

# COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE JUNTAS ENTRE DOVELAS DE CONCRETO PREFABRICADO PARA TÚNELES

Fernando Peña, Arturo Galván Chávez y Roberto Meli<sup>1</sup>

## RESUMEN

En este trabajo se estudia el comportamiento mecánico de juntas planas típicas similares a las utilizadas en túneles dovelados, mediante pruebas de laboratorio en modelos a escala. Se aplicaron cargas axiales excéntricas para simular el comportamiento de las juntas, las cuales se incrementaron hasta la falla del espécimen. Asimismo, se propone una relación teórica momento–rotación, la cual representa el comportamiento mecánico de las juntas entre dovelas de túneles. La curva propuesta se compone de una parte lineal inicial y de una rama plástica.

**Palabras clave:** Túnel; dovelas; juntas; relación momento–rotación.

## ABSTRACT

The aim of this paper is to study the mechanical behavior of typical planar joints, similar to those used in segmented tunnels, by means of experimental tests performed in scaled down models. In addition, a theoretical moment–rotation relation that represents the mechanical behavior of joints between segments of tunnels is proposed. The proposed curve consists of an initial linear part and a plastic branch.

**Keywords:** Tunnel; dowels; joints; moment–rotation relation.

## RESUMO

Neste trabalho é estudado o comportamento mecânico de juntas planas típicas similares às utilizadas em túneis aduelados, mediante provas de laboratório em modelos de escala. São aplicadas cargas axiais excêntricas para simular o comportamento das juntas, as quais se incrementarão até a falha da espécime. No entanto, propõe-se uma relação teórica momento–rotação que representa o comportamento mecânico das juntas entre aduelas de túneis. A curva proposta se compõe de uma parte linear inicial e de uma haste plástica.

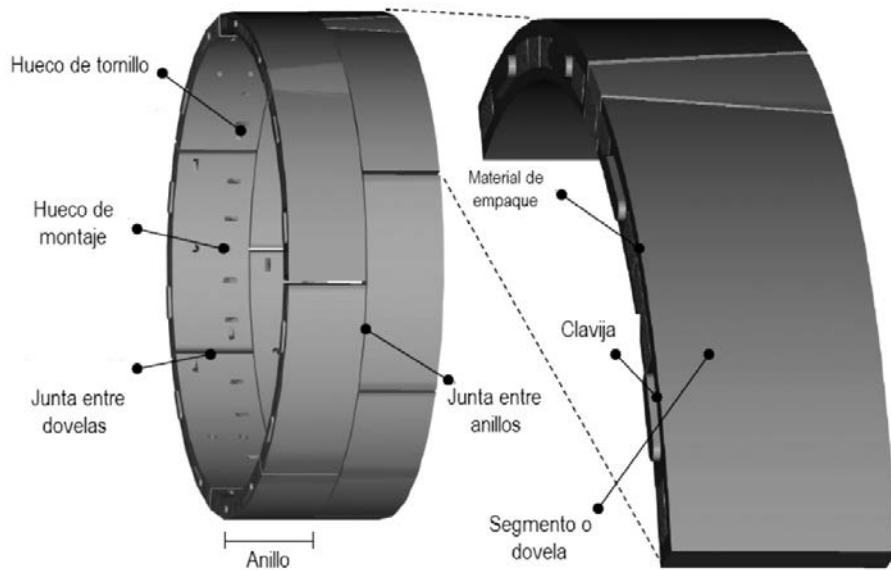
**Palavras chave:** Túnel, aduelas, juntas, relação momento-rotação.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los métodos más utilizados en los últimos años en la construcción de túneles en suelos blandos (que no son autosoportantes), tanto en México como en otros países, es el escudo o máquina tuneladora. La ventaja de esta técnica constructiva es que permite ir excavando el túnel mientras es colocado un revestimiento primario formado por dovelas prefabricadas que sirve como ademe temporal o definitivo a la excavación. Esto ha permitido excavar túneles cada vez de mayor diámetro, a mayor profundidad, con mayor velocidad y con mayor precisión. Ejemplo de esto son los túneles que actualmente se encuentran en construcción en la Ciudad de México, tanto para drenaje como para sistema de transporte.

Las dovelas son generalmente de concreto reforzado y se colocan gracias a una máquina perforadora que también se encarga de la excavación del túnel. En dicha máquina, un elevador levanta las dovelas por succión, que posteriormente son llevadas al montador, el cual a medida que avanza la tuneladora va colocando las dovelas formando así los anillos. Entre dovela y dovela se localizan juntas, así como entre anillo y anillo (Fig. 1).

<sup>1</sup> Instituto de Ingeniería de la UNAM.



**Fig. 1.** Esquema de las partes básicas de un anillo dovelado (Blom, 2002).

Una de las mayores dudas sobre la eficiencia del revestimiento de anillos de dovelas está relacionada con el funcionamiento de las conexiones entre dovelas y entre anillos sucesivos. Esto debido a que una de las principales características de los túneles dovelados es que no se pueden considerar como un anillo continuo, debido precisamente a la existencia de las juntas entre dovelas y anillos. Por tanto, es necesario tomar en cuenta la influencia de éstas en el cálculo de las fuerzas internas y los desplazamientos en el anillo. Se debe garantizar que las juntas mantengan la estanqueidad, sobre todo a largo plazo, y que el anillo resista los empujes del suelo sin deformaciones excesivas y sin fallas estructurales.

En los sistemas modernos de endovelado se han mejorado sustancialmente los sellos para impermeabilizar las conexiones transversales y longitudinales; así como también se han modificado las conexiones entre dovelas y entre anillos, de modo que la transmisión de esfuerzos se realiza por contacto directo entre las superficies de concreto, sin conexiones atornilladas adicionales. De este modo, se confía en la presencia de fuerzas axiales importantes para asegurar la continuidad entre los distintos elementos del revestimiento.

En el diseño estructural de túneles es de especial interés el estudio de los factores que inducen los esfuerzos en el túnel y que pueden causar la falla del mismo (Hefny *et. al.*, 2004). Entre estos podemos mencionar:

- El comportamiento mecánico de las juntas entre dovelas.
- El número de juntas y su posición relativa con respecto a las cargas.
- La relación entre las cargas verticales y horizontales que actúan sobre el túnel.

Asimismo, diversos autores (BTS, 2004; Blom, 2003; Hefny *et. al.*, 2004; Lee y Ge, 2001; Lee *et. al.*, 2001; Xiaochun *et. al.*, 2006) han estudiado analíticamente el comportamiento mecánico de las juntas entre dovelas. Sin embargo, son pocos los autores que han realizado pruebas experimentales. Entre éstos, podemos destacar los trabajos realizados por: Rodríguez y Salmón (1987), Hordijk y Gijsbers (1996), Schreyer y Winselmann (1998, 2000) y Teachavorasinsuk y Chub-Uppakarn (2009). De estos estudios se concluye que:

- Conforme aumenta el número de juntas en un anillo, el momento flexionante y las fuerzas actuantes en las dovelas decrecen.
- Existe un número crítico de juntas, después del cual, si se sigue aumentando el número de juntas, no existe una disminución significativa del momento flexionante.
- La orientación de las juntas es un factor determinante en el nivel de esfuerzos presente en el anillo.
- 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.

- Para el caso de juntas con pernos, la rigidez a rotación de la junta se incrementa cuando hay un incremento en el presfuerzo aplicado a los pernos.

- El momento máximo resistente positivo es mayor que el negativo, para el caso de juntas con pernos excéntricos. En algunos casos, esta diferencia puede ser de hasta seis veces.

- El comportamiento mecánico de la junta no sólo depende de su geometría y del material de las dovelas, sino que también depende de las cargas aplicadas y del tipo de conexión usada: con pernos o sin ellos, con juntas de contacto, etc.

Lo anterior nos dice que el tener un buen conocimiento del comportamiento de la junta permitirá realizar modelos numéricos más representativos de la realidad. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento mecánico de las juntas de un túnel típico construido en suelo blando por medio de pruebas experimentales. Para tal efecto, se realizaron pruebas experimentales de juntas típicas de dovelas. Las pruebas fueron realizadas en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, mediante modelos a escala de juntas planas que representaran el revestimiento primario de un túnel típico, con el fin de reproducir el comportamiento mecánico de la junta entre dovelas de un anillo completo.

Este artículo se divide en tres partes. En la primera se describirá a manera de introducción, el estado del arte sobre el comportamiento de las juntas entre dovelas. En la segunda parte se presentarán las pruebas experimentales; mientras que en la tercera se propone una relación momento–rotación para el estudio analítico de las juntas.

## COMPORTAMIENTO TEÓRICO DE LAS JUNTAS ENTRE DOVELAS

Hasta hace algunos años, las juntas que se empleaban en los túneles construidos en México con escudo tenían una conexión mecánica mediante tornillos de acero alojados en cajas de acero insertadas en los extremos de las dovelas. Los tornillos transmitían tensiones y cortantes entre dovelas contiguas, dando al anillo una continuidad y una rigidez significativa que les permitía limitar las deformaciones y distorsiones, así como posibles corrimientos entre dovelas y entre anillos.

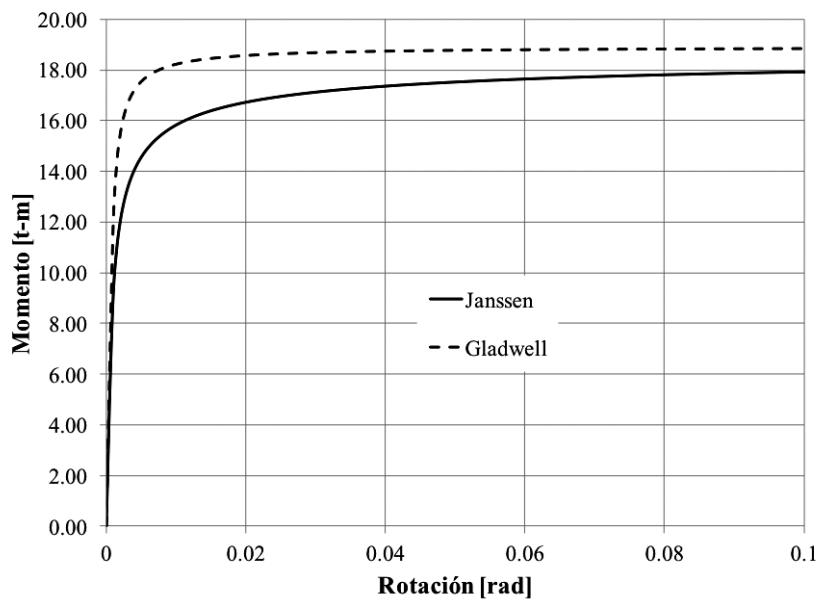
Actualmente, el tipo de junta que se utiliza en la práctica es el de la junta plana sin conectores (Fig. 2). En este tipo de juntas, los tornillos que se llegan a colocar tienen únicamente la función de permitir el posicionamiento correcto de las dovelas durante la construcción, pero no se les asigna función estructural específica. El comportamiento de la junta está influenciado significativamente por la fuerza normal  $N$  presente en la junta, la cual es debida 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.



**Fig. 2.** Junta plana típica de una dovela.

Cuando el momento flexionante  $M$  es de pequeña magnitud, se tendrá un esfuerzo de compresión en toda la sección transversal de la junta. Esto conlleva a que la junta no se abra y a que el momento flexionante produzca pequeñas rotaciones  $\phi$ . Si el largo de la junta  $h$  es igual al de la dovela, entonces no se tendrán curvaturas adicionales. Sin embargo, cuando el ancho de la junta es pequeño, comparado con el ancho de la dovela, entonces la curvatura de la junta producirá grandes rotaciones; aún si no hay una abertura de la junta.

Debido a que la junta no puede transmitir esfuerzos de tensión, conforme se incremente el momento flexionante llegará un punto en el que, en uno de los extremos, la presión será igual a cero. Esto conlleva a que la junta se abra provocando rotaciones adicionales. Teóricamente, este estado se obtiene cuando el momento flexionante  $M$  es igual a  $M=1/2Nh$ . La Fig. 3 muestra una curva típica momento–rotación de una junta plana sin pernos. Se observa una parte inicial lineal y una parte no lineal, la cual inicia con la abertura de la junta.



**Fig. 3.** Comparación de la respuesta momento–rotación obtenidas con las relaciones de Janssen y Gladwell.

Varios autores han propuesto expresiones para definir una relación bilineal, para juntas no atornilladas, donde el momento resistente está dado por la carga axial actuante en el anillo. Por ejemplo, la ecuación 1 muestra la relación propuesta por Janssen (Van der Vliet, 2006), quien la obtuvo a partir de una relación lineal de esfuerzos y deformaciones (Fig. 3). Asimismo, considera que la junta no es capaz de desarrollar esfuerzos de tensión; además de que considera las dovelas como elementos elástico–lineales. Esta relación está en función de la carga axial  $N$ , la geometría de la junta (largo  $h$  y ancho  $b$ ) y del módulo de elasticidad  $E$ .

$$\varphi = \begin{cases} \frac{12 \frac{M}{Ebh^2}}{8N} & \text{si } M < \frac{1}{6}Nh \\ \frac{8N}{9Ebh\left(\frac{2M}{Nh}-1\right)^2} & \text{si } M \geq \frac{1}{6}Nh \end{cases} \quad (1)$$

Por otra parte, la ecuación 2 muestra la relación propuesta por Gladwell (Van der Vliet, 2006), quien la propone, basándose en la Teoría de la elasticidad, para el caso en que la distribución de esfuerzos deja de ser lineal (Fig. 3). Al igual que Janssen, Gladwell propone una rama elástica y una no-lineal. En esta relación, el momento está en función de la carga axial, la geometría de la junta y las propiedades elásticas del material (módulo de elasticidad  $E$  y coeficiente de Poisson  $v$ ).

$$\mu = \begin{cases} \frac{\pi}{16(1-\nu^2)} \Phi & \text{si } \Phi \leq \frac{8(1-\nu^2)}{\pi} \\ 1 - \frac{4(1-\nu^2)}{\pi} \frac{1}{\Phi} & \text{si } \Phi > \frac{8(1-\nu^2)}{\pi} \end{cases} \quad (2)$$

donde:  $\mu = \frac{M}{1/2Nh}$ ;  $\Phi = \varphi \frac{hbE}{N}$

Existen tres diferencias principales entre ambas leyes (Fig. 3):

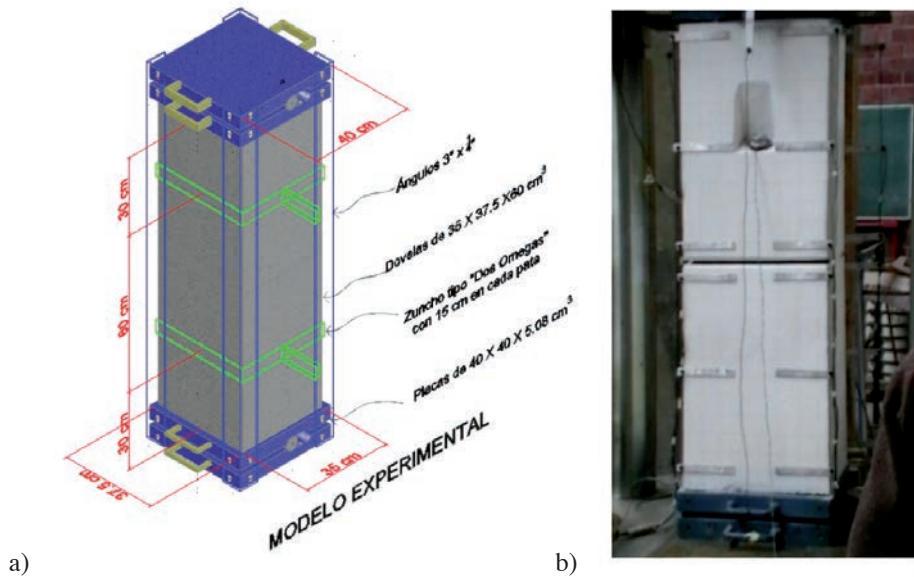
- La rigidez inicial obtenida por Gladwell es mayor que la de Janssen.
- De acuerdo con Gladwell, la junta requiere un mayor momento flexionante para que se abra.
- La parte no-lineal propuesta por Gladwell alcanza más rápidamente el momento máximo teórico.

A pesar de los estudios teóricos de Janssen y Gladwell, la caracterización del comportamiento de las juntas en el estado límite de falla ha sido poco estudiada. Debido a esto, en este trabajo se presenta un estudio experimental de las juntas entre dovelas de un túnel de drenaje típico construido en la ciudad de México. Este estudio tiene como objetivo principal la caracterización experimental del comportamiento de las juntas.

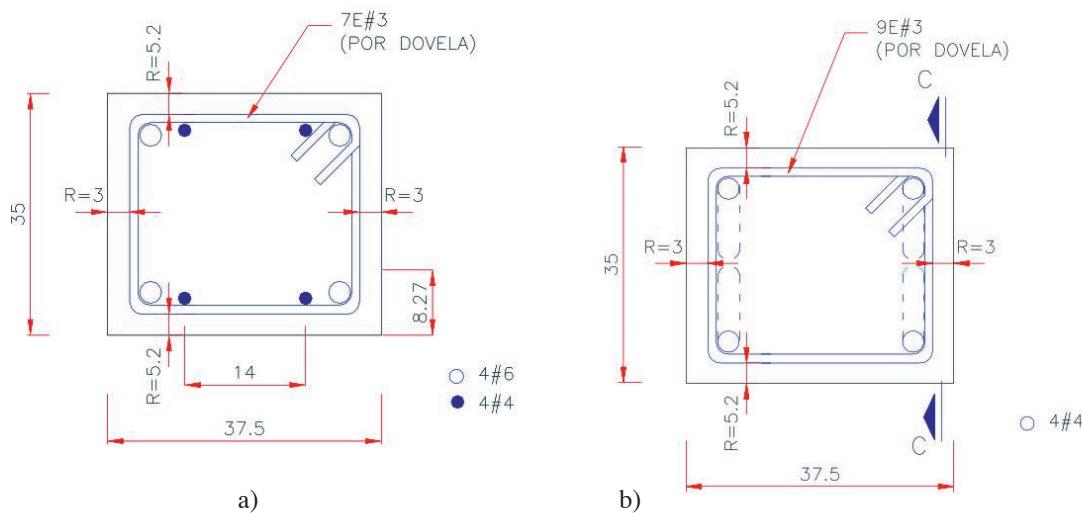
## DESCRIPCIÓN DE LOS ESPECÍMENES Y DE LAS PRUEBAS

Los especímenes que se ensayaron fueron modelos a escala de juntas planas típicas a las utilizadas en un túnel de drenaje de la ciudad de México. Las dovelas se construyeron sin considerar la curvatura que presentan las dovelas reales, con el fin de facilitar la construcción de las mismas, así como su manejo y ensaye en laboratorio. Por otro lado, como el objetivo del estudio era conocer el comportamiento mecánico de las juntas y no el de las dovelas, el largo de las dovelas se redujo al máximo, en modo de que fueran manejables en laboratorio. Cabe hacer notar que esta dimensión, así como la curvatura de las dovelas no tiene influencia en el comportamiento de las juntas, como se ha observado en pruebas experimentales (Hordijk y Gijsbers, 1996) y en modelos numéricos (Peña, 2010). Esto se debe a que el comportamiento de la junta depende únicamente de su geometría (sección transversal, la cual es plana) y en las cargas que llegan a la junta (ver Ecuaciones 1 y 2). Así mismo, como las dovelas eran simétricas en su dimensión fuera del plano (ancho), la cual no tiene influencia en el comportamiento de las juntas, ésta se redujo a una cuarta parte de la real.

El momento necesario para flexionar la junta se realizó mediante cargas axiales excéntricas. La excentricidad se mantuvo constante, mientras que la carga axial se fue incrementando hasta la falla del espécimen. La excentricidad de la carga está dada por la relación entre la carga axial y el momento actuante interno de la dovela, los cuales generalmente dependen de la relación  $K$  ( $Ph/Pv$ ) entre la carga horizontal  $Ph$  y la carga vertical  $Pv$  actuantes en los anillos. Esta relación de cargas es constante para un estado de cargas predeterminado, por lo que esta simplificación es razonable para el estudio de las juntas entre dovelas. Los especímenes se fabricaron de concreto armado con una resistencia a compresión  $f'c$  de  $350 \text{ kg/cm}^2$ , obteniendo un módulo de elasticidad nominal  $E$  de  $261,916.017 \text{ kg/cm}^2$ . La Fig. 4 muestra un esquema de los especímenes ensayados.



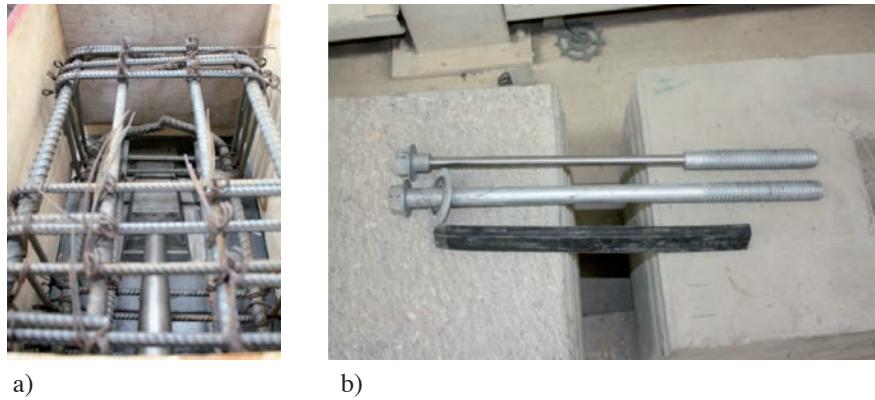
**Fig. 4.** Esquema tipo de los especímenes ensayados: a) Geometría tipo; b) Espécimen en la máquina universal.



**Fig. 5.** Armado de los especímenes: a) Etapa A; b) Etapa B.

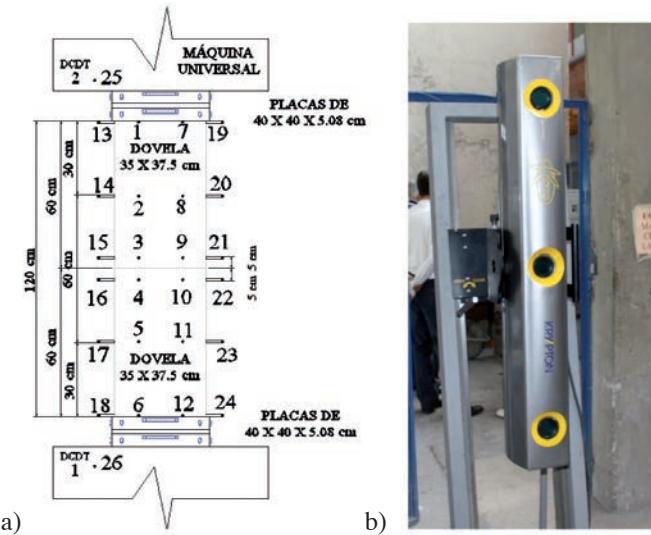
Se probaron 10 especímenes divididos en dos etapas. Cada espécimen consiste en dos dovelas (Fig. 4). La primera etapa, definida como Etapa A, constó de seis especímenes, mientras que para la segunda etapa (Etapa B) se ensayaron cuatro especímenes. La diferencia entre los especímenes de ambas etapas se debe al armado (longitudinal y transversal) de los mismos, con el fin de evaluar la influencia de la cuantía de acero en la respuesta de las juntas. Los especímenes de la etapa A se armaron con cuatro varillas del número seis y cuatro del número cuatro, al tiempo que se colocaron siete estribos del número tres por dovela (Fig. 5a). Los especímenes que conformaron la etapa B se armaron con una cuantía menor de acero longitudinal, pero con un mayor confinamiento debido a los estribos. El armado se realizó con cuatro varillas del número cuatro para el armado longitudinal y nueve estribos del número tres, por dovela (Fig. 5b).

Asimismo, en cuatro especímenes de la Etapa A se dejó una preparación para colocar un inserto tipo T25x140" (perno) y un conector de plástico (Fig. 6), con el fin de evaluar la influencia del inserto en el comportamiento mecánico de las juntas. Cabe hacer notar que tanto el inserto como el conector son similares a los empleados en la construcción de túneles a escala real, con la salvedad de que el inserto se adelgazó en taller a la mitad (1/2) de su diámetro, con el fin de mantener la relación entre la resistencia del perno y la de las dovelas. Los insertos se instrumentaron con un deformímetro, para observar su comportamiento a lo largo de las pruebas.



**Fig. 6.** Conexiones entre dovelas: a) Insertos; b) Perno

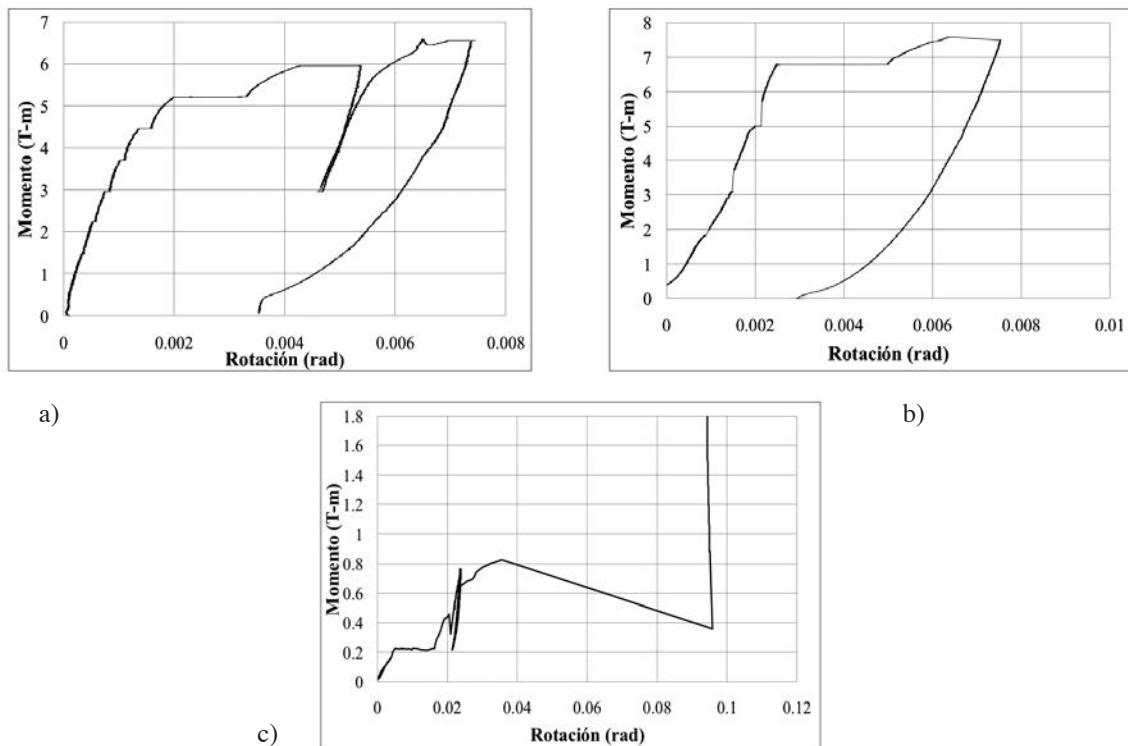
Los especímenes se ensayaron en una máquina universal cuya carga máxima era de 220 t, aproximadamente; la cual fue suficiente para llevar a la falla a los especímenes. El sistema de adquisición de datos fue diseñado en modo de obtener la posición de los especímenes a cada instante de la prueba. Asimismo, se buscó que la instrumentación no influyera en la respuesta de los especímenes. De este modo, la instrumentación fue realizada utilizando un sistema basado en Diodos de Emisor de Luz o LEDs y una cámara de alta resolución. Así, al colocar los LEDs sobre el espécimen es posible conocer su posición de forma exacta a cada instante de tiempo mediante una medición óptica, lo cual elimina posibles errores por ruido eléctrico en la señal. La resolución del sistema es de 0.004 mm a una distancia de 2.5 m de la cámara, para un solo punto y una resolución volumétrica de 0.085 mm a una distancia de 2.5 m. Debido a que las pruebas son estáticas, se utilizó la frecuencia mínima permitida por el sistema de 10 Hz para el registro de la señal (Fig. 7).



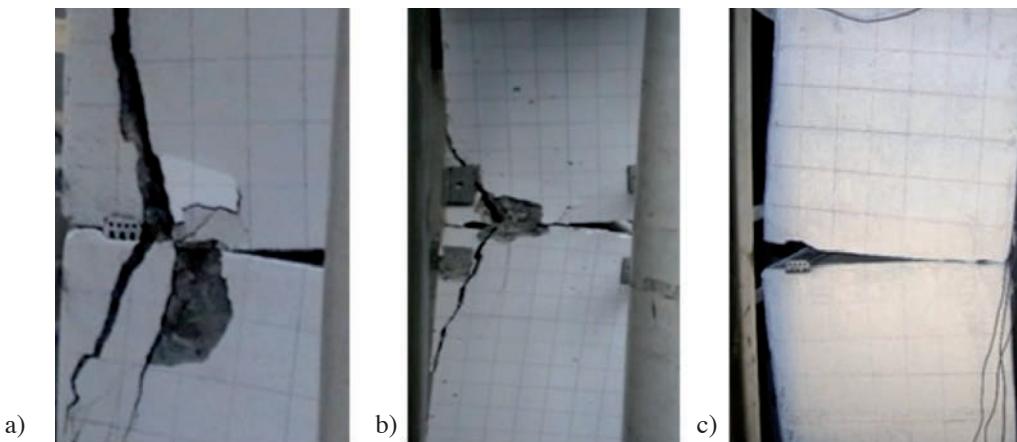
**Fig. 7.** Instrumentación de los especímenes: a) Ubicación de los LED's; b) Cámara de adquisición de datos.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se realizaron 10 pruebas con tres diferentes excentricidades (3, 6 y 9 cm). La Fig. 8 muestra las curvas típicas momento–rotación de una junta con excentricidad constante y carga axial variable. Se observa que el comportamiento de la junta se puede aproximar a un comportamiento elasto-plástico; es decir, se tiene una rama inicial elástica hasta el momento de fluencia, después del cual se incrementan las rotaciones pero el momento resistente permanece prácticamente constante (rama plástica). La Fig. 9 muestra las fallas de las juntas. Se observa que se presenta un agrietamiento debido al desconchamiento del recubrimiento.



**Fig. 8.** Curvas típicas momento–rotación de una junta con excentricidad constante y carga axial variable (caso A), excentricidades de: a) 3 cm; b) 6 cm; c) 9 cm.



**Fig. 9.** Fallas típicas de las juntas, excentricidades de: a) 3 cm; b) 6 cm; c) 9 cm.

Por otro lado, es interesante hacer notar que la prueba con una excentricidad de 9 cm presenta un fenómeno de ablandamiento por rotaciones. Lo cual es debido a que el espécimen gira como cuerpo rígido y el ablandamiento indica que la dovela superior ha sobrepasado el ángulo crítico del elemento, lo que llevará al colapso del bloque, sin que se tenga un aplastamiento del material. Cabe recordar que el ángulo crítico de un cuerpo rígido es el ángulo al cual el cuerpo se vuelve inestable y colapsa debido a un momento estático. Por lo tanto, la curva momento–rotación de esta prueba (Fig. 8c) muestra la respuesta típica del giro de un bloque rígido; lo cual se debe a la gran excentricidad de la carga. Esto indica que esta excentricidad es una condición crítica para las juntas entre dovelas.

Se comparó la carga última obtenida experimentalmente con la carga máxima de compresión calculada con las expresiones de las Normas Técnicas Complementarias para Estructuras de Concreto del *Reglamento de Construcción del Distrito Federal* (NTC-C, 2004). Así, para apoyos de miembros estructurales y otras superficies sujetas a presiones de contacto o aplastamiento, las normas indican que cuando la superficie que recibe la carga tiene un área mayor que el área de contacto, el esfuerzo puede incrementarse en la relación, de acuerdo con la ecuación 3:

$$\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 2 \quad (3)$$

donde  $A_1$  es el área de contacto y  $A_2$  es el área de la figura de mayor tamaño, semejante al área de contacto y concéntrica con ella, que puede inscribirse en la superficie que recibe la carga. Las áreas  $A_2$  y  $A_1$  se pueden calcular con las ecuaciones 4 y 5, respectivamente.

$$A_2 = b h_{tot} \quad (4)$$

$$A_1 = b h_{ef} \quad (5)$$

donde  $h_{tot}$  es el ancho total de la junta y el ancho efectivo  $h_{ef}$  se puede calcular con la ecuación 6, la cual depende la excentricidad de la carga  $e$ .

$$h_{ef} = h_{tot} - 2e \quad (6)$$

Así, la carga que producirá el aplastamiento del concreto  $P_{máx}$  estará dada por:

$$P_{máx} = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} f'_c A_1 \quad (7)$$

La Tabla 1 compara las cargas obtenidas experimentalmente  $P_u$ , con las de la ecuación 7. Se observa que la carga última es similar para las pruebas que tienen la misma excentricidad, lo que indica que el perno no proporciona una resistencia adicional a los especímenes. Asimismo, las cargas últimas son similares para los especímenes de la etapa A y B, a pesar de la diferencia del armado. Esto se debe principalmente a que la falla se da por desconchamiento del concreto fuera del núcleo confinado, lo que hace que la resistencia en la junta sea la misma para los especímenes de ambas etapas; independientemente del armado que presentan las dovelas.

**Tabla 1. Comparación de las cargas obtenidas experimentalmente, con las obtenidas de la ecuación 7.**

Espécimen	Excentricidad (cm)	$P_u$ (t)	$P_{max}$ (t)	$P_u/P_{max}$
A1	3	221.5	191	1.16
A2	3	218.0	191	1.14
B1	3	202.3	191	1.06
B2	3	218.9	191	1.15
Promedio	3	215.18	191	1.12
A3	6	140.3	136	1.03
A4	6	138	136	1.01
B3	6	125.5	136	0.92
B4	6	89.8	136	0.66
Promedio	6	123.4	136	0.91

Cabe mencionar que el espécimen B4 alcanzó una carga última 30 por ciento menor que los demás especímenes probados con la misma excentricidad. Esto se debió a que al iniciarse el desconchamiento del revestimiento, la dovela superior perdió súbitamente parte del apoyo (el que correspondía al revestimiento) en el que estaba asentada la dovela, lo que provocó que la dovela girará súbitamente y se apoyara en los extremos de la dovela.

Por otro lado, a pesar de que la falla no es propiamente por aplastamiento, la ecuación 7 da una correcta estimación de la carga última, teniendo errores medios del 10%, por lo que puede utilizarse para el cálculo de la resistencia de la junta.

La carga máxima teórica  $P_{máx}$  para una excentricidad de 9 cm no se puede calcular debido a que el área  $A_1$  (ecuación 3) es cero, ya que la excentricidad es igual a la mitad del ancho de la junta. Por otro lado, para este caso en particular, la ecuación 7 deja de ser válida porque el aplastamiento del espécimen se da cuando la junta se ha abierto completamente y las dovelas se apoyan en los extremos de las mismas, que inicialmente se encontraban separados (Fig. 9c). Asimismo, la carga máxima deja de tener un sentido físico para estas excentricidades porque los especímenes fallan por rotaciones excesivas, antes de que se presente el aplastamiento del material. Por lo tanto, la ecuación 7 sólo es válida cuando el aplastamiento aparece cuando la junta no se ha abierto totalmente y los extremos de las dovelas no hayan entrado en contacto.

## RELACIONES MOMENTO-ROTACIÓN PARA UNA CARGA AXIAL VARIABLE

Las relaciones propuestas por Janssen (Ecuación 1) y por Gladwell (Ecuación 2) fueron obtenidas para una carga axial constante. Cuando se hace el análisis de un anillo formado con dovelas, la carga axial actuante en las juntas dependerá de la flexibilidad de las juntas. Debido a esto, generalmente es necesario hacer una serie de iteraciones en los análisis, variando la flexibilidad de la junta y la carga axial actuante en ella. Con el fin de tratar de eliminar esta serie de iteraciones, se propone una relación momento-rotación para una carga axial variable, la cual estará en función de las propiedades geométricas de la junta ( $h, b$ ), las propiedades mecánicas del material ( $E, v, f'c$ ) y la excentricidad de la carga  $e$ . La excentricidad de la carga está dada por la relación entre la carga axial y el momento actuante interno de la dovela, los cuales generalmente dependen de la relación  $K$  ( $Ph/Pv$ ) entre la carga horizontal  $Ph$  y la carga vertical  $Pv$  actuantes en los anillos.

Con base en lo anterior se propone una relación bilineal para obtener de forma teórica las curvas momento-rotación de una junta para una carga axial variable con una excentricidad constante. La curva propuesta se compone de una parte lineal inicial y de una rama plástica (línea horizontal). Esta relación se construye con sólo dos parámetros: rigidez inicial y momento máximo resistente.

La rigidez inicial se obtiene de las relaciones de Gladwell (Ecuación 2). Sin embargo, como éstas fueron obtenidas para una carga axial constante, es necesario modificar dichas relaciones para que estén en función de una excentricidad constante y una carga axial variable.

De este modo, la Ecuación 2 se modifica al considerar el momento flexionante  $M$  en función de la carga axial  $N$  y la excentricidad  $e$  ( $M=Ne$ ) y despejando la carga axial. De este modo se obtiene la Ecuación 8, donde el momento está en función de la rotación y de la excentricidad.

$$M = \begin{cases} \frac{\pi h^2 b E}{32(1-v^2)} \varphi & \text{si } e \leq \frac{1}{4}h \\ \frac{\pi b E (h/2 - e)}{2(1-v^2)} \varphi e & \text{si } e > \frac{1}{4}h \end{cases} \quad (8)$$

De estas ecuaciones se observa que:

Para una excentricidad constante la relación momento–rotación es lineal.

La rigidez rotacional de la junta depende de las propiedades elásticas del material, de la geometría de la junta y de la excentricidad de la carga.

Para una excentricidad igual a la mitad del ancho de la junta, la rigidez rotacional es igual a cero, lo que indica que la sección no es capaz de resistir carga con esa excentricidad.

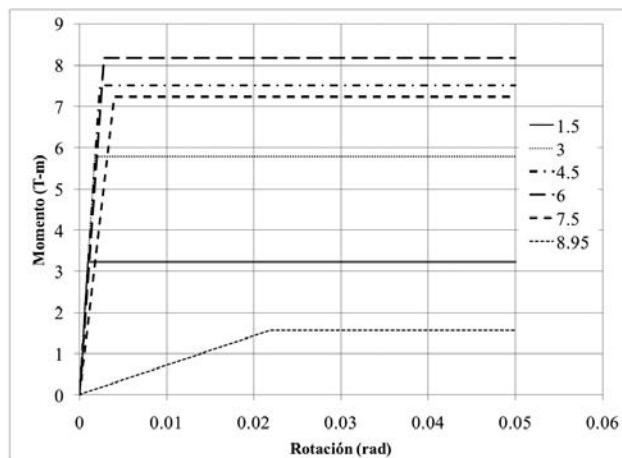
Para una excentricidad igual a cero, la rigidez rotacional es infinita.

Con la ecuación 8 solamente es posible calcular la rigidez inicial de la junta. Para obtener el momento máximo resistente se utiliza la carga de aplastamiento. Por lo que el momento máximo  $M_{\max}$  estará dado por:

$$M_{\max} = P_{\max} e = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} f_c \Phi_c A_1 e \quad (9)$$

Asimismo, la rotación de fluencia  $\phi_y$  se puede calcular mediante:

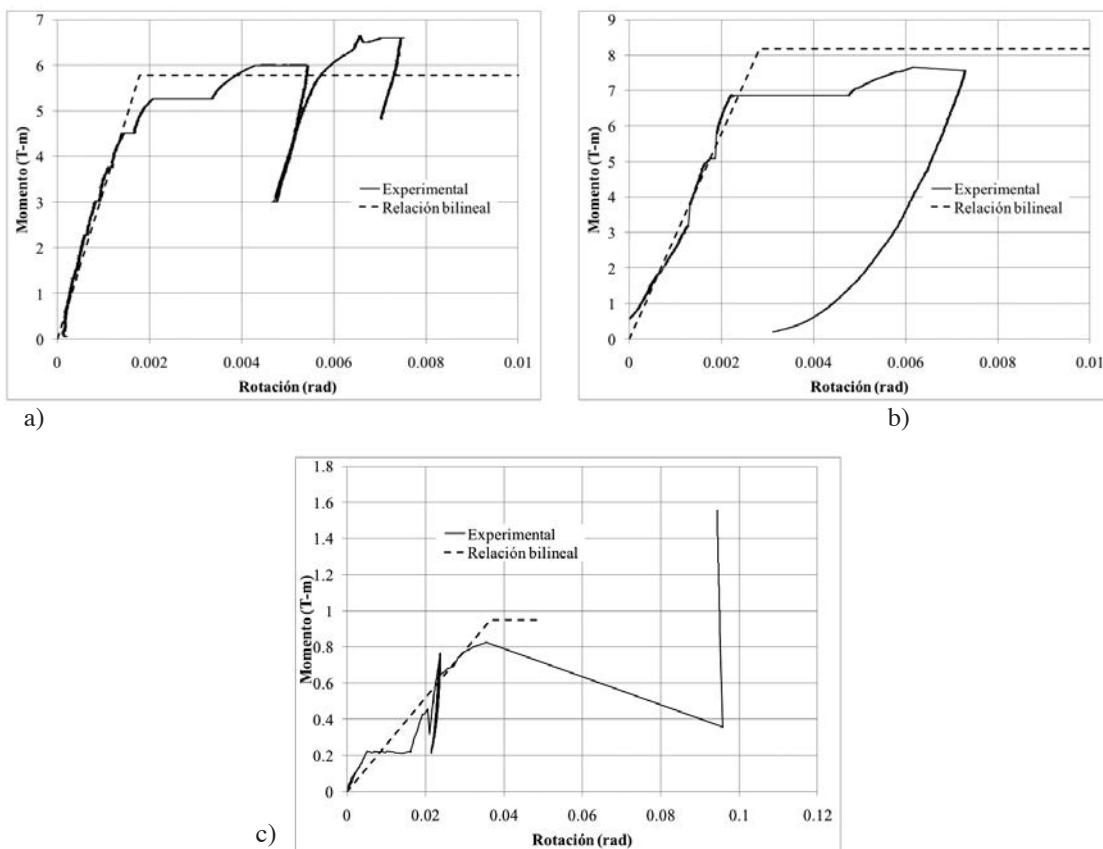
$$\phi_y = \begin{cases} \frac{32(1-v^2)}{\pi h^2 b E} M_{\max} & \text{si } e \leq \frac{1}{4}h \\ \frac{2(1-v^2)}{\pi b E e (h/2 - e)} M_{\max} & \text{si } e > \frac{1}{4}h \end{cases} \quad (10)$$



**Fig. 10.** Curvas momento – rotación obtenidas con la relación bilineal propuesta para diferentes excentricidades.

La Fig. 10 muestra las relaciones momento–rotación para diferentes excentricidades. Se observa que la rigidez inicial y el momento máximo dependen de la excentricidad de la carga. Asimismo, se observa que existe una excentricidad límite en la cual se tiene el momento máximo. Después de esta excentricidad límite, tanto la rigidez inicial, como el momento máximo decrecen. Esta excentricidad límite corresponde al tercio medio de la junta ( $h/3$ ). Asimismo, se observa que cuando la excentricidad tiende a la mitad de la junta ( $h/2$ ), la rigidez inicial tiende a cero.

Con el fin de validar la relación propuesta se compararon sus resultados con los de las curvas momento–rotación obtenidas de las pruebas experimentales. La Fig. 11 muestra la comparación entre las curvas obtenidas con la relación propuesta y las pruebas experimentales, para distintas excentricidades. Cabe mencionar que para la prueba con 90 mm de excentricidad; en especial para el cálculo de la relación bilineal se utilizó una excentricidad de 89.92 mm. Esto se debió a que con una excentricidad de 90 mm se obtiene una rigidez y un momento resistente igual a cero. Como se puede observar, las curvas obtenidas con la relación propuesta dan una muy buena aproximación con las curvas experimentales, para las diferentes excentricidades. Tanto en el cálculo de la rigidez inicial, como del momento máximo resistente.

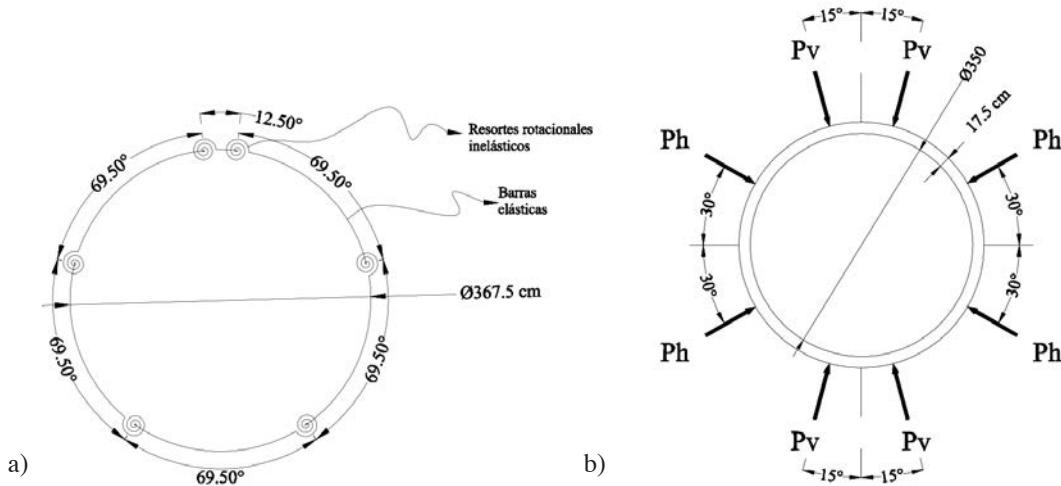


**Fig. 11.** Comparación de las curvas momento-rotación obtenidas experimentalmente con las obtenidas mediante la relación propuesta:  
a) Excentricidad de 3 cm; b) Excentricidad de 6 cm; c) Excentricidad de 9 cm.

## EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con el fin de mostrar la utilidad de la relación propuesta, se muestra el análisis de un anillo típico (Peña, 2010). Para este caso, las dovelas se modelaron como elementos elástico lineales, mientras que las juntas como resortes rotacionales inelásticos. La Fig. 12 muestra la geometría del anillo así como la distribución de cargas sobre el mismo. El anillo está formado por cinco dovelas del mismo tamaño, más una dovela clave. El ancho de cada dovela es de 17.5cm y el

de la junta de 9 cm. Las dovelas son de concreto con un módulo de elasticidad  $E$  igual a 245,000 kg/cm<sup>2</sup>. Por sencillez se utilizó la distribución de cargas que se muestra en la Figura 8b, donde la carga horizontal  $Ph$  es de 9.05 t y la carga vertical  $Pv$  es de 10.45 t. Esto da una relación de cargas horizontales y verticales  $Ph/Pv$  igual a 0.87 (Peña, 2010).



**Fig. 12.** Anillo típico de dovelas: a) Geometría y localización de las juntas; b) Distribución de cargas.

El anillo se analizó utilizando la relación propuesta en este trabajo y con la relación de Gladwell con el fin de comparar resultados. Cabe mencionar que es necesario realizar una serie de iteraciones cuando se utiliza la relación de Gladwell con el fin de obtener la carga axial actuante en las juntas. En cada iteración, al cambiar la carga axial es necesario cambiar la curva momento–rotación de los resortes inelásticos. Así mismo, para cada junta es necesaria una relación, dependiendo de la carga axial actuante en ella. Para este caso, fueron necesarias cinco iteraciones, como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2. Iteraciones realizadas en el análisis considerando la relación de Gladwell**

<b>Carga Axial <math>N</math> (t)</b>			
<b>Iteración</b>	<b>Junta I</b>	<b>Junta II</b>	<b>Junta III</b>
1	10.526	14.360	12.364
2	10.853	25.349	7.478
3	10.775	17.485	7.553
4	10.776	17.611	7.552
5	10.776	17.609	7.552

Por otro lado, cuando se utiliza la formulación propuesta para una carga axial variable, entonces el número de iteraciones se reduce únicamente a dos pasos. El primer paso corresponde a un anillo continuo para obtener la excentricidad inicial. Con esta excentricidad se obtienen las relaciones momento–rotación con carga axial variable. De este modo, en el segundo paso se hace el análisis considerando las juntas como resortes inelásticos.

La Tabla 3 muestra las excentricidades iniciales obtenidas del anillo continuo con rigidez reducida. Se observa que dos de las excentricidades son mayores que la mitad del ancho de la junta  $h/2$ , que es la máxima excentricidad que se puede presentar en la junta. Esto es debido a que el análisis es elástico, por lo que la carga axial puede salirse de la junta. En estos casos, para el análisis del anillo con resortes inelásticos se debe considerar la máxima excentricidad permitida, que es igual a la mitad del ancho de la junta  $h/2$ . Sin embargo, desde un punto de vista numérico, esto conllevaría a tener una rigidez igual a cero.

De acuerdo con los resultados experimentales, cuando la excentricidad de la carga es igual a la mitad del ancho de la junta, la junta tiene una cierta capacidad a momento. Esto se debe a que la carga axial forma un bulbo de reacción, lo que permite que la resultante pase por el ancho de la junta. Para casos prácticos se recomienda reducir la excentricidad máxima en un 1 por ciento para realizar los cálculos numéricos. De este modo, se tiene que para las juntas I y II, la excentricidad es de 4.45 cm, mientras que para la junta III es de 3.25 cm. Con estas excentricidades se calcula la curva momento–rotación para carga axial variable y se realiza el análisis.

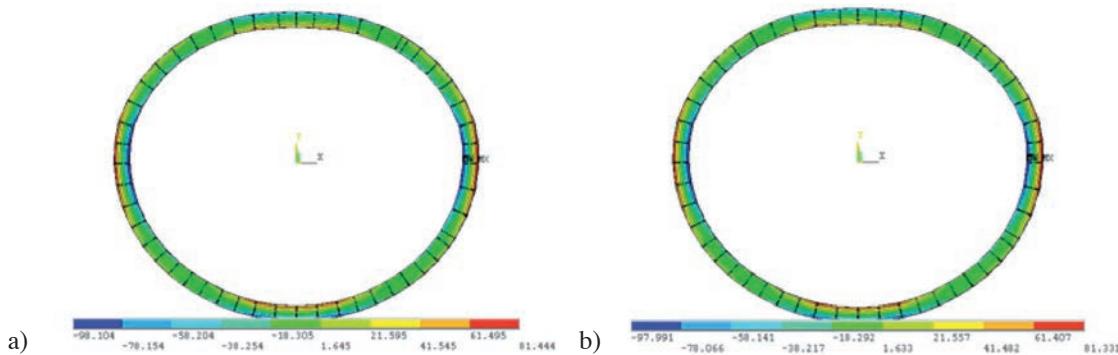
**Tabla 3. Cargas axiales, momentos flexionantes y excentricidades obtenidos con el anillo continuo.**

<b>Junta</b>	<b>N (t)</b>	<b>M (t-m)</b>	<b>e (cm)</b>
I	10.526	-3.583	34.04
II	14.360	3.314	23.08
III	12.364	-0.401	3.24

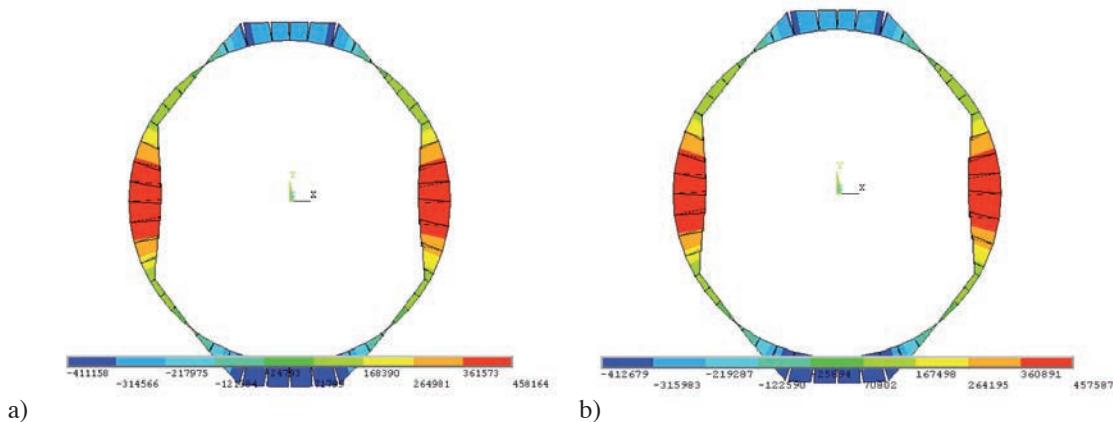
**Tabla 4. Decremento de diámetro vertical  $\Delta D$  considerando la relación de Gladwell y la relación propuesta en este trabajo**

<b>Iteración</b>	<b><math>\Delta D</math> (cm)</b>	
	<b>Gladwell</b>	<b>Propuesta</b>
1	1.31	1.31
2	1.42	---
3	1.43	---
4	1.43	---
5	1.43	1.43

La Tabla 4 presenta el decremento del diámetro vertical  $\Delta D$  utilizando ambas relaciones y para cada una de las iteraciones realizadas. Se observa que el  $\Delta D$  obtenido en la última iteración con la relación de Gladwell y el obtenido con la relación que se propone en este trabajo son los mismos. Por otra parte, la Fig. 13 muestra la deformada del anillo y la distribución de esfuerzos axiales, para los dos análisis desarrollados. Se observa que ambas deformadas y distribuciones son las mismas. Lo que indica que ambos análisis dan los mismos resultados, pero con la diferencia que con la relación aquí propuesta no fue necesario realizar una iteración de los resultados. Esto conlleva una mayor rapidez y sencillez en los análisis de anillos formados con dovelas.



**Fig. 13.** Deformación del anillo y mapa de esfuerzos axiales obtenidos con:  
a) Relación de Gladwell; b) Relación propuesta en este trabajo



**Fig. 14.** Diagrama de momentos flexionantes: a) Relación de Gladwell;  
b) Relación propuesta en este trabajo.

Finalmente, la Fig. 14 presenta el diagrama de momentos flexionantes obtenidos con ambos modelos. Obviamente, ambos diagramas son iguales, tanto en forma como en magnitud. Con estos diagramas se observa la influencia de las juntas, las cuales hacen que el diagrama de momentos sea prácticamente constante en la zona de clave y cubeta. Asimismo, las juntas tienen una menor resistencia a flexión que las dovelas, por lo que el diagrama de momentos se reduce en las zonas de las juntas.

## CONCLUSIONES

De estas pruebas experimentales se puede concluir que:

- El perno que se coloca por cuestiones constructivas en las juntas planas no modifica la rigidez inicial de la junta, ni su resistencia, por lo que se puede despreciar su influencia.
- El modo de falla principal de las juntas fue por desconchamiento del concreto de recubrimiento, por lo que el armado de la dovela no influye en la resistencia de la junta.
- Cuando la excentricidad es muy grande (la mitad del ancho de la junta), la falla de la junta se da por rotaciones excesivas, pues la junta se abre completamente apoyándose las dovelas en sus extremos que se encontraban inicialmente separados.
- La fórmula para calcular la carga de aplastamiento propuestas por las Normas Técnicas Complementarias para *Concreto del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal* (NTC-C, 2004) permite estimar correctamente la resistencia de las juntas.

Asimismo, se propuso una relación bilineal para el cálculo teórico de curvas momento–rotación para una carga axial variable con una excentricidad constante. Esta relación reproduce de forma adecuada el comportamiento de una junta típica de túneles dovelados. Una ventaja de esta relación es que se construye sólo con dos parámetros: rigidez inicial y momento máximo. La rigidez inicial se obtiene de la relación de Gladwell modificada; mientras que el momento máximo se calcula con la carga axial de aplastamiento para la excentricidad de la carga. Así mismo, se propone una fórmula para obtener la rotación de fluencia.

El uso de esta relación permite simplificar los análisis de anillos dovelados. Debido a que la rigidez de la junta depende de la carga axial, al utilizar relaciones momento–rotación para cargas axiales constantes, es necesario realizar una serie de iteraciones durante los análisis, hasta lograr la convergencia. Al proponer una relación con una carga axial variable, esta serie de iteraciones se elimina.

Finalmente, los resultados obtenidos en este trabajo permitirán conseguir algunos beneficios prácticos como:

- El perno de unión, que tiene una función únicamente constructiva, se podría quitar una vez terminada la construcción, pudiéndose reutilizar en otros tramos del mismo túnel.
- El comportamiento de la junta no depende del armado de la pieza, por lo que la cuantía de acero dependerá únicamente de las condiciones generales del anillo y el manejo de la pieza prefabricada, simplificando el análisis y diseño de las dovelas.
- Los modelos estructurales se pueden simplificar, al considerar las juntas como resortes rotacionales, considerando la relación momento – rotación de la junta. Por lo que no es necesario modelos numéricos complejos.
- De acuerdo con el punto anterior, las dovelas se pueden modelar como elementos barra. Teniendo por consiguiente, modelos sencillos con los cuales obtener los elementos mecánicos necesarios para su diseño.
- En ninguno de los experimentos se observó un deslizamiento entre las dovelas, aún cuando la junta tuviera rotaciones importantes. Lo que permite simplificar los modelos numéricos, al considerar únicamente la rotación de las juntas y despreciar el deslizamiento entre dovelas.

## AGRADECIMIENTOS

Las pruebas experimentales presentadas en este trabajo fueron financiadas por la compañía Ingenieros Civiles Asociados (ICA), mediante el proyecto 9561 “Pruebas de laboratorio de juntas de túneles dovelados” del Instituto de Ingeniería de la UNAM. El segundo autor agradece al CONACYT la beca otorgada para la realización de sus estudios de doctorado.

## REFERENCIAS

- 1) Blom C.B.M., “Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils”, tesis doctoral, Universidad Tecnológica de Delft, 2002, disponible en:  
<http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:dee23627-1fb0-4308-a536-6120ae1e8db5/>
- 2) Blom C.B.M., “The structural (un)safety of tunnels explained by analytical approach”, en *Heron*, vol. 48, núm. 1, pp. 17-32, 2003, disponible en:  
<http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:9a3a214d-78c2-4379-a239-cfc5e5f65146/>
- 3) BTS, “Tunnel lining design guide”, en *The British Tunnelling Society and The Institution of Civil Engineers*, Thomas Telford Ltd, Londres, 2004.
- 4) Hefny A.M.; Tan F.C.; Macalevey N.F., “Numerical study on the behaviour of jointed tunnel lining”, en *Journal of the Institution of Engineers, Singapur*, vol. 44, núm. 1, pp. 108-118, 2004.
- 5) Hordijk D.A.; Gijsbers F.B.J., “Laboratoriumproeven tunnelsegmenten”. Reporte Interno K100-W-026, TNO-Bouw, Delft, 1996.
- 6) Lee K.M.; Ge X.W., “The equivalence of a jointed shield-driven tunnel lining to a continuous ring structure”, en *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 38, núm. 3, pp. 461-483, 2001.
- 7) Lee K.M.; Hou X.Y.; Ge X.W.; Tang Y., “An analytical solution for a jointed shield-driven tunnel lining”, en *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 25, pp. 365-390, 2001.
- 8) NTC-C, “Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto”, en “Normas técnicas complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, en *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo I, núm. 103-Bis, México, 2004.
- 9) Peña F., “Evaluación de modelos simplificados para el análisis estructural de túneles dovelados”, en *XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, León, 2010.

- 10) Rodríguez M.; Salmón R., "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, 1987.
- 11) Schreyer J.; Winselmann D., "Suitability tests for the segmental lining for the 4th Elbe tunnel tube, Hambrug". *Tunnel* 2/98, pp. 30-37, 1998.
- 12) Schreyer J.; Winselmann D., "Suitability tests for the lining for the 4th Elbe tunnel tube – Results of large-scale tests". *Tunnel* 1/2000, pp. 34-44, 2000.
- 13) Teachavorasinskun S.; Chub-Uppakarn T., "Experimental verification of joint effects on segmental tunnel lining" en *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 14, Bund K., 2009. Disponible en: <http://www.ejge.com/200/Ppr0992/Ppr0992.pdf>
- 14) Xiaochun Z.; Wei Z.; Zhengrong H.; Yuewang H., "Effect of joint structure on joint stiffness for shield tunnel lining", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 21, pp. 406-407, 2006.
- 15) Van der Vliet C., "Langsvoeggedrag op basis van de elastici-teitstheorie, Een aanscherping van de Janssen-relatie", Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2006.