



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS DE CONCRETO**

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE TÚNEL DOVELADO CON JUNTAS INELÁSTICAS ENTRE  
DOVELAS**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**GERARDO HERNÁNDEZ MORALES**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**DR. FERNANDO PEÑA MONDRAGÓN, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**

**CO-TUTOR**  
**DR. ARTURO GALVÁN CHÁVEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**

**MÉXICO, D. F. JUNIO 2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Darío Rivera Vargas  
Secretario: Dr. Hugo Hernández Barrios  
Vocal: Dr. Fernando Peña Mondragón  
1 er. Suplente: Dr. Marcos Mauricio Chávez Cano  
2 do. Suplente: M.I. Luis Núñez Quiroz

Lugar donde se realizó la tesis:

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA, FES-ACATLÁN. UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

DR. FERNANDO PEÑA MONDRAGÓN

-----  
**FIRMA**

A mis **Padres, Hermanos** y a mi Novia **Magaly**  
(**COMPAÑEROS INSEPARABLES**) que sin ellos nunca hubiese  
podido concluir este objetivo.

## ***AGRADECIMIENTOS***

A la Facultad de Estudios Superiores Acatlán-UNAM por fomentar mi formación profesional y a su Unidad de Investigación Multidisciplinaria, por brindarme un espacio para poder desarrollar mi trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de Maestría.

A mi tutor el Dr. Fernando Peña Mondragón, por la atención y el tiempo que dedicó a enseñarme y guiarme formándome como maestro, además de los consejos que me brindó ya que me ayudaron a ser no sólo mejor profesionista si no mejor persona.

A mi co-tutor el Dr. Arturo Galván Chávez, por su colaboración, apoyo y valiosos consejos en la elaboración de la tesis.

A los sinodales, Dr. Darío Rivera Vargas, Dr. Hugo Hernández Barrios, Dr. Marcos Mauricio Chávez Cano y al Mtro. Luis Núñez Quiroz, por su disposición, tiempo y sugerencias hacia mi proyecto de graduación.

Al Dr. Oriol Arnau Delgado, por su apoyo y disposición en la elaboración de éste trabajo, ayudándome con observaciones y sugerencias en él.

Al Ing. Carlos Arce León, por su gran apoyo y palabras de aliento en momentos difíciles.

Al M.U. Pablo Miguel Pavía Ortíz, por su gran apoyo.

A mis compañeros de maestría y en especial a Gustavo Godho.

A Magaly García por todo el apoyo, tiempo y comprensión que me brindó.

## Índice

### Contenido

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
OBJETIVO.....	12
CAPÍTULO 1: Estado del arte.....	13
1.1 Elementos del túnel dovelado.....	14
1.1.1 Revestimiento primario.....	15
1.1.2 Juntas entre dovelas.....	17
1.1.3 Juntas entre anillos.....	18
1.2 Proceso de construcción de túneles dovelados con máquina tuneladora.....	19
1.3 Comportamiento teórico de las juntas entre dovelas.....	21
1.3.1 Relación momento-rotación.....	22
1.3.2 Relación momento-rotación para carga axial constante.....	22
1.3.3 Relación momento-rotación para carga axial variable.....	24
1.4 Comportamiento experimental.....	26
1.4.1 Juntas planas entre dovelas.....	27
1.4.2 Juntas entre anillos.....	30
1.4.3 Anillos de dovelas.....	31
1.5 Modelos de análisis estructural para túneles dovelados.....	32
1.5.1 Consideraciones en el análisis de túneles dovelados.....	32
1.5.2 Modelos simplificados.....	33
1.5.3 Modelos complejos.....	34
CAPÍTULO 2: Descripción del modelo experimental presentado por Lutikholt en 2007.....	36
2.1 Geometría.....	37
2.2 Cargas.....	37
2.3 Resultados del modelo experimental.....	38
CAPÍTULO 3: Modelo numérico.....	42
3.1 Modelo de barras.....	42

3.2	Modelo de sólidos.....	45
3.2.1	Modelo inelástico .....	45
3.2.2	Modelo elástico .....	45
CAPÍTULO 4: Análisis de resultados .....		46
4.1	Primera Etapa: Modelo de barras y Modelo experimental.....	46
4.2	Segunda Etapa: Modelo de barras y Modelo de sólidos .....	50
4.2.1	Deformación radial .....	51
4.2.2	Rotación de juntas .....	52
4.2.3	Momento flexionante.....	58
4.2.4	Fuerza cortante .....	61
Conclusiones y comentarios finales .....		64
Referencias .....		66

## RESUMEN

En el presente trabajo se realiza el análisis estructural de un túnel de dovelas prefabricadas de concreto con juntas planas, para lo cual se utilizó la información presentada por Luttikholt (2007), donde se analizó un modelo experimental a escala natural de un túnel. El espécimen fue sometido a cargas radiales y de confinamiento en la dirección del eje longitudinal del túnel. Debido a la existencia de las juntas el túnel no se puede considerar como un anillo continuo y en su análisis debe tomarse en cuenta el comportamiento de las juntas. Si bien el análisis de este tipo de estructuras se puede realizar de forma simplificada, modelando las dovelas como elementos barra y el comportamiento de las juntas entre dovelas mediante resortes, se requiere de una serie de iteraciones para lograr representar el comportamiento de las juntas entre dovelas.

Por lo anterior, en este trabajo se realiza el análisis estructural de un túnel dovelado utilizando elementos barra para representar las dovelas y un nuevo criterio para reproducir el comportamiento de las juntas entre dovelas mediante una relación momento-rotación, con lo que se logra reducir el número de iteraciones al simular su comportamiento.

Por otro lado, los resultados del análisis numérico, además de compararse con los experimentales son comparados con un modelo numérico en 3D (modelo más preciso y/o complejo), el cual se obtuvo a partir de la información presentada por Galván (2013).

Por medio de la comparación de resultados analíticos con los del modelo experimental se pudo constatar que las cargas y posición de las juntas influyen directamente en la respuesta del modelo. También, se observó que tienen el mismo funcionamiento dentro del intervalo lineal y que incursionan en el rango inelástico bajo el mismo nivel de carga, por lo que hasta este punto, el confinamiento no influye en su comportamiento. Respecto al modelo de sólidos, ambos tuvieron el mismo comportamiento, concordando en las juntas que provocan el mecanismo de falla y en los elementos mecánicos, los cuales coinciden en al menos un 80%.

Finalmente, utilizando el método simplificado, se tiene una buena aproximación al comportamiento real de la estructura (al menos hasta el 75% de la prueba), por lo que es factible utilizar anillos aislados (barras y resortes) en el análisis estructural de túneles dovelados para niveles de confinamiento bajo o nulo.



## ABSTRACT

The structural analysis of a precast segmental tunnel with planar joints is presented in this research, for this study, the information presented by Luttikholt (2007) was used, where a pilot-scaled model of a tunnel was analyzed. The experiment was subjected to radial and confinement loads in direction to longitudinal axis of the tunnel. Due to the existence of the joints, the tunnel could not be considered as a continuous ring and in its analysis the behavior of the joints must be taken into account. Despite the fact that the analysis of such structures was already done in a simplified way: the segments were modeled with beam elements and the behavior of the joints between them with springs. It was required a series of iterations in order to represent the behavior of segment joints.

Therefore, in this research, it was made the structural analysis of a segmental tunnel in which beam elements were considered to represent the segments and a new criterion was performed to reproduce the behavior of the segment joints, by means of a moment-rotation behavior, which reduced the number of iterations at the moment of simulating it.

Furthermore, the results of the numerical analysis were not only compared with the experimental, but also with a numerical model in 3D (accurate and complex model), which was obtained from the information provided by Galván (2013).

Through the comparison between the results and the experimental model, it was found that the loads and the position of joints influenced directly in the model response. Besides that, it could be seen that they had the same functioning in the linear range and ventured into the inelastic range under the same load level; so at this point, the confinement did not affect their behavior. Regarding to the solid model, both of them showed the same behavior, agreeing on the joints that caused the mechanism of failure and in the mechanical elements which coincided at least 80%.

Finally, a good approximation of the real behavior of the structure was obtained (at least up to 75% of the test); so it was feasible to use isolated rings to perform the structural analysis of segmental tunnels based on the use of beam elements and rotational springs for low or zero confinement levels.

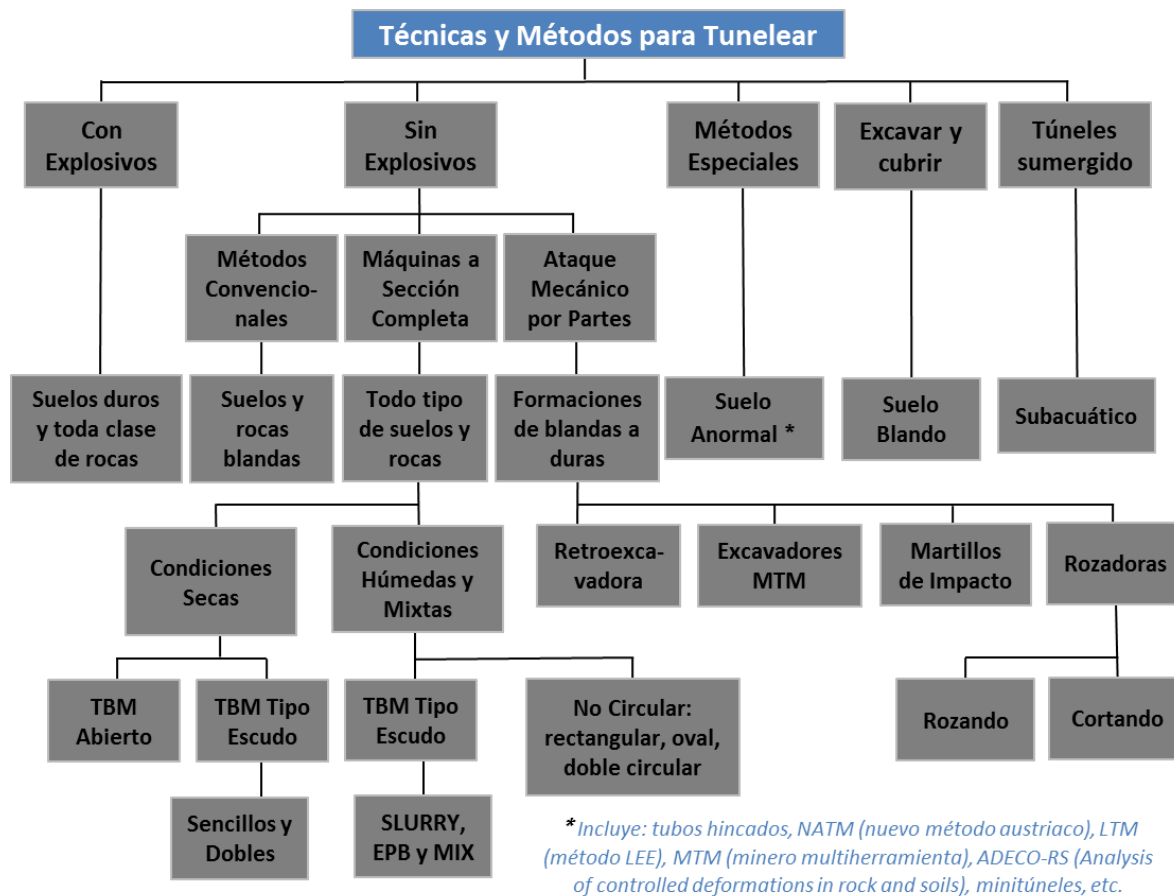
# INTRODUCCIÓN

Debido al acelerado crecimiento de la población los sistemas de transporte (carretero, ferrocarrilero, metro, etc.), acueductos y drenaje (Figura 1) se requieren en mayor cantidad y volumen. Estas obras de ingeniería se pueden solucionar mediante la construcción de túneles, los cuales, de acuerdo con Moreno (2005), se pueden clasificar según su localización (bajo el agua, de montaña y con poco techo) y respecto a su geología (Túneles en roca, en suelo o mixtos). Los túneles pueden estar enterrados, en la superficie o una combinación de estas dos condiciones. Además, como indica Basurto (2013), en zonas donde ya no es posible construir estas estructuras superficialmente (por cuestiones de espacio o de impacto ambiental), realizarlas de forma subterránea es una buena solución.



*Figura 1. Tipo de túneles (Moreno, 2005): a) túnel vehicular; b) túnel de drenaje*

Los métodos para la construcción de túneles, van desde el convencional con o sin el uso de explosivos hasta el uso de las máquinas tuneladoras de perforación TBM (por sus siglas en inglés, Tunnel Boring Machine). La tuneladora forma anillos dovelados, generalmente de concreto prefabricado, conformando el túnel. De acuerdo con Basurto (2013), este último método ha evolucionado de tal forma que se ha convertido en el más seguro y utilizado actualmente para cualquiera de sus aplicaciones, pues en éste se ha logrado sistematizar y agilizar la construcción del túnel.



**Figura 2. Técnicas y Métodos para construir Túneles (Moreno, 2005)**

En la Figura 2 se indican las técnicas y principales métodos para la construcción de túneles. A diferencia de las demás técnicas, el método del escudo (TBM) no requiere de explosivos y puede aplicarse en todo tipo de suelos o rocas, e incluso en condiciones húmedas y mixtas (suelo y/o roca).

Si bien el método de la TBM existe desde el siglo XIX hoy día es el más utilizado. Por otro lado, desde el punto de vista estructural, las principales características del túnel construido con la TBM son las siguientes: se forma con anillos de dovelas; existen juntas entre dovelas que forman un anillo y juntas entre anillos, las cuales pueden tener conexiones mecánicas; y debido al impulso de la tuneladora se aplican fuerzas normales sobre los anillos colocados en dirección al eje longitudinal del túnel.

El túnel que se construye con la TBM (revestimiento primario, en ocasiones único) puede ser diseñado para soportar el cien por ciento de las solicitaciones o para trabajar en conjunto con otro revestimiento (revestimiento secundario), en este caso, si bien el túnel contará con otro revestimiento, existe una etapa durante su construcción (determinado tiempo, por ejemplo:

más de medio año) en el que únicamente el revestimiento de dovelas estaría resistiendo las sollicitaciones (presiones del suelo en un túnel enterrado), por lo que es de interés conocer el comportamiento estructural de un túnel dovelado sin otro revestimiento.

Por lo anterior descrito, en este trabajo se investiga el comportamiento de un túnel formado por anillos de dovelas, particularmente para niveles bajos o nulos de fuerza axial debido a la tuneladora. El tipo de junta que se considera entre dovelas es plana y no se tienen conexiones mecánicas en dichas juntas.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Actualmente, uno de los métodos más utilizados para construir túneles es mediante máquinas de perforación (tuneladoras), las cuales forman anillos de dovelas dando lugar al túnel. Al realizar el análisis estructural de túneles dovelados deben tomarse en cuenta, además de las características geométricas y propiedades de los materiales, el comportamiento mecánico de las juntas entre dovelas, ya que debido a éstas el anillo no se puede considerar como continuo. También, debido al proceso constructivo, la tuneladora ejerce fuerzas axiales en dirección al eje longitudinal del túnel, lo que origina cierta interacción entre anillos.

Estas dos características son de especial interés en este trabajo, pues, si bien el comportamiento de las juntas ya se reproduce de forma simplificada mediante resortes inelásticos, se requiere de una serie de iteraciones para lograr representar su comportamiento. Respecto a la interacción entre anillos (acoplamiento de anillos), no se considerará la fuerza axial producto de la máquina tuneladora, es decir, se analiza un anillo aislado. Lo anterior se llevará a cabo mediante un modelo de elemento finito considerando la información de una prueba experimental a escala natural, representativa de un túnel típico dovelado.

## **OBJETIVO**

El objetivo de este trabajo es realizar y evaluar el análisis estructural de un túnel típico formado por dovelas prefabricadas de concreto con juntas planas entre éstas, mediante un modelo numérico simplificado de barras en el que se aplica un nuevo criterio para simular el comportamiento inelástico de las juntas entre dovelas mediante una relación momento-rotación, la cual es propuesta por Peña et al. (2012). El análisis se realiza utilizando el programa ANSYS (2006).

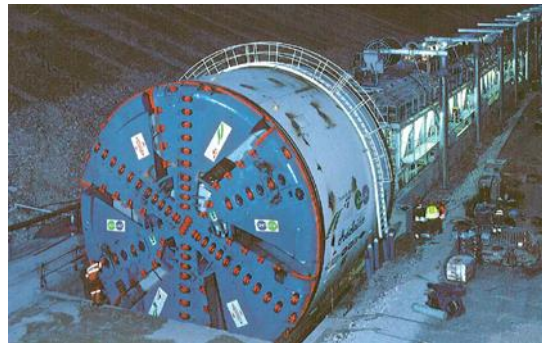
Los resultados del análisis estructural se compararán y validarán con resultados experimentales y con los de un modelo numérico en 3D (este modelo es considerado como modelo numérico más preciso) en los que se considera una baja y nula interacción entre anillos.

# CAPÍTULO 1: Estado del arte

La construcción de túneles puede realizarse en suelo, roca o una combinación de ellas, utilizando máquinas de perforación mejor conocidas como tuneladoras o TBM. Las características del terreno determinan el tipo de tuneladora a utilizar; en este sentido, si el terreno que se debe atacar tiene fracturas o fallas, donde exista el riesgo de que la máquina quede atrapada, será necesario incrementar la capacidad de corte y que sea provista de equipos de perforación en la cabeza. Celada (2008) indica que los tipos de tuneladora para roca pueden ser: TBM abiertas, escudadas y doble escudo (Figura 3).



a)



b)



c)

**Figura 3. Tipos de tuneladora (Celada, 2008): a) abierta; b) escudo sencillo; c) escudo doble**

De los tipos de tuneladoras anteriores, la primera se apoya sobre las paredes de roca excavada y sólo la cabeza cortadora tiene protección (escudo), es conveniente cuando la excavación es en roca dura o media, sin grandes necesidades de soporte inicial. La escudada cuenta con una protección que brinda el soporte inmediato a la excavación y ésta se apoya sobre los anillos previamente colocados, es diseñada para la excavación en roca blanda y suelos donde el frente es inestable o por si se encuentra por debajo del nivel freático. Por último, la de doble escudo;

es una combinación de las anteriores, ya que se puede apoyar sobre la excavación y/o los anillos colocados.

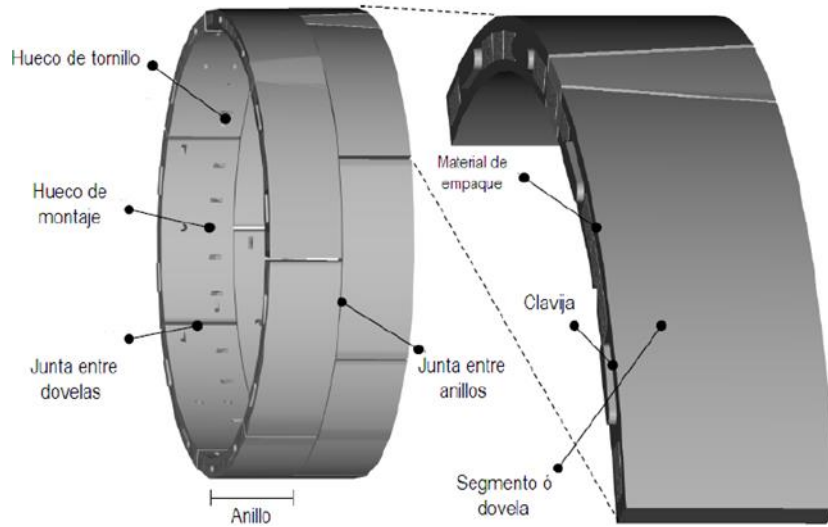
Por otro lado, Escobar (2006), comenta que para el caso de túneles en suelos, los cuales se pueden encontrar por debajo del nivel freático o saturados, se utiliza la TBM con escudo, brindando el soporte a las paredes de suelo. En este caso, la tuneladora puede ser de frente abierto cuando la excavación es estable y la afluencia del agua es reducida; o cerrado cuando el frente es inestable y/o saturado, realizando una presurización en el frente de excavación. En el caso de frente cerrado se tiene como ejemplo el Escudo de Balance de Tierras (EPB), en éste, el material excavado y el agua del propio terreno forman una mezcla plástica con la que se estabiliza el frente.

Si se quisiera reutilizar las tuneladoras, debido a que éstas dependen de las características del terreno original (proyecto), para poder hacerlo es indispensable que exista una gran similitud entre el terreno original y donde se desea implementar.

## **1.1 Elementos del túnel dovelado**

El túnel dovelado, considerado como el revestimiento primario, está conformado por anillos de dovelas prefabricadas de concreto (Figura 4), a éste se le puede adosar un revestimiento secundario, según sea el caso. El revestimiento primario brinda el soporte de manera inmediata a la excavación. Aunque muchas veces se menciona que es un método principalmente para suelos blandos, también es utilizado en suelos duros. Esto depende de las características de la máquina perforadora, las propiedades mecánicas del terreno y el criterio que se tome en el proyecto. Este revestimiento al tener juntas entre las dovelas cuenta con sellos que garantizan cierta impermeabilidad. El diseño de las dovelas puede hacerse para condiciones de carga a corto y/o largo plazo, esto depende fundamentalmente de las propiedades del suelo y del criterio que se toma en el proyecto (resistencia que pueda tener el revestimiento de dovelas).

Por otro lado, el revestimiento secundario puede ser de concreto colado in situ utilizando cimbra deslizante o concreto lanzado. El diseño de este revestimiento se puede hacer para cargas a largo plazo o para trabajar en conjunto con el revestimiento primario. Además, este revestimiento al ser continuo es el que suele brindar una mejor impermeabilidad al túnel.



*Figura 4. Elementos que forman un anillo de dovelas (Luttikholt, 2007)*

### **1.1.1 Revestimiento primario**

El revestimiento primario se forma con el menor número de dovelas posible, pues con esto se agiliza su construcción, además, respecto al comportamiento estructural del túnel, se tiene un menor número de juntas y por ello una estructura más continua y rígida, que permite limitar las deformaciones y distorsiones. Otras consideraciones en las dimensiones y el número de dovelas, de acuerdo con Luttikholt (2007), pueden ser: el espacio de almacenamiento, el transporte y la extensión máxima disponible de los gatos hidráulicos de la perforadora.

Las características del anillo formado por dovelas dependen de las solicitaciones, las características físicas de la tuneladora, las propiedades de los materiales y la geometría del anillo. De ésta última, la dimensión en dirección hacia el eje longitudinal del túnel, como indica Toan (2006), depende del tiempo de excavación (velocidad de avance de la tuneladora), el peso de la dovela y del riesgo de daño en su manipulación.

Por otro lado, el espesor de la dovela y/o del anillo depende más de la demanda de elementos mecánicos y deformaciones de la estructura. Finalmente, el túnel dovelado comienza a trabajar una vez que se tiene un anillo completo y éste empieza a interactuar con el suelo; es decir, el escudo de la perforadora ha dejado de brindar el soporte a las paredes de suelo.



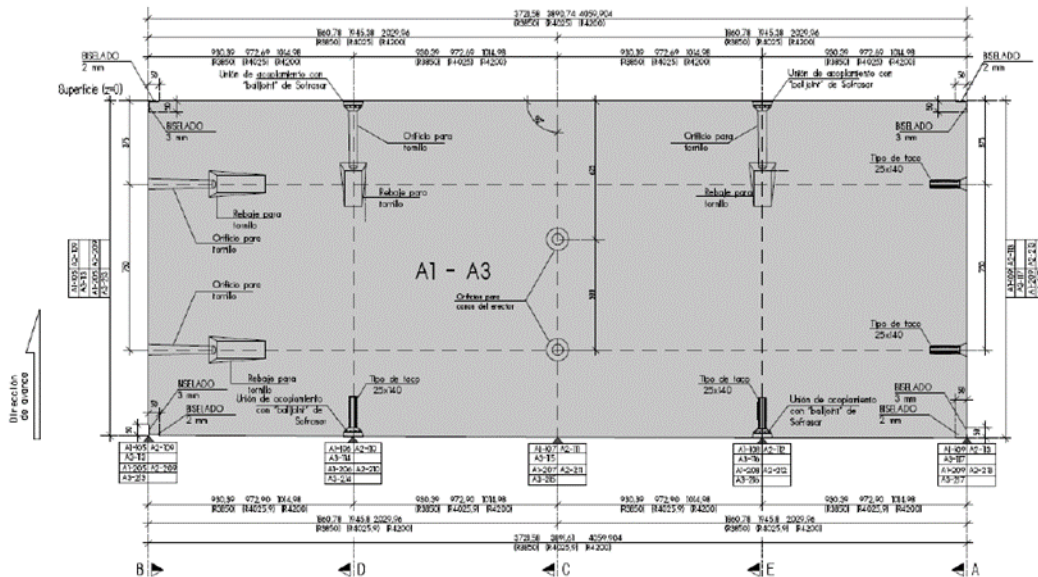


a)

b)

**Figura 5. Anillo de dovelas: a) almacenaje de dovelas (Vittorio et al., 2007); b) anillos de dovelas habilitados**

La Figura 5a muestra el número de dovelas que forman un anillo y la manera en que se almacenan; mientras que en la Figura 5b se observa un tramo de túnel terminado (varios anillos colocados).

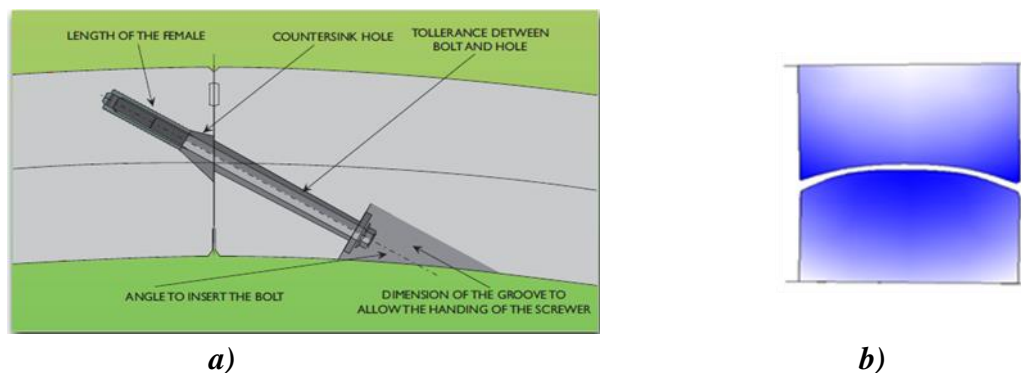


**Figura 6. Vista interior en planta de la dovela (CONAGUA, 2011)**

En la Figura 6 se puede apreciar las características geométricas de la dovela y las preparaciones para los tornillos entre dovelas y entre anillos. Por otro lado, se tienen preparaciones (símbolo A1 y A3) para rellenar el espacio que queda entre la parte exterior de las dovelas y la excavación.

### 1.1.2 Juntas entre dovelas

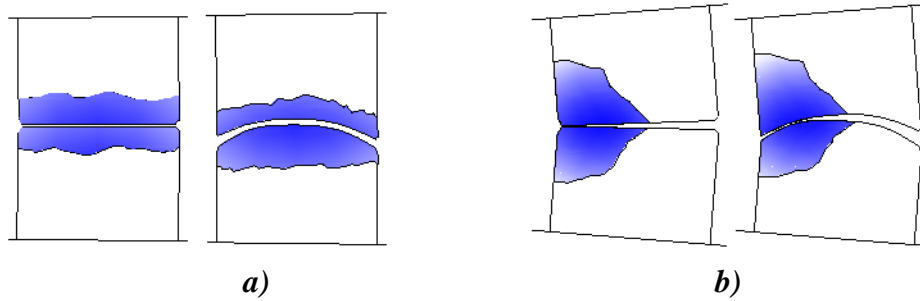
Las juntas entre dovelas modifican la respuesta estructural del anillo, asignándole cierta flexibilidad. De éstas existen principalmente dos tipos: juntas planas y convexas (Figura 7), teniendo como principal diferencia la capacidad misma de transmitir momentos flexionantes. De acuerdo con Galván (2013), el funcionamiento de las juntas planas se puede explicar de la siguiente manera: al presentarse una rotación en las juntas se origina un momento flexionante debido a las fuerzas normales actuantes sobre el anillo, el cual tiende a cerrar la junta; además, si se tienen grandes rotaciones tendrá lugar una concentración de esfuerzos a compresión, lo que podría aplastar la sección de concreto.



**Figura 7. Junta entre dovelas: a) esquema de una junta plana (Vittorio et al., 2009); b) junta convexa**

La Figura 7 muestra la junta plana y la convexa. La primera cuenta con un tornillo, el cual le da estabilidad a los anillos de dovelas y no tiene una función estructural, también, con éste se asegura que los sellos brinden la impermeabilidad. Además, en una primera instancia el anillo queda conformado (presionado) por los tornillos y por la fuerza que ejercen los gatos de la tuneladora que se apoyan en el anillo terminado, después y de manera definitiva el trabajo del anillo es por la presión de suelo. Si bien en las juntas se siguen usando tornillos son únicamente para la etapa constructiva y no son considerados en el diseño estructural ya que como indica Peña et al. (2012) no modifican la resistencia ni la rigidez del anillo. Por otro lado, las juntas convexas no tienen capacidad de transmitir momentos flexionantes, gracias a su geometría, pues éstas pueden rotar libremente.

Las fuerzas internas que se desarrollan en las juntas entre dovelas (fuerza axial y momento flexionante), están relacionadas al tipo de carga a la que se encuentra sometido el anillo; es decir, valor y forma de la carga. Si el anillo se encuentra bajo una carga radial uniforme se tiene el comportamiento de anillo perfecto, dando lugar a un esfuerzo uniforme en la zona de juntas (Figura 8a) y un valor de rotación igual a cero (eje a eje de segmentos de dovela).

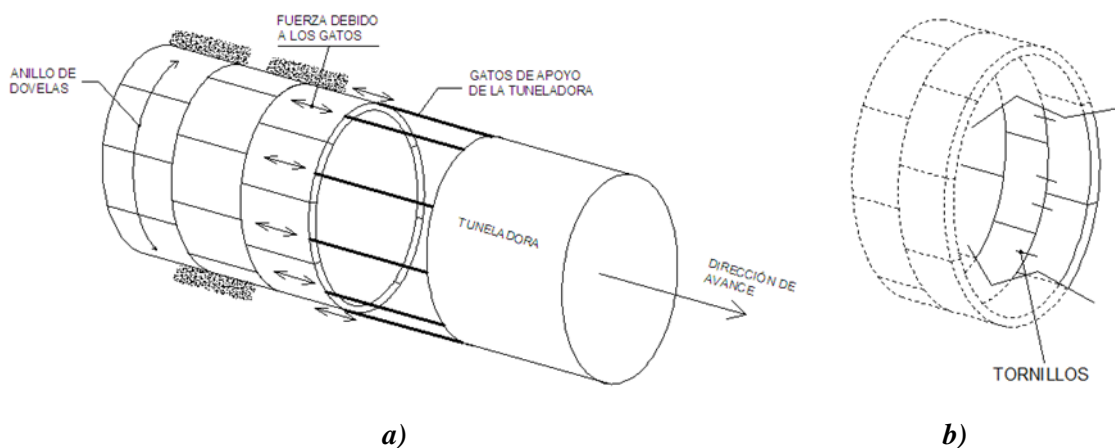


**Figura 8. Distribución de esfuerzos en zona de juntas: a) distribución uniforme de esfuerzos de compresión para rotaciones pequeñas o nulas; b) concentración de esfuerzos de compresión debido a grades rotaciones**

Por otro lado, si la condición de carga en el anillo no es uniforme se presenta una rotación en las juntas, lo que produce una concentración de esfuerzos locales debido a la pérdida de contacto (Figura 8b).

### 1.1.3 Juntas entre anillos

La interacción entre anillos contiguos se debe al rozamiento que se tiene entre sus superficies de contacto y a las fuerzas perpendiculares que se aplican en el anillo, por lo que no siempre trabajan de manera independiente. Estas fuerzas son producto de los gatos de la TBM que se apoyan directamente sobre los anillos colocados (Figura 9a). Además, al igual que en las juntas entre dovelas, también entre los anillos se pueden tener tornillos que garantizan la funcionalidad de los sellos que dan la impermeabilidad al túnel (Figura 9b).



**Figura 9. a) Fuerza entre anillos de dovelas debido a los gatos de la tuneladora; b) tornillos entre anillos**

Respecto a los tornillos entre anillos León (2012) comenta, que si bien la fuerza de los tornillos existe, no se considera como contribuyente al acoplamiento por rozamiento, pues su principal función es asegurar que la banda de estanqueidad se mantenga comprimida durante el montaje del anillo.

## **1.2 Proceso de construcción de túneles dovelados con máquina tuneladora**

El principio fundamental de la máquina tuneladora (TBM) es ir excavando, y de ser el caso, al mismo tiempo brinda el soporte necesario a las paredes de suelo o roca.

Una vez definida la ubicación, el trazo y el diseño del túnel se ensambla la máquina tuneladora (Figura 10), la cual cuenta con un escudo que brinda soporte a las paredes de la excavación. Después de haber armado la TBM se inicia la perforación del túnel, ésta se realiza en avances de un ancho de anillo de tal manera que permita colocar las dovelas. Para poder lograr la perforación es necesario que la máquina se impulse hacia el frente y debido a que en esta instancia no se cuenta con anillos de dovelas es común considerar una estructura temporal en la cual se apoye la perforadora.

Simultáneamente a la perforación se extrae el material de rezaga. Para esto, la tuneladora cuenta con un tornillo tipo sin fin el cual extrae el material que se corta y lo coloca sobre un sistema de bandas para transportarlo hasta una zona de tiro fuera del túnel.

Al mismo tiempo en que se perfora se van suministrando las dovelas prefabricadas. Lograda la longitud de avance se detiene la excavación y con ayuda de los aditamentos de la TBM se colocan las dovelas para así, formar el anillo (Figura 11). Las dovelas habilitadas son presionadas por los gatos de la tuneladora, de éstos, su distribución es uniforme y simétrica, y todos los segmentos están presionados por al menos uno de ellos.

Una vez completado el anillo, la tuneladora reanuda la excavación impulsándose con los gatos que ahora se apoyan en las dovelas colocadas y se ponen los tornillos (conectores) entre dovelas y entre anillos; por lo que llegado a este punto se tiene un tramo de avance igual al ancho de la dovela.

Después, se inicia otro ciclo de avance repitiendo los puntos antes mencionados. Ya que se han colocado varios anillos, de acuerdo con Peña et al. (2012), los tornillos se pueden retirar, si así se desea, pudiéndose reutilizar en otros tramos del mismo túnel. Las dovelas cuentan con orificios que permiten inyectar una mezcla en el espacio que queda entre las dovelas y el terreno excavado.

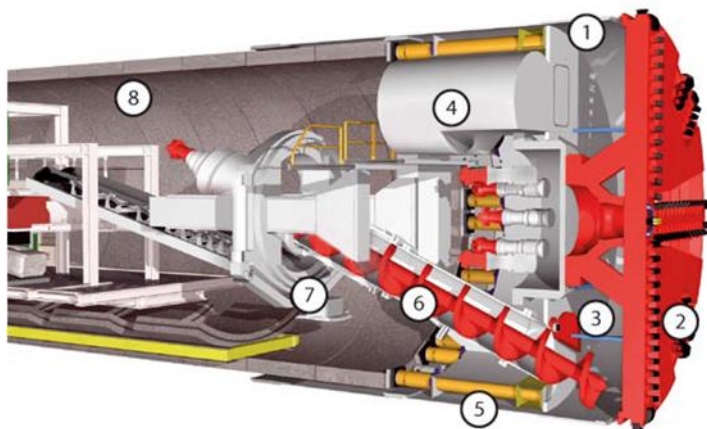


***Figura 10. TBM ensamblada (CONAGUA, 2011)***

En la Figura 10 se muestra el escudo ensamblado apoyado sobre la cuna de arrastre, en el frente la cabeza cortadora y en la parte posterior el tren de carga. Por otro lado, en la Figura 11 se muestran las partes principales de la tuneladora, resaltando de éstas:

- El escudo (1); brinda la protección a la tuneladora y a los anillos de dovelas recién colocados (en este caso se aprecian dos anillos protegidos).
- Cabeza cortadora (2); consiste en un disco giratorio equipado con diferentes herramientas de corte (discos simples o dobles y brocas), que efectúa la excavación gracias a la acción simultánea del giro y el empuje contra el terreno.
- Cámara de fluidos (3); en ella se contiene la masa de suelo y agua con la que se estabiliza el frente de la excavación.
- Presión de bloqueo (4); si el frente de ataque es inestable, se utiliza dicha presión para estabilizar la excavación (actúa como un sello contra el suelo).
- Pistones axiales o gatos (5); con ellos la TBM se apoya sobre los anillos de dovelas recién colocados para impulsarse contra el frente de ataque.
- Tornillo tipo sin fin (6); con este aditamento se extrae el material del frente de ataque y se coloca sobre las bandas transportadoras.
- Erector (7); este aditamento sujeta las dovelas y las levanta para colocarlas en su posición y así formar el anillo (8); además en la parte inferior de la Figura 11 se puede observar el suministro de dovelas (transporte de dovelas).





- 1-Escudo
- 2-Cabeza cortadora (discos y brocas)
- 3-Cámara de fluidos (excavación bajo presión de suelo)
- 4- Presión de bloqueo
- 5-Pistones axiales (gatos)
- 6-Tornillo tipo sin fin, extractor del material
- 7-Erector
- 8-Anillos de dovelas

**Figura 11. Partes de la perforadora y del túnel (LUNARDI, 2008)**

Entre dovelas y entre anillos se tienen juntas, en las cuales se colocan sellos para garantizar cierta impermeabilidad del túnel. En ocasiones suelen considerarse pernos sujetadores para garantizar el trabajo de los sellos. De acuerdo con Peña et al. (2012) dichos pernos no tienen función estructural y después de cierta longitud de avance se pueden retirar y reutilizar. En la Figura 4 se mostró el esquema de las partes básicas de una sección de túnel formado por dovelas.

### **1.3 Comportamiento teórico de las juntas entre dovelas**

En la realización de los modelos numéricos se debe considerar un comportamiento teórico de los elementos que conforman la estructura; este comportamiento debe ser representativo de la realidad. Por lo que a continuación se presenta el comportamiento teórico para las juntas entre dovelas.

En el caso de las juntas planas, el comportamiento teórico se puede explicar de la manera siguiente; de acuerdo con Peña et al. (2012), si la junta y la dovela tienen el mismo largo  $h$  no se presentarán rotaciones adicionales, pero si el largo de la junta es pequeño comparado con el de la dovela, se tendrán grandes rotaciones debido a la curvatura de la junta, además indica que: como la junta no es capaz de transmitir esfuerzos de tensión, al presentarse un incremento en el momento flexionante, llegará un instante en el que en uno de los extremos de la junta la presión sea igual a cero (se pierde el contacto), lo cual origina rotaciones adicionales, que teóricamente ocurre cuando el momento flexionante  $M$  es igual a  $M=1/2Nh$ .



*Figura 12. Junta plana típica de una dovela (Peña et al., 2012)*

### **1.3.1 Relación momento-rotación**

Una forma de reproducir el comportamiento teórico de las juntas entre dovelas es mediante resortes rotacionales, los cuales obedecen una ley momento-rotación. En forma conceptual, ésta consiste de la siguiente manera: si la junta tiende a rotar, debido a las acciones a las que se encuentra sujeto el anillo, transmitirá un momento flexionante en función de la rotación entre dovelas.

### **1.3.2 Relación momento-rotación para carga axial constante**

Las relaciones momento-rotación siguientes se obtienen a partir de una carga axial constante. En éstas, la carga axial actuante en la junta depende de la flexibilidad de la misma, lo cual requiere de una serie de iteraciones en las que se va variando la flexibilidad de la junta y la carga actuante en ella.

Una ley momento-rotación es la propuesta por Janssen (van der Vliet, 2006, citadas por Galván, 2013). Ésta reproduce el comportamiento de una junta plana sin tornillos y considera un material elástico lineal de las dovelas. En la Figura 13 se presentan curvas momento-rotación para varios niveles de carga axial obtenidas con la propuesta de este autor, las cuales son de forma bilineal. La primera rama es elástica lineal, y su rigidez es función del módulo de elasticidad y de las características geométricas de la junta. La segunda parte representa el comportamiento inelástico de la junta y está en función de la carga axial  $N$  que a ella llega, además del módulo de elasticidad y la geometría de la junta. Asimismo, en esta parte de la curva se encuentra el momento máximo resistente de la junta.

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

La ecuación anterior (Galván, 2013) conforma la ley constitutiva de Janssen. Donde;  $E$  es el módulo de elasticidad,  $M$  el momento flexionante,  $N$  la fuerza axial,  $h$  el largo de la junta,  $b$  el ancho y  $\varphi$  la rotación de la junta.

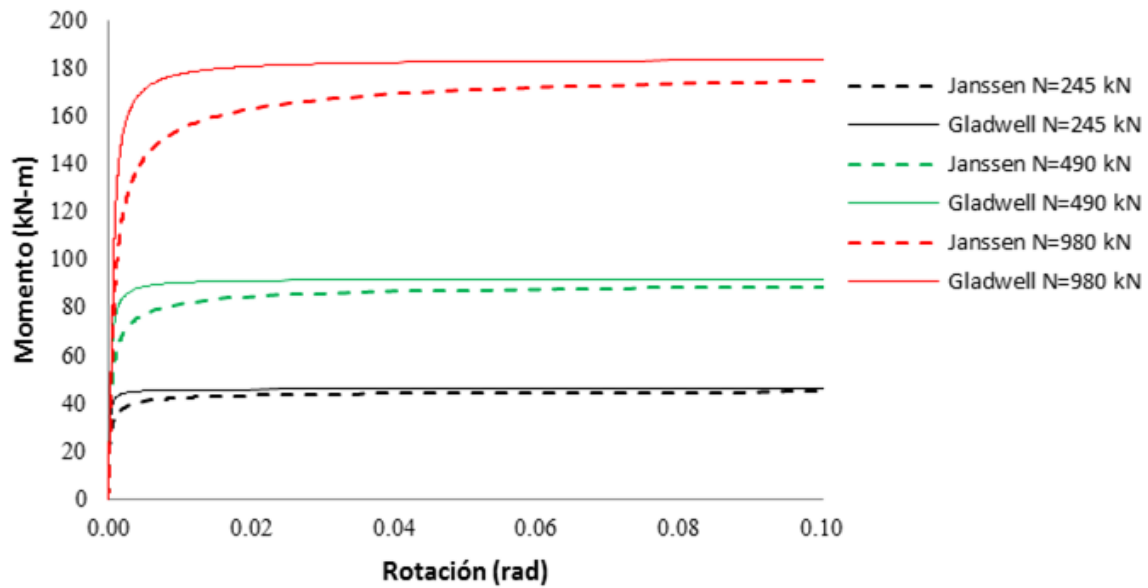
El criterio siguiente corresponde a la relación momento-rotación de Gladwell, y éste es similar al de Janssen (Figura 13). La relación propuesta es representativa de dos superficies planas sin tornillos, consta de una parte elástica lineal y una parte inelástica. La ecuación que reproduce el modelo de Gladwell (van der Vliet, 2006, citadas por Galván, 2013) se menciona a continuación:

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

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

$E$  es el módulo de elasticidad,  $N$  carga axial,  $\nu$  el coeficiente de Poisson,  $M$  el momento flexionante,  $h$  el largo de la junta y  $b$  el ancho.





**Figura 13. Curvas momento-rotación para niveles diferentes de carga axial constante**

Las curvas de la Figura 13 muestran el comportamiento teórico para juntas planas con diferentes valores de carga axial, en las cuales se utilizaron las ecuaciones 1 y 2. La rigidez inicial y el momento flexionante asociado al punto de fluencia son mayores en el caso de Gladwell. Como en el caso de Janssen se requiere un momento menor para que se inicie la fluencia, será en éste donde la junta se abra primero.

### 1.3.3 Relación momento-rotación para carga axial variable

La siguiente relación momento-rotación se obtiene a partir de una carga axial variable, donde la excentricidad de la carga está dada por la relación entre la carga axial y el momento actuante interno de la dovela, los cuales dependen de las cargas que actúan en el anillo.

Esta relación momento-rotación es presentada por Peña et al. (2012), la cual se basa en el modelo de Gladwell. Mientras que la relación de Gladwell está en función de una carga axial constante y requiere de una serie de iteraciones en los análisis, la relación de Peña considera una carga axial variable y una excentricidad constante, misma que se construye con sólo dos parámetros: rigidez inicial y momento máximo resistente. Teniendo la ventaja de que sólo se requieren dos iteraciones.

A continuación se presentan las ecuaciones que definen la ley momento-rotación propuesta por Peña et al. (2012), en las cuales el momento está en función de la rotación y de la excentricidad de la carga.

$$M = \begin{cases} \frac{\pi h^2 b E}{32(1-\nu^2)} \varphi & \text{si } e \leq \frac{1}{4} h \\ \frac{\pi b E (\frac{h}{2} - e)}{2(1-\nu^2)} \varphi e & \text{si } e > \frac{1}{4} h \end{cases} \quad (3)$$

La ecuación 3 define la rigidez inicial

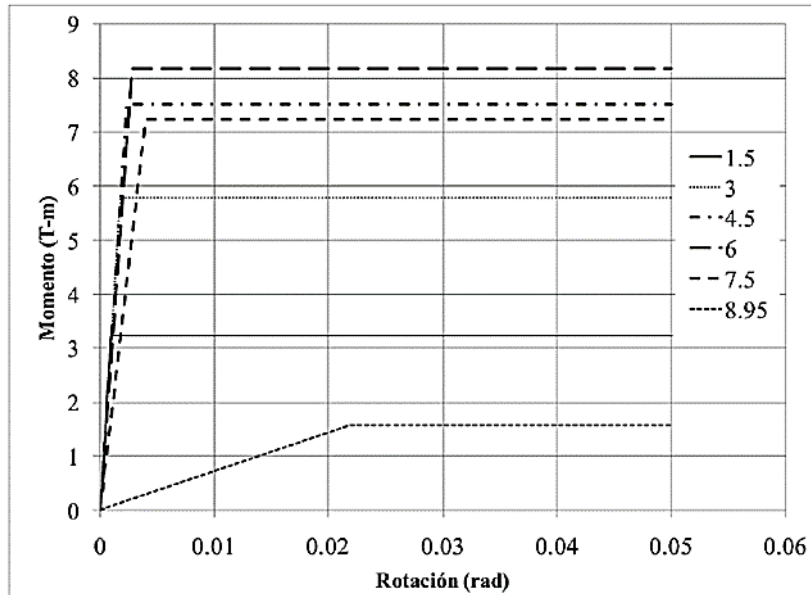
$$M_{m\acute{a}x} = P_{m\acute{a}x} e = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} f' c A_1 e \quad (4)$$

La ecuación 4 define el momento máximo resistente, donde  $M_{m\acute{a}x}$  es el momento máximo resistente y  $P_{m\acute{a}x}$  la carga de aplastamiento del concreto, calculada de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Estructuras de Concreto del Reglamento de Construcción del Distrito Federal (NTC-C\_RCDF, 2004).

Y la rotación de fluencia está dada por:

$$\varphi_y = \begin{cases} \frac{32(1-\nu^2)}{\pi h^2 b E} M_{max} & \text{si } e \leq \frac{1}{4} h \\ \frac{2(1-\nu^2)}{\pi b E e (\frac{h}{2} - e)} M_{max} & \text{si } e > \frac{1}{4} h \end{cases} \quad (5)$$

En las ecuaciones anteriores;  $e$  es la excentricidad de la carga (la cual está dada por el momento y la carga axial),  $A_1$  y  $A_2$  es el área de contacto y el área de la figura de mayor tamaño, respectivamente.  $f'c$  es la resistencia nominal del concreto a compresión,  $\nu$  es el coeficiente de Poisson y  $E$  el módulo de elasticidad del concreto. Mientras que  $h$  y  $b$  son las propiedades geométricas de la junta.



**Figura 14. Relación momento-rotación bilineal, para diferentes excentricidades (Peña et al., 2012)**

La Figura 14 muestra la relación momento-rotación para una junta plana sin tornillos para varios valores de excentricidad ( $e = 1.5, 3, 4.5, 6, 7.5$  y  $8.95$  cm) utilizando las expresiones propuestas por Peña et al. (2012). Se puede apreciar que la rigidez inicial y el momento máximo dependen de la excentricidad de la carga. Además, de que el momento máximo está asociado a una excentricidad límite. Después de dicha excentricidad la rigidez inicial y el momento máximo decrecen.

La excentricidad límite corresponde al tercio medio de la junta ( $h/3$ ). Por otro lado, cuando la excentricidad tiende a la mitad de la junta ( $h/2$ ) la rigidez inicial tiende a cero. De la misma manera se puede notar, que para construir la relación momento-rotación basta con calcular el momento máximo y la rotación de fluencia, lo que se vuelve muy práctico.

#### 1.4 Comportamiento experimental

En el análisis estructural de túneles dovelados (por ejemplo al utilizar modelos numéricos) se deben considerar elementos para representar las diferentes partes que lo constituyen (dovelas, juntas entre dovelas o entre anillos de dovelas), si bien el comportamiento de algunos de estos elementos ya está bien definido, se tienen otros que vale la pena estudiar para mejorar su aplicación. Para lograr lo anterior se realizan pruebas experimentales de una sección específica o de la estructura completa, lo cual permite realizar simplificaciones o formulaciones al realizar los modelos numéricos.

En el caso de modelos experimentales respecto a túneles dovelados, a continuación se presenta una síntesis de los trabajos realizados.

#### **1.4.1 Juntas planas entre dovelas**

Hordijk y Gijbers (1996), presentan los resultados de ensayos de especímenes a escala de dovelas del túnel “Second Heinenoord” y juntas entre ellas. En estos especímenes se consideró la influencia de tornillos. A continuación se indican las conclusiones de dichos ensayos:

- La rigidez rotacional inicial de la junta depende de la fuerza normal que a ella llega, debido a que las irregularidades de las superficies que forman la junta originan que dichas superficies no estén completamente en contacto;
- La rigidez rotacional se incrementa con un incremento de la fuerza normal;
- La influencia del tornillo en la relación momento-rotación no es importante y decrece con un incremento de la fuerza normal que llega a la junta;
- Debido a que las primeras grietas aparecieron en un nivel muy alto de carga, se puede afirmar que la resistencia de la junta es suficiente para su implementación en la práctica y para los niveles de fuerza normal especificados.

Schreyer y Winselmann (1998, 2000), realizaron pruebas experimentales para un túnel de drenaje en “STUVAtch Center” en Alemania. Dichos experimentos consistían en estudiar las características de las juntas entre dovelas mediante pruebas entre tramos rectos que reproducían la conexión a escala natural. De las pruebas obtuvieron las siguientes conclusiones:

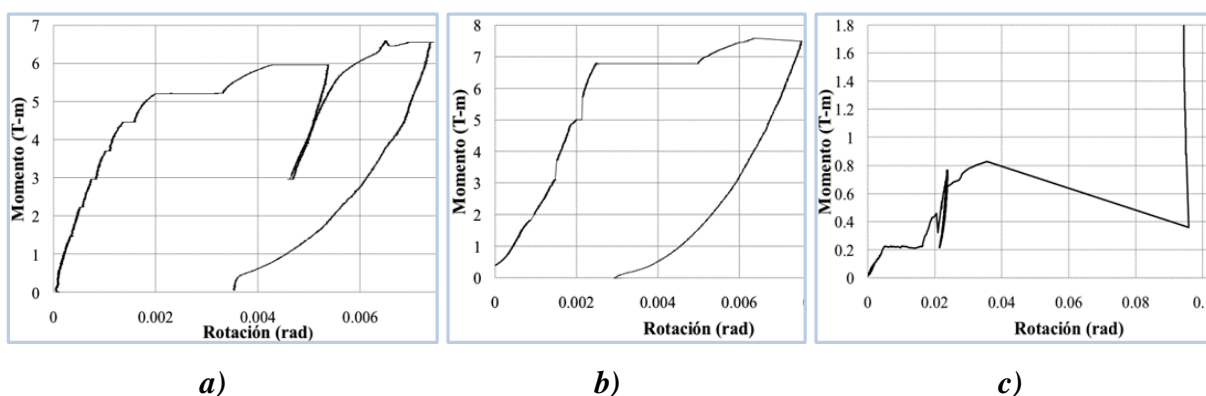
- Los procedimientos de cálculo que habían desarrollado para el diseño de las juntas predecían con buena precisión la capacidad y rigidez de las mismas;
- La falla se produjo por aplastamiento de la saliente de concreto (asiento) y se transmitía después hacia abajo en la sección completa de la dovela;
- Se encontró que con un refuerzo transversal adecuado en dicho extremo se podía aumentar la capacidad de carga de la junta en 2.5 veces.

Recientemente, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM se estudió el comportamiento mecánico de juntas planas similares a las utilizadas en un túnel dovelado típico construido en México, mediante modelos a escala, Peña et al. (2012). En este estudio, al igual que en Hordijk y Gijbers (1996), no se consideró la curvatura de las dovelas reales, además como el objeto en cuestión era el comportamiento de las juntas y no el de las dovelas, su dimensión en la dirección perpendicular a la zona de contacto entre dovelas se redujo al máximo de modo que fueran manejables. Lo anterior se hizo tomando en consideración, además de las pruebas

experimentales realizadas por Hordijk y Gijsbers (1996), las simulaciones numéricas expuestas en el trabajo de Peña (2010) donde se determinó que esta dimensión y la curvatura de las dovelas no tienen influencia en el comportamiento de las juntas, pues este depende únicamente de su geometría y en las cargas que llegan a la junta. Por otro lado, 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 estudio residió en aplicar cargas axiales excéntricas para simular el comportamiento de las juntas, las cuales se incrementaron hasta la falla. Los especímenes tienen una sección transversal de  $35 \times 37.5 \text{ cm}^2$  de ancho y una altura de 60 cm, se fabricaron de concreto reforzado con una resistencia a la compresión  $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ , obteniendo un módulo de elasticidad nominal  $E$  igual a  $261,916.017 \text{ kg/cm}^2$ .

Se ensayaron 10 especímenes divididos en dos etapas “A” y “B”. Cada espécimen estaba formado por dos dovelas. La diferencia entre ambas etapas es el armado longitudinal y transversal de los mismos. La etapa “A” constó de 6 especímenes los cuales se armaron con cuatro varillas del número seis y cuatro del número cuatro como refuerzo longitudinal, y siete estribos del número tres, por dovela. Por otro lado, los especímenes de la etapa “B” fueron 4 y éstos se armaron con cuatro varillas del número cuatro como refuerzo longitudinal y nueve estribos del número tres, por dovela. Por lo que, los especímenes de la etapa “B” se armaron con una cuantía menor de refuerzo longitudinal, pero con un mayor confinamiento debido a los estribos. Asimismo, en 4 especímenes de la etapa “A” se colocó un perno con la finalidad de evaluar su influencia en el comportamiento mecánico de la junta. El perno fue similar a los utilizados en la construcción de túneles a escala real. Las pruebas se realizaron para tres diferentes excentricidades, 3, 6 y 9 cm. Una descripción detallada de los ensayos se encuentra en el trabajo realizado por Peña et al. (2012).



**Figura 15. Curvas momento-rotación de una junta con excentricidad constante y carga axial variable (Peña et al., 2012), excentricidades de a) 3 cm; b) 6 cm; c) 9 cm**

En la Figura 15 se observan las curvas momento-rotación para las juntas con excentricidad constante y carga axial variable. De éstas se puede ver que el comportamiento se puede aproximar a un comportamiento elasto-plástico (rama inicial elástica y rama plástica).



*a)* *b)* *c)*  
**Figura 16. Fallas de las juntas (Peña et al., 2012) para excentricidades de: a) 3 cm; b) 6 cm; c) 9 cm**

La Figura 16 muestra las fallas de las juntas, en ellas se puede observar que se presenta un agrietamiento debido al desconchamiento del recubrimiento. También en la Figura 16c se puede observar que para una excentricidad de 9 cm se presenta un fenómeno de ablandamiento por rotaciones, lo cual es debido a que la dovela superior gira como cuerpo rígido, lo que la lleva al colapso sin que el material falle, por lo que la curva momento-rotación representa la respuesta típica del giro de un bloque rígido (Figura 15c), lo cual se debe a la excentricidad de la carga. Esto indica que la excentricidad es una condición crítica para las juntas entre dovelas.

Finalmente de las pruebas se concluyó que:

- El perno colocado 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;
- La falla de las juntas fue por desconchamiento del recubrimiento, por lo que el refuerzo de las dovelas no influye en la resistencia de las juntas;
- Si la excentricidad de la junta 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 juntas en sus extremos que se encontraban separados;
- En ninguno de los experimentos se observó un deslizamiento entre las dovelas, lo que permite considerar en los modelos numéricos únicamente la rotación de las juntas y despreciar el deslizamiento entre dovelas.

Por otro lado, se comparó la carga máxima obtenida experimentalmente contra la carga de aplastamiento calculada de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para Estructuras Concreto del Distrito Federal-2004, de lo cual se pudo ver que al utilizar las expresiones del reglamento se puede estimar de manera correcta la resistencia de las juntas. Además, se propuso una relación bilineal para el cálculo teórico de las curvas momento-rotación para una carga axial variable con una excentricidad constante (ver capítulo 1.3.3).

#### **1.4.2 Juntas entre anillos**

Gijsbers y Hordijk (1997), realizaron investigaciones experimentales acerca de la rigidez al corte entre anillos, enfocándose únicamente al cortante de las áreas en dirección radial. En esta investigación, en las juntas, se utilizó plástico como material de empaque, así como madera contrachapada. El espécimen ensayado consistió en 3 bloques de concreto sin reforzar con 2 juntas en ambos lados del bloque central. El bloque central fue cargado por una fuerza normal, al mismo tiempo en que sus deformaciones fueron registradas. La prueba fue controlada por deformaciones. De esta investigación se tienen los resultados siguientes:

- Para la prueba con material de empaque plástico; la velocidad de aplicación de los desplazamientos influyó en la máxima fuerza cortante que podría ser transmitida. Se obtuvieron diferentes coeficientes de fricción para diferentes velocidades de deformación (para una velocidad baja-un coeficiente de fricción bajo y para una velocidad muy baja-un coeficiente de fricción despreciable). De la prueba se tiene que el plástico prácticamente no puede transmitir fuerzas cortante;
- Además, debido a la disminución del plástico, las superficies de concreto entran en contacto, lo que significa que en una junta estas superficies ayudan en la transmisión de fuerzas cortantes. Por lo que, dicha transmisión de fuerzas, dadas por el contacto entre concreto y concreto, depende de cómo se establece dicho contacto, de que tan lisa es la superficie de concreto y de la fuerza normal aplicada. Para estas áreas (donde el concreto entra en contacto) se puede aplicar un coeficiente de fricción de 0.4 y 0.5, con cual se transmite una gran cantidad de fuerza cortante entre anillos;
- Por otro lado, para el caso de material de empaque de madera contrachapada se obtuvieron coeficientes de fricción, los cuales son dependientes de las fuerzas normales y de los desplazamientos aplicados. De esta etapa se obtuvieron resultados a corto plazo y no se obtuvo información del comportamiento del material de empaque a largo plazo. El espesor del material de empaque final fue de la mitad, por lo que los bordes del concreto de las dovelas no entran en contacto. Debido a esto no ocurrieron grandes esfuerzos ni daños.

### 1.4.3 Anillos de dovelas

Schreyer y Winselmann (2000), realizaron pruebas experimentales en un tramo de túnel de 4 anillos a escala natural, el cual se sometió a una distribución de presiones radiales externas igual a las de diseño. En la prueba se varió la relación momento/carga axial, así como algunos detalles de la geometría de la conexión y del refuerzo de las dovelas. Los resultados que encontraron Schreyer y Winselmann son los siguientes:

- La rigidez de la junta fue de casi del doble de la teórica, lo cual, probablemente, se debió a la fricción que se desarrolló entre el concreto y las bandas de sello;
- El aplastamiento desarrollado se presentó para una deformación unitaria de 0.0021 y la junta soportó una rotación de 0.025 rad sin perder la capacidad de carga;
- El asiento efectivo se redujo a 20% de tamaño del “saliente” sin que hubiera problemas de comportamiento.

Por su parte, Teachavorasinskun y Chub-Uppakarn (2009), utilizaron un modelo a escala, con un diámetro de 15 cm y espesor de 8.5 mm, realizado con material PVC. La rigidez de las juntas se obtuvo mediante una serie de pruebas considerando las dovelas de PVC como vigas simplemente apoyadas. La finalidad de esta prueba fue para obtener un factor de reducción de momentos y no para conocer el comportamiento mecánico de las juntas.

Además, realizaron pruebas de capacidad de carga para una sección de anillo y para un anillo completo, en el cual se varió el número y posición de las juntas. Los resultados que encontraron Teachavorasinskun y Chub-Uppakarn son los siguientes:

- Para una sección de túnel con cuatro juntas, el modelo a escala de PVC se comportaba de modo similar a un anillo dovelado de concreto a escala real;
- Si el número de juntas se incrementa, la capacidad de carga es altamente dependiente de la rigidez de las juntas;
- Entre más flexible sea la junta, menor es el momento flexionante que puede ser transmitido;
- También, recomiendan que para cuestiones de diseño, se realice una sencilla prueba de una viga simplemente apoyada usando materiales equivalentes con el fin de obtener la rigidez de las juntas, y con ellas el factor de reducción del momento flexionante.



## **1.5 Modelos de análisis estructural para túneles dovelados**

En el diseño de túneles es imperante tener un buen conocimiento de su comportamiento estructural, pues, aunque la geometría está definida por la función que desempeña y las características de la máquina perforadora, un buen análisis permite tomar decisiones en su concepción como son: el tipo de material, las dimensiones de sus secciones y posibles refuerzos.

### **1.5.1 Consideraciones en el análisis de túneles dovelados**

En el análisis de los túneles dovelados se debe tener en cuenta que existe la fuerza axial producto de la tuneladora, la cual genera interacción entre anillos (Luttikholt, 2007).

Si bien la fuerza axial de los gatos de la tuneladora que provocan la interacción entre anillos se puede calcular en un principio (cuando actúa en los anillos recién colocados), es difícil conocer el valor de dicha fuerza para los anillos que se encuentran alejados de la tuneladora (después de varios anillos colocados).

Para realizar el análisis estructural de un túnel, se debe tener en cuenta que cuando se tiene el 100% de la fuerza axial con la que se impulsan los gatos de la tuneladora, el análisis corresponde a los anillos recién colocados, mismos, que dependiendo del largo del escudo de la TBM, aún pueden estar protegidos por éste, por lo que las presiones de suelo no actúan en él. Por otro lado, cuando se retira la protección a los anillos las presiones de suelo actúan en el túnel, lo cual no ocurre de manera inmediata, pues esto depende de la capacidad de deformación del terreno y del tiempo en que tarde en rellenarse el espacio que queda entre las paredes de suelo excavado y el túnel.

Por lo anterior, cuando existe el 100% de la fuerza axial producto de la TBM no se tiene aún la presión del suelo actuando en el anillo y en caso inverso, cuando se tiene la presión del suelo sobre el anillo, la fuerza ejercida por la TBM en el túnel ya se ha relajado y sólo queda un porcentaje bajo de la fuerza inicial. Como es difícil evaluar el valor de la fuerza axial producto de la TBM que queda en el túnel, es conveniente conocer su comportamiento para varios niveles de esta fuerza axial e incluso para un valor nulo.

A continuación se presentan los tipos de modelos numéricos más comunes que se consideran para el análisis estructural de túneles dovelados.

## 1.5.2 Modelos simplificados

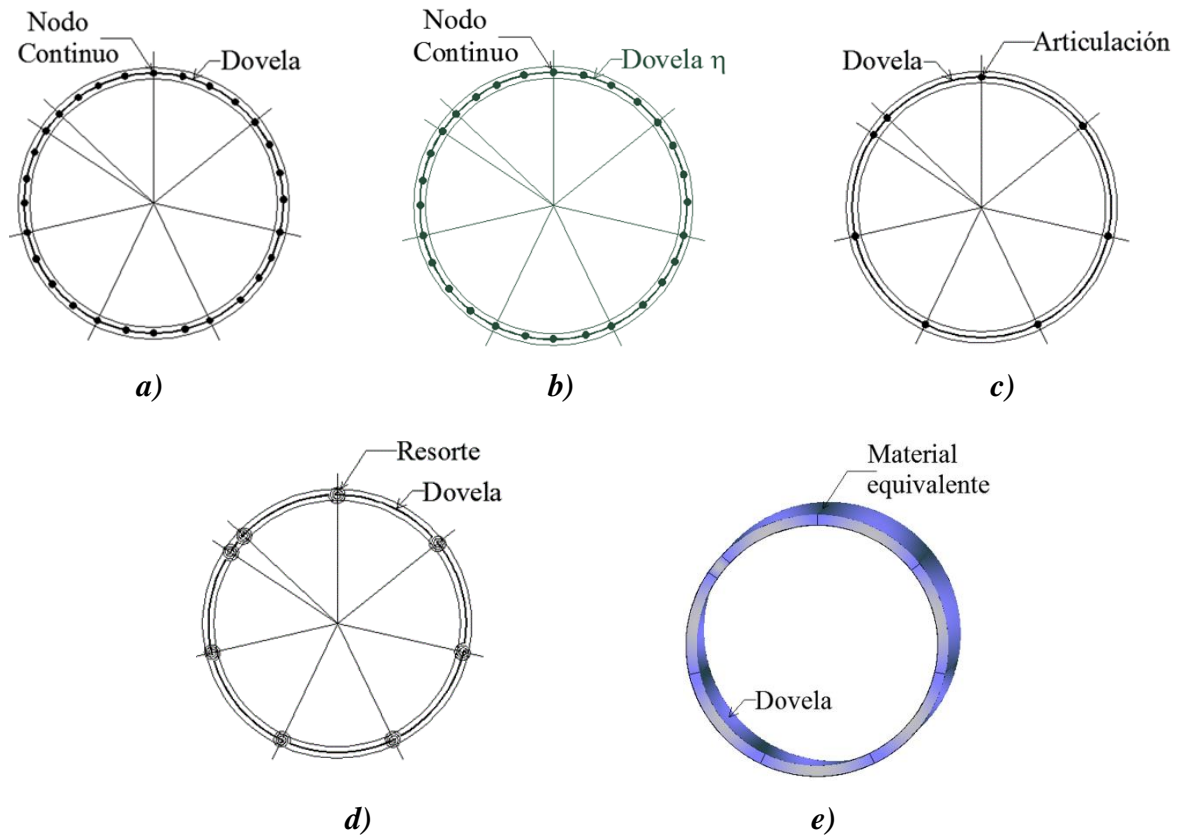
El análisis estructural de túneles dovelados puede realizarse mediante modelos numéricos utilizando el Método del Elemento Finito (MEF), ya que como indica Peña (2010) utilizar esta opción presenta ventajas sobre métodos empíricos y de soluciones analíticas. La principal ventaja de la modelación numérica radica en que se pueden analizar un gran número de casos y condiciones, además los análisis pueden ser complejos o simplificados.

El túnel dovelado se puede analizar de forma simplificada mediante modelos numéricos. De acuerdo con Peña (2010), se puede considerar un comportamiento elástico-lineal de las dovelas y de forma simplificada la influencia de la rigidez de las juntas. Algunos modelos son:

- Anillo Elástico Continuo: Se considera un anillo continuo con material elástico y no se toma en cuenta el comportamiento mecánico de las juntas.
- Anillo Elástico con Rigidez Reducida: Se considera el anillo continuo y elástico pero con una rigidez reducida debido al comportamiento de las juntas.
- Anillo Elástico con Articulaciones en las Juntas: Se considera un anillo elástico pero con articulaciones en las juntas.
- Anillo Elástico considerando la Rigidez de la Junta: Se considera un anillo elástico en el cual se toma en cuenta la rigidez de las juntas mediante resortes o utilizando un material inelástico equivalente.

En la Figura 17 se muestran algunos modelos numéricos simplificados, en éstos se considera a las dovelas como elásticas y las juntas como: a) nodo continuo, b) nodo continuo pero con rigidez reducida en las dovelas, c) articulación en las juntas, d) resortes en las juntas y e) material inelástico equivalente.

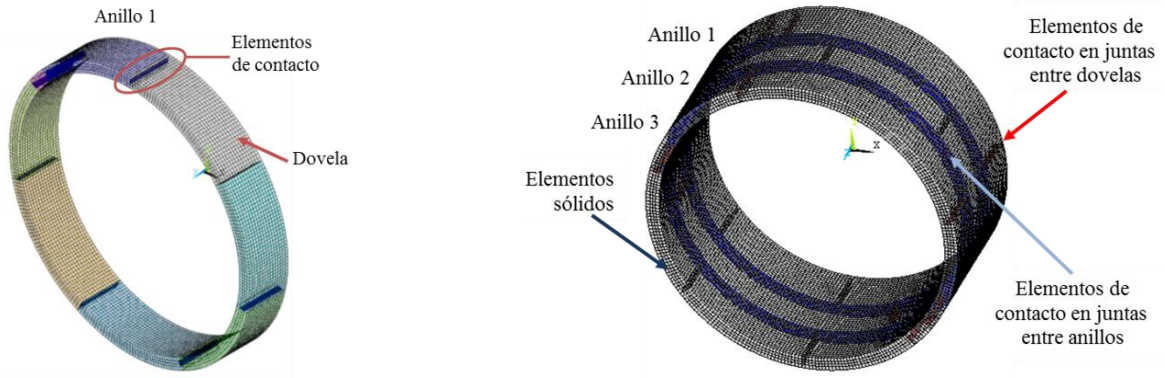
De los modelos anteriores, el que considera articulaciones en las juntas convierte al anillo muy flexible; el que es elástico continuo reproduce la rigidez elástica del anillo; el de rigidez reducida predice bien la deformación última y el que considera la rigidez de las juntas describe mejor el comportamiento del anillo.



**Figura 17. Modelos numéricos simplificados: a) anillo continuo elástico; b) anillo continuo elástico con rigidez reducida; c) anillo que considera las juntas mediante articulaciones; d) anillo que considera las juntas mediante resortes; e) anillo que considera las juntas mediante material inelástico equivalente**

### 1.5.3 Modelos complejos

De acuerdo con Galván (2013), en el caso de los modelos complejos, las dovelas son modeladas mediante elementos sólidos 2D o 3D mientras que las juntas se consideran mediante elementos de contacto o de interfaz (Figuras 18a, b). También se puede considerar la no-linealidad del material y el acero de refuerzo. Además si se toma en cuenta el efecto del acoplamiento entre anillos, se tiene una mayor precisión al reproducir su comportamiento comparado con un modelo simplificado. Por otro lado, el tiempo computacional que requiere en su solución es muy grande, lo cual se vuelve en una desventaja si se compara con el tiempo que requiere un modelo simplificado.



a)

b)

**Figura 18. Modelos numéricos complejos (Galván, 2013): a) modelo complejo de un anillo aislado; b) modelo complejo que considera el acoplamiento entre anillos**

## CAPÍTULO 2: Descripción del modelo experimental presentado por Lutikholt en 2007

En la Universidad de DELFT (Lutikholt, 2007) se ensayó un modelo a gran escala de un túnel construido con dovelas prefabricadas de concreto. Las características geométricas y propiedades de los materiales del modelo experimental corresponden con el Túnel Botlek Railway, construido en Rotterdam, Holanda; estos ensayos fueron realizados en el laboratorio Stevin II de la Universidad de DELFT.

El modelo consistió en tres anillos formados por dovelas, orientados horizontalmente (Figura 19); debido a esto, en el modelo numérico no se tomó en cuenta el peso propio de la estructura. Las cargas consideradas fueron: una carga radial uniforme, la cual simula las presiones en el túnel debido a la profundidad a la que éste se encuentra; una carga de ovalamiento radial que representa la diferencia entre cargas horizontales y verticales debida al tipo de suelo en el que éste está situado y; una carga aplicada axialmente (en dirección al eje longitudinal del túnel), la cual simulaba la fuerza que ejercen los gatos de la tuneladora sobre el anillo para impulsarse.



a)

b)

**Figura 19. Modelo experimental (Lutikholt, 2007): a) vista general del ensaye; b) detalle de las vigas de repartición para la transmisión de la carga radial**

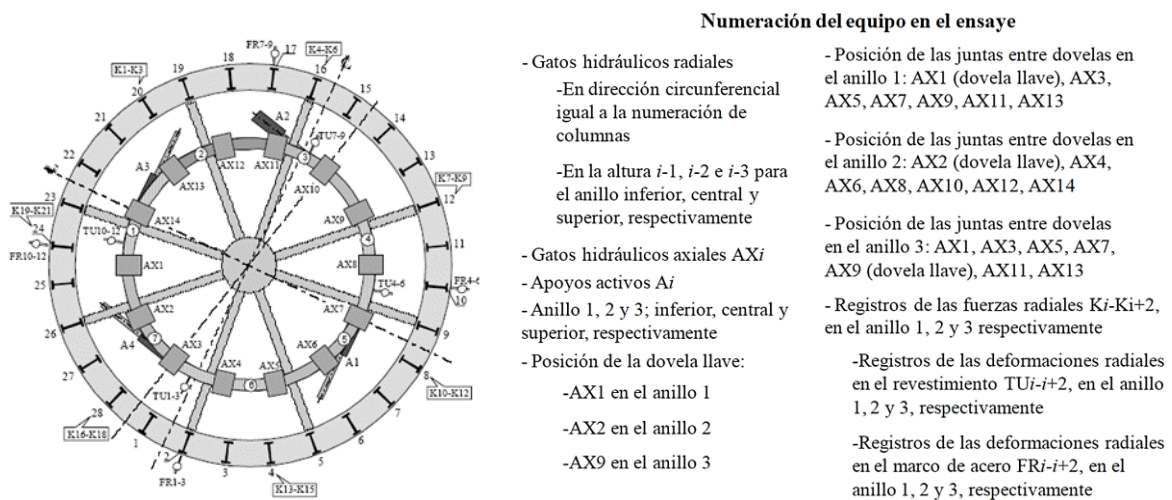
El experimento consistió en dos tipos de prueba, las cuales fueron etiquetadas como C01 y C02. La diferencia entre ellas es que en C01 se consideró una fuerte interacción entre anillos debido al efecto de la fuerza axial (en dirección hacia el eje longitudinal del túnel) que inducen

los gatos de la tuneladora a los anillos, mientras que en C02 la fuerza en dirección eje de túnel es pequeña (0.125 veces la fuerza de C01), dando lugar a una baja interacción entre anillos. Debido a que el objetivo principal de este trabajo fue reproducir el comportamiento estructural de un anillo de túnel aislado, solo se describirá y utilizará la prueba C02, ya que es donde se tiene una baja interacción.

## 2.1 Geometría

Cada anillo estaba formado por siete dovelas, las cuales tenían las mismas características y propiedades, más una dovela de cierre (dovela llave) cuya longitud fue menor (Figuras 20 y 22). El radio interior del anillo fue de 432.5 cm; la dovela tuvo una sección de 150 cm de ancho y 40 cm de largo (Figura 12). Por otro lado, las juntas entre dovelas fueron planas y tuvieron por sección 150 cm de ancho por 17 cm de largo (Figura 12).

El modelo experimental se restringió tangencialmente en cuatro puntos del anillo inferior mediante gatos hidráulicos (símbolos A1, A2, A3 y A4 de la Figura 20), con lo cual se impidieron posibles movimientos de cuerpo rígido de la estructura.



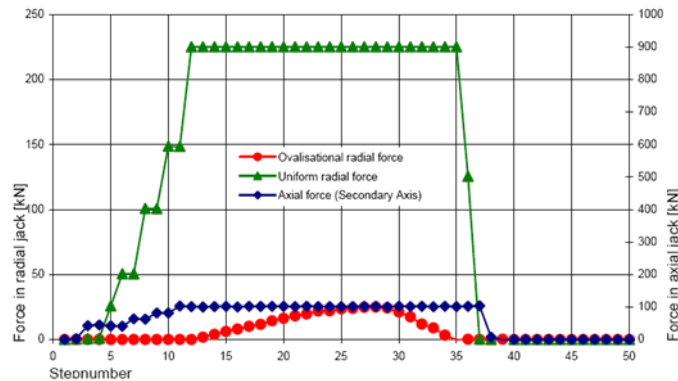
**Figura 20. Geometría. Ubicación de la juntas entre dovelas y posición de los gatos hidráulicos (puntos de aplicación de la carga) (Luttikholt, 2007)**

## 2.2 Cargas

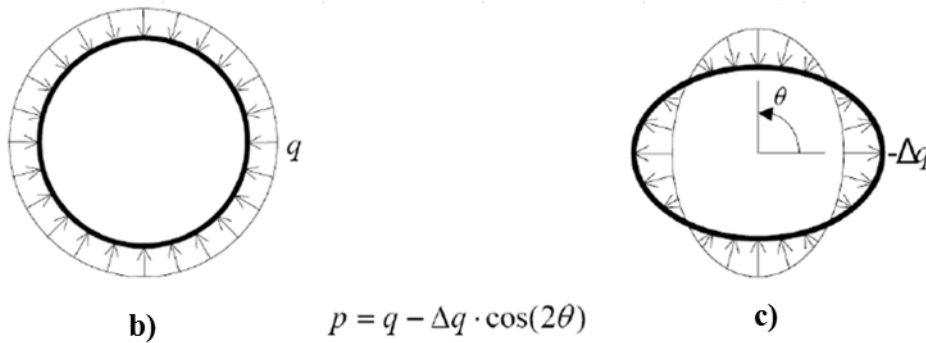
La carga radial uniforme corresponde a una primera etapa, la cual se aplicó con 28 gatos por anillo con una fuerza de 225 kN por gato, ver Figuras 21a, b. Los gatos se apoyaron en una viga de acero distribuyendo la carga en el anillo (Figura 19b). Al tiempo en que se aplicaba la

carga radial uniforme se aplicó una presión axial (dirección al eje del túnel), la cual constó de 14 gatos que ejercían una fuerza de 100 kN cada uno.

Manteniendo constante el estado de cargas y deformaciones anteriores, se dio inicio a la etapa siguiente que consta en incrementos y decrementos de la carga radial uniforme, aplicada previamente con los gatos, para lograr un estado de cargas de forma cosenoidal a lo largo de la circunferencia del anillo. Estos incrementos y decrementos se aplicaron hasta llevar a la falla el modelo experimental, lo cual sucedió al incrementar o decrecer en un 10%, aproximadamente, la carga radial (Figuras 21a, c).



a)



**Figura 21. Cargas aplicadas al experimento: a) protocolo de cargas del modelo (Luttikholt, 2007); b) diagrama de carga radial uniforme (den Uijl, 2003); c) diagrama de carga cosenoidal (den Uijl, 2003)**

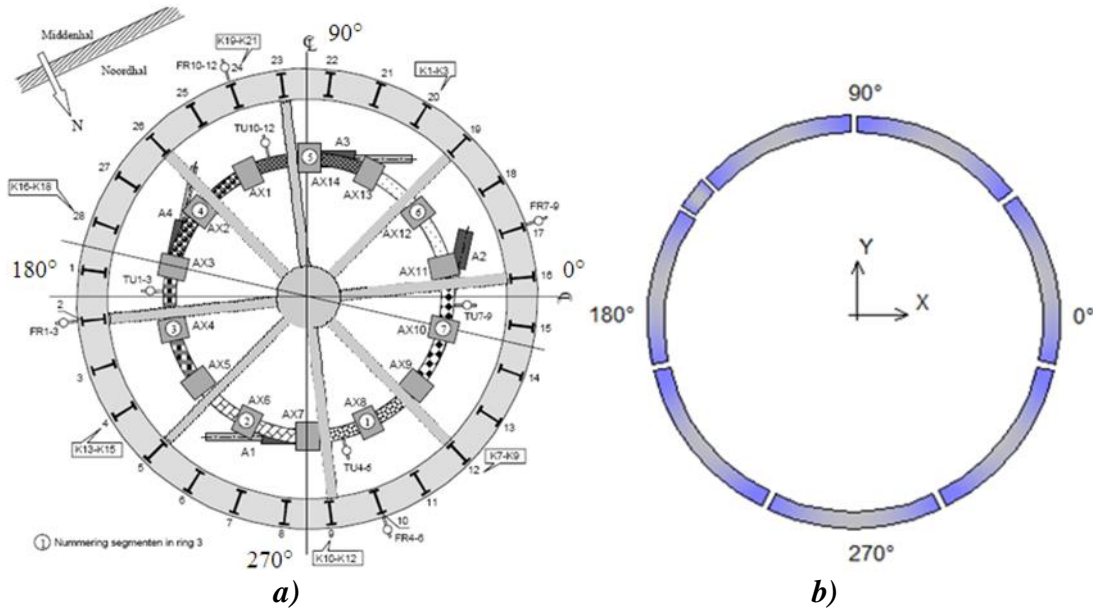
### 2.3 Resultados del modelo experimental

Los resultados de las pruebas fueron medidos a partir de puntos donde se desea conocer el estado de deformación o elementos mecánicos. En este caso los puntos de interés corresponden donde los momentos flexionantes y deformaciones son máximos debido a la carga de ovalamiento, resultando así, cuatro puntos; dos de éstos corresponden a 90° y 270°,

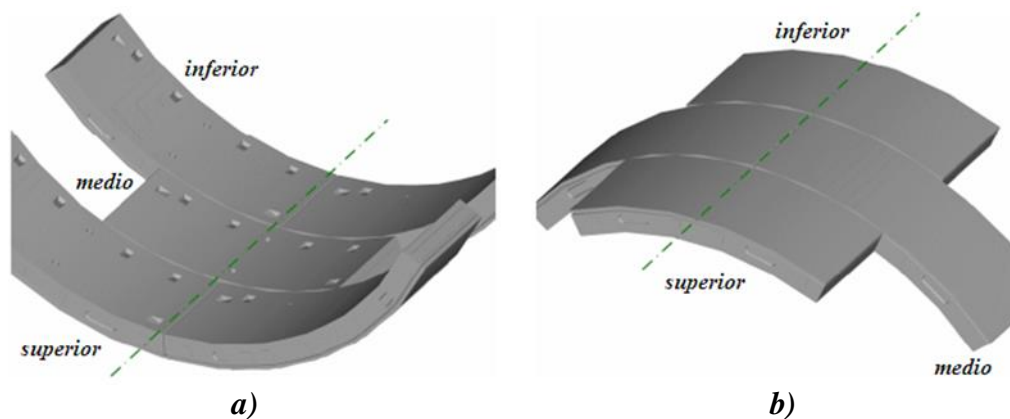


arriba y abajo, respectivamente (Figuras 22 y 23). La sección transversal a  $90^\circ$  tiene una junta, mientras que a  $270^\circ$  se tienen dos, describiendo los tres anillos. Los otros dos puntos donde se cuenta con momentos flexionantes máximos corresponden a  $0^\circ$  y  $180^\circ$  (Figuras 22 y 24).

Por otro lado, para poder conocer la forma de la deformada, cada segmento de dovela estuvo instrumentada con medidores de deformación en tres lugares diferentes en ambos lados de la dovela, con lo cual se logró determinar la deformación horizontal y vertical del anillo (deformaciones radiales y axiales del anillo).

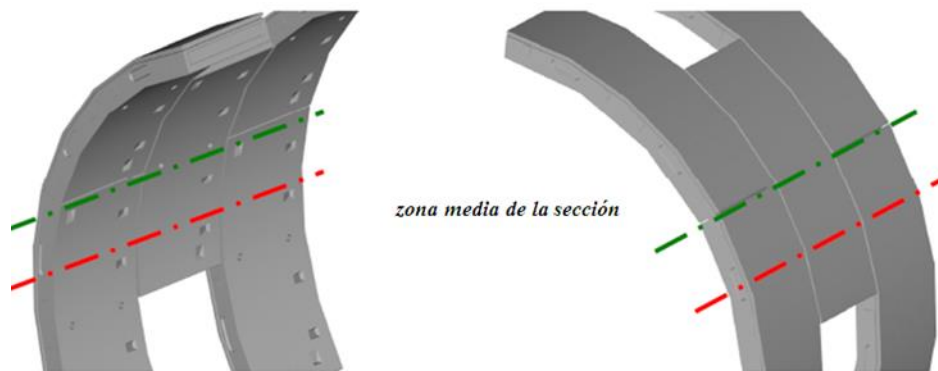


**Figura 22. Ubicación de los puntos para medición de deformaciones: a) ubicación en el experimento (Luttikholt, 2007); b) ubicación respecto a la distribución de dovelas**



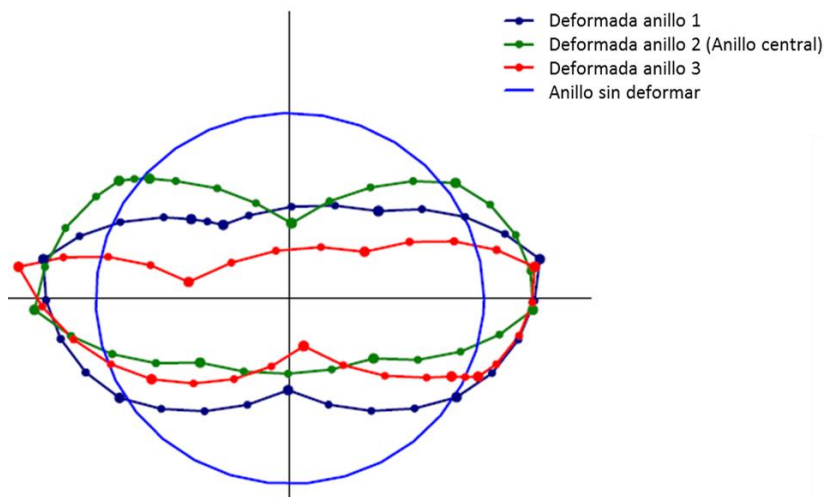
**Figura 23. Puntos de medición de deformación (Luttikholt, 2007): a) ( $270^\circ$ ) un punto en la dovela; b) ( $90^\circ$ ) un punto en la junta entre dovelas**





**Figura 24. Puntos de medición de deformación: en la línea verde se tiene un punto en la dovela en  $0^\circ$  (derecha) y  $180^\circ$  (izquierda); la línea roja indica donde se tiene un momento máximo (Luttikholt, 2007)**

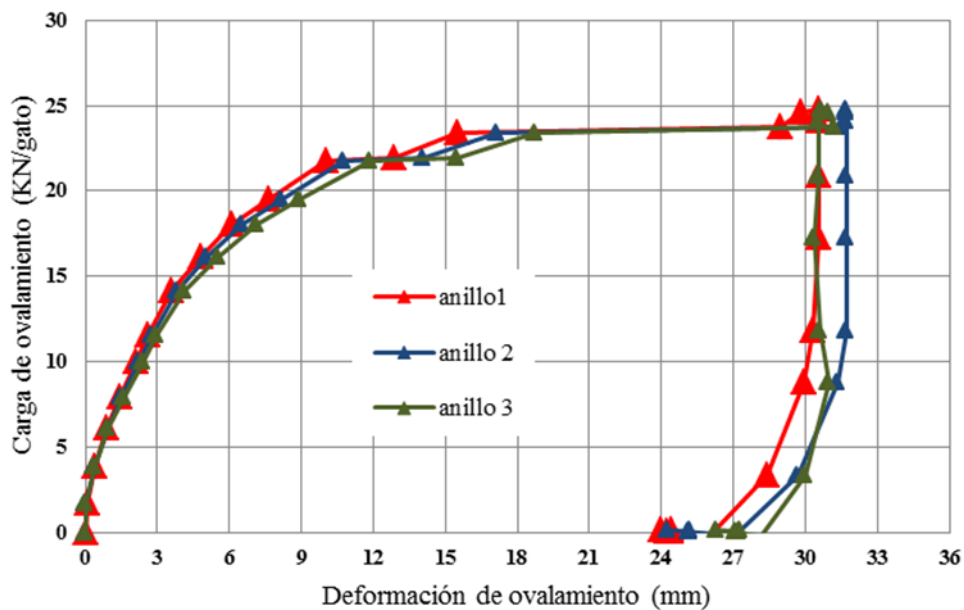
Por facilidad en el manejo de datos, de aquí en adelante, se hará referencia a la deformación y carga que corresponden con la segunda etapa de cargas (carga cosenoidal Figura 21a, c) como carga de ovalamiento y deformación de ovalamiento.



**Figura 25. Deformación del modelo para el máximo valor de carga de ovalamiento, factor de amplificación igual a 50 (paso 30) (Luttikholt, 2007)**

En la Figura 25 se muestra la configuración deformada del experimento para el máximo valor de carga de ovalamiento. La deformación se debe principalmente a las rotaciones entre juntas. De éstas, se tiene que la deformada del anillo superior e inferior (Deformada anillo 1 y

Deformada anillo 3, respectivamente) son parecidas debido a que su ubicación de las juntas coincide, excepto por la dovela llave. Ahora bien, el anillo inferior se deforma menos que el anillo superior debido a que cuatro de sus ocho juntas coinciden con los apoyos tangenciales colocados para evitar movimientos de cuerpo rígido (sección 2.1), lo cual le asigna una mayor rigidez a estas juntas.



**Figura 26. Curvas carga de ovalamiento-deformación de ovalamiento para los tres anillos por separado, obtenidas a partir de los datos de Lutikholt (2007)**

En la Figura 26 se presenta la deformación de ovalamiento para cada anillo por separado. Las curvas corresponden al promedio de la deformación radial de los cuatro puntos de interés (momentos máximos). Como se puede apreciar, las curvas carga de ovalamiento-deformación de ovalamiento de los tres anillos prácticamente tienen la misma forma. La parte no-lineal en las deformaciones se nota después de una carga de ovalamiento de 15 kN/gato y se alcanza la rama horizontal a los 24 kN/gato. Además, se puede apreciar que hay un fuerte incremento en las deformaciones entre 20 y 25 kN/gato.

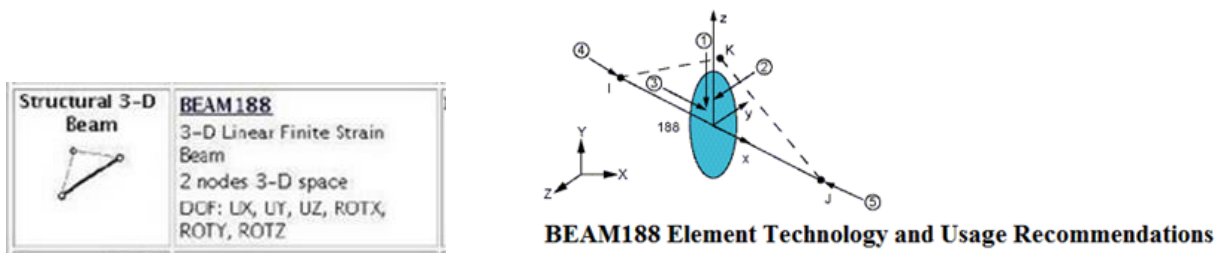
# CAPÍTULO 3: Modelo numérico

## 3.1 Modelo de barras

El modelo numérico del anillo de túnel, se realizó con el Método del Elemento Finito (MEF) mediante el programa comercial ANSYS (2006). En éste, se modelaron las dovelas mediante elementos barra y las juntas entre ellas con conexiones que simulan la interacción entre dovelas.

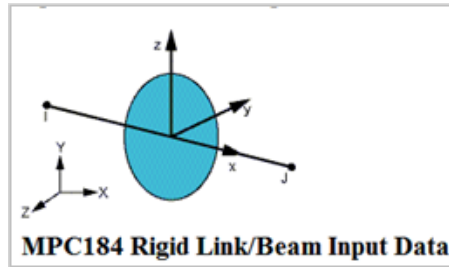
En la realización del modelo se consideraron dos tipos de elementos: elementos barra para las dovelas y resortes rotacionales para las juntas entre dovelas.

Los elementos barra se modelaron con el elemento BEAM188 de ANSYS (2006), que está basado en la teoría de la viga de Timoshenko donde las deformaciones por cortante son tomadas en cuenta. De igual manera, permite considerar la no-linealidad geométrica; además, es adecuado para aplicaciones lineales, de grandes rotaciones y/o de grandes deformaciones no-lineales. El elemento BEAM188 incluye términos de endurecimiento por deformación, permitiendo analizar problemas de estabilidad torsional, lateral y a flexión.



*Figura 27. Elemento BEAM 188 (ANSYS, 2006)*

La interacción entre dovelas se reproduce con el elemento MPC184 de ANSYS (2006), el cual logra asignar un comportamiento momento-rotación. El “MPC184 unión rígida/elemento viga” se puede usar para modelar una condición rígida entre dos cuerpos deformables o como un componente rígido utilizado para transmitir fuerzas y momentos; además, es muy adecuado para rotaciones lineales, rotaciones grandes, y/o grandes aplicaciones de deformación no lineal.

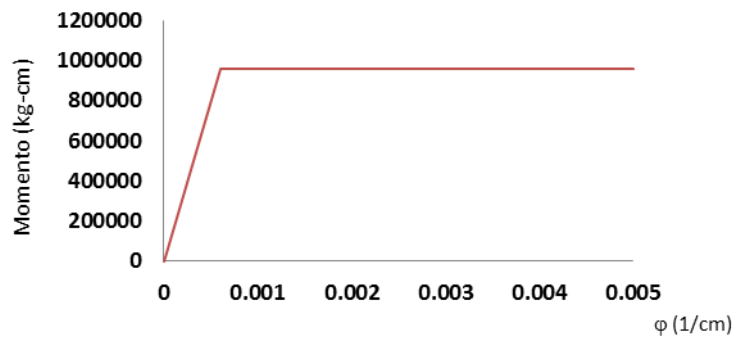


**Figura 28. Elemento MPC 184 (ANSYS, 2006)**

La geometría del modelo numérico corresponde con la del modelo experimental presentado en el Capítulo 2. En el caso de las dovelas, éstas tienen una sección transversal de  $40 \times 150 \text{ cm}^2$  y el número de juntas entre dovelas es 8 (Figura 22). El comportamiento de las juntas entre dovelas se reproduce y modela de forma simplificada al considerarlo como un resorte rotacional (Figura 29), para lo cual se utiliza la relación momento-rotación propuesta por Peña, et al. (2012). Por otro lado las propiedades de los materiales se presentan en la tabla 1.

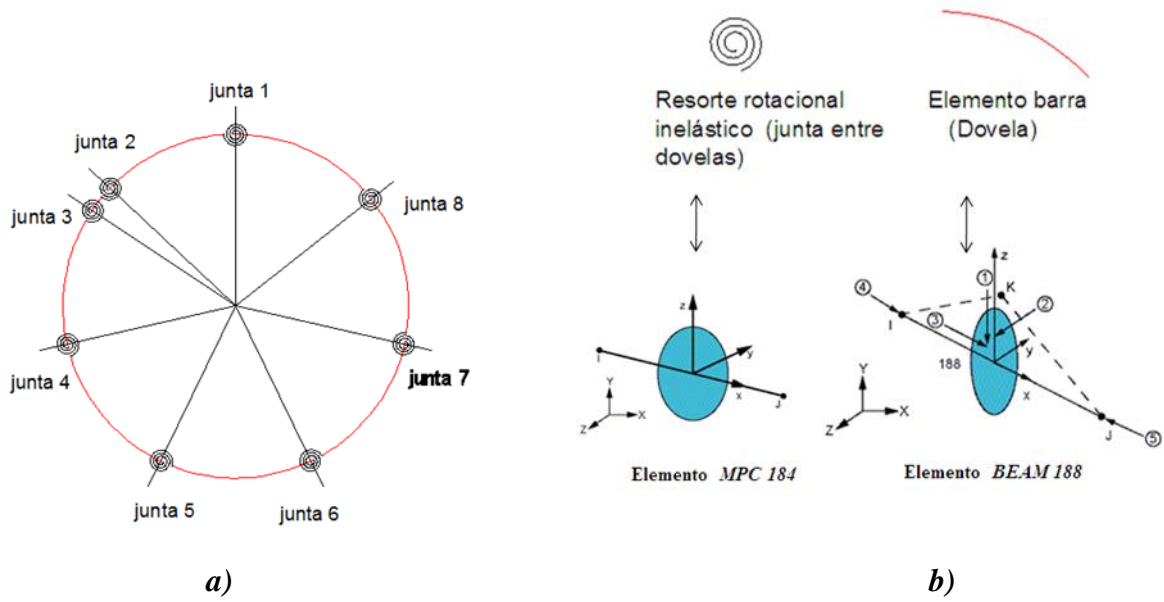
Tabla 1. Propiedades de materiales

Elemento	Material	$\nu$	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$My$ (kg-cm)	$\varphi_y$ (rad)
BEAM 188	Concreto	0.2	Elástico	360000	--	--
MPC 184	--	--	--	--	960289	0.0006017



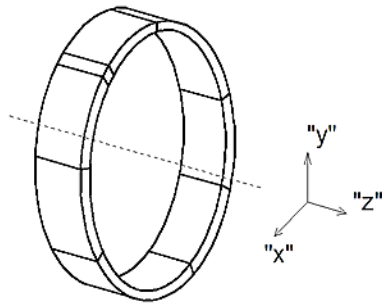
**Figura 29. Modelo de comportamiento teórico para las juntas entre dovelas**

De la Tabla 1, las propiedades del elemento BEAM188 se obtuvieron de los datos del experimento presentados por Luttkholt (2007) (correspondiente a las dovelas) y en el caso del elemento MPC184 primero se analizó un anillo continuo, con lo cual, se obtuvo la excentricidad inicial ( $e=M/N=63613/102110=0.62\text{cm}$ ), con esta excentricidad se aplicaron las ecuaciones 4 y 5 para así obtener la relación momento-rotación ( $My$  y  $\varphi_y$ ).



**Figura 30. Modelo numérico: a) orientación de juntas en el anillo; b) tipos de elemento utilizados para el modelo numérico (ANSYS, 2006)**

Las condiciones de frontera (apoyos) para el modelo fueron: se restringió el desplazamiento en dirección “z” ( $U_z$ ), dirección eje longitudinal del túnel; además se restringió la rotación alrededor de los ejes “x” y “y”. De lo anterior se tienen los grados de libertad  $U_x$ ,  $U_y$  y  $R_z$  (Figura 31). Por otro lado, al igual que el experimento el modelo numérico se restringe tangencialmente en los puntos que corresponden a la zona de clave, cubeta y hastiales, ver sección 2.1 (Figuras 20 y 22b).



**Figura 31. Ejes de referencia para los grados de libertad restringidos y permitidos**

## **3.2 Modelo de sólidos**

Para la comparación de resultados se utilizarán dos modelos numéricos en 3D (modelos más precisos), uno con comportamiento inelástico en las dovelas y juntas entre éstas y otro con comportamiento elástico en las dovelas e inelástico para las juntas entre éstas.

### **3.2.1 Modelo inelástico**

El modelo inelástico en 3D fue elaborado por Galván (2013) en el programa ANSYS (2006). En éste modelo, al igual que en el modelo de barras, se modeló un anillo aislado y que corresponde al anillo central. La geometría, secciones, cargas y condiciones de frontera corresponden con la información del capítulo 2. Las dovelas fueron modeladas mediante elementos sólidos 3D (solid65) con comportamiento no-lineal, mientras que las juntas se modelaron con elementos de contacto considerando un comportamiento inelástico.

Las propiedades no-lineales del concreto se definieron utilizando su resistencia a tensión uniaxial, así como los coeficientes de transferencia a cortante para una grieta abierta y una grieta cerrada. Las deformaciones plásticas del concreto fueron tomadas mediante la superficie de fluencia de Drucker-Prager y considerando los siguientes parámetros: cohesión, ángulo de fricción y ángulo de dilatación. Además, el acero de refuerzo es considerado disperso en toda la dovela.

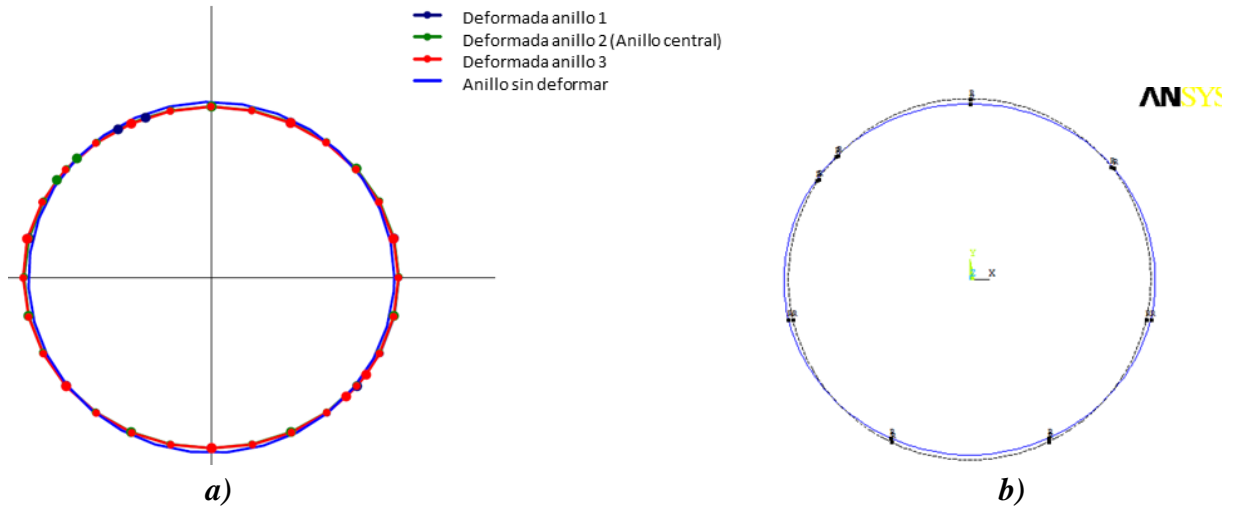
### **3.2.2 Modelo elástico**

Debido a que el modelo de barras aquí desarrollado considera un comportamiento elástico-lineal en las dovelas e inelástico en las juntas entre éstas y con la finalidad de comparar los elementos mecánicos, se tomó el modelo de Galván (2013) y se modificó el comportamiento de las dovelas, quedando igual que el modelo de barras (comportamiento elástico-lineal).

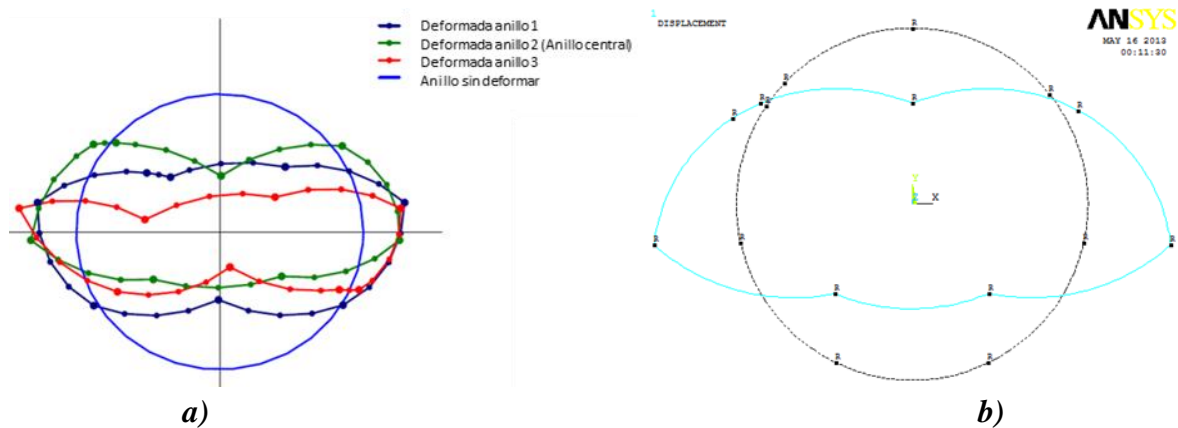
# CAPÍTULO 4: Análisis de resultados

## 4.1 Primera Etapa: Modelo de barras y Modelo experimental

En esta etapa los resultados del modelo de barras se comparan con los resultados experimentales. De las pruebas experimentales tenemos que el comportamiento del túnel es representado mediante la deformación de ovalamiento del revestimiento contra la carga de ovalamiento aplicada.



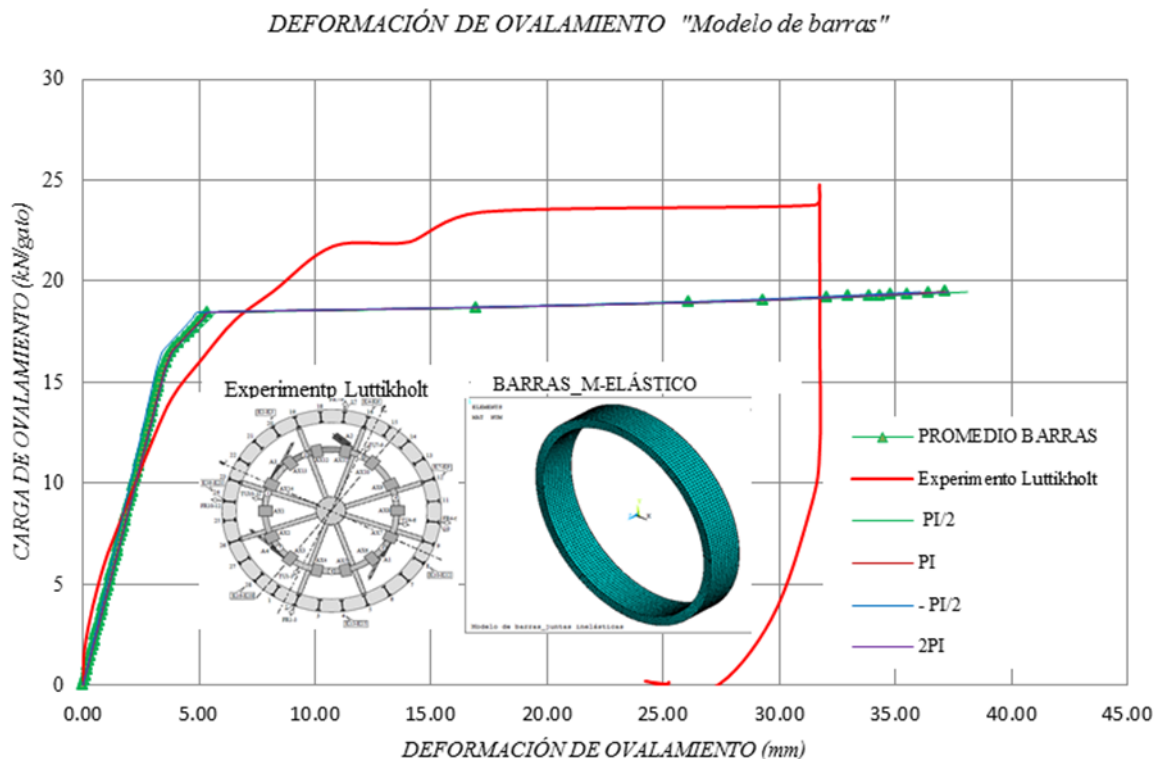
**Figura 32. Configuración deformada del túnel para una carga de ovalamiento de 10.01 kN/gato, factor de escala de ampliación 50: a) modelo experimental, Luttikholt (2007); b) modelo numérico**



**Figura 33. Configuración deformada del túnel: a) modelo experimental bajo una carga de 24.78 kN/gato, Luttikholt (2007); b) modelo numérico bajo una carga de 19.48 kN/gato (79% de la carga de ovalamiento obtenida experimentalmente)**

En la Figura 32 se puede ver que la configuración deformada para el modelo numérico es similar a la obtenida del modelo experimental (anillo central) para un valor de carga de 10.01 kN/gato (42% de la carga de ovalamiento). En la Figura 32a se muestra la configuración deformada de los tres anillos del modelo experimental. Para este nivel de carga la configuración de las deformadas de los tres anillos quedan encimadas.

La Figura 33 muestra la configuración deformada obtenida en ambos modelos (experimental y numérico). En el caso del modelo experimental (línea de color verde que corresponde al anillo central) ésta se presenta para un nivel de carga de ovalamiento de 24.78 kN/gato (100% de la carga), mientras que en el modelo numérico se muestra para una carga de 19.48 kN/gato (79% de la carga de ovalamiento), máximo nivel de carga que alcanza el modelo numérico. La comparación anterior se presenta para los máximos valores de carga que pueden tomar los modelos, en el caso del modelo numérico a partir de este nivel cualquier incremento en la carga induce una deformación muy grande que desde el punto de vista analítico no se puede comparar. Considerando lo anterior, aún se puede ver que el estado último de deformación entre ambos modelos es parecido.



**Figura 34. Deformación radial de ovalamiento. Se indica para los cuatro puntos de medición y su promedio. La curva de color rojo corresponde con el experimento y la de color verde con el promedio del modelo numérico de barras**



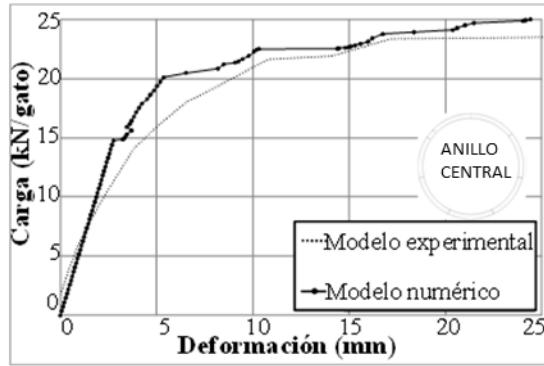
En la Figura 34 se muestran las curvas carga-deformación de ovalamiento para cada uno de los cuatro puntos de medición del modelo de barras (ver Figura 22), la del promedio de éstos y la curva del modelo experimental. La curva 2PI corresponde a  $0$  ó  $360^\circ$ ,  $PI/2$  a  $90^\circ$ ,  $PI$  a  $180^\circ$ ,  $-PI$  a  $270^\circ$ , *PROMEDIO BARRAS* al promedio del modelo numérico de barras y *Experimento Luttikholt* al promedio del experimento.

La principal razón por la cual el modelo numérico no logra tomar el 100% de la carga de ovalamiento se debe a que el mecanismo de falla del anillo es por rotaciones excesivas de las juntas y, a que en el modelo numérico no se consideró la carga axial de confinamiento que actúa en dirección hacia el eje longitudinal del túnel; es decir, la interacción entre anillos (Figuras 9a y 21).

Lo anterior se pudo constatar en el trabajo de Galván (2013) donde en otra etapa de análisis si considera la baja interacción entre anillos, dando como resultado una diferencia del 5% en el comportamiento entre su modelo numérico (modelo complejo) y el modelo experimental (ver Figura 35).

De la Figura 34 se puede apreciar que el comportamiento entre ambos modelos es similar, al menos hasta el 75% de la carga de ovalamiento, por lo que hasta este punto el efecto de la carga axial (interacción entre anillos) no influye significativamente en el comportamiento del modelo numérico. Por otro lado, se pueden evaluar tres características (cambio de pendiente) de las curvas para el modelo de barras; la primera está asociada a la rigidez elástica hasta una carga de 15.51 kN/gato, la segunda es debida a que la junta 1 (Figuras 30 y 39) ha incurrido en el rango inelástico y la tercera se debe al comportamiento inelástico de las juntas 5, 6, 4 y 7, en este orden, respectivamente (Figuras 30 y 39), para un valor de carga igual a 18.46 kN/gato.

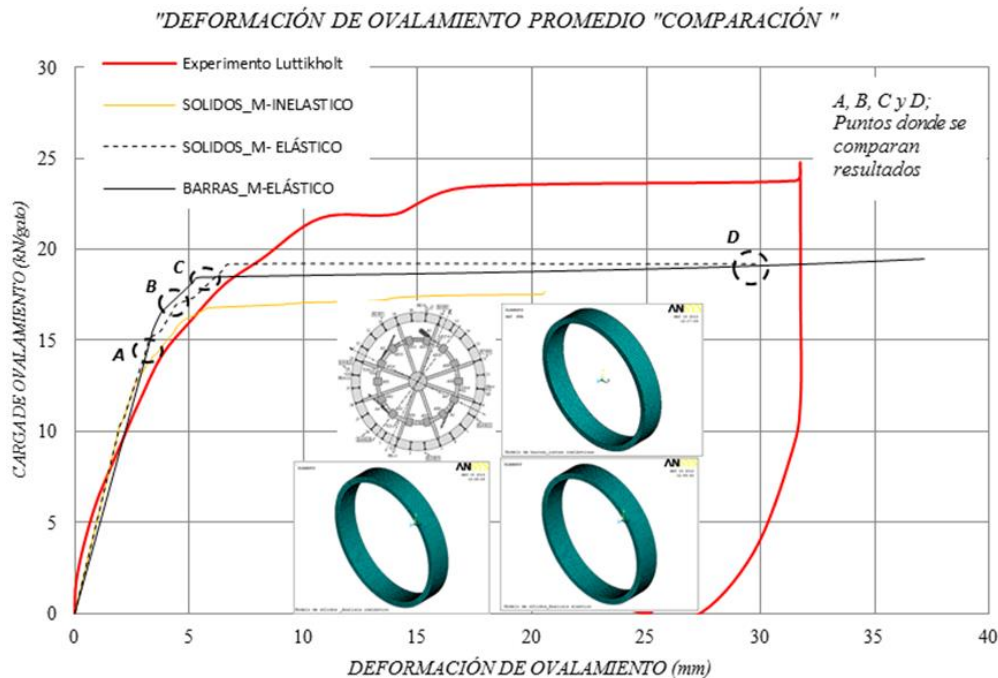
Asimismo, en la Figura 34 se puede observar un comportamiento similar de las deformadas hasta un valor de carga de 11.0 kN/gato, a partir de este valor y hasta 18.46 kN/gato (75% del total de la carga de ovalamiento) se presenta un incremento en la rigidez del modelo de barras del 20% aproximadamente. Después del valor de carga de 18.46 kN/gato, al incrementarse la carga, el modelo numérico presenta grandes deformaciones aún para pequeños incrementos de carga. El máximo valor de carga aplicado al modelo numérico es 19.47 kN/gato que equivale al 79% de la carga de ovalamiento total y ésta corresponde con una deformación de 37.15 mm.



**Figura 35. Comparación de las curvas carga-deformación, obtenidas a partir de la carga de ovalamiento, entre el modelo de sólidos que considera el efecto del bajo confinamiento y el modelo experimental Galván (2013)**

En la Figura 35 se muestra la comparación de deformación de ovalamiento, presentada en el trabajo de Galván (2013), para el modelo numérico de sólidos que considera la baja interacción entre anillos y el modelo experimental.

De las curvas de la Figura 34 (experimento y modelo de barras que no considera la interacción) y de la Figura 35 (experimento y modelo complejo que considera la baja interacción entre anillos), se puede ver que la forma de las curvas (experimento, modelo complejo y modelo de barras) tienen de forma aproximada los mismos cambios de pendiente.



**Figura 36. Comparación de deformación radial de ovalamiento de los modelos de sólidos y de barras y puntos donde se comparan resultados (elementos mecánicos)**

Las curvas mostradas en la Figura 36 corresponden al promedio de los cuatro puntos de medición, de las cuales, se puede ver que los modelos numéricos tienen en buena medida el mismo comportamiento (elástico-lineal) hasta el punto *A* donde la carga de ovalamiento tiene un valor de 14.77 kN/gato (60% de la carga de ovalamiento) y corresponde a una deformación radial de 3.24 mm. Por otro lado, los puntos *B*, *C* y *D* donde también se comparan elementos mecánicos están asociados a una carga de 16.98, 18.46 y 19.47 kN/gato, respectivamente, y éstos corresponden a una deformación radial de 4.15, 5.39 y 37.15 mm, respectivamente.

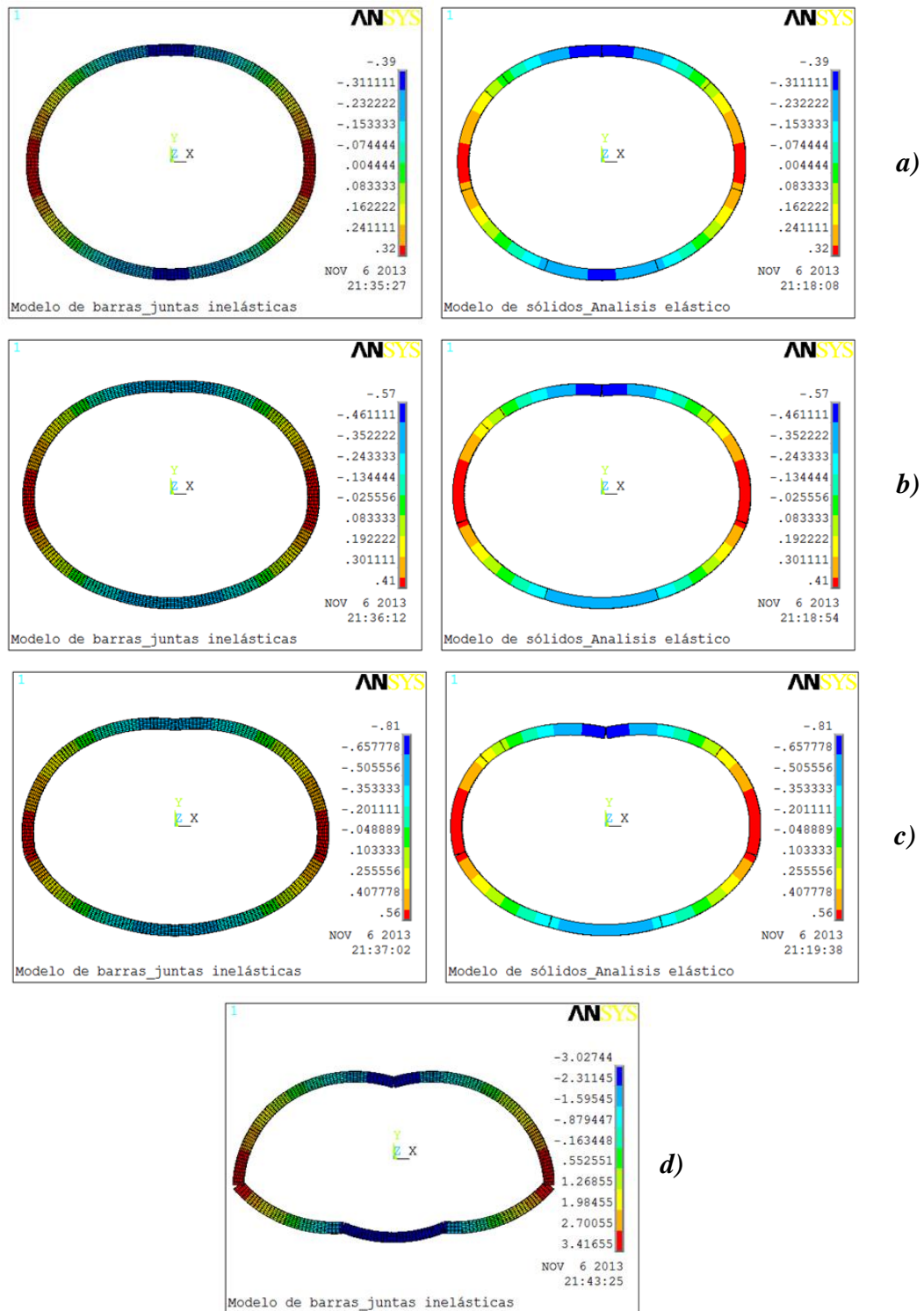
De la Figura 36 se tiene que al considerarse las dovelas como elásticas (Modelo de *BARRAS\_M-ELÁSTICO* y *SOLIDOS\_M-ELÁSTICO*) la rigidez del modelo aumenta en comparación con el modelo experimental y el de sólidos que consideran las dovelas y juntas como inelásticas (Modelo *SOLIDOS\_M-INELASTICO*). Por otro lado, de acuerdo con la Figura 34, este aumento en la rigidez del modelo (capacidad de tomar carga) es bajo, por lo tanto se puede concluir que el modo de falla del modelo es debido al comportamiento de las juntas, es decir, es por rotaciones excesivas.

También, de la Figura 36 se puede ver que los modelos de barras y de sólidos con comportamiento elástico en las dovelas e inelástico en las juntas se comportan de la misma manera, pues tienen las mismas consideraciones, ahora, sumando a esto la comparación mostrada en la figura 35 se puede concluir que el efecto de la carga axial de confinamiento es el motivo por el cual el modelo puede o no tomar el 100% de la carga de ovalamiento y por lo tanto, es factible considerar y realizar modelos de túneles mediante elementos barra y resortes rotacionales en las juntas, cuando se tenga una baja o nula fuerza de confinamiento axial (interacción entre anillos).

## **4.2 Segunda Etapa: Modelo de barras y Modelo de sólidos**

En la primera etapa se comparó el comportamiento estructural del modelo numérico de barras con el modelo experimental, correspondiente a la forma de la deformada que produce la carga de ovalamiento y a las curvas carga de ovalamiento-deformación de ovalamiento. Ahora en esta etapa se compara el comportamiento del modelo de barras con el modelo de sólidos con comportamiento elástico en las dovelas.

## 4.2.1 Deformación radial

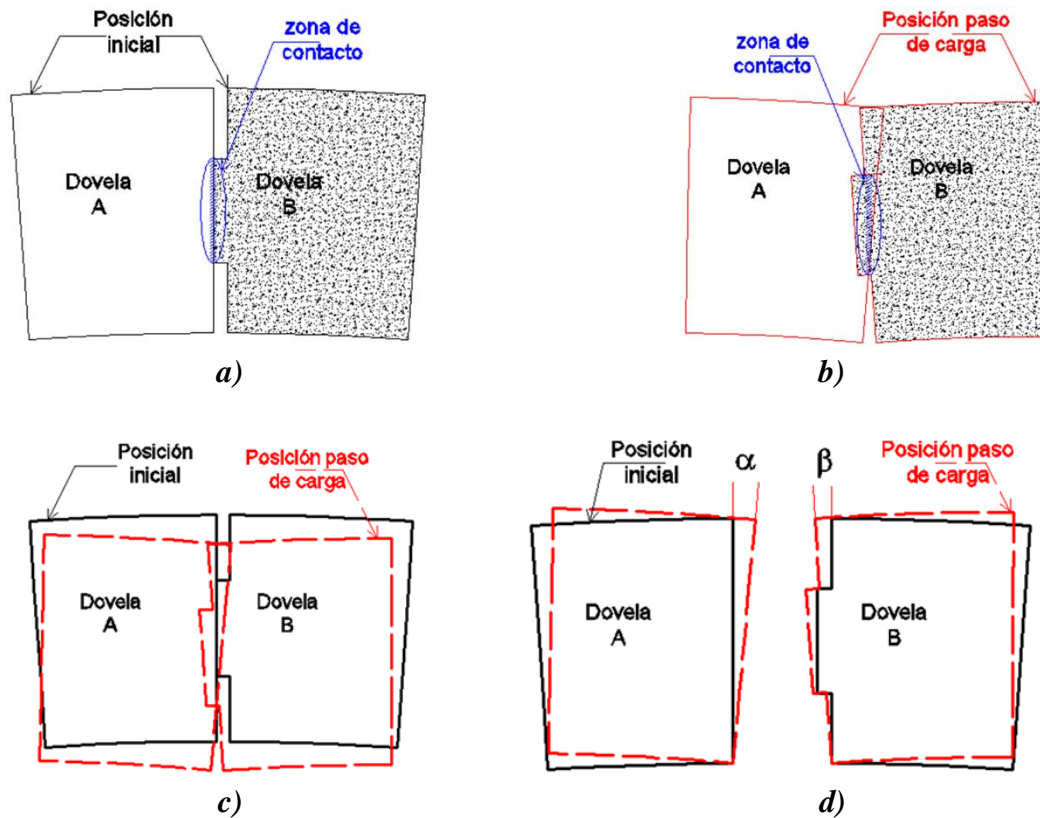


**Figura 37. Comparación de la deformación radial total entre los modelos de barras y sólidos elásticos para: a) punto A; b) punto B; c) punto C, factor de escala 150; d) punto D, factor de escala 50**

En la Figura 37 se muestra la deformación radial total de los modelos numéricos de barras y de sólidos elásticos. En el caso del punto *D* (Figura 37d) sólo se muestra la deformada para el modelo de barras ya que el modelo de sólidos tiene un incremento en la deformación muy grande, de 6.76 mm (para un valor de carga de 19.20 kN/gato) a 117.3 mm (para una carga de 19.38 kN/gato), por lo cual no se puede comparar. No obstante, en los demás puntos (Figura 37a-c) se pueden apreciar que las deformaciones son muy similares, cualitativa y cuantitativamente, en ambos modelos.

#### 4.2.2 Rotación de juntas

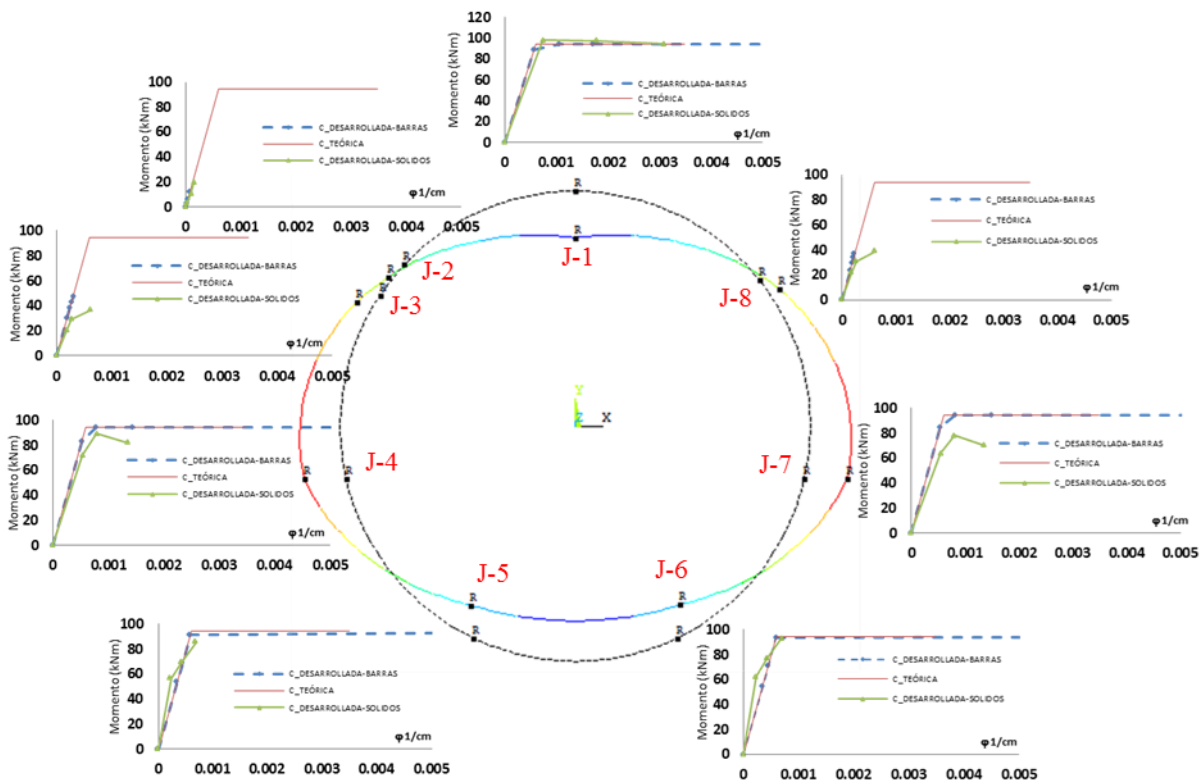
Las rotaciones presentadas en esta sección se obtuvieron de la manera siguiente: las que corresponden al modelo de barras son obtenidas de manera directa mediante la salida de datos del programa. En el caso del modelo de sólidos los datos de salida no dan rotaciones, sin embargo, éstas se pueden obtener a partir del estado de deformaciones de cada paso de análisis (Figura 38).



**Figura 38. Rotación entre dovelas en zona de juntas en el modelo de sólidos: a) posición inicial (sin cargas); b) posición para un paso de carga; c) posición inicial y paso de carga superpuestas; d) obtención de rotaciones**

En la Figura 38 se muestra como se obtuvieron las rotaciones en el modelo de sólidos. Éstas se consiguen después de superponer las dovelas deformadas, debido al paso de carga en estudio, y sin deformar, rotación  $\varphi = \alpha + \beta$ .

Debido a que en la zona de contacto entre dovelas se tiene un comportamiento inelástico (elementos de contacto, donde la sección se aplasta), las deformaciones para el cálculo de rotaciones son medidas en los extremos de las dovelas donde se tiene un comportamiento elástico de éstas (en esta zona las dovelas no se aplastan, sólo giran).



**Figura 39. Comparación entre la curva momento-rotación teórica (Peña et al., 2012) y las curvas momento rotación desarrolladas por los modelos numéricos, para cada junta**

En la Figura 39 se muestra la curva momento-rotación de cada junta para los puntos A, B, y C indicados en la Figura 36.

De lo anterior se puede comentar lo siguiente: las juntas 1, 4, 5, 6 y 7 son las que se abren e incursionan en el rango inelástico, mientras que la junta 2, 3 y 8 permanecen en el rango elástico, lo cual corresponde con lo mostrado en la Figura 40 e indicado en las Tablas 2 a 5.

Las juntas 7 y 8 presentan una ligera discrepancia en las rotaciones. De esto se puede concluir que los modelos tienen el mismo comportamiento, en cuanto a rotaciones y aberturas.

Tabla 2. Rotación de juntas para una carga de 14.77 kN/gato

Carga de ovalamiento=14.77 kN/gato				
Junta	Rotación ( $\phi$ ) rad		Diferencia (%)	Status
	Barras	Sólidos		
J-1	0.00057	0.00075	24	Rota hacia adentro
J-2	0.00000	0.00003	98	Rota hacia afuera
J-3	0.00019	0.00019	1	Rota hacia afuera
J-4	0.00053	0.00055	2	Rota hacia afuera
J-5	0.00035	0.00023	52	Rota hacia adentro
J-6	0.00035	0.00023	52	Rota hacia adentro
J-7	0.00054	0.00055	2	Rota hacia afuera
J-8	0.00015	0.00018	16	Rota hacia afuera

Tabla 3. Rotación de juntas para una carga de 16.98 kN/gato

Carga de ovalamiento=16.98 kN/gato				
Junta	Rotación ( $\phi$ ) rad		Diferencia (%)	Status
	Barras	Sólidos		
J-1	0.00106	0.00178	41	Rota hacia adentro
J-2	0.00002	0.00010	80	Rota hacia afuera
J-3	0.00024	0.00028	12	Rota hacia afuera
J-4	0.00079	0.00080	1	Rota hacia afuera
J-5	0.00044	0.00043	4	Rota hacia adentro
J-6	0.00045	0.00043	4	Rota hacia adentro
J-7	0.00083	0.00081	3	Rota hacia afuera
J-8	0.00019	0.00027	30	Rota hacia afuera

Tabla 4. Rotación de juntas para una carga de 18.46 kN/gato

Carga de ovalamiento=18.46 kN/gato				
Junta	Rotación ( $\phi$ ) rad		Diferencia (%)	Status
	Barras	Sólidos		
J-1	0.00171	0.00309	45	Rota hacia adentro
J-2	0.00004	0.00015	75	Rota hacia afuera
J-3	0.00027	0.00062	56	Rota hacia afuera
J-4	0.00145	0.00135	7	Rota hacia afuera
J-5	0.00059	0.00069	15	Rota hacia adentro
J-6	0.00060	0.00070	14	Rota hacia adentro
J-7	0.00150	0.00136	10	Rota hacia afuera
J-8	0.00021	0.00060	64	Rota hacia afuera

En las Tablas 2, 3 y 4 se muestra la comparación de la rotación de juntas de los modelos numéricos para una carga de ovalamiento correspondiente con los puntos *A*, *B* y *C*, respectivamente, indicados en la Figura 36. De éstas se tiene:

Tabla 2. En las juntas 3, 4, 7 y 8 se tienen pequeñas diferencias en sus rotaciones (3 y 8 corresponden a la zona de inflexión), mientras que las juntas 5 y 6 tienen una diferencia del 50% aproximadamente. En el caso de la junta 1 la diferencia es del 24% y para la junta 2 una diferencia del 98% (esta junta corresponde a la zona de inflexión).

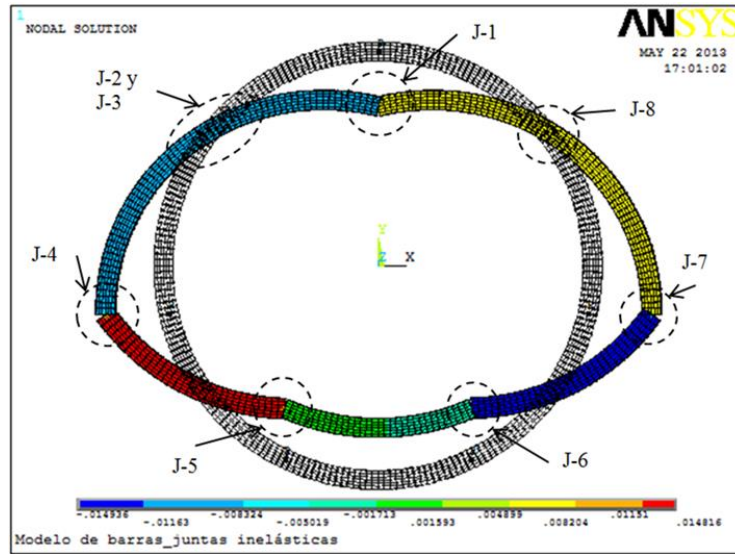
Tabla 3. La diferencia en la junta 1 es del 41% y en las juntas 4 a 7 es muy pequeña. En el caso de la junta 2 se tiene una diferencia del 80%. Para las juntas 3 y 8 (ubicadas en la zona de inflexión) la diferencia es de 12 y 30%, respectivamente.

Tabla 4. La diferencia en las juntas 4 a 7 es menor al 15%. En el caso de las juntas 2, 3 y 8 se tienen diferencias grandes. Por otro lado en la junta 1 se tiene una diferencia del 45%.

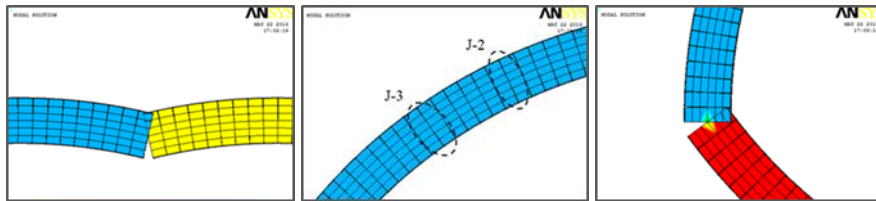
De las Tablas 2, 3 y 4 se puede apreciar un comportamiento simétrico de las juntas, referido a un eje vertical. Por otro lado, las diferencias tan grandes que se tienen (Tabla 2 98% en la junta 2, Tabla 3 80% en la junta 2 y Tabla 4 75%, 56% y 64% para las juntas 2, 3 y 8, respectivamente) se debe a que sus valores son pequeños y cualquier discrepancia resulta en una diferencia muy grande. De lo anterior se tiene que para los tres puntos (*A*, *B* y *C*) la junta 2 prácticamente no se abre.

A continuación se muestra la rotación de las juntas para el máximo valor de carga que toma el modelo de barras (punto *D* de la Figura 36).





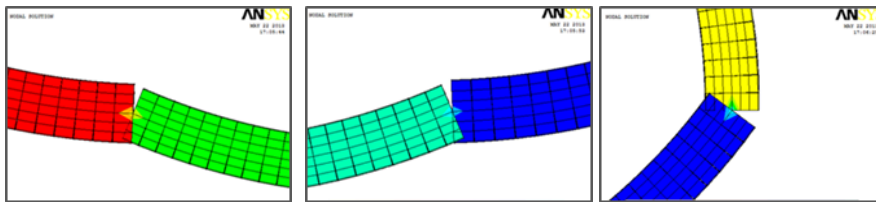
a)



b)

c)

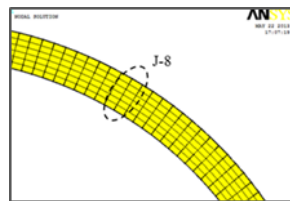
d)



e)

f)

g)



h)

**Figura 40. Rotación de las juntas obtenida del modelo de barras para una carga de ovalamiento de 19.47 kN/gato, factor de escala 50: a) vista general; b) junta 1; c) juntas 2 y 3; d) junta 4; e) junta 5; f) junta 6; g) junta 7; h) junta 8**

La rotación de las juntas se muestra en la Figura 40. De éstas se tiene que la junta 1 es la que presenta la máxima rotación hacia adentro. Por otro lado, las juntas 4 y 7 son las que presentan mayor rotación hacia afuera.

La configuración deformada de la Figura 40a se puede explicar de la manera siguiente: la zona de clave (junta 1) y cubeta (juntas 5 y 6), se abren hacia adentro debido a que la carga de ovalamiento aplasta esta zona del modelo, mientras que la zona de hastiales (juntas 4 y 7) lo abren hacia afuera en dirección horizontal. También se puede ver que los puntos donde se tiene la máxima flexión corresponden con  $2\pi$ ,  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $-\pi/2$ , mientras que los puntos de inflexión son a  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  y  $315^\circ$  (zona de riñones), además, se puede apreciar un comportamiento simétrico referido al eje vertical del modelo.

Tabla 5. Rotación de juntas para una carga de 19.47 kN/gato

Carga de ovalamiento=19.47 kN/gato, Modelo de Barras		
Junta	Rotación ( $\phi$ ) rad	Status
J-1	0.0125	La junta rota (abre) hacia adentro
J-2	0.00007	La junta rota (abre) hacia afuera
J-3	0.00030	La junta rota (abre) hacia afuera
J-4	0.01611	La junta rota (abre) hacia afuera
J-5	0.01012	La junta rota (abre) hacia adentro
J-6	0.01036	La junta rota (abre) hacia adentro
J-7	0.01631	La junta rota (abre) hacia afuera
J-8	0.00023	La junta rota (abre) hacia afuera

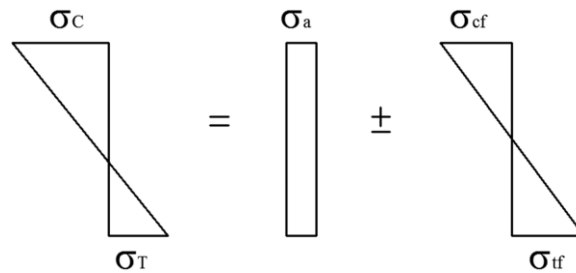
En la Tabla 5 se presenta, en resumen, el comportamiento de las juntas para un valor de carga de 19.47 kN/gato. La junta 1, 5 y 6 se abren hacia adentro, mientras que las juntas 2, 3, 4, 7 y 8 lo hacen hacia afuera. De éstas, 2, 3 y 8 son las que presentan menor abertura debido a que se encuentran ubicadas a  $135^\circ$  (aproximadamente) y  $45^\circ$ , respectivamente, lo cual corresponde

con la zona de inflexión del modelo (Figuras 40a, c y h). Por otro lado, las juntas que presentan mayor abertura corresponden a los puntos donde se tiene la máxima deflexión.

### 4.2.3 Momento flexionante

En el modelo de barras los momentos flexionantes se obtienen de forma directa a través de la salida de datos del programa, no así para el modelo de elementos sólidos, donde los datos de salida que se obtienen son esfuerzos. Debido a esto, los momentos en el modelo de sólidos se adquieren de la siguiente manera:

Se determina el paso de carga y la sección donde se desea conocer el momento flexionante, después, se obtiene la distribución de esfuerzos axiales de dicha sección (Figura 41). Al tratarse de dovelas con comportamiento elástico los esfuerzos debido a la flexión se pueden obtener de la manera siguiente (ecuaciones 6 a 15).



**Figura 41. Distribución de esfuerzos en las dovelas**

$$\sigma_c = \sigma_{cf} + \sigma_a \quad (6)$$

$$\sigma_T = \sigma_{tf} - \sigma_a \quad (7)$$

Las ecuaciones 6 y 7 representan los esfuerzos totales de tensión y compresión en la sección, donde;  $\sigma_c$  es el esfuerzo de compresión total,  $\sigma_T$  el esfuerzo de tensión total,  $\sigma_{cf}$  el esfuerzo de compresión debido a la flexión,  $\sigma_{tf}$  el esfuerzo de tensión debidos a la flexión y  $\sigma_a$  el esfuerzo de compresión debido a la fuerza axial.

De las ecuaciones 6 y 7 se despejan los esfuerzos de compresión y tensión debido a la flexión  $\sigma_{cf}$  y  $\sigma_{tf}$  (ecuaciones 8 y 9), los cuales, corresponden a flexión pura, por lo que éstos se pueden igualar (ecuación 10).

$$\sigma_{cf} = \sigma_c - \sigma_a \quad (8)$$

$$\sigma_{tf} = \sigma_T + \sigma_a \quad (9)$$

$$\sigma_c - \sigma_a = \sigma_T + \sigma_a \quad (10)$$

De la ecuación 10 se despeja el esfuerzo de compresión debido a la fuerza axial.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_c - \sigma_T}{2} \quad (11)$$

Ahora, sustituyendo  $\sigma_a$ ,  $\sigma_c$  y  $\sigma_T$  en las ecuaciones 8 y 9 tenemos  $\sigma_{cf}$  y  $\sigma_{tf}$ , y si además se hace uso de la ecuación de la escuadría, esto resulta en (ecuaciones 12 y 13).

$$\sigma_{cf} = \sigma_c - \sigma_a = \frac{M}{I}c \quad (12)$$

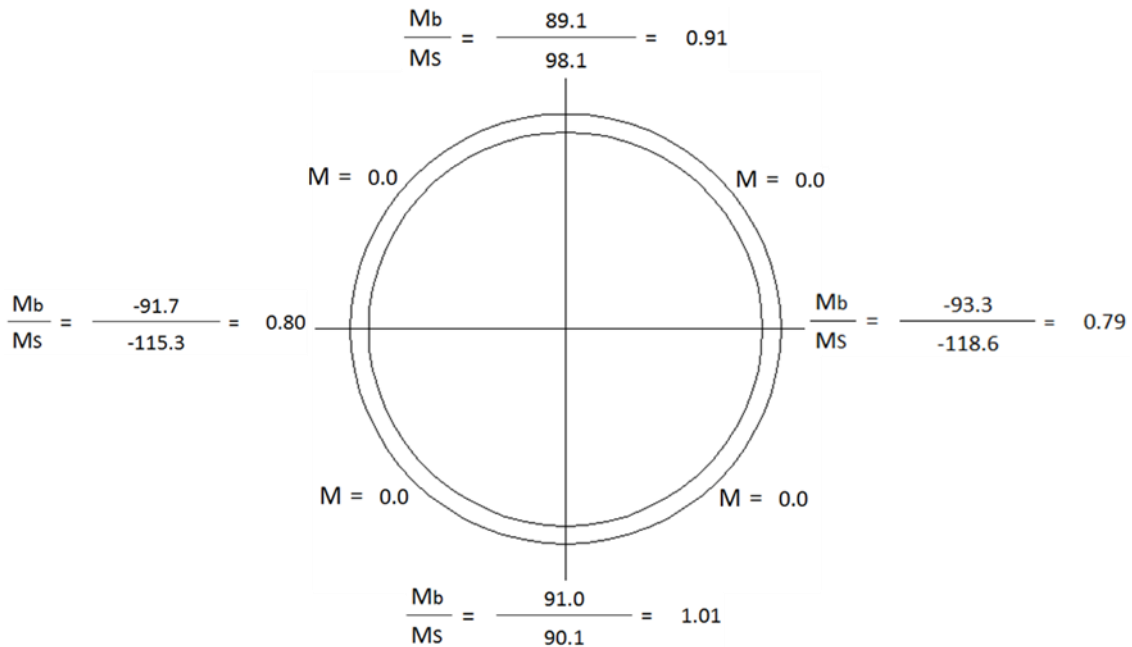
$$\sigma_{tf} = \sigma_T + \sigma_a = \frac{M}{I}c \quad (13)$$

Donde;  $M$  es el momento flexionante,  $I$  la inercia de la sección transversal y  $c$  la distancia medida del eje centroidal a la fibra más alejada de la sección.

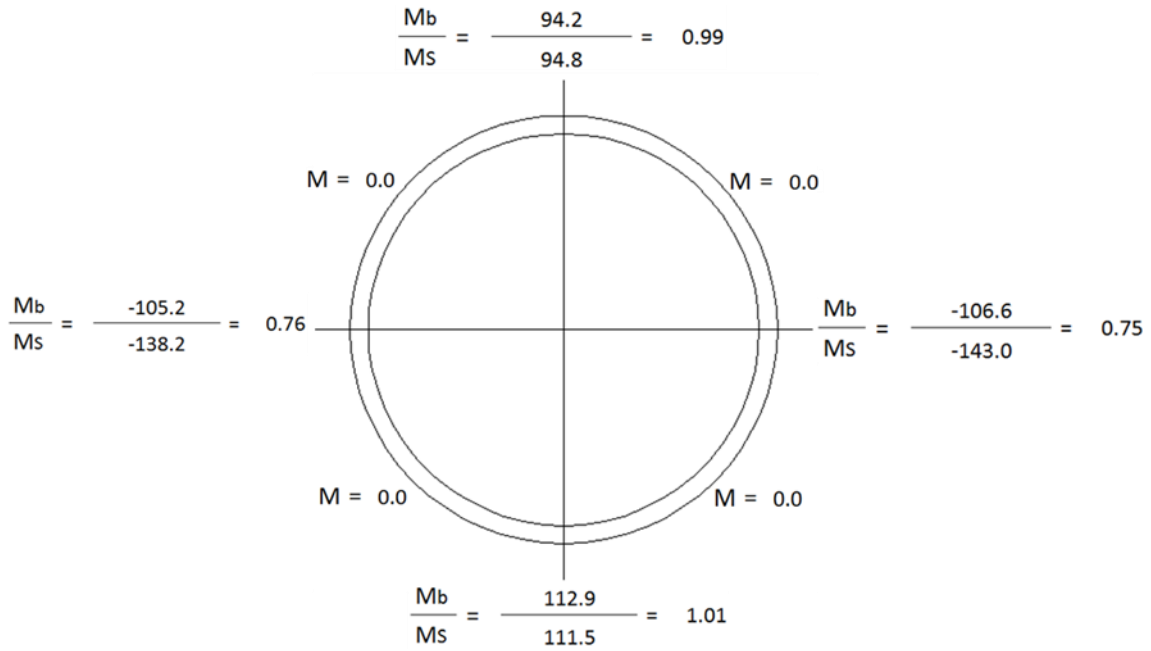
Finalmente, despejamos de la ecuación 12 y 13 el momento flexionante, lo que resulta en (Ecuación 14 y 15).

$$M = \sigma_{cf} \frac{I}{c} \quad (14)$$

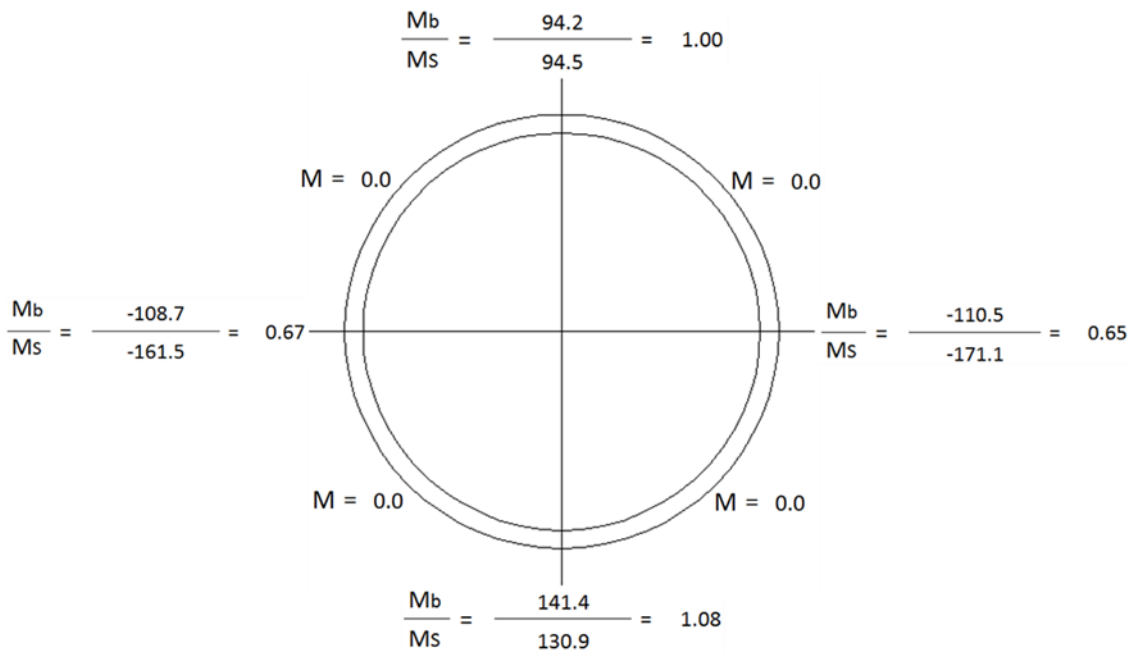
$$M = \sigma_{tf} \frac{I}{c} \quad (15)$$



**Figura 42. Momentos flexionantes máximos y mínimos debidos a la carga de ovalamiento que corresponden al punto A de la Figura 36**



**Figura 43. Momentos flexionantes máximos y mínimos debidos a la carga de ovalamiento que corresponden al punto B de la Figura 36**



**Figura 44. Momentos flexionantes máximos y mínimos debidos a la carga de ovalamiento que corresponden al punto C de la Figura 36**

En las Figuras 42, 43 y 44 se muestran las comparaciones de momentos flexionantes “Mb” y “Ms” correspondientes al modelo de barras y de sólidos con comportamiento elástico en las dovelas, estos elementos mecánicos están en kN-m. De lo anterior se desprenden los comentarios siguientes:

De la Figura 42; en la zona de hastiales ( $2\pi$  y  $\pi$ ) la relación de momentos (Mb/Ms) es de 0.8, por lo que se tiene un error del 20%; en la zona de clave y cubeta ( $\pi/2$  y  $-\pi/2$ ) la relación es de 0.91 y 1.01, 9 y 1% de error, respectivamente.

De la Figura 43; en la zona de hastiales ( $2\pi$  y  $\pi$ ) la relación de momentos (Mb/Ms) es de 0.75 y 0.76, por lo que el error es del 25%; en la zona de clave y cubeta ( $\pi/2$  y  $-\pi/2$ ) la relación es de 0.99 y 1.01, 1% de error.

De la Figura 44; en la zona de hastiales ( $2\pi$  y  $\pi$ ) la relación de momentos (Mb/Ms) es de 0.65 y 0.67, por lo que se tiene un error del 34%; en la zona de clave y cubeta ( $\pi/2$  y  $-\pi/2$ ) la relación es de 1.0 y 1.08, 0.0 y 8% de error, respectivamente.

De las Figuras 42 a 44 se puede ver que se tiene un comportamiento simétrico referido al eje vertical del modelo. También en esas Figuras se puede ver que en los puntos de inflexión (riñones) los momentos son cero (Figura 40a). Además, se tiene una buena aproximación en los momentos flexionantes entre ambos modelos. En la zona de clave y cubeta se mantiene un porcentaje de error prácticamente nulo y en la zona de hastiales el porcentaje de error se va incrementando conforme se incrementa la carga de ovalamiento.

#### 4.2.4 Fuerza cortante

Las fuerzas cortantes en el modelo de barras y de sólidos se obtienen de forma directa mediante la salida de datos del programa.

Tabla 6. Fuerza cortante en juntas para una carga de 14.77 kN/gato

Carga de ovalamiento=14.77 kN/gato			
Junta	Fuerza cortante "V" kN		Relación B/S
	Barras	Sólidos	
J-1	0.55	1.42	0.39
J-2	72.89	87.08	0.84
J-3	4.69	0.43	10.91
J-4	16.37	12.98	1.26
J-5	33.91	32.86	1.03
J-6	33.90	32.38	1.05
J-7	17.00	13.69	1.24
J-8	39.39	47.88	0.82

Tabla 7. Fuerza cortante en juntas para una carga de 16.98 kN/gato

Carga de ovalamiento=16.98 kN/gato			
Junta	Fuerza cortante "V" kN		Relación B/S
	Barras	Sólidos	
J-1	0.95	2.16	0.44
J-2	72.03	91.64	0.79
J-3	8.62	4.58	1.88
J-4	20.32	17.89	1.14
J-5	39.95	39.47	1.01
J-6	39.65	38.29	1.04
J-7	21.51	19.43	1.11
J-8	45.52	52.38	0.87

Tabla 8. Fuerza cortante en juntas para una carga de 18.46 kN/gato

Carga de ovalamiento=18.46 kN/gato			
Junta	Fuerza cortante "V" kN		Relación B/S
	Barras	Sólidos	
J-1	1.21	2.34	0.51
J-2	70.08	96.85	0.72
J-3	25.98	9.76	2.66
J-4	24.37	18.36	1.33
J-5	45.67	41.99	1.09
J-6	45.29	41.11	1.10
J-7	25.88	19.27	1.34
J-8	48.22	58.52	0.82

En las Tablas 6 a 8 se muestra la comparación de fuerza cortante en la zona de juntas para los modelos numéricos de barras y de sólidos elásticos, de las que se desprenden los comentarios siguientes:

Tabla 6. Las juntas 5 y 6 tienen una relación de 1.03 y 1.05 (3 y 5% de error), respectivamente, las juntas 2, 4, 7 y 8 una relación de 0.84, 1.26, 1.24 y 0.82 (16, 26, 24 y 18% de error), respectivamente, mientras que las juntas 1 y 3 tienen una relación de 0.39 y 10.91 (61 y 991% de error), respectivamente. La diferencia tan grande de las juntas 1 y 3 se debe a que las fuerzas cortantes son muy pequeñas y una pequeña variación entre éstas se traduce en un alto porcentaje de error.

Tabla 7. Las juntas 5 y 6 tienen una relación de 1.01 y 1.04 (1 y 4% de error), respectivamente, las juntas 2, 4, 7 y 8 una relación de 0.79, 1.14, 1.11 y 0.87 (21, 14, 11 y 13% de error), respectivamente, mientras que las juntas 1 y 3 tienen una relación de 0.44 y

1.88 (56 y 88% de error), respectivamente. En éstas últimas (1 y 3), se puede ver que la fuerza cortante es pequeña comparada con las demás juntas.

Tabla 8. Las juntas 5 y 6 tienen una relación de 1.09 y 1.10 (9 y 10% de error), respectivamente, las juntas 2, 4, 7 y 8 una relación de 0.72, 1.33, 1.34 y 0.82 (28, 33, 34 y 18% de error), respectivamente, mientras que las juntas 1 y 3 tienen una relación de 0.51 y 2.66 (49 y 166% de error), respectivamente. En esta comparación se puede ver que la junta 3 es la que presenta el mayor porcentaje de error.

De la comparación de fuerzas cortantes se puede ver, en general, que el comportamiento entre ambos modelos es muy similar. Por otro lado, si bien la junta 3 es la que presenta mayor error, también en ésta se tienen valores pequeños de fuerza cortante y que al compararse, cualquier discrepancia entre ellas, se traducen en un alto porcentaje de error.



## Conclusiones y comentarios finales

Con base en los resultados del análisis realizado de un túnel típico formado por dovelas prefabricadas de concreto con juntas planas entre éstas, el cual se idealizó como un anillo aislado y el comportamiento de las juntas entre dovelas mediante resortes rotacionales, al compararlos con los del modelo experimental presentado por Lutikholt (2007), se concluye lo siguiente:

- La forma de las cargas, su magnitud y posición de las juntas influyen significativamente en el comportamiento del modelo, pues como se observó, las juntas con menor abertura coinciden con los puntos de inflexión (resultado de las cargas), mientras que las juntas críticas (mayor abertura) corresponden donde los momentos flexionantes son máximos;
- La respuesta del modelo de barras es en buena medida muy aproximada a la del experimento en el rango elástico, ambos incursionan en el rango inelástico bajo el mismo nivel de carga de ovalamiento, por lo que hasta este punto la carga de confinamiento no influye en el comportamiento de la estructura;
- La relación momento-rotación teórica (Peña et al., 2012) utilizada para representar el comportamiento de las juntas en el modelo de barras reproduce en forma adecuada el comportamiento de las mismas, por lo que se puede utilizar en la práctica para el análisis de túneles dovelados;
- El modelo de barras no logró tomar el 100% de la carga de ovalamiento, alcanzada experimentalmente, debido a que en éste no se consideró la carga axial de confinamiento, aun así, el modelo numérico es representativo del comportamiento experimental (real), al menos hasta el 75% de dicha carga. Entonces, para niveles bajos o nulos de carga de confinamiento, es factible idealizar los modelos como anillos aislados.

Mediante la comparación de resultados del modelo de barras con el modelo de sólidos con comportamiento elástico en las dovelas e inelástico en las juntas, se concluye lo siguiente:

- La historia de rotaciones y/o abertura de las juntas del modelo de barras es similar a la del modelo de sólidos (forma y magnitud), ambos coinciden en las juntas que provocan el mecanismo (mismo orden);
- De la comparación de momentos flexionantes, en la zona de clave y cubeta se tiene el 99% de aproximación, excepto en la clave donde en un paso de carga la aproximación es del 91%, mientras que en la zona de hastiales se tiene el 80% de aproximación, mismo que decrece conforme aumenta la carga de ovalamiento.

- En la comparación de la fuerza cortante el error es del 20% aproximadamente, excepto donde los valores de esta fuerza son pequeños.
- En general, en la comparación de resultados de los modelos de barras y de sólidos (simplificado y complejo) se tienen algunos puntos con grandes diferencias entre ellos debido a que los valores de sus fuerzas son pequeños y cualquier discrepancia que tengan (un modelo con el otro) se traduce en un porcentaje alto de error.

## Referencias

- ANSYS. (2006). Documentation for ANSYS. ANSYS Workbench Release 11.0. ANSYS Inc. USA.
- Basurto, B. (2013). *Factor de Reducción de Rigidez para Túneles Dovelados*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Celada, Tamames, B. (2008). *Utilización de Tuneladoras en Macizos Rocosos*. GEOCONTROL. Recuperado el 10 de febrero de 2013, de: <http://www.geocontrolbrasil.com/publicaciones/macizosrocosos.pdf>
- CONAGUA. (2011). Programa de sustentabilidad Hídrica del Valle de México y Túnel Emisor Oriente. Recuperado el 17 de febrero de 2012, de: <http://www.conagua.gob.mx/sustentabilidadhidricadelValledeMexico/AvancesRetos.aspx>
- den Uijl J.A., Vervuurt A.H.J.M., Gijsberg F.B.J. y van der Veen C. (2003). Full scale tests on a segmented tunnel lining . In proc ITA World Tunnelling Congress 2003, Amsterdam The Netherlands, 12-17 de abril de 2003.
- Escobar, E. (2006). La seguridad en Tuneladoras. Trébol. 4 (41), 13-19. Recuperado el 19 de agosto de 2013 de la base de datos de MAPFRE
- Galván, A. (2013). *Comportamiento Estructural de Túneles con Dovelas Prefabricadas en Suelo Blando*. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gijsbers, F.B.J. y Hordijk, D.A. (1997). *Experimental onderzoek naar het afschuifgedrag van ringvoegen*, CUB/COB k11-W-001, Noviembre 1997.
- Hordijk, D.A. y Gijsbers, F.B.J. (1996). *Laboratoriumproeven Tunnelsegmenten*. Reporte Interno K100-W-026, TNO-Bouw, Delft.
- León, I., Aguilar, M., Martínez, A., y Pereyra, J. (2012). Análisis Geotécnico – Estructural y Diseño del Revestimiento Primario y Definitivo del Túnel Emisor Oriente. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero.
- Lunardi, P. (2008). *Design And Construction Of Tunnels*. Italia: Springer.
- Luttikholt, A. (2007). *Ultimate Limit State Analysis of a Segmented Tunnel Lining - Results of full-scale tests compared to finite element analysis-*. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería Civil y Geociencias, Universidad Tecnológica de Delf.
- Moreno, A. (2005). *Construcción de Túneles en suelos y rocas*. Trabajo presentado en la tercera conferencia Magistral Alfonso rico Rodríguez.

- Nguyen, Duc, Toan. (2006). *TBM and Lining-Essential Interfaces*. Tesis de Maestría. Politecnico di Torino, Italy, Turin.
- NTC – C (2004). Normas Técnicas Complementarias para el Diseño Y Construcción de Estructuras de Concreto del Reglamento de Construcción del Distrito Federal, Departamento del Distrito Federal.
- Peña, F., Galván, A. y Meli, R. (2012). Comportamiento Estructural de Juntas entre Dovelas de Concreto Prefabricado para Túneles. *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (IMCYC)*, 1 (2), 2-18.
- Peña, F. (2010). Evaluación de modelos simplificados para el análisis estructural de túneles dovelados. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León, Guanajuato, artículo 7-06.
- Rodríguez, M. y 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.
- Schreyer, J. y Winselmann, D. (1998). Suitability Tests For The Segmental Lining For The 4th Elbe Tunnel Tube, Hamburg. *Tunnel* 2/98, pp. 30-37.
- Schreyer, J. y Winselmann, D. (2000). Suitability Tests For The Lining For The 4th Elbe Tunnel Tube-Results of Large-scale Test. *Tunnel* 1/2000, pp. 34-44.
- Teachavorasinskun, S. y Chub-Uppakarn, T. (2009). Experimental Verification of Joint Effects on Segmental Tunnel Lining. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 14, Bund K. Recuperado el 19 de agosto de 2013, de: <http://www.ejge.com/2009/Ppr0992/Ppr0992.pdf>
- Vittorio, G., Piergiorgio, G., Ashraf, M. y Shulin, Xu. (2007). MECHANIZED TUNNELLING IN URBAN AREAS. Italia: Turin.
- Xiaochun, Z., Wei, Z., Zhengrong, H. y Yuewang, H. (2006). Effect of joint structure on joint stiffness for shield tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, 406-407.
- Zienkiewicz, O.C. y Taylor, R.L. (1993). *El método de los Elementos Finitos*. Barcelona: CIMNE