

SIMULACIÓN DEL COLAPSO EN TÚNELES DOVELADOS MEDIANTE LA FORMACIÓN DE ARTICULACIONES EN VIGAS

Enrique Tenorio Montero¹ y Gelacio Juárez Luna²

RESUMEN

Se estudia el mecanismo de colapso en túneles construidos con dovelas mediante el método de elementos finitos. Los túneles se discretizaron mediante elementos finitos viga, resortes longitudinales y rotacionales, estos últimos tienen la capacidad de simular el desarrollo de articulaciones y el comportamiento de las juntas longitudinales, considerando un comportamiento constitutivo momento-rotación de las dovelas. En los apoyos se colocaron resortes axiales elásticos que representan la rigidez del suelo. El colapso en un túnel se debe a los desplazamientos producidos por la ovalización del anillo, interrumpiendo la transmisión de las fuerzas entre las dovelas. Las soluciones numéricas obtenidas para tres túneles se compararon con las reportadas en la literatura, mostrando diferencias relativas en los desplazamientos del 2.30 % y en los momentos flexionantes 1.82 % atribuidas a las estrategias de modelado, concluyéndose que los elementos finitos utilizados en este artículo proporcionan resultados aceptables.

Palabras clave: dovelas, colapso, ovalización, junta, túnel, articulación.

ABSTRACT

The collapse mechanism in segmental tunnels is studied by the finite element method. The tunnels were discretized with beam finite elements, longitudinal and rotational springs, the last have the capability to simulate the development of hinges and the longitudinal joints behavior, considering a moment-rotation constitutive behavior of concrete segments. In the supports, elastic axial springs were placed representing the soil stiffness. The tunnel collapse is attributed to the displacements caused by the ovalization of the ring, interrupting the normal forces transmission between the concrete segments. The computed numerical solutions for three tunnels were compared with those reported in the literature, showing relative differences of 2.30 % and 1.82 % in the displacements and in the bending moments, respectively, attributed to the modeling strategies, concluding that the finite used elements in this paper provide acceptable results.

Keywords: concrete segments, collapse, ovalization, joint, tunnel, hinge.

RESUMO

Estuda-se o mecanismo do colapso em túneis construídos por seguimentos através do método dos elementos finitos. Os túneis serão discretizados por elementos finitos, vigas molas longitudinais e rotacionais, estas últimas têm a capacidade de simular o desenvolvimento das articulações e o comportamento das juntas longitudinais, considerando um comportamento constitutivo momento-rotação dos seguimentos. Como apoio, serão colocadas molas axiais elásticas que representam a rigidez do solo. O colapso em um túnel se deve aos desprendimentos produzidos pela ovalização do anel, interrompendo a transmissão das forças entre os seguimentos. As soluções numéricas obtidas para três túneis foram comparadas com as relatadas na literatura, mostrando diferenças relativas nos desprendimentos de 2.30 % e nos momentos flexionáveis 1.82 %, atribuídas às estratégias de modelagem, concluindo-se que os elementos finitos utilizados neste artigo proporcionam resultados aceitáveis.

Palavras chave: seguimentos, colapso, ovalização, junta, túnel, articulação.

⁽¹⁾ Maestro en Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Estudiante de Doctorado del Posgrado de Ingeniería Estructural. México, D.F.
E-mail: etenorio14@hotmail.com

⁽²⁾ Doctor en Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Materiales, Área de Estructuras, México, D.F.
E-mail: gjl@correo.azc.uam.mx

INTRODUCCIÓN

La construcción de túneles depende del servicio que proporcionará, de la calidad del suelo donde se instalará, del grado de seguridad y desempeño en la construcción, entre otros factores. El método de construcción TBM, por el acrónimo de su nombre en el idioma inglés Tunnel Boring Machine, sobresale en nuestros días entre otros métodos, debido a las ventajas que ofrece respecto a los demás, entre las cuales está la seguridad y el control en la construcción. En este método de construcción casi todas las actividades, entre ellas la excavación de suelos y colocación del revestimiento, se encuentran integradas por una máquina en común que facilita las operaciones. La construcción de túneles por el método TBM, considera el uso de elementos prefabricados de concreto para el revestimiento, conocidos como dovelas, estas piezas son colocadas por un proceso mecanizado en el que se acoplan alternadamente entre ellas formando dos tipos de juntas identificadas como longitudinales y transversales respecto al eje longitudinal del túnel, como se muestran en la Fig. 1. Las juntas transversales se forman entre el acoplamiento de los anillos que conforman el túnel y las juntas longitudinales por la unión de las dovelas que forman un anillo.

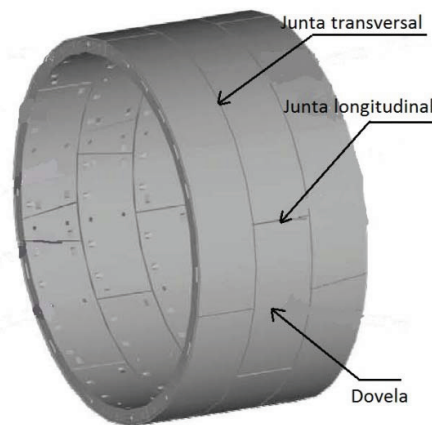


Fig. 1: Estructuración de un túnel construido con dovelas (Luttikholt 2007).

El análisis estructural de túneles formados con dovelas, al igual que otros métodos, considera los efectos de sitio como lo son las cargas superficiales, presiones de suelo y agua y efectos dinámicos. Otros factores que incluyen cargas al túnel son la colocación de la lechada, que se introduce entre la cavidad producida por la excavación y el lado externo de la dovela que colinda con el suelo la cual es conocida como carga de flotación, así como las fuerzas aplicadas por los gatos de la máquina en la colocación de las dovelas.

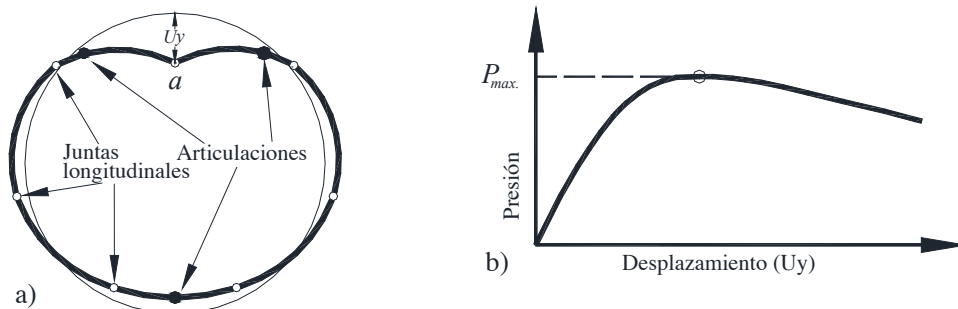


Fig. 2: Mecanismo de colapso en un túnel: a) formación de articulaciones y b) curva carga contra desplazamiento (van der Waart van Gulik 2010).

Una estructura se diseña para garantizar estados límites de falla y de servicio; sin embargo, existe la posibilidad de experimentar cargas que provoquen fuerzas internas y desplazamientos mayores a los de diseño, que produzcan daño en

los elementos estructurales hasta rebasar el estado límite, perdiendo la capacidad de transmitir cargas. Tal es el caso en túneles construidos con dovelas, en los que el inicio del mecanismo de falla se caracteriza por un punto límite de carga, que al rebasarse modifica la geometría y la capacidad de los elementos de concreto, provocando que los elementos de concreto reduzcan su capacidad de transmitir las fuerzas normales por el desarrollo de articulaciones en las dovelas y grandes rotaciones en las juntas, formándose el mecanismo de colapso como el que se muestra en la Fig. 2a. El comportamiento fuerza-desplazamiento observado en el punto superior del túnel exhibe la forma mostrada en la Fig. 2b, en la cual se tiene un valor máximo de carga, que posteriormente presenta un decaimiento de la magnitud al incrementar los desplazamientos (van der Waart van Gulik 2010).

El fenómeno de ovalización fue reportado por Doran *et al.* (2000), quienes estudiaron este efecto en dos túneles existentes debido a la construcción de dos estaciones en las cercanías, así como una línea nueva para un túnel de tránsito masivo. Blom (2002) estudió el mecanismo de colapso en un túnel construido en Holanda utilizando el método elementos finitos, él reportó la formación secuencial de articulaciones, la primera de ellas ocurre en el fondo del túnel y, posteriormente, ante el incremento de cargas de ovalización, otras articulaciones ocurren simultáneamente en la parte superior, como se muestra en la Fig. 2a. Los resultados obtenidos por Blom (2002), fuerza-desplazamiento en el punto *a*, fueron utilizados posteriormente por van der Waart van Gulik (2010) para validar los cálculos que realizó sobre un estudio paramétrico de 3 túneles, cuyos parámetros fueron el diámetro del túnel y el espesor de la dovela. La variación de la curva fuerza-desplazamiento en el punto *a* en función del diámetro fue el aspecto importante de su trabajo, pues concluyó que el parámetro significativo en el mecanismo de falla es el diámetro, puesto que a mayor diámetro, mayor desplazamiento ante la misma fuerza. Lutikholt (2007) evaluó el comportamiento de túneles dovelados sujetos a cargas mayores a las de diseño, utilizando el método de elementos finitos, en los que analizó la ovalización, la capacidad de las juntas longitudinales y transversales. Sus análisis fueron validados con los resultados obtenidos de un ensayo a escala en un arreglo de anillos de dovelas en la Universidad de Tecnologías, Delft University (1999).

En este artículo se determina el mecanismo de falla en túneles dovelados, utilizando elementos finitos disponibles en el software ANSYS. Las acciones de cargas consideradas son: compresión uniforme (σ_1) y no uniforme (σ_2) que incorpora un efecto de ovalización, como se muestran en la Fig.3. Para el análisis se aplicó la fuerza de ovalización incrementalmente, con el propósito de obtener la curva fuerza-desplazamiento en el punto *a* del túnel. Las cargas aplicadas son aquellas reportadas por Blom (2002), también utilizadas por van der Waart van Gulik (2010).

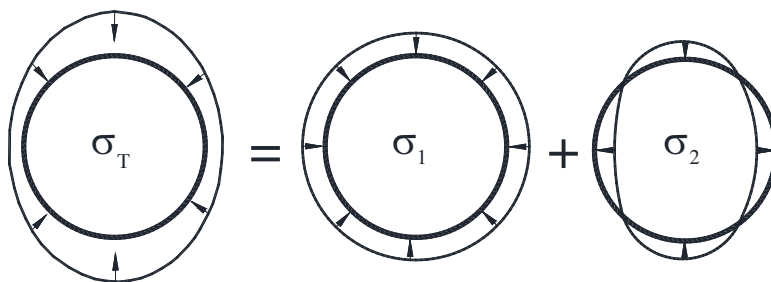


Fig. 3: Presión total del suelo aplicada al revestimiento del túnel.

Se desarrolló el modelado para tres diferentes diámetros, en los cuales se tomó un anillo por separado, asumiendo que la acción de los anillos colindantes no participa. El comportamiento constitutivo de la junta longitudinal entre la unión de las dovelas se realizó con base en las formulaciones de Jansen (1983), y el comportamiento constitutivo momento-curvatura de los elementos vigas es el reportado por van der Waart van Gulik (2010) para la capacidad de las dovelas.

DISCRETIZACIÓN

Con el propósito de validar los resultados, se discretizaron tres túneles con diámetros de 4.325 m, 8.65 m y 17.30 m, también utilizados por van der Waart van Gulik (2010). Los túneles están formados por siete dovelas, los cuales se discretizaron en 12, 20 y 35 elementos viga, respectivamente. El tamaño de los elementos vigas se fue de 200 mm como lo recomienda Lutikholt (2007), con base en la curva momento-curvatura. Cada extremo de los elementos vigas está interconectado por un resorte rotacional y por dos axiales, los cuales simulan en algunos casos las juntas longitudinales

entre dovelas y en otros, el comportamiento de la sección transversal de la dovela que incluye la posible formación de articulaciones a la que se le denomina junta continua, como se muestra en la Fig. 4. Para lograr lo anterior se definieron dos nodos en cada extremo de la viga que se acoplan por el elemento COMBIN39, que está constituido por tres resortes rotacionales y tres axiales. Por tratarse de un estudio en dos dimensiones, sólo se consideró la propiedad del resorte rotacional en la dirección perpendicular al anillo y los resortes axiales en las dos direcciones al plano. Es de interés mencionar que para las dovelas se utilizó el element lineal BEAM3, pues se consideró que la formación de posibles articulaciones se desarrollen en las juntas continuas, que al tener un momento menor a su valor umbral, se comporten en el intervalo elástico-lineal como una dovela continua.

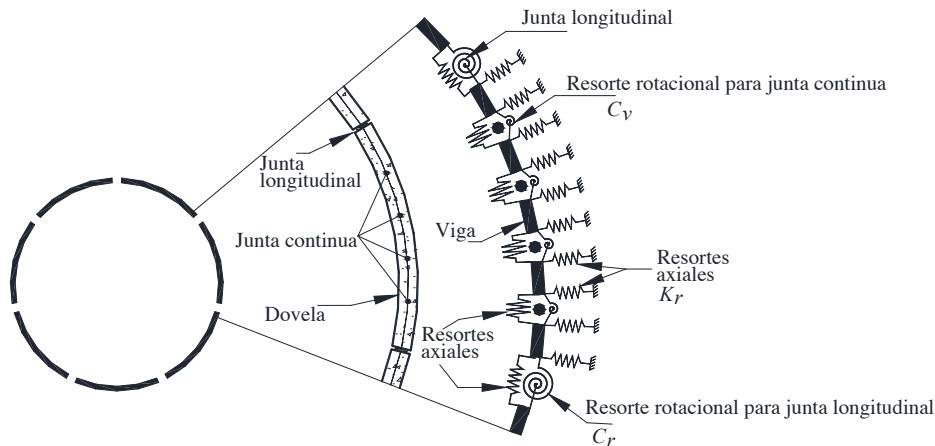


Fig. 4: Discretización estructural del modelo numérico.

A los resortes del elemento COMBIN39, para simular las juntas longitudinales, se les asignó la rigidez rotacional C_r , definida por las pruebas experimentales realizadas por Leonhardt y Reimann (1966), quienes experimentaron dos elementos de concreto unidos por una superficie de contacto sometidos a momentos flexionantes y una fuerza de compresión, posteriormente, el modelo constitutivo de estas juntas fue formulada matemáticamente por Janssen (1983). A las juntas continuas se les asignaron la rigidez rotacional C_v , correspondiente al comportamiento constitutivo momento-curvatura de la dovela de concreto reforzada. En ambas juntas se utilizaron los resortes axiales del elemento COMBIN39 en las dos direcciones del plano, a los que se les asignó una rigidez axial equivalente a la rigidez axial de la viga, para evitar el desplazamiento relativo entre los nodos ubicados en la misma coordenada, ya que sin ellos se forma un mecanismo por inestabilidad numérica.

El suelo circundante se idealizó con elementos resortes longitudinales COMBIN14, con rigidez axial K_r , a los cuales se les asignó un comportamiento elástico lineal, puesto que no se consideró la no linealidad del suelo. Para determinar K_r del elemento se usó: el área tributaria de suelo que está en contacto con el element viga, el módulo elástico del suelo y el radio del túnel evaluado.

El elemento COMBIN39 del software ANSYS tiene la capacidad de simular la no linealidad del comportamiento constitutivo fuerza contra desplazamiento (F-D) ó también momento contra rotación (M- ϕ), que es el caso utilizado en este trabajo, como lo muestra la Fig. 5. La discretización de los elementos utilizados se muestra en la Tabla 1.

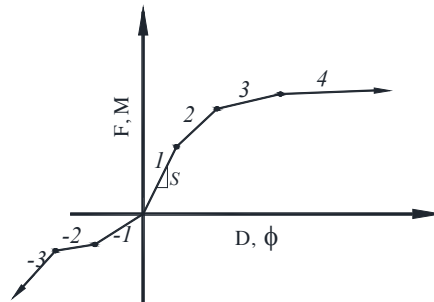


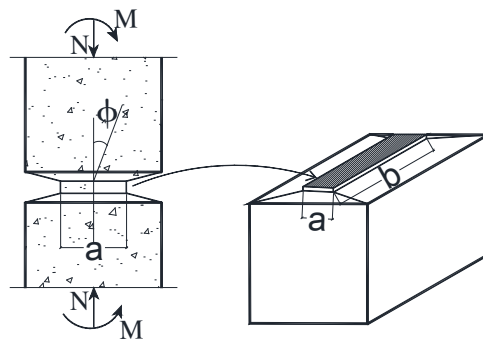
Fig. 5: Capacidad constitutiva del elemento COMBIN39 de ANSYS.

Tabla 1: Número de elementos en los modelos.

Tipo de elemento	diámetro del túnel (m)		
	4.325	8.65	17.30
Viga	100	146	220
Resorte rotacional de juntas continuas	93	139	213
Resorte rotacional de juntas longitudinales	7	7	7
Resorte longitudinal	100	146	220
Resorte longitudinal (soporte de suelo)	104	148	220

MODELOS CONSTITUTIVOS

En esta sección se describen los modelos constitutivos para las juntas longitudinales y continuas de los elementos estructurales utilizados para la solución de los modelos numéricos.

**Fig. 6: Modelo de junta ensayada por Leonhardt y Reimann (1966).**

Junta longitudinal

El comportamiento del contacto entre dos elementos de concreto fue estudiado por Leonhardt y Reimann (1966), quienes realizaron un estudio experimental en el cual sometieron dos elementos de concreto a compresión y a momento flexionante en los que se varió la excentricidad, como se muestra en la Fig. 6. Posteriormente, Janssen (1983) analizó estos datos experimentales para formular las ecuaciones 1 a 3 que forman el modelo constitutivo momento-rotación de una junta longitudinal, el cual depende del Módulo de Young del concreto E_c , la fuerza normal N , el momento flexionante M , la rigidez rotacional C_r , el ancho a y el largo b del área de contacto en la junta y la rotación ϕ .

$$C_r = \frac{M}{\phi} \quad (1)$$

$$C_r = \frac{ba^2 E_c}{12}; \quad \text{si } \phi \leq \frac{2N}{E_c ba} \quad (2)$$

$$C_r = \frac{9ba E_c \left(\frac{2M}{Na} - 1 \right)^2}{8N} M; \quad \text{si } \phi > \frac{2N}{E_c ba} \quad (3)$$

El modelo constitutivo momento-rotación descrito anteriormente, muestra inicialmente un intervalo elástico lineal con pendiente constante hasta que la rotación alcanza un valor $\phi_u \leq \frac{2N}{E_c b a}$, posteriormente se presenta una reducción gradual hasta estabilizarse aproximadamente como una línea inclinada, ver Fig. 7.

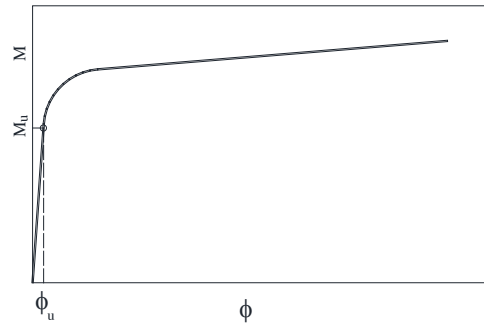


Fig. 7: Comportamiento momento-rotación de la junta longitudinal, Janssen (1983).

Juntas continuas

El modelo constitutivo utilizado en la junta continua de la dovela se obtuvo al analizar el comportamiento constitutivo momento-curvatura de su sección transversal, que es semejante al análisis estudiado para vigas de concreto reforzado. El comportamiento de los elementos a flexión, vigas, estudiado por Park y Paulay (1975), reportan el ensayo realizado a una viga reforzada, con lo que desarrollan un procedimiento para la determinación analítica del comportamiento momento-curvatura. Posteriormente, Nilson *et al.* (2002) demuestran la importancia de la obtención del modelo constitutivo momento-curvatura como requerimiento para el estudio del estado límite de las estructuras sometidas a flexo-compresión, que es el caso de las dovelas utilizadas para revestimientos de túneles, en condición de capacidad última.

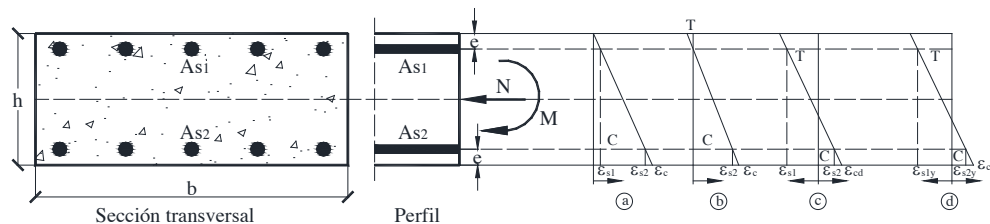


Fig. 8: Evolución del esfuerzo en la dovela de concreto.

Van der Waart van Gulik (2010) analizó la capacidad de una dovela reforzada hasta la deformación última del concreto considerando cuatro etapas, mostradas en la Fig. 8, en la cual se observa el momento flexionante M , la fuerza normal N , la deformación ε , el área de refuerzo A_{s_i} , las zonas consideradas en tensión T y compresión C ; procedimiento que se utilizó en este artículo para el comportamiento constitutivo momento-curvatura de los resortes rotacionales en las juntas continuas. Las cuatro etapas consideradas fueron cuando: a) la mayor magnitud del esfuerzo de la fibra superior en tensión es cero, b) el valor máximo del refuerzo en tensión es cero, c) se alcanzó el valor de diseño de esfuerzo a compresión en el concreto y d) se alcanzó el estado límite último de la zona a compresión.

El comportamiento constitutivo momento-curvatura para la dovela de concreto fue calculado con base a van der Waart van Gulik (2010), como se muestra la Fig. 9, en el cual se indican los puntos correspondientes a la evaluación de las cuatro etapas descritas en la Fig. 8. El procedimiento permite la obtención de cuatro etapas, no obstante se aprecian tres cambios de pendientes en el comportamiento constitutivo del elemento de concreto, por lo que se utilizó un modelo constitutivo momento-curvatura multilíneal de tres intervalos comprendidos, respectivamente, desde o-b, b-c y c-d.

El momento M y la curvatura κ , se definen con las ecuaciones 4 y 5, respectivamente, las cuales se formularon para las cuatro etapas con los parámetros mostrados en la Fig. 10, que son: las fuerzas normales producto de la sección efec-

tiva del concreto N_c y las desarrolladas en los elementos de acero de refuerzo N_{si} , aplicadas en cada coordenada x_i , que deben cumplir la igualdad $\sum N_i = N$, A_{s1} y A_{s2} corresponden al acero de refuerzo superior e inferior respectivamente.

$$M = \sum N_i x_i \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{\varepsilon}{ah} \quad (5)$$

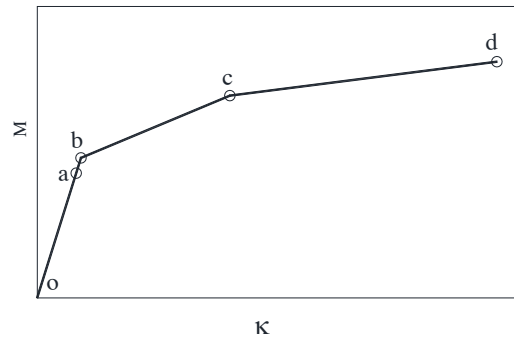


Fig. 9: Comportamiento momento-curvatura de las dovelas, van der Waart van Gulik (2010).

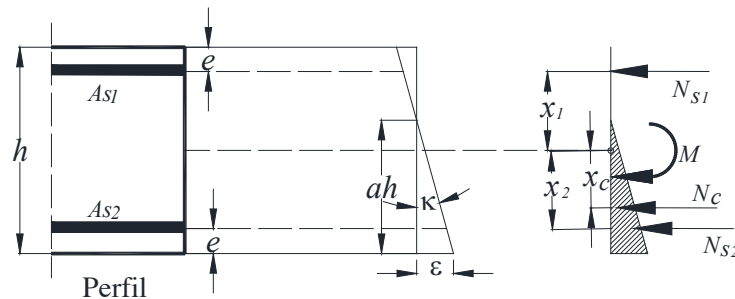


Fig. 10: Curvatura y capacidad de momento en la sección de la dovela.

EJEMPLOS NUMÉRICOS

Se presentan ejemplos correspondientes a tres túneles con diferentes diámetros sometidos a presión uniforme y de ovalización, como se muestra en la Fig. 3, incrementada hasta el desarrollo del colapso.

Descripción

Los túneles, con la geometría mostrada en la Fig. 11, se discretizaron como se indicó en la sección de discretización, a los que se les asignaron, respectivamente, las propiedades mecánicas del acero, concreto y suelo mostradas en la Tabla 2. A los modelos numéricos se les impuso una presión uniforme de $\sigma_1 = 0.5$ MPa y una presión no uniforme de ovalización σ_2 de 0.32 y 0.43 MPa, las cuales se aplicaron gradualmente por etapas; primero, la presión uniforme y, posteriormente, la presión de ovalización.

Con las fuerzas normales N , calculadas con la ecuación 6, cuyos valores son 1131.25, 2262.5 y 4525 kN/m, respectivamente para cada túnel, se determinaron los modelos constitutivos de las juntas longitudinales y de las continuas en la sección de las dovelas, los cuales se muestran respectivamente en la Fig. 12. Las expresiones matemáticas de Janssen

(1983), en las ecuaciones 1 a 3, permiten obtener el comportamiento constitutivo de la junta longitudinal en momento-rotación, mientras que los valores del comportamiento constitutivo de la junta continua en las dovelas se calcula en momento-curvatura, en el elemento resorte rotacional COMBIN39 de ANSYS es posible implementar el modelo constitutivo con comportamiento momento-rotación, por lo cual los valores momento-curvatura son multiplicados por la longitud del elemento finito viga correspondiente para cada modelo numérico. Es de interés mencionar que las curvas para el túnel con diámetro de 8.65 m son congruentes con las obtenidas por van der Waart van Gulik (2010).

$$N = \sigma_1 \frac{d}{2} \quad (6)$$

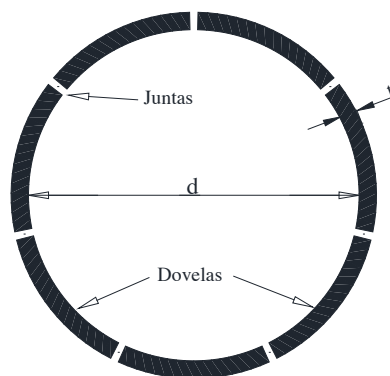


Fig. 11. Geometría del túnel.

Tabla 2: Parámetros para los 3 túneles, van der Waart van Gulik (2010).

Parámetro	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
a (altura del área de contacto)	0.85 m	0.170 m	0.34 m
b (ancho del área de contacto)	1.338 m	1.338 m	1.338 m
Ancho de las dovelas	1.50 m	1.50 m	1.50 m
t (espesor de la dovela)	0.200 m	0.400 m	0.800 m
d (diámetro interno)	4.325 m	8.65 m	17.30 m
E _{oed} (módulo elástico del suelo)	38 MPa	38 Mpa	38 MPa
E _c (módulo elástico del concreto)	33500 MPa	33500 MPa	33500 MPa
f' _c (esfuerzo de diseño del concreto)	27 MPa	27 MPa	27 MPa
Área del refuerzo de acero (superior e inferior)	3.24 cm ²	6.48 cm ²	12.96 cm ²
f _y (esfuerzo de fluencia en el acero)	435 MPa	435 MPa	435 MPa

El anillo formado por las dovelas es soportado por el suelo circundante, el cual se idealiza con resortes asumiendo un comportamiento elástico lineal. Debido a la ovalización del anillo, como se muestra en la Fig. 13a, el suelo reduce su capacidad de soporte en las regiones donde el diámetro disminuye, lo que justifica el no considerar el soporte en esas zonas (Blom, 2002), ver Fig. 13b.

La rigidez de los resortes que representan el suelo se calculan con la ecuación 7, cuyos parámetros representan: la rigidez longitudinal del resorte K_r , el módulo elástico del suelo E_{oed} obtenido mediante una prueba de compresión, el radio del túnel r , un factor de reducción de rigidez del suelo α_s y la rigidez del resorte A_r .

$$\frac{K_r}{A_r} = \alpha_s \frac{E_{oed}}{r} \quad (7)$$

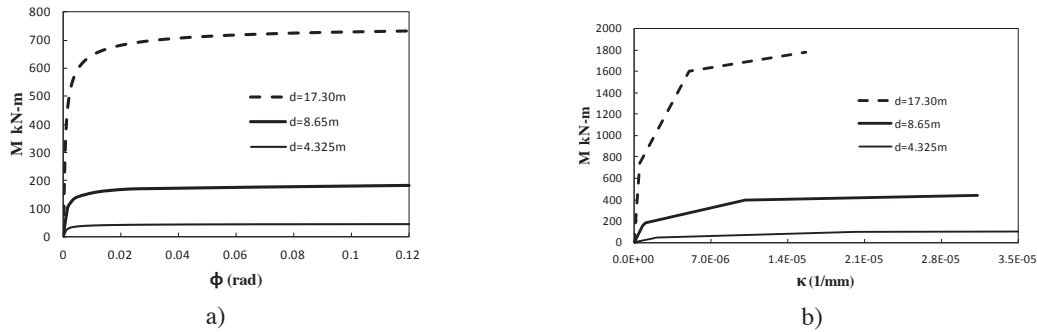


Fig. 12: Modelos constitutivos: a) $M-\phi$ en la junta longitudinal y b) $M-\kappa$ en la junta continua.

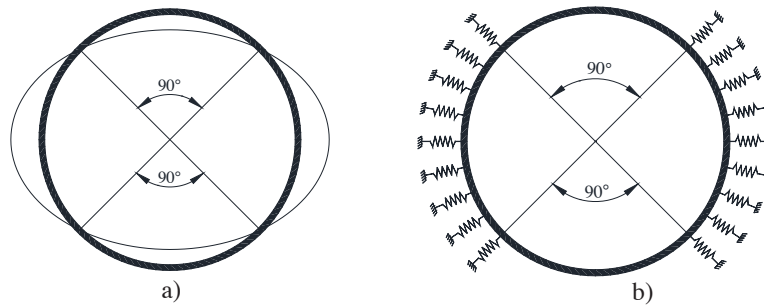


Fig. 13: a) Deformación del anillo y b) soportes aportados por el suelo.

El factor de reducción en la rigidez del suelo α_s , tiene un valor de 0.65 cuando se trata del caso de compresión no uniforme (ovalización) y 1.0 cuando el caso sea de compresión uniforme (Blom 2002), en este estudio se tomó el valor de 1.0, utilizado también por van der Waart van Gulik (2010).

Resultados

1. Desplazamientos por etapas de carga

En la primera etapa de carga, la presión constante (σ_1), el túnel no desarrolla grandes deformaciones, puesto que permanece uniformemente comprimido, como se muestra en la Fig. 14a, y en la segunda etapa de carga, presión no uniforme (σ_2), el túnel mostró un desplazamiento mayor en el punto superior, ver Fig. 14b.

2. Desplazamiento contra presión de ovalización

El desplazamiento contra presión de ovalización del punto superior del anillo se muestra en la Fig. 15, para cada uno de los tres túneles, en los cuales se aplicó una presión de ovalización máxima de 0.3202 MPa en los túneles con $d=4.325$ m y 17.30 m, y de 0.43 MPa para el $d=8.650$ m con el propósito de comparar los resultados con los reportados en la literatura.

Se aprecian diferencias, mostradas en la Tabla 3, entre las soluciones, debidas a las consideraciones del momento de inercia de los elementos finitos utilizados por van der Waart van Gulik (2010), quién discretizó las dovelas con elemen-

tos viga y resortes rotacionales conectados en los nodos. A los elementos viga les asumió un comportamiento elástico lineal, en los que se intercambié el momento de inercia entre ejes locales para incrementar la rigidez a flexión, con la finalidad de llevar los efectos no lineales a los resortes rotacionales, los cuales son capaces de simular agrietamiento del concreto y la fluencia del acero de refuerzo.

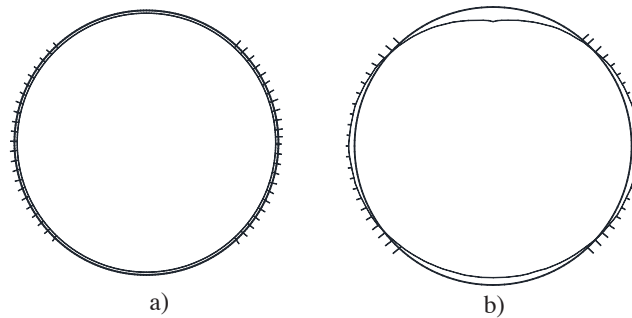


Fig. 14: Desplazamiento por compresión a) uniforme y b) no uniforme (ovalización).

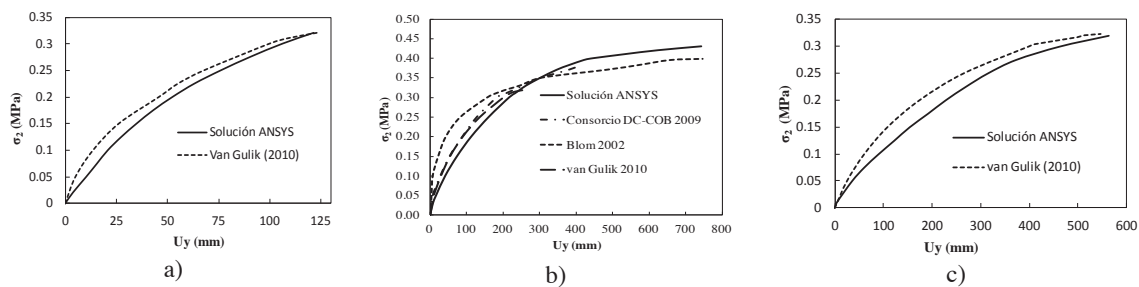


Fig. 15: a) Deformación del anillo y b) soportes aportados por el suelo.

El túnel correspondiente al diámetro $d=8.65$ m también fue analizado por Blom (2002), el Consortium DC-COB (2009) y van der Waart van Gulik (2010) cuyos resultados, incluyendo los de este trabajo, se muestran en la Fig. 15b, donde se observa que para presiones de hasta 0.35 MPa se obtienen desplazamientos mayores respecto a las demás; sin embargo, para presiones mayor esta tendencia cambia. Este efecto se debe a las diferencias en los momentos de inercia, y las estrategias de modelado mencionadas anteriormente, las cuales ofrecen mayor oposición a los desplazamientos respecto a los elementos utilizados en este trabajo.

Tabla 3: Comparación de desplazamientos máximos.

Diámetro del túnel (m)	van der Waart van Gulik (2010) (mm)	ANSYS (mm)	Error relativo
4.325	123	121	0.82 %
8.650	265	253	2.30 %
17.30	546	564	1.62 %

3. Momentos flexionantes

Los momentos flexionantes calculados para una presión de ovalización $\sigma_2=0.3202$ MPa, se muestran en la Fig. 16 para los tres diferentes túneles. En el caso del túnel de 8.650 m de diámetro, la magnitud de momento calculado es de 397.03

kN-m en dos puntos en la parte superior, que es 1.82 % relativamente menor al obtenido por van der Waart van Gulik (2010), quién reporta un valor máximo de 411.72 kN-m. Este error se debe a las diferencias en rotaciones, ya que los modelos constitutivos son semejantes.

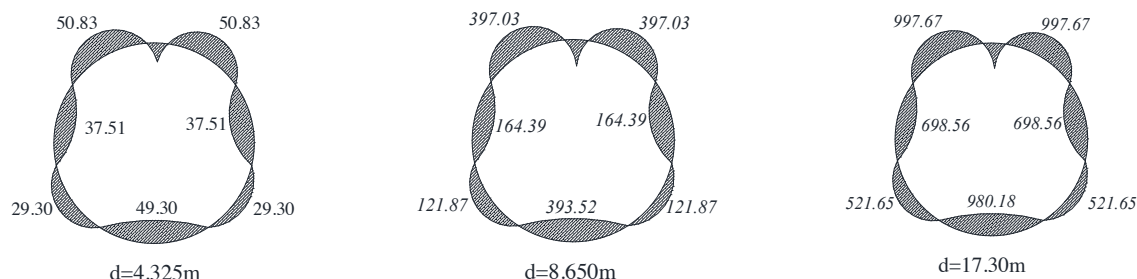


Fig. 16: Momentos flexionantes (kN-m) para $\sigma_2=0.3202$ MPa en cada túnel.

4. Desarrollo del mecanismo de colapso

La Fig. 17a, muestra la configuración deformada correspondiente al nivel de presión cuando se desarrolla la primera articulación, la cual se ubica en la parte inferior del túnel, la Fig. 17b muestra para cuando se forman las dos de la parte superior. En el anillo con $d=4.325$ m, la primera articulación ocurrió para una presión $\sigma_2=0.05$ MPa, las superiores para $\sigma_2=0.126$ MPa; de igual forma, para el $d=8.650$ m, la primera se desarrolló para $\sigma_2=0.06$ MPa y las simultáneas de la parte superior cuando $\sigma_2=0.141$ MPa; y para $d=17.300$ m la primera se formó para $\sigma_2=0.110$ MPa y las de la parte superior en $\sigma_2=0.180$ MPa. La Fig. 17c muestra la ubicación y secuencia de las articulaciones del mecanismo de colapso, el cual es reportado por Blom (2002) y van der Waart van Gulik (2010), quienes no reportaron las presiones de ovalización en las que ocurren las articulaciones.

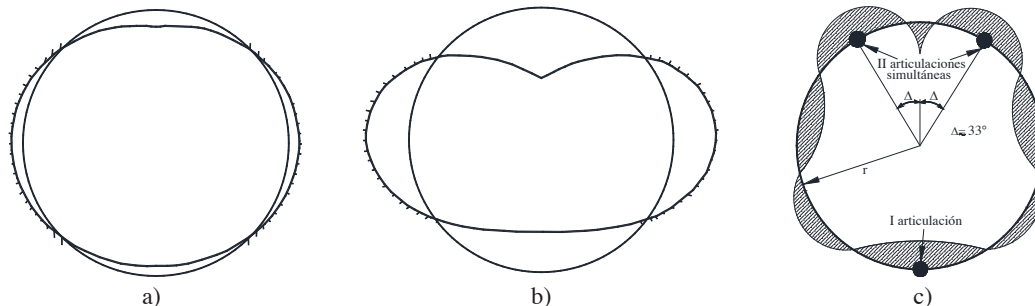


Fig. 17: Desarrollo de articulaciones: a) en la parte inferior b) en la parte superior y c) ubicación.

CONCLUSIONES

Se estudió el mecanismo de colapso de túneles construidos con dovelas de concreto, mediante simulación numérica utilizando el software de elementos finitos ANSYS, debido a cargas de ovalización. Los aspectos sobresalientes de este trabajo son:

- En los resultados se observó que en la etapa de carga uniforme la estructura no presenta desplazamientos considerables, puesto que la estructura se comprime uniformemente, no así cuando actúan la presión de ovalización, puesto que se desarrollan articulaciones en algunos puntos y desplazamientos considerables, principalmente en la parte superior del túnel.

- Van der Waart van Gulik (2010) desarrolló los modelos numéricos modificando el momento de inercia de la sección transversal de la dovela incrementando el peralte diez veces y decrementando el ancho la misma magnitud, pero manteniendo la rigidez axial del elemento. Lo anterior para que el comportamiento no lineal de las dovelas sea llevado a los resortes rotacionales colocados entre elementos. Esta consideración no se consideró en los modelos desarrollados en este trabajo; sin embargo, se obtuvieron resultados aceptables con diferencias relativas atribuidas a las diferencias de inercia entre ambas soluciones.

- Las desplazamientos obtenidos se compararon con los reportados por van der Waart van Gulik (2010), entre ellos se observan diferencias, las cuales se deben a la asignación de los momentos de inercia con grandes magnitudes que utilizaron los autores de los trabajos comparados, lo cual restringe los desplazamiento por flexión.
- Las diferencias relativas máximas entre las soluciones de van der Waart van Gulik (2010) y las obtenidas con ANSYS fueron de 1.82 % en los momentos flexionantes y 2.30 % en los desplazamientos. Estos resultados muestran la capacidad de los modelos numéricos desarrollados en este trabajo para simular el mecanismo de colapso de túneles dovelados.
- En las curvas de desplazamiento contra presión de ovalización para $d=8.650$ m se observa que en presiones menores de 0.35 MPa, los desplazamientos obtenidos con los elementos del software ANSYS son mayores que los reportados por Waart van Gulik (2010), y para valores mayores de $\sigma_2=0.35$ MPa, los resultados son contrarios, lo cual indica que los modelos reportados en la literatura presentan un decaimiento en la rigidez respecto a los modelos resueltos en este trabajo.
- Otro valor comparado fue el momento máximo obtenido, aplicando $\sigma_2=0.3202$ MPa para ser congruente con los valores utilizados en los modelos de la literatura, en el cual también se observó un valor menor respecto al de van der Waart van Gulik (2010); además se concluye que las rotaciones obtenidas con la simulación numérica a través de ANSYS son menores, dado que el comportamiento constitutivo de los elementos finitos es semejante para ambas soluciones.
- Aún cuando existen diferencias numéricas entre las soluciones obtenidas en este trabajo y la comparada, se concluye que es factible el uso de modelos discretizados con elementos del software ANSYS para la solución del problema de ovalización en túneles.
- Existen otras aproximaciones como lo son los elementos viga con discontinuidades embebidas, que tienen la capacidad de desarrollar articulaciones en el dominio del elemento viga que se quiera considerar; las cuales se presentaran en publicaciones futuras para estudiar el colapso en túneles.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Metropolitana por las facilidades proporcionadas a la realización de este trabajo y al patrocinio proporcionado por el Programa de Mejoramiento del Profesorado. El primer autor agradece la beca de estudios de Doctorado al CONACyT y a la Universidad Tecnológica de Panamá por las facilidades otorgadas.

REFERENCIAS

- Blom, C.B.M (2002), "Design philosophy for concrete linings of tunnels in soft soils", *Ph. D. Thesis*, TU Delft University of Technology, Holanda.
- Consortium DC-COB (2009), "Bezwijkveiligheid van boortunnels", Deltares, TU Delft University of Technology, Holanda.
- Doran, S. R., Wood T., Tham S. K., Copsey J. N., Wen D. (2000), "The assessment of limits for the movement of subway tunnels and trackwork due to adjacent construction", *Tunnel and underground structures*, Balkema, Holanda, pp. 495-500.
- Janssen, P. (1983), "Tragverhalten von Tunnelausbauten mit Gelenktübbings", *Reporte*, University of Braunschweig, Departamento de Ingeniería Civil, Instituto de Análisis Estructural, No. 83 - 41, Alemania.
- Leonhard, F., Reimann, H., (1966), "Betongelenke", *Der Bauingenieur*, Vol. 41, pp. 49-56, Alemania.
- Luttikholt, A., (2007), "Ultimate Limit State Analysis of a Segmented Tunnel Lining", *Tesis de Maestría*, TU Delft University of Technology, Holanda.

Nilson, A. H., Darwin, D. (2002), “Design of concrete structures”, 13a edición McGraw Hill, Estados Unidos.

Park, R., Paulay, T. (1975), “Reinforced concrete structures”, 1a edición, University of Canterbury, Christchurch, Nueva Zelanda, John Wiley and Sons, New York.

Stevin Laboratory (1999), “Botlek Railway Tunnel full-scale test”, TU Delft University Technology, Holanda.

Van der Waart van Gulik, T.G. (2010), “Snap through of large shield driven tunnels”, *Tesis de Maestría*, TU Delft University of Technology, Holanda.