

Diseño geométrico de revestimientos prefabricados de hormigón armado para túneles ejecutados con TBM

Geometric design of precast reinforced concrete linings for TBM tunnels

Javier Pablo Ainchil Lavín^a, Gonzalo Ramos Schneider^b, Albert de la Fuente

Antequera^c

^aDr. Ing. de Caminos. Prof. Asociado. Dept. de Ing. Civil y Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña.

^bDr. Ing. de Caminos. Catedrático. Dept. de Ing. Civil y Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña.

^cDr. Ing. de Caminos. Prof. Agregado. Dept. de Ing. Civil y Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña.

RESUMEN

La ejecución de túneles con T.B.M. y revestimientos de dovelas prefabricadas de hormigón armado se ha convertido en una solución frecuente en áreas urbanas, válida para una amplia gama de entornos geotécnicos. En esta comunicación se presentan los resultados del análisis de una serie de proyectos de referencia construidos en los últimos años y se han establecido correlaciones básicas entre los diferentes parámetros geométricos. Además, se ha comparado el comportamiento de dovelas con juntas longitudinales rectas frente a las dovelas con juntas ligeramente oblicuas, según la tendencia actual, desde el punto de vista tensional y deformacional, con modelos de MEF y observaciones en obras reales.

ABSTRACT

The construction of tunnels with T.B.M. with precast reinforced concrete segments linings has become a frequent solution in urban areas, valid for a wide range of geotechnical environments. This paper presents the results of the analysis of a series of reference projects built in recent years are presented and basic correlations have been established between the different geometric parameters. In addition, the behaviour of segments with straight longitudinal joints compared to segments with slightly oblique joints has been compared, according to the current trend, from the tensional and deformational point of view, with MEF models and observations in real works.

PALABRAS CLAVE: TBM, túnel, dovela, prefabricado, hormigón armado, revestimiento.

KEYWORDS: TBM, tunnel, segment, precast, reinforce concrete, lining

1. Introducción

La solución actualmente más extendida para túneles urbanos (tanto para metro como tráfico rodado o hidráulicos) es la construcción mediante tuneladora (TBM), especialmente las del tipo presión equilibrada de tierras (EPB).

Las ventajas son múltiples, pero especialmente destaca el control de asentamientos en

superficie y, en consecuencia, la minimización de la afectación a edificaciones o estructuras existentes.

Esta técnica incluye la ejecución de un sostenimiento/revestimiento mediante dovelas prefabricadas de hormigón. La geometría de dichas dovelas ha ido variando con el tiempo,

especialmente conforme han aumentado el diámetro de los túneles a construir.

En esta comunicación se presenta un estudio sobre las características geométricas de las dovelas y anillos de 17 túneles construidos mediante dovelas prefabricadas de hormigón armado. Dichos 17 túneles incluyen, además de algunos construidos en España, otros en el resto de Europa, Norte, Sur y Centroamérica y Oriente Próximo y abarcan temporalmente desde 2001 a 2015.

Una de las tendencias actuales en cuanto a geometría es el hacer ligeramente oblicuas las juntas longitudinales, en vez de hacerlas perfectamente paralelas al eje del túnel.

En esta comunicación también se aborda esa característica reciente de las dovelas de túneles.

Los resultados mostrados corresponden a la Tesis Doctoral del primer autor [1] y de dos Tesis de Master [2 y 3]

2. Diseño preliminar de dovelas

Como en cualquier diseño estructural, también en el caso de las dovelas que conforman los anillos de revestimiento de un túnel es preciso iniciar el proceso con una geometría de partida. Para ello se utilizan correlaciones y reglas que permiten generar la geometría inicial [1].

También existen correlaciones que permiten determinar cuántas probables de armadura.

A continuación se muestran las obtenidas a partir de los túneles reales analizados.

2.1 Parámetros geométricos

En primer lugar, se quiere resaltar cómo se está imponiendo, en las realizaciones más recientes, el uso de dovelas de anillo universal con juntas longitudinales oblicuas. En la Figura 1 se muestra la evolución en el tiempo del tipo de junta longitudinal, según los proyectos estudiados. Las dovelas con juntas longitudinales

oblicuas tienen una proyección en planta trapezoidal, mientras que la proyección de las de juntas rectas es rectangular.

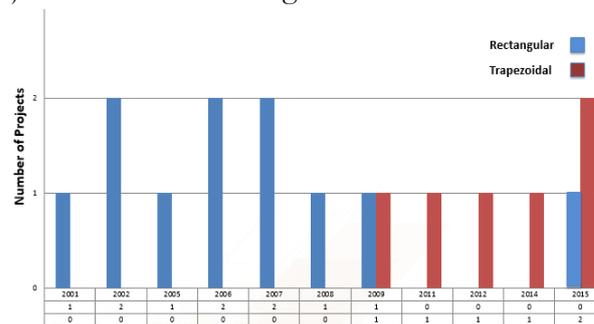


Figura 1. Evolución de los tipos de dovelas con el tiempo.

Se observa que casi todos los proyectos desde 2011 utilizan dovelas trapezoidales.

El número de dovelas por anillo es, básicamente, un parámetro que depende del radio interior, que oscila normalmente entre 6 y 8, siendo 7 el número más habitual (diámetros entre 8 y 11 m). La figura 2 muestra la relación antes reseñada y una correlación.

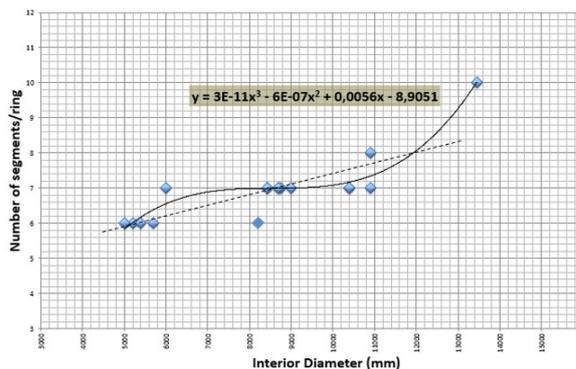


Figura 2. Número de dovelas por anillo frente a diámetro interior en m

La Figura 3 muestra la relación entre espesor de las dovelas y diámetro interior que es un parámetro muy importante para el comportamiento del túnel en fase de montaje y de servicio [2]. Se observa que los valores están entre 1/20 y 1/28.

Otra correlación de interés es entre el ancho de dovela y el diámetro interior. El ancho de dovela es un parámetro que también depende del radio de giro que se desee para el túnel. La Figura 4 muestra la correlación entre ambos que, tal como se puede observar, es prácticamente

lineal. Los valores habituales están entre 1500 mm y 2000 mm.

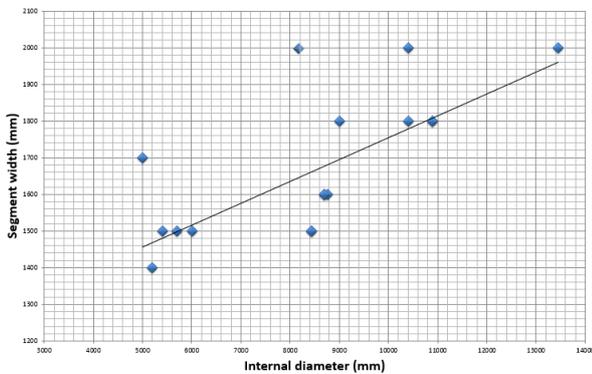
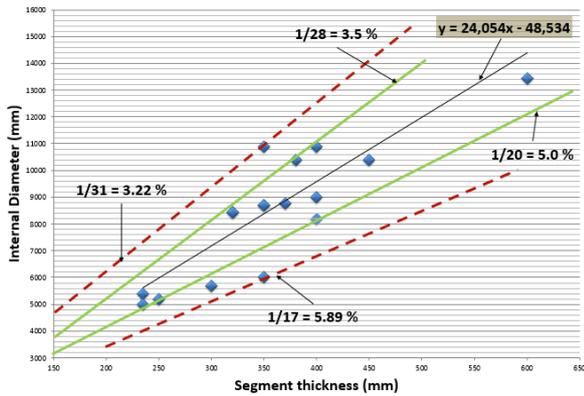
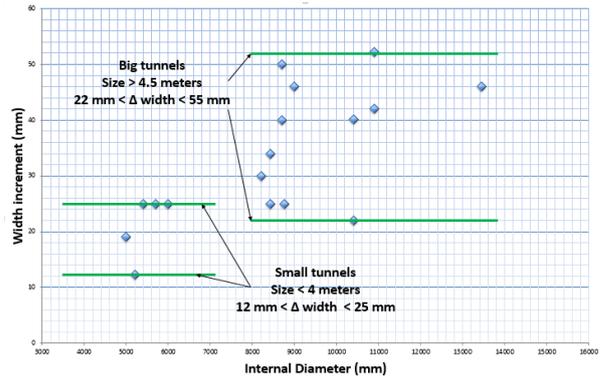


Figura 4. Relación entre diámetro interior y ancho de dovela

Se ha observado una gran dispersión en la conicidad de los anillos que define el anillo universal [3]. Como es bien sabido, la conicidad está directamente relacionada con el radio de giro mínimo que se desea para el recubrimiento del túnel, y con las condiciones de la máquina, por lo que es muy difícil correlacionarla con parámetros geométricos como el radio interior que se ha utilizado en otros casos. Se define, en este caso, como conicidad, el sobre-ancho total del anillo, o sea la diferencia entre la zona más ancha y la más estrecha. Cabe recordar que esta conicidad es la principal característica de un anillo universal y que todos los proyectos estudiados lo utilizaban.

Así, en la Figura 5 se observa dicha relación y se confirma plenamente la dispersión antes comentada, aunque pueden diferenciarse

dos bandas distintas en función del radio interior.



2.2 Parámetros mecánicos

En primer lugar se estudia la posible correlación entre la esbeltez diametral y la cuantía de armadura. En este caso, y tal como se muestra en la Figura 6, la esbeltez diametral se define como la relación entre el diámetro interior del anillo y el espesor de la dovela.

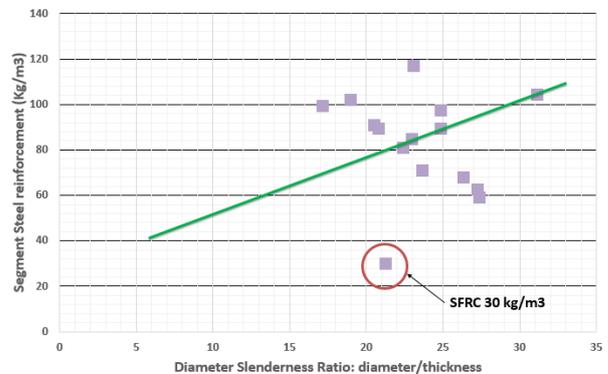


Figura 6. Relación entre cuantía de armadura y esbeltez diametral = diámetro interior / espesor

Se puede observar, enmarcado en rojo, un valor que se aleja de la tendencia que corresponde al único túnel cuyas dovelas no tienen armadura convencional, sino que están fabricadas con hormigón reforzado con fibras de acero, con una cuantía de 30 Kg/m³.

En la Figura 7 se muestra la misma correlación, pero, en este caso, con respecto a la esbeltez relativa a la longitud del desarrollo de las dovelas. Dicha esbeltez se define en este caso

como la relación entre la longitud del desarrollo de la dovela y su espesor.

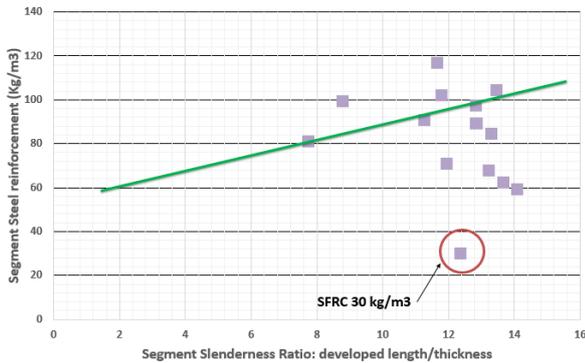
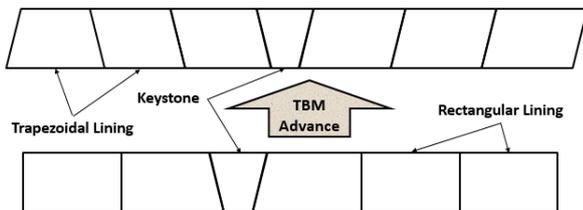


Figura 7. Relación entre cuantía de armadura y esbeltez del desarrollo = longitud dovela desarrollada / espesor

3. Dovelas rectangulares y trapezoidales

Tal como se ha indicado en el apartado anterior, existe una tendencia a utilizar dovelas trapezoidales frente a las rectangulares. Dicha tendencia parece estar asentándose en los proyectos más recientes. La Figura 8 ilustra la geometría de ambos tipos de dovelas.



Para el estudio de ambas configuraciones se han realizado análisis a nivel dovela y a nivel anillo [4], [5] y [6]

La Figura 9 muestra la geometría de las dovelas estudiadas.

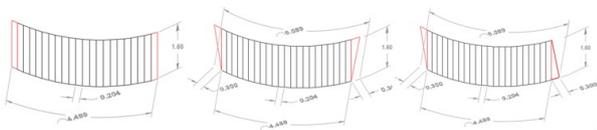


Figura 9. Geometría de las dovelas estudiadas

Para comparar su comportamiento, y de modo simplificado, se han adoptado dos hipótesis respecto a la respuesta de la junta de dovelas. Así, la junta se ha modelizado como perfectamente articulada y como totalmente empotrada, ya que estas hipótesis constituyen dos cotas entre las que se encontrará el comportamiento real.

La modelización se ha realizado con SAP2000®. Se puede ver la imagen del modelo de anillo, para el caso trapezoidal, en la figura 10.

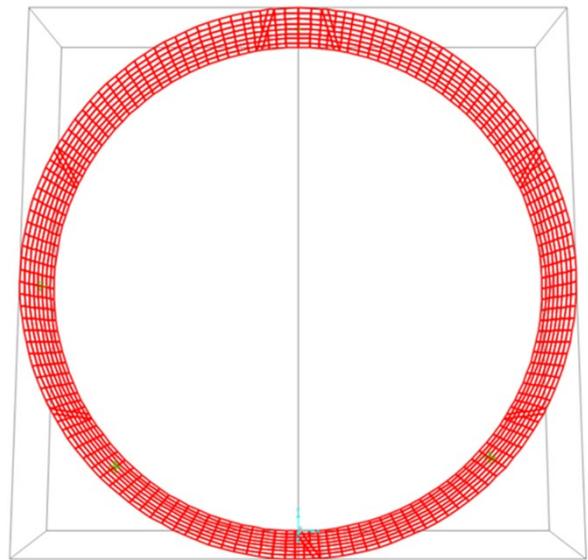


Figura 10. Modelo del anillo con dovelas trapezoidales

Se han obtenido múltiples resultados con diversas hipótesis de acciones. Un ejemplo se muestra en la Figura 11. Corresponde a momentos en el anillo de dovelas para el caso de dovelas trapezoidales en la hipótesis de empotramiento perfecto en las juntas. Las acciones exteriores, en este caso, simulan un túnel real bajo nivel freático.

En la Figura 12 se proporcionan los desplazamientos y giros espaciales para dicho anillo, exento, en la misma hipótesis descrita en el párrafo anterior.

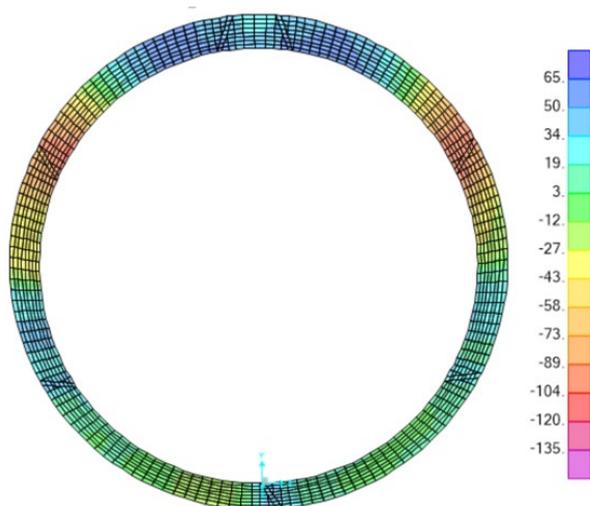


Figura 11. Momentos flectores en anillo de dovelas trapezoidales para cargas reales de túnel bajo nivel freático

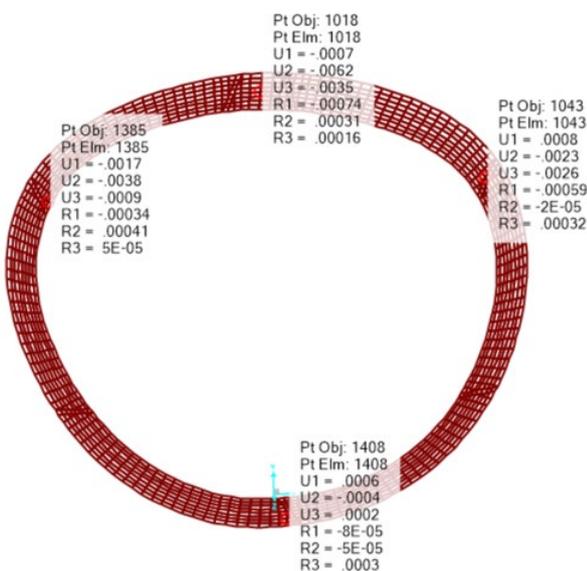


Figura 12. Desplazamientos y giros en anillo de dovelas trapezoidales para cargas reales de túnel bajo nivel freático

Como conclusiones se obtuvo que los esfuerzos son ligeramente superiores en el caso de dovelas trapezoidales, del orden de hasta un 40%, por los efectos de esquina que introducen las juntas oblicuas en las dovelas trapezoidales cuando aquellas se consideran articuladas.

Es preciso señalar que, sin embargo, dado que los armados vienen condicionados generalmente por fases transitorias, estas

diferencias de esfuerzos no producen incrementos de cuantía de armado.

El efecto que se observa y que sí tiene consecuencias, no estructurales sino constructivas, es el alabeo de los anillos frente a cargas radiales.

En efecto, la existencia de juntas oblicuas (siempre las de la dovola de clave y en el caso trapezoidal todas ellas) genera, frente a cargas radiales, desplazamientos fuera del plano del anillo.

Estos alabeos son inferiores en el caso de dovelas trapezoidales, lo que permite un mejor acabado geométrico del anillo.

La mera acción de la inyección del trasdós en el anillo recién instalado genera deformaciones de alabeo.

5. Conclusiones

A partir del estudio de 17 proyectos reales de túneles se ha procedido a obtener correlaciones que permitan un rápido y ajustado pre-diseño de las dovelas de un túnel construido mediante TBM.

Se han obtenido, y proporcionado, relaciones entre el diámetro interior o la esbeltez diametral, y las principales dimensiones geométricas de las dovelas, como el espesor, número de dovelas, conicidad,...

También se ha mostrado parte del estudio desarrollado para determinar las diferencias de comportamiento estructural entre los anillos formados por dovelas prefabricadas rectangulares y trapezoidales.

Se ha observado que la presencia de esquinas genera mayores esfuerzos en el caso de las dovelas trapezoidales. Sin embargo, dichos esfuerzos no son suficientemente altos como para resultar determinantes en el diseño. En general, las dovelas se arman por condiciones

transitorias, no por esfuerzos de carácter permanente, pues producen esfuerzos pésimos.

Sin embargo, sí se ha determinado que las dovelas trapezoidales generan anillos con una menor tendencia al alabeo, lo cual reduce la probabilidad de imperfecciones geométricas en el túnel acabado y, por ende, mejora su impermeabilidad.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la financiación recibida a través del proyecto de investigación BIA 2017-86811-C2 del Ministerio de Economía y Competitividad y de Agaur (2017 SGR 1481) de la Secretaria d'Universitats i Recerca de la Generalitat de Catalunya

Referencias

- [1] Blom C.B.M. (2002). Design Philosophy of Concrete Linings in Soft Soils. ISBN 90-407-2366-4, Delft, The Netherlands. 2002
- [2] Groeneweg, T.W. Shield driven tunnels in ultra-high strength concrete- Reduction of the tunnel lining thickness. Graduation thesis. Delft University of Technology. The Netherlands. 2007
- [3] AFTES. The Design, Sizing and Construction of Precast Concrete Segments Installed at the Rear of a Tunnel Boring Machine (TBM), Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain AFTES, November 1997.
- [4] ITA. Guidelines for the Design of Tunnels. Originally published in Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.3, No. 3. pp. 237-249. 1998
- [5] Japanese standard for shield tunnelling -1996- The third edition, JSCE, Tokio, Japan. 2001
- [6] Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining. Originally published in Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 15, Nr. 3, pp. 303 – 331. 2000