

Prueba de carga en un modelo a escala real de un túnel de dovelas con revestimiento secundario

Oscar S. Aguilar Pérez, Lizbeth Mendoza R., Elías A. Tavera G.
Ingenieros Civiles Asociados, S.A., México
Yolanda Alberto H. y Jesús Morelos R.
Ingenieros Civiles Asociados, S.A., México



RESUMEN

Para conocer el comportamiento geotécnico y estructural de un túnel de dovelas con revestimiento secundario, se realizó un modelo a escala real que permitiera observar el cambio de rigidez del conjunto dovelas con revestimiento secundario y la interfaz que se genera entre los dos revestimientos. El modelo consta de dos medios anillos y un anillo de dovelas completo para simular la participación de los anillos adyacentes. Se instrumentaron los anillos de dovelas, la interfaz y el revestimiento secundario, así como el perímetro exterior, para medir las deformaciones y obtener esfuerzos. Se varió la relación de cargas horizontales y verticales, para simular diferentes condiciones de suelo. Como parte de los resultados se muestran las gráficas de esfuerzo-deformación obtenidas para cada ciclo de carga donde se observa el cambio de rigidez con el revestimiento definitivo. Se presentan conclusiones relevantes sobre el comportamiento de las dovelas y la contribución del revestimiento secundario.

ABSTRACT:

Seeking to understand the geotechnical and structural behavior of a tunnel with secondary lining, a real scale model was conducted. The load test aimed to observe the stiffness change in the lining array and the interface between them. The model comprises two half rings and a whole ring to simulate the adjacent rings. The primary lining, the secondary lining and the interface were instrumented to measure deformations and estimate stresses. The horizontal and vertical load ratio was varied to replicate several soil conditions. As part of the results, stress-strain curves obtained for each load cycle are exposed and the stiffness variation with the secondary lining is observed. Relevant conclusions regarding precast segmental lining performance and permanent lining contribution are presented herein.

1 ANTECEDENTES

Existen tres objetivos a considerar para el análisis de un túnel con escudo de presión balanceada (EPB): a) la estabilidad del frente, b) las cargas en el revestimiento y c) los asentamientos en la superficie.

La ingeniería de túneles ha tenido un gran avance en las últimas décadas, desde los métodos empíricos hasta sofisticados modelos numéricos en tercera dimensión. Sin embargo, para entender patrones de deformación y mecanismos de falla es muy útil contar con modelos físicos. Para ello, se han desarrollado diversos modelos a escala en laboratorios que permiten, en condiciones controladas, estudiar el complejo proceso de la construcción de un túnel.

Se han realizado pruebas en centrífuga con tubos rígidos y frentes flexibles para evaluar los esfuerzos transferidos al túnel (e.g. Kamata y Masimo, 2003), bolsas de aire presurizado para estudiar la estabilidad del frente y los asentamientos inducidos en superficie (e.g., Lee y Yoo, 2006), tuneladoras miniatura para simular el proceso completo de construcción (Nomoto et al., 1999), pruebas a escala real para estudiar el comportamiento de las juntas de anillos de dovelas (e.g. Schreyer y J., Winselmann, D., 2000), pruebas de cortante para revisar el comportamiento del acero de refuerzo en las juntas (Lu, L. et. al. 2006) y algunos otros experimentos. Existen algunas limitaciones en las pruebas realizadas en centrífuga como la inconsistencia de los factores de escala de diversas magnitudes como la longitud o la fuerza de inercia, además, las fuerzas

radiales inducidas no son las mismas a lo largo de la prueba (Taylor, 1995).

Dada la complejidad de la extrapolación de resultados en modelos a escala y buscando reproducir las condiciones reales de carga y deformación que experimenta el revestimiento de un túnel, se realizó un modelo a escala real que permitiera definir el comportamiento de dichas estructuras.

También se decidió hacer la prueba, ya que en las NTC del RCDF (2004) no se presenta un apartado de diseño de túneles.

2 MODELO A ESCALA REAL

2.1 Objetivo de la prueba

El objeto de este experimento es determinar mediante una prueba de carga a escala real de un anillo de dovelas completo y dos medios anillos de dovelas, el comportamiento estructural de un túnel diseñado con anillos de dovelas y la magnitud del esfuerzo cortante que se presenta entre el revestimiento primario y secundario al estar sometidos a cargas radiales que simulan las presiones del suelo y la presión de poro, con la finalidad de estimar el número de conectores de cortante en la interfaz de ambos revestimientos.

2.2 Características del modelo

Los anillos de dovelas no trabajan de forma independiente, sino que cada anillo está acoplado, bien

por fricción y/o por sistemas de acoplamiento mecánicos, con los anillos colindantes. Esto introduce en el anillo una rigidez adicional. Esta rigidez adicional aportada por el acoplamiento con los anillos consecutivos debe considerarse, pues supone un aumento de los momentos flectores en el anillo. El no considerar el acoplamiento entre anillos estaría del lado de la inseguridad desde el punto de vista del cálculo de elementos mecánicos.

Debido a lo anterior, para la prueba se usó un anillo de dovelas (con diámetro interior 9.11 m y exterior 9.91 m), el cual está en medio de dos medios anillos, para representar la rigidez que le aportan los anillos contiguos (0). Las dovelas tienen un espesor de 40 cm y 150 cm de ancho.

Para la prueba se siguió un proceso que se describe a continuación:

- Se construyó una losa de cimentación y un muro de reacción, siguiendo el reglamento ACI-318 (2008), el cual soporta las cargas de los gatos hidráulicos con los que se aplicó la carga.
- Sobre la losa de cimentación de concreto reforzado se ubicaron 18 soportes de neopreno cubiertos con teflón y placas de acero inoxidable para reducir la fricción de los anillos con la losa y garantizar una deformación libre de los anillos de dovelas debida a las cargas.
- Una vez colocadas las placas de apoyo se inició el montaje de los anillos. Para representar las condiciones reales del túnel, a los anillos se les colocaron las bandas de estanqueidad, las placas de contacto y la tornillería.
- Se colocaron 12 yugos para aplicar una presión en los anillos de dovelas simulando el empuje del escudo (0). Para los yugos se usaron cables de presfuerzo. Lo anterior tiene la finalidad de simular la compresión remanente que genera el sistema EPB sobre los anillos al avanzar durante el proceso de excavación.
- Se colocó el sistema de aplicación de cargas a base de gatos de émbolo hueco, barras de presfuerzo y distribuidores de carga, que sirvieron para distribuir la carga (0 y 0).

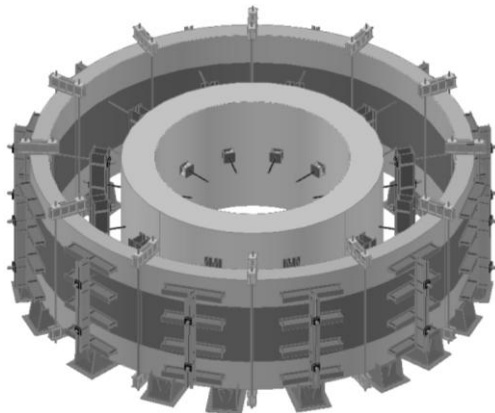


Figura 1 Isométrico de anillo completo y dos medios anillos.

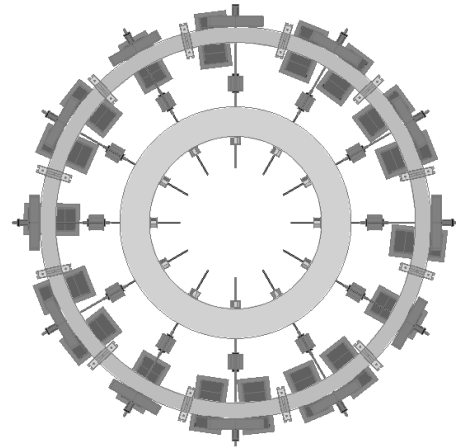


Figura 2 Ubicación de cargas aplicadas de acuerdo con la ubicación de tensores.

Se realizaron cuatro etapas de aplicación de carga únicamente al revestimiento formado por los anillos de dovelas, los cuales se describen en la sección de cargas. Posteriormente se coló el revestimiento secundario, mostrado en la 0 con un espesor de 20 cm y la cubeta con una altura de 1.1 m en el punto más bajo del túnel.

A continuación se realizaron cinco etapas más de cargas, que se explican en el apartado de cargas.

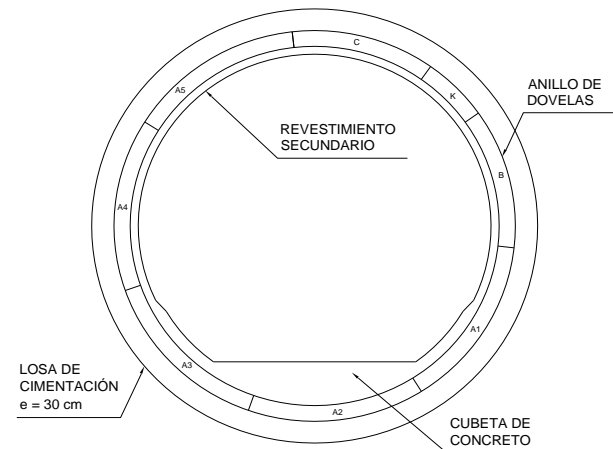


Figura 3 Anillo de dovelas, revestimiento secundario y cubeta.

2.3 Cargas

El diseño del revestimiento del túnel depende principalmente de las condiciones del suelo. En la Ciudad de México, el suelo se caracteriza por sus altos contenidos de agua y altos índices de plasticidad, los asentamientos que sufre se deben principalmente a los procesos de consolidación primaria y compresión secundaria. Debido a ello, el diseño del túnel debe considerar las cargas por consolidación para su estado último de servicio.

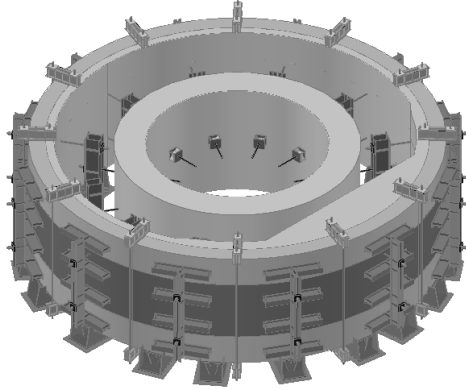


Figura 4 Anillo de dovelas, cubeta y revestimiento secundario con estructuras de aplicación de carga.

Debido a que en México no se tiene ningún precedente de una prueba con estas características y posiblemente a nivel mundial (usando un revestimiento secundario que contribuya estructuralmente con el túnel), se decidió realizar primero una serie de pruebas de calibración e interpretación de los datos obtenidos a partir de la instrumentación instalada tanto en las dovelas prefabricadas como en el segundo revestimiento. Para el experimento se usó un porcentaje de las cargas de servicio y de diseño que se consideraron para el análisis y diseño del túnel.

Para la fase de calibración se consideró que el revestimiento secundario se colocaría 6 meses después ($t = 6$ meses) de la colocación de dovelas ($t = 0$ años). A partir de análisis basados en la metodología del Elemento Finito para el modelado del suelo, se encontró que la diferencia de magnitudes entre las cargas de estos dos estados era muy pequeña, por lo que en las etapas de carga se decidió omitir las relacionadas con $t = 0$ años, y pasar directamente a las relacionadas de $t = 6$ meses (denominadas en este documento como corto plazo, $t=CP$) En la 0 y 0 se presentan los estados de carga mencionados. Las cargas de servicio relacionadas con el abatimiento de la presión de poro del 50% (denominadas como largo plazo $t = LP$) se muestran en la 0.

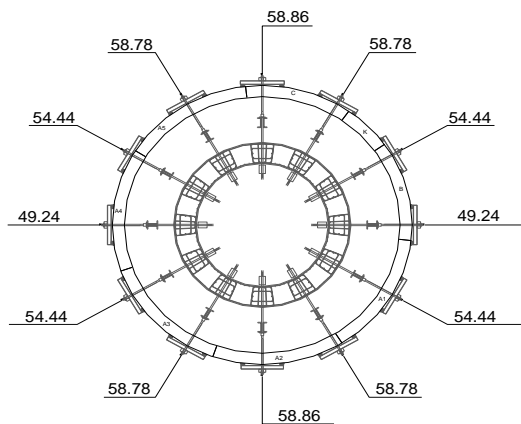


Figura 5 Estado de cargas de servicio relacionado con $t = 0$ años (unidades t).

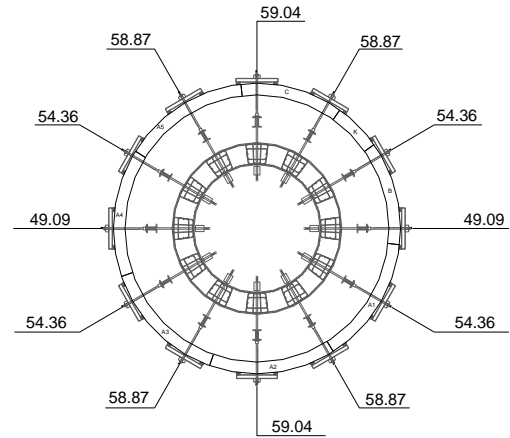


Figura 6 Estado de cargas de servicio relacionado con $t = 6$ meses (unidades t)

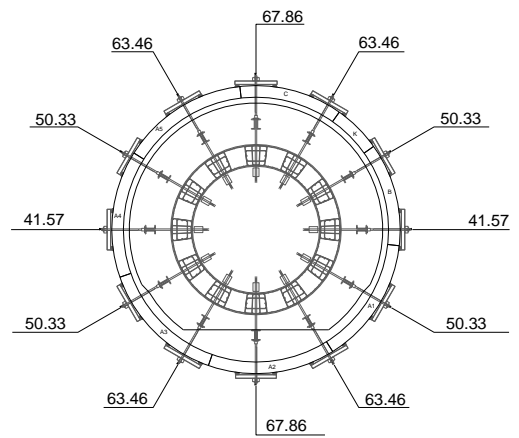


Figura 7 Estado de cargas de servicio relacionado con $t = LP$ (unidades t).

Se procede a describir las etapas de carga que se emplearon para la prueba.

Etapas I y II (de ajuste): consisten en un ciclo de cargas y descargas para hacer un reacomodo de las dovelas, esto con la finalidad de evitar concentraciones de esfuerzos en alguna parte del anillo. Para estas etapas se realizaron seis incrementos de carga de cuatro toneladas por cada gato. Posteriormente se realizaron seis decrementos en la misma proporción hasta llegar a cero toneladas. Los incrementos y decrementos de carga se realizaron simultánea y uniformemente.

Etapas III: consiste en la aplicación del estado de cargas de servicio de $t = CP$. Esta etapa se realizó en seis incrementos de carga, manteniendo constante la relación de $P_r/P_v=0.83$, es decir, los incrementos no serán uniformes en los tensores.

Etapas IV: se aplica el 85% de las cargas de diseño de $t = CP$, en nueve incrementos manteniendo constante la relación $P_r/P_v=0.83$. Posteriormente se realizan tres decrementos hasta llegar a la configuración de cargas de servicio de $t = CP$.

En este punto se realizó el colado de la cubeta y el revestimiento secundario y se colocó la instrumentación restante. Aquí es importante mencionar que no se

colocaron elementos de unión (tales como pernos de cortante) entre los dos revestimientos. Las dovelas no se escarificaron, con la finalidad de observar el comportamiento de la sección compuesta entre dos elementos curvos.

Una vez que el concreto del revestimiento secundario y cubeta alcanzó la resistencia de diseño se descimbró y se realizó la siguiente etapa de carga.

Etapa V: se aplicaron cargas para llegar nuevamente al 85% de las cargas de diseño de $t = CP$ (en cuatro incrementos) y posteriormente realizar cuatro decrementos hasta regresar al estado de carga de $t = CP$ de servicio, manteniendo constante la relación $P_H/P_V=0.83$. La finalidad de esta etapa es comprobar si el revestimiento secundario le aporta mayor rigidez al anillo de dovelas, y en qué porcentaje.

Etapa VI: se pasa del estado de cargas de $t = CP$ al de $t = LP$ (ambos casos para cargas de servicio). Se realizan cuatro incrementos de carga simultáneos pero no uniforme, es decir en el mismo número de incrementos se llega a una configuración asimétrica, manteniendo constante la relación $P_H/P_V=0.61$ (en este

caso, la relación cambia ya que se consideran los efectos de consolidación a largo plazo).

Etapa VII: consiste en incrementar las cargas de servicio de $t = LP$ a las de diseño de $t = LP$, manteniendo constante la relación $P_H/P_V=0.61$. Para esta etapa se considera una descarga para volver al estado de cargas de $t = CP$ de servicio.

Posteriormente se realizaron dos etapas más, las cuales son similares a la Etapa VII, con la diferencia que la relación P_H/P_V se reduce, ya que representa un estado de cargas más desfavorable para el túnel.

Etapa VIII: Se hacen incrementos hasta llegar al estado de cargas relacionado con $t = LP$ de diseño, pero con la relación $P_H/P_V=0.50$; después se hacen decrementos hasta llegar al estado de cargas de $t = CP$ de servicio.

Etapa IX: se incrementa la carga hasta llegar al estado de cargas relacionado con $t = LP$ de diseño con la relación $P_H/P_V=0.40$.

En la 0 se presenta esquemáticamente el proceso de etapas de carga que se implementó en la prueba.

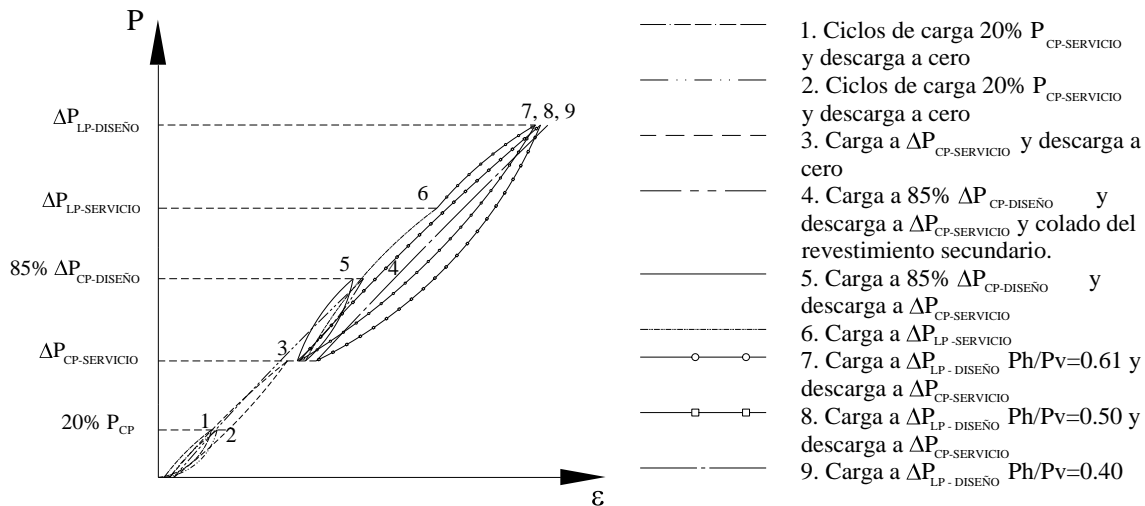


Figura 8 Esquema del proceso de carga y descarga del anillo de prueba.

2.4 Revestimiento secundario

En México, cuando se habla de un túnel de dovelas, es común pensar en que este contará con revestimiento secundario y más aún si se encuentra en un suelo con alto contenido de agua.

De acuerdo a varios análisis realizados y a las experiencias vividas, se percibe que el túnel de dovelas tiene un mejor comportamiento estructural, ya que al tener juntas tanto en cada anillo como a lo largo de la longitud, tiene menor rigidez y por lo tanto la libertad de deformarse junto con el terreno, induciendo a elementos mecánicos menores que si se considerara la rigidez total (longitudinalmente) del túnel.

En el caso del experimento aquí descrito, el revestimiento secundario empleado tiene un espesor de 20 cm y una cubeta con altura de 1.1 m en la parte más

baja del túnel. La 0 muestra la configuración final del modelo a escala real.



Figura 9. Modelo a escala real.

2.5 Instrumentación

Se instalaron diversos dispositivos de medición para verificar el comportamiento del anillo de dovelas, el revestimiento definitivo e interacción entre ambos; antes, durante y después de cada una de las etapas de carga aplicadas.

Los dispositivos utilizados de tecnología de cuerda vibrante se emplearon para medir deformaciones en diversas zonas de la estructura del anillo, para que con base en éstas se pudieran determinar los esfuerzos a tensión y compresión que se presentaron durante la prueba. El registro de datos se realizó con ayuda de dispositivos electrónicos para almacenamiento, conexión, automatización y un programa para su manipulación, llamados comúnmente como “dataloggers” y “multiplexores”.

Los aparatos de tipo mecánico se utilizaron para medir deformaciones y distancias de separación entre juntas, los registros de los cambios de mediciones sólo se hicieron antes y después de la aplicación de las cargas, registrando el número de dispositivo, etapa de carga, fecha, hora, ubicación y medición.

Se definieron cinco zonas instrumentadas para identificar las diferentes variables medidas:

1. Clave, Cubeta y Hastiales. En esta zona con ayuda de deformímetros de cuerda vibrante para concreto conocidos como “strain gauge”, se determinaron deformaciones del concreto en el lecho interior y exterior del anillo de dovelas y revestimiento definitivo, además se determinaron deformaciones del acero transversal de revestimiento secundario con deformímetros para acero conocidos como “rebar strain meters”.
2. Zonas de máximos cortantes. Se determinaron cuatro zonas de máximos cortantes en las cuales con ayuda de un deformímetro con anclas dispuestas a 90 grados, las cuales se fijaron en la junta entre dovela y el revestimiento definitivo midiendo en sentido transversal, se registraron las deformaciones presentadas antes, durante y después de la aplicación de cada carga, determinando la magnitud y dirección de los deslizamientos presentados entre el anillo de dovelas y el revestimiento definitivo.
3. Juntas transversales del anillo de dovelas. Se colocaron medidores de juntas entre las dovelas del anillo; con estas reglas se registró el desplazamiento en las direcciones X, Y, y se verificaron las divergencias o convergencias entre las juntas, así como desplazamientos tangenciales entre las mismas.
4. Juntas de cara transversal entre revestimiento primario y definitivo. Se colocaron medidores de juntas de cuerda vibrante conocidos como “crackmeters”, en las zonas de clave, cubeta y hastiales registrando el desplazamiento entre el anillo de dovelas y el revestimiento definitivo, antes, durante y después de la aplicación de las cargas.
5. Deformación del perímetro exterior del anillo. Se colocaron 12 micrómetros de tipo analógico distribuidos en el perímetro externo del anillo de dovelas registrando las divergencias y

convergencias presentadas antes y después de cada período de carga.

2.6 Inspección visual

Antes del inicio de la aplicación de cargas se realizó una inspección visual observando el estado inicial del anillo para posteriormente al término de cada etapa de carga registrar la aparición de grietas en el perímetro exterior de la dovela como en el perímetro interior del revestimiento definitivo.

En la 0 se muestra la ubicación de los instrumentos y en las Figuras 11 a 14 se muestran los detalles de localización de cada instrumento en ambos revestimientos.

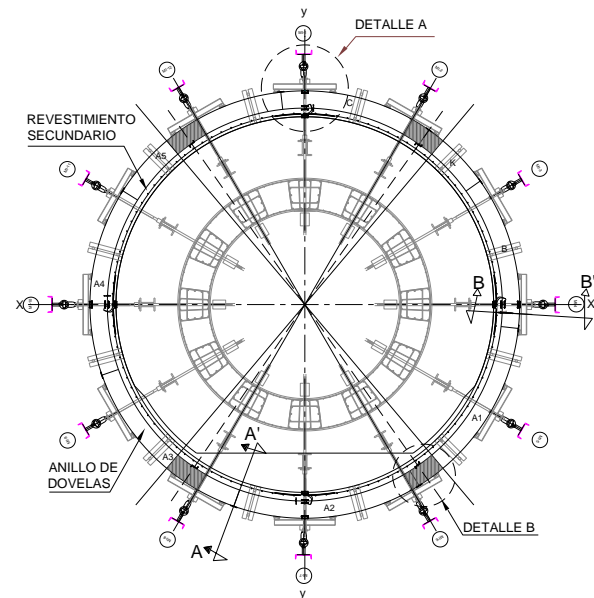


Figura 10. Planta de ubicación general de los instrumentos.

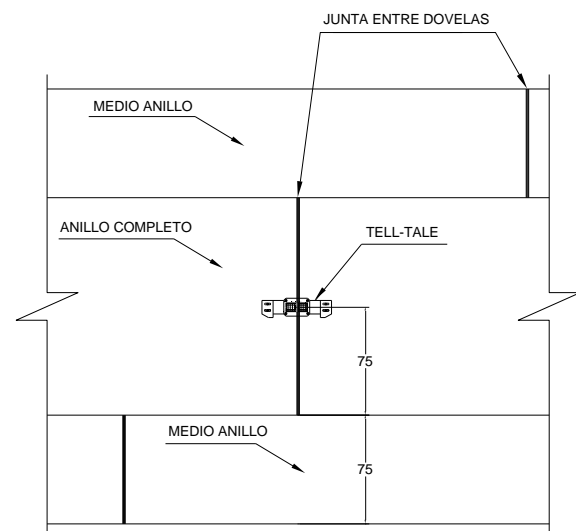


Figura 11. Corte A-A': “Tell-tale” en juntas de perímetro exterior de anillo de dovelas.

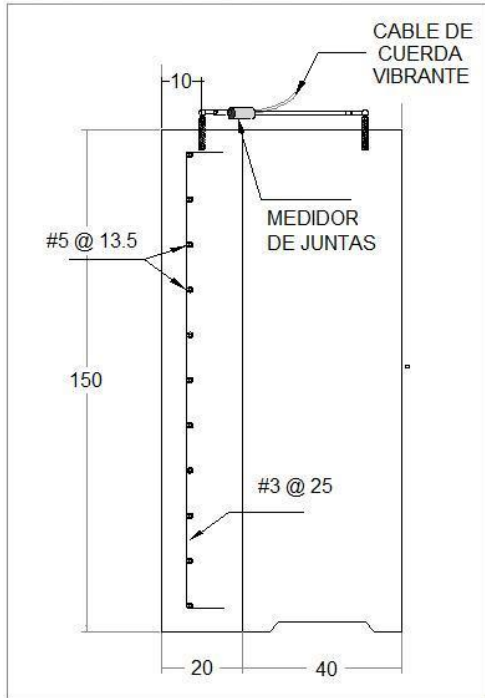


Figura 12. Corte B-B: "crackmeters" en cara transversal entre revestimiento primario y definitivo.

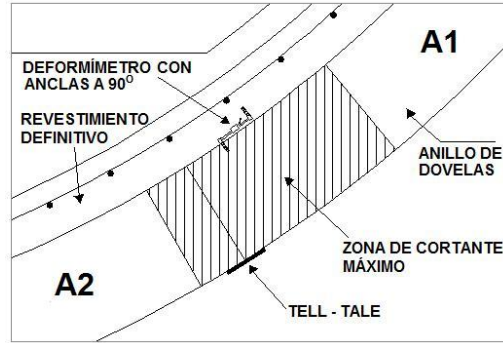


Figura 14. Detalle B: Instrumentación tipo en zonas de máximo cortante

3 RESULTADOS

Considerando la relación K , de fuerza horizontal sobre la fuerza vertical ($K=P_h/P_v$), se consideraron ocho etapas de cargas (a a h); de ellos, los primeros tres casos (a, b y c) se realizaron sobre el anillo de dovelas y los siguientes cinco (d a h) se hicieron sobre el anillo de dovelas con el revestimiento secundario.

La 0 presenta las convergencias para cada etapa de carga, con el valor de la relación K correspondiente y las cargas máximas verticales y horizontales. El signo negativo en las convergencias denota acortamiento y el signo positivo indica alargamiento.

Tabla 1 Convergencias para cada etapa de carga

	K= P_h/P_v	Carga máxima (t)		Convergencia máxima (cm)	
		P_v	P_h	Vertical	Horizontal
Dovelas	a) K= 0.83	56.10	46.92	-1.95	1.40
	b) K= 0.83	75.48	63.24	-2.34	1.68
	c) K= 0.83	59.16	48.96	-2.42	1.75
Revestimiento secundario	d) K= 0.83	75.48	62.22	-1.60	2.03
	e) K= 0.61	68.34	41.82	-1.70	2.12
	f) K= 0.50	102.00	62.22	-2.04	2.47
	g) K= 0.50	102.00	51.00	-2.30	3.03
	h) K= 0.40	102.00	40.80	-2.69	3.39

En las 0 se observa, en una gráfica radial, la deformación que presentó el anillo de dovelas para los 3 casos de carga realizados, donde la relación K no varió. En todas las etapas se puede notar un acortamiento en clave y cubeta, y extensión en los hastiales.

En la 0 se muestran los desplazamientos en el anillo con revestimiento secundario. La figura central muestra el esquema de las dovelas, el revestimiento definitivo y la cubeta que se colocaron. Aunque las deformaciones siguen la misma tendencia que las mostradas en la 0, es decir, acortamiento en clave y cubeta y extensión en los hastiales, se aprecia que en la zona de la cubeta las

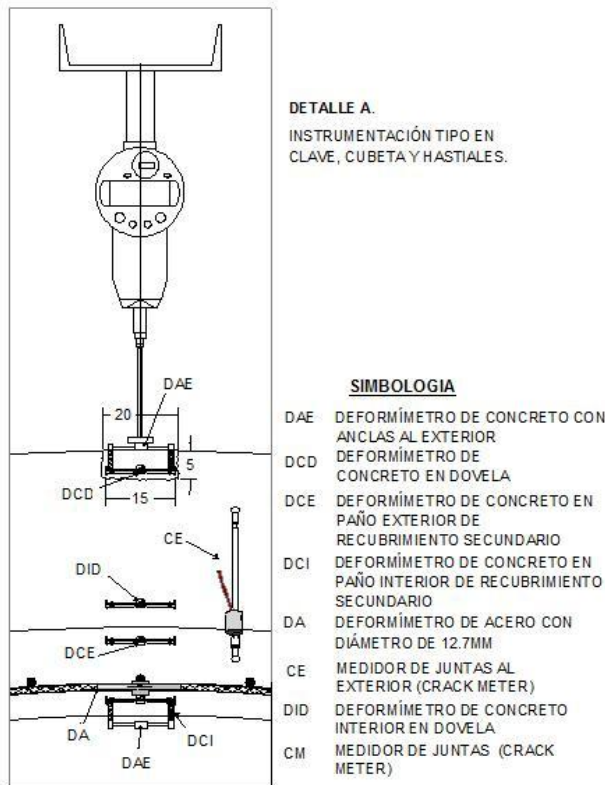


Figura 13. Detalle A: Instrumentación tipo en clave, cubeta y hastiales.

deformaciones se reducen considerablemente debido al aumento de rigidez.

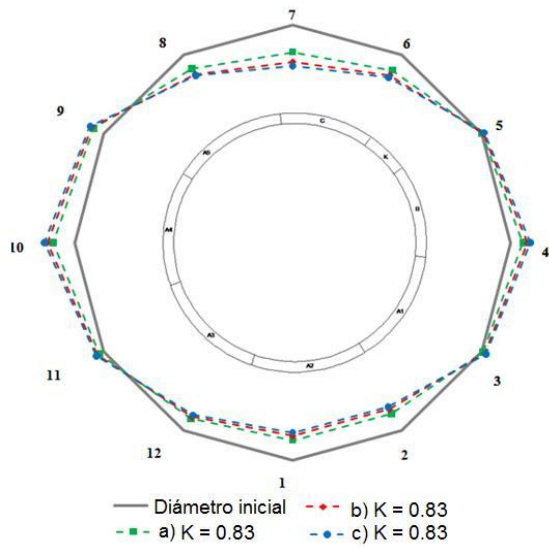


Figura 15 Desplazamientos en el anillo de dovelas

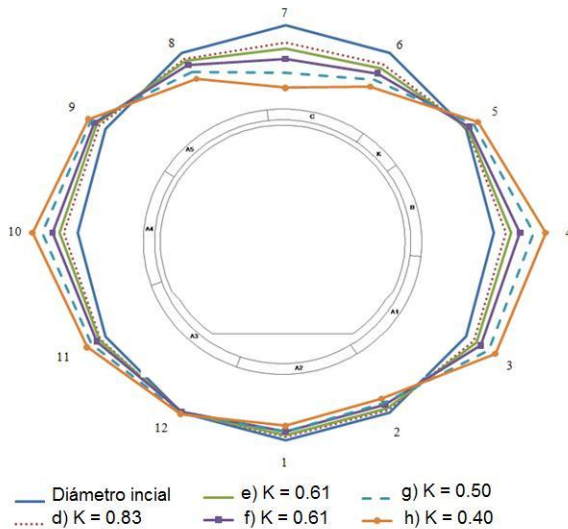


Figura 16. Desplazamientos con el revestimiento secundario

En la 0 se muestran las curvas carga deformación en los tensores ubicados en la clave y cubeta, en la parte derecha de la figura se observa la ampliación de la imagen para observar con mayor detalle el cambio en la pendiente de la curva cuando se construye el revestimiento secundario y se cuela la cubeta. El incremento de rigidez también indica la contribución del revestimiento definitivo en la curva de extrema izquierda.

Se observa, que a diferencia de las curvas medidas en clave y cubeta, donde los desplazamientos denotaban acortamiento, en los hastiales, conforme aumenta la carga, se incrementa el alargamiento y también se percibe el cambio de rigidez una vez construido el revestimiento secundario, en la curva de extrema derecha.

De las figuras anteriores, se calculó que la contribución de rigidez del revestimiento secundario fue de gran aporte, ya que para la clave y la cubeta la rigidez aumentó en un 28%, mientras que para los hastiales se acrecentó hasta un 50%. Esto se debe a que en la zona de la clave existe una junta (muy cercana al deformímetro), debido a lo cual, se tiene una mayor deformación en esta zona.

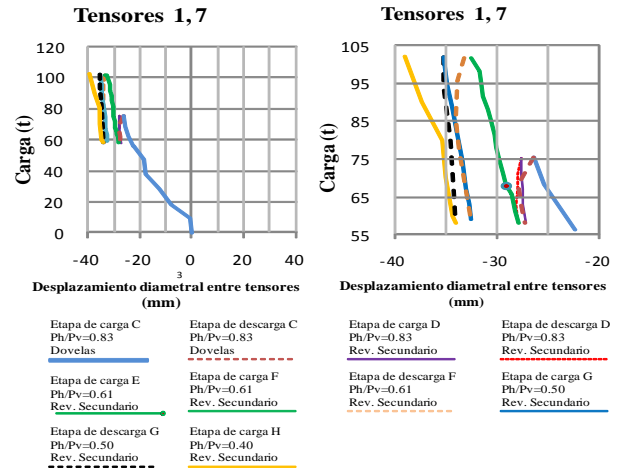


Figura 17 Curvas de carga-deformación en clave y cubeta

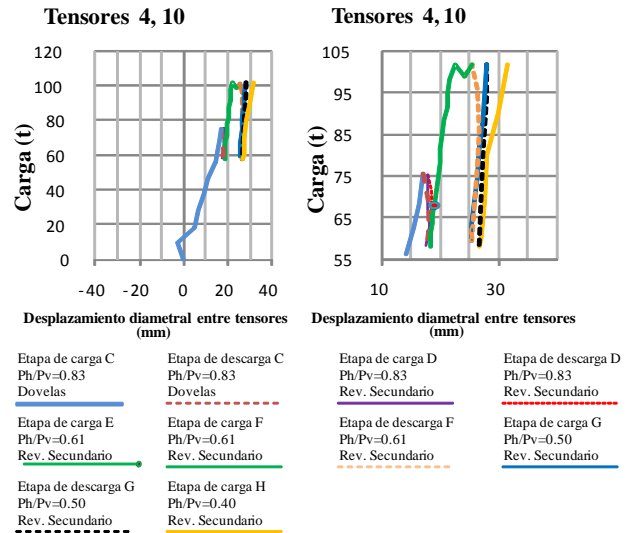


Figura 18 Curvas de carga-deformación en los hastiales

Pudo observarse con la instrumentación, que tanto en el anillo de dovelas, como en el anillo con revestimiento secundario, se tiene compresión en la parte exterior de clave y cubeta, así como en la parte interna de los hastiales. Asimismo, se produce tensión en la parte interior de clave y cubeta y en la parte externa de las paredes. Las Figuras 19 y 20 muestran este comportamiento.

De acuerdo a los recorridos visuales que se hicieron durante cada incremento de carga, no se observó la aparición de grietas entre los revestimientos primario y

secundario, por lo que a primera instancia se puede apuntar que pueden trabajar como sección compuesta.

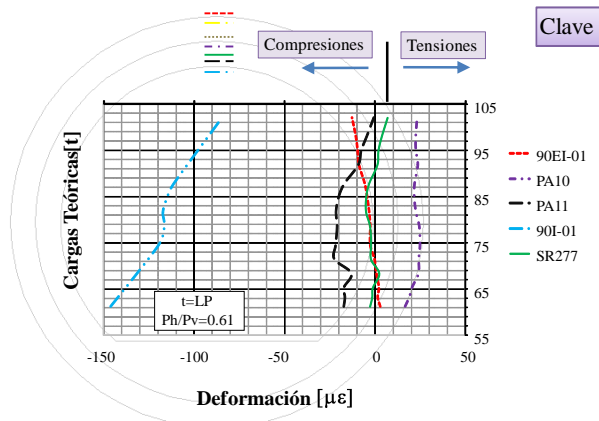


Figura 19. Curvas carga-deformación en clave

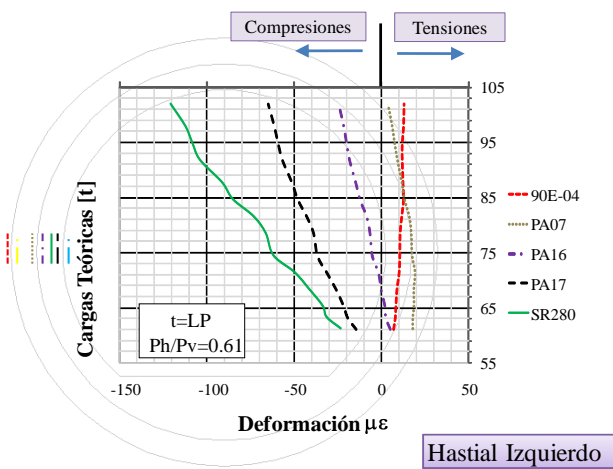


Figura 20. Curvas carga-deformación en pared

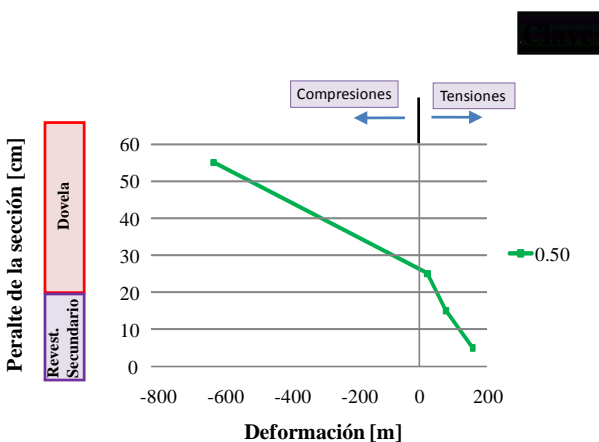


Figura 21. Diagrama de esfuerzos en la sección compuesta en clave.

Finalmente los diagramas de esfuerzos permitieron tener un acercamiento al comportamiento del sistema formado por las dovelas y el revestimiento secundario, en

las figuras 21 y 22 se muestran las microdeformaciones obtenidas con los deformímetros de concreto, en clave, cubeta y hastiales.

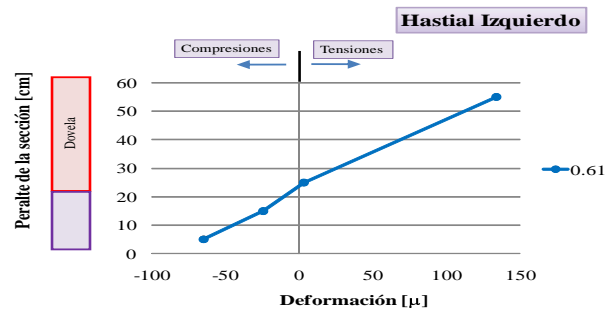


Figura 22. Diagrama de esfuerzos en la sección compuesta en paredes.

4 CONCLUSIONES Y APORTACIONES FUTURAS

La necesidad de conocer el comportamiento de un túnel con revestimiento definitivo, condujo a la realización de una prueba en escala real. Los resultados aquí mostrados, concuerdan con estimaciones hechas con modelado numérico, por lo que esta prueba sienta las bases para continuar con esta línea de investigación. Por otro lado, los datos acopiados también retroalimentan los modelos numéricos realizados, en cuanto al comportamiento de las juntas entre dovelas y las juntas longitudinales, así como el cambio en la rigidez del conjunto cuando se integra el revestimiento secundario y la cubeta de concreto.

El procedimiento de carga, la instrumentación y el monitoreo de datos fueron revisados en esta prueba y se detectaron áreas de mejoramiento para la realización de una prueba más completa, donde se incrementen las cargas en el revestimiento para simular las cargas que se tendrían en un túnel con poca cobertura y en un suelo sujeto al proceso de consolidación.

Dicha prueba contribuirá también a la calibración de los modelos numéricos para desarrollar una metodología de análisis y diseño de dovelas en suelos blandos.

También, al usar las cargas de diseño en las pruebas futuras, se podrá concluir acerca del uso de conectores de cortante.

5 REFERENCIAS

- Kamata, H., Masimo, H., (2003). "Centrifuge model test of tunnel reinforcement by bolting". *Tunnelling and Underground Space Technology* 18 (2) pp. 205.
- Lee, Y., Yoo, C. (2006). "Behavior of a bored tunnel adjacent to a line of load piles". *Tunnelling and Underground Space Technology* 21 (3) pp. 270.
- Lu, L. et. al. (2006), "Full-Ring Experimental Study of the Lining Structure of Shanghai Changjiang Tunnel", 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taiwan.
- Nomoto, T., Imamura, S., Hagiwara, T., Kusakabe, O., Fujii, N., (1999). "Shield tunnel construction in

- centrifuge". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125 (4), pp. 289-300.
- "Normas Técnicas Complementarias Para el diseño y Construcción de Estructuras de Concreto" (2004), del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, México.
- "Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI-318S-08) y Comentario" (2008), Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México.
- Schreyer , J., Winselmann, D. (2000), "Suitability Test for the Lining for the 4th Elbe Tunnel Tube – Results of large-scale Tests", STUVAtec, Cologne.
- Taylor, R.N. (1995). "Geotechnical centrifuge technology". Blackie Academy & Professional, Chapman & Hall, London.