

FACTOR DE REDUCCIÓN DE RIGIDEZ PARA ANILLOS DE DOVELAS DE CONCRETO REFORZADO EN TÚNELES

Fernando Peña¹ y Brianda Basurto¹

RESUMEN

En este trabajo se presenta un factor para reducir la rigidez de un anillo continuo, con el fin de que sea equivalente a un anillo de dovelas. Generalmente, en los modelos geotécnicos se modela el anillo dovelado como un anillo continuo. Sin embargo, se sabe que por la presencia de las juntas, el comportamiento del anillo dovelado es diferente al de un anillo continuo. Debido a esto, es necesario reducir la rigidez del anillo continuo para que sea equivalente al de uno dovelado. De este modo, en este trabajo se presenta un factor de reducción de rigidez, donde se obtuvo estudiando los diferentes parámetros que modifican el comportamiento estructural de los anillos: la relación de presiones horizontales y verticales, la posición y geometría de las juntas. La relación propuesta es validada con pruebas de laboratorio y es comparada con otros factores de reducción de rigidez que hay en la literatura, con el fin de mostrar las ventajas y limitantes de la formulación propuesta. Se concluye que la formulación propuesta da una buena aproximación del comportamiento de un anillo continuo con respecto a uno dovelado; además de que es sencilla de aplicar en comparación con otras formulaciones existentes.

Palabras clave: Túnel, factor de reducción de rigidez, dovelas, juntas, relación momento – rotación.

ABSTRACT

This paper presents a stiffness reduction factor for a continuous ring. In order to make it equivalent to a segmented ring. In geotechnical models it is common to model the segmented ring as a continuous ring. However, it is known that due to the existence of joints, there is a difference between the behavior of a segmented ring and a continuous ring. For this reason, it is necessary to reduce the stiffness of a continuous ring to make it equivalent to a segmented one. Thereby, in this paper a stiffness reduction factor is presented, which was obtained from the study of different parameters that modify the structural behavior of the rings: the vertical and horizontal loads ratio, the position and geometry of joints. The proposed formula is validated with experimental tests and it is compared with the existing factors in literature, in order to show the advantages and limitations of the proposed formulation. It is concluded that the proposed formulation provides a good approximation of the continuous ring in regard to a segmented ring; besides that is easy to apply in comparison with other existing formulations.

Keywords: Tunnel, stiffness reduction factor, dowels, joints, moment – rotation relation.

RESUMO

Neste trabalho apresentamos um fator de redução da rigidez de um anel contínuo, de modo que seja equivalente a um anel de aduela. Geralmente, nos modelos geotécnicos modelamos o anel aduelado como um anel contínuo. No entanto, sabe-se que pela presença das juntas, o comportamento do anel de aduela seja diferente de um anel contínuo. Devido a isto, se faz necessário reduzir a rigidez do anel contínuo para que seja equivalente a de um aduelado. Deste modo, apresentamos neste trabalho, um fator de redução de rigidez, onde se obteve estudando os diferentes parâmetros que modificam o comportamento estrutural dos anéis: a relação de pressões horizontais e verticais, a posição e geometria das juntas. A relação proposta é validada com provas de laboratório e comparada com outros fatores de redução de rigidez que tem na literatura, com a finalidade de mostrar as vantagens e limitantes da formulação proposta. Concluiu-se que a formulação proposta proporciona uma boa aproximação do comportamento de um anel contínuo, com relação a um aduelado; além de ser mais fácil de aplicar, em comparação com outras formulações existentes.

Palavras chave: Túnel, fator de redução de rigidez, aduelas, juntas, relação momento – rotação.

⁽¹⁾ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Edificio 2, Circuito Escolar Ciudad Universitaria, C.P. 04510 México, D. F.
E-mail: fpem@pumas.iingen.unam.mx; briankaleth@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente se puede realizar la excavación de un túnel de forma totalmente mecanizada con el empleo de una máquina tuneladora, mejor conocida como TBM. Mientras se realiza la excavación se coloca un soporte inicial formado con dovelas prefabricadas de concreto reforzado; un erector levanta las dovelas por succión y las coloca en el montador para ir formando los anillos. Una vez terminado un anillo, el escudo avanza con unos cilindros de empuje para formar el siguiente anillo. En la holgura que queda entre el anillo y el terreno se inyecta mortero.

Una de las características principales de los túneles dovelados es que sus anillos no se pueden considerar como continuos, debido a la existencia de las juntas. Por lo que es necesario tomar en cuenta la influencia de éstas en el cálculo de las fuerzas internas y los desplazamientos en el anillo. De forma resumida, la influencia de las juntas en el comportamiento estructural del anillo se verá reflejada en:

- El anillo dovelado tendrá una rigidez global menor que un anillo continuo.
- Para las mismas cargas, un anillo dovelado tendrá mayores desplazamientos y menores elementos mecánicos que un anillo continuo.
- El comportamiento de las juntas es no lineal.
- Lo anterior conlleva a que el comportamiento de un anillo dovelado será no lineal incluso cuando el material de las dovelas esté en el rango elástico lineal.

Por otro lado, el diseño estructural del revestimiento se debe realizar por etapas. Las presiones que actuarán en el túnel debido al suelo y a la presión hidrostática se verán afectadas por el proceso constructivo y el comportamiento a largo plazo. Para esto, se realiza un modelo geotécnico que debe tomar en cuenta los diferentes estados de presiones del suelo antes, durante y después de la construcción del túnel. Debido a esto, y con el fin de simplificar el modelo geotécnico, generalmente se considera el anillo dovelado como un anillo continuo sin juntas. Esto permite simplificar el modelo numérico, pues la presencia de las juntas hace que el comportamiento del anillo dovelado sea no lineal. Sin embargo, para poder realizar esta simplificación es necesario que el anillo continuo tenga un comportamiento similar al de un anillo dovelado. Una de las formas más sencillas es la de reducir la rigidez del anillo continuo e igualarla a la de uno dovelado.

Así, el objetivo principal de este trabajo es presentar un factor de reducción de rigidez η que pueda ser aplicado en la práctica a un modelo geotécnico de anillo continuo, con el fin de simplificar el proceso de diseño. La metodología utilizada para obtener el factor de reducción de rigidez consistió en estudiar los diferentes parámetros que modifican el comportamiento estructural de los anillos dovelados, como son:

- La influencia de las condiciones del suelo, mediante la relación de cargas horizontales y verticales.
- La orientación de las juntas.
- La geometría de las juntas.

En cada caso se observó cada parámetro cómo afectó al factor de reducción η . De este modo, con base en los resultados obtenidos, se propuso una formulación para obtener dicho factor. Así mismo, la relación propuesta se validó con pruebas de laboratorio y se comparó con otros factores de reducción de rigidez que hay en la literatura, a fin de mostrar las ventajas y limitaciones de la formulación propuesta. Se hace notar por que el campo de aplicación de la formulación obtenida es para un proceso de diseño, se consideró únicamente el comportamiento elástico tanto de las dovelas como de las juntas.

2. COMPORTAMIENTO DE LOS ANILLOS DOVELADOS

Las dovelas que forman los anillos son segmentos prefabricados de concreto reforzado. Las dimensiones de las dovelas se eligen lo más grande posible para tener el menor número de segmentos y así agilizar el trabajo de la máquina tuneladora. El espesor dependerá de las cargas que deba soportar el anillo y de las dimensiones de la máquina tuneladora, pero habitualmente varía entre 20 a 50 cm (Maidl *et al*, 2011). Entre una dovela y otra existe una junta. Esta área de contacto es capaz de transferir los elementos mecánicos a otros segmentos (Fig. 1).



Fig. 1: Dovelas y juntas.

Actualmente, el tipo de junta que se utiliza en la práctica es el de la junta plana sin conectores (Fig. 1). En este tipo de juntas, los tornillos que se llegan a colocar tienen únicamente la función de permitir el posicionamiento correcto de las dovelas durante la construcción, pero no se les asigna función estructural específica. El comportamiento de la junta está influenciado significativamente por la fuerza normal N presente en la junta, la cual se debe a la presión radial impuesta por el suelo al túnel. Las fuerzas se transmiten por el contacto de concreto a concreto en unas salientes que abarcan poco más de la mitad de la sección de la dovela (Peña *et al.*, 2012).

El comportamiento mecánico de las juntas es uno de los parámetros principales que modifican el comportamiento estructural de los anillos dovelados. Las juntas modificarán el comportamiento del anillo de la siguiente forma (Hefny *et al.*, 2004; Peña *et al.*, 2010):

- Conforme aumenta el número de juntas, el momento flexionante y las fuerzas actuantes en las dovelas decrecen.
- El comportamiento de las juntas depende de ciertos factores como la geometría (largo b y ancho h), las propiedades mecánicas del material (módulo de elasticidad E , relación de Poisson ν), la relación K entre cargas horizontales Ph y verticales Pv ($K=Ph/Pv$) y el tipo de conexión usada (juntas planas o atornilladas).
- La orientación relativa de las juntas con respecto a las cargas modificará el nivel de esfuerzos y la distribución de elementos mecánicos en el anillo.
- Existe un número “crítico” de juntas, después del cual, si se sigue aumentando, no existirá una disminución significativa del momento flexionante.
- La rigidez a rotación de la junta depende de las cargas actuantes en ella. La rigidez disminuye cuando se incrementa el momento flexionante y se incrementa al aumentar las fuerzas axiales.

Por otro lado, el comportamiento mecánico de las juntas se puede describir con una relación momento – rotación. De acuerdo con Blom (2002), el comportamiento de la junta se puede dividir en tres etapas (Fig. 2):

- En la etapa I, el comportamiento de la junta es lineal. La excentricidad de la carga es pequeña por lo que se tiene un esfuerzo de compresión en toda la sección de la junta.
- En la etapa II, la junta comienza a abrirse conforme se incrementa el momento flexionante.
- En la etapa III se presenta un fenómeno similar a la plastificación. Se incrementan las rotaciones pero no el momento. Se puede decir, que cuando la junta ha alcanzado la tercera etapa la sección prácticamente ha fallado por rotaciones excesivas.

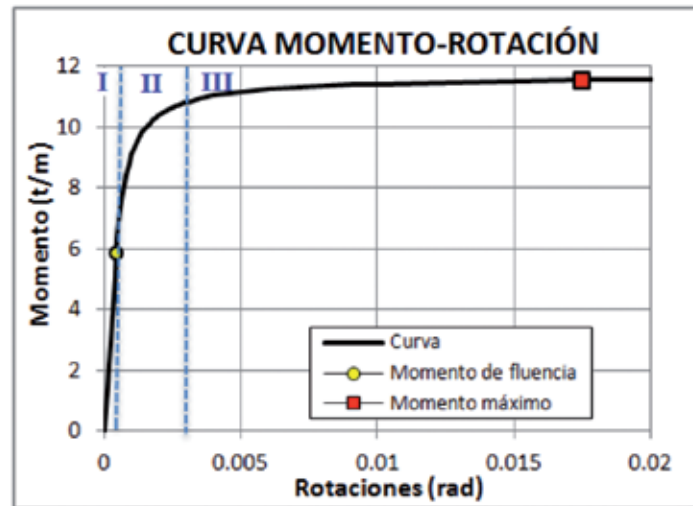


Fig. 2: Curva típica momento – rotación de una junta plana.

En una etapa de diseño, las juntas deberían tener únicamente un comportamiento elástico lineal. Es decir, deberían estar trabajando en la Etapa I. Esto significa que las juntas no deberían de abrirse en las condiciones de servicio, pues entre otras cosas se debe garantizar la estanqueidad de la junta. Así mismo, cabe recordar que grandes rotaciones producen concentraciones de esfuerzos de compresión en los extremos de las dovelas, lo cual puede llevar al aplastamiento del concreto (Peña *et al.*, 2012). Por lo tanto, el factor de reducción de rigidez que se propone en este trabajo está pensado para ser utilizado en una etapa de diseño. Motivo por el cual, se considera en la formulación del mismo únicamente el comportamiento elástico lineal de las juntas y de las dovelas.

3. FÓRMULAS EXISTENTES PARA OBTENER EL FACTOR DE REDUCCIÓN DE RIGIDEZ

Diversos autores han estudiado el comportamiento de los anillos dovelados y han propuesto factores de reducción de rigidez. En esta sección se presentan cinco formulaciones propuestas por diversos autores y se muestran las ventajas y limitaciones de cada uno de ellos. Esto servirá de base para compararlos con la formulación propuesta.

Muir Wood (1975) propone que un túnel dovelado tiene un comportamiento similar a que el anillo estuviera parcialmente articulado. De este modo, propone que la inercia efectiva I_e del anillo dependa del número de juntas n y el momento de inercia de éstas I_j , así como de la inercia total del anillo I (Ec. 1). La limitante de esta formulación es que, la Ecuación (1) es válida únicamente cuando el anillo tiene más de cuatro juntas y cuando el tamaño de todas las dovelas es el mismo. Por lo tanto no se puede aplicar a configuraciones actuales donde las dovelas no son todas del mismo tamaño.

$$I_e = I_j + \left(\frac{4}{n}\right)^2 I \quad (1)$$

Por otro lado, Rodríguez y Salmón (1987) proponen que el factor de reducción de rigidez depende de las cargas impuestas en el túnel. Sus resultados fueron obtenidos de pruebas experimentales realizadas en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Observaron que el factor de reducción depende de la relación de cargas K (Fig. 3). Sin embargo, la desventaja de esta formulación es que las dovelas que utilizaron en los experimentos tenían juntas metálicas con conexiones mecánicas, por lo que no son aplicables a juntas planas.

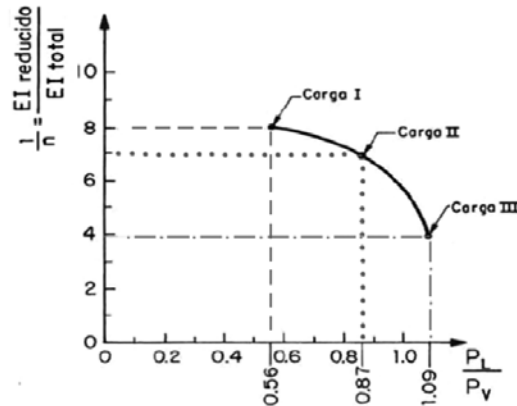


Fig. 3: Propuesta de Rodríguez y Salmón (1987) para el factor de reducción, el cual depende de la relación de cargas (en la gráfica se presenta el inverso de η).

Liu y Hou (Lee y Ge, 2001) proponen la Ecuación (3) para obtener el factor η , tomando en cuenta la rigidez rotacional de las juntas K_θ y el radio del túnel R :

$$\eta = \frac{1}{1+b}; \quad b = \frac{3EI}{RK_\theta} \sum_{i=1}^m \cos \varphi_i \cos 2\varphi_i \quad (2)$$

Dónde: EI es la rigidez a flexión del anillo continuo, m es el número de juntas en un rango de 0° a 90° , mientras que φ_i es el ángulo medido desde la dirección vertical hasta la posición de la junta i -ésima, siempre dentro de un rango de 0° a 90° . Una limitante de este método es que sólo es válida para dovelas de igual tamaño y que la posición de las juntas debe ser simétrica en cada cuadrante, por lo que su campo de acción es reducido.

Blom (2002) propone una formulación que depende de la geometría del anillo y de las características de las juntas (Ec. 3). El problema de esta formulación es que se considera una sola posición de las juntas para definir los coeficientes C_x^* y C_y^* (Ecs. 4 y 5), esto conlleva a no considerar los diferentes niveles de esfuerzos que pueden presentarse al cambiar la orientación de las juntas. Otra limitante de esta formulación es que no toma en cuenta el efecto de las cargas en la rigidez del anillo.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{3}{4} \frac{d^3}{l^2 r} (C_x^* + C_y^*)} \quad (3)$$

Dónde: l es el ancho de la junta, d el de la dovela y r es el radio de la sección. C_x^* y C_y^* se calculan con las Ecuaciones (4 y 5), respectivamente. En estas ecuaciones β es el ángulo, en grados, de la posición de las juntas.

$$C_x^* = \sum_{-\pi/2 < \beta_i}^{\beta_i < +\pi/2} \cos(2\beta_i) \cos(\beta_i) \quad (4)$$

$$C_y^* = - \sum_{0 < \beta_i}^{\beta_i < +\pi} \cos(2\beta_i) \sen(\beta_i) \quad (5)$$

Finalmente, Hefny y Chua (2006) realizaron un estudio paramétrico considerando diferentes condiciones del terreno, profundidades del túnel y flexibilidad del revestimiento para anillos con diferente número y orientación de juntas. En sus estudios consideran que el factor de reducción depende de la relación que existe entre el momento de inercia de un anillo continuo I con respecto al momento de inercia efectivo I_e de un anillo discontinuo ($\eta=I_e/I$). Con base en ello, proponen una formulación (Ec. 6) que involucra el número de juntas n y la orientación crítica η_{\max} o favorable η_{\min} de las juntas. La limitante de esta formulación es que no se toma en cuenta las características de las juntas ni la relación de cargas.

$$\eta_{\min} = \frac{429}{n^{4.6}} \quad \eta_{\max} = \frac{159.2}{n^{4.3}} \quad (6)$$

Como se ha visto, diversos autores han propuesto varias metodologías para obtener el factor de reducción de rigidez. Algunas de ellas son muy sencillas, mientras que otras son complejas. Sin embargo, la mayoría de ellas presentan el inconveniente de no tomar en cuenta factores importantes que afectan la rigidez de un anillo dovelado. Debido a esto, el factor propuesto en este trabajo toma en cuenta varios de los parámetros que los diferentes autores han tomado en cuenta, así como otros que han dejado a un lado como son: la relación de cargas horizontales y verticales, la orientación de las juntas y la geometría de las juntas.

4. PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DEL FACTOR DE REDUCCIÓN

La metodología que se utilizó consistió en estudiar los diferentes parámetros que afectan la rigidez de los anillos dovelados. En cada uno de los casos se utilizaron dos tipos de modelos numéricos: un anillo continuo y un anillo con juntas. Se observó el comportamiento de ambos anillos y se calculó la rigidez de ellos dividiendo la deformación del anillo entre la carga aplicada. El factor de reducción de rigidez η se obtuvo dividiendo la rigidez del anillo con juntas entre la rigidez del anillo continuo.

La geometría que se utilizó de base para los diferentes análisis corresponde a la de un túnel de drenaje típico de la ciudad de México, el cual consta de seis dovelas más una dovela llave (6+1). El diámetro exterior de los anillos es de 840 cm con un ancho de 150 cm cada uno. Las dovelas tienen un espesor de 35 cm, dejando así un diámetro interior del anillo de 770 cm. Las juntas de las dovelas son planas, con un ancho de 18 cm (Fig. 4).

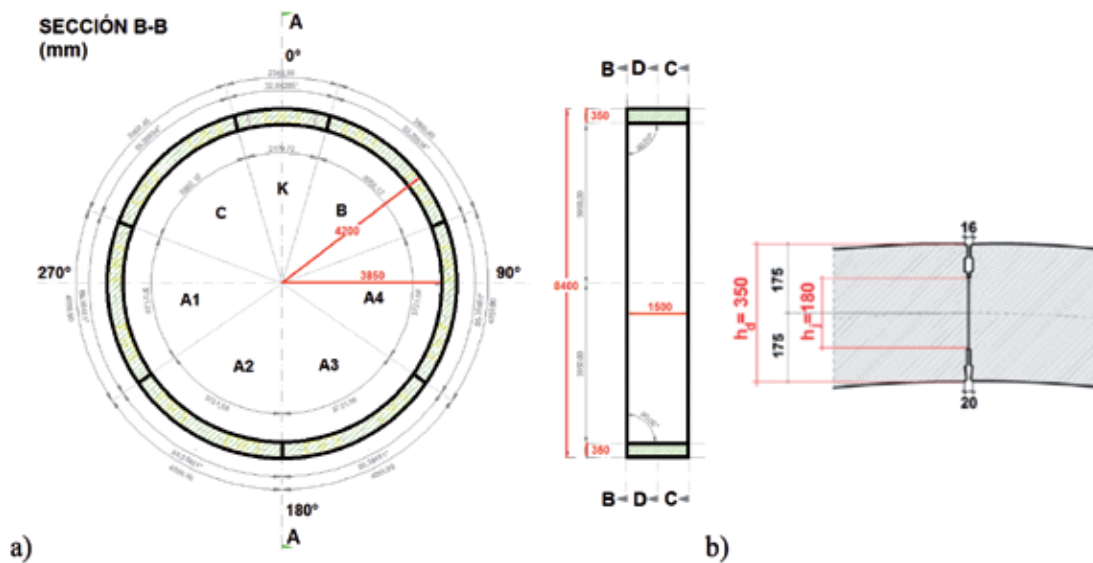


Fig. 4: Geometría inicial del anillo utilizado: a) Sección transversal del anillo de dovelas, b) Detalle de la junta plana sin tornillo, acotaciones en mm.

Con esta geometría inicial se realizaron los diferentes modelos numéricos utilizando el programa de análisis comercial SAP2000. Las dovelas se consideraron como elementos barras y las juntas entre dovelas se modelaron con resortes rotacionales (Fig. 5a). La rigidez rotacional K_θ de los resortes se considera constante (Ec. 7) de acuerdo con la rama elástica de la curva momento – rotación propuesta por Gladwell (Van der Vliet, 2006). Por otro lado, para representar el acoplamiento entre anillos se utilizaron resortes axiales para unir un anillo con otro (Fig. 5a). Se consideró que los anillos tienen una fuerte interacción entre sí, con una rigidez axial constante de 1,000 t/m.

$$K_\theta = \frac{\pi h_j^2 b E}{32(1 - \nu^2)} \quad (7)$$

Dónde: h_j es el ancho de la junta, b es el largo de la junta, E es el módulo de elasticidad del túnel y ν es la relación de Poisson.

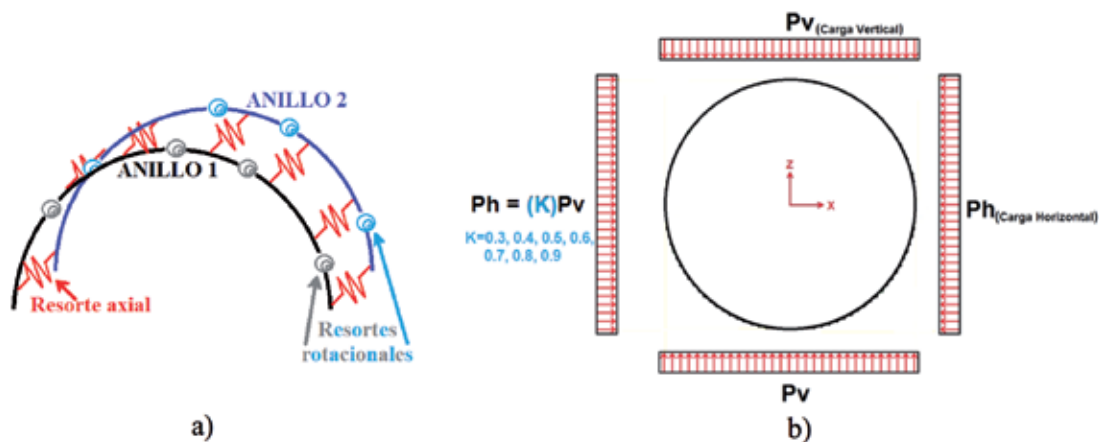


Fig. 5: Consideraciones realizadas en los modelos numéricos:
a) Sistema de dos anillos acoplados por medio de resortes; b) Distribución de cargas.

En todos los modelos se considera que las dovelas están formadas de concreto con resistencia a la compresión f'_c de 350 kg/cm² y relación de Poisson igual a 0.2. El módulo de elasticidad E se obtiene conforme a las Normas Técnicas Complementarias de Concreto del Reglamento de Construcción del Distrito Federal (NTC-C, 2004). Así, el módulo de Elasticidad es de 261,916.02 kg/cm². Las dovelas se consideran elástica lineales. Finalmente, las cargas se consideran como uniformemente distribuidas a lo largo del revestimiento (Fig. 5b). Se utilizó la relación de cargas K (Ph/Pv) para representar los diferentes patrones de carga, los cuales se variaron desde K igual a 0.3 hasta 0.9.

5. VARIACIÓN DEL FACTOR CON RESPECTO A LA RELACIÓN DE CARGAS

El primer factor que se estudió fue la relación de cargas K . Esta relación dependerá de las características del suelo, estratigrafía, profundidad a la que se encuentra el túnel y el nivel del manto freático. De este modo, al observar la variación del factor de reducción con respecto a la relación de cargas, se está estudiando de forma indirecta y muy simplificada la influencia del suelo que rodea al túnel.

Así mismo, la relación de cargas K permite observar el comportamiento del anillo bajo diferentes niveles de confinamiento debido a las características del suelo. Cabe recordar que las cargas externas al ser radiales producen un efecto similar a un confinamiento. Si la relación de cargas K es igual a uno significaría que las cargas fueran radiales uniformes por lo que se tendría un efecto de confinamiento perfecto. Si la relación de cargas es igual a cero significaría que no existen cargas laterales, por lo que el efecto del confinamiento debido a las cargas radiales no existiría. De este modo, entre mayor sea la relación de cargas K , más confinado estará el anillo, por lo que será más rígido y por lo tanto se deformará menos.

La Fig. 6 muestra la deformada de un anillo continuo y de uno con juntas para diferentes relaciones de cargas K , se puede observar que para las mismas cargas el anillo con juntas tiene una mayor deformación que el anillo continuo. Ahora bien, si se compara la rigidez de ambos anillos, dovelado y continuo, se puede obtener el factor de reducción de rigidez η para cada una de las relaciones K (Fig. 7). En el caso de la relación $K=0.3$ se tiene un factor $\eta=0.77$, esto significa que si se desea representar la rigidez un anillo dovelado con bajo confinamiento se tiene que utilizar un anillo continuo con rigidez reducida al 77 %. Por otro lado, para una relación $K=0.9$, con alto confinamiento, se tiene un factor $\eta=0.85$. Cabe resaltar que aunque el comportamiento de las juntas se modeló como elástico-lineal, el nivel de confinamiento en los anillos es un parámetro que sí modifica el factor de reducción de rigidez η (Fig. 7) aunque la diferencia entre ambos factores es pequeña, del orden del 9 %.

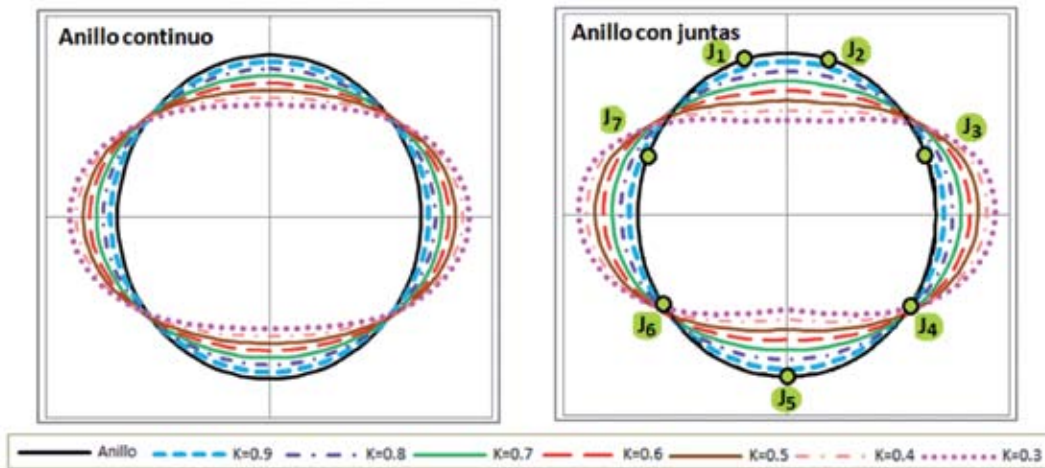


Fig. 6: Deformada de los anillos para diferentes relaciones de cargas K , factor de amplificación de 100.

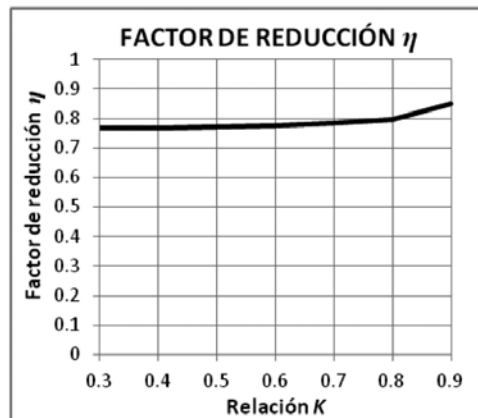


Fig. 7: Factor de reducción de rigidez η contra relación de cargas K .

6. VARIACIÓN DEL FACTOR CON RESPECTO A LA ORIENTACIÓN DE LAS JUNTAS

En la construcción de los túneles dovelados se busca que los anillos tengan un traslape entre dovelas de tal forma que se evite la formación de planos débiles. Así, los anillos no siempre tienen la misma orientación de las juntas con respecto a las cargas y esto modificará los esfuerzos en los anillos. Con base en ello se estudiaron cuatro diferentes posiciones

de montaje de los anillos utilizados en la construcción de un túnel en la ciudad de México (Fig. 8). En la figura 9 se presenta el factor de reducción de rigidez η obtenido al comparar la rigidez del anillo dovelado y el anillo continuo con las cuatro posiciones para las diferentes relaciones de carga. En la posición crítica P2 se obtuvo un factor constante $\eta=0.76$ para todas las relaciones de carga. Por otro lado, en la posición favorable P4 el factor varía desde $\eta=0.79$ para la relación $K=0.3$ hasta $\eta=0.85$ para la relación $K=0.9$. En este caso, el factor η obtenido con un anillo en la posición favorable y alto confinamiento, $K=0.9$, es 7 % mayor que el de un anillo con bajo confinamiento, $K=0.3$. Si se compara el factor η del anillo en la posición crítica contra el anillo en la posición favorable, se tiene una diferencia del 11 %.

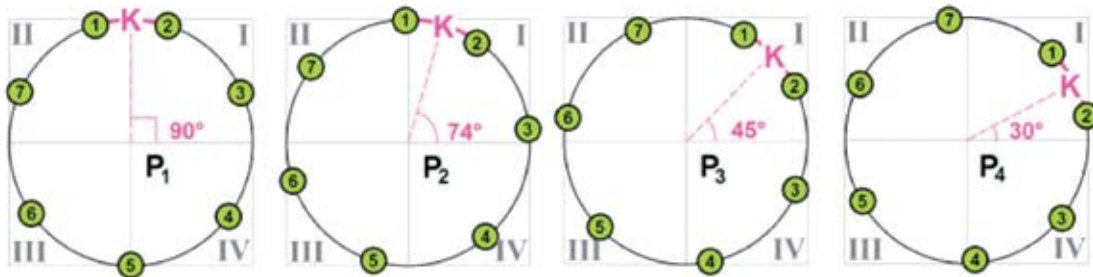


Fig. 8: Orientación de las juntas y ubicación de la dovela llave K en las cuatro posiciones.

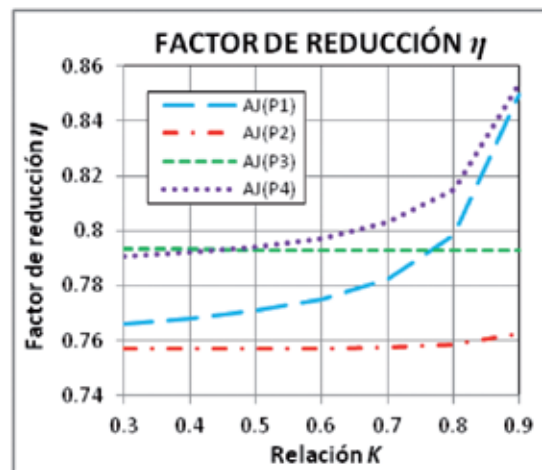


Fig. 9: Factor de reducción de rigidez η obtenido para las cuatro posiciones estudiadas.

7. VARIACIÓN DEL FACTOR CON RESPECTO A LA GEOMETRÍA DE LAS JUNTAS

La relación de espesores β (h_j/h_d) se utilizó para representar las diferentes geometrías que pueden presentar las juntas de un anillo dovelado. Para ello se mantuvo constante el ancho de dovela h_d de 35 cm y se modificó el ancho de junta h_j . La disminución de la relación de espesores representa la disminución del área de las juntas, con ello se reduce el momento de Inercia I de los anillos y, por lo tanto, su rigidez a flexión EI . De este modo se tiene que, a mayor relación de espesores β , menores deformaciones en los anillos (Fig. 10) y mayor factor de reducción η (Fig. 11). El factor de reducción η obtenido en la posición crítica (constante en todas las relaciones K) con la relación de espesores $\beta=0.3$ ($\eta=0.51$) es 80.4 % menor que el factor obtenido con $\beta=1.0$ ($\eta=0.92$). Mientras que el factor de reducción en la posición favorable (promediado con las diferentes relaciones K), con la relación de espesores $\beta=0.3$ ($\eta=0.66$) es 44.7 % menor que con $\beta=1.0$ ($\eta=0.96$).

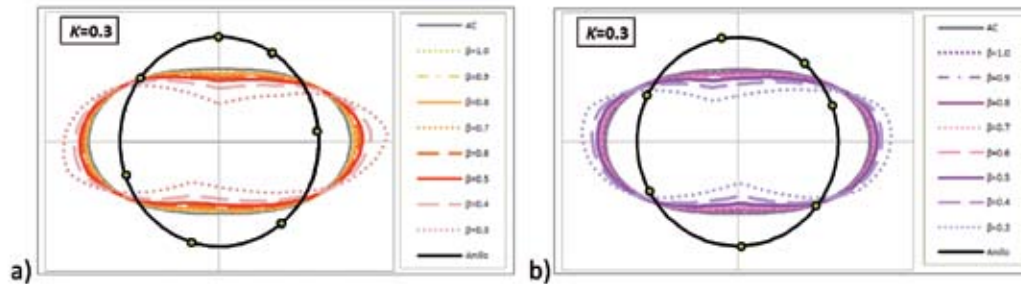


Fig. 10: Deformada de los anillos para diferentes relaciones de espesor β (h_j / h_d):
a) posición crítica, b) posición favorable.

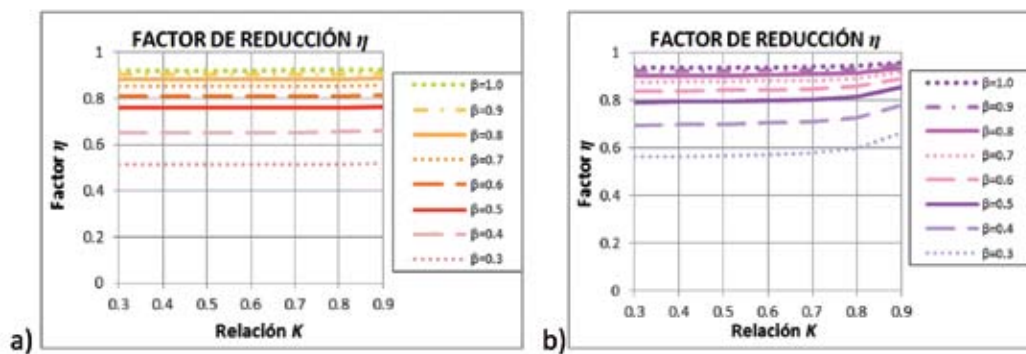


Fig. 11: Factor de reducción de rigidez η contra relación de cargas K :
a) posición crítica, b) posición favorable.

8. FORMULACIÓN PROPUESTA

Con la información obtenida en los estudios anteriores se llegó a la conclusión de que la influencia de la relación de cargas K es pequeña (menor a 10 %). Por tanto, se desprecia la influencia de la relación K en la formulación propuesta. Así, los parámetros utilizados son: la orientación y la geometría de las juntas. La figura 12 presenta las dos curvas que representan al factor de reducción de rigidez η con respecto a la relación de espesores β para las posiciones crítica y favorable. Se propone la Ecuación (8) para obtener el factor η considerando que el anillo está en una posición crítica y la Ecuación (9) para la posición favorable. El error estándar de estimación (Ec. 10) para la posición crítica es de 0.0097 y para la posición favorable es de 0.0205. Con ambas ecuaciones se obtuvo una correlación lineal casi perfecta ($r \approx 1$). Por lo tanto, las ecuaciones propuestas se consideran adecuadas para obtener el factor de reducción de rigidez η .

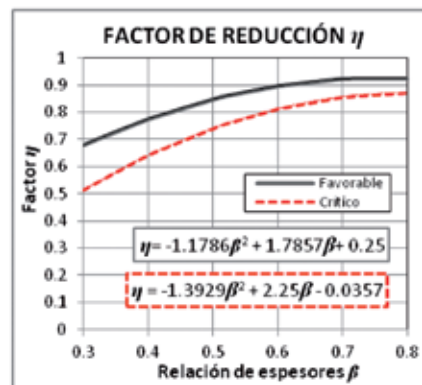


Fig. 12: Factor de reducción de rigidez η con respecto a la relación de espesores
($0.3 < \beta < 0.8$) para las posiciones crítica y favorable.

$$\eta_{crítico} = -\frac{1}{28}(39\beta^2 - 63\beta + 1) \quad (8)$$

$$\eta_{favorable} = -\frac{1}{28}(33\beta^2 - 50\beta - 7) \quad (9)$$

$$Se = \frac{\sum (\eta_{modelo} - \eta_{calculado})^2}{d} \quad (10)$$

Dónde: Se = error estándar de estimación, η_{modelo} = factor de reducción de rigidez obtenido en los modelos, $\eta_{calculado}$ = factor de reducción de rigidez obtenido en las ecuaciones, d = número de datos.

9. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con el fin de validar las fórmulas propuestas del factor de reducción de rigidez, se tomaron los datos de pruebas experimentales a gran escala del túnel Botlek Railway, Holanda (Luttikholt, 2007). El modelo experimental consta de tres anillos (superior, central e inferior). Cada anillo está formado por siete dovelas más una dovela llave (7+1). El ancho de cada anillo es de 150 cm, el de las dovelas es de 40 cm y el de sus juntas es de 17 cm. El diámetro exterior de cada anillo es de 945 cm. El concreto utilizado en las dovelas tiene un módulo de Elasticidad E de 367,097.76 kg/cm² y relación de Poisson ν de 0.2.

Los anillos fueron probados dentro de un marco de carga en dirección axial y en dirección radial, por medio de gatos hidráulicos. La carga axial representa la carga impuesta por los gatos de empuje al túnel para el avance del escudo. Por otro lado, la carga radial representa la presión impuesta por el suelo al túnel. Se realizaron dos experimentos, uno con una fuerte interacción entre los anillos (C01) y otro con una pobre interacción (C02). En las pruebas experimentales, los anillos se llevaron al estado límite último.

Se realizó un modelo de anillo continuo que tuviera la misma geometría y el mismo patrón de carga de los ensayos de laboratorio para obtener el factor de reducción de rigidez real de las pruebas experimentales. Posteriormente se obtuvo el factor de reducción de rigidez η con las fórmulas existentes propuestas por diferentes autores.

Una vez obtenidos los factores de reducción de los distintos autores, éstos se aplicaron a un modelo de anillo continuo y se compararon sus deformaciones con las deformaciones reales del modelo experimental (Fig. 13). Del comportamiento global de los anillos, puede observarse que la mayoría de las propuestas representan, con diferente grado de aproximación, la rama elástica lineal obtenida en los experimentos. Solamente el factor propuesto por Hefny y Chua sobreestima grandemente la degradación de rigidez. Así mismo, el factor de Muir Wood sobreestima la reducción de rigidez, cuando existe una fuerte interacción entre anillos, mientras que puede representar la deformación última cuando los anillos presentan una baja interacción entre sí. Finalmente con el factor de Rodríguez y Salmón sobreestima la reducción de rigidez; ya que estos factores se obtuvieron para un tipo de junta mecánica y no plana como en el experimento.

Por otro lado, si se comparan únicamente los factores que representan el comportamiento elástico-lineal de los anillos (Fig. 14), puede observarse que dependiendo de la formulación utilizada, es la aproximación obtenida. En general todas las propuestas representan de forma adecuada el comportamiento elástico lineal de los anillos. Tanto la formulación propuesta por Blom como la de este trabajo son las que presentan menor grado de error y se pueden utilizar para representar el comportamiento elástico lineal de anillos dovelados, con alta o baja interacción entre ellos. Sin embargo, se hace notar que la formulación propuesta por los autores es mucho más sencilla de utilizar que la propuesta por Blom. Lo cual, obviamente, representa una ventaja de una formulación con respecto a la otra.

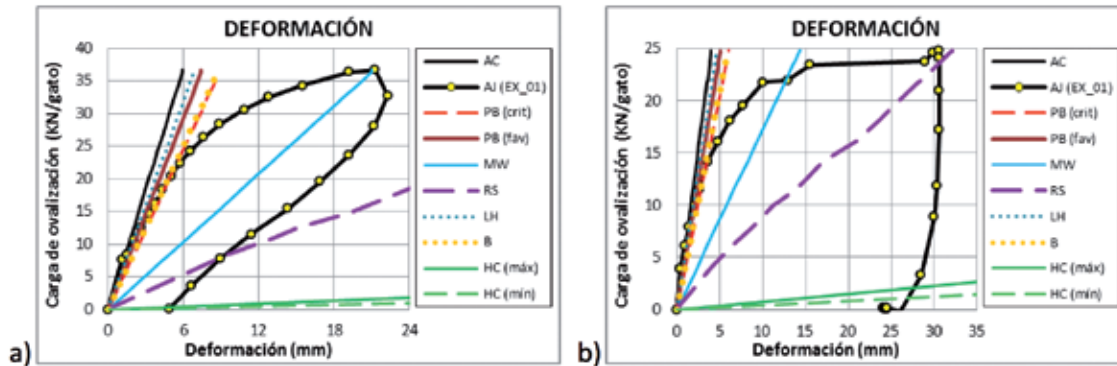


Fig. 13: Deformación del anillo continuo sin reducir (AC) y con rigidez reducida:
a) para anillos con fuerte interacción, b) para anillos con débil interacción.

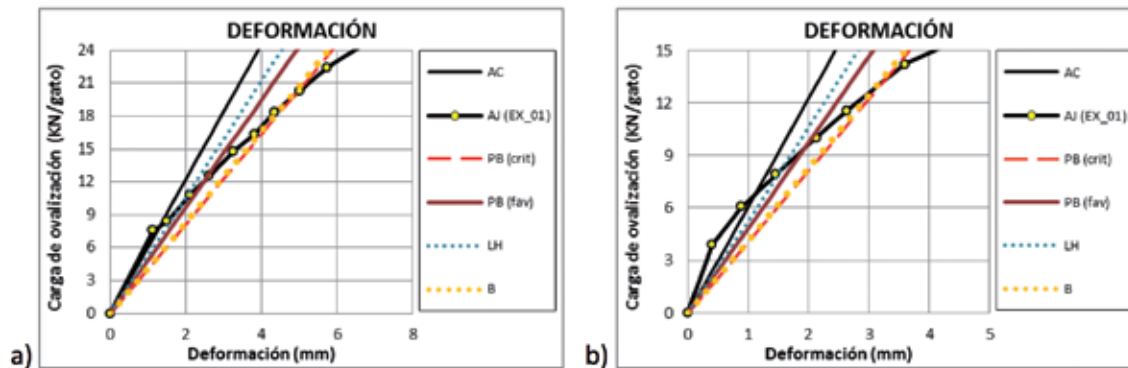


Fig. 14: Deformación de los anillos en el rango elástico del material: a) para el experimento con fuerte interacción entre anillos C01 (carga de fluencia de 24 kN/gato), b) para el experimento con débil interacción entre anillos C02 (carga de fluencia de 15 kN/gato).

10. CONCLUSIONES

Existen diferentes formulaciones en la literatura para obtener el factor de reducción de rigidez, de las cuales la mayoría dan una buena aproximación en el rango elástico lineal. Solamente, los factores propuestos por Hefny y Chua, Rodríguez y Salmón, y el de Muir Wood sobrestiman en diferente grado la reducción de rigidez, por lo que no se recomienda su uso para fines de diseño.

Así mismo, como la formulación propuesta está pensada para ser utilizada en la etapa de diseño, se consideró únicamente el comportamiento elástico lineal de las juntas y del material. De esta forma se observó que la influencia de la relación de cargas se puede despreciar en el rango elástico lineal. Así mismo, las propiedades mecánicas del concreto no afectan al factor de reducción, debido a que son las mismas, tanto en el anillo continuo como en el de dovelas. Por tal motivo, la relación propuesta sólo depende de la geometría de las juntas. Esto permite tener una formulación sencilla, en comparación con la de otros autores, y práctica para ser utilizada en un proceso de diseño.

11. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) por el apoyo económico recibido mediante el proyecto 3550: "Obras de infraestructura hidráulica del valle de México".

REFERENCIAS

- Blom C. B. M. (2002), “Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils”, *Tesis doctoral*, Universidad Tecnológica de Delft, [Disponible en: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:dee23627-1fb0-4308-a536-6120ae1e8db5/>]
- Hefny A. M.; Tan F. C.; Macalevey N. F. (2004), “Numerical study on the behaviour of jointed tunnel lining”, *Journal of the Institution of Engineers*, Singapur, Vol. 44, No. 1, pp. 108-118.
- Hefny A. M. y Chua H. C. (2006), “An investigation into the behavior of jointed tunnel lining”, Civil Engineering Research, School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University.
- Lee K. M.; Ge X. W. (2001), “The equivalence of a jointed shield-driven tunnel lining to a continuous ring structure”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, No. 3, pp. 461-483.
- Luttikholt A. (2007), “Ultimate limit state analysis of a segmented tunnel lining – Results of full scale tests compared to finite elements analysis”, Facultad de Ingeniería Civil y Geociencias, Universidad Tecnológica de Delft.
- Maidl B., Herrenknecht M., Maidl U., Wehrmeyer G. (2011), “Mechanised Shield Tunnelling, 2nd Edition”, Ernst & Sohn, Berlín.
- Muir Wood A. M. (1975), “The circular tunnel in elastic ground”, *Geotechnique*, Vol. 25, No.1, pp. 115-127.
- NTC-C (2004), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto”. Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo I, No. 103-Bis, México.
- Peña F., Galván A. y Meli R. (2010), “Relación teórica momento – rotación de juntas entre dovelas de túneles”, *Memorias del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, León, Guanajuato.
- Peña F., Galván A. y Meli R. (2012), “Comportamiento estructural de juntas entre dovelas de concreto prefabricado para túneles”, *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Vol. 3, No. 2, pp. 2-18.
- Rodríguez M.; Salmón R. (1987), “Comportamiento estructural de dovelas para revestimiento de túneles. Segunda parte: Ensayos en Laboratorio”, *Informe elaborado para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Van der Vliet C. (2006), “Langsvoeggedrag op basis van de elasticiteitstheorie, Een aanscherping van de Janssen-relatie”, Bouwdienst Rijkswaterstaat.