



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA DEL REVESTIMIENTO DE CONCRETO
LANZADO DE UN TÚNEL EXCAVADO EN ROCAS BLANDAS**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

P R E S E N T A :

ING. LEIDY ELVIRA BEJARANO URREGO

DIRECTOR DE TESINA: DR. MANUEL J. MENDOZA LÓPEZ

MÉXICO, D.F.

MAYO 16 DE 2014

*Este trabajo está dedicado a todos los instrumentadores geotécnicos cuyo trabajo es vital
para la comprobación de teorías y criterios en la geotecnia.*

Mis más sinceros agradecimientos a la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en especial al Dr. Manuel J. Mendoza López quien dirigió este trabajo, a mi equipo de trabajo conformado por el M.C. Miguel Rufiar J, M.I. Enrique Ibarra R, Ing. Esp. Salvador A. Mendoza M, Ing. Esp. Gerardo González G, Ing. Diego A. González Martín y al estudiante de maestría en Geotecnia Alejandro Nicolás Jiménez, sin quienes no hubiera sido posible el desarrollo de este proyecto y a la empresa TGC Geotecnia por su constante colaboración e información proporcionada.

INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA DEL REVESTIMIENTO DE CONCRETO LANZADO DE UN TÚNEL EXCAVADO EN ROCAS BLANDAS

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1 Justificación	6
1.2 Objetivos y alcance.....	6
2. DESCRIPCIÓN DEL TÚNEL INSTRUMENTADO.....	8
2.1 Proyecto geométrico.....	9
2.2 Ubicación geotécnica.....	11
3. ESTRATIGRAFÍA DE LA ZONA	12
3.1 Interpretación geotécnica y propiedades mecánicas	12
3.2 Interpretación geológica	14
4. RESUMEN DEL ANÁLISIS GEOTÉCNICO Y ESTRUCTURAL	16
4.1 Mecanismo de falla simplificado	16
4.2 Factor de seguridad	18
4.3 Aspectos generales del diseño del revestimiento	20
4.4 Diseño del revestimiento de concreto lanzado.....	21
4.5 Diseño de la zapata longitudinal de apoyo.....	23
4.6 Resumen del diseño del Túnel 4 "La Loma" (Por TGC).....	24
4.6.1 Análisis de estabilidad.....	24
4.6.2 Diseño del revestimiento de concreto lanzado, cubeta y zapata longitudinal de apoyo ..	26
5. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.....	28
5.1 Procedimiento de excavación.....	28
5.2 Lanzado de concreto	28
6. LINEAMIENTOS GENERALES DE LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA.....	31
6.1 Argumentación para llevar a cabo la instrumentación	31
6.2 Implementación de la instrumentación	31
6.3 Deformímetro eléctrico de un cuarto de puente (sensores tipo strain gage)	33
6.3.1 Funcionamiento de los deformímetros eléctricos	33
6.3.2 Deformímetro eléctrico de un cuarto de puente empleado en el estudio	36
6.3.3 Adquisición de datos de deformación	36
6.4 Celda de presión de transductor tipo cuerda vibrante.....	37
6.3.1 Funcionamiento de la celda de presión de cuerda vibrante	38
6.3.2 Celda de presión empleada en el estudio	38

6.3.3 Adquisición de datos de presión	40
6.3.4 Procesamiento de datos	41
7. INSTRUMENTACIÓN	41
7.1 Calibración de las celdas de presión en laboratorio y teoría de operación.....	41
7.2 Registro de lecturas iniciales de deformímetros de un cuarto de puente	48
7.3 Instalación de equipos en campo en el Túnel 4 “La Loma”	49
7.3.1 Colocación de instrumentos en la bóveda.....	51
7.3.2 Colocación de instrumentos en la cimentación	56
8. RESULTADOS	60
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
10. BIBLIOGRAFÍA.....	65

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

El diseñador de obras geotécnicas, especialmente de túneles, trabaja constantemente con una significativa dosis de incertidumbre en el diseño debido a los materiales heterogéneos y anisotrópicos en medios naturales no continuos con los que se enfrenta, por lo cual se ve en la necesidad de realizar suposiciones y análisis hipotéticos. Por otro lado, los ensayos de laboratorio o de campo realizados para calcular las propiedades mecánicas del suelo son llevados a cabo sobre un espacio muestral para luego extrapolarlos a todo el cuerpo de suelo; lo que significa que estos ensayos sólo brindan un rango de posibles valores aumentando el grado de incertidumbre en el diseño.

La necesidad de relacionar el estado de esfuerzos y deformaciones empleadas en el diseño con el estado real durante y después de la construcción es de vital importancia con el fin de evaluar la metodología de diseño y validar las teorías aplicadas. Aquí es donde entra en escena la instrumentación sismo-geotécnica, una actividad poco desarrollada en América Latina, que nos permite medir parámetros de respuesta de los materiales o del suelo como desplazamientos, esfuerzos, deformación, carga, entre otros, durante no sólo la construcción y operación del proyecto, sino también en condiciones de sismo.

Entre otras cosas, la instrumentación geotécnica busca la verificación de las hipótesis de diseño, validación de nuevas teorías y procedimientos constructivos y recopilación de información útil para investigación y futuros diseños.

“Lo que no se mide, no se puede mejorar” (Schmitter, 2012).

1.2 Objetivos y alcance

En la presente tesina se pretende realizar una descripción de los procedimientos de instrumentación geotécnica llevados a cabo en un túnel excavado mediante medios mecánicos y revestido a base de concreto lanzado reforzado con fibras de acero.

Objetivos de la instrumentación:

- Determinar el estado de esfuerzos y deformaciones presentados en el revestimiento del túnel bajo condiciones estáticas a corto y largo y plazo, y compararlos con el determinado en el diseño y en análisis numéricos.
- Determinar la transferencia de carga de la zapata corrida al suelo.

Objetivo de la tesina:

- Describir cada uno de los instrumentos empleados, haciendo énfasis en su funcionamiento, objetivo y ubicación.
- Detallar el procedimiento de instalación de los instrumentos en campo y su calibración correspondiente en laboratorio.
- Dar un bosquejo de los resultados preliminares a corto plazo.

Se pretende realizar la instrumentación geotécnica de una sección del Túnel 4 “La Loma”, revestido en concreto reforzado con fibras de acero, ubicado sobre la Vía Rápida Poetas que comunica las zonas poniente (Santa Fé) y sur (Luis Cabrera) de la ciudad de México.

Se realizará una descripción de las unidades estratigráficas de la zona, donde predominantemente se presentan tobas, materiales pumíticos y lahar. Se presentará una breve descripción del diseño del túnel y su proceso constructivo. Posteriormente, se explicará detalladamente los lineamientos e implementación de la instrumentación, cada equipo a emplear incluyendo su finalidad, calibración, instalación y finalmente el registro de datos.

Se pretende mostrar, de forma general, el procedimiento de análisis de datos y resultados parciales.

2. DESCRIPCIÓN DEL TÚNEL INSTRUMENTADO

El túnel 4 "La Loma", objeto de estudio, es parte del nuevo proyecto vial denominando Vía Rápida Poetas (también conocido como Supervía Poniente), que conecta la zona de Santa Fe con el sur de la ciudad de México. Dentro de este proyecto se contempla la construcción de 5 túneles cuyas características principales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los túneles pertenecientes a la Vía Rápida Poetas

Túnel	Longitud (m)	Características principales
Túnel 1 Las Águilas	26	Túnel de tubos hincados
Túnel 2 Desierto de Los Leones	270	Túnel método convencional
Túnel 3 Las Torres	170	Túnel Falso
Túnel 4 La Loma	600	Túnel método convencional
Túnel 5 Luis Cabrera	960	Túnel método convencional

Fuente TGC.

El Túnel 4 fue construido mediante método convencional excavando mediante medios mecánicos para después colocar el revestimiento definitivo a base de concreto lanzado reforzado con fibras de acero. El proyecto se encuentra ubicado al poniente de la ciudad de México, en su mayoría en la delegación Álvaro Obregón, como se muestra en la Figura 1.

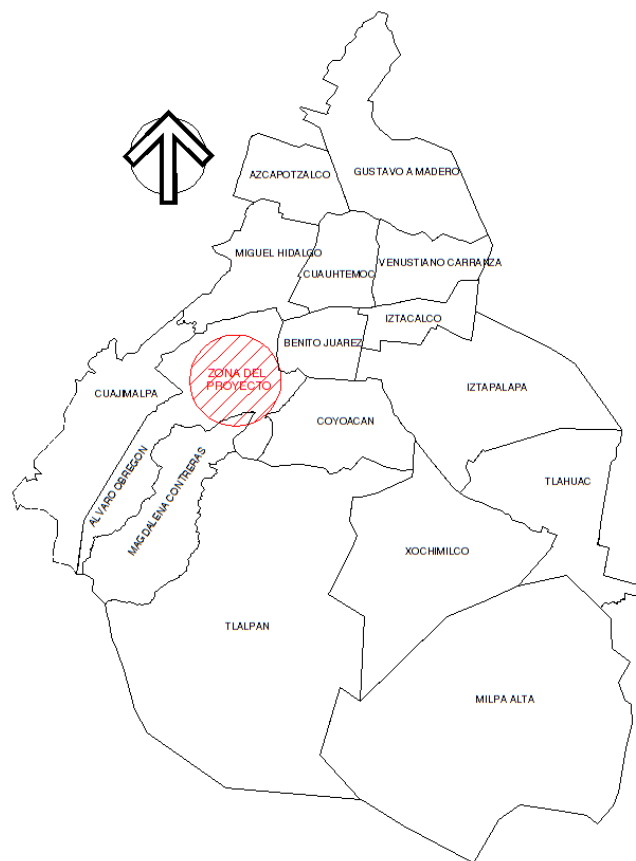


Figura 1. Localización del proyecto Vía Rápida Poetas dentro de la ciudad de México

2.1 Proyecto geométrico

La representación en planta del trazo del proyecto del Túnel 4 “La Loma” se muestra en la Figura 2, el cual se compone por dos túneles gemelos de iguales características de diseño. La instrumentación se llevó a cabo en el cadenamiento Km13+513.5 sobre el cuerpo izquierdo en sentido del cadenamiento, como se observa en la Figura 3.

TGC Geotecnia, la empresa encargada del diseño, propuso la geometría abovedada de los túneles. La sección de diseño es para dos carriles con una altura exterior de 8.5 m, un espesor de la bóveda de 0.30 m con un radio de la bóveda de 5.52 m, un ancho interior de 11 m, un ancho exterior de 12.34 m, zapatas con ancho de 2.24 m y alto de 2.33 m, así como una cubeta de 0.35 m como se indica en la Figura 4. En la Tabla 2 y Tabla 3 se presentan algunas características geométricas del túnel y de la sección instrumentada.

Tabla 2. Características geométricas del Túnel 4

Túnel	Longitud (m)	Altura exterior sección transversal (m)	Cadenamiento Portal Norte	Cadenamiento Sección Instrumentada	Cadenamiento Portal Sur
4 “La Loma”	600	8.5	K13+330	K13+513.5	K13+930

Tabla 3. Características de la sección instrumentada

Túnel	4 “La Loma”
Cadenamiento	K13+513.5
Profundidad de clave	23 m
Distancia a portal más cercano	183.5 m (a Portal Norte)
Altura de la subrasante (suelo)	2452 m.s.n.m

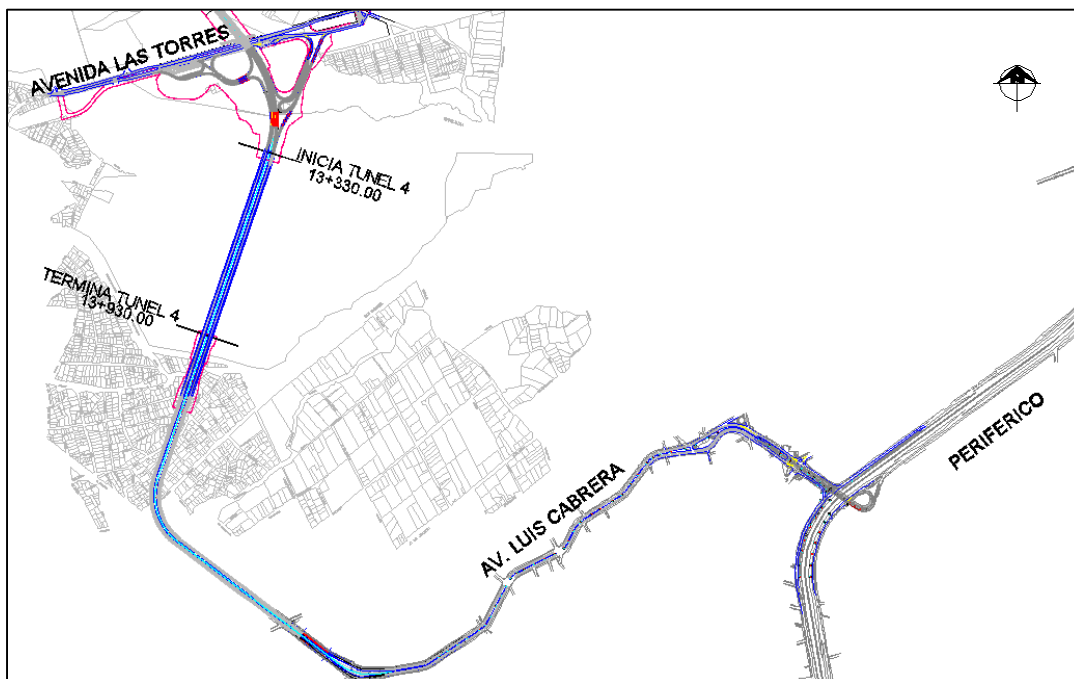


Figura 2. Planta geométrica del proyecto

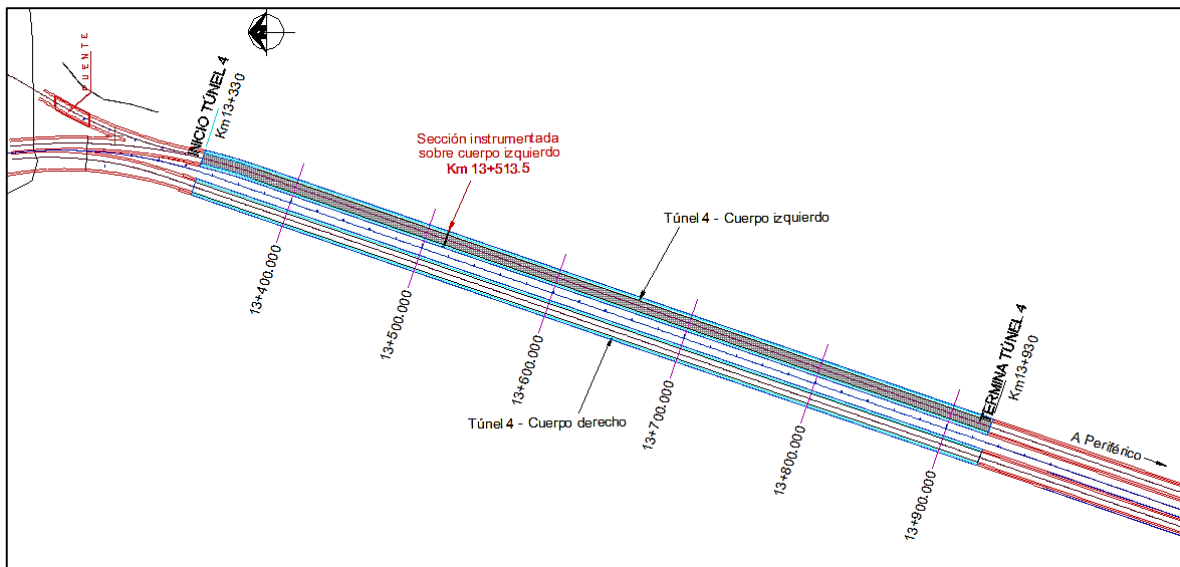


Figura 3. Ubicación de la sección instrumentada en trazado en planta

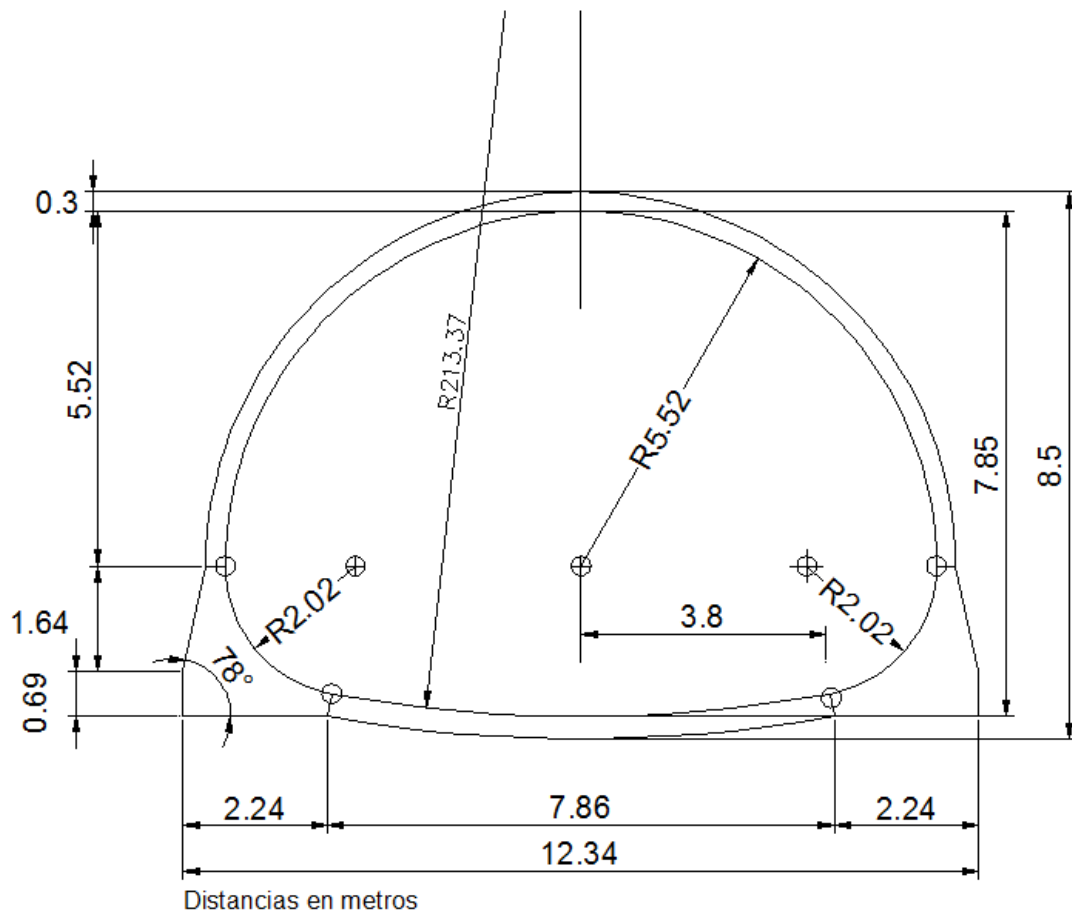


Figura 4. Sección transversal del Túnel 4 "La Loma"

Fuente: TGC

El proyecto de la Vía Rápida Poetas se encuentra ubicado al poniente de la ciudad de México dentro de la zona I de Lomas (Figura 5), la cual está formada por rocas piroclásticas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos (GDF, 2004).



3. ESTRATIGRAFÍA DE LA ZONA

3.1 Interpretación geotécnica y propiedades mecánicas

De acuerdo al informe de proyecto ejecutivo del Túnel 4 (TGC, 2011), se realizaron varios trabajos de caracterización geotécnica, Figura 6, en los cuales se encontraron cuatro unidades litológicas que son:

I. *Tobas redepositadas*, conformada por tobas limoarenosas o arcilloarenosas de color café rojizo o café amarillento con presencia en algunas zonas de gravas y gravillas de hasta 1" de diámetro.

II. *Serie pumítica*, constituida por intercalaciones de horizontes de arenas pumíticas de color blanquecino, gris y café amarillento con horizontes de limo arenoso de color café amarillento.

III. *Toba inferior*, conformada por un depósito de tobas limoarenosas o arcillolimosas.

IV. *Lahar*, constituida por una corriente de lodo conteniendo bloques de andesita de hasta 80 cm de diámetro empacados en una matriz arenosa de color gris en ocasiones con tonalidades rosáceas o verdosas.

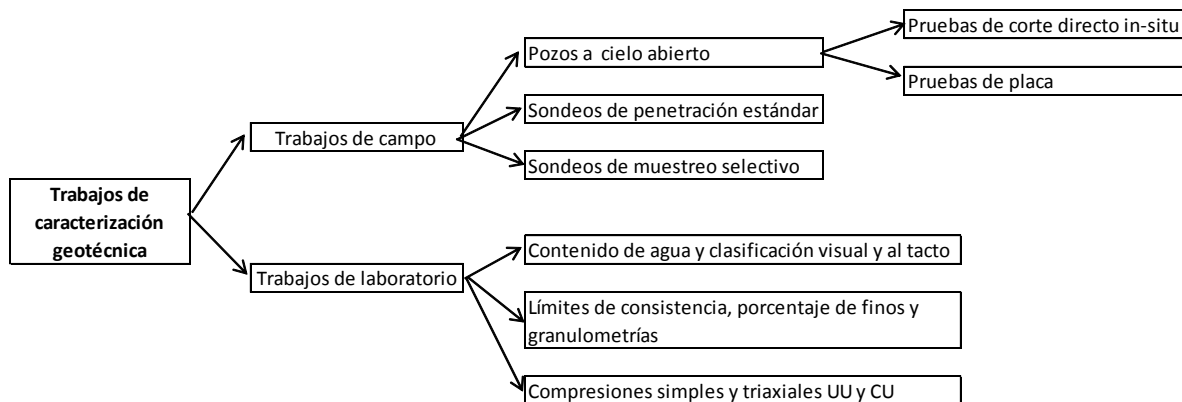


Figura 6. Trabajos para caracterización geotécnica

La estratigrafía para diferentes cadenamientos con sus espesores se presenta en la Tabla 4, teniendo en cuenta que el cadenamiento de la sección instrumentada es Km 13+513.5 y que la profundidad de la clave del túnel en esta sección es 23 m, se puede inducir que la sección instrumentada posiblemente estaría conformada por las unidades II. Serie pumítica y III. Toba inferior.

Tabla 4. Unidades estratigráficas-Túnel 4 "La Loma"

Unidad	13+326		13+420		13+673		13+850	
	de (m)	a (m)	de (m)	a (m)	de (m)	a (m)	de (m)	a (m)
I. Toba redepositada			0	16	0	11		
II. Serie pumítica	0	11.5	16	28	11	23	0	14
III. Toba inferior	11.5	18.5	28	35.5	23	31	14	22
IV. Lahar	18.5		35.5		31		22	

Fuente: TGC.

En la Tabla 5 se presentan las propiedades mecánicas de cada estrato obtenidas de las pruebas *in situ* y de laboratorio.

Tabla 5. Propiedades mecánicas del suelo a lo largo del túnel 4 “La Loma”

Sondeo	Cad.	Unidad	Prof. (m)	Tipo de prueba	c t/m ²	ϕ °	γ t/m ³	E ₅₀ t/m ²	E ₁ t/m ²	E ₂ t/m ²
PCA-5	13+326	Toba redepositada	6	P. Placa					2643	5631
			7.6	Triaxial UU	17.5	19	1.42	8690		
			10	P. de corte directo	4.5	36.7				
			12.3	P. de placa					4862	9784
			15.18	P. de corte directo	13	25				
			15.3	Triaxial UU	31.8	18	1.62			
		Serie pumítica	16.5	P. de placa					7280	9027
			18.8	Triaxial UU	12	19	1.52	6810		
			20.5	P. Placa					2114	8072
			21.1	Triaxial CU	9	18	1.27	4210		
			21.4	Triaxial CU	1.7	25	1.46	8320		
			22.5	P. de corte directo	2.8	36.5				
SPH-16/ SMS-8	13+360	Toba redepositada	23	P. Placa					5298	11724
			6	P. de picómetro	5	35				
			7.3	Triaxial UU	4	29	1.40	1850		
			10	P. de picómetro	2	16				
		Serie Pumítica	14.3	Triaxial UU	12.3	31	1.83	5110		
			15	P. de picómetro	6	26				
			21.3	Triaxial UU	8.5	31	1.54	4100		
			22.8	P. de picómetro	8	36				
			26.5	P. de picómetro	10	37				
			28.58	Triaxial UU	8.2	20	1.65	2200		
SPH-15/ SMS-7	13+3	Toba redepositada	28.5	P. de picómetro	10	41				
			6.28	Triaxial UU	2.9	38	1.53	2370		
			10.30	Triaxial UU	6	46	1.79	3910		
		Serie pumítica	12	P. de picómetro	4	32				
			23.40	Triaxial UU	15.9	31	1.83	3950		
SPH-14/ SMS-9	13+600	Toba redepositada	28.33	Triaxial UU	5.3	29	1.63	3300		
			5	P. de picómetro	3	26				
			5.06	Triaxial UU	17.1	33				
			9.3	Triaxial UU	9.8	43				
		Serie Pumítica	14	P. de picómetro	3	34				
			17.5	P. de picómetro	3	33				
			21.6	P. de picómetro	4	40				
			24.6	P. de picómetro	4	38				
		Toba Inferior	27.5	P. de picómetro	5	39				
			32.5	P. de picómetro	4	39				
SPH-5	13+673	Toba redepositada	8.5	P. de picómetro	2	22				
			17.2	P. de picómetro	3	25				
		Serie Pumítica	24.3	P. de picómetro	4	30				
SPH-13/ SMS-6	13+720	Toba redepositada	9.7	Triaxial UU	6.5	47	1.86	5960		
			31.29	Triaxial UU	9.8	36	1.9	4100		
		Toba inferior	33.85	Triaxial UU	23.2	27	1.49	5290		
			36.1	Triaxial UU	12.7	34	1.63	4780		
SPH-12/ SMS-5	13+820	Toba redepositada	4.85	Triaxial UU	7.2	35	1.70	1770		
		Toba inferior	23.30	Triaxial UU	1.6	32	1.22	2860		
SPH-11/ SMS-4	13+849	Toba redepositada	5.55	Triaxial UU	10	29	1.68	2150		
			7	P. de picómetro	5	34				
			12	P. de picómetro	5	33				
		Serie Pumítica	18	P. de picómetro	7	37				
			24.9	P. de picómetro	4	33				
		Toba inferior	28.05	Triaxial UU	7.2	37	1.68	5610		
			Lahar	33	P. de picómetro	8	38			

Fuente: TGC

Según los estudios previos a la construcción del túnel, el perfil geotécnico longitudinal y la sección transversal esperada en el cadenamiento de instrumentación corresponde al presentado en la Figura 7.a y Figura 7.b, conformado por un estrato de la unidad II. Serie pumítica de aproximadamente 5.13 metros y un estrato de la unidad III. Toba arcillo-limosa inferior de aproximadamente 3.4 metros; sin embargo la estratigrafía real que se encontró en la sección correspondió a varios estratos

intercalados y escalonados de la serie pumítica y de la toba arcillo-limosa inferior con aproximadamente 2 y 1 metro de espesor respectivamente como se aprecia en la Figura 7.c. De primera vista se podría inferir la presencia de una falla geológica pero los especialistas en geología determinaron que no se presentaba movimiento entre los planos, sin embargo existía inestabilidad de la clave por lo que se instalaron marcos de acero separados cada metro en esa zona.

3.2 Interpretación geológica

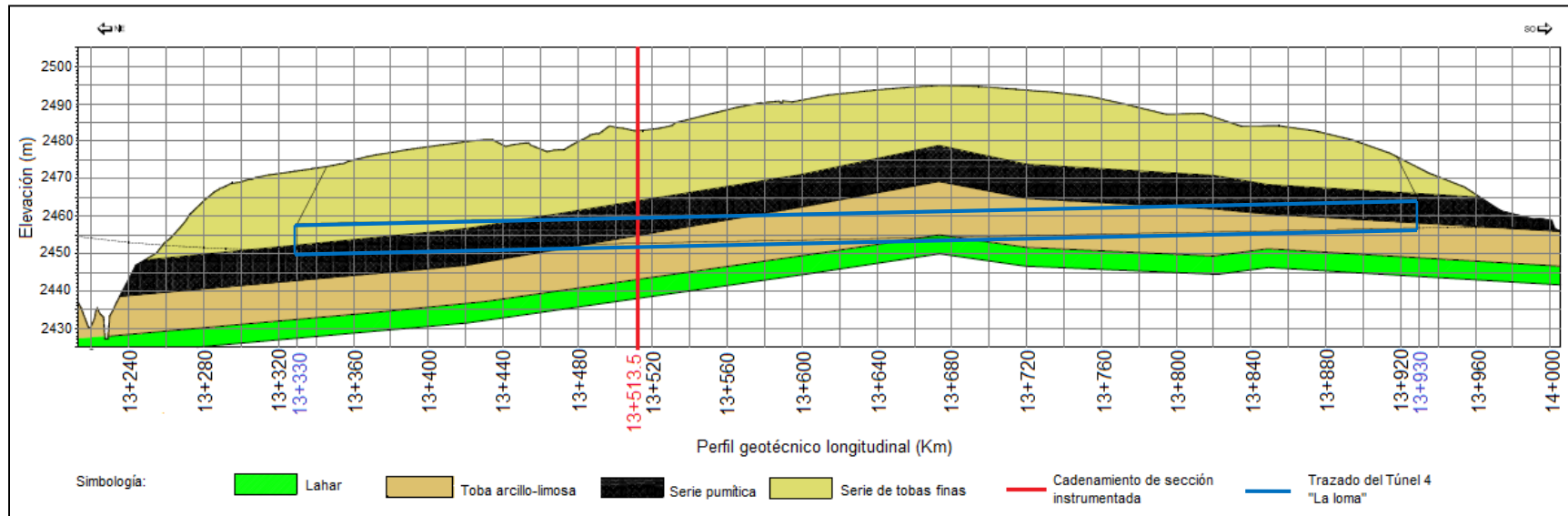
De acuerdo al informe de proyecto ejecutivo del Túnel 4 (TGC, 2011), los materiales que conforman las unidades estratigráficas, anteriormente mencionadas, son:

*Lahar: agregado heterogéneo de materiales volcánicos, tales como rocas, minerales cristalizados, vidrio volcánico (obsidiana) y gases incandescentes, depositados y enfriados a algunos kilómetros del cono eruptivo de donde fueron eyectados (Sierra de las Cruces). La alta densidad de la nube ardiente con respecto a la densidad del aire circundante, provoca que éstos, se desplacen y friccionen durante varios kilómetros, antes de llegar a su sitio de depósito y de enfriarse totalmente.

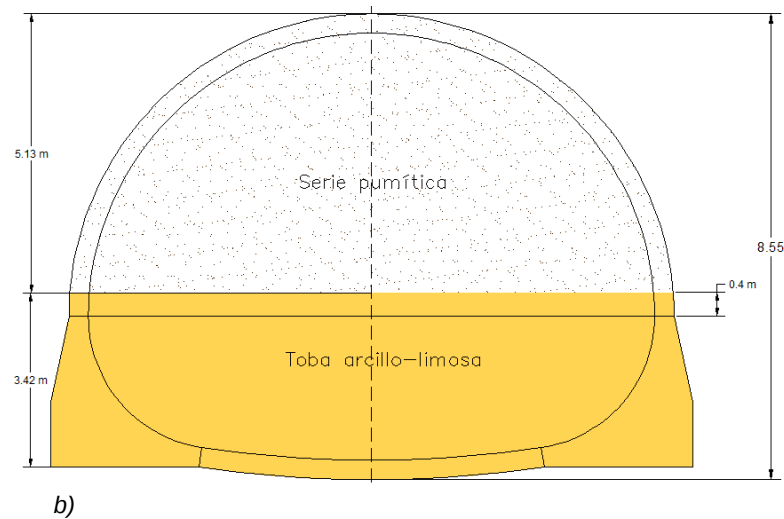
*Toba fina: por arriba del lahar yace una toba fina de aproximadamente 7 a 9 metros de espesor. Se caracteriza por estar constituida por materiales de granulometría limosa y arcillosa con escasa fracción arenosa y/o grava fina (granzón). En apariencia corresponde al mismo evento eruptivo que originó el lahar, dado que no se encontró una superficie de contacto entre ambos.

La toba se encuentra excepcionalmente alterada (suelo residual arcilloso), así como sus diminutos líticos en ella incluidos, los cuales son de composición similar a los del lahar. La granulometría preferente de la fracción lítica varía de arenas gruesas a gravas finas (granzón).

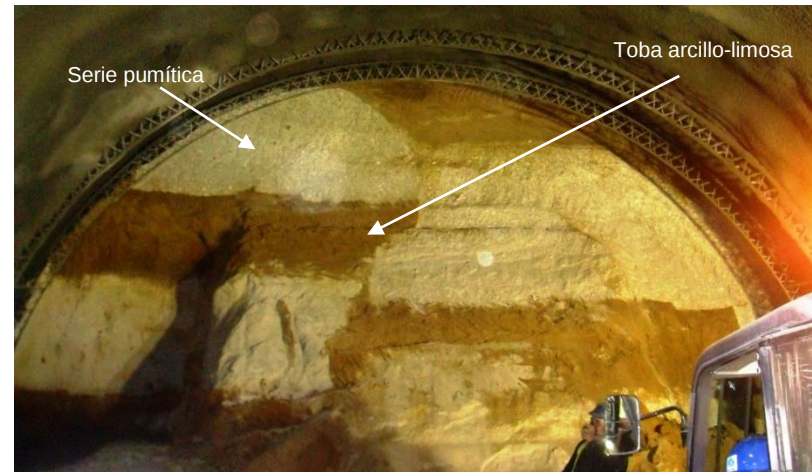
*Serie pumítica (pómez): yaciendo a la unidad anterior (toba fina inferior) se encuentra una toba pumítica de color blanquecino, con estructura estratificada ignimbrítica de espesor del orden de 2 metros. Los minerales presentes son de tono blanquecino (en estado sano) y están constituidos por vidrio (esquirlas compuestas por sílice amorfo), cuarzo y mica con algunos ferromagnesianos. La granulometría de este material varía de un tamaño arena gruesa a gravas, y dependiendo de su estructura en estratos muy delgados o de estructura ignimbrítica, líticos alargados o con bordes angulares.



a)



b)



c)

Figura 7. a) Perfil geotécnico longitudinal previo - Túnel 4. b) Sección transversal esperada. c) Sección transversal real encontrada en sitio

4. RESUMEN DEL ANÁLISIS GEOTÉCNICO Y ESTRUCTURAL

En este capítulo se presenta un resumen de la metodología de diseño empleado para el túnel 4 “La Loma” el cual se presenta en el libro “Diseño Geotécnico de Túneles” por Tamez, E, Rangel, J.L y Holguín, E. (1997) y una síntesis de los resultados del análisis geotécnico y estructural presentado por la empresa TGC-Geotecnia en el informe del proyecto ejecutivo.

4.1 Mecanismo de falla simplificado

El análisis de la estabilidad está basado en un mecanismo de falla simplificado obtenido a partir de la observación y estudio de fallas ocurridas en la práctica de la construcción, así como en modelos de laboratorio. Este mecanismo de falla está formado por tres prismas como se visualiza en la Figura 8.

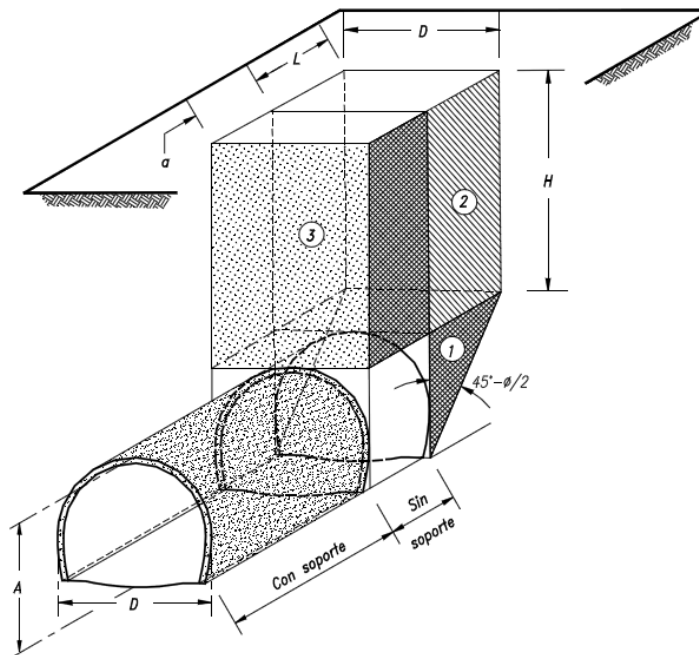


Figura 8. Equilibrio del mecanismo de falla simplificado del frente

Fuente: Tamez et al., 1997

Nomenclatura:

- Prisma 1: prisma triangular frontal. Se forma adelante del frente y tiene la forma triangular de una cuña de Coulomb.
- Prisma 2: prisma rectangular de fondo. Es rectangular y se apoya sobre la cuña del frente.
- Prisma 3: prisma rectangular sobre la clave. Es rectangular y se localiza sobre la clave de la zona excavada sin soporte.
- D: anchura del túnel
- A: altura del túnel
- H: profundidad de la clave
- L: $A \tan (45^\circ - \phi/2)$
- a: tramo sin soporte.

Los túneles están contruidos en suelos que se caracterizan como suelos cohesivos-friccionantes, en los que la resistencia al corte es una función del esfuerzo normal al plano de falla, por lo que se hace indispensable conocer la distribución de este esfuerzo a lo largo de la superficie de falla.

Según Tamez y coautores (1997) en el equilibrio de este mecanismo de falla del frente intervienen:

a) Las fuerzas actuantes: Por una parte las fuerzas internas, dadas por los pesos de los prismas que tienden a producir el movimiento descendente del conjunto, cuya magnitud se determina en función del volumen de los prismas y el peso volumétrico del suelo, como se observa en la primera columna de la Tabla 6. Por otra, las fuerzas externas, que pueden o no estar presentes, como: la sobrecarga superficial producida por el peso de estructuras existentes en la superficie del terreno o por el tránsito de vehículos, así como en ocasiones las presiones interiores ejercidas sobre el frente y la clave, aplicadas por aire comprimido o por escudos de frente presurizado.

b) Las fuerzas resistentes: Son derivadas de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y se desarrollan en las caras de los prismas rectangulares y en el prisma triangular, al desplazarse estos hacia abajo. La resistencia al esfuerzo cortante depende, en el caso más general, de la cohesión y ángulo de fricción del suelo, así como de la intensidad y distribución de los esfuerzos de compresión horizontales que actúan sobre las caras de los prismas, inducidos en la masa del suelo que rodea a la cavidad al hacer la excavación.

En la Figura 9, se presenta una sección longitudinal del túnel con el conjunto de prismas que integran el mecanismo de falla anteriormente explicado, y las fuerzas que pueden intervenir en su equilibrio.

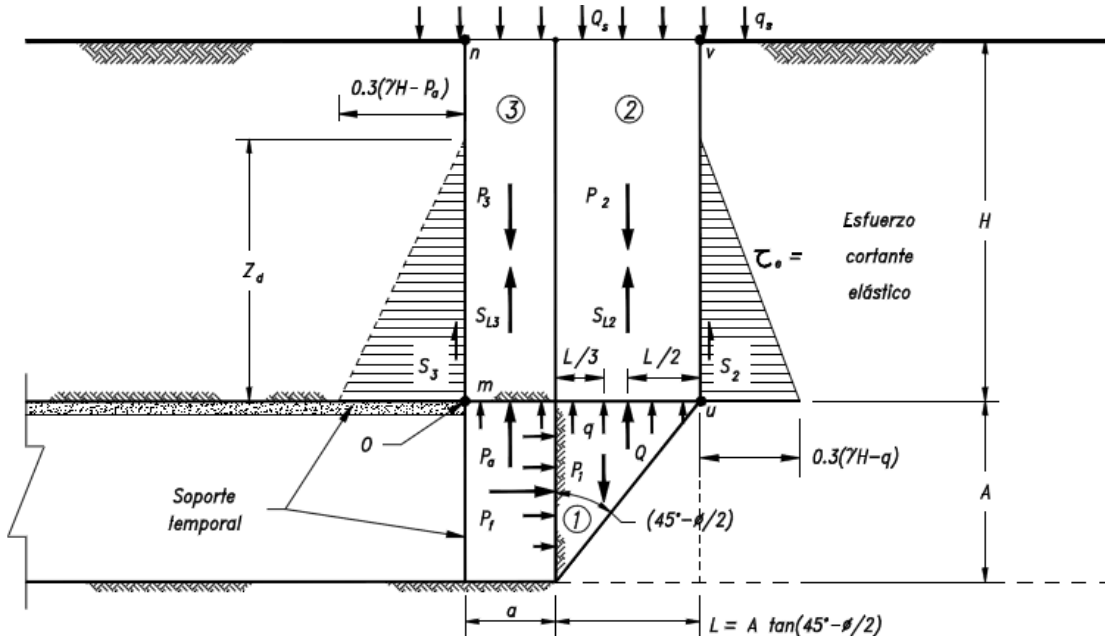


Figura 9. Fuerzas actuantes y resistentes en el mecanismo simplificado del equilibrio del frente

Fuente: Tamez et al., 1997

4.2 Factor de seguridad

El factor de seguridad se expresa como la relación entre las sumas de los momentos resistentes, M_r , y los momentos actuantes, M_a , tomados desde un eje horizontal que pasa por el punto O y es perpendicular al eje del túnel.

$$FS = \frac{\sum M_r}{\sum M_a}$$

El factor de seguridad de la estabilidad general es función de diversos factores (Figura 9), como son:

H: profundidad de la clave del túnel

D: anchura de la sección excavada

A: altura de la sección excavada

a: longitud de avance sin soporte

γ : peso volumétrico

c: cohesión (parámetro de resistencia al corte del suelo)

ϕ : ángulo de fricción (parámetro de resistencia al corte del suelo)

q_s : sobrecarga superficial

p_f , p_a : presión interior en el túnel

Z_d : altura que marca la zona de descarga dentro de la cual se distribuyen los efectos de la descarga

Para este mecanismo de falla la altura Z_d es 1.7 veces el diámetro o anchura del túnel (D).

Los esfuerzos cortantes resistentes actuando en los planos verticales de los prismas 2 y 3 hasta la altura Z_d , están expresados por la siguiente ecuación:

$$s_f = K_f c + K_f \sigma_v \tan(\phi)$$

En donde:

s_f : esfuerzo cortante resistente sobre las caras verticales de los prismas

K_f : es un coeficiente cuyo valor está en función del ángulo de fricción interna del material y se define como:

$$K_f = \frac{1 - \sin^2 \phi}{1 + \sin^2 \phi}$$

σ_v : esfuerzo de compresión vertical actuante a lo largo de la cara del prisma, cuyo valor varía desde P_a en la base del prisma, hasta $\gamma(H-Z_d)$

c: cohesión del suelo

ϕ : ángulo de fricción interna

La fuerza resistente desarrollada por el prisma 1 (triangular) es igual a su capacidad de carga expresada como:

$$Q = (2.7 c \sqrt{K_p} + p_f K_p) L * D$$

En donde:

K_p : coeficiente de presión pasiva de Rankine, definido como:

$$K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

p_f : presión aplicada en el frente de la excavación.

Las fuerzas actuantes (P_1 , P_2 , P_3 , Q_s , P_a , y P_f) se deben al peso de los tres prismas que integran el mecanismo de falla, a la sobrecarga superficial y a la presión radial interior y a la presión aplicada al frente; mientras que las fuerzas resistentes (S_2 , $2S_{L2}$, S_3 , $2S_{L3}$ y Q) son las que desarrollan en la superficie lateral de los prismas 2 y 3, considerando que la interacción horizontal entre ellos no es significativa, Q es la capacidad de carga del prisma triangular. Cada uno de estos parámetros se presenta detalladamente en la Tabla 6.

Tabla 6. Sistema de fuerzas del mecanismo de falla

	FUERZAS	MOMENTOS	ACLARACIONES
ACTUANTES	$P_1 = \frac{1}{2} \gamma A L D$	$P_1 = \frac{1}{2} \gamma A L D (a + L/3)$	P_1 : Peso del prisma triangular 1
	$P_2 = \gamma L D H$	$M_2 = \gamma L D H (a + L/2)$	P_2 : Peso del prisma rectangular 2
	$P_3 = \gamma a D H$	$M_3 = \frac{1}{2} \gamma D h a^2$	P_3 : Peso del prisma rectangular de la clave 3
	$Q_s = q_s (a + L) D$	$M_s = \frac{1}{2} q_s D (a + L)^2$	q_s : Sobrecarga en la superficie
	$P_a = p_a a D$	$M_a = \frac{1}{2} p_a D a^2$	p_a : Presión radial ejercida por el soporte temporal o un fluido a presión
	$P_f = p_f A D$	$M_f = \frac{1}{2} p_f D A^2$	p_f : Presión horizontal que actúa sobre el frente de la excavación
RESISTENTES	$S_2 = s_{m2} Z_d D$	$M_{s2} = s_{m2} Z_d D (a + L)$	s_{m2} : Resistencia media en la cara uv del prisma 2
	$S_{L2} = 2 s_{m2} Z_d L$	$M_{sL2} = 2 s_{m2} Z_d L (a + L/2)$	
	$S_3 = s_{m3} Z_d D$	$M_{s3} = 0$	s_{m3} : Resistencia media en la cara mn del prisma 3
	$S_{L3} = 2 s_{m3} Z_d a$	$M_{sL3} = s_{m3} Z_d a^2$	
	$Q = (2.7 c \sqrt{K_p} + p_f K_p) LD$	$M_Q = (2.7 c \sqrt{K_p} + p_f K_p) LD (a + L/2)$	q : capacidad de carga del prisma triangular 1

Fuente: Tamez et al., 1997

Como se mencionó anteriormente la ecuación general de la estabilidad del túnel se obtiene como la relación entre las sumas de los momentos resistentes y los momentos actuantes de la Figura 6.

$$FS = \frac{S_{m2} Z_d D (a + L) + 2 S_{m2} Z_d L \left(a + \frac{L}{2}\right) + s_{m3} Z_d a^2 + (2.7 c \sqrt{K_p} + p_f K_p) \left(1 + \frac{2a}{L}\right)}{\frac{1}{2} \gamma A L D \left(a + \frac{L}{3}\right) + \gamma L D H \left(a + \frac{L}{2}\right) + \frac{1}{2} (\gamma H - p_a) D a^2 + \frac{1}{2} q_s D (a + L)^2 - \frac{1}{2} p_f D A^2}$$

En el libro “Diseño Geotécnico de Túneles” (Tamez et al., 1997) se particulariza la ecuación anterior para suelos puramente cohesivos y para suelos cohesivo-friccionantes. En el caso del Túnel 4 de la Vía Rápida Poetas el análisis se realizó para suelos cohesivo-friccionantes donde la resistencia al

corte es calculada de acuerdo a la ley de Mohr-Coulomb, $\tau=c+\sigma_n \tan \phi$. Se propone dividir este análisis de estabilidad así:

- a) Estabilidad del frente (equilibrio de los prismas 1 y 2), $a=0$
- b) Estabilidad de la clave (equilibrio del prisma 3), $\text{avance}=a$
- c) Estabilidad local de la clave (equilibrio del prisma 3), $\text{avance}=a$
- d) Estabilidad general (equilibrio del conjunto, prismas 1,2 y 3)

4.3 Aspectos generales del diseño del revestimiento

El revestimiento de un túnel se diseña, entre varias funciones, para soportar las presiones ejercidas por el suelo circundante a la cavidad dentro de un margen de seguridad aceptable y disminuir al mínimo los asentamientos de la superficie.

Es posible diseñar un revestimiento único que garantice la estabilidad del túnel durante su construcción y mantenga los asentamientos superficiales dentro de un rango aceptable, que proporcione la geometría final del túnel y asegure su comportamiento adecuado a largo plazo.

Para el óptimo diseño del revestimiento es indispensable conocer la magnitud y distribución de la presión que ejerce el suelo sobre la estructura de soporte. Este es un procedimiento complejo debido al fenómeno de interacción suelo-revestimiento, cuya solución aproximada se puede obtener con modelos numéricos de análisis que simulan la evolución del estado inicial de esfuerzos en el suelo durante la excavación y la colocación del revestimiento; evolución que depende tanto de las propiedades esfuerzo-deformación de la masa de suelo como del material del revestimiento y del proceso constructivo que se siga para su colocación (Tamez et al., 1997).

La distribución de presiones alrededor del revestimiento depende principalmente de los siguientes factores:

- a) Estado inicial de esfuerzos en la masa de suelo
- b) Resistencia al corte y deformabilidad del suelo
- c) Procedimiento de excavación y de colocación del revestimiento
- d) Tipo y rigidez del revestimiento
- e) Evolución de los esfuerzos en el suelo después de concluida la construcción

La presión radial ejercida por el suelo es el resultado de un proceso de interacción entre éste y la estructura de soporte, lo cual implica que los desplazamientos radiales en la frontera de ambos medios deben ser compatibles; por ello es necesario conocer cómo se desarrollan los desplazamientos durante el proceso de construcción, para comprender la influencia de cada factor en el comportamiento del sistema suelo-revestimiento.

Si la presión radial inicial en el contacto suelo-revestimiento es $p_a = \gamma H_0$, el desplazamiento radial de cualquier punto en la periferia del túnel es nulo. Si la presión de contacto se reduce hasta un valor p_a , dentro del intervalo elástico del suelo, se producirá un desplazamiento radial u , el cual aumenta linealmente al disminuir la presión de contacto p_a entre suelo y revestimiento, hasta un punto en el que se alcanza el límite elástico del suelo a partir del cual inicia la plastificación del suelo siendo cada vez mayores los desplazamientos radiales para pequeños decrementos de la presión p_a , hasta llegar al colapso del suelo de la clave, Figura 10.

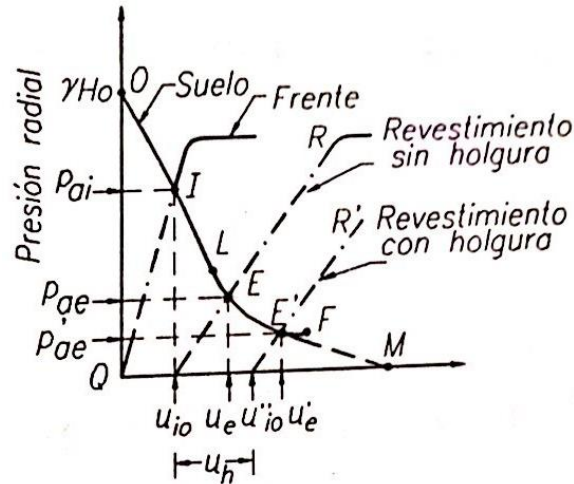


Figura 10. Interacción suelo-revestimiento. Presión radial vs desplazamiento

Fuente: Tamez et al., 1997

Según la teoría de elasticidad, el desplazamiento radial u , está dado por:

$$u = (\gamma H_o - p_a) \frac{(1 + \nu)D}{2E}$$

Donde E es el módulo de elasticidad del suelo y ν es la relación de Poisson del suelo. En esta ecuación se observa que el desplazamiento radial u aumenta linealmente al disminuir la presión de contacto p_a entre el suelo y el revestimiento hasta alcanzar el límite elástico del suelo que está en el contacto; a partir de allí inicia la plastificación del suelo siendo cada vez mayores los desplazamientos radiales para pequeños decrementos de la presión p_a , hasta llegar al colapso del suelo en la clave. El desplazamiento inicial tiene dos componentes (u_{oi}), el desplazamiento previo a la colocación del revestimiento y el desplazamiento por holgura que se presenta cuando se utilizan dovelas que en este caso es cero ya que no se recurrió a ellas.

Desplazamiento radial del revestimiento primario.

Bajo la presión aplicada por el suelo sobre el revestimiento, el desplazamiento que se genera presenta tres componentes:

1. Compresión elástica del concreto (u_c) bajo presión uniforme p_a
2. Deflexión (u_d) producida por la diferencia de presiones horizontal y vertical.
3. Desplazamiento vertical (u_z) de la bóveda de concreto lanzado, cuando el revestimiento es abierto en el fondo y se apoya sobre zapatas longitudinales.

4.4 Diseño del revestimiento de concreto lanzado

Según Tamez y coautores (1997), el espesor del revestimiento (t) en la bóveda se determina bajo la metodología del diseño plástico de un arco sujeto a una presión uniforme p_u , en función de los siguientes parámetros:

$$t = \frac{F_c p_u D}{f_c} \frac{1}{2} = \frac{F_c p_u D}{2 f_c}$$

Donde:

- D : Diámetro del túnel
- f_c : Esfuerzo de fluencia plástico del concreto ($f_c = 0.8 f'_c$).
- F_c : Factor de carga (generalmente igual a 2, para revestimiento primario, y 3 para revestimiento único).
- p_u : Presión radial uniforme (para revestimiento único, es igual a la presión vertical final)

Para el cálculo del espesor de la cubeta, se consideran las fuerzas observadas en la Figura 11, para el diseño se desprecia la fricción en el contacto del suelo, debido a que esta se puede reducir durante la vida útil del túnel.

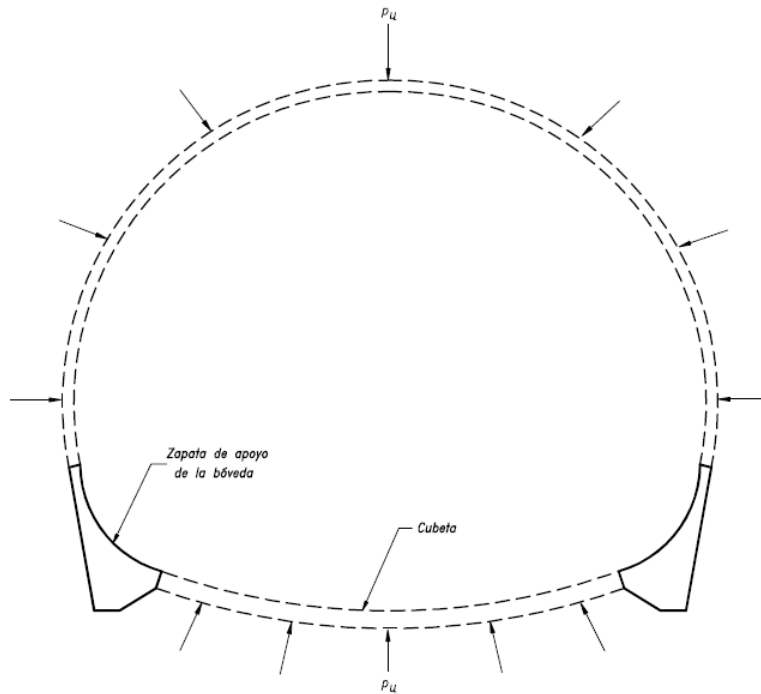


Figura 11. Equilibrio de la cubeta

Fuente: Tamez et al., 1997

Considerando que la cubeta está sometida a una presión radial p_u , igual que a la de la bóveda, el espesor de la cubeta se obtiene con la siguiente expresión:

$$t_c = \frac{F_c p_u R_c}{0.8 f'_c}$$

Donde R_c es el radio de curvatura de la cubeta el cual corresponde a 21.34 metros para el túnel estudiado.

4.5 Diseño de la zapata longitudinal de apoyo

Según Tamez y coautores (1997), la posición de la zapata y su anchura se eligen de manera que la reacción del suelo sea colineal con la carga transmitida por la bóveda, a través de la ampliación gradual de su espesor, a la vez que permita formar el plano de unión con la cubeta.

En la Figura 12 se muestra esquemáticamente el polígono de fuerzas que determina el equilibrio de la zapata, despreciando la fuerza debida a la cohesión del suelo, ya que ésta depende del contenido de humedad y puede sufrir variaciones importantes durante la construcción; de este polígono se obtiene la fuerza por unidad de longitud Q_z que debe soportar la zapata.

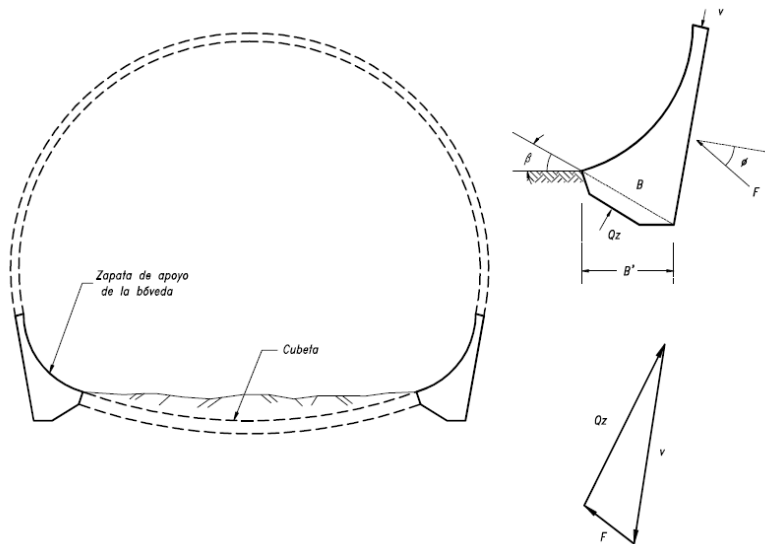


Figura 12. Equilibrio de la zapata de apoyo de la bóveda

Fuente: Tamez et al., 1997

Por medio de la ecuación de la capacidad de carga para una zapata longitudinal se obtiene la anchura B , así:

$$B = \frac{Q_z}{q_u} FS$$

$$q_u = cN'_c + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$$

Donde:

- c : parámetro de cohesión del suelo al nivel de desplante
- γ : peso volumétrico del suelo
- N'_c , N_γ : factores de capacidad de carga dependientes del ángulo de fricción del suelo y la inclinación de la superficie de apoyo (β)
- FS : factor de seguridad ($FS \geq 2$).
- Q_z : fuerza por unidad de longitud que debe soportar la zapata
- q_u : capacidad de carga de la zapata

4.6 Resumen del diseño del Túnel 4 "La Loma" (Por TGC)**4.6.1 Análisis de estabilidad**

Se realizó el análisis de estabilidad para cuatro diferentes secciones a lo largo del túnel (longitud del túnel: 600 m). La sección analizada más cercana a la sección instrumentada se encuentra a 93.5 metros. Los cadenamientos de estas secciones se muestran a continuación:

- a. 13+326 Km → A 4 metros del portal norte (13+330 Km)
- b. 13+420 Km → Sección más cercana a la instrumentada (13+513.5 Km)
- c. 13+673 Km
- d. 13+850 Km → A 80 metros del portal sur (13+930 Km)

El resumen del cálculo de la estabilidad, presentado por la empresa TGC de cada sección analizada se presenta en la Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9.

Tabla 7. Resumen de la estabilidad del frente

Ubicación	Cadenamiento	H m	Z _d m	c _f t/m ²	φ °	D m	A m	L m	γH t/m ²	q _{fr} t/m ²	s _{m2} t/m ²	FS _f mín 2.6
Portal Norte	13+326	13	13	12	19	12.43	8.55	6.09	22.01	37.728	6.936	3.287
	13+420	20	20	12	19	12.43	8.55	6.09	34	37.728	9.04	3.41
	13+673	33	21.13	6	37	12.43	8.55	4.26	56.1	24.79	9.55	2.608
Portal Sur	13+850	20	20	57	37	12.43	8.55	4.26	34	30.123	8.034	3.55

Fuente: TGC

Tabla 8. Resumen del cálculo de avance máximo

Ubicación	Cadenamiento	H m	Z _d m	c _c t/m ²	φ °	s _{m3} t/m ²	a _{Lmáx} /2 m	a _{Pmáx} /2 m	Tramo	
									CAD INICIAL	CAD FINAL
Portal Norte	13+326	13	13	6	35	3.029	1.04	1.04	13+330	13+390
	13+420	20	20	6	35	3.029	1.04	1.04	13+390	13+620
	13+673	33	21.13	3	28	5.34	1.2	0.6	13+620	13+800
Portal Sur	13+850	20	20	5	33	2.712	0.9	0.9	13+800	13+930

Fuente: TGC

Tabla 9. Resumen del cálculo de la estabilidad general

Ubicación	Cadenamiento	H m	Z _d m	Z _d /D	a _{máx} /L	D/L	A/H	s _{m2} t/m ²	s _{m3} t/m ²	FS _g
Portal Norte	13+326	13	13	1.05	0.34	2.04	0.66	6.936	3.029	2.86
	13+420	20	20	1.61	0.34	2.04	0.43	9.04	3.029	2.92
	13+673	33	21.13	1.70	0.28	2.92	0.26	9.55	5.34	2.22
Portal Sur	13+850	20	20	1.61	0.42	2.92	0.43	8.034	2.712	2.83

Fuente: TGC

Los parámetros de diseño y resumen de la estabilidad de la sección analizada más cercana a la sección instrumentada se presenta en la Tabla 10.

Tabla 10. Resumen del análisis de estabilidad del Túnel 4

Análisis de estabilidad en el cadenamiento 13+420 Km a 93.5 metros de la sección instrumentada				
Geometría	Profundidad de la clave del túnel	H	20	m
	Ancho de la sección excavada	D	12.43	m
	Altura de la sección excavada	A	8.55	m
	Relación H/D (H/D<1.7:Túnel somero, H>D: Túnel profundo)	H/D	1.61	Túnel somero
Sobrecarga	Sobrecarga superficial por edificios o estructuras existentes	Q _e	0	ton/m ²
	Peso volumétrico del relleno	γ _r	0	ton/m ²
	Espesor del relleno superficial	H _r	0	ton/m ²
	Sobrecarga superficial por relleno	Q _r	0	ton/m ²
	Sobrecarga superficial total, por estructuras y rellenos existentes	Q _s	0	ton/m ²
Estabilidad del frente	Longitud del prisma del frente	L	6.099	m
	Altura de descarga (Z_d=1.7D)	Z_d	20	m
	Cohesión en el frente	c _f	12	ton/m ²
	Ángulo de fricción interna en el frente	φ _f	19	°
	Peso volumétrico del suelo del frente	γ _f	1.8	ton/m ³
	Módulo de elasticidad del suelo del frente	E _f	3950	ton/m ²
	Relación de Poisson del suelo	N	0.35	
	Coeficiente de presión de tierras en reposo de Rankine	K _{of}	0.674	
	Coeficiente de presión de tierras pasiva de Rankine	K _{pf}	1.965	
		γ*H	34.00	ton/m²
	Capacidad de carga del prisma del frente	Q_{fr}	37.73	ton/m²
	Resistencia del material del bloque 2 (en la cara uv-Figura 9)	S_{m2}	9.04	ton/m²
	Factor de seguridad del frente	FS_f	3.41	
	Factor de seguridad mínimo para suelos elasto-plásticos	FS _{m1}	1.6	1.3FS _{m1} =2.08
	Factor de seguridad para suelos frágiles	FS _{m2}	2.0	1.3FS _{m2} =2.6
	FS _r > 1.3 FS _m		SI	
Estabilidad de la clave	Cohesión en la clave	c _c	6	ton/m ²
	Ángulo de fricción interna en la clave	φ _c	35	°
	Peso volumétrico del suelo en la clave	γ _c	1.7	ton/m ³
	Módulo de elasticidad del suelo en la clave	E _c	3950	ton/m ²
	Relación de Poisson del suelo	N	0.35	
	Coeficiente de presión de tierras en reposo de Rankine	K _{of}	0.426	
	Coeficiente de presión de tierras pasiva de Rankine	K _{pf}	3.690	
	Longitud de avance máximo sin soporte	a_L	2.08	m
	Long. avance max. sin soporte (falla local de la clave por plastif.)	a_p	2.08	m
	Longitud de avance máximo sin soporte corregido, para concreto lanzado normal, para tomar en consideración el tiempo de endurecimiento (Igual para la sección instrumentada)	a_L/2	1.04	m
Estabilidad general	Resistencia del material del bloque 3 (en la cara mn-Figura 9)	S_{m3}	3.029	ton/m²
	Relación altura de descarga y ancho de la excavación	Z _d /D	1.61	
	Relación ancho de excavación y longitud de avance máximo	D/a _{max}	5.98	
	Relación ancho de excavación y longitud del prisma del frente	D/L	2.04	
	Relación profundidad de la clave y altura de la sección excavada	H/A	2.34	
	Factor de seguridad general (debe ser mayor a 2)	FS_g	2.92	

4.6.2 Diseño del revestimiento de concreto lanzado, cubeta y zapata longitudinal de apoyo

En la Tabla 11 y Tabla 12, se observa el resumen de cálculo del espesor tanto del concreto lanzado como el de la cubeta y el cálculo de la anchura de la zapata, diseños realizados por TGC. Además se presentan el valor del momento flexionante máximo y la fuerza normal actuantes en la sección del anillo del revestimiento y algunos parámetros para sus cálculos.

Tabla 11. Resumen del cálculo del espesor del concreto lanzado, de la cubeta y elementos mecánicos en el revestimiento

Ubicación	Cadenamiento	p_{vf} t/m ²	F_c	f_c t/m ²	t m	R_c m	t_c m	t_e m	K	F	C	N_{posi} t	N_{neg} t	M t-m
Portal Norte	13+326	14.4	1.7	2400	0.123	21.34	0.278	0.3	0.833	38.485	0.149	71.56	71.182	0.587
	13+420	19.2	1.7	2400	0.145	21.34	0.35	0.3	0.833	20.59	0.08	101.74	100.82	1.43
	13+673	18	1.7	2400	0.14	21.34	0.33	0.3	0.833	26.074	0.101	93.46	92.77	1.07
Portal Sur	13+850	19.2	1.7	2400	0.145	21.34	0.35	0.3	0.833	20.59	0.08	101.743	100.82	1.43

Fuente: TGC

Tabla 12. Resumen del cálculo de la anchura de la zapata

Ubicación	Cadenamiento	p_{vf} t/m ²	r m	FS_z	q_u t/m ²	B m
Portal Norte	13+326	14.4	6.21	3	169	1.58
	13+420	19.2	6.21	3	169	2.11
	13+673	18	6.21	3	376	0.9
Portal Sur	13+850	19.2	6.21	3	432	0.82

Fuente: TGC

En la Tabla 13, se presenta el resumen del diseño del revestimiento y de la cimentación corrida de la sección analizada más cercana a la sección instrumentada (cadenamiento 13+420 Km a 93.5 m de la sección instrumentada).

Tabla 13. Resumen del diseño del revestimiento y cimentación para el cadenamamiento 13+420 Km

Diseño del revestimiento y zapata en el cadenamamiento 13+420 Km a 93.5 m de la sección instrumentada				
Revestimiento	Ancho de la sección excavada	D	12.43	m
	Altura de la sección excavada	A	8.55	m
	Esfuerzo vertical final	P_{vf}	19.2	ton/m ²
	Factor de carga	F_c	1.70	
	Esfuerzo de fluencia plástico del concreto	f_c	2400	ton/m ²
	Radio de curvatura de la cubeta	H_r	0	ton/m ²
	Espesor del revestimiento de concreto lanzado	t_e	0.3	m
	Espesor de la cubeta	t_c	0.35	m
	Relación de presiones horizontal y vertical ($K=p_h/p_v$) antes de la deflexión del anillo	K	0.833	
	Relación de flexibilidades del suelo y el anillo	F	26.074	
	Relación de compresibilidades del suelo y el anillo	C	0.101	
	Fuerza normal modificada por la interacción para la sección diametral horizontal del túnel	N_{pos}	101.74	ton
	Fuerza normal modificada por la interacción para la sección diametral vertical del túnel	N_{neg}	100.82	ton
Cimentación	Momento flexionante máximo, reducido por interacción	M	1.43	ton*m
	Esfuerzo vertical final	P_{vf}	19.2	ton/m ²
	Longitud zapata	r	6.21	m
	Factor de seguridad (>2)	FS	3	
	Capacidad de carga de la zapata longitudinal	q_u	169	ton/m²
	Ancho de la zapata corrida	B	2.11	m

5. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

5.1 Procedimiento de excavación

La excavación se llevó a cabo en cuatro etapas como se observa en la Figura 13:

1. Excavación de túneles piloto y construcción de zapatas intermedias de concreto lanzado
- 2a. Excavación del resto de la media sección y lanzado de concreto con espesor de 3 cm
- 2b. Colocación del resto del concreto lanzado en la bóveda
3. Excavación, colocación de armado de la zapata y lanzado de concreto
4. Excavación rampa, colocación armado de la cubeta y colado de concreto hidráulico

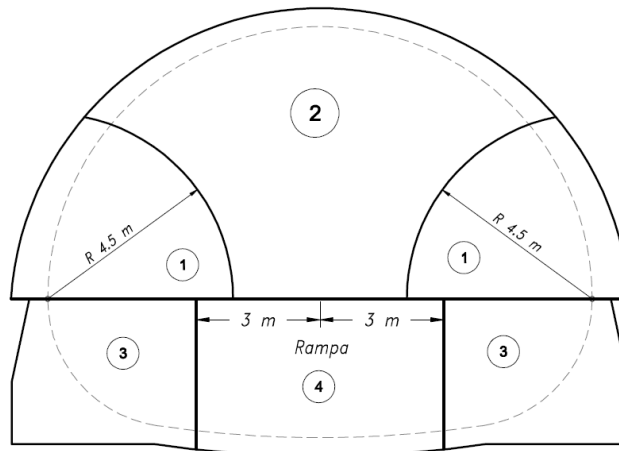


Figura 13. Etapas de la excavación

Fuente: TGC.

El túnel 4 "La Loma" fue construido mediante método convencional excavando mediante medios mecánicos empleando una máquina rozadora y colocando el revestimiento definitivo a base de concreto lanzado reforzado con fibras de acero. En la Tabla 14 se presenta un registro fotográfico de algunas de las etapas del procedimiento constructivo.

5.2 Lanzado de concreto

El concreto lanzado utilizado en los túneles fue reforzado con fibras de acero y el lanzado se inició a partir de las partes más bajas del túnel, continuando de manera ascendente hacia la clave, aprovechando de esta forma el efecto de sostén del concreto ya aplicado.

Para lograr el total de espesor de concreto se instalaron indicadores de espesor o maestras, (varillas en forma de L). Donde se encontró suelo muy inestable, como arenas pumíticas en la clave, se colocaron segmentos de anillos de varilla o alambrión con la forma del túnel separadas entre sí 1.0 m. Respetando la longitud máxima de avance sin soporte, habiendo lanzando una primera capa de concreto de 3 cm, se prosiguió a excavar el siguiente segmento para regresar a lanzar capas sucesivas de 10 cm o menos hasta llegar al espesor de diseño.

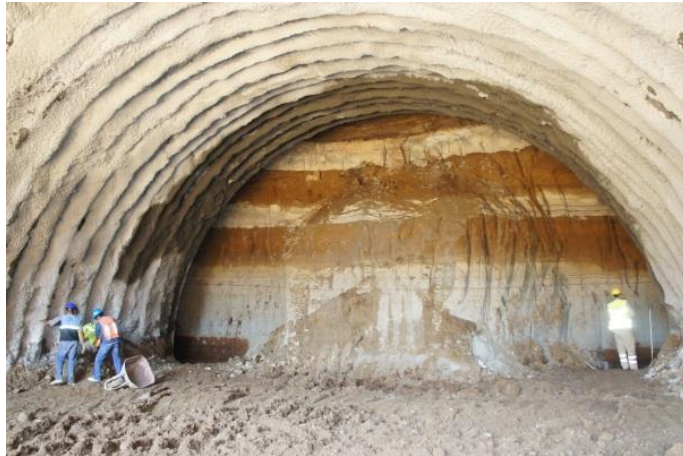
La construcción del túnel, objeto de estudio, fue llevada a cabo por la compañía mexicana de ingeniería ITECSA, S.A.

Tabla 14. Registro fotográfico de algunas fases de la construcción

Excavación de la sección 2 empleando una máquina rozadora hasta llegar a la longitud máxima sin soporte (1.04 m), seguido por el lanzado de concreto en la bóveda.



Frente de la media sección, lista para iniciar de nuevo la excavación de la sección 1 o túneles piloto.



Excavación para la cimentación corrida empleando una pala excavadora, aproximadamente a 30 metros del frente.



Armado de la zapata y lanzado de concreto.



Colado de la cubeta después de la compactación mecánica del suelo, empleando concreto hidráulico de 30 MPa de resistencia.



6. LINEAMIENTOS GENERALES DE LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

6.1 Argumentación para llevar a cabo la instrumentación

El diseñador de túneles trabaja constantemente con una significativa dosis de incertidumbre debido a los materiales heterogéneos y anisotrópicos que se presentan en el medio natural, por lo cual se ve en la necesidad de utilizar modelos simplificados, por ejemplo, el diseño del Túnel 4 "La Loma" está basado en un mecanismo de falla simplificado obtenido a partir de la observación y estudio de fallas ocurridas en la práctica de la construcción, así como en modelos de laboratorio, Figura 8. Es por esto que se tiene la necesidad de realizar una adecuada instrumentación para comparar las diferentes variables medidas en campo con las obtenidas con los modelos, para así concluir sobre la efectividad de las metodologías empleadas en el diseño.

Por otro lado, la instrumentación geotécnica es indispensable especialmente a corto plazo, para conocer el comportamiento que está teniendo el suelo después de la excavación en el procedimiento de la construcción, así ante la ocurrencia de excesiva deformación, los resultados de la instrumentación deben ser procesados oportunamente y entregados a quienes toman decisiones sobre el proceso constructivo del túnel.

La instrumentación debe estar en aptitud para responder tanto a las condiciones estáticas por cargas sostenidas, como a las condiciones dinámicas derivadas de las acciones sísmicas. Se debe mencionar que la instrumentación tanto geotécnica (presente estudio) como sismo-geotécnica, de túneles son proyectos innovadores que no tienen amplia precedencia en México.

6.2 Implementación de la instrumentación

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México fue la institución encargada de la ejecución del proyecto de instrumentación del Túnel 4 "La Loma", del cual se basa el presente estudio. Más ampliamente, la coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería fue la responsable de realizar la instrumentación de dos túneles localizados sobre la Vía Rápida Poetas, bajo dos diferentes objetivos, como se muestra en la Tabla 15:

Tabla 15. Proyectos de instrumentación realizados por el Instituto de Ingeniería en túneles de la Vía Rápida Poetas

Túnel	Tipo de instrumentación	Objetivo	Instrumentos empleados	Adquisición de datos
Túnel 4 "La Loma" (Objeto de este estudio)	Geotécnica	Seguimiento del comportamiento estático a largo plazo y durante la construcción	1. Deformímetros 2. Celdas de presión	* Consolas lectoras manuales
Túnel 5 "Luis Cabrera"	Sismo-geotécnica	Seguimiento de comportamiento estático y dinámico a largo plazo y durante la construcción	1. Deformímetros 2. Celdas de presión 3. Celdas de presión para medir esfuerzos radiales 4. Celdas de presión para medir esfuerzos tangenciales	* Adquisidor digital de datos (uso permanente) * Consolas lectoras manuales

Como se plantea en la Tabla 15, la instrumentación geotécnica del Túnel 4 "La Loma" se llevó a cabo con el objetivo de conocer el comportamiento estático a largo plazo y durante la construcción del revestimiento de concreto y la carga transmitida por las zapatas al suelo.

El uso de la instrumentación geotécnica no se limita solamente a seleccionar el instrumento en sí, sino al desarrollo paso a paso de un proceso ingenieril, que empieza con la definición de los objetivos buscados, continúa con la implementación de los aparatos e instrumentos requeridos y termina con la interpretación de los resultados obtenidos (Schmitter, 2012).

La instrumentación siempre debe estar enfocada a dar respuestas a un conjunto de preguntas específicas con el objetivo de relacionar las causas y los efectos o en otras palabras corroborar relaciones constitutivas. Cuando sólo se recurre a la medición de los efectos, es claro que las respuestas serán incompletas al no establecerse la relación entre las causas y los efectos (Dunnicliff, 1988). Entonces, una instrumentación completa requiere no sólo de medios para medir deformaciones, sino también fuerzas o esfuerzos en los elementos bajo prueba.

La instrumentación geotécnica propuesta para la sección mencionada del Túnel 4 "La Loma" se basó a la respuesta de una serie de cuestionamientos que condujeron a la determinación del tipo, número, características y ubicación de los instrumentos. Los cuestionamientos planteados fueron los siguientes:

- ¿Cuál es la capacidad de carga de la cimentación corrida?
- ¿Cómo se deforma el revestimiento de concreto, por la carga sostenida que soporta, durante la construcción del túnel y a largo plazo?
- ¿Cómo es la distribución de esfuerzos en el revestimiento de concreto del túnel?

Atendiendo a estos cuestionamientos, se seleccionaron deformímetros resistivos de un cuarto de puente por facilidad de instalación, economía y eficiencia para determinar las deformaciones del revestimiento, además de la practicidad de calcular los esfuerzos utilizando el módulo elástico del concreto; y por otro lado, ya que el sistema de adquisición de datos es manual, se optó por instalar celdas de presión con transductores de cuerda vibrante recomendados para mediciones estáticas a largo plazo.

Como se mencionó en los capítulos 2 y 3, la sección instrumentada está ubicada en el cadenamiento 13+513.5, a 23 metros de profundidad (clave) y una distancia al portal más cercano de 183.5 metro (Ver Figura 7). Esta sección fue escogida por estar suficientemente alejada de los portales, tener una profundidad promedio de la clave en comparación con el total de longitud y por adecuación al ritmo de la construcción.

Para llevar a cabo dichas mediciones bajo condición estática se instalaron los siguientes instrumentos: 7 deformímetros (strain gauges) resistivos de un cuarto de puente ubicados en la bóveda del túnel, 2 deformímetros resistivos de un cuarto de puente ubicados cada uno en las zapatas longitudinales, 2 celdas de presión con transductor de cuerda vibrante colocadas en la interfaz cimentación-suelo. La ubicación de los instrumentos utilizados se observa en la Figura 14 y Figura 20.

6.3 Deformímetro eléctrico de un cuarto de puente (sensores tipo strain gage)

Como se muestra en la Figura 14, los deformímetros eléctricos se ahogaron en el revestimiento de la bóveda del túnel a cada 30 grados y en cada una de las zapatas corridas, con el fin de medir las deformaciones tangenciales y axiales respectivamente, durante las etapas de cargas sostenidas (no sísmicas) y a largo plazo en la operación de la obra; además del monitoreo de las deformaciones del revestimiento durante eventos representativos como la excavación y lanzamiento de concreto en las zapatas. Por otro lado, con las deformaciones obtenidas con estos instrumentos, es posible calcular los esfuerzos que las producen por medio de la ley de Hook a partir del módulo elástico del concreto.

Estos instrumentos serán interrogados manualmente con un registrador convencional de microdeformaciones (Vishay-P3).

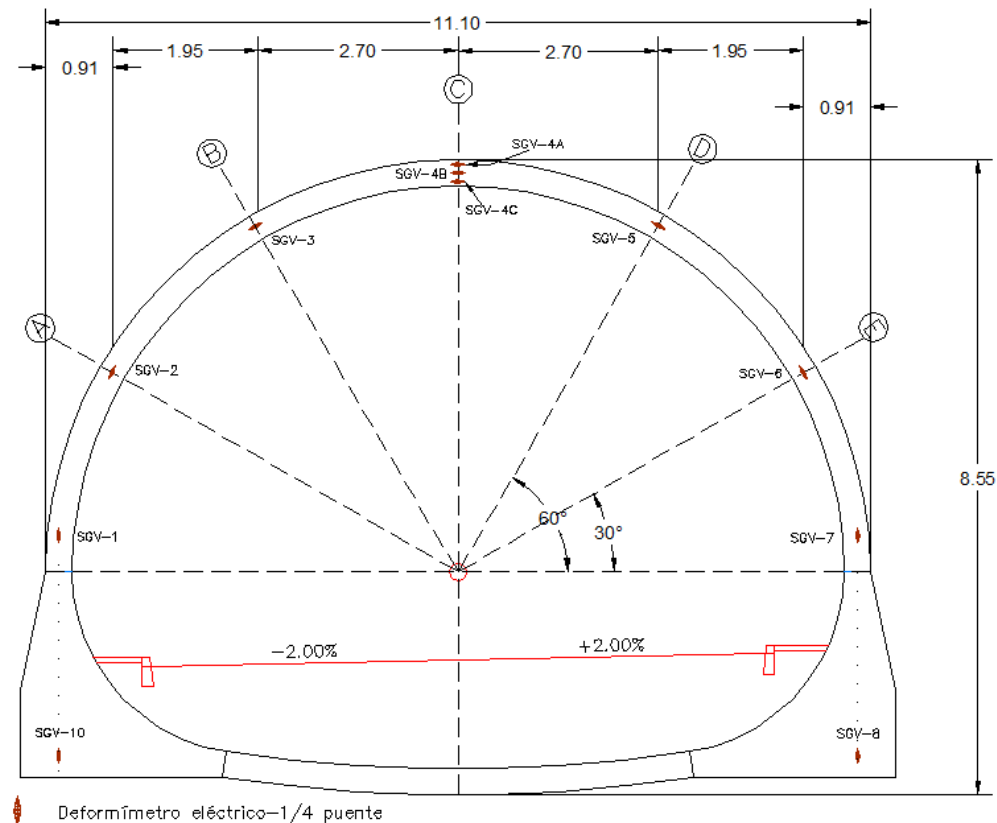


Figura 14. Ubicación de los deformímetros eléctricos de un cuarto de puente en la sección

En la clave del túnel se instalaron tres deformímetros separados cada 7.5 cm con el fin de conocer la deformación en diferentes posiciones dentro del revestimiento.

6.3.1 Funcionamiento de los deformímetros eléctricos

El uso de deformímetros o también llamados *strain gages* es uno de los métodos más comunes para medir las microdeformaciones, este es un dispositivo que varía su resistencia eléctrica en proporción con la cantidad de esfuerzo aplicado.

Los strain gauges metálicos consisten en un fino alambre dispuesto en un patrón de rejilla fijado a una base flexible y aislante. El instrumento se adhiere al objeto cuya deformación se quiere estudiar,

según se deforma el objeto también lo hace esta rejilla, provocando así una variación en su resistencia eléctrica. El dispositivo es mucho más sensible a las deformaciones en la dirección vertical que en la horizontal.

La rejilla conformada por hilo metálico se enlaza a un forro fino, llamado portador, que se une directamente al espécimen de la prueba. Este portador es un conductor, por lo que la corriente debe fluir a través de los estrechos canales.

Si el indicador se extiende verticalmente por un esfuerzo de tensión, los canales se hacen más largos y más estrechos (Figura 15.b) y la tasa de cambio de resistencia es positivo, de lo contrario, cuando se aplica un esfuerzo de compresión, los canales se hacen más cortos y más amplios (Figura 15.c) y la tasa de cambio de resistencia es negativo.

Al final de las 2 terminales, el hilo metálico se une a un transductor, el cual es un dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal correspondiente pero de otra forma física distinta, en este caso por ejemplo, de una variación de resistencia a una variación de voltaje, ambas proporcionales a la deformación. Los strain gauges están disponibles comercialmente con valores nominales de la resistencia desde 30 hasta 3000 Ω , siendo 120, 350, y 1000 Ω los valores más comunes en el mercado.

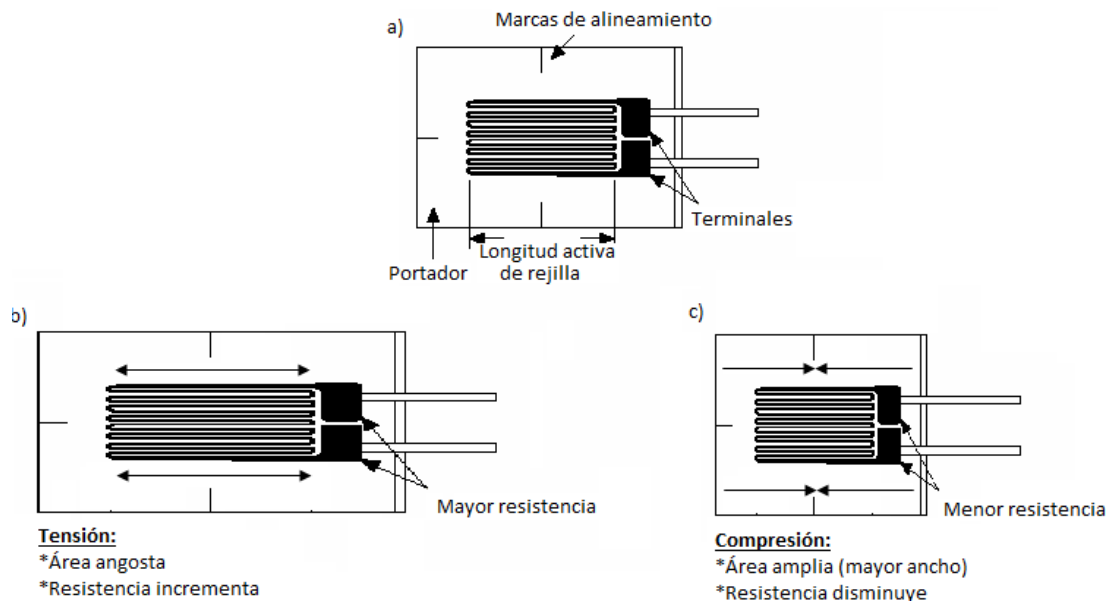


Figura 15. a) Esquema de strain gage en reposo. b) Esquema de strain gage bajo un esfuerzo de tensión. c) Esquema de strain gage bajo un esfuerzo de compresión

Un parámetro esencial del strain gauge es su sensibilidad a los esfuerzos de tensión y compresión, expresado cuantitativamente como el factor de la galga, factor de medición o *gauge factor* (GF). Se define el factor de medición como la relación entre el cambio relativo en resistencia eléctrica y el cambio relativo en la longitud:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon}$$

El factor de medición, para los deformímetros de tensión metálicos, es generalmente alrededor de 2. En la práctica, las deformaciones causadas por los esfuerzos de tensión o compresión implican

cantidades del orden de 10^{-6} m, por lo tanto, medir la deformación requiere la medida exacta de cambios muy pequeños en resistencia. Por ejemplo, si un espécimen experimenta una deformación axial de $500 \mu\epsilon$, un deformímetro con un factor de medición de 2 exhibirá un cambio en resistencia eléctrica de $2 \cdot (500 \times 10^{-6}) = 0,1\%$, esto quiere decir que para un strain gauge de 350Ω , este es un cambio de resistencia de solamente $0,35 \Omega$. Para medir estos cambios tan pequeños en resistencia, los deformímetros utilizan casi siempre una configuración puente de Wheatstone con una fuente de excitación de voltaje. Como se observa en la Figura 16, el puente de Wheatstone consiste en cuatro brazos de resistencias (R) con un voltaje de la excitación (V_{EX}) que se aplica a través del puente.

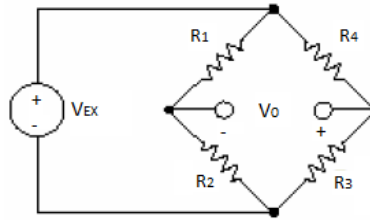


Figura 16. Puente de Wheatstone

Para el puente de la Figura 16, donde el cociente entre las resistencias 1 y 2 es igual al cociente entre las resistencias 4 y 3, se dice que el puente está balanceado y el voltaje de salida (V_0) será igual a cero:

$$V_0 = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right] * V_{EX}$$

Cualquier cambio en resistencia en cualquier brazo del puente dará lugar a un voltaje de salida distinto a cero.

Si $R_4 = R_G$ y se somete la galga a un esfuerzo de tensión, se generará un aumento de esta resistencia, se desequilibrará el puente y se producirá un voltaje de salida distinto a cero. Este caso en particular se puede representar con un circuito de un puente como se observa en la Figura 17.

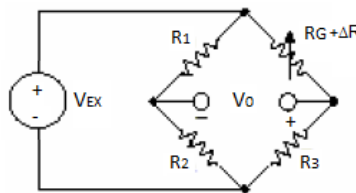


Figura 17. Circuito de un cuarto de puente

Si $GF = \frac{\Delta R / R_G}{\epsilon}$, entonces $\Delta R = \epsilon * GF * R_G$; Si $R_1 = R_2 = R_3 = R_G$, la ecuación del puente (circuito de cuarto de puente) se reescribe como:

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = -\frac{GF * \epsilon}{4} \left[\frac{1}{1 + GF * \frac{\epsilon}{2}} \right]$$

Al conocer la relación entre el voltaje de entrada y salida y el factor de medición o gage factor del deformímetro es posible calcular la deformación unitaria del espécimen. Los valores típicos de voltaje

de entrada son entre 5 VDC y 12 VDC, mientras que los valores de voltaje salida generalmente están dados en milivolts.

El cambio en la resistencia también responderá a los cambios en temperatura, por eso los fabricantes de estos deformímetros procuran reducir al mínimo la sensibilidad a la temperatura procesando su material para compensar en el rango de temperatura del material del espécimen (concreto). Aunque se logra reducir la sensibilidad termal, no la quitan totalmente. Usando deformímetros con transductor de puente completo se compensarían los cambios de temperatura y el efecto de ésta puede ser reducido casi totalmente.

6.3.2 Deformímetro eléctrico de un cuarto de puente empleado en el estudio

El tipo de deformímetro que se empleó en el proyecto de instrumentación del túnel fue uno perteneciente a las series EGP-*strain gauges* de la empresa Vishay (Figura 18). Estos deformímetros fueron diseñados especialmente para medir las deformaciones del concreto estando embebidos dentro de éste, además cuenta con un sistema de auto compensación para minimizar al máximo los efectos de temperatura especialmente mientras el proceso de fraguado del concreto. Las características de este dispositivo se presentan en la Tabla 16.

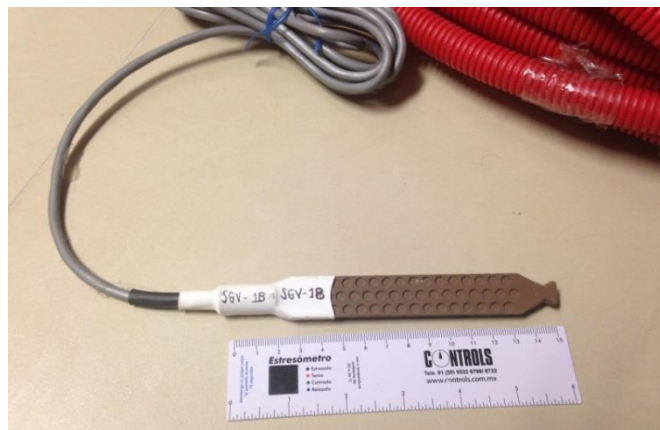


Figura 18. Deformímetro eléctrico de un cuarto de puente

Tabla 16. Características del deformímetro de un cuarto de puente empleado en el proyecto

Marca	Vishay
Modelo	EGP-5-350
Resistencia	350 Ω +/- 0.8%
Factor de medición (gauge factor)	2.04
Material de la rejilla metálica	Aleación entre níquel y cromo
Longitud activa	100 mm
Longitud exterior	130 mm
Ancho exterior	17 mm
Espesor exterior	10 mm
Diámetro del cable	5 mm
Rango de temperatura	-5 a +50 grados celsius

6.3.3 Adquisición de datos de deformación

Para el registro manual de lecturas de estos instrumentos, en condición estática, se usa una consola indicadora y grabadora de deformaciones modelo Vishay-P3 (Figura 19), la cual induce una corriente eléctrica en volts al instrumento y registra su voltaje de salida, dicho voltaje de salida depende de la variación de la resistencia cuando el deformímetro es sometido a un esfuerzo.

El usuario introduce el factor de medición o gauge factor (GF) y la consola determina la deformación en unidades de microdeformaciones conociendo la relación entre el voltaje de salida y entrada, con la siguiente expresión:

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = -\frac{GF * \varepsilon}{4} \left[\frac{1}{1 + GF * \frac{\varepsilon}{2}} \right]$$



Figura 19. Consola lectora para adquisición de datos de deformaciones, P3- Vishay

La consola lectora grabadora Vishay-P3 es un instrumento portátil, capaz de aceptar simultáneamente cuatro entradas de un cuarto de puente, medio puente o puente completo. Utiliza un voltaje de excitación de 1.5 VDC, un rango de voltaje de salida de 0 a 2.5 VDC y su rango y resolución de lecturas de deformación es de $\pm 31000 \mu\varepsilon \pm 1 \mu\varepsilon$.

6.4 Celda de presión de transductor tipo cuerda vibrante

En la Figura 20 se muestra la ubicación de las celdas de presión con transductor de tipo cuerda vibrante que se colocaron bajo la base de la cimentación corrida, ahogándolas en contacto entre el concreto y el suelo con el fin de obtener el esfuerzo bajo la zapata.

Estos instrumentos son interrogados manualmente con una consola lectora de instrumentos de cuerda vibrante (Geokon K-404), la cual arroja datos de frecuencia (Hz) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

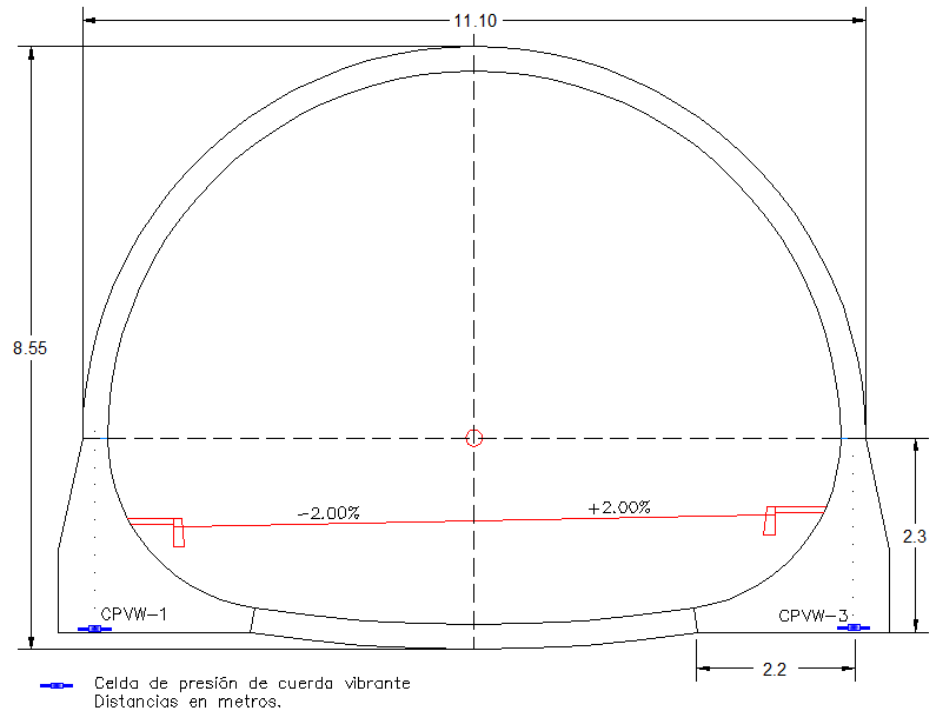


Figura 20. Ubicación de las celdas de presión de cuerda vibrante en la cimentación

6.3.1 Funcionamiento de la celda de presión de cuerda vibrante

Este sensor consiste en una celda plana circular construida por 2 placas de acero inoxidable soldadas juntas periféricamente, el pequeño espacio entre las placas se rellena con un fluido muy estable, totalmente desaerado, que está comunicado con un tubo delgado de acero a un transductor de presión de cuerda vibrante. La presión total externa que actúa perpendicularmente al plano de la celda, se transmite hidráulicamente al transductor de cuerda vibrante y es medida por éste. Finalmente esta señal eléctrica se conduce por un cable blindado hasta la consola lectora.

Adicionalmente, estas celdas cuentan con termistores para medir la temperatura, lo que hace posible realizar las correcciones de la presión por la variación de ésta.

Las celdas de presión con transductor de cuerda vibrante son instrumentos que basan sus mediciones a partir de deformaciones originadas por la aplicación de un esfuerzo, estas deformaciones generan un cambio de voltaje que a su vez producen vibraciones; el transductor tiene incorporado una cuerda tensionada cuya elongación variará dependiendo de la presión externa a la que está siendo sometido el sistema. Midiendo el cambio de la frecuencia vibratoria de la cuerda, es posible determinar el cambio de esfuerzo mecánico al que está sometida la celda basándose en el principio de que cuando un elemento flexible se somete a niveles variables de tensión mecánica, la frecuencia de este elemento es directamente proporcional a la tensión aplicada.

6.3.2 Celda de presión empleada en el estudio

Las celdas de presión utilizadas en el proyecto de instrumentación del Túnel 4 fueron suministradas por la empresa Geokon, modelo 4800, diseñadas entre otras cosas para medir las presiones entre una estructura geotécnica, como una cimentación, y el suelo, en dirección perpendicular a la cara de la celda.

Debido al cambio de presión se oprimen las dos placas de acero inoxidable lo que causa un aumento correspondiente de la presión del fluido dentro de la celda, el transductor de presión de cuerda vibrante convierte esta presión en una señal eléctrica la cual se transmite como frecuencia por cable a la consola lectora.

La capacidad de la celda empleada es de 170 KPa y cuenta con termistores para medir la temperatura con un rango de -20°C a $+80^{\circ}\text{C}$ basándose en la variación de la resistividad que presenta el semiconductor con la temperatura. En la Figura 21 y Figura 22 se presenta un esquema de la celda de presión circular de diámetro de 23 cm utilizada en el proyecto y en la Tabla 17 sus principales características.

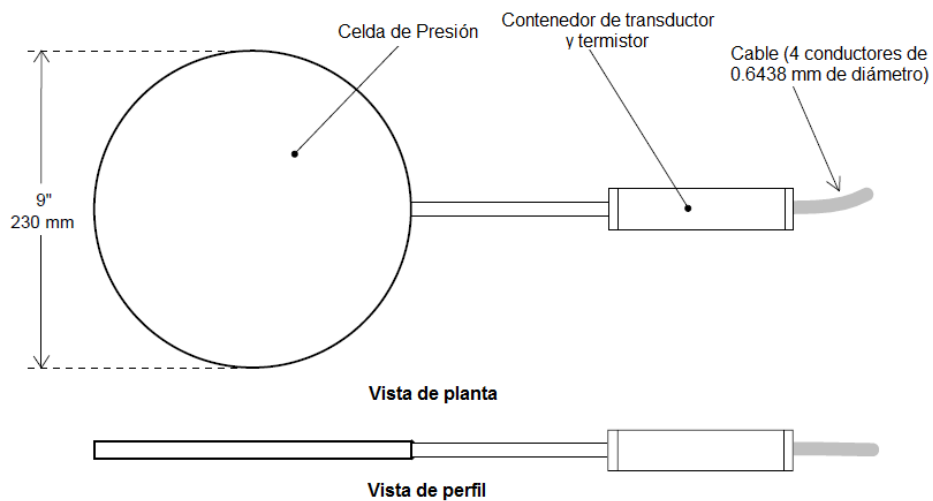


Figura 21. Representación de celda de presión de cuerda vibrante

Fuente: Geokon



Figura 22. Celda de presión con transductor de cuerda vibrante

Tabla 17. Características de la celda de presión empleada en el proyecto

Marca	Geokon
Modelo	4800
Capacidad	170 KPa
Rango de temperatura	-20°C a +80°C
Tipo de transductor	Cuerda vibrante
Diámetro	230 mm
Espesor exterior	6 mm

6.3.3 Adquisición de datos de presión

Como se ha mencionado anteriormente, el transductor de presión de cuerda vibrante convierte la presión en una señal eléctrica la cual se transmite como frecuencia por cable a la consola lectora. Para el registro manual de lecturas de estos instrumentos, en condición estática, se usa una consola indicadora y grabadora modelo GK-404 de la empresa Geokón como la mostrada en la Figura 23, es posible programarla para que muestre los valores de frecuencia relacionados a la cuerda vibrante en Hz y la temperatura en grados centígrados.

El termistor es un sensor resistivo de temperatura, cuyo funcionamiento se basa en la variación de la resistividad que presenta un semiconductor con la temperatura, la caja lectora convierte esta variación de resistividad en unidades de temperatura directamente.



Figura 23. Consola lectora para adquisición de datos de frecuencia y temperatura

Como se observa en la Figura 23, la consola cuenta con una conexión con un cordón que tiene 5 cables de diferente color cada uno con un clip (caimán). Los colores de estos clips son rojo, negro, verde, blanco y azul; los cables de color rojo y negro son para medir la frecuencia de la cuerda vibrante (positivo y negativo respectivamente), los de color verde y blanco son los correspondientes al termistor para medir la temperatura (positivo y negativo respectivamente) y el cable azul es un cable blindado que disminuye la posibilidad de que ocurra interferencia de la señal del transductor debido a emisiones de ruidos electrónicos.

El termistor tiene una exactitud de $\pm 0.5^\circ$ Celsius y un rango de medición de temperatura -20°C a $+80^\circ\text{C}$ y el transductor de cuerda vibrante un rango de medición de frecuencia de 400 a 6000 Hz.

6.3.4 Procesamiento de datos

Para obtener la presión definitiva a la que está sometida la celda se deben realizar tres tipos de correcciones: por el factor de calibración (calibration factor), por temperatura y por presión barométrica.

Considerando que no habrán cambios de presión barométrica en el sitio, no se tuvo en cuenta dicha corrección.

Para convertir satisfactoriamente los dígitos (frecuencia) arrojados por la consola lectora a presión se usa la siguiente expresión:

$$Presión = (lectura\ actual - lectura\ inicial) * factor\ de\ calibración$$

$$P = (R_1 - R_0) * G$$

La lectura inicial fue tomada en laboratorio y al finalizar la instrumentación en el sitio, el factor de calibración es suministrado por el fabricante del equipo, sin embargo, para tener certeza de este valor se realizó una calibración de las celdas en el laboratorio la cual se describe en el siguiente capítulo.

El factor de calibración tiene unidades de esfuerzo sobre dígitos (KPa/dígitos) por ello las lecturas arrojadas por la consola lectora deben ser convertidas de frecuencia a dígitos de la siguiente forma:

$$Digitos = \left(\frac{1}{periodo\ (s)} \right)^2 * 10^{-3} = \frac{Hz^2}{1000}$$

Por ejemplo, si se asume una lectura inicial de $R_0=3108.1\ Hz$, una lectura actual de $R_1=2788.9\ Hz$ y un factor de calibración de $G=-0.04552\ KPa/dígitos$, la presión calculada será:

$$P = \left[\left(\frac{2788.9^2}{1000} \right) - \left(\frac{3108.1^2}{1000} \right) \right] * -0.04552 = 85.68\ KPa$$

La celda de presión de cuerda vibrante es muy sensible a los cambios de temperatura, por ello es necesario realizar una corrección por temperatura usando la siguiente expresión:

$$Corrección\ por\ temperatura = (temperatura\ actual - temperatura\ inicial) * Factor\ térmico$$

$$P = (R_1 - R_0) * G + (T_1 - T_0) * K$$

El factor de temperatura (K) es suministrado por el fabricante y tiene unidades de esfuerzo sobre temperatura (KPa/°C). Para el ejemplo anterior si la temperatura inicial es 22.7°C, la temperatura final es 23.8°C y el factor de temperatura es -0.006827 KPa/°C, la presión final corregida será:

$$P = \left\{ \left[\left(\frac{2788.9^2}{1000} \right) - \left(\frac{3108.1^2}{1000} \right) \right] * -0.04552 \right\} + \{ [23.8 - 22.7] * -0.006827 \} = 85.67\ KPa$$

7. INSTRUMENTACIÓN

7.1 Calibración de las celdas de presión en laboratorio y teoría de operación

Las celdas de presión de cuerda vibrante utilizadas en el proyecto cuentan con una hoja de calibración suministrada por el fabricante, donde se especifica el factor de calibración (gauge factor) y el factor de temperatura (termal factor) para cada instrumento. Con el objetivo de verificar de estos factores se realizó una calibración previa a la instalación, en el Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, usando para ello la consola lectora con la que se medirá en campo.

El procedimiento llevado a cabo para la calibración de las celdas se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Calibración en laboratorio de celdas de presión

1. Cálculo del 65% del esfuerzo admisible de la celda (170 KPa) para determinar la máxima carga aplicada en el laboratorio.	$q = 0.65 * 170 \text{ KPa} * \left[\pi * \left[\frac{0.23}{2} \right]^2 m^2 \right] = 4.59 \text{ KN}$ $\approx 468 \text{ Kg}$
2. Se utilizó una báscula (Toledo) con capacidad máxima de 500 Kg con precisión de 0.5 Kg. Antes de aplicar cualquier carga se tomó la lectura inicial de frecuencia y temperatura con la consola lectora.	
3. Se ubicó la celda en el centro de aplicación de la carga y en medio de dos placas de corcho con el fin de simular las condiciones del suelo (baja rigidez) y distribuir mejor la carga.	

4. Se colocaron 2 placas de acero sobre el corcho superior de la celda de 10 y 20 Kg respectivamente para asegurar una distribución uniforme de esfuerzos.

Se realizaron incrementos gradualmente de 50 Kg tomando las lecturas respectivas de frecuencia y temperatura hasta llegar a 450 Kg. Se realizaron dos ciclos uno de carga y otro de descarga.



Los datos de calibración de las dos celdas de presión de cuerda vibrante instaladas en las zapatas del túnel se presentan en la Tabla 19 y Tabla 20. Con los datos obtenidos se generó una gráfica de las lecturas de salida tanto en frecuencia como en dígitos vs el esfuerzo registrado en el laboratorio y el obtenido con la ecuación de calibración suministrada por el fabricante, cada gráfica cuenta con su ecuación con el fin de comparar las pendientes (gage factor).

Como se observa en la Figura 24, Figura 25, Figura 26 y Figura 27 es claro que los esfuerzos calculados con la ecuación de calibración del fabricante es ligeramente superior al medido en el laboratorio, por ejemplo, como se observa en la Figura 27 en el proceso de carga, el factor de calibración de fábrica corresponde a -0.0431 mientras que el determinado en laboratorio corresponde a -0.0369 es decir una diferencia de -0.0062. Esta variación de pendientes no se le puede atribuir a un error en la hoja de calibración del instrumento de fábrica sino a varios factores entre los cuales tenemos:

- La distribución no uniforme de la carga en la calibración de laboratorio debida a la diferencia de rigideces entre la celda y el corcho.
- El cálculo aproximado del área de contacto de la celda ya que no se está considerando que el borde de la celda está soldado y no tiene fluido en su interior. A su vez este borde puede causar distribución no uniforme de la carga debida a concentración de esfuerzos por diferencia de rigideces.
- El método de calibración utilizado en fábrica y el realizado en laboratorio no son los mismos, aunque en los manuales de los instrumentos no se especifica cómo fue realizada su calibración, es posible que haya sido dentro de un tanque presurizado, lo que eliminaría la incertidumbre de las mediciones por cambio de rigideces.

Tabla 19. Datos de calibración de la celda de presión CPVW-1

CALIBRACIÓN CELDA DE PRESIÓN DE CUERDA VIBRANTE							
Fecha:		18-Oct-12		 INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM			
Celda de presión:							
Instrumento:	CPVW-1			Factores regresión lineal:			
Marca:	GEOKON			Factor de calibración	G (Kpa/Digitos)	-0.0455	
Modelo:	4800-1-170 Kpa			Factor de temperatura	K (Kpa/°C)	-0.0068	
SN:	1139460			$P = (R_1 - R_0) * G + (T_1 - T_0) * K$			
Long. cable (m)	21			Calibró:			
Diámetro (cm)	23			Ingenieros: Leidy Bejarano y Miguel Rufiar			
Área (m²)	0.04154756						
PROCESO CARGA							
Carga (prensa)	Fuerza	Esfuerzo Lab.	Frecuencia	Lectura salida	Temperatura	Esfuerzo (fábrica)	Variación
kg	KN	Kpa	Hz	Digitos	°C	Kpa	(%)
0	0.000	0.00	3108.1	9660.3	23.7	0.00	
10	0.098	2.36	3098.6	9601.3	23.8	2.68	12.0
20	0.196	4.72	3088.9	9541.3	23.8	5.42	12.8
50	0.491	11.81	3060.3	9365.4	23.8	13.42	12.0
100	0.981	23.61	3002.5	9015.0	23.8	29.37	19.6
150	1.472	35.42	2946.5	8681.9	23.8	44.54	20.5
200	1.962	47.22	2894.2	8376.4	23.8	58.44	19.2
250	2.453	59.03	2840.4	8067.9	23.8	72.49	18.6
300	2.943	70.83	2788.9	7778.0	23.8	85.68	17.3
350	3.434	82.64	2736.9	7490.6	23.8	98.76	16.3
400	3.924	94.45	2686.7	7218.4	23.9	111.16	15.0
450	4.415	106.25	2634.4	6940.1	23.9	123.82	14.2
PROCESO DESCARGA							
Carga (prensa)	Fuerza	Esfuerzo Lab.	Frecuencia	Lectura salida	Temperatura	Esfuerzo (fábrica)	Variación
kg	KN	Kpa	Hz	Digitos	°C	Kpa	(%)
450	4.415	106.25	2634.4	6940.1	23.9	123.82	14.2
400	3.924	94.45	2692.3	7248.5	23.9	109.78	16.2
350	3.434	82.64	2746.3	7542.2	23.8	96.42	14.3
300	2.943	70.83	2801.1	7846.2	23.9	82.58	14.2
250	2.453	59.03	2855.2	8152.2	23.9	68.65	14.0
200	1.962	47.22	2908.2	8457.6	23.9	54.74	13.7
150	1.472	35.42	2960.5	8764.6	23.9	40.77	13.1
100	0.981	23.61	3012.0	9072.1	23.9	26.77	11.8
50	0.491	11.81	3060.0	9363.6	23.9	13.50	12.6
10	0.098	2.36	3089.8	9546.9	23.9	5.16	54.3
10	0.098	2.36	3098.9	9603.2	23.9	2.60	9.1
0	0.000	0.00	3108.4	9662.2	24.0	-0.09	

Tabla 20. Datos de calibración de la celda de presión CPVW-3

CALIBRACIÓN CELDA DE PRESIÓN DE CUERDA VIBRANTE							
Fecha: 18-Oct-12							
Celda de presión:							
Instrumento: CPVW-3				Factores regresión lineal:			
Marca: GEOKON				Factor de calibración		G (Kpa/Digitos)	-0.04314
Modelo: 4800-1-170 Kpa				Factor de temperatura		K (Kpa/°C)	0.02251
SN: 1139457				$P = (R_1 - R_0) * G + (T_1 - T_0) * K$			
Long. cable (m) 27							
Diámetro (cm) 23				Calibró:			
Área (m²) 0.04154756				Ingenieros: Leidy Bejarano y Miguel Rufiar			
PROCESO CARGA							
Carga (prensa)	Fuerza	Esfuerzo Lab.	Frecuencia	Lectura salida	Temperatura	Esfuerzo (fábrica)	Variación
kg	KN	Kpa	Hz	Digitos	°C	Kpa	(%)
0	0.000	0.00	3124.3	9761.3	23.7	0.00	
10	0.098	2.36	3112.9	9690.1	23.8	3.07	23.1
20	0.196	4.72	3101.8	9621.2	23.8	6.05	21.9
50	0.491	11.81	3068.5	9415.7	23.8	14.91	20.8
100	0.981	23.61	3008.9	9053.5	23.8	30.54	22.7
150	1.472	35.42	2953.6	8723.8	23.8	44.76	20.9
200	1.962	47.22	2898.7	8402.5	23.8	58.62	19.4
250	2.453	59.03	2842.3	8078.7	23.8	72.59	18.7
300	2.943	70.83	2789.1	7779.1	23.8	85.51	17.2
350	3.434	82.64	2735.9	7485.1	23.8	98.19	15.8
400	3.924	94.45	2680.8	7186.7	23.9	111.07	15.0
450	4.415	106.25	2627.6	6904.3	23.9	123.25	13.8
PROCESO DESCARGA							
Carga (prensa)	Fuerza	Esfuerzo Lab.	Frecuencia	Lectura salida	Temperatura	Esfuerzo (fábrica)	Variación
kg	KN	Kpa	Hz	Digitos	°C	Kpa	(%)
450	4.415	106.25	2627.6	6904.3	23.9	123.25	13.8
400	3.924	94.45	2683.1	7199.0	23.9	110.54	17.0
350	3.434	82.64	2738.5	7499.4	23.8	97.58	15.3
300	2.943	70.83	2793.8	7805.3	23.9	84.38	16.1
250	2.453	59.03	2845.5	8096.9	23.9	71.81	17.8
200	1.962	47.22	2902.8	8426.2	23.9	57.60	18.0
150	1.472	35.42	2957.5	8746.8	23.9	43.77	19.1
100	0.981	23.61	3012.7	9076.4	23.9	29.55	20.1
50	0.491	11.81	3070.4	9427.4	23.9	14.41	18.1
10	0.098	2.36	3102.5	9625.5	23.9	5.86	59.7
10	0.098	2.36	3113.1	9691.4	23.9	3.02	21.8
0	0.000	0.00	3124.4	9761.9	24.0	-0.02	

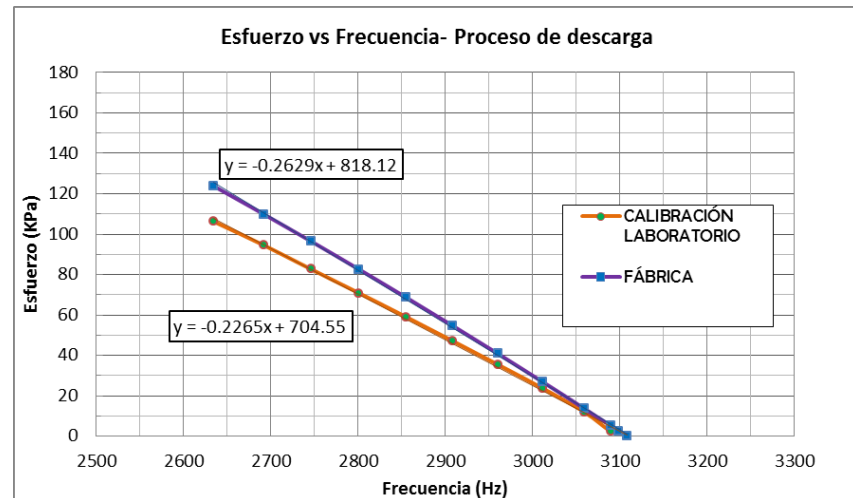
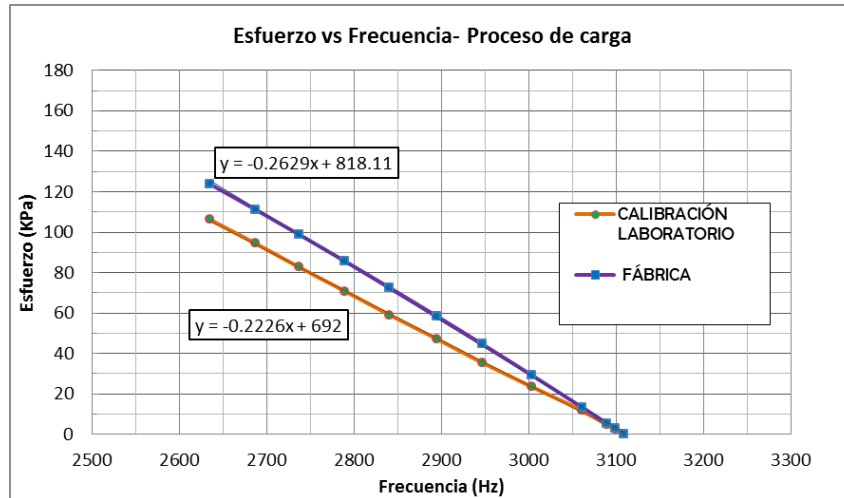


Figura 24. Gráfica de esfuerzo vs frecuencia obtenida en laboratorio y con la ecuación de fábrica, en proceso de carga y descarga para celda CPVW-1

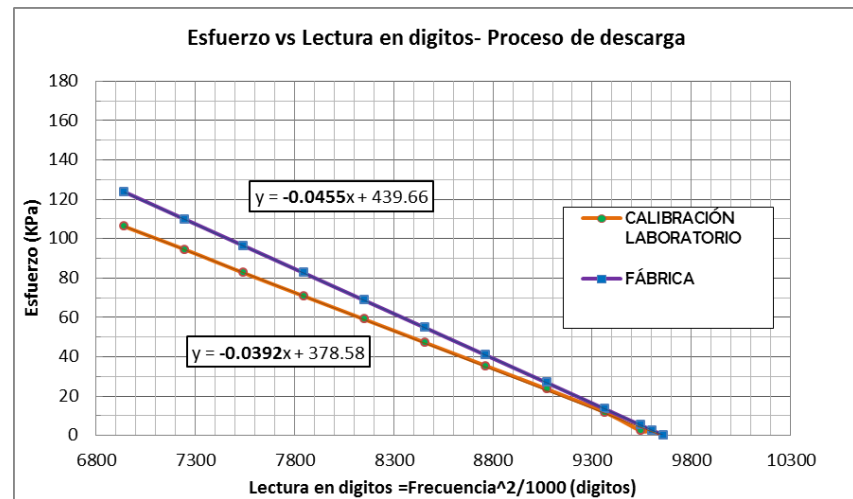
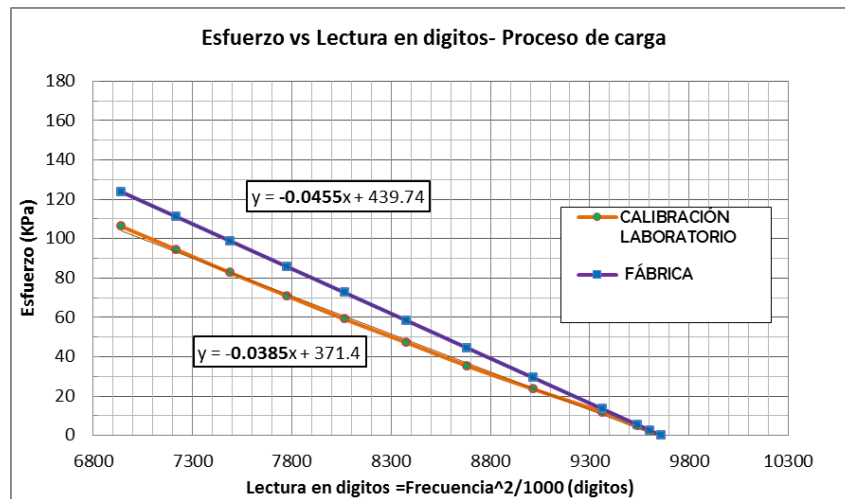


Figura 25. Gráfica de esfuerzo vs dígitos obtenida en laboratorio y con la ecuación de fábrica, en proceso de carga y descarga para celda CPVW-1

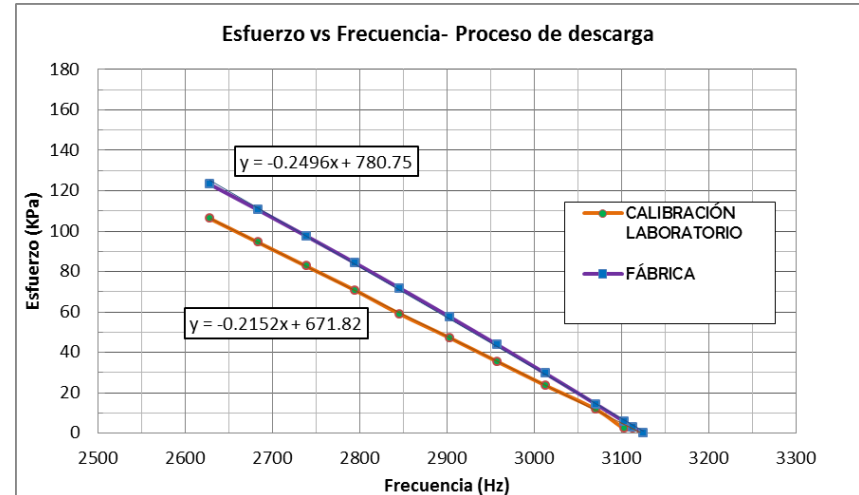
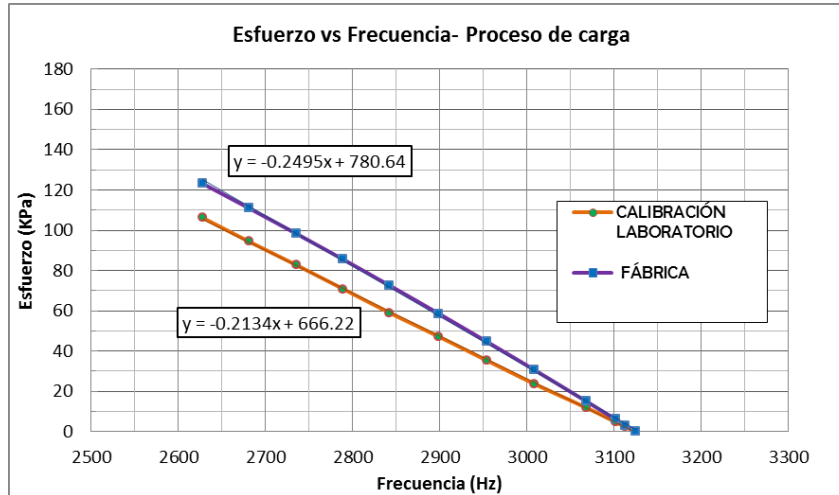


Figura 26. Gráfica de esfuerzo vs frecuencia obtenida en laboratorio y con la ecuación de fábrica, en proceso de carga y descarga para celda CPVW-3

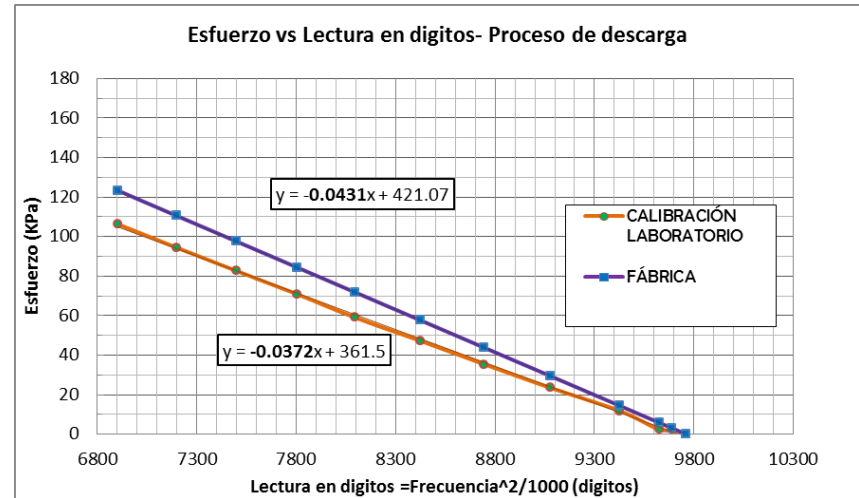
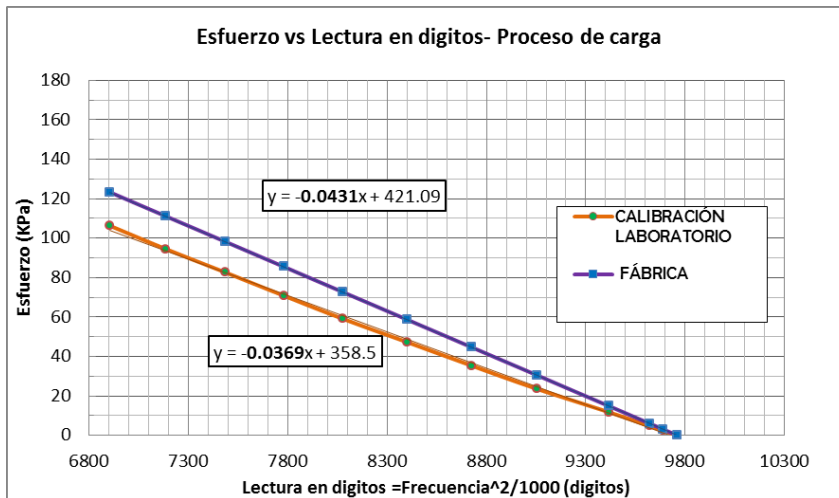


Figura 27. Gráfica de esfuerzo vs dígitos obtenida en laboratorio y con la ecuación de fábrica, en proceso de carga y descarga para celda CPVW-3

Pruebas realizadas por varios investigadores (como los reportados por Dunncliff, 1988) han mostrado que la distribución de esfuerzos sobre la celda se ve afectado por la relación de rigideces entre la celda y el suelo y también por el espesor de la celda, siendo que, una celda con un espesor grande alterará la condición de esfuerzos más que una celda delgada.

La afectación del cambio de rigideces en las mediciones es fácil de comprobar en una prueba de laboratorio igual que la anterior pero donde no se coloquen las placas de corcho en la parte superior e inferior de la celda, sino dejando la celda en contacto directamente con las placas de acero. Las placas de acero al tener una rigidez mayor que la celda no permitirán una distribución de esfuerzos uniforme sobre esta, causando una salida de datos de esfuerzos menores que el real aplicado; este fenómeno se puede observar en Figura 28, en la calibración de una celda de presión tipo resistiva **donde no se empleó lámina de corcho.**

Idealmente, la celda debería ser tan rígida como el suelo, pero en la práctica esto es algo muy difícil de obtener, sin embargo se ha demostrado en varios estudios que una celda delgada y rígida tendrá el mejor comportamiento posible disminuyendo la variación del estado de esfuerzos en el suelo.

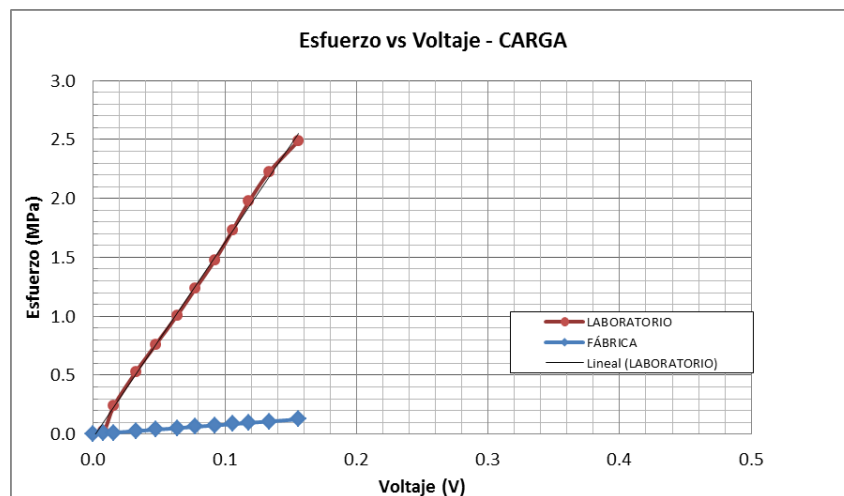


Figura 28. Calibración de una celda de presión tipo resistiva en contacto con placas de acero sin utilizar lámina de corcho

7.2 Registro de lecturas iniciales de deformímetros de un cuarto de puente

Debido a la geometría y fragilidad de los deformímetros de un cuarto de puente no fue posible realizar una configuración adecuada para llevar a cabo su calibración. En el apartado 6.3 se menciona el funcionamiento y las características de estos dispositivos, los utilizados en el proyecto poseen un factor de medición de 2,04.

Es indispensable tomar las lecturas iniciales de los deformímetros en laboratorio y después de instalarlos en campo, ya que la deformación es función de la diferencia de lecturas de deformación.



Figura 29. Toma de lecturas iniciales de deformímetros de un cuarto de puente

En la Tabla 21 se muestra un registro de los deformímetros empleados indicando sus principales características como longitud de cable, número de serie, lectura de deformación inicial, entre otras. Es recomendable realizar la lectura de cada deformímetro en la misma consola y en un canal fijo para disminuir la incertidumbre por el equipo de medición.

Instrumento	N° Serie	Modelo	Long. Cable (m)	Consola+canal	Deformación inicial ($\mu\epsilon$)
SGV-10	0917-2	EGP-5-350	17	N+1	682
SGV-8	0922-10	EGP-5-351	31	N+3	61
SGV-7	0918-4	EGP-5-352	35	N+1	328
SGV-6	0684-5	EGP-5-353	30.5	N+2	2629
SGV-5	0918-2	EGP-5-354	26.5	N+3	719
SGV-4C	0926-12	EGP-5-355	23	G+2	348
SGV-4B	0680-4	EGP-5-356	23	G+1	410
SGV-4A	0519-9	EGP-5-357	24	N+4	534
SGV-3	0684-9	EGP-5-358	18	G+3	924
SGV-2	0684-7	EGP-5-359	13	G+1	579
SGV-1	0918-7	EGP-5-360	10	G+4	642

Tabla 21. Características de los deformímetros de un cuarto de puente instalados

7.3 Instalación de equipos en campo en el Túnel 4 “La Loma”

Como se mencionó anteriormente, la sección instrumentada corresponde al cadenamiento 13+513.5. En la Figura 30 se muestra la ubicación final de los instrumentos.

Es importante mencionar que la comunicación entre el instrumentador geotécnico y los ingenieros encargados de la obra es indispensable para saber el momento adecuado para la instalación de los dispositivos. También es importante realizar constantes visitas a la obra para observar los avances de la construcción y revisar que los instrumentos estén respondiendo correctamente.

La instrumentación de la bóveda del túnel (revestimiento) se llevó a cabo el día 19 de septiembre de 2012, la de la zapata derecha el día 30 de octubre de 2012 y la instrumentación de la zapata izquierda el día 1 de noviembre de 2012.

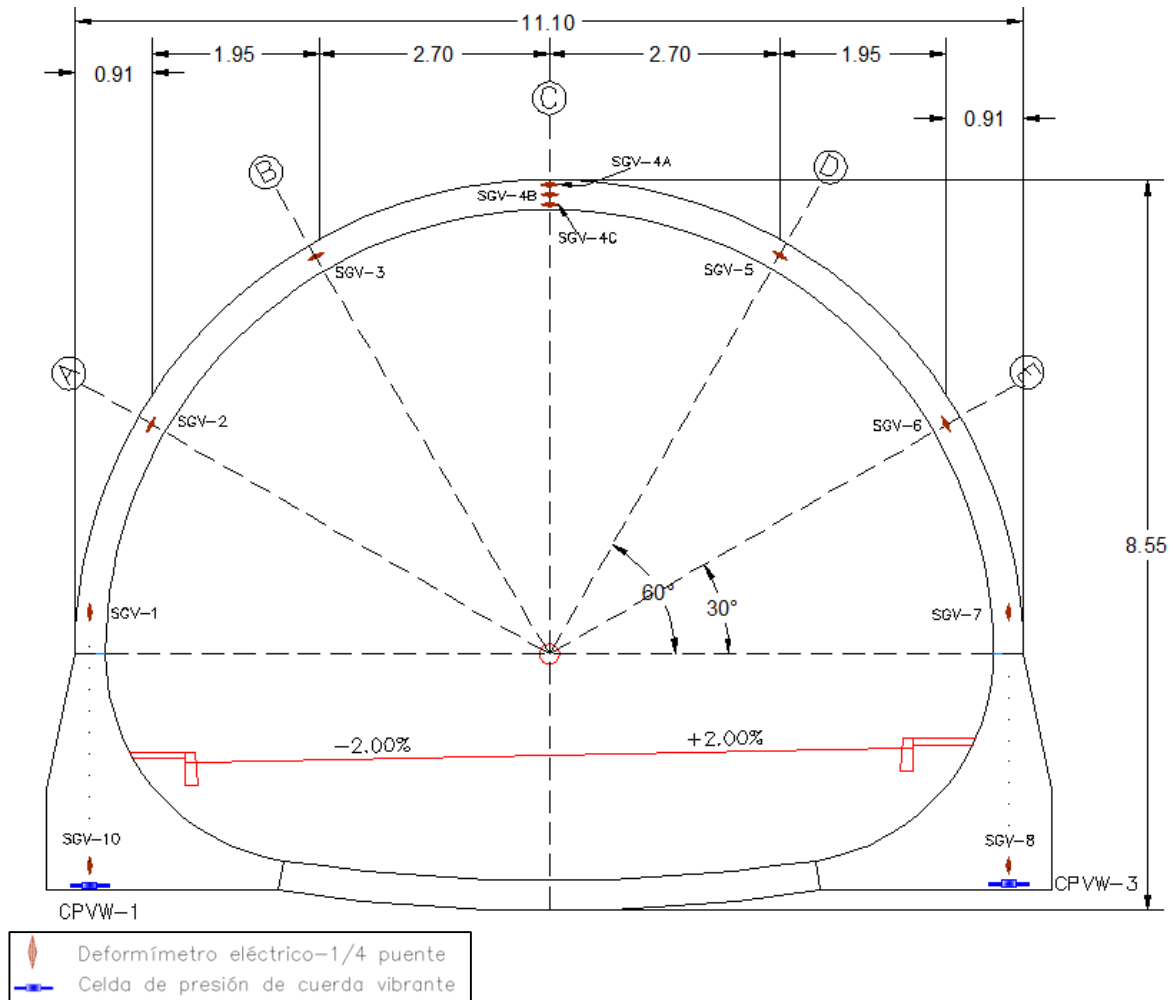


Figura 30. Ubicación de los instrumentos en una sección del Túnel 4 "La Loma"



Figura 31. Colocación de ducto de protección a los cables de los instrumentos

Los cables correspondientes a cada instrumento fueron conducidos por un ducto flexible “Conduit Poliflex” (Figura 31), con el objetivo de protegerlos de las condiciones de la obra y principalmente del lanzado de concreto.

7.3.1 Colocación de instrumentos en la bóveda

Para determinar las deformaciones que sufre el revestimiento de concreto del túnel se recurrió a pequeños deformímetros eléctricos o strain-gauges, descritos en el apartado 6.3, que se ahogaron directamente en el concreto. Para la instalación de estos deformímetros se diseñó un soporte (tipo araña) elaborado con placa y varilla de acero de $\frac{1}{4}$ " como se muestra en la Figura 32, el cual fue de fácil anclaje al terreno.

En la Figura 33 se observa el detalle de la fijación del deformímetro en el soporte en la bóveda. En la clave se realizó un arreglo diferente colocando tres deformímetros dentro del revestimiento como se muestra en la Figura 34, con el fin de conocer cómo se deforma éste a diferentes profundidades. El procedimiento de instalación se muestra en la Tabla 22.

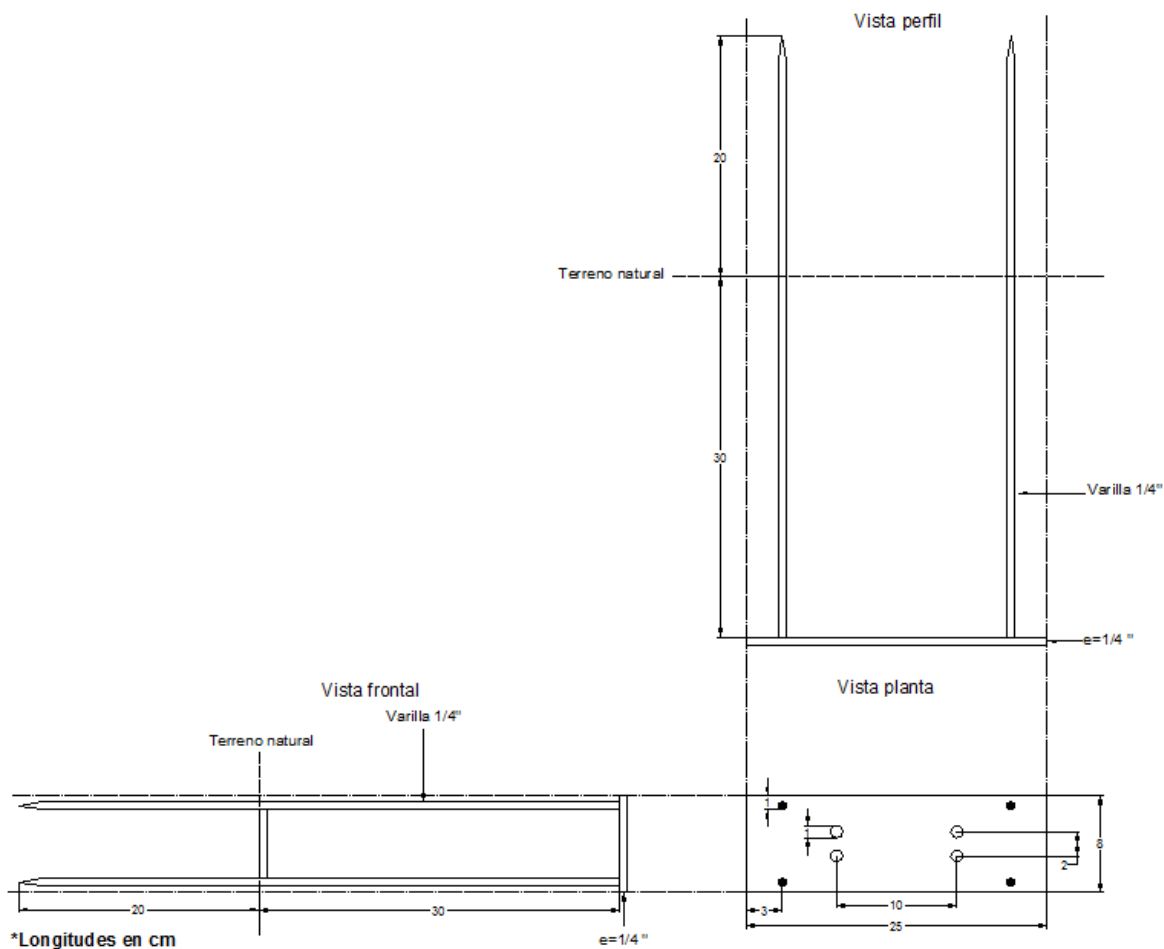


Figura 32. Diseño de soporte en acero para instalación de deformímetros

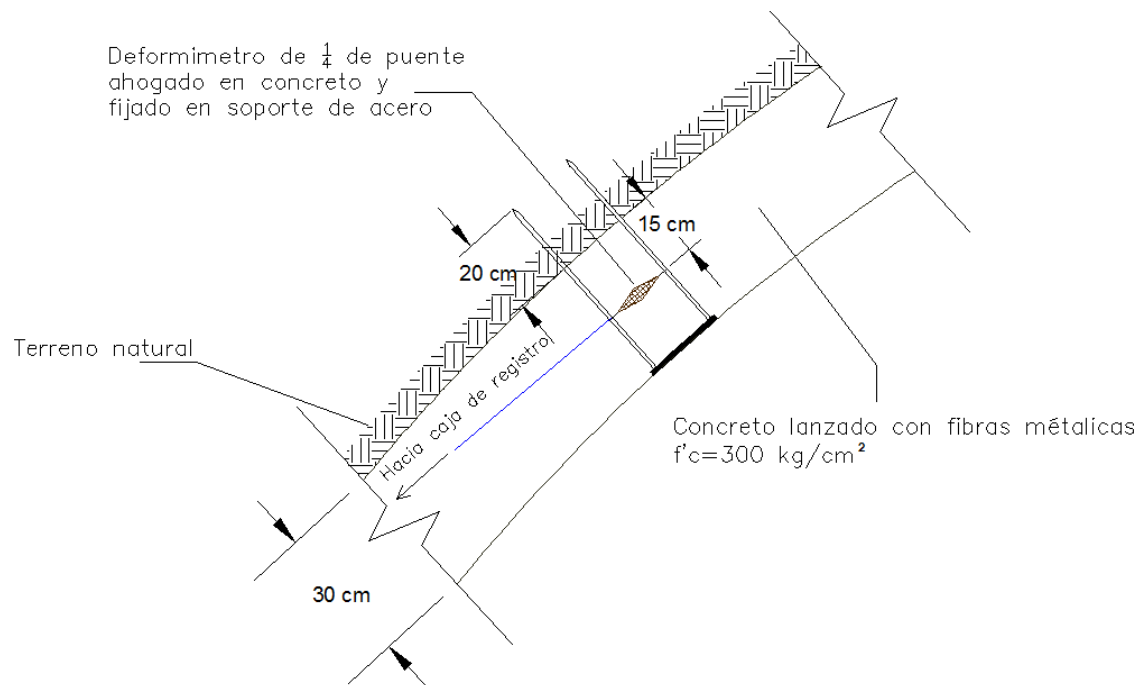


Figura 33. Detalle de fijación de deformímetros en la bóveda

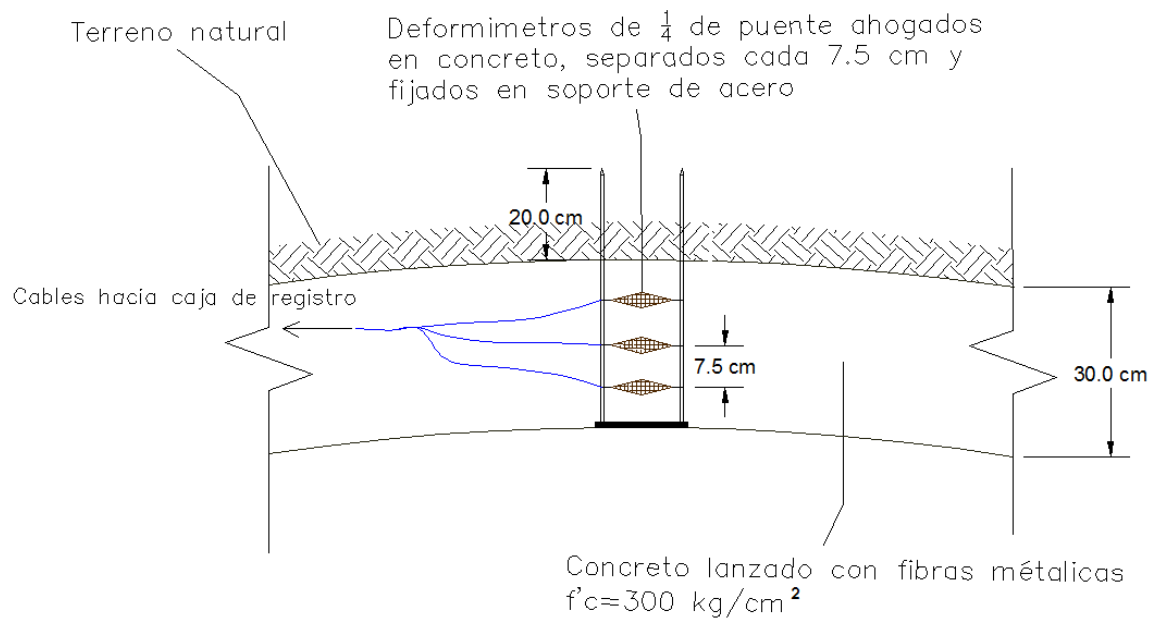


Figura 34. Detalle de fijación de deformímetros en la clave

Tabla 22. Procedimiento de instalación de los deformímetros eléctricos de 1/4 de puente en el revestimiento de concreto

Fijación de los deformímetros eléctricos en el soporte, con alambre dulce y zinchos, permitiendo libre deformación.



Deformímetro colocado en soporte, listo para ser instalado.



Fijación en el soporte de los deformímetros SGV-4A, SGV-4B y SGV-4C (ver Figura 30) que fueron instalados en la clave del túnel con el fin de conocer la deformación en diferentes posiciones dentro del revestimiento.



Deformímetros SGV-4A, SGV-4B y SGV-4C colocados en el soporte, listos para ser instalados.



Ubicación de los puntos de instalación con ayuda del equipo topográfico.



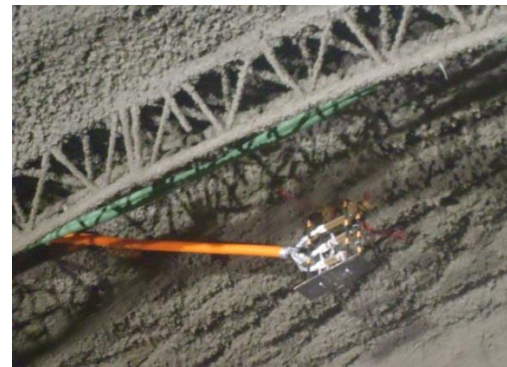
Instalación del soporte, con el deformímetro fijado, hincándolo 20 cm en el suelo (arenas pumíticas y tobas volcánicas). Se tuvo precaución en la correcta orientación del deformímetro para que midiera solamente la deformación tangencial.



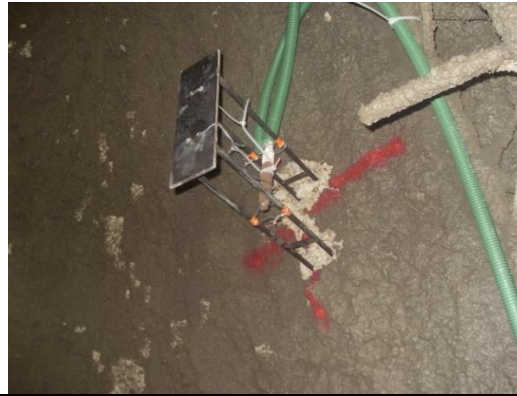
Conducción de los cables por la bóveda para dirigirlos a la posición final de toma de lecturas.



Deformímetros SGV-4A, SGV-4B y SGV-4C (ver Figura 30) instalados en la clave del túnel.



Deformímetro SGV-6 (ver Figura 30) instalado en la bóveda.



Registro de lecturas de deformación iniciales previo al lanzamiento del concreto.



Lanzado de concreto ahogando los dispositivos.



Toma de lecturas de deformación después del lanzamiento y durante los días siguientes.

Constante supervisión de cables y funcionamiento de dispositivos.



7.3.2 Colocación de instrumentos en la cimentación

Siguiendo el proceso constructivo del túnel, después de 42 días de la instrumentación de la bóveda del túnel, se realizó la excavación de la cimentación corrida en la sección instrumentada; el 30 de octubre de 2012 se realizó la excavación para la zapata derecha y a los dos días siguientes para la izquierda.

En la Tabla 23 se muestra el procedimiento llevado a cabo para la instrumentación de la cimentación corrida del túnel.

Tabla 23. Procedimiento de instalación de los instrumentos en la cimentación

Excavación para construcción de zapata derecha.



Registro de lecturas de deformación de los dispositivos previamente instalados en el revestimiento del túnel mientras se realiza la excavación de la zapata derecha.



Colocación del acero de refuerzo de la zapata derecha.



Instalación de la celda de presión CPVW-3 para quedar en contacto entre el suelo y el concreto de la zapata derecha en la posición que se indica en la Figura 30.

Antes de culminar el armado de la sección se ubicó el punto de instalación y se realizó una compactación manual y nivelación del suelo (toba volcánica).



Para fijar la celda de presión al suelo, se fijaron sus cuatro vértices ("orejas") con clavos, también se emplearon dos varillas de acero en forma de grapa para asegurar el vástago.

La celda fue ubicada de forma horizontal para medir esfuerzo vertical.

Es importante notar que el armado no estaba en contacto con la celda sino 5 cm sobre ésta.



Instalación del deformímetro eléctrico SGV-8 en la zapata derecha, en posición vertical, sobre la línea de acción de la celda de presión como se indica en la Figura 30.



Posición final del deformímetro eléctrico y celda de presión de cuerda vibrante en el espacio correspondiente a la zapata derecha.

Después de la instalación de los dispositivos se procedió a tomar las lecturas iniciales y terminar el armado de la cimentación.



Lanzado de concreto en la sección correspondiente a la zapata corrida derecha.



Registro de lecturas de deformación y presión de los instrumentos ya instalados durante el lanzamiento de concreto.



Excavación para construcción de zapata izquierda e inicio del procedimiento de armado.



Instalación de la celda de presión CPVW-1 (ver Figura 30) para quedar en contacto entre el suelo y el concreto de la zapata izquierda.



Posición final del deformímetro eléctrico SGV-10 y celda de presión de cuerda vibrante CPVW-1 en el espacio correspondiente a la zapata izquierda.

El procedimiento de instalación fue el mismo que el descrito anteriormente para los instrumentos de la zapata derecha.



Después de la instalación de los dispositivos se procedió a tomar las lecturas iniciales y terminar el armado de la cimentación



Lanzado de concreto de la zapata izquierda.



Para cada procedimiento de instrumentación se tuvo la precaución de tomar cilindros de concreto para posteriormente obtener el módulo elástico.



8. RESULTADOS

Como se mencionó en el capítulo 1, el principal objetivo de este trabajo estuvo enfocado al procedimiento y justificación de la instrumentación geotécnica y no al análisis de resultados. Actualmente el Instituto de Ingeniería de la UNAM se encuentra procesando y analizando detalladamente los resultados obtenidos; sin embargo, a continuación se presentan algunos resultados parciales obtenidos a corto plazo con los deformímetros localizados en la clave.

En la Figura 35, se aprecia claramente la magnitud y tipo de deformación tangencial presentada en la clave del túnel. Se observa que durante los primeros días se presenta un cambio positivo abrupto de deformación, a primera vista se podría pensar que el revestimiento del túnel está trabajando a sólo compresión, pero esta lectura puede estar afectada por los cambios de temperatura que sufre el concreto durante el fraguado, a partir del día 10 se observa claramente el comportamiento de los deformímetros, algunos sometidos a tensión (cambios de deformación negativa) y otros a compresión (cambios de deformación positiva).

Después de que se presenta una tendencia definida, se observa que el deformímetro ubicado en la parte superior presenta una deformación positiva (esfuerzo a compresión) del orden de $125 \mu\epsilon$, el ubicado en el medio presenta una deformación positiva (esfuerzo a compresión) del orden de $50 \mu\epsilon$ y el ubicado en la parte inferior presenta una deformación negativa (esfuerzo a tensión) del orden de $-40 \mu\epsilon$; esto nos indica que existe una distribución de esfuerzos transversal donde se presenta un eje neutro dividiendo las zonas sometidas a tensión y a compresión (Figura 36). En la Figura 36.b se representa una posible deformación de la clave del túnel de acuerdo al tipo de deformación obtenida con los instrumentos.

Con los datos obtenidos con los deformímetros y conociendo el módulo de elasticidad del concreto usado en el lanzado, es posible conocer los esfuerzos tangenciales en los puntos instrumentados. Además, mediante un análisis más exhaustivo es posible determinar la distribución de esfuerzos en la sección de la clave, la sección deformada del túnel y los desplazamientos finales, y comparar esta información con la obtenida en el diseño y en modelos numéricos.

Desafortunadamente se perdieron dos instrumentos, la celda de presión CPVW-3 y el deformímetro SGV-8, debido al corte accidental de sus cables y la imposibilidad de soldarlos. Por otro lado, se descartaron los datos obtenidos con el instrumento SGV-6 debido a que resultaron ser considerablemente alejados de la tendencia.

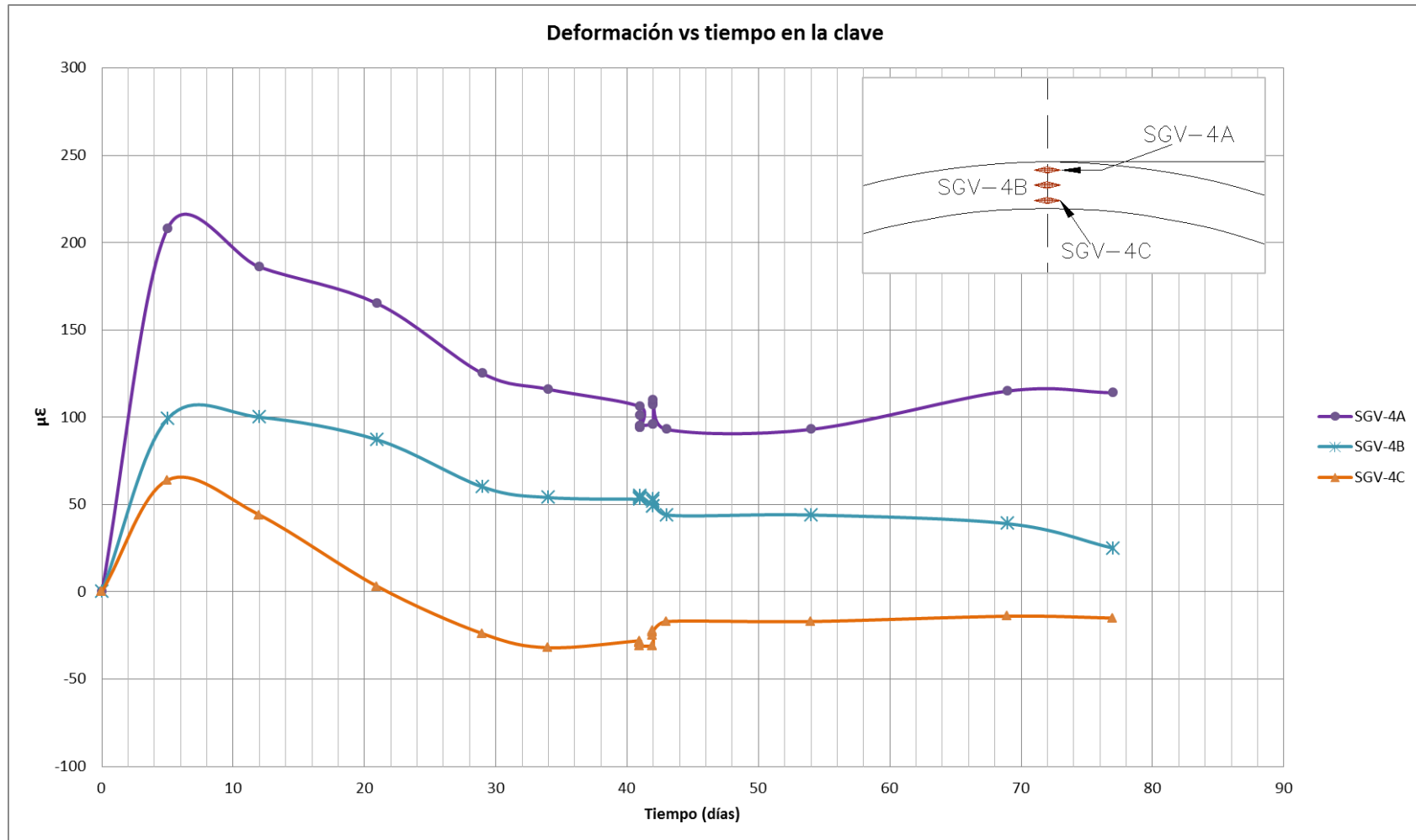
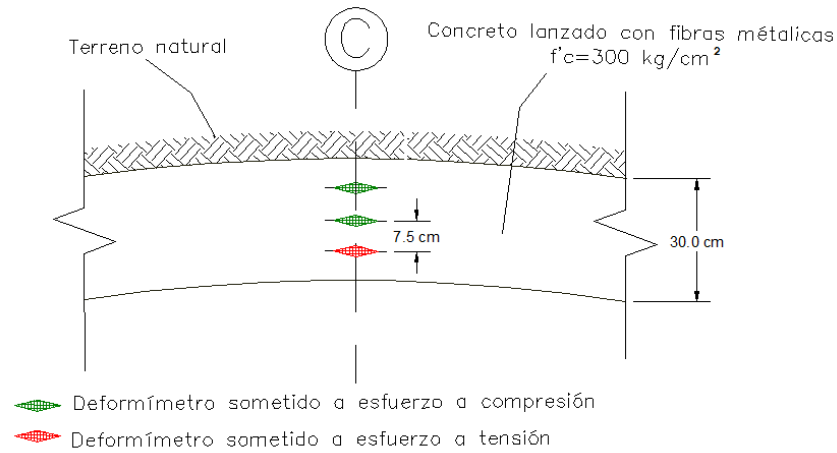
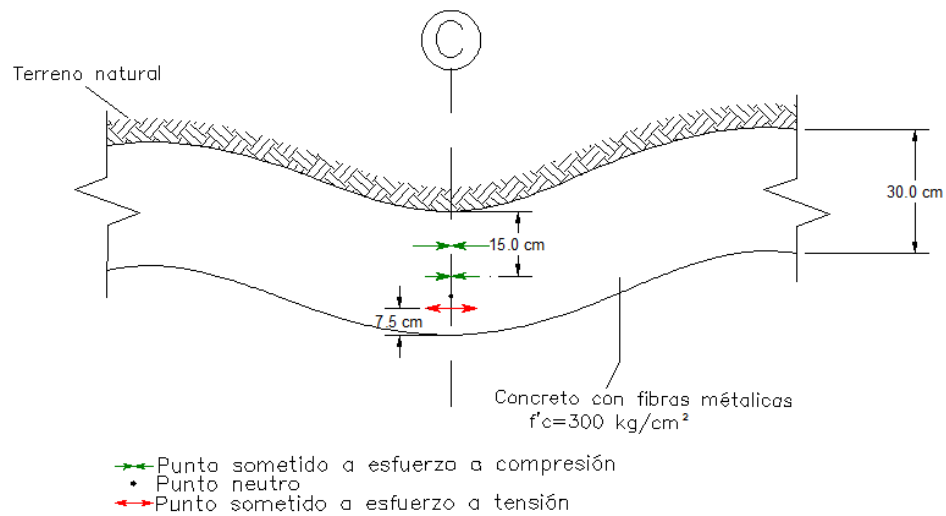


Figura 35. Deformación horizontal en la clave a corto plazo vs tiempo

a)



b)



**Figura 36. a) Ubicación de deformímetros en la clave del túnel
 b) Representación de la posible deformación de la clave, según el tipo de información registrada**

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La instrumentación geotécnica de un túnel requiere de una planeación cuidadosa siempre enfocada a dar respuestas; cada instrumento instalado debe ser seleccionado y ubicado correctamente para responder una pregunta específica. Es importante conocer el proyecto de diseño con suficiente anticipación para seleccionar adecuadamente los instrumentos y su capacidad. Cualquier error en la planeación o instalación de los instrumentos conducirá a falsa información y pérdida de dinero.
- En este documento se describió el procedimiento de la instrumentación geotécnica del revestimiento de concreto de una sección de un túnel construido en rocas blandas, empleando para ello deformímetros eléctricos y celdas de presión. Se describió cada uno de los instrumentos empleados, haciendo énfasis en su funcionamiento, objetivo y ubicación, se detalló el procedimiento de instalación de los instrumentos en campo y su calibración correspondiente en laboratorio, finalmente se presentó un bosquejo de los resultados a corto plazo.
- En un proyecto de instrumentación geotécnico, donde las lecturas se realizan manualmente, además de realizar una detallada planeación e instalación de equipos, es importante hacer una programación de registro de lecturas cada determinado intervalo de tiempo y tan pronto como sea posible después de la ocurrencia de eventos críticos como sismos o movimientos de tierra. Es indispensable realizar el análisis de resultados y la elaboración de artículos que respalden o contradigan las hipótesis de diseño para mejorar las técnicas futuras de diseño y construcción.
- Algunos de los resultados parciales mostraron que en la clave del túnel se presentan algunas zonas sujetas a esfuerzos de compresión y otras a esfuerzos de tensión; esto indica que el nivel de esfuerzos no es constante en cada sección sino que presenta una distribución (tal como ocurre en una viga) donde se presentaría un eje neutro, en algunas secciones, dividiendo las zonas sometidas a tensión y a compresión.
- Una vez realizado un análisis más a fondo de los resultados obtenidos en la instrumentación geotécnica, se podrá determinar el estado de esfuerzos y deformación tangencial del revestimiento del túnel y la transferencia de carga de la zapata corrida al suelo, bajo condiciones estáticas a corto y largo plazo, y compararlos con los parámetros empleados en el diseño y resultados de modelos numéricos.

RECOMENDACIONES

- Es muy importante realizar visitas frecuentes a la obra en el periodo de instalación de los dispositivos, esto con el fin no solo de tomar lecturas durante la construcción, sino de revisar que los instrumentos se encuentren en buen un estado y asegurar una correcta posición de los cables para evitar que sean cortados.
- Es importante analizar la información de la calibración de los equipos antes de su instalación en campo.

- Se recomienda tomar la lectura inicial en campo mínimo tres veces por cada instrumento, ya que ésta es muy importante en la determinación del resultado final tanto del esfuerzo como de deformación.
- El instrumentador geotécnico debe ser una persona confiable, paciente y perseverante, con amplios conocimientos en geotecnia y con habilidades básicas en ingeniería mecánica y eléctrica. Debe prestar atención a los detalles y tener un alto grado de motivación hacia la investigación.

10. BIBLIOGRAFÍA

Dunnicliff, J. (1988), *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*, John Wiley.

GDF (2004), *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones*, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México

Mendoza, M. J. (2004), “Comportamiento de una cimentación con pilotes de fricción en la ciudad de México, bajo carga estática y sísmica”, Tesis Doctoral, UNAM, México, D. F.

Mendoza, M. J, Ibarra, E, Rufiar, M y Mendoza, S. A. (2012), “Especificaciones para la instrumentación sismo-geotécnica de la cimentación del apoyo A-281. Autopista Urbana Sur”. Informe del Instituto de Ingeniería elaborado para Prefabricados y Transportes, S.A. de C.V. México, D. F.

Mendoza, S. A. (2011), “Integración de instrumentos sismo-geotécnicos a una cimentación a base de zapata con pilas coladas in situ”, Tesina Especialidad, UNAM, México, D. F.

Schmitter, J. J. (2012), “Instrumentación y mediciones de comportamiento en túneles carreteros” Presentación en curso: Túneles carreteros, diseño, construcción y supervisión. Oaxaca de Juarez, México.

Tamez, E, Rangel, J.L y Holguín, E. (1997), *Diseño Geotécnico de Túneles*, TGC Geotecnia SA de CV, México, D.F.

TGC (2011), “Informe de proyecto ejecutivo Vía Rápida Poetas Túnel 4 - La Loma, Proy. No. 258-G10”, TGC Geotecnia SA de CV, México, D.F.