo-arenoso.
		brb	<b>Brecha de bloques (brb).</b> 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 parda, donde el porcentaje de bloques es mayor con respecto a la matriz. Se presentan horizontes de tobas líticas.
		Qdt-br	<b>Brecha tobácea (brt).</b> Constituida por fragmentos angulosos a subredondeados de composición andesítica y de tamaño variable de 0,02 a 0,06 m y ocasionalmente se observan bloques mayores a 1 m, embebidos en una matriz de arena fina a gruesa (0,8 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.
		brt	<b>Brecha consolidada (brc).</b> Constituida por clastos andesíticos de color gris oscuro y rojo, de forma subredondeados 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 pardas. La relación entre la matriz y los clastos se presenta en la misma proporción. Se presentan horizontes de tobas líticas.
		brc	<b>(Qan-br) Andesita y brechas andesíticas.</b> Derrames de andesita porfídica de color gris con tonalidad rojiza, que alternan con brechas andesíticas, de color pardo con tonalidad rojiza, sus fragmentos varían de 0,01 a 0,07 m y están empaquetados en una matriz vítrea, que al alterarse presenta una consistencia limo-arcillosa.
		Qdt-br	
	an		
	br		
NEOGENO	Ttran		<b>Traquiandesita (Ttran).</b> Conjunto de rocas constituidas por traquiandesitas, dacitas y vitrófidos. Son de color gris con tonalidades rosáceas y rojizas, de estructura compacta; constituidas por abundantes cristales de plagioclasa, anfíboles y piroxenos, embebidos en una matriz vítrea.

Figura 4. Columna litológica de la zona de estudio.

### 2.3. Condición geológica del bitúnel

Como indica la referencia 2, 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 5, 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.

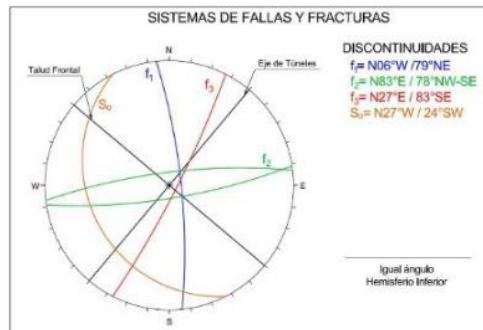


Figura 5. Estereograma con las orientaciones de los sistemas principales de fallas y fracturas del bitúnel, referencia 2.

### **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 20 galerías de evacuación a cada 250 m de separación y 5 galerías técnicas con separación de 1 km.

### **5. Zonificación de las galerías**

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 de las galerías en zona de roca**

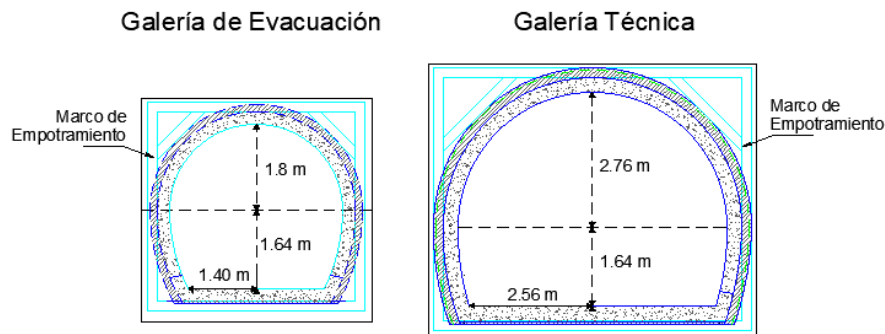
De acuerdo a la referencia 1, esta zona se encuentra dentro de la unidad litológica de andesitas Qan-br, conformada por las unidades geotécnicas Ug3a y U3b, los tipos de tratamientos en la zona de roca están considerados como tipo 1, y de acuerdo a las sus condiciones geohidrológicas (filtraciones) que 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. Etapa previa al corte de las dovelas

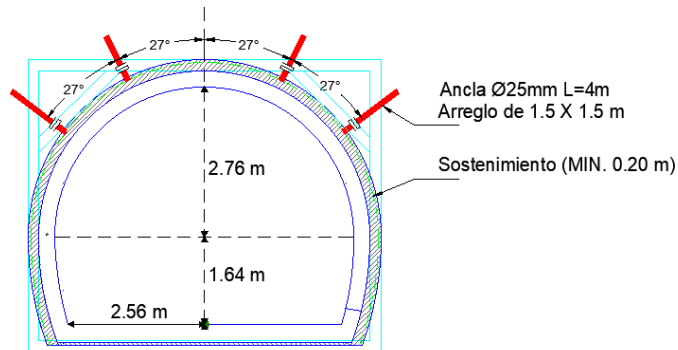
El tipo de tratamiento para esta etapa se aplicó en ambos tipos de galerías (Evacuación y Técnicas), la finalidad de este tratamiento es el de aportar soporte y adherencia de las dovelas hacia el terreno. El tratamiento consistió en un arreglo de anclas de fricción con varilla corrugada de 1" de diámetro 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 1/2" de diámetro y 12 m de longitud. El diseño propuesto para cada tipo de galería se describe a continuación, (tabla 1 y figura 6).



**Figura 6.** Diseño para las galerías de evacuación y técnica tipo GE-I y 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 27 grados a cada 1.5 m y con un sostenimiento (primario) de concreto lanzado de  $f'c=300$  kg/cm<sup>2</sup> con fibras de acero 30 kg/m<sup>3</sup>, 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, referencia 4 y 5.



**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 y 5.

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

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

TIPO	GALERÍA	MARCOS METÁLICOS		ANCLAJE		CONCRETO LANZADO		
		CARGA	SEPARACIÓN	VARILLA	ARREGLO	FIBRAS	ESPESOR	
		(t/m <sup>2</sup> )	(m)	DIÁMETRO	LONGITUD	(m)	kg/m <sup>3</sup>	(m)
				(Pulg.)	(m)			
<b>TRATAMIENTOS DE SOSTENIMIENTO EN ZONA DE ROCA</b>								
<b>Etapa previa al corte de las dovelas</b>								
T1	GT-05							
	GE-18	NR	NR	1	4	1	NR	NR
	GE-12							
<b>Etapa durante el proceso de excavación</b>								
T1	GT-05							
	GE-18	NR	NR	1	4	1.5x1.5	30	0
	GE-12							

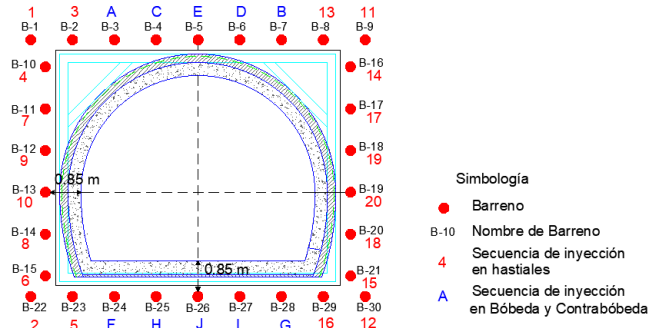
NR, No se requiere

## 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

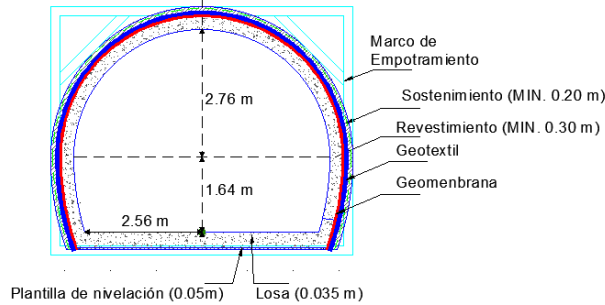
Derivado una considerable aportación de agua en la sección de entronque, para ambos tipos de galerías además de la colocación de anclas se determinó un tratamiento en base a una inyección de consolidación en el perímetro de la sección los cuales deberán inyectarse alternadamente partiendo de las extremidades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



**Figura 8.** Diseño de plantilla de barrenos de inyección para tratamiento de impermeabilización previo al corte de las dovelas, referencia 2 y 3.

### 6.2.2. Etapa de revestimiento final

Para garantizar la estanqueidad en ambos tipos de galerías es indispensable colocar una membrana impermeable de geotextil de 500gr/m<sup>2</sup> y de geomenbrana de polietileno de alta densidad de con un espesor de 1.5 mm, entre el sostenimiento (primario) y el revestimiento (secundario o definitivo). El revestimiento definitivo es a base de armado de varilla de acero de 5/8" y 1/2" de diámetro, figura 9 y tabla 2, referencia 3.



**Figura 9.** Tratamiento de impermeabilización con geotextil y geomenbrana, 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.

GALERÍA	GT	GM	BARRENOS DE INYECCIÓN		ANCLAJE			CONCRETO LANZADO	
			Ø	SEP.	VARILLA Ø	LON.	SEP.	FIBRAS	ESP.
	(g/m <sup>2</sup> )	(mm)	(t/m <sup>2</sup> )	(m)	(Pulg.)	(m)	(m)	kg/m <sup>3</sup>	(m)
<b>Etapa previa al corte de las dovelas</b>									
GE-18	NR	NR	NR	NR	1	4	0.8	NR	NR
GE-12			2	0.8					
GT-05									
<b>Etapa de revestimiento final</b>									
GE-18	500	1.5 (Alta densidad)	1	1	1/2"	16 (longitud de la galería)	0.2 (Horizontal y vertical)	30	0.3
GE-12									
GT-05									

NR, No se requiere; GT, Geotextil; GM, Geomenbrana; SEP., Separación; LON., Longitud; ESP., Espesor; Ø, Diámetro.

## 7. Tratamiento de las galerías en zona de brechas

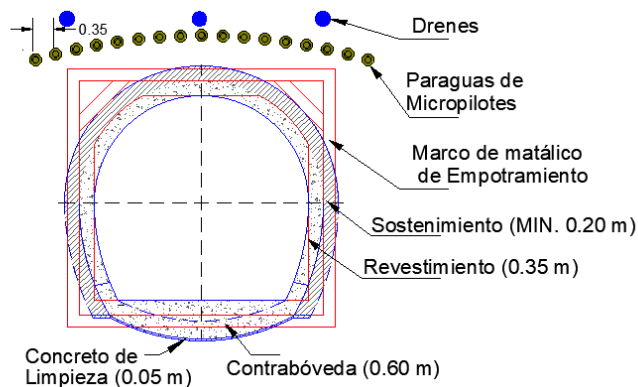
Esta zona se encuentra dentro de la unidad litológica de brechas andesitas (Qan-br) y tobáceas o de alteración, de los tipos de tratamientos para esta zona están considerados como tipo 2, en esta zona al igual que la anterior se definieron dos conjuntos de tratamientos, los de sostenimiento y de impermeabilización,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

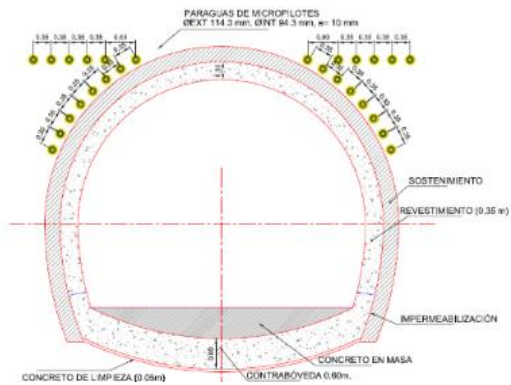
#### 7.1.1. Etapa previa al corte de las dovelas

El tipo de tratamiento para esta etapa se aplicó en las de galerías evacuación, 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 10.



**Figura 10.** Diseño para las galerías de evacuación tipo GE-II en zona de brechas, referencia 3.

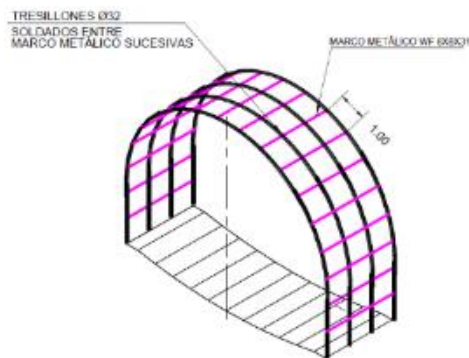
En la galería GT-04 se presentó una variación en relación al tratamiento para su sostenimiento, ya que debido a la altura del paraguas de enfilaje programado, resulta realizar maniobras muy complicadas para conservar la pendiente del 3%, en la perforación de los barrenos y la colocación del enfilaje. 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 11.



**Figura 11.** Diseño de sostenimiento tipo 2 en la galería técnica tipo GE-II, en zona de brechas, referencia 3

### 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  $f'c=300$  kg/cm<sup>2</sup> con fibras de acero 30 kg/m<sup>3</sup>, 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 12.



**Figura 12.** 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		ANCLAJE			ENFILAJE			CONCRETO LANZADO	
		CARGA (t/m <sup>2</sup> )	SEP. (m)	VARILLA Ø (Pulg.)	LON. (m)	SEP. (m)	MICROPILOTES Ø (Pulg.)	LON. (m)	SEP. (m)	FIBRAS kg/m <sup>3</sup>	ESP. (m)
<b>Etapa previa al corte de las dovelas</b>											
T2	GE-20 GE-16 GE-14 GT-03 GE-10	NR	NR	1	4	1	4	9	0	NR	NR
<b>Etapa durante el proceso de excavación</b>											
T2	GE-20 GE-16 GE-14 GT-03 GE-10	17	1	NR	NR	NR	NR	NR	NR	30	0

NR, No se requiere; GT, Geotextil; GM, Geomenbrana; SEP., Separación; LON., Longitud; ESP., Espesor; Ø, Diámetro.

### 7.2. Tratamientos 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 a 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	GT (g/m <sup>2</sup> )	GM (mm)	BARRENOS DE INYECCIÓN		ANCLAJE			CONCRETO LANZADO	
			Ø (t/m <sup>2</sup> )	SEP. (m)	VARILLA Ø (Pulg.)	LON. (m)	SEP. (m)	FIBRAS kg/m <sup>3</sup>	ESP. (m)
<b>Etapa previa al corte de las dovelas</b>									
GE-20 GE-16 GE-14 GE-10 GT-03	NR	NR	2	0.5	1	4	0.8	NR	NR
<b>Etapa de revestimiento final</b>									
GE-20 GE-16 GE-14 GE-10 GT-03	500	1.5 (Alta densidad)	NR	NR	1/2"	16 (longitud de la galería)	0.2	30	0.3

NR, No se requiere; GT, Geotextil; GM, Geomenbrana; SEP., Separación; LON., Longitud; ESP., Espesor; Ø, Diámetro.

## 8. Evaluación de tratamientos de las galerías

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.

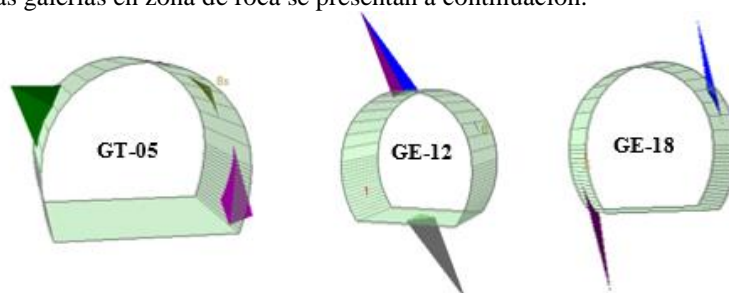
### 8.1. Evaluación de tratamientos en roca

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 12). 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 (m3)	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 13.** Análisis de cuñas para las galerías GT-05, GE-12 y GT-18, referencia 5.

### 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 GEOTÉCNICA	DESCRIPCIÓN	TIPO	DUREZA (MPa)
<b>GALERÍAS DE EVACUACIÓN</b>				
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
<b>GALERÍAS DE TÉCNICAS</b>				
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