



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**ESTUDIOS DE LA INTERACCIÓN ENTRE  
REVESTIMIENTOS DE TÚNELES DOVELAS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

P R E S E N T A :

**JAVIER SALAZAR MORALES**

TUTOR:

**Dr. FERNANDO PEÑA MONDRAGÓN**

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Meli Piralla Roberto  
Secretario: Dr. Pérez Gavilán Escalante Juan José  
Vocal: Dr. Peña Mondragón Fernando  
1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Escobar Sánchez José Alberto  
2<sup>do</sup>. Suplente: M.I. García Domínguez Octavio

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**  
**Dr. Fernando Peña Mondragón**

---

FIRMA

### ***RESUMEN***

En este trabajo se estudia la interacción entre el revestimiento primario y el revestimiento secundario de un anillo de un túnel a base de dovelas prefabricadas. El revestimiento primario es aquel conformado por las dovelas de concreto prefabricado y el revestimiento secundario es aquel conformado de concreto reforzado colado in situ. Debido al proceso constructivo, el revestimiento secundario se coloca meses después de haberse colocado el revestimiento primario. Por lo tanto, existe una incertidumbre de saber si el comportamiento del anillo permite considerar una estructura monolítica. El objetivo general del trabajo fue el desarrollo y calibración de modelos numéricos de elemento finito no lineal para el análisis estructural de túneles a base de dovelas. El objetivo específico es el estudio de la interacción entre los revestimientos que conforman un anillo típico de túneles a base de dovelas, donde se evaluaron las transmisiones de carga del revestimiento primario al revestimiento secundario, así como de posibles deslizamientos o separaciones entre ellos. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que la condición crítica en la interfaz entre los revestimientos es la separación de ellos y no de posibles deslizamientos. Las presiones laterales actuando en el anillo ayudan a evitar las deformaciones que se pudieran presentar en el anillo.

### ***ABSTRACT***

This paper studies the interaction between the primary and secondary coating of a tunnel ring segments. The primary coating is one made up of precast concrete segments and the secondary coating is made of reinforced concrete. Due to the construction process, the secondary coating is put in place month after the primary coating. This leads to the uncertainty of whether the casting of the secondary coating allows a monolithic structure. The general objective of this study was the development and calibration of numerical models of non-linear finite element. The specific objective is to study the interaction between both coatings, in order to be evaluated the load transfer of a coating to the other, as well as possible sliding or separation between them. The result obtained in this work show that the critical condition at the interface between coatings is the separation and not the sliding that could be presented. The lateral pressure acting on the ring, help avoid the distortion that might arise in it.



# ÍNDICE

---

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
<i>ALCANCE Y OBJETIVO.....</i>	7
<i>BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....</i>	8
<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....</b>	<b>11</b>
1.1 <i>CARACTERÍSTICAS DE LOS TÚNELES DOVELADOS CON REVESTIMIENTO SECUNDARIO .....</i>	12
1.1.1 <i>Revestimiento primario.....</i>	12
1.1.2 <i>Comportamiento juntas entre dovelas .....</i>	14
1.1.3 <i>Revestimiento secundario .....</i>	20
1.2 <i>CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES MEDIANTE UNA MÁQUINA TUNELADORA TBM-EPB .....</i>	20
1.3 <i>FACTORES QUE AFECTAN LA DISTRIBUCIÓN DE FUERZAS EN EL ANILLO.....</i>	21
<b>CAPÍTULO 2. MODELOS DE ELEMENTO FINITO.....</b>	<b>26</b>
2.1 <i>MODELADO DE LOS REVESTIMIENTOS.....</i>	29
2.2 <i>MODELADO DE LAS JUNTAS DEL REVESTIMIENTO PRIMARIO .....</i>	30
2.3 <i>MODELADO DE LA INTERFAZ ENTRE REVESTIMIENTOS.....</i>	33
2.4 <i>CARGAS APLICADAS A LOS MODELOS .....</i>	37
2.5 <i>MODELO CON CONTACTO PERFECTO.....</i>	37
2.6 <i>MODELO PERMITIENDO SEPARACIÓN Y DESLIZAMIENTO EN LA INTERFAZ .....</i>	39
2.7 <i>MODELO QUE PERMITE ÚNICAMENTE DESLIZAMIENTO EN LA INTERFAZ .....</i>	41
2.8 <i>MODELO PERMITIENDO UNA CIERTA CANTIDAD DE SEPARACIÓN Y DESLIZAMIENTO.....</i>	42
<b>CAPÍTULO 3. MODELO CONSIDERANDO CONTACTO PERFECTO.....</b>	<b>45</b>
3.1 <i>MAPAS DE ESFUERZOS AXIALES Y DE CORTANTE EN EL ANILLO.....</i>	45
3.2 <i>CAMBIO DE DIÁMETRO Y OVALAMIENTO DEL ANILLO .....</i>	46
3.3 <i>ELEMENTOS MECÁNICOS EN LAS ZONAS DONDE EL ESFUERZO AXIAL ES MÁXIMO .....</i>	48
<b>CAPÍTULO 4. MODELO PERMITIENDO SEPARACIÓN Y DESLIZAMIENTO.....</b>	<b>55</b>
4.1 <i>MAPAS DE ESFUERZO AXIAL Y DE CORTANTE EN EL ANILLO.....</i>	55
4.2 <i>CAMBIOS DE DIÁMETRO Y OVALAMIENTO DEL ANILLO .....</i>	56
4.3 <i>ELEMENTOS MECÁNICOS EN LAS ZONAS DONDE EL ESFUERZO AXIAL ES MÁXIMO .....</i>	57
4.4 <i>FRICCIÓN Y DESLIZAMIENTO EN LOS RIÑONES DEL ANILLO .....</i>	60
<b>CAPÍTULO 5. MODELO CONSIDERANDO ÚNICAMENTE DESLIZAMIENTO.....</b>	<b>65</b>
5.1 <i>MODELO CON COHESIÓN NULA .....</i>	65
5.1.1 <i>Mapas de esfuerzo axial y de cortante en el anillo.....</i>	65
5.1.2 <i>Cambios de diámetro y ovalamiento del anillo .....</i>	66
5.1.3 <i>Elementos mecánicos en las zonas donde el esfuerzo axial es máximo.....</i>	67
5.1.4 <i>Fricción y deslizamiento en los riñones del anillo.....</i>	69
5.2 <i>MODELO CON COHESIÓN MÍNIMA (1 KG/CM<sup>2</sup>).....</i>	72
5.2.1 <i>Mapas de esfuerzo axial y de cortante en el anillo.....</i>	72

5.2.2 Cambios de diámetro y ovalamiento del anillo .....	73
5.2.3 Elementos mecánicos en las zonas donde el esfuerzo axial es máximo .....	74
5.2.4 Fricción y deslizamiento en los riñones del anillo.....	76
<b>CAPÍTULO 6. MODELO CONSIDERANDO UNA CIERTA CANTIDAD DE SEPARACIÓN Y DESLIZAMIENTO .....</b>	<b>79</b>
6.1 MODELO CON RESISTENCIA AL ESFUERZO A LA TENSIÓN DE 0.1 KG/CM <sup>2</sup> .....	79
6.1.1 Mapas de esfuerzo axial y de cortante en el anillo.....	79
6.1.2 Cambios de diámetro y ovalamiento del anillo .....	80
6.1.3 Elementos mecánicos en las zonas donde el esfuerzo axial es máximo .....	82
6.1.4 Fricción y deslizamiento en los riñones del anillo.....	84
6.2 MODELO CON UNA RESISTENCIA A LA TENSIÓN DE 1 KG/CM <sup>2</sup> .....	86
6.2.1 Mapas de esfuerzo axial y de cortante en el anillo.....	86
6.2.2 Cambios de diámetro y ovalamiento del anillo .....	86
6.2.3 Elementos mecánicos en las zonas donde el esfuerzo axial es máximo .....	88
6.2.4 Fricción y deslizamiento en los riñones del anillo.....	90
<b>CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>93</b>
7.1 CAMBIO DE DIÁMETRO Y OVALAMIENTO .....	93
7.2 ELEMENTOS MECÁNICOS EN LAS ZONAS DONDE EL ESFUERZO AXIAL ES MÁXIMO (CLAVE, CUBETA Y HASTIALES) .....	95
7.3 FUERZAS DE DESLIZAMIENTO EN LOS RIÑONES DEL ANILLO .....	98
7.3.1 Modelo permitiendo únicamente deslizamiento.....	98
7.3.2 Modelo permitiendo una cierta cantidad de separación y deslizamiento.....	99
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>101</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>105</b>

# INTRODUCCIÓN

## *ALCANCE Y OBJETIVO*

En este trabajo se modelaron los revestimientos que conforman un anillo típico de túneles de drenaje en la ciudad de México. Así como también la interfaz entre los revestimientos, el cual fue el tema principal de este trabajo. De forma general, el objetivo de este estudio es desarrollar y calibrar modelos numéricos para el análisis estructural de túneles a base de dovelas de concreto prefabricado.

El objetivo específico de este trabajo es el estudio de la interacción entre revestimientos que conforman un anillo típico de túneles dovelados. Los revestimientos de este tipo de túneles dovelados, son: un revestimiento primario a base de dovelas de concreto reforzado, y un revestimiento secundario colado *in situ*. Se evaluaron las transmisiones de carga del revestimiento primario al revestimiento secundario. Así como también la forma en cómo afecta el comportamiento de la interacción entre revestimientos de forma global en el anillo; evaluando los posibles deslizamientos y separaciones en ella.

Una vez que se desarrollaron y calibraron los modelos, estos nos ayudaron a verificar diseños de túneles bajo esta misma técnica. Los resultados obtenidos en este trabajo nos pueden permitir tomar decisiones a tiempo y necesarias en posibles medidas en determinado túnel con la misma técnica utilizada. Así como también, este trabajo podrá ayudar a estudios posteriores con modelos más detallados, para acercarse más al comportamiento esperado en la interfaz.

### ***BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA***

El proceso constructivo de túneles en suelos blandos, en los últimos años, es el de máquina tuneladora o escudo. Actualmente en la ciudad de México, se utiliza esta técnica para la construcción de túneles de drenaje y transporte. Los túneles se componen de un revestimiento primario que consiste en elementos prefabricados de concreto reforzado, funcionando como ademe temporal o definitivo del túnel. Y en ocasiones, después de un tiempo, se coloca un segundo revestimiento de concreto colado *in situ*, para conformar el anillo definitivo del túnel. Se complementa el revestimiento de dovelas con un revestimiento secundario colado con cimbra telescópica y de espesor igual o mayor al primario para resistir los empujes de tierra y demás acciones que se puedan presentar en el túnel durante su vida útil.

Las presiones que actúan en un túnel a base de dovelas se conforman por efectos como: asentamientos debido a la excavación del túnel y por la extracción de agua del manto freático, la inyección de mortero entre el suelo y el revestimiento primario, etc. Estas presiones deben de tomarse en cuenta lo mejor posible para el diseño del túnel, según las características del proyecto. Una vez consideradas todas las acciones necesarias para el diseño de un túnel determinado, se evalúa la propuesta de la estructura para que cumpla con todos los requerimientos correspondientes para tener un buen comportamiento de la estructura en su vida útil.

En este trabajo se estudió un anillo de un túnel típico de drenaje de la ciudad de México a base de dovelas con revestimiento secundario. El revestimiento secundario se coloca, normalmente, meses después de haberse colocado el revestimiento primario de dovelas prefabricadas; generándose una interfaz entre ambos revestimientos donde no existe ninguna liga mecánica o química que pueda asegurar que los revestimientos trabajen como una sola sección. Por tanto, se desea conocer si ambos revestimientos trabajan como un solo anillo o si trabajan de forma individual. Al no existir una liga mecánica o química entre revestimientos, se estudiará la transmisión de carga de un revestimiento a otro; de posibles deslizamientos o separaciones entre ellos, y de qué forma influyen en el comportamiento global del anillo. De tal forma, que se pretende representar el comportamiento en la interfaz entre revestimientos y tener una mejor idea del comportamiento esperado de túneles con características similares a las consideradas en el trabajo.

Para estudiar la interacción entre el revestimiento primario y el revestimiento secundario se desarrollaron modelos numéricos de elemento finito no lineal. Se modelaron los revestimientos, las juntas entre dovelas, y la interfaz entre ambos revestimientos.



Para poder calibrar el comportamiento de un túnel típico de drenaje de la ciudad de México se desarrollaron diferentes modelos numéricos, lo cuales son:

- Modelo permitiendo separación y deslizamiento libremente en la interfaz
- Modelo permitiendo únicamente deslizamiento en la interfaz
- Modelo permitiendo una cierta cantidad de separación y deslizamiento en la interfaz
- Modelo con contacto perfecto

Estos modelos numéricos desarrollados nos dan una idea del comportamiento que se tendría en la interfaz entre revestimientos y su influencia en el comportamiento a nivel global del anillo.

Los estudios realizados se caracterizan por la simplificación de los modelos numéricos, ya que el objetivo primordial es la interacción entre el revestimiento primario y el revestimiento secundario; de tal manera, que algunos criterios del proceso de construcción y características y propiedades de los materiales de construcción, no influyen en el objetivo de este trabajo.

Para modelar los revestimientos, se utilizaron propiedades mecánicas y características geométricas típicas de túneles de drenaje de la ciudad de México. Como se pretende estudiar la interacción entre revestimientos, se consideró que los revestimientos tengan un comportamiento elástico lineal; de tal forma, que los revestimientos no sufrirán daño alguno.

Un factor que hay que tomar en cuenta es la presencia de juntas; ya que la presencia de éstas hace que el anillo no sea continuo y afectará el comportamiento global del mismo. No hay una garantía de estanqueidad, principalmente a largo plazo; así como también, en cuanto a la capacidad para resistir los empujes sin deformaciones excesivas y sin fallas estructurales (Meli, 2010). Por simplicidad, se tomó en cuenta un material inelástico equivalente que sea representativo de una junta entre dovelas.

La interfaz entre revestimientos se modeló gracias a elementos de contacto predefinidos en el programa comercial ANSYS (2006) para representar el comportamiento de la interacción entre ambos revestimientos. Para desarrollar los distintos modelos numéricos, se modificó el comportamiento en la interfaz entre revestimientos, para conocer la influencia de los posibles deslizamientos y separaciones.

Las acciones que actúan en el anillo del túnel también se simplificaron y no se tomaron en cuenta las diferentes etapas en las que se puede dividir el proceso del túnel, por ejemplo, la excavación, construcción y uso del túnel. Debido a que en este trabajo no se pretende hacer una revisión o diseño de algún proyecto en particular, se utilizó un factor  $K_0$  para poder generalizar las presiones que actúan en el anillo. Este factor  $K_0$  relaciona las presiones verticales y las presiones horizontales. Estas presiones se simplificaron, tomándose de forma constante y uniforme tanto en el eje vertical como en el eje horizontal del anillo. Se hicieron análisis paramétricos variando el factor  $K_0$  en intervalos de 0.1, de un valor de 0.4 a 0.9

Los modelos donde se permite libremente la presencia de separación y deslizamiento, y el modelo permitiendo únicamente el deslizamiento son dos casos opuestos del comportamiento. En el primero se tiene un comportamiento desfavorable donde los revestimientos trabajan de forma individual y el anillo es más flexible que en el modelo permitiendo únicamente deslizamiento. Los momentos que se generan son más grandes respecto a los otros modelos considerados. Y en el segundo caso se tiene un comportamiento ideal, donde los revestimientos no se separan en ningún momento. Pero lo hace poco realista ya que no hay ninguna liga mecánica o química que permita que se encuentren en contacto los revestimientos en todo momento. Debido al deslizamiento entre revestimiento el modelo sufre una degradación de la rigidez global del anillo, según la relación de carga que se presente.

Por tal razón, se desarrolló un modelo donde se combinen los comportamientos mencionados anteriormente. En este modelo se restringen las separaciones en la interfaz entre revestimientos con el parámetro de la resistencia al esfuerzo de tensión. Con este parámetro le agregamos una cierta ligazón entre los revestimientos.

Sin embargo, se necesitaba de un punto de comparación para los modelos desarrollados y mencionados anteriormente; de tal forma, que se realizó un modelo donde no existiera una interfaz, teniéndose así un contacto perfecto.

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES

Un proceso muy utilizado en los últimos años para la construcción de túneles en suelos blandos es aquel donde se utiliza una tuneladora de tierra balanceada (TBM-EPB, por sus siglas en inglés). Al ser blandos los suelos, no son auto-soportantes; empleándose elementos de concreto prefabricado llamados *dovelas* para formar anillos de concreto y servir como un ademe temporal o final de la excavación. Las dovelas, generalmente, son de concreto reforzado, las cuales se colocan por succión durante la construcción del túnel con ayuda de la máquina tuneladora. En la máquina perforadora hay un elevador que levanta las dovelas por succión y son llevadas posteriormente al montador; y mientras avanza la excavación, se van colocando las dovelas para formar un anillo troncocónico. Entre dovelas se localizan juntas, así como también entre anillos.

Las dimensiones y características de las dovelas van a depender de algunos factores como: las condiciones del terreno, del espacio disponible para colocarlas y transportarlas, la extensión máxima disponible de los gatos en la tuneladora. Por lo general, las dovelas se intentan hacer lo más largas posibles y así tener el menor número de dovelas por anillo, agilizando el trabajo de la tuneladora.

Algunos criterios para la selección del método constructivo de un túnel son los siguientes (Galera, 2008):

- Geometría
- Longitud
- Ubicación
- Rendimiento
- Respuesta del terreno
- Flexibilidad ante cambios del terreno

Debido al proceso de excavación, el suelo sufrirá cambios como asentamientos; provocando que los esfuerzos que se tenían en un principio cambien. Al excavar el suelo, el terreno pierde el equilibrio original y paulatinamente llegará a otro equilibrio. Esto debe tomarse en cuenta en el diseño del túnel para mitigar en mayor medida las fallas en el túnel. También hay que tomar en cuenta los asentamientos por el fenómeno que se genera al

extraer agua del manto freático para la construcción del túnel (Ding, 2004). Factores como los mencionados anteriormente influyen en el comportamiento del túnel. Por lo que hay que considerarlos para tener un buen comportamiento del túnel, tanto en su construcción como su vida útil.

En muchos de los casos de túneles que se construyen mediante la técnica de escudo en suelos blandos, se complementan generalmente por un revestimiento adicional de concreto colado *in situ*. Este revestimiento adicional se construye sobre el revestimiento conformado por dovelas, sin ningún tipo de elemento que los ligue mecánicamente. Por tanto, se presentará una interfaz entre estos dos revestimientos. Al revestimiento conformado por dovelas se le conoce como revestimiento primario por ser el primer revestimiento colocado, y revestimiento secundario aquel colado *in situ*, ya que es el que se coloca después del revestimiento primario.

### ***1.1 Características de los túneles dovelados con revestimiento secundario***

Los túneles más empleados en la actualidad para suelos blandos son aquellos que se componen de un revestimiento primario conformado por dovelas y un revestimiento secundario colado *in situ* sobre el revestimiento primario (en muchos de los casos). Debido a que no existe una liga mecánica entre los revestimientos, es de interés conocer la interacción entre estos. A pesar de no tener ninguna liga mecánica en la interfaz entre revestimientos, estos podrán tener una cierta liga proporcionada, por ejemplo, por la rugosidad de las superficies y características del material utilizado.

Normalmente, el revestimiento primario es de concreto prefabricado reforzado; y el revestimiento secundario es de un concreto que puede tener la misma resistencia a la compresión del revestimiento primario y mismas características geométricas.

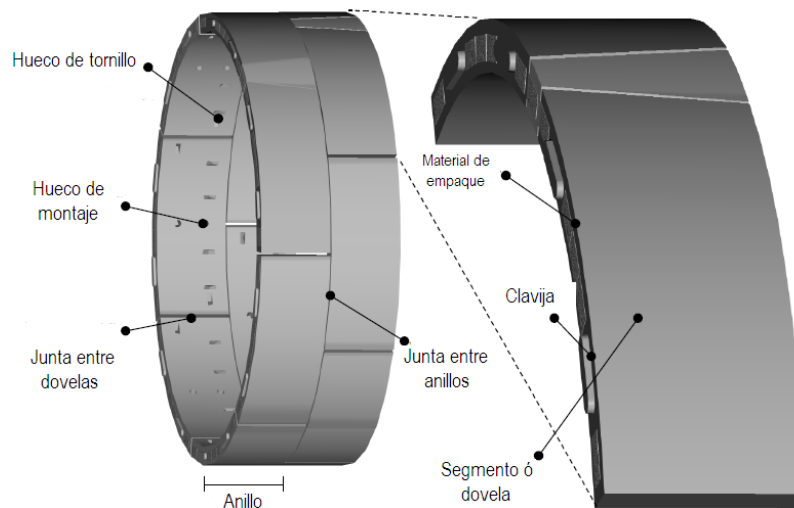
Hay que tomar en cuenta la presencia de las juntas entre dovelas, ya que estos elementos van a influir en el comportamiento del anillo (ver sección 1.1.2). En las juntas se encuentra una banda de estanqueidad elastomérica, entre dovelas y entre anillos.

#### ***1.1.1 Revestimiento primario***

El revestimiento primario tiene por objetivo el proveer un apoyo temporal o definitivo y garantizar la estabilidad del túnel durante su construcción, manteniendo los asentamientos superficiales dentro de los límites tolerables.

El revestimiento primario se coloca mediante una maquina tuneladora. Conforme va excavando y avanzando la tuneladora, coloca en su posición final el conjunto de dovelas que conforman el revestimiento primario. Las dovelas se producen en diferentes plantas, y posteriormente son llevados a la zona de construcción para almacenaje y colocación. Las dovelas pueden unirse entre sí ya sea por medio de tornillos o sin tornillos dependiendo del tipo de junta. Se van colocando una serie de dovelas hasta formar un anillo tronco-cónico, es decir, en forma de un cono truncado. (Peña, 2009)

El escudo excavador instala de forma automatizada y precisa el conjunto de dovelas, formando anillos. El erector de dovelas se encarga de colocar las dovelas en su posición final. Se coloca primero el piso del túnel, llamada *cubeta*, para después colocar las demás dovelas a los costados de la excavación hasta formar el anillo al colocar la última pieza llamada *clave*. La clave es la pieza de menor tamaño, con una geometría diferente al de las demás; y es la última pieza que se coloca durante la construcción del anillo, formando así una sucesión de anillos (Gutiérrez, 2010). En la figura 1.1 se muestra esquemáticamente un anillo conformado por dovelas y sus partes básicas.



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

Una vez que se forma el anillo se inyecta mortero entre el suelo y el revestimiento primario para evitar en mayor medida los asentamientos del suelo; ya que el escudo excavador tiene un diámetro mayor al diámetro exterior del revestimiento primario. Así mismo, el mortero ayuda a evitar filtraciones de agua del manto freático al túnel (Ding, 2004).

El revestimiento conformado por el conjunto de dovelas tiene una banda elastomérica la cual rodea el perfil de las juntas de la dovela con el objetivo de evitar filtraciones de agua o de algún material a través de estas. El agua que se encuentra en el suelo trata de filtrarse a

elevadas presiones por las juntas, pero que es impedido su paso por la banda elastomérica. Cuando una dovela se coloca sobre otra y por la unión entre éstas, se presenta una compresión en la junta; tanto en juntas longitudinales como en juntas transversales (Peña, 2009).

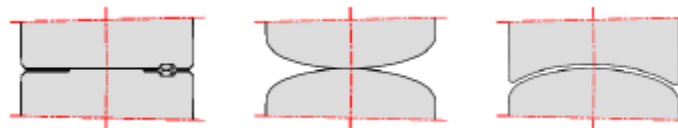
Existe un desfase en la configuración de las dovelas entre anillos contiguos con la finalidad de no se tengan líneas débiles y tener un mejor comportamiento en toda la longitud del túnel (Gutiérrez, 2010).

### *1.1.2 Comportamiento de las juntas entre dovelas*

Entre cada dovela existen juntas para unir y transferir los efectos en todo el anillo, por tal razón, no es posible considerar al anillo como continuo. La presencia de las juntas influirá en el comportamiento del anillo, como puede ser en el cálculo de las fuerzas internas y los desplazamientos en el anillo. En cuanto al diseño estructural del túnel, es de interés conocer los factores que inducen los esfuerzos en el túnel y que pueden causar la falla del mismo; como pueden ser:

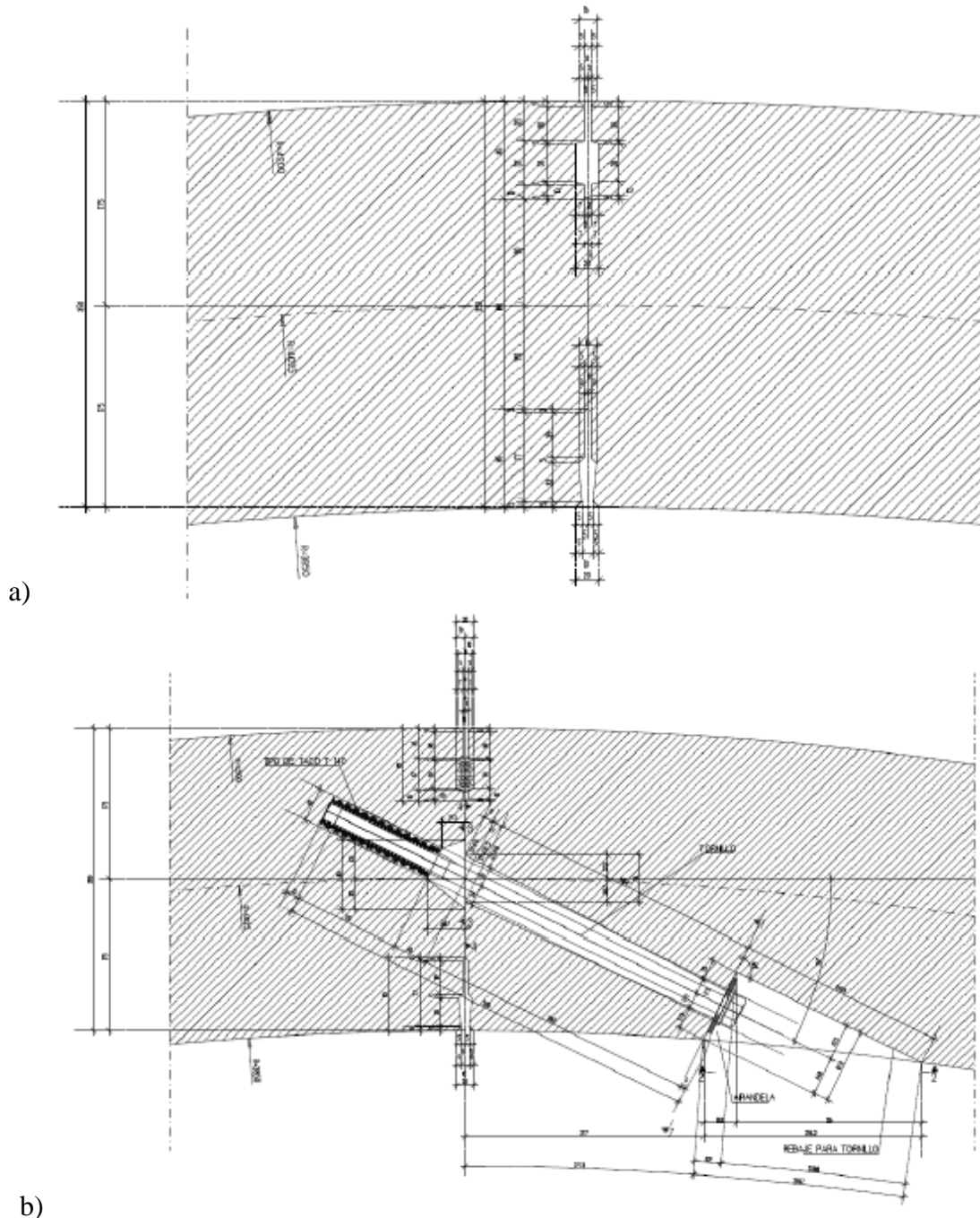
- El comportamiento mecánico de las juntas entre dovelas
- Número de juntas y su posición relativa con respecto a las cargas
- La relación entre las cargas verticales y horizontales que actúan sobre el túnel

En la práctica se utilizan dos tipos de juntas las cuales son: la junta plana y la junta convexa. En la figura 1.2 se muestran esquemáticamente las juntas planas y las juntas convexas. La junta plana tenderá a cerrarse por el momento que se genera debido a las fuerzas normales, presentándose la rotación en la junta. En el caso de la junta convexa, no existe una transferencia de momentos teniendo un comportamiento similar al de una articulación. Por tanto, la principal diferencia entre los tipos de juntas es la capacidad que tiene cada una para transferir momentos flexionantes. Las juntas convexas se recomiendan utilizar cuando se presenten momentos de gran magnitud. Debido que al utilizarse una junta plana, esta puede fallar por aplastamiento por la concentración de esfuerzos de compresión (Luttikholt, 2007).



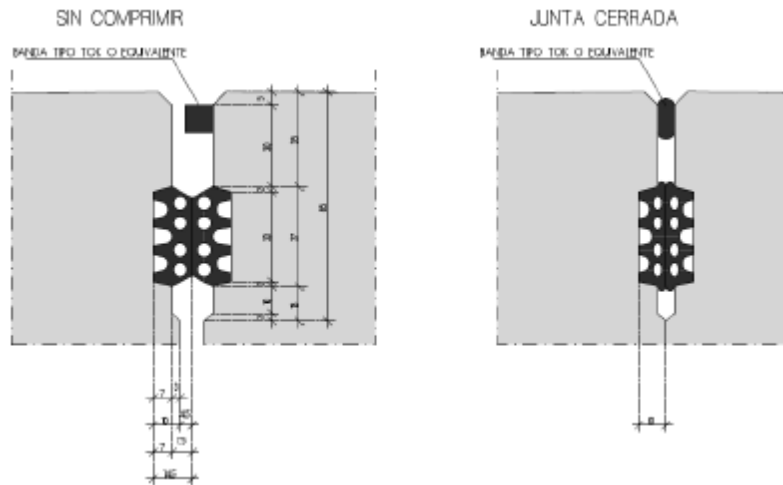
**Fig. 1. 2. Representación esquemática de los tipos de junta. Junta plana (izquierda), juntas convexas (centro y derecha) (Luttikholt, 2007)**

Las juntas planas se subdividen en juntas atornilladas y sin atornillar. En la figura 1.3a se tiene una junta plana sin atornillar, la cual se encuentra apoyada de forma simple; y en la figura 1.3b se tiene una junta plana, en donde las dovelas se encuentran unidas entre sí por medio de tornillos.



**Fig. 1. 3. Detalle y geometría de la junta entre dovelas (COMISSA, 2009): a) sin tornillo; b) atornillada**

El revestimiento de dovelas se encuentra equipado con una banda de estanqueidad elastomérica que rodea todo el perfil de las juntas de la dovela. Esta banda trata de impedir las filtraciones de agua al interior del túnel u otro material (Peña, 2010). En la figura 1.4 se muestra la compresión de las bandas de estanqueidad elastomérica y la acanaladura, en una junta, al momento de unirse.



**Fig. 1. 4. Junta de estanqueidad, sellado y acanaladura (Peña, 2009)**

Blom (2003) consideró el efecto de la existencia de juntas para túneles construidos en suelos blandos. Las juntas se modelaron por medio de una rigidez rotacional en su modelo. Concluyó que la implementación de las juntas en el anillo, reducen la rigidez a momento flexionante en éste.

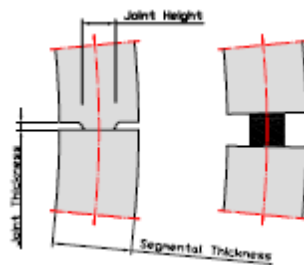
El comportamiento de las juntas de las dovelas tiene una gran influencia por la presencia de la fuerza normal, la cual es causada por una presión radial uniforme en el revestimiento. Cuando se tiene un momento flexionante bajo, existe una fuerza de compresión en la totalidad de la sección transversal de la junta. La rotación que se presente será muy poca y no se formará ninguna abertura (Luttikholt, 2007).

Peña (2009), estudió el comportamiento de las juntas del Túnel Emisor Oriente, donde utilizó varios modelos numéricos: dovelas elásticas, dovelas de concreto simple y dovelas reforzadas. En cuanto a la capacidad de rotación de los modelos numéricos de las juntas se concluyó en el trabajo que a mayor compresión en el área transversal de la junta, menor la rotación de la misma. Así como a mayor resistencia del concreto mayor la capacidad de rotación de la junta. Se menciona también, que no hay que tener rotaciones excesivas para evitar que la junta falle y no se ponga en riesgo la estabilidad del anillo. El momento flexionante está íntimamente relacionado con la fuerza normal  $N$  en la junta. La fuerza



normal de la junta se debe a la presión radial impuesta por el suelo al revestimiento conformado por dovelas. Al tener un momento flexionante  $M$  de pequeña magnitud, se tendrán esfuerzos de compresión en toda la sección transversal de la junta; por tanto, las rotaciones serán pequeñas.

Hoy en día el método más usado para estudiar el comportamiento de estructuras complejas, es el *método de elementos finitos*. Sin embargo, existen expresiones para definir el comportamiento de las juntas no atornilladas. Por ejemplo, Janssen (Luttikholt, 2007) consideró la junta como una viga equivalente entre las dovelas para poder simular las rotaciones en la junta y las curvaturas entre dos dovelas adyacentes causados por una fuerza concentrada inducida entre dovelas. Para simular las rotaciones, la viga de concreto no es capaz de tomar fuerzas de tensión y tiene dimensiones iguales a la altura de la junta. La figura 1.5, muestra esquemáticamente la junta equivalente desarrollada por Janssen.



**Fig. 1. 5. Esquema de una junta de Janssen. Junta real (izquierda) y modelo de Janssen (derecha) (Luttikholt, 2007)**

La rigidez de la junta solo se verá afectada por el módulo de Young del concreto y la altura de la junta de contacto. Al incrementarse el momento flexionante, la junta se abrirá y ocurrirá una relación no lineal. Janssen consideró una relación lineal de esfuerzos y deformaciones; también consideró que la junta no es capaz de desarrollar esfuerzos de tensión. La ecuación 1.1 muestra la relación propuesta por Janssen, donde relacionó de forma lineal los esfuerzos y las deformaciones.

$$\varphi = \begin{cases} \frac{12}{Eb h^3} M & \text{si } M < \frac{1}{6} Nh \\ \frac{8N}{9Eb h \left(\frac{2M}{Nh} - 1\right)^2} & \text{si } M \geq \frac{1}{6} Nh \end{cases} \quad (1.1)$$

Donde  $N$  es la fuerza normal presente en la junta,  $M$  es el momento flexionante,  $E$  es el modulo de elasticidad,  $h$  es el ancho de la junta (ver figura 1.5) y  $\varphi$  es la rotación de la junta.

Basado en la teoría de la elasticidad, Gladwell (Luttikholt, 2007) desarrolló una relación entre el momento y la rotación entre dos superficies planas. El esfuerzo de contacto se concentra en los bordes de la junta. Lo que conlleva a una mayor rigidez rotacional comparada con la de una distribución lineal de esfuerzos. Las diferencias principales entre estas dos propuestas para considerar el comportamiento de juntas no atornilladas son las siguientes: a) La rigidez inicial obtenida por Gladwell es mayor a la obtenida por Janssen; b) Se alcanza más rápidamente el momento máximo teórico en la sección no-lineal propuesta por Gladwell; y c) la junta necesita de la presencia de un mayor momento para que se genere una abertura, según Gladwell (Peña, 2009). La ecuación 1.2 muestra la relación de Gladwell, donde la relación deja de ser lineal. Esta relación está en función de carga axial, la geometría de la junta, el modulo de elasticidad del material y el coeficiente de Poisson  $\nu$ .

$$\mu = \begin{cases} \frac{\pi}{16(1-\nu^2)} \Phi & \text{si } \Phi \leq \frac{8(1-\nu^2)}{\pi} \\ 1 - \frac{4(1-\nu^2)}{\pi} \frac{1}{\Phi} & \text{si } \Phi > \frac{8(1-\nu^2)}{\pi} \end{cases} \quad (1.2)$$

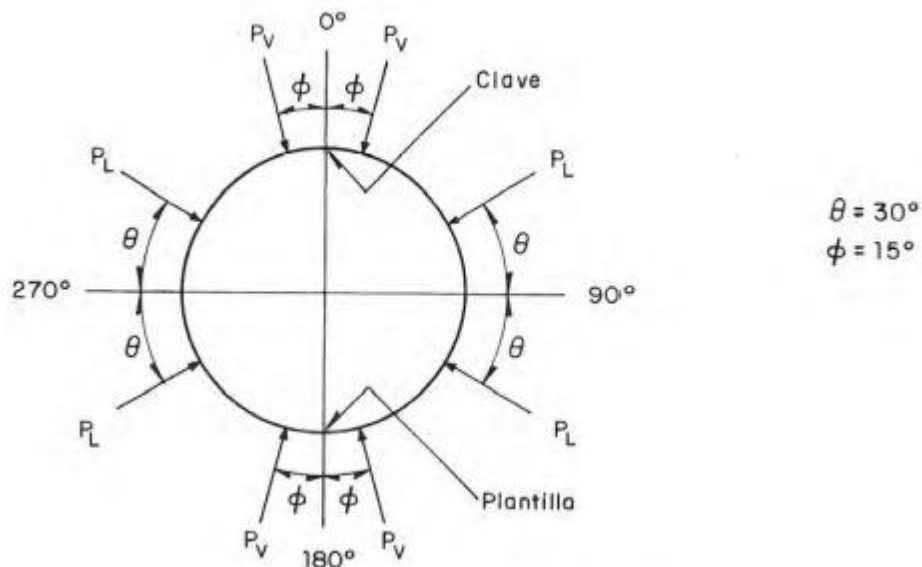
Donde:  $\mu = \frac{M}{1/2Nh}$ ;  $\Phi = \varphi \frac{hbE}{N}$

La presencia de tornillos en las juntas cambia el comportamiento global del anillo. El trabajo de Abbas Majdied al. (2010), nos muestra la influencia de juntas atornilladas y juntas no atornilladas en el comportamiento de un túnel. Los resultados finales muestran que los desplazamientos decrecen mientras que el esfuerzo se incrementa en juntas atornilladas respecto a las juntas no atornilladas.

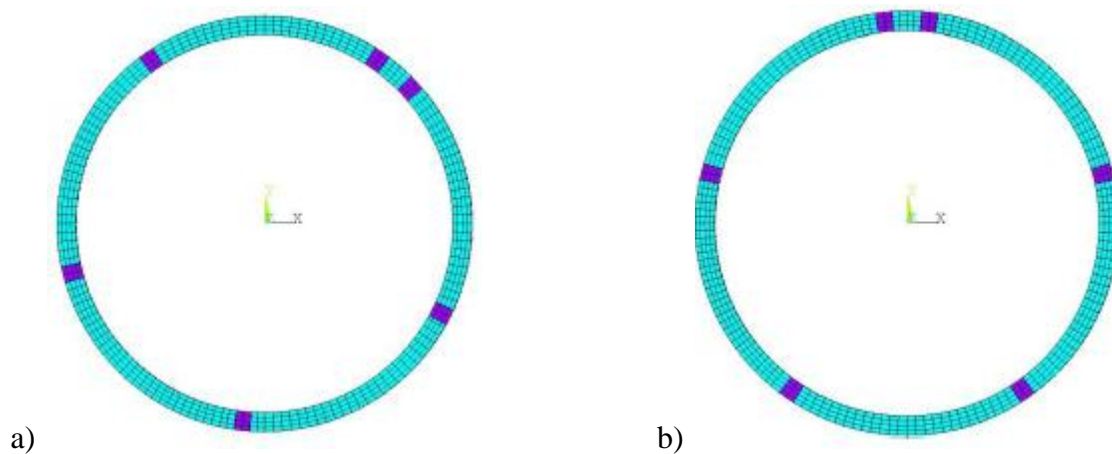
Un aspecto importante es la configuración de las dovelas para el comportamiento global del anillo. El trabajo de Rodríguez y Salmón (1987) muestran que el comportamiento del anillo depende de dos factores principalmente: de la relación de cargas horizontales y verticales; y de la posición relativa de las juntas en el anillo respecto a la carga (Peña, 2009). Entre mayor sea la carga vertical en el anillo mayor deformación presentará éste, y el anillo tendrá una mayor flexibilidad al cambiar la configuración de las juntas. En la figura 1.7 se muestra la posición relativa de las juntas del anillo respecto a las cargas que se utilizaron en Rodríguez y Salmón (1987). Se presentan en la figura 1.8 las curvas carga vertical-disminución de diámetro vertical. Hay que mencionar que en el trabajo de Rodríguez y Salmón se utilizaron tres casos de carga los cuales se muestran en la tabla 1.1. Y en la figura 1.6 se muestra de forma esquemática la aplicación de las cargas en el anillo.

**Tabla 1.1 Condiciones de carga (Peña, 2009)**

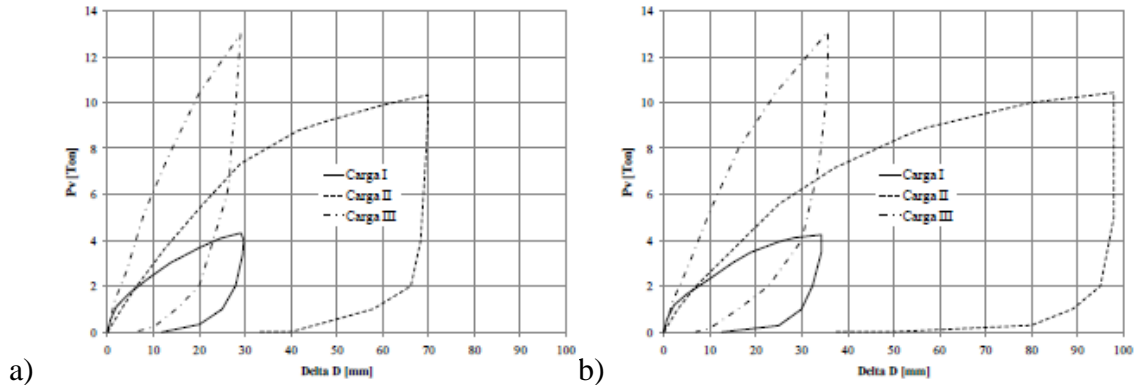
Carga	$P_l$ (Ton)	$P_v$ (Ton)	$K0(P_l/P_v)$
I	2.40	4.31	0.56
II	9.05	10.45	0.87
III	14.50	13.00	1.09



**Fig. 1. 6 Distribución de carga (Rodríguez y Salmón, 1987)**



**Fig. 1. 7. Modelos de elemento finito. Configuración de las juntas en el anillo: a) anillo superior; b) anillo inferior. (Peña, 2009)**



**Fig. 1. 8. Curvas carga vertical-disminución de diámetro vertical: a) anillo superior, b) anillo inferior (Rodríguez y Salmón, 1987)**

### 1.1.3 Revestimiento secundario

El revestimiento secundario tiene por objetivo el dar adecuado comportamiento del túnel a largo plazo. El revestimiento secundario se coloca meses después de haberse colocado el revestimiento conformado por el conjunto de dovelas prefabricadas. Este revestimiento secundario se coloca con cimbra telescópica y de un espesor igual o un poco mayor que el revestimiento primario. Una vez colocado el revestimiento secundario se tiene la geometría definitiva de un anillo del túnel.

### 1.2 Construcción de túneles mediante una máquina tuneladora TBM-EPB (Gutiérrez, 2010).

El método comúnmente utilizado para la construcción de túneles en la ciudad de México es el de Máquina de tierra balanceada (TBM-EPB). Las máquinas de tierra balanceada que se usan para construir el túnel tienen discos cortadores de acuerdo al tipo de suelo. Los escudos EPB se usan donde es necesario aplicar una presión en el frente de excavación para mantener el equilibrio de la masa de suelo y evitar la falla o asentamientos importantes.

Las máquinas de tierra balanceada consisten en un disco de corte que es accionado por gatos hidráulicos y va excavando el suelo. La presión en el frente de la excavación se hace: por medio de la presión que ejerce la rueda de corte sobre el suelo, empujándolo con gatos hidráulicos que se apoyan en el revestimiento; y controlando la entrada y salida de material de la cámara de corte, mediante la regulación de la velocidad del tornillo sin fin. Como normalmente se tienen suelos blandos, la máquina cuenta con un escudo que va reteniendo

el suelo en las zonas ya excavadas mientras atrás se colocan los elementos prefabricados que conformarán un solo anillo del túnel. En cuanto va avanzando la máquina tuneladora se colocarán una sucesión de anillos que conformarán al túnel. En la parte trasera de la máquina tuneladora, se encuentra el equipo de rezaga, que consiste en una serie de plataformas arrastradas por la misma máquina. En esta zona se localizan los equipos de ventilación, transformadores, depósitos de mortero y el sistema de evacuación del material excavado.

El material excavado se va extrayendo mediante un tornillo sin fin o tornillo de Arquímedes, colocándolo en bandas transportadoras hasta unos vehículos sobre rieles o bombeado por tuberías. La máquina tuneladora se apoya en el suelo excavado para darle soporte al frente. El empuje de los cilindros de avance actúa sobre el suelo plastificado en la cámara de excavación, equilibrando así las fuerzas y evita la presencia de derrumbes en el frente. En ocasiones, se le suele añadir ciertos aditivos al suelo para que el trabajo de excavación sea más fácil, como pueden ser espumas para sustituir los finos faltantes y agua intersticial; y polímeros para disminuir la permeabilidad en el frente aumentando la viscosidad del agua intersticial.

Como el diámetro exterior del escudo de la tuneladora es mayor que el diámetro exterior del túnel, se inyecta mortero entre el suelo y el túnel para evitar los asentamientos del suelo de alguna forma. Evitando también la alteración de la presión del suelo que actúa en el anillo.

En la figura 1.9 se muestra un esquema de una máquina tuneladora TBM-EPB, las cuales se han utilizado para la excavación del Túnel Emisor Oriente (TEO) y en tramos de la línea 12 del metro de la ciudad de México.

### ***1.3 Factores que afectan la distribución de fuerzas en el anillo***

Las partículas del suelo se encuentran en equilibrio, el cual se altera en el momento en que se realizan los trabajos de excavación de un túnel. Las máquinas tuneladoras TBM-EPB aplican presión mediante gatos hidráulicos en el frente de la excavación cambiando el estado de esfuerzo del suelo conforme avanza. La tuneladora cuenta con un cilindro metálico conocido como escudo con la finalidad de evitar los asentamientos mientras se colocan los elementos de concreto prefabricado. Sin embargo, el diámetro del escudo es mayor al diámetro del revestimiento del túnel (Gutiérrez, 2010). Por lo que se presenta un reacomodo de las partículas del suelo, cambiando el equilibrio de fuerzas que se tenía en un principio. Entonces el reacomodo de las partículas del suelo modificarán las cargas que se

consideraron en el diseño del túnel. Por tanto, se puede alterar el comportamiento previsto del túnel, pudiéndose presentar fallas en el túnel o comportamientos que no se tenían contemplados.

El proceso de construcción del túnel puede influir en la distribución de fuerzas que actúan en el revestimiento. En la construcción es donde se presentan los mayores efectos en la distribución de fuerzas. Es en la etapa de construcción donde se presenta un cambio en el suelo y en la presión del agua, provocando que se genere una gran carga axial al revestimiento del túnel (Peña, 2009). Se inyecta lechada entre el revestimiento y el suelo circundante para cerrar las juntas. La lechada que se inyecta debe tener la misma o una presión mayor que la presión del suelo. La inyección de la lechada se debe realizar de tal manera que no se induzcan efectos negativos en las fuerzas en el revestimiento. El túnel se encontrará “flotando” en la lechada mientras se encuentra en estado plástico, pero conforme se va endureciendo servirá de soporte al túnel (Ding et al., 2004). Todos estos trabajos determinarán las fuerzas resultantes en el revestimiento en su construcción y probablemente en su vida útil.

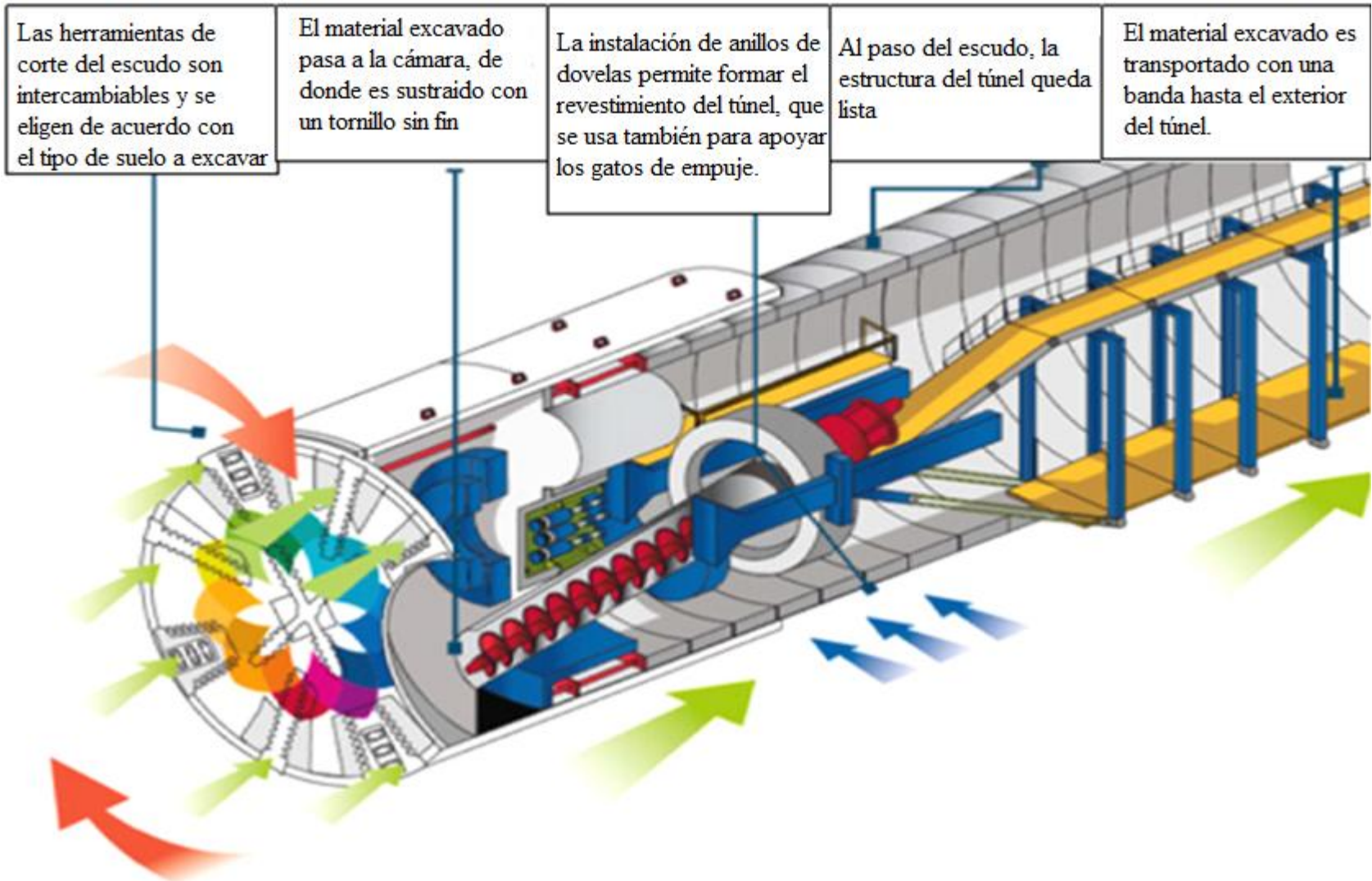


Fig. 1. 9. Esquema de una tuneladora de escudo TBM- EPB (tierra balanceada) (CONAGUA, 2011)

Las fuerzas actuantes en el revestimiento del túnel se pueden subdividir en: fuerza axial, fuerza radial y fuerza tangencial (Luttikholt, 2007). Cuando se construye un túnel por debajo del nivel freático, la presión del agua se presenta y sólo actúa en la dirección radial del revestimiento. Un bajo nivel del manto freático resulta en una carga uniforme radial menor provocando relativamente una gran carga de deformación en el revestimiento y debe tomarse en cuenta en el diseño.

Las fuerzas del terreno pueden ser pasivas o activas; y pueden actuar en el revestimiento. Debido a estos factores las distribuciones de carga que se presenten en el eje vertical con los que se presenten en el eje horizontal del anillo, no son uniformes en la circunferencia del revestimiento.

Existen trabajos que muestran que el acomodo del suelo influye de forma importante en el comportamiento del anillo, sobre todo durante su construcción. En trabajos anteriores (Ding et al., 2004; Yoo, 2009) se menciona que las cargas actuantes en el túnel dependen en gran medida del proceso constructivo, tanto en el proceso de excavación como en la colocación del revestimiento conformado por elementos de concreto prefabricado. Peña (2009) también menciona en su trabajo, que entre un 30% y un 50% de la deformación de un anillo que se presenta durante su construcción se da en el frente de la excavación y en la colocación del revestimiento.

Pero no es cosa fácil considerar todos aquellos factores que puedan alterar la distribución de cargas en el anillo. Ya que, no todas las condiciones que se tengan durante la construcción, colocación de revestimientos y la vida útil del túnel serán las mismas para cualquier túnel con este tipo de excavación, terreno y propósito del túnel. Por tanto, es de suma importancia hacer una correcta idealización de todos aquellos factores que afecten la distribución de cargas a la cual estará cometido el túnel.

Una forma de idealizar la distribución de cargas es separándolas en diferentes etapas, ya que no será la misma en todo el proceso de construcción y vida útil del túnel. El terreno del suelo sufrirá un cambio importante durante la excavación y colocación del revestimiento, y paulatinamente se presentará un equilibrio de fuerzas en las partículas del suelo (ver sección 1.2). Por lo que en ese aspecto, las cargas debido al terreno varían en diferentes momentos del proceso de excavación, colocación y vida útil del túnel. Las etapas se pueden discretizar de varias formas, por ejemplo, Ding et al. (2004) mencionan cuatro etapas diferentes las cuales son las siguientes:

Estado 1. Excavación y escudo de apoyo

Estado 2. Relleno de mortero entre el suelo y el revestimiento



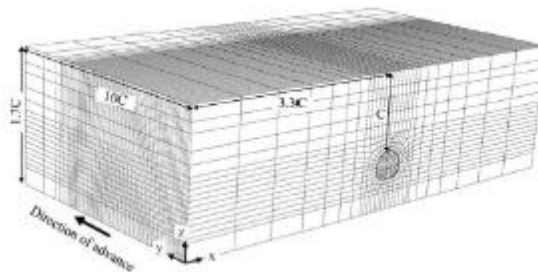
Estado 3. Endurecimiento del mortero

Estado 4. Mortero endurecido

Como se puede observar, y como objetivo principal del trabajo de Ding et. al. (2004), se estudió la influencia de la inyección del mortero en el comportamiento de un modelo de elementos finitos en dos dimensiones de túneles con escudo. Debido a los asentamientos del suelo por la excavación, se inyecta el mortero con una presión igual o mayor a la del suelo. Cuando se inyecta el mortero, que se encuentra en un estado “líquido”, provoca una fuerza de elevación debido a la diferencia de densidades de los materiales. Debido a esto el revestimiento flota, generándose tensiones adicionales en éste. Blom (2003) toma en cuenta también el efecto de la lechada en estado líquido en el comportamiento del anillo de un túnel, considerando un estado de carga de elevación. Este caso de carga representa el efecto de la inyección de lechada entre el suelo y el revestimiento, y concluye que la presencia de la lechada es muy importante en el comportamiento global del anillo.

Otro ejemplo de clasificación de los estados de carga en la construcción del túnel podría ser: a) terreno original, sin excavar; b) suelo excavado y c) colocación del revestimiento. Hay que hacer notar que la elección de las etapas del proceso constructivo depende mucho de que tan refinado se desea que sea el estudio.

Normalmente para considerar los factores que alteran las distribuciones de fuerzas en el anillo se utilizan simulaciones numéricas. Se recomienda el uso de modelos en tres dimensiones para tener comportamientos semejantes a la realidad. A veces con la ventaja de la simulación numérica es posible modelar todo el proceso constructivo, desde el estado original del suelo hasta la colocación de los elementos de concreto prefabricado. Incluso es posible modelar el suelo circundante del túnel, como se realizó en el trabajo de Yoo (2009). Sin embargo, siempre van a existir limitaciones, por ejemplo que tanta masa de suelo se considera, etc. En la figura 1.10 se muestra un modelo de elemento finito representando el proceso constructivo.



**Fig. 1. 10. Representación del proceso constructivo mediante simulación numérica (Yoo, 2009)**

## CAPÍTULO 2

### MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

Para modelar numéricamente el problema se utilizó el método de elementos finitos (MEF). Las bondades de este método lo hacen ideal para resolver problemas de este tipo, donde una de las características principales son la no-linealidad.

Se utilizó el programa comercial ANSYS (2006) para poder modelar nuestro problema y estudiar el posible comportamiento en la interfaz entre revestimientos. Los modelos numéricos son tridimensionales y considera un revestimiento primario compuesto por 6 dovelas y una dovela llave; y el revestimiento secundario que constituyen el anillo final del túnel.

Para este estudio se utilizó un túnel dovelado típico de drenaje construido en la ciudad de México. Este túnel presenta las características geométricas y propiedades mecánicas de los materiales mostrados a continuación.

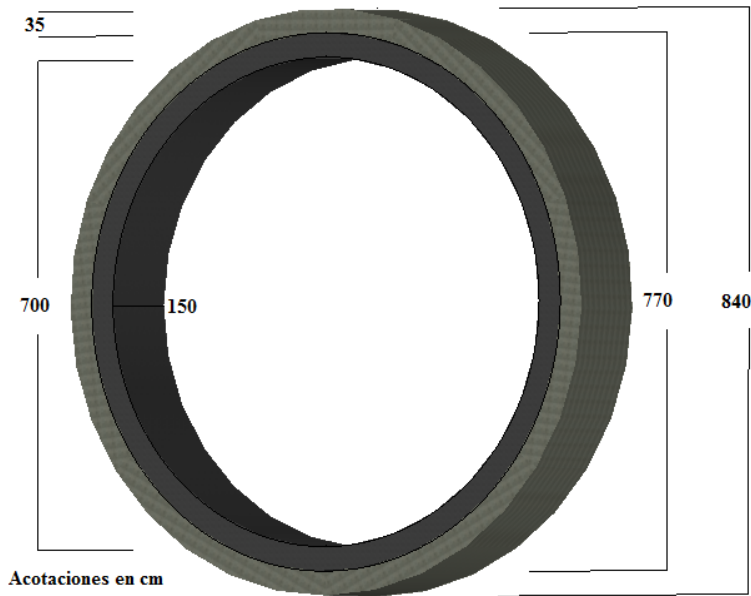
Las dimensiones del revestimiento primario son las siguientes:

- 840 cm de diámetro exterior
- 770 cm de diámetro interior
- 35 cm del espesor de la dovela
- 150 cm del espesor del anillo

El revestimiento tiene las siguientes dimensiones:

- 700 cm de diámetro interior
- 770 cm de diámetro exterior
- 35 cm de espesor del revestimiento secundario
- 150 cm del espesor del anillo

En la figura 2.1 se muestra de forma esquemática las características geométricas de los revestimientos.



**Fig. 2. 1. Representación esquemática de la geometría del anillo**

En cuanto a los materiales utilizados, tanto el conjunto de dovelas de concreto prefabricado que componen al revestimiento primario, como el revestimiento secundario están hechos de concreto clase 1 con una resistencia a la compresión  $f'c$  de  $350 \text{ kg/cm}^2$ . El acero de refuerzo cuenta con una resistencia a la fluencia  $f_y$  igual a  $4200 \text{ kg/cm}^2$ . El módulo de elasticidad  $E_c$  y la resistencia a la tensión  $f_t$  se obtienen de la resistencia a compresión y utilizando el criterio de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, en las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (2004) (ecuaciones 2.1 y 2.2)

$$E_c = 14000\sqrt{f'c} \quad (2.1)$$

$$f_t = 1.5\sqrt{f'c} \quad (2.2)$$

En la tabla 2.1 se muestra un resumen de las propiedades mecánicas de los materiales considerados para un anillo típico de drenaje de la ciudad de México.

**Tabla 2. 1. Propiedades mecánicas de los materiales**

Material	Resistencia a la compresión [ $\text{kg/cm}^2$ ]	Resistencia a la tensión [ $\text{kg/cm}^2$ ]	Módulo de elasticidad [ $\text{kg/cm}^2$ ]
Concreto	350	28	261,916
Acero de refuerzo	4200	4200	2,100,00

El programa comercial ANSYS (2006) tiene predefinidos algunos elementos para poder modelar el comportamiento de ciertos materiales. En el caso de los revestimientos, siendo

ambos de concreto, y tridimensionales se utilizó un elemento de ocho nodos que puede modelar el comportamiento de estructuras de concreto, también llamado *sólido de concreto reforzado* (ver sección 2.1).

Otro de los elementos que deben modelarse por su influencia en el comportamiento global del anillo son las juntas entre dovelas. El revestimiento primario al componerse de varios elementos (dovelas) deja de ser un anillo continuo (ver subsección 1.1.2). Por tanto, se tomará en cuenta la influencia de las juntas en el cálculo de las fuerzas internas y los desplazamientos del revestimiento primario. Para una mayor facilidad en el modelado de las juntas se consideró un material inelástico equivalente (ver sección 2.2).

El tema principal de este trabajo es el estudio de la interfaz entre revestimientos. La interfaz se modeló utilizando elementos que se encuentran predefinidos en el programa ANSYS (2006). A estos elementos se les conoce como *elementos de contacto* (ver sección 2.3), y permiten tener elementos finitos discontinuos. Para conocer y estudiar el comportamiento de la interacción entre ambos revestimientos se desarrollaron diferentes modelos modificando la forma en cómo se considera la interacción entre los revestimientos. Los modelos realizados son los siguientes:

- ***Modelo con contacto perfecto.*** Para este modelo se considera que no existe una interfaz entre revestimientos, es decir, que trabajan como una sola sección. No existen elementos de contacto para modelar la interfaz, por tanto, el modelo es continuo. Principalmente, este modelo nos ayudará en el trabajo como punto de referencia con los comportamientos de los modelos que se describen adelante.
- ***Modelo que permite separación y deslizamiento.*** En este modelo se utilizan los elementos de contacto para modelar la interfaz entre revestimientos. En este modelo se permite que se presenten separaciones y deslizamiento en la interacción entre ambos revestimientos. De tal manera que la única fuerza que se opone al deslizamiento es la fuerza de fricción. Y al presentarse una separación entre revestimientos se pierde toda transferencia de esfuerzos de cualquier tipo.
- ***Modelo que permite únicamente deslizamiento.*** En este modelo solo se permite que los revestimientos se deslicen entre sí, midiendo indirectamente la influencia que se tiene en el comportamiento global del anillo la presencia de separaciones. Los revestimientos se mantendrán siempre en contacto, con la posibilidad que se deslicen.
- ***Modelo permitiendo una cierta cantidad de separación y deslizamiento.*** Se pretende definir una cierta “ligazón” entre revestimientos para este modelo. Es

decir, que se mantendrán unidos los revestimientos hasta que se sobrepase una cierta tolerancia; y al exceder la tolerancia los revestimientos se podrán separar. La tolerancia que tomará en cuenta es la resistencia al esfuerzo de tensión, teniéndose así, una resistencia a la tensión finita. Se podrán diferenciar dos comportamientos, uno donde los revestimientos están unidos y se transfieren esfuerzos de cortante; y otro donde los revestimientos presentan separaciones rigiendo una formulación tipo Coulomb, siendo necesario definir una cohesión y un ángulo de fricción.

### 2.1 Modelado de los revestimientos

Para modelar los revestimientos, se utilizó el elemento sólido predefinido en el programa comercial que consta de 8 nodos llamado SOLID65 (ANSYS, 2006. “Documentation for ANSYS”). El elemento SOLID65 nos ayuda a modelar estructuras en 3D de elementos sólidos, con el que se pueden modelar también el acero de refuerzo de forma dispersa. Este elemento también es conocido como “sólido de concreto reforzado” ya que como su nombre lo indica se utiliza para el modelado, en específico, de estructuras de concreto. Este elemento nos permite representar el agrietamiento del sólido por tensión y el aplastamiento debido a la compresión.

El elemento SOLID65 es un sólido tridimensional con seis caras, 8 nodos, y tres grados de libertad para cada nodo: desplazamiento en las direcciones x, y, z. El elemento se define con 8 nodos y con las propiedades isotrópicas del material (figura 2.2).

Un aspecto importante para este tipo de elemento es que se pueden tratar propiedades de materiales no lineales. El concreto se puede agrietar, sufrir aplastamiento, tener deformación plástica y fluir, en las tres direcciones ortogonales.

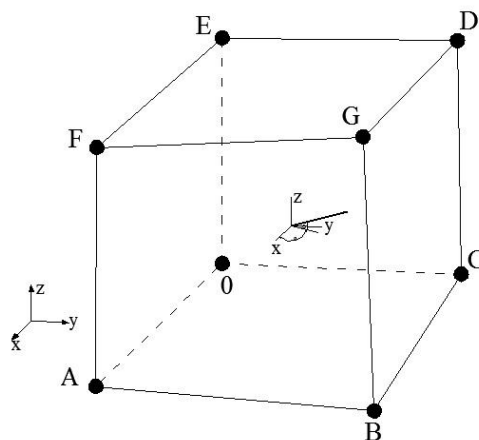


Fig. 2. 2. Esquema de un sólido tridimensional, 8 nodos (SOLID65)

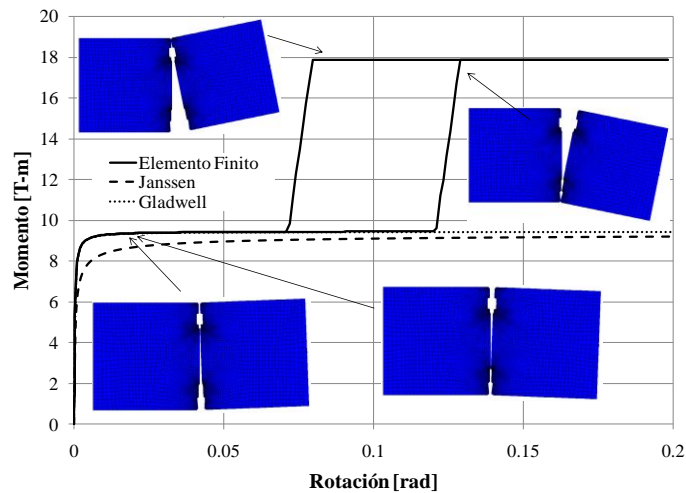
Debido a que el objetivo de este trabajo es la interacción entre ambos revestimientos, los modelos numéricos se han simplificado considerando que los revestimientos, tanto primario como secundario, no sufren ningún daño; modelándose como elementos elásticos lineales. No se consideró el acero de refuerzo en los revestimientos debido a que se considera un comportamiento elástico lineal y para simplificar los modelos numéricos. Las propiedades del material que se utilizó para modelar los revestimientos son los que se presentan en la tabla 2.1.

## ***2.2 Modelado de las juntas del revestimiento primario***

El modelado de las juntas se basó de los trabajos de Peña (2009 y 2010). En los primeros trabajos se realizó un modelo refinado de una junta típica de drenaje de la ciudad de México, en específico del Túnel Emisor Oriente (TEO), y se obtuvieron las curvas típicas momento-rotación. Se consideraron elementos de contacto en la zona de la junta para diferentes condiciones de carga axial, con momentos tanto positivos, como negativos. Para el modelado de la junta solo se tomó una porción de las dovelas, y se consideraron rectas, ya que el objetivo de dicho trabajo era el estudio del comportamiento de la junta, y la curvatura de las dovelas no influía en los resultados; sin embargo, para conocer la descripción detallada del modelo y de los resultados obtenidos se recomienda consultar el trabajo de Peña (2009).

La figura 2.3 muestra las curvas momento-rotación del modelo de las juntas refinado con dovelas elásticas y las curvas comparativas de los criterios de Janssen y Gladwell (ver subsección 1.1.2). Se puede observar en la figura que el modelo que se realizó tiene un comportamiento similar a los criterios antes mencionados para una rotación de aproximadamente 0.07, y al sobrepasar esta rotación el modelo tiene un comportamiento poco realista; sin embargo, es difícil que se sobrepase dicha rotación.

Janssen modeló un segmento de una junta utilizando un material equivalente entre los dos segmentos de las dovelas, como se puede observar en la figura 1.5. Este material equivalente simula las rotaciones en la junta y curvaturas adicionales entre los dos segmentos de dovela, causados por las fuerzas concentradas en estos segmentos (Luttikholt, 2007). Con base en la figura 2.3 y por sencillez, las juntas del revestimiento primario se modelaron mediante un material inelástico equivalente. Dicho material inelástico equivalente debe de tomar en cuenta la resistencia a compresión y tensión que pueda desarrollar la junta, para que su curva momento-rotación al compararla con la junta del modelo refinado sea similar.

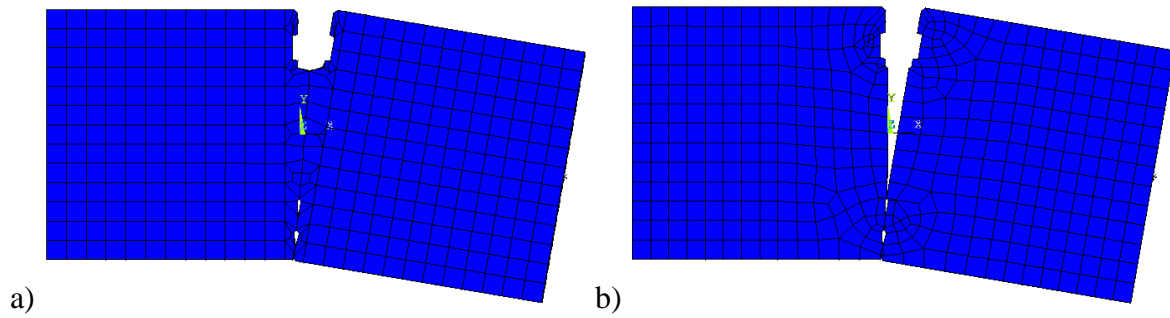


**Fig. 2. 3. Modelo refinado de una junta y su curva momento - rotación (Peña, 2009)**

Se consideró que las juntas fueran de un material isótropo con diferentes resistencias a compresión y a tensión, para modelar las juntas del material inelástico equivalente. Para modelar las juntas mediante un material equivalente se utilizó el elemento llamado SOLID65 (ANSYS, 2006), el cual nos permite modelar un material con diferentes resistencias en compresión y tensión. El elemento SOLID65 permite modelar estructuras de concreto con o sin acero de refuerzo. La ley constitutiva asociada a este elemento permite que el sólido falle por agrietamiento a tensión y por aplastamiento a compresión; permitiendo modelar el comportamiento del concreto.

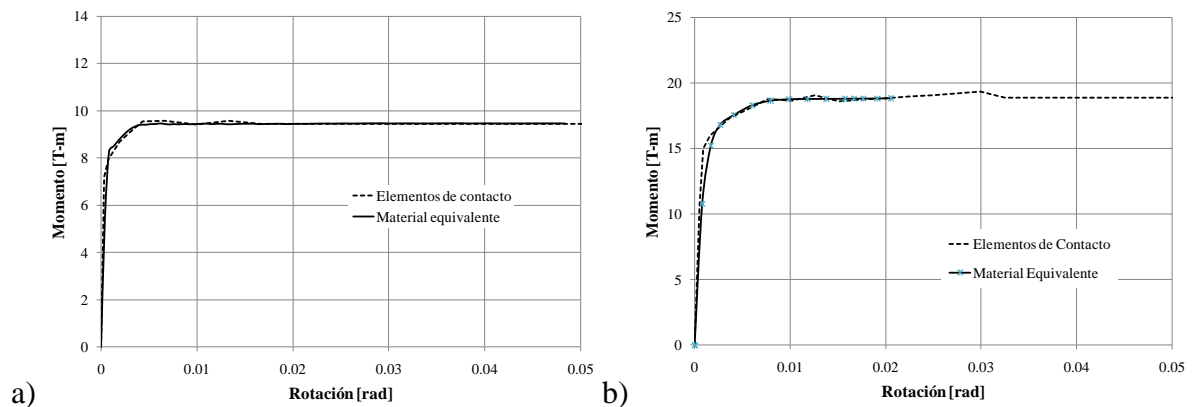
Para que el comportamiento del modelo de una junta con material equivalente sea similar al comportamiento de un modelo refinado, hubo que calibrarse el modelo de forma directa. El modelo de la junta con material inelástico equivalente se fue calibrando hasta obtener un comportamiento en las curvas momento-rotación similar al de una junta real, y las propiedades mecánicas del material se observan en la tabla 2.2.

A continuación se muestran comparaciones del modelo con material inelástico equivalente con el de un modelo de junta refinado. En la deformada de los modelos (figura 2.4, a y b), se observa que el modelo con material inelástico equivalente es un modelo continuo donde los elementos de la junta se deforman inelásticamente para tomar en cuenta el comportamiento de la junta; en cambio, el modelo refinado es un modelo discontinuo y se tomaron en cuenta elementos de contacto. La deformada entre los dos modelos es similar.



**Fig. 2. 4. Deformada típica del modelo de una junta entre dovelas; a) modelo con material equivalente, b) modelo con elementos de contacto (Peña, 2009)**

En la figura 2.5 se muestran las curvas momento-rotación de una junta con material equivalente y una junta refinada, donde los modelos se sometieron a dos cargas axiales diferentes. Las curvas son similares entre el modelo con material inelástico equivalente y el modelo refinado de la junta. Teniéndose tanto la deformación como las curvas - momento rotación de las juntas similares, se concluye, en el trabajo de Peña (2010), que el modelo con material inelástico equivalente es representativo para el modelado de la junta entre dovelas.



**Fig. 2. 5. Curvas momento - rotación de una junta típica de túneles dovelados, con diferentes presiones axiales; a) 20 kg/cm<sup>2</sup>, b) 40 kg/cm<sup>2</sup>**



**Tabla 2. 2. Propiedades mecánicas del material equivalente para modelar la junta entre dovelas**

Propiedad	Magnitud	Unidad
Módulo de elasticidad	261,916	Kg/cm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.2	
Resistencia a la tensión	20	Kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la compresión	elástico	

Viendo con detalle la figura 2.5, es posible que al considerar un material inelástico equivalente se tenga una pequeña diferencia en el comportamiento de las juntas. Donde se tendría una menor rigidez inicial, siendo más flexibles las juntas; y por lo tanto, los elementos mecánicos que actúen en las dovelas sean menores. Como se puede observar en dicha figura, el momento máximo es mayor en el modelo refinado de la junta que en el modelo con material equivalente. Sin embargo, no afectará esta pequeña diferencia en el estudio de la interacción entre ambos revestimientos.

### 2.3 Modelado de la interfaz entre revestimientos

Para modelar la interfaz entre revestimientos se requieren definir dos superficies, una superficie que se le llamará como *superficie de contacto*, que corresponde al diámetro interior del revestimiento primario; y una *superficie objetivo*, la cual corresponde al diámetro exterior del revestimiento secundario. El mallado del revestimiento primario y el del revestimiento secundario no serán coincidentes. Como los nodos en la interfaz no son coincidentes al definirse los elementos de contacto, nuestro modelo es discreto. Al tener un modelo discreto, los análisis serán no-lineales independientemente del tipo de material asignado a los elementos sólidos. La no-linealidad en los modelos numéricos que se generaron para este trabajo se presenta en la geometría.

Se ha considerado un comportamiento elástico por simplicidad, para definir los materiales que conforman a los revestimientos. Principalmente es de interés la presencia de separaciones y/o deslizamiento; y sus influencias en el comportamiento global del anillo.

La interacción entre revestimientos se modeló utilizando elementos de contacto tipo, los cuales nos permiten tener modelos de elementos finitos discontinuos. Los elementos de contacto que se utilizaron para modelar la interacción entre ambos revestimientos son:

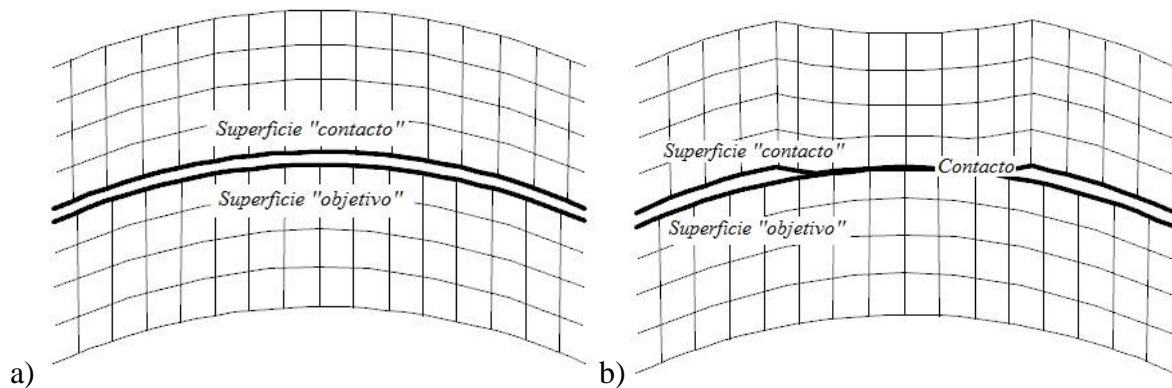
- TARGE170
- CONTA173

Estos elementos de contacto se basan en dos superficies, una de ellas se encuentra en movimiento y va a hacer contacto con una superficie que se encuentra en su posición esperando ser contactado. Los elementos se utilizan para representar las superficies “*contacto*” y “*objetivo*” en el modelado de la interacción entre revestimientos y son aplicables en superficies de elementos sólidos en 3D, SOLID65.

Cuando se modela la interacción entre los revestimientos se debe definir una superficie “*contacto*”, mediante la utilización de elementos CONTA173 (ANSYS, 2006). El elemento CONTA173 se utiliza para representar el contacto y deslizamiento entre superficies en 3D. El contacto ocurre cuando la superficie del elemento penetra uno de los segmentos de los elementos “*objetivo*”.

Se necesita una superficie “*objetivo*” la cual puede ser representada con el elemento TARGE170 (ANSYS, 2006). Los elementos de contacto se superponen a la cara del sólido describiendo el contorno de un cuerpo deformable y potencialmente en contacto con la superficie “*objetivo*”, definido por TARGE170.

La figura 2.6 representa el proceso de contacto entre las superficies de contacto y objetivo que pueden ser las de la interfaz entre revestimientos. La superficie “*contacto*” se mueve debido a la acción de las cargas aplicadas hacia una superficie que se define como “*objetivo*”, la cual es un límite a la respuesta que se tenga en la superficie “*contacto*” y se transmitirán los efectos a la otra superficie.



**Fig. 2. 6. Elementos de contacto; a) superficies "contacto" y "objetivo", b) Contacto entre las superficies**

Para definir los diferentes comportamientos contemplados en este trabajo, hay que considerar algunos parámetros para modelar el comportamiento en la interfaz, como lo es el grado de penetración. El grado de penetración entre el contacto y las superficies “*objetivo*”

depende de la rigidez normal. El intervalo común del factor de rigidez normal oscila entre 0.1 a 1.0, siendo 1.0 el valor predeterminado. El valor predeterminado es apropiado para deformaciones grandes, pero si la deformación por flexión rige, se recomienda utilizar un valor más pequeño del orden de 0.1 (ANSYS, 2006).

Hay que definir en los elementos de contacto la tolerancia de penetración, para establecer límites al considerar cuando hay contacto entre dos superficies. La tolerancia de penetración es un factor que se debe de aplicar en la dirección de la superficie normal de contacto. Esta tolerancia debe ser menor a la unidad, por lo general es menor a 0.2 (ANSYS, 2006).

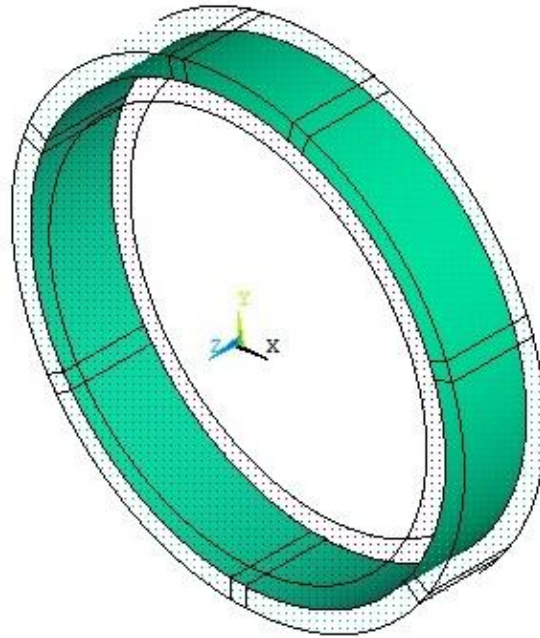
También debe definirse el tipo de comportamiento en la interfaz entre revestimientos. Los elementos de contacto permiten sólo tres tipos de formulación (ANSYS, 2006):

- Con rigidez a cortante infinita, en donde existe la posibilidad de separación entre elementos pero no un deslizamiento entre ellos.
- Siempre en contacto, en donde existe la posibilidad de deslizamiento entre superficies que se mantienen siempre en contacto.
- Formulación general, en donde puede existir una separación y un deslizamiento entre superficies. Pero la única liga entre superficies está dada por la carga axial actuante en la superficie de contacto.

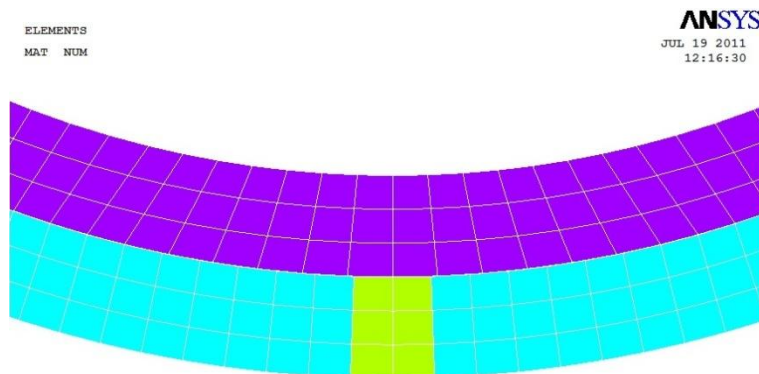
Las características de los elementos de contacto (TARGE170 Y CONTA173) son las siguientes (ANSYS, 2006):

- Permiten el contacto, separación y deslizamiento entre los revestimientos.
- Permiten una transmisión de esfuerzos de compresión y cortante mientras los revestimientos se encuentren en contacto directo, más no de tensión.
- Si los revestimientos no se encuentran en contacto directo, sino separados no existe una transmisión de esfuerzos de ningún tipo.
- Permiten una transmisión de esfuerzos de cortante, la cual se da mediante fricción de acuerdo con una ley tipo Coulomb.
- Permite detectar cambios en la geometría debido al movimiento relativo de los revestimientos.

La figura 2.7 nos muestra la superficie de interacción entre revestimientos marcada en color verde, y se muestra también en forma traslúcida los revestimientos primario y secundario. La figura 2.8 muestra la discontinuidad que existe entre revestimientos, donde los nodos del revestimiento primario no coinciden necesariamente con los nodos del revestimiento secundario en la interfaz entre estos.



**Fig. 2. 7. Interfaz entre revestimientos**



**Fig. 2. 8. Discontinuidad en la interfaz entre revestimientos**

Los principales parámetros que se le asignan a los elementos de contacto para definir la interacción entre los revestimientos son la cohesión y el coeficiente de fricción. Como el

revestimiento secundario es colado después sobre el revestimiento primario, debido al proceso constructivo del túnel se considera que el concreto del revestimiento secundario es un concreto nuevo colocado sobre uno ya endurecido (revestimiento primario) cuya superficie no se ha hecho intencionalmente rugosa. Con la consideración anterior y utilizando las normas del ACI (2008) el coeficiente de fricción que se le asignó a los elementos de contacto es de 0.6. En cuanto al valor de la cohesión se varía según el modelo numérico partiendo de un valor prácticamente nulo y se incrementará en cierto grado para observar la influencia de este parámetro en el comportamiento en la interfaz entre los revestimientos. Se escoge un valor casi nulo de la cohesión para partir de un caso extremo, donde se evita una cierta “ligazón” con este parámetro (ver capítulos 4 y 5).

Finalmente, en la figura 2.9 se muestra el mallado del modelo de elementos finitos de un anillo compuesto por un revestimiento primario conformado por dovelas, donde también se distinguen las juntas entre las dovelas; y un revestimiento secundario. El modelo consta de 13,880 elementos de los cuales 10,410 son elementos sólidos y 3,470 son elementos de contacto para definir la interacción entre revestimientos; y 44,383 grados de libertad.

#### ***2.4 Cargas aplicadas a los modelos***

Las cargas que se aplicaron a los modelos se simplificaron lo más posible, porque interesa únicamente como interactúan los revestimientos entre sí. Las cargas se aplicaron como presiones constantes, una vertical ( $P_v$ ) y una horizontal ( $P_h$ ). La figura 2.10 muestra de forma esquemática como se consideraron las presiones verticales y las horizontales. Por sencillez se consideró una presión vertical de  $10 \text{ t/m}^2$ . Las presiones se relacionaron por un factor  $K_0$  (ecuación 2.1), variando dicho factor de 0.4 a 0.9, en intervalos de 0.1; realizando análisis paramétricos para conocer el comportamiento del anillo.

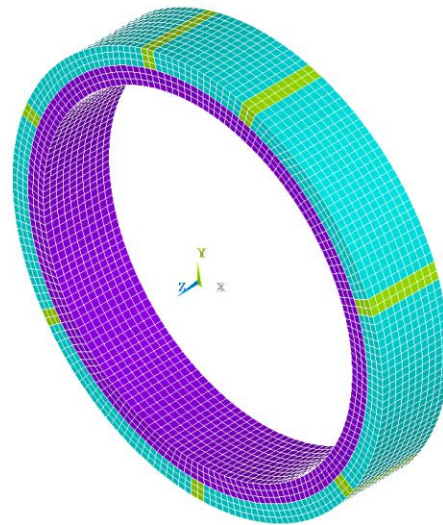
$$K_0 = \frac{P_h}{P_v} \quad (2.1)$$

#### ***2.5 Modelo con contacto perfecto***

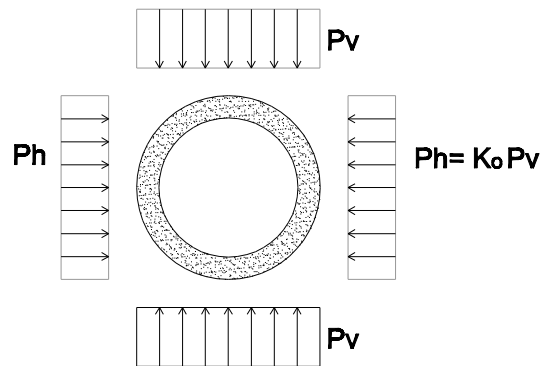
Para este modelo numérico no se considero la interfaz entre revestimientos, es decir, que no existen elementos de contacto teniéndose así un continuo; es decir, se tiene un contacto perfecto. Se tiene un solo anillo con un espesor igual a la suma de los dos revestimientos, de este modo ambos revestimientos trabajan como una sola sección.

Este modelo es el primero que se analizó con el objetivo de tener una referencia del comportamiento del anillo con respecto a los demás modelos numéricos considerados; y

poder hacer comparaciones. La figura 2.11 muestra el modelo con contacto perfecto, donde se puede notar que no existe una interfaz entre revestimientos, donde los nodos coinciden en la superficie donde interactúan ambos revestimientos.



**Fig. 2. 9. Modelo de elementos finitos**

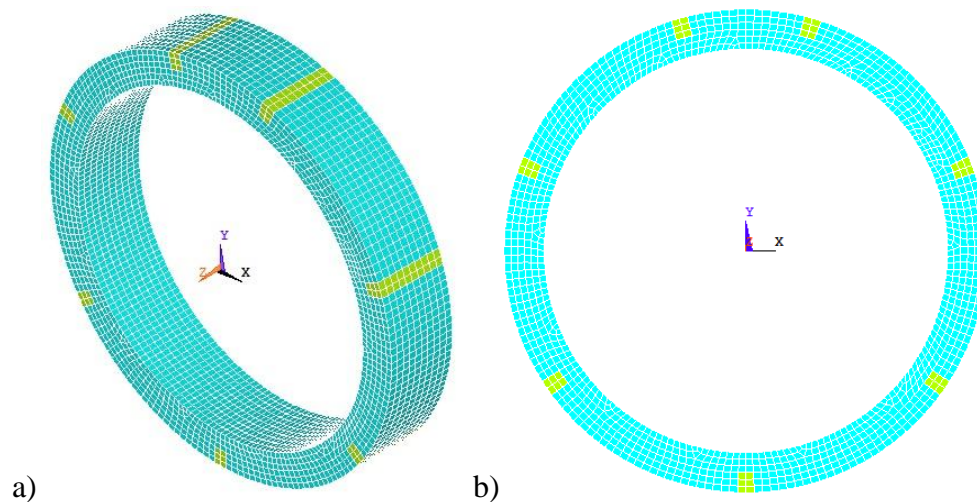


**Fig. 2. 10. Esquema de las cargas aplicadas a los modelos numéricos**

## 2.6 Modelo permitiendo separación y deslizamiento en la interfaz

A partir de este modelo se toma en cuenta la interacción que existe entre ambos revestimientos. Se ha modelado la interfaz entre revestimientos considerando los elementos de contacto (ver sección 2.4).

En este modelo numérico se permite que se presenten tanto separación y deslizamiento en la interfaz entre ambos revestimientos y no existe una restricción en la presencia de este comportamiento.



**Fig. 2. 11. Modelo con contacto perfecto: a) vista isométrica, b) vista frontal**

Para definir el comportamiento de la interfaz entre revestimientos de este modelo se tomaron en cuenta parámetros y factores como lo es la rigidez de contacto. En este caso se utilizó el valor predeterminado de 1.0 ya que se considera que se deforma libremente la interfaz, debido a que la flexión no domina el comportamiento de nuestro anillo porque actúa una carga lateral que impide la deformación del anillo, siendo importante las cargas axiales en la estructura.

Así como la rigidez normal, hay que tomar en cuenta la tolerancia de penetración entre el contacto y las superficies “objetivo”. La tolerancia de penetración que se eligió en este modelo es el valor predeterminado de los elementos de contacto, de 0.1. El factor se utiliza para determinar si la compatibilidad de penetración está satisfecha, debido a que la penetración se encuentra dentro de la tolerancia admisible. Cuando se excede la tolerancia de penetración la solución global se considera que no convergió.

Los elementos de contacto nos permiten ir actualizando la rigidez tangencial y normal en el transcurso de un análisis, ya sea de forma automática o establecida de forma manual. Se hará un análisis donde se incrementará la carga, de tal forma que la rigidez de contacto normal se actualiza en cada iteración en base en la tensión media actual de los elementos subyacentes y la penetración permitida, excepto en la primera iteración.

Cuando se manejan elementos de contacto, en este caso superficie a superficie; los problemas de discontinuidad se manejan por varios métodos. El método que se utilizó para este modelo numérico es el conocido como *método de las penalidades*. El método de penalidades es un algoritmo para la solución de problemas de optimización restringida. Se sustituye un problema de optimización con restricciones por una serie de problemas sin restricciones, cuyas soluciones idealmente convergen a la solución del problema original restringido. Al existir una discontinuidad en la interfaz entre ambos revestimientos, donde el mallado de cada revestimiento no es coincidente, tenemos una restricción; y al usar este algoritmo se descompone el problema en varios eliminando dichas restricciones. Para descomponer en problemas sin restricciones se adiciona un término a la función objetivo, el cual consiste en un parámetro de penalización y una medida de violación de las restricciones. La penalidad es un valor que se añade a la función objetivo con la intención de fragmentar la solución, dicho valor no se conoce pero se sabe que con él se comete una violación a la solución (lo que lo hace aproximado), pero lo que si se conoce es el grado de violación. La medida de violación es distinto de cero cuando se violan las restricciones, y es igual a cero en la región donde las restricciones no se violen.

Ahora, ya se ha hablado que se crearon elementos de contacto para definir la interacción entre revestimientos (ver sección 2.3), hay que definir de qué forma entran en contacto las superficies de ambos revestimientos; es decir, cuando empiecen a interactuar los revestimientos hay que decirle al programa en qué momento entran en contacto los elementos. La detección del contacto se encuentra en los puntos de integración de los elementos de contacto que son internos a la superficie del elemento; hay dos formas de definir cuando entran en contacto los elementos y son: con los puntos de Gauss y en los nodos normales a los elementos de contacto.

Los puntos de Gauss se seleccionan de forma óptima y no necesariamente deben estar equidistantes; en cambio, los nodos de los elementos de contacto son fijos. A pesar de lo anterior y debido a la curvatura que existe por la naturaleza del problema se escogieron los nodos de los elementos de contacto para determinar en qué momento se presenta un contacto.

También hay que elegir un comportamiento para la interacción entre revestimientos, y como se ha mencionado, para este modelo se permite que se presenten tanto deslizamientos



como separaciones en la interfaz; pero al presentarse una separación, en ese momento se pierde toda transferencia de cualquier tipo de esfuerzo. De esta forma se conocerá que tanta influencia tendrá la separación o el deslizamiento en la interacción entre revestimientos y de qué manera se afecta el comportamiento al compararse con el modelo con contacto perfecto.

Otros parámetros importantes que hay que considerar en los elementos de contacto para definir la interacción entre revestimientos son la cohesión y fricción de los elementos. Se permite que los revestimientos actúen de forma libre, es por eso que el valor de la cohesión que se asigna es nulo. En cuanto al coeficiente de fricción, como ya se mencionó en otros apartados, se considera con un valor de 0.6 según los criterios del ACI (2008).

### ***2.7 Modelo que permite únicamente deslizamiento en la interfaz***

El objetivo de este modelo numérico es conocer la influencia del deslizamiento en la interfaz entre ambos revestimientos, restringiendo cualquier separación que se pudiere presentar, de tal forma que los revestimientos se encontrarán en contacto en todo momento.

Como los revestimientos deben permanecer unidos en todo momento; sin presentar ninguna separación; los principales aspectos que se modifican respecto al modelo anterior es el comportamiento de los elementos de contacto, el algoritmo para el contacto y la cohesión.

La fricción que existe en la interacción entre revestimientos toma mucha mayor importancia en la solución del problema. El algoritmo óptimo para un problema de fricción es el *método lagrangiano aumentado*. El método lagrangiano aumentado es un proceso iterativo de series de métodos de penalidades. Las presiones y esfuerzos de fricción se incrementan durante iteraciones de equilibrio para que la penetración final sea menor a la tolerancia. De tal forma, que el método lagrangiano aumentado por lo general conduce a un mejor acondicionamiento y es menos sensible a la magnitud de la rigidez de contacto.

El comportamiento que se maneja en este modelo para los elementos de contacto es que siempre estén unidos. En caso de que los puntos de contacto no se encuentren unidos, estos si en algún momento se puedan unir, se adhieran automáticamente permitiendo únicamente en la solución que se presente el deslizamiento y/o solo contacto.

En cuanto a la cohesión, al estar siempre unidos los revestimientos, se considerará un valor pequeño o mínimo de  $0.5 \text{ kg/cm}^2$ .

### **2.8 Modelo permitiendo una cierta cantidad de separación y deslizamiento**

En este modelo se pretende combinar los comportamientos de los modelos donde sólo se permite deslizamiento y donde los revestimientos se pueden comportar libremente sin ninguna restricción. Para ello, el modelo dejar de ser un problema de “*contacto simple*” y convertirse en uno de “*desprendimiento*”. Se establece un límite de la resistencia al esfuerzo de tensión, teniendo así una resistencia a la tensión finita. Mientras no se rebasa el límite de resistencia a la tensión, los revestimientos se encontrarán en contacto y regirá un comportamiento tipo Coulomb donde existirá una transferencia de esfuerzos de cortante y se tomarán en cuenta parámetros como la fricción y cohesión. Si se rebasa el límite de resistencia al esfuerzo de tensión se pierde toda transferencia de esfuerzos de cualquier tipo y los revestimientos trabajarán de forma diferente.

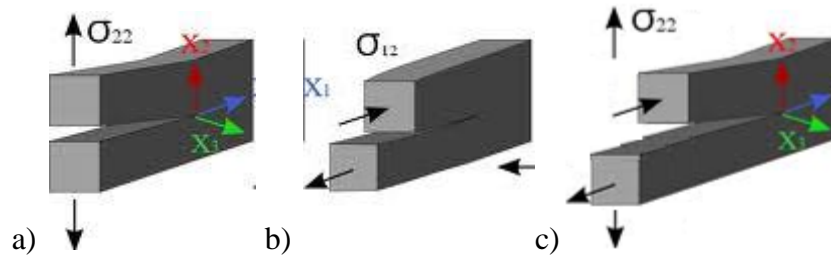
La forma en que se modelará el comportamiento cambia un poco respecto a los modelos anteriores ya que no sólo hay que modificar el comportamiento de los elementos de contacto sino también el del material utilizado en los revestimientos. La razón por la cual hay que modificar el material utilizado es que el programa comercial ANSYS (2006) solo permite 3 condiciones de contacto simple de los elementos de contacto (ver sección 2.3).

Para lograr que el modelo se comporte con estas características hay que simular el fenómeno de la delaminación para que se presenten separaciones en la interacción entre ambos revestimientos. Entonces, en el comportamiento de los elementos de contacto se definió un comportamiento de *contacto permanente*; y se asoció un material de *zonas cohesivas* para los elementos de contacto.

Existen tres formas que el programa comercial ANSYS (2006) nos permite modelar la separación de los elementos por efecto de la delaminación los cuales son:

1. Desprendimiento por separación normal al plano de falla
2. Desprendimiento por separación tangencial al plano de falla
3. Desprendimiento mixto por separación normal y tangencial

En la figura 2.12, se muestra esquemáticamente la forma de desprendimiento entre superficies.



**Fig. 2. 12. Modos típicos de separación entre superficies: a) Modo I o separación normal al plano de falla; b) Modo II o separación tangencial al plano de falla; c) Modo III o separación mixta**

El material se define en términos de esfuerzos de contacto (normales y tangenciales) y de distancias de separación de contacto (abertura normal y deslizamiento tangencial). Es posible modelar los materiales de las zonas cohesivas con una ley constitutiva bilineal para representar la separación entre las superficies. Un comportamiento bilineal se caracteriza por tener una zona elástica, como lo hemos considerado en este trabajo; y una zona de ablandamiento. Las superficies de contacto contarán con una rigidez de contacto y unos límites de separación. Al presentarse la separación entre las superficies que se encuentran en contacto y rebasarse dichos límites, la interacción entre las superficies estará gobernada por la formulación general de los elementos de contacto, tanto para la dirección normal como para la tangencial. En la dirección normal regirá la carga axial que actuará en el contacto entre ambos revestimientos y la fricción entre estos afectará el comportamiento tangencial de cada punto que define la interfaz. En la tabla 2.3 se muestran los valores que definen la zona cohesiva que se utilizará en este modelo.

**Tabla 2. 3. Propiedades mecánicas del material de zona cohesiva**

Propiedad	Magnitud	Unidad
Módulo de elasticidad	261,916	Kg/cm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.2	
Esfuerzo de tensión de separación	0.1	Kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo de cortante de separación	0.5	Kg/cm <sup>2</sup>
Abertura normal	0.25	mm
Deslizamiento	2.5	mm
Cohesión	0.1	Kg/cm <sup>2</sup>
Coefficiente de fricción	0.6	

Finalmente en la tabla 2.4 se muestra una tabla resumen de las principales consideraciones de los parámetros y algoritmos que se utilizaron para desarrollar los diferentes modelos numéricos.

Parámetro o algoritmo	M. permitiendo separación y deslizamiento	M. permitiendo únicamente deslizamiento	M. con zonas cohesivas	Unidad
Algoritmo de contacto	Método de las penalidades	Método Aumentado de Lagrange	Método de las penalidades	
Comportamiento superficie de contacto	Estándar	Sin separación (en todo momento)	En contacto inicialmente	
Coefficiente de fricción	0.6	0.6	0.6	Kg/cm <sup>2</sup>
Cohesión inicial*	0.1	0.5	0.1	Kg/cm <sup>2</sup>
Rigidez de contacto	1.0	1.0	1.0	
Rigidez normal	0.1	0.1	0.1	

\* Se hace referencia de una cohesión inicial que tiene un valor nulo o mínimo, debido a que en un principio se toma el caso en que este parámetro no tendrá mucha influencia en los análisis. Este valor se aumentará para conocer la influencia en el comportamiento de los modelos numéricos (ver capítulos 4 y 5).

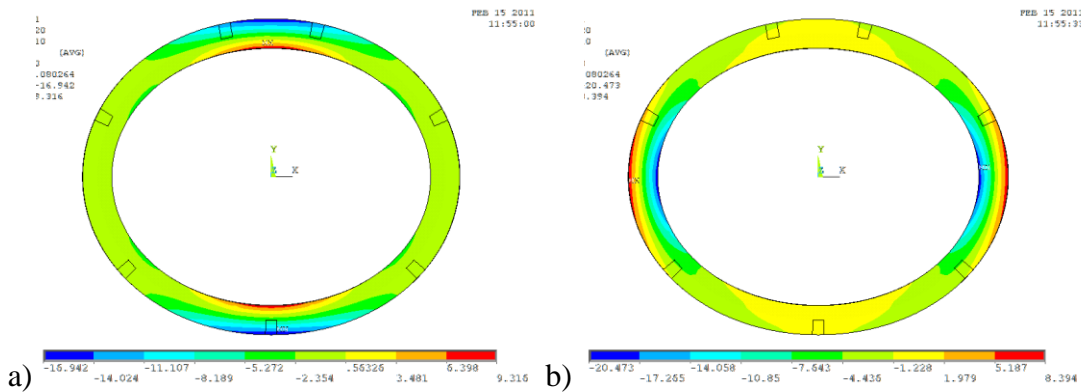
# CAPÍTULO 3

## MODELO CONSIDERANDO CONTACTO PERFECTO

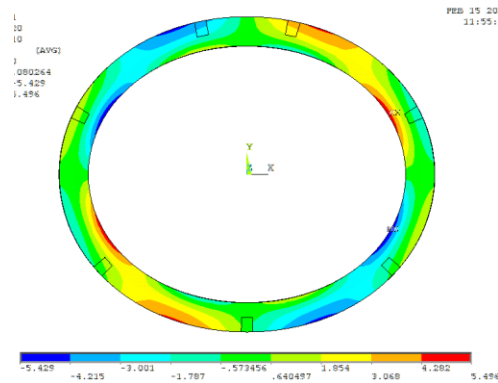
El primer modelo analizado es aquel en donde no se modelaron los elementos de contacto y se consideró un elemento continuo. La finalidad de este modelo es para que sirva como punto de comparación con los modelos donde si se consideraron los elementos de contacto como son: el modelo permitiendo separación y deslizamiento, el modelo donde se permite únicamente el deslizamiento y el modelo donde se permite una cierta cantidad de separación y deslizamiento. Por ser un modelo continuo, se tiene una compatibilidad de esfuerzos y deformaciones.

### 3.1 Mapas de esfuerzos axiales y de cortante en el anillo

En las figuras 3.1 y 3.2 se muestran los mapas de esfuerzos axiales y esfuerzos cortantes, respectivamente, para una relación de carga de  $K_0 = 0.6$  debido a que a partir de esta relación el comportamiento del anillo empieza a mostrar un comportamiento diferente en comparación a relaciones de carga mayores de los modelos considerando interfaz entre revestimientos (ver capítulos 4, 5 y 6). Cabe mencionar que se refiere a esfuerzos axiales a aquellos que se encuentran respecto a la sección transversal del túnel, y no son los esfuerzos en el sentido del eje del túnel.



**Fig. 3. 1. Mapas de esfuerzos axiales ( $\text{kg/cm}^2$ ) y deformadas del anillo con contacto perfecto para un  $K_0$  de 0.6: a) horizontal; b) vertical**

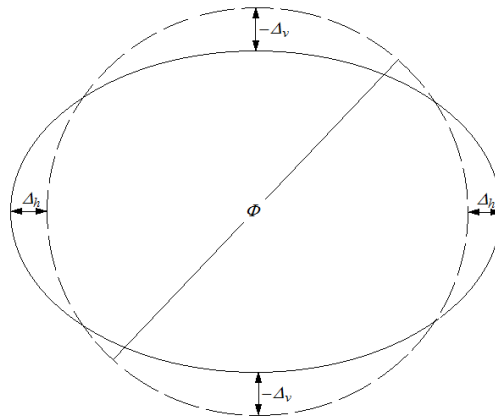


**Fig. 3. 2. Mapa de esfuerzos cortantes ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) y deformada del anillo con contacto perfecto**

Como el diámetro vertical disminuye y el diámetro horizontal aumenta debido a que la carga vertical es mayor a la carga horizontal para cualquier relación de carga, los esfuerzos máximos de compresión se presentan en el extradós de la clave y cubeta, y en el intradós de los hastiales. Los máximos esfuerzos de tensión se encuentran en el intradós de la clave y cubeta y en el extradós de los hastiales (figura 3.1, a y b). En cuanto a los esfuerzos de corte, los máximos se concentran en los riñones del anillo (figura 3.2). Se observa que existe una compatibilidad de esfuerzos y una simetría en los esfuerzos, tanto axiales como de corte.

### ***3.2 Cambio de diámetro y ovalamiento del anillo***

Para medir el comportamiento global del anillo, un parámetro importante son los desplazamientos. En este caso y debido a las cargas aplicadas las cuales son constantes e iguales para cada eje, vertical y horizontal, los máximos desplazamientos se presentan en estos ejes como se aprecia en las figura 3.1 y 3.2. De tal forma, que para tomar en cuenta los desplazamientos se calculan las diferencias de diámetros, tanto vertical como horizontal, para relacionarlos. La figura 3.3 muestra esquemáticamente el cambio de diámetro tanto vertical como horizontal del anillo.

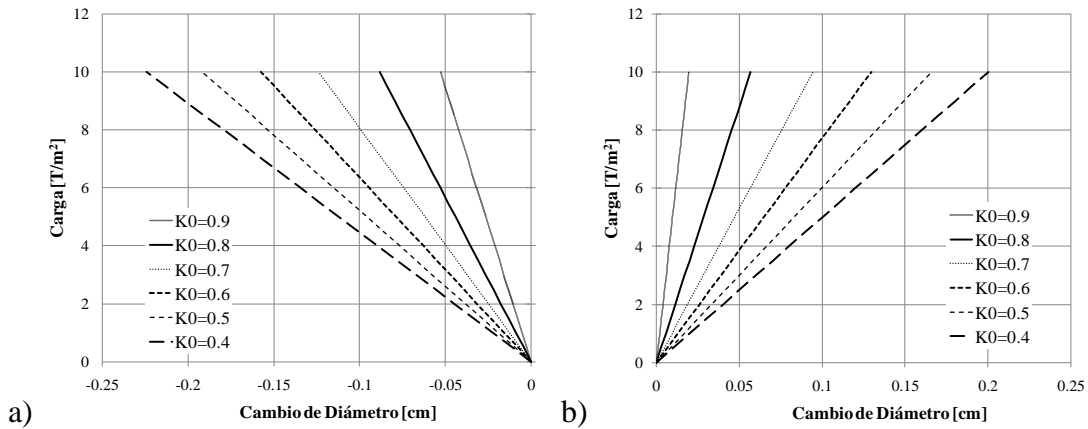


**Fig. 3. 3. Esquema del cambio de diámetro**

Se puede relacionar el cambio de diámetro vertical con el cambio de diámetro horizontal para obtener un parámetro de comportamiento global del anillo, y a este factor se le llamará *ovalamiento* ( $\vartheta$ ). Este factor que se le nombró ovalamiento, nos indica que tanto cambia el diámetro vertical con respecto al horizontal (ecuación 3.1). Por convención de signos, se considerará el cambio de diámetro positivo cuando exista alargamiento, y en caso contrario, negativo cuando el diámetro se contraiga. Si se considera que en el anillo existirá un diámetro que se expande y el diámetro en la otra dirección de contrae se le agrega un signo negativo a la ecuación 3.1 para que el ovalamiento sea siempre positivo. Si se llegase a presentar el caso que el ovalamiento sea negativo, lo que estaría pasando es que en ambas direcciones los diámetros se están alargando o contrayendo al mismo tiempo.

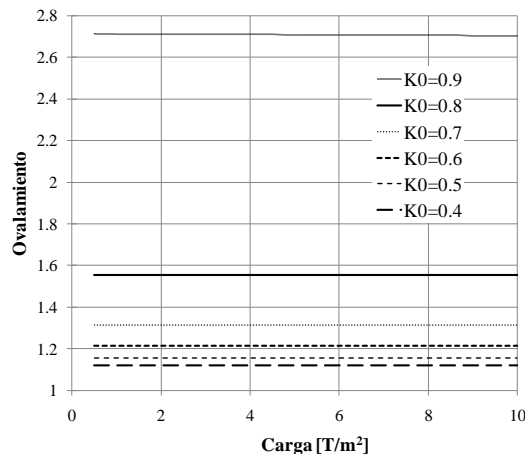
$$\vartheta = - \frac{\Delta D_v}{\Delta D_h} \quad (3.1)$$

Como la carga vertical es mayor que la carga horizontal para cualquier relación de carga, el diámetro vertical del anillo tiende a disminuir y el diámetro horizontal aumenta. Conforme la relación de carga sea menor la deformación que sufrirá el anillo será mayor y el cambio de diámetro, tanto vertical como horizontal, aumenta (figura 3.4). El cambio de diámetro vertical será mayor que el cambio de diámetro horizontal para relaciones de carga cercanas a la unidad, pero conforme disminuya la relación de carga los cambios de diámetro, horizontal y vertical, tenderán a ser iguales.



**Fig. 3. 4. Curvas carga – cambio de diámetro; a) diámetro vertical; b) diámetro horizontal, modelo con contacto perfecto**

En cuanto al ovalamiento, entre más grande sea la relación de carga el ovalamiento también será mayor; indicando que la carga horizontal evita desplazamientos grandes del diámetro en esa dirección. Si la relación de carga es pequeña el cambio de diámetro horizontal será similar al vertical haciendo que el ovalamiento tienda a la unidad. El ovalamiento se mantiene constante para cualquier incremento de carga, para cada relación de carga. La figura 3.5 muestra las curvas de ovalamiento – carga para cada relación de carga.



**Fig. 3. 5. Curvas ovalamiento – carga, modelo con contacto perfecto**

### 3.3 Elementos mecánicos en las zonas donde el esfuerzo axial es máximo

Para el cálculo de los elementos mecánicos se utilizaron las distribuciones de esfuerzo en cada zona donde se presenten los máximos esfuerzos axiales (clave, cubeta y hastiales). Al tratarse en este trabajo de materiales con comportamiento elástico; se conoce de la teoría

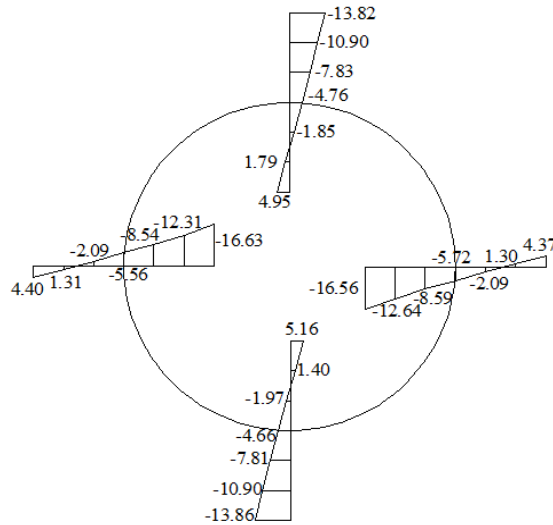


que las distribuciones de esfuerzo axial de una sección transversal de una viga recta, son lineales. En el caso de que la viga tenga un radio de curvatura finito, la distribución de esfuerzos deja de ser lineal. Los elementos curvos siguen la misma hipótesis que los elementos rectos donde: las secciones perpendiculares al eje de la viga permanecen planas después de que se aplica un momento flexionante. Pero la longitud inicial de una fibra de la viga depende de la curvatura de la misma. Entonces, aunque las deformaciones totales de las fibras de la viga obedecen una ley lineal, las deformaciones unitarias no lo hacen (Popov, 1983). La distribución de esfuerzo de una viga curva es hiperbólica. En este trabajo, al estudiar un elemento con curvatura, puede complicarse el cálculo de los elementos mecánicos. Sin embargo, Popov (1983) menciona que la fórmula usual de la flexión es razonablemente buena para vigas de gran radio. Entonces el radio de curvatura del elemento y su peralte juegan un papel importante en la distribución de esfuerzos axiales. Se ha visto que para relaciones peralte-radio de curvatura (ecuación 3.2) de 5; el error en el esfuerzo axial, considerando la viga como recta, es del 7% disminuyendo conforme la relación aumente.

$$\zeta = \frac{r}{h} \quad (3.2)$$

Para este modelo donde se tiene que el peralte del anillo es de 70 [cm] y el radio de curvatura es de 402.5 [cm]; por tanto, la relación  $r/h$  es igual a 5.75 y es posible considerar una distribución lineal de esfuerzos con errores pequeños en los resultados.

Ahora, al obtener la distribución de esfuerzos directamente del modelo numérico se comprueba lo anterior donde se tienen una distribución de esfuerzos prácticamente lineal. La figura 3.6 muestra la distribución de esfuerzos axiales en las zonas en estudio para una relación de carga de 0.7 debido a que para relaciones de carga menores no existe convergencia en el análisis en los modelos donde se consideran los elementos de contacto; donde la circunferencia que se muestra indica el centroide geométrico de la sección transversal y las distribuciones de esfuerzo están a escala.

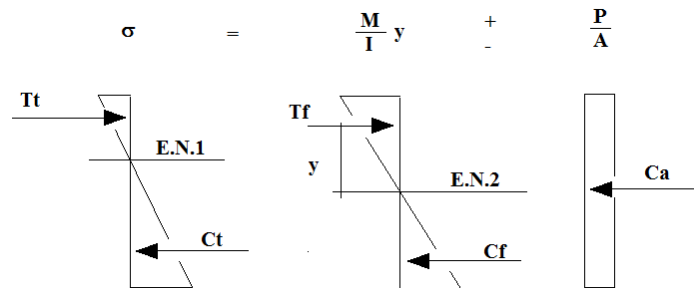


**Fig. 3. 6. Esquema de la distribución de esfuerzos axiales en la cubeta, clave y hastiales en  $kg/cm^2$ , caso  $K_0 = 0.7$ ; modelo con contacto perfecto**

Al tratarse de materiales que siguen un comportamiento elástico, se utiliza la *fórmula de la escuadría* para el cálculo de los elementos mecánicos. En la ecuación 3.3 se tiene la fórmula de la escuadría, donde se relacionan los esfuerzos a flexión y los esfuerzos por fuerza axial.

$$\sigma = \frac{M}{I} y \pm \frac{P}{A} \tag{3.3}$$

Para el cálculo del momento flexionante se ocupó un equilibrio de fuerzas, para poder obtener la compresión debido a la fuerza axial y con ella obtener la compresión y tensión por flexión pura (figura 3.7).



**Fig. 3. 7. Equilibrio de fuerzas**

Las ecuaciones 3.4 y 3.5 muestran el equilibrio algebraico de las tensiones y compresiones en la sección transversal de nuestro elemento:

$$T_t = T_f - C_a \quad (3.4)$$

$$C_t = C_f + C_a \quad (3.5)$$

Donde

$T_t$ ; Tensión total

$C_t$ ; Compresión total

$T_f$ ; Tensión debida a la flexión

$C_f$ ; Compresión debida a la flexión

$C_a$ ; Compresión debida a la fuerza axial

Se despeja la tensión y compresión por flexión (ecuaciones 3.6 y 3.7).

$$T_f = T_t + C_a \quad (3.6)$$

$$C_f = C_t - C_a \quad (4.7)$$

A flexión pura los esfuerzos de tensión y de compresión son iguales, de tal manera que las fuerzas también lo serán, las ecuaciones 3.6 y 3.7 se igualan (ecuación 3.8):

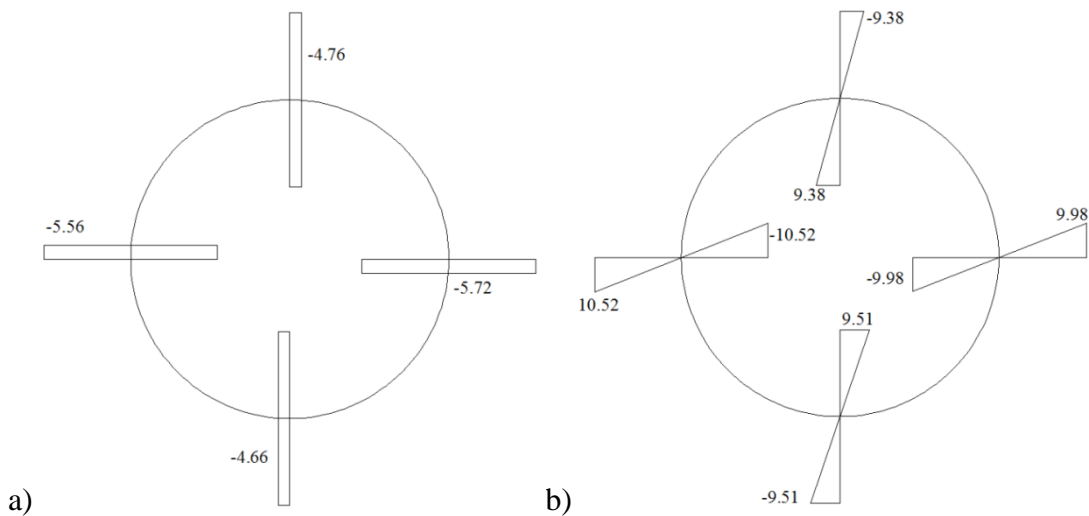
$$T_t + C_a = C_t - C_a \quad (3.8)$$

Como el esfuerzo debido a la carga axial es constante en todo el peralte de la sección transversal, la compresión debido a la carga axial se despeja (ecuación 3.9)

$$C_a = \frac{C_t - T_t}{2} \quad (3.9)$$

Al observar la ecuación 3.9, se obtiene un promedio de los esfuerzos de compresión y tensión para calcular la compresión debido a la fuerza axial. Una vez que se obtiene la compresión por fuerza axial, se sustituye en las ecuaciones 3.6 y 3.7 para obtener la tensión y compresión por flexión, las cuales se utilizan para obtener el esfuerzo por flexión. Con el esfuerzo por flexión es posible calcular el momento flexionante con la ecuación 3.3.

La figura 3.8 muestra los esfuerzos calculados por flexión y por fuerza axial en las zonas en estudio para una relación de carga de 0.7.



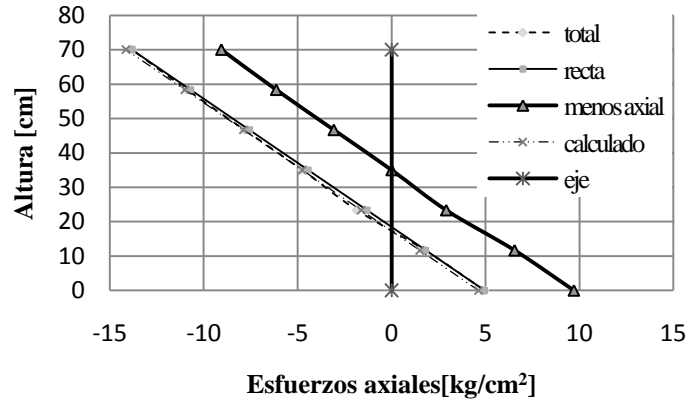
**Fig. 3. 8. Esquema de la distribución de esfuerzos en  $kg/cm^2$  caso  $K_0 = 0. 7$ : a) por carga axial, b) por flexión; modelo con contacto perfecto**

Siendo la carga vertical mayor que la horizontal, la transmisión de los efectos de compresión por fuerza axial a la zona de los hastiales son mayores que en el caso de la clave y cubeta como se observa en la figura 3.8; por consecuencia los esfuerzos por flexión serán mayores también en los hastiales. Los esfuerzos, tanto por flexión como por fuerza axial, de la figura anterior son prácticamente simétricos, con ligeras diferencias probablemente debidos a errores numéricos durante el proceso de análisis.

Para comprobar que los esfuerzos obtenidos dan buenos resultados se hace un cálculo de la distribución de esfuerzos axiales y se compara con los resultados obtenidos del ANSYS. En la figura 3.9 se han representado la distribución de esfuerzo total del análisis (total), una línea recta considerando los máximos en compresión y tensión del análisis del ANSYS (recta) para comprobar que la distribución de esfuerzos axiales del análisis sean prácticamente lineales, una distribución donde se resta el esfuerzo axial teniendo un esfuerzo nulo a mitad de peralte que viene siendo la distribución de esfuerzo debido a la flexión (menos axial) y una distribución calculada en base al momento calculado (calculado).

De la figura 3.9 se puede apreciar que la distribución de esfuerzos axiales del análisis (total) es prácticamente lineal al compararse con una recta que va de los esfuerzos máximos a tensión y compresión (recta). Se concluye también que al hacer el esfuerzo igual a 0 a una distancia igual a la mitad del peralte del revestimiento los esfuerzos máximos a tensión y compresión son prácticamente iguales y que se consideran como los esfuerzos por flexión (menos axial). Por último, una vez calculado el momento a flexión se calcula el esfuerzo total (calculado) a diferentes alturas del peralte del anillo y obtener una distribución que se

compara con la obtenida del análisis y se observa que son similares por lo que se concluye que nuestros cálculos y consideraciones son adecuados.



**Fig. 3. 9. Distribución de esfuerzos axiales en  $kg/cm^2$  en la clave;  $K_0 = 0.7$ ; modelo con contacto perfecto**

Se siguió el mismo procedimiento para la cubeta y hastiales, obteniendo sus momentos flexionantes. Entre menor carga lateral en el anillo existirá una mayor tendencia a la deformación y mayor será su momento flexionante. En la tabla 3.1 se muestran los momentos flexionantes para diferentes relaciones de carga y en diferentes zonas del anillo (donde se presentan los esfuerzos axiales máximos). Existe una simetría de los momentos flexionantes entre hastiales, y entre la cubeta y clave; siendo máximos en los hastiales, para cualquier relación de carga.

Así mismo, en la tabla 3.2 se muestran las cargas axiales de las secciones transversales del anillo, en las zonas donde los esfuerzos axiales son máximos. En este caso, las cargas axiales en la sección transversal del anillo son de compresión, por la forma en cómo se aplicaron las presiones en el mismo. Se observa en esta tabla que en los hastiales es donde se presentan las mayores cargas axiales en la sección transversal, respecto a la clave y a la cubeta. Esto es debido a que la presión vertical aplicada en el anillo, es mayor a la presión horizontal. Al disminuir la carga lateral en el anillo, la carga axial, principalmente en la cubeta y en la clave, disminuyen. En los hastiales también se presentan cargas axiales menores al disminuir la carga lateral, pero su cambio es menor que en la clave y cubeta. Por último, existe una simetría en las cargas de compresión entre la clave y cubeta y entre los hastiales; con variaciones relativamente pequeñas. Probablemente debido a errores numéricos, donde se podría refinar más el mallado del anillo para que los resultados sean prácticamente iguales.

**Tabla 3. 1. Momentos flexionantes para diferentes relaciones de carga y diferentes ángulos, en  $t - m$**

Zona	$K_0 = 0.9$	$K_0 = 0.8$	$K_0 = 0.7$	$K_0 = 0.6$	$K_0 = 0.5$	$K_0 = 0.4$
Clave	3.44	7.76	11.49	14.71	18.40	21.83
Hastial izq.	-4.37	-8.33	-12.88	-16.82	-20.88	-24.78
Cubeta	3.49	7.64	11.65	14.92	18.66	22.16
Hastial der.	-4.45	-8.39	-12.23	-17.31	-21.46	-25.44

NOTA: Los momentos se consideran positivos en sentido anti horario

**Tabla 3. 2. Cargas axiales en la sección transversal del anillo, en toneladas**

Zona	$K_0=0.9$	$K_0=0.8$	$K_0=0.7$	$K_0=0.6$	$K_0=0.5$	$K_0=0.4$
Clave	58.25	53.98	49.94	46.14	42.31	38.92
Hastial izq.	61.14	59.68	58.37	57.19	56.06	55.25
Cubeta	58.01	53.36	48.96	44.83	40.66	36.97
Hastial der.	61.73	60.81	60.03	59.38	58.77	58.47

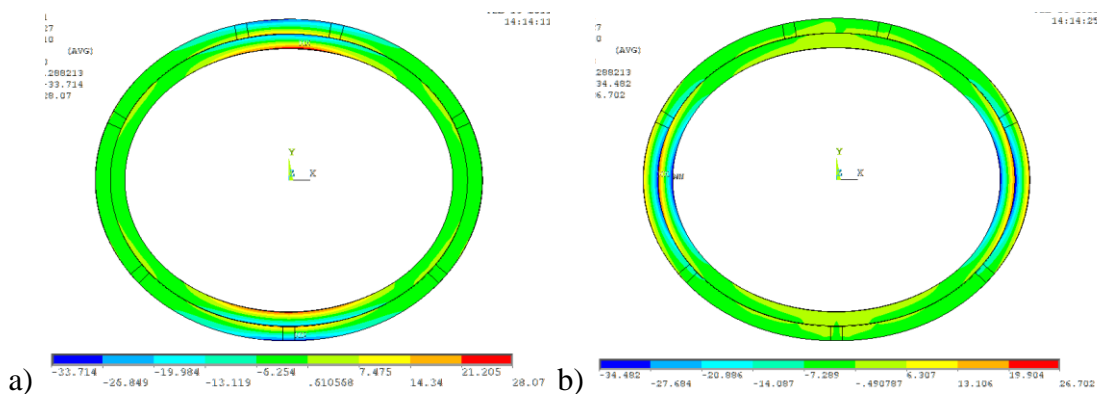
# CAPÍTULO 4

## MODELO PERMITIENDO SEPARACIÓN Y DESLIZAMIENTO

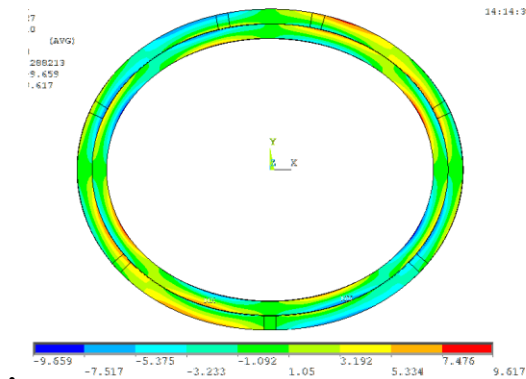
A partir de este modelo se empieza a tomar en cuenta la interfaz entre revestimientos, donde se definen elementos de contacto con parámetros como la cohesión, el coeficiente de fricción igual de 0.6, y una resistencia al esfuerzo a tensión igual a cero. No hay ninguna ligazón entre revestimientos que los mantenga unidos; se considera que se coloca uno sobre el otro de forma libre. Este comportamiento tiene una ley constitutiva tipo Coulomb, elástica a compresión y nula a tensión; es decir, que al presentarse una separación en la interfaz se pierde toda transferencia de cualquier tipo esfuerzo.

### 4.1 Mapas de esfuerzo axial y de cortante en el anillo

En los mapas de esfuerzo, tanto axiales como de cortante, se observa que no existe una compatibilidad de esfuerzos de ningún tipo, así como tampoco de deformaciones en el anillo. Debido a la presencia de separaciones y deslizamientos en la interfaz, los revestimientos trabajan de forma independiente (figuras 4.1 y 4.2, para un  $K_0$  de 0.6).



**Fig. 4. 1. Mapas de esfuerzos axiales ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) y deformadas del anillo permitiendo separación y deslizamiento en la interfaz (cohesión nula), para un  $K_0$  de 0.6: a) horizontal; b) vertical**



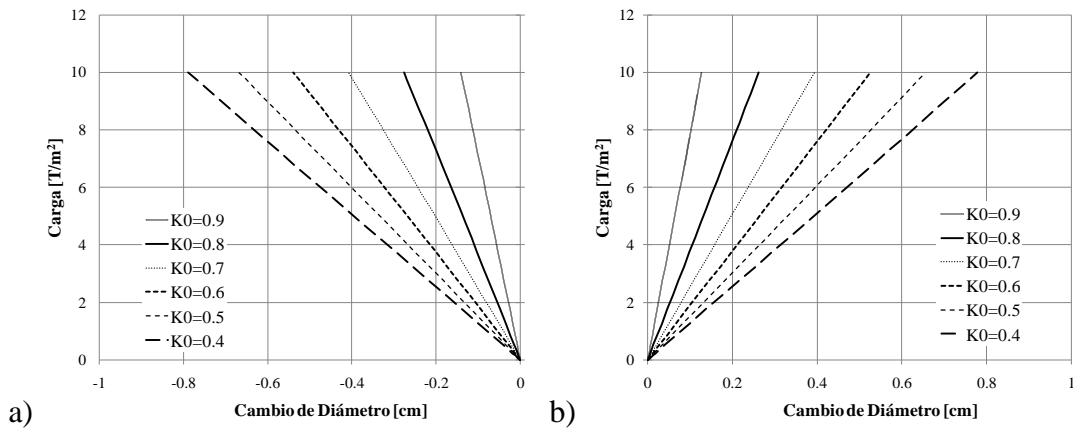
**Fig. 4. 2. Mapa de esfuerzos cortantes ( $\text{kg/cm}^2$ ) y deformada del anillo permitiendo separación y deslizamiento en la interfaz (cohesión nula), para un  $K_0$  de 0.6**

#### ***4.2 Cambios de diámetro y ovalamiento del anillo***

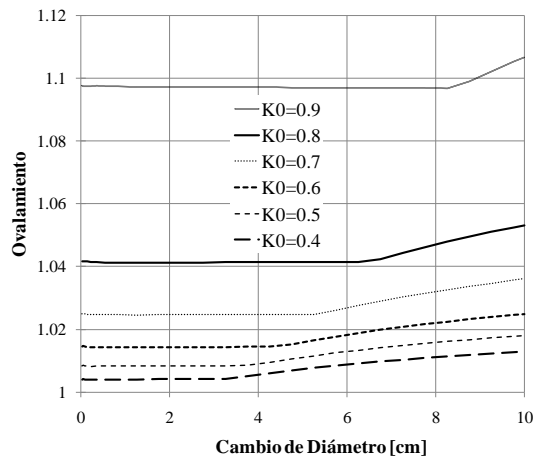
Si se relaciona la carga aplicada al anillo con el cambio de diámetro tanto vertical como horizontal se observa que entre más pequeña sea la relación  $K_0$ , mayor será la diferencia de diámetro ya sea para el eje vertical como para el horizontal; presentándose una mayor deformación del anillo (figura 4.3). Como no hay una compatibilidad de esfuerzos, los revestimientos trabajan de forma individual y existe una rigidez global menor que si trabajara como un anillo único, debido a que el momento de inercia es la mitad de la que se tiene con un contacto perfecto. De tal forma, el cambio de diámetro para este modelo es mayor que para el modelo anterior, para todos los análisis paramétricos.

En el caso del ovalamiento se tienen valores cercanos a la unidad para cualquier relación de carga, lo que nos estaría indicando que a pesar de que existe una carga lateral que impide la deformación en ese sentido del anillo, prácticamente lo que se contraiga el diámetro vertical se alarga el horizontal (figura 4.4) por las separaciones y deslizamientos en la interfaz. En la figura 4.4 las curvas muestran un aumento del ovalamiento para un determinado incremento de carga según un cierto valor de  $K_0$ . Lo anterior se podría expresar que los revestimientos se mantienen unidos hasta que se presenten separaciones y deslizamientos en la interfaz entre revestimientos haciendo que los revestimientos trabajen de forma individual. Y es en las relaciones de carga menores donde los revestimientos trabajan de forma independiente para incrementos pequeños de carga.





**Fig. 4.3. Curvas carga – cambio de diámetro del modelo permitiendo separación y deslizamiento en la interfaz (cohesión nula): a) diámetro vertical; b) diámetro horizontal**

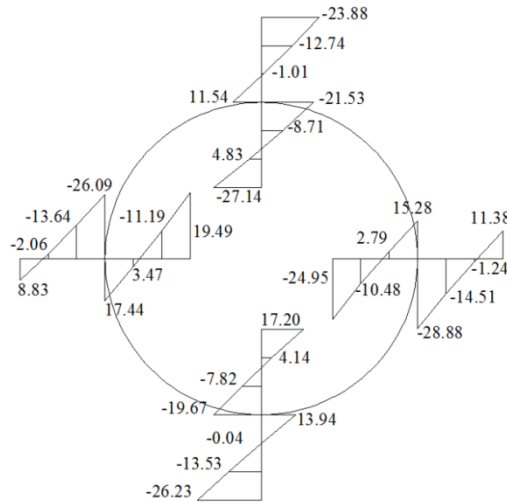


**Fig. 4.4. Curvas ovalamiento – carga del modelo permitiendo separación y deslizamiento en la interfaz (cohesión nula)**

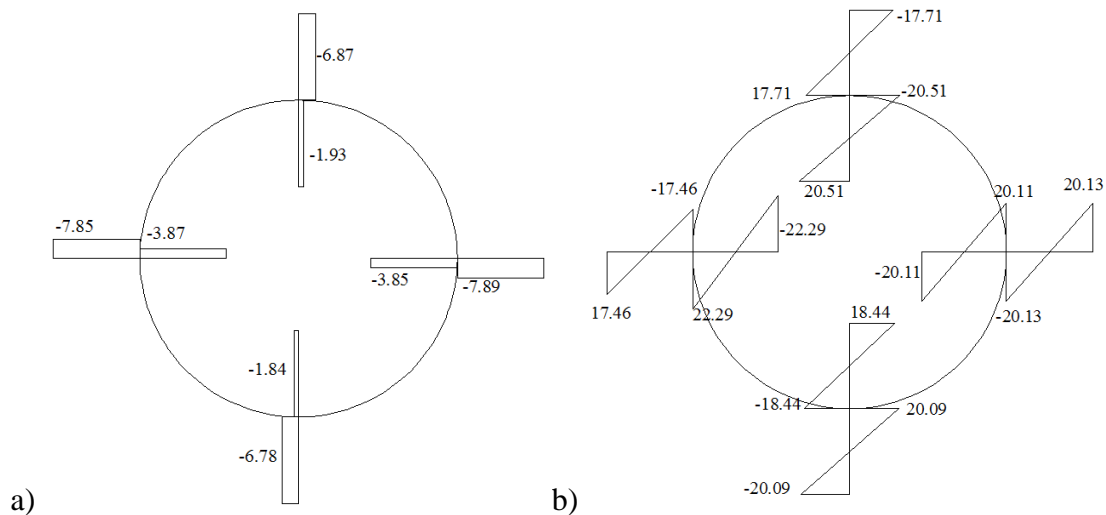
### 4.3 Elementos mecánicos en las zonas donde el esfuerzo axial es máximo

Se tiene una distribución de esfuerzos axiales prácticamente lineal, como se muestra en la figura 4.5. Las figuras 4.5 y 4.6 muestran cómo los revestimientos trabajan totalmente de forma independiente. La distribución de esfuerzo no es lineal en toda la sección del anillo, existiendo un cambio de signo de los esfuerzos axiales en la interfaz entre revestimientos. El revestimiento primario tiene un mayor esfuerzo por fuerza axial debido a que este revestimiento es el primero en recibir las presiones que después se transmiten al revestimiento secundario existiendo pérdidas cuando se presentan las separaciones y deslizamientos (figura 4.6a). Los máximos esfuerzos por fuerza axial se presentan en los

hastiales debido a que la presión vertical es mayor que la horizontal. A flexión se tienen prácticamente los mismos esfuerzos en ambos revestimientos mostrando que trabajan de forma independiente (figura 4.4b), flexionándose de la misma forma. No se tiene una distribución lineal en toda la sección transversal del anillo, presentándose un cambio de signo en la interfaz entre revestimientos. Y son mayores que en el modelo con contacto perfecto, ya que tienen una mayor tendencia a la deformación.



**Fig. 4. 5. Esquema de la distribución de esfuerzos axiales en la cubeta, clave y hastiales en  $kg/cm^2$ , caso  $K_0 = 0.7$ ; modelo permitiendo separación y deslizamiento en la interfaz (cohesión nula)**



**Fig. 4. 6. Esquemas de la distribución de esfuerzos en  $kg/cm^2$  caso  $K_0 = 0.7$ : a) por carga axial, b) flexión; modelo permitiendo separación y deslizamiento en la interfaz (cohesión nula)**

Los momentos calculados se muestran en la tabla 4.1, los cuales van aumentando conforme la relación de carga disminuye debido a que el anillo tiene una menor carga lateral y es posible un mayor desplazamiento horizontal de la zona de los hastiales. Los momentos son menores en magnitud que en el modelo sin interfaz principalmente porque se manejan dos elementos ya que trabajan de forma independiente. Al trabajar de forma independiente los revestimientos, se diferencian los momentos en el revestimiento primario y en el revestimiento secundario. Cabe hacer notar que la suma de los momentos en cada zona entre el revestimiento primario y el secundario, se tienen prácticamente los momentos obtenidos en la tabla 3.1. Lo anterior se debe probablemente de que el cálculo de los momentos se relaciona con el momento de inercia, que en este modelo es la mitad del modelo con contacto perfecto.

**Tabla 4. 1. Momentos flexionantes para diferentes relaciones de carga, en  $t - m$**

Zona	$K_0 = 0.9$		$K_0 = 0.8$		$K_0 = 0.7$	
	Primario	Secundario	Primario	Secundario	Primario	Secundario
Clave	1.89	1.97	3.81	4.18	5.42	6.28
Hastial izq.	-1.53	-2.40	-3.34	-4.70	-5.34	-6.82
Cubeta	2.57	1.35	4.52	3.44	6.15	5.64
Hastial der.	-2.48	-1.54	-4.22	-3.93	-6.17	-6.16

Zona	$K_0 = 0.6$		$K_0 = 0.5$		$K_0 = 0.4$	
	Primario	Secundario	Primario	Secundario	Primario	Secundario
Clave	7.07	8.28	8.74	10.30	10.28	12.17
Hastial izq.	-7.15	-8.86	-8.98	-10.94	-10.28	-12.92
Cubeta	7.79	7.66	9.43	9.70	10.94	11.62
Hastial der.	-7.86	-8.31	-9.58	-10.50	-11.25	-12.60

NOTA: Los momentos se consideran positivos en sentido anti horario

En la tabla 4.2 y 4.3 se muestran los valores de las cargas axiales que actúan en la sección transversal del anillo. Estas cargas axiales son de compresión, debido a que las presiones en la circunferencia de del anillo son de compresión. Como los revestimientos trabajan de forma individual, se tienen los valores de las cargas de compresión tanto para el revestimiento primario (tabla 4.2) como del revestimiento secundario (tabla 4.3). Las máximas cargas de compresión se presentan en el revestimiento primario, que es el revestimiento que primero recibe las presiones y las transmite al secundario. Y conforme la carga lateral sea menor, las cargas de compresión serán menores en el revestimiento primario. En los hastiales la carga de compresión es mayor que en la clave y cubeta, tanto para el revestimiento primario como el secundario; debido a que la presión vertical siempre

será mayor a la presión horizontal en este trabajo. Y también debido a lo anterior, y a que el revestimiento secundario va a tomar mayor participación en el comportamiento global del anillo con factores de  $K_0$  más pequeños; la carga de compresión en los hastiales de este revestimiento aumentará, como se observa en la tabla 4.3.

**Tabla 4. 2. Cargas axiales en la sección transversal del revestimiento primario, en toneladas**

Zona	$K_0 = 0.9$	$K_0 = 0.8$	$K_0 = 0.7$	$K_0 = 0.6$	$K_0 = 0.5$	$K_0 = 0.4$
Clave	44.80	40.04	36.06	32.69	29.62	27.13
Hastial izq.	46.54	43.60	41.24	39.28	37.50	36.07
Cubeta	44.55	39.66	35.57	32.10	28.94	26.37
Hastial der.	46.74	43.78	41.40	39.42	37.61	36.16

**Tabla 4. 3. Cargas axiales en la sección transversal del revestimiento secundario, en toneladas**

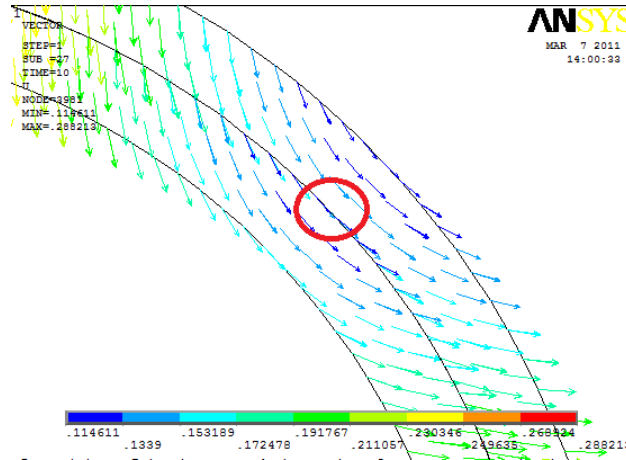
Zona	$K_0 = 0.9$	$K_0 = 0.8$	$K_0 = 0.7$	$K_0 = 0.6$	$K_0 = 0.5$	$K_0 = 0.4$
Clave	12.41	11.52	10.15	8.48	6.46	4.40
Hastial izq.	15.80	18.30	20.31	22.01	23.58	25.05
Cubeta	12.04	11.07	9.64	7.92	5.86	3.76
Hastial der.	15.64	18.17	20.22	21.94	23.55	25.05

#### **4.4 Fricción y deslizamiento en los riñones del anillo**

En los riñones del anillo es donde se presentan desplazamientos tangenciales de los revestimientos a la superficie de interacción, lo que nos hace suponer que se presentan deslizamientos entre ellos en estas zonas. En la figura 4.7 se muestra un mapa de vectores de desplazamientos en el anillo, en donde se observa que es en los riñones donde se presentan los desplazamientos tangenciales y que existe una diferencia en cada revestimiento. El círculo en color rojo nos muestra la zona en donde los componentes de desplazamiento son tangenciales a la superficie de los revestimientos, zona que coincide con un eje a  $45^\circ$  respecto a los ejes globales.

El comportamiento en la interfaz entre ambos revestimientos se muestra la siguiente figura (fig. 4.8a) en la cual se aprecia en color rojo las zonas donde los revestimientos están en contacto y en color amarillo las zonas donde los revestimientos se separan, y en color naranja las zonas donde se deslizan entre sí los revestimientos. Las zonas que se encuentran en contacto son principalmente en la cubeta y clave, y en los hastiales; y cerca de estos

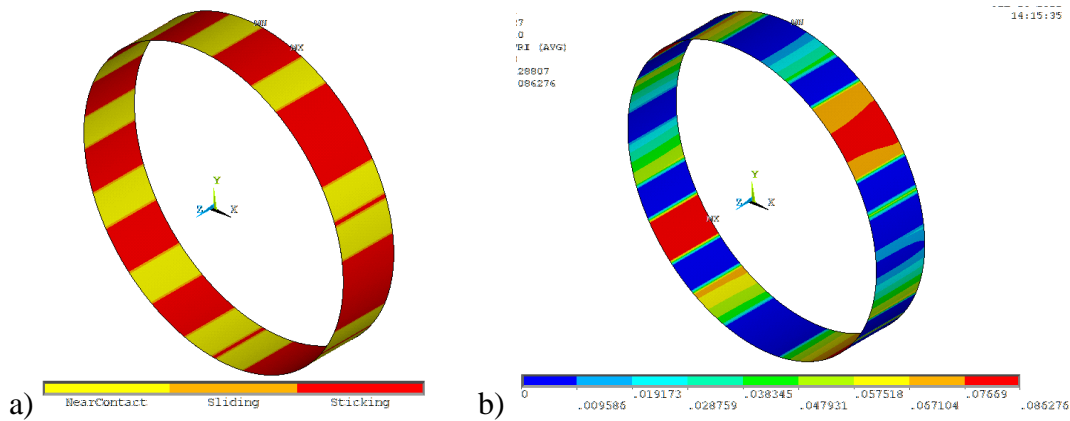
últimos se presentan algunas separaciones y es en estas zonas donde se pierde la transferencia de esfuerzos debido a la ley constitutiva que se consideró. En la figura 4.8b se muestran las zonas donde se presentan los deslizamientos en la interfaz, siendo máximos en las zonas de los riñones. Sin embargo, los deslizamientos que se presentan son muy pequeños menores a 1 [mm].



**Fig. 4. 7. Mapa de vectores de desplazamiento en el riñón superior derecho del anillo,  $K_0 = 0.6$  . Modelo permitiendo separación y deslizamiento en la interfaz**

La tabla 4.4 muestra los deslizamientos que se presentan en la interfaz entre revestimientos para diferentes ángulos y relaciones de carga. Entre menor sea la relación de carga mayor va a ser el deslizamiento que se presente en la interfaz entre revestimientos en la zona de los riñones debido a que existe una mayor ovalamiento del anillo. Sin embargo, debido a que los deslizamientos son muy pequeños no se considera que influyan en el comportamiento del modelo.

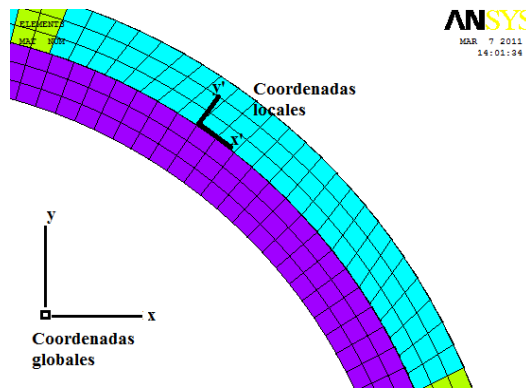
Para obtener las fuerzas de deslizamiento, se obtienen las fuerzas en los ejes globales de las superficies de contacto en la zona en estudio directamente del ANSYS (2006) de los elementos de contacto. Las fuerzas se encuentran en los ejes globales, por tanto se calculan sus componentes en los ejes locales. En la figura 4.9 se muestran los ejes globales y los ejes locales en la zona en estudio.



**Fig. 4. 8. Interfaz entre revestimientos para un  $K_0$  de 0.6: a) comportamiento, b) deslizamiento. Modelo permitiendo separación y deslizamiento en la interfaz**

**Tabla 4. 4. Deslizamiento entre revestimientos medidos en los riñones del anillo en mm**

Ángulo [°]	$K_0=0.9$	$K_0=0.8$	$K_0=0.7$	$K_0=0.6$	$K_0=0.5$	$K_0=0.4$
45	0.076	0.173	0.265	0.351	0.438	0.519
135	0.101	0.197	0.288	0.373	0.460	0.541
225	0.115	0.209	0.298	0.382	0.467	0.546
315	0.094	0.192	0.284	0.371	0.460	0.542

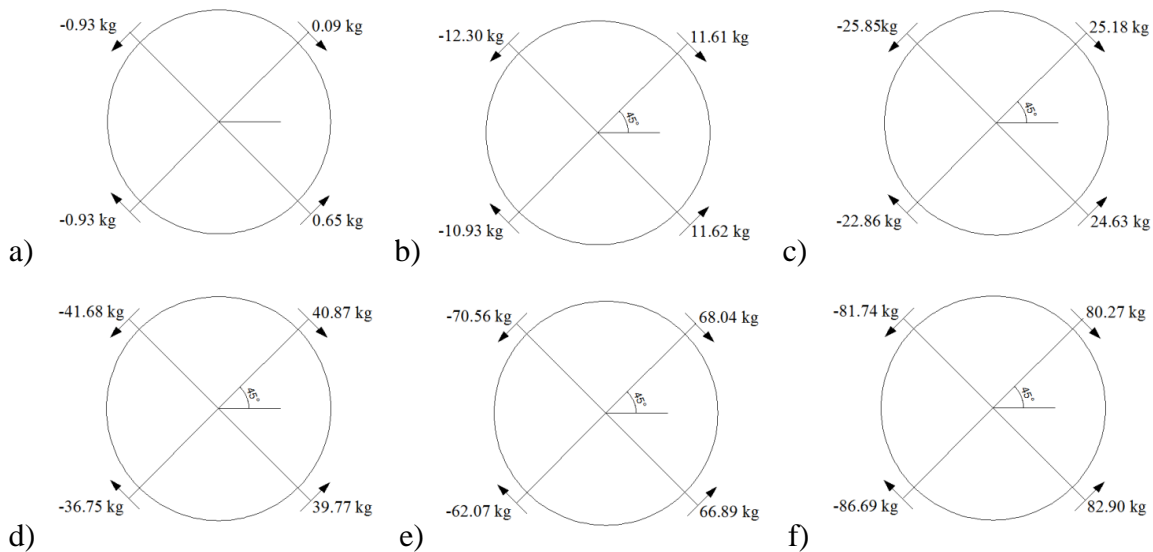


**Fig. 4. 9. Ejes globales y ejes locales en los riñones del anillo**

Como las cargas se encuentran paralelas al plano  $xy$ , las fuerzas que se utilizarán sólo serán aquellas que se encuentren en dirección  $x$  y  $y$ ; ya que, las que se presentan en dirección  $z$  son perpendiculares al plano  $xy$ , de tal forma que su componente en la dirección de los ejes locales es nula.

En la figura 4.10 se hace una representación vectorial de las fuerzas de fricción que se generan en el anillo debido a las relaciones de cargas aplicadas, donde se muestra la magnitud y dirección de las fuerzas. Con la deformación que presenta el anillo, se generan en la superficie de contacto del revestimiento primario fuerzas de fricción que se oponen al movimiento, donde el revestimiento secundario trata de empujar hacia arriba al revestimiento primario. Como se observa en las figuras siguientes a medida que la fuerza lateral disminuye la fuerza de fricción en la interfaz aumenta tratando de evitar el movimiento entre los revestimientos por la deformación que sufre el anillo.

En la tabla 4.5 se muestran los esfuerzos de fricción medidos en la interfaz entre revestimientos en los riñones del anillo debido que son los máximos en toda la superficie de interacción. Conforme el valor de  $K_0$  sea menor, los esfuerzos de fricción aumentarán. Sin embargo la magnitud de estos esfuerzos de fricción es muy pequeña como para considerarlo importante en el comportamiento global del anillo.



**Fig. 4. 10. Vectores de fuerzas de fricción en los riñones del anillo. Modelo permitiendo separación y deslizamiento en la interfaz. a)  $K_0 = 0.9$ ; b)  $K_0 = 0.8$ ; c)  $K_0 = 0.7$ ; d)  $K_0 = 0.6$ ; e)  $K_0 = 0.5$ ; f)  $K_0 = 0.4$**

**Tabla 4. 5. Esfuerzos de fricción en los riñones del anillo medidos en la interfaz entre revestimientos (kg/cm<sup>2</sup>)**

Ángulo [°]	$K_0=0.9$	$K_0=0.8$	$K_0=0.7$	$K_0=0.6$	$K_0=0.5$	$K_0=0.4$
45	0.013	0.031	0.054	0.078	0.12	0.14
135	0.016	0.035	0.058	0.083	0.13	0.15
225	0.019	0.038	0.060	0.085	0.13	0.15
315	0.016	0.035	0.057	0.082	0.13	0.15

Al modelo se le aumentó el valor de la cohesión para conocer si influía en el comportamiento global del anillo hasta un valor de 30 kg/cm<sup>2</sup>. A pesar de haber aumentado la cohesión no se observaron resultados diferentes al del caso donde la cohesión es de nula. Esto es debido a que la cohesión es una propiedad de los materiales para que permanezcan unidas sus partículas, pero se tienen dos elementos en contacto y sin ninguna ligazón, aunque tengan el mismo material, la cohesión no influye al presentarse una separación tampoco para evitarla. Por lo tanto la separación rige en el comportamiento de este modelo ya que la separación es independiente de la cohesión y al presentarse dicha separación se pierde toda transferencia de esfuerzos en esa zona. Se escogió un valor de cohesión de 30 kg/cm<sup>2</sup> debido a que este valor es similar a la magnitud de la resistencia al esfuerzo de tensión del concreto.



# CAPÍTULO 5

## MODELO CONSIDERANDO ÚNICAMENTE DESLIZAMIENTO

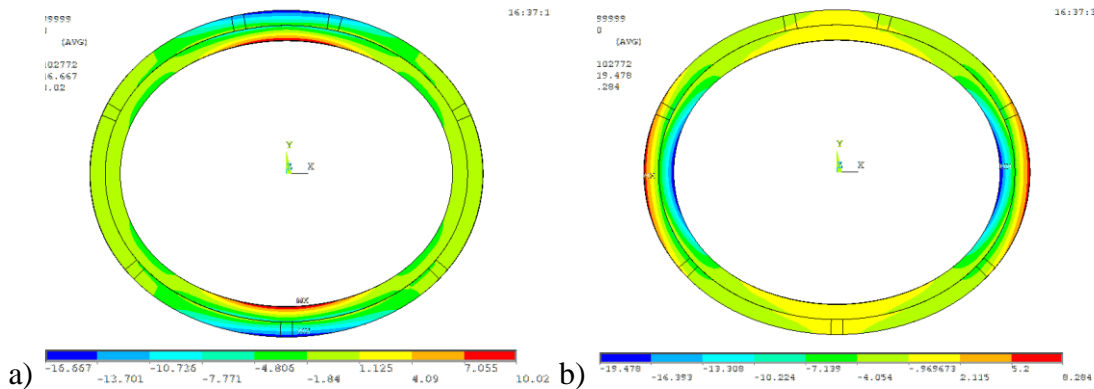
Para este modelo se considera que los revestimientos siempre van a estar unidos, es decir, no se presentan separaciones, solo deslizamientos y simple contacto. Se definió un comportamiento diferente para los elementos de contacto pero se consideran los mismos parámetros como el coeficiente de fricción de 0.6. En cuanto a la cohesión, como no van a existir separaciones se observará la influencia de dicho parámetro teniendo dos casos: cohesión nula y cohesión mínima. La resistencia a tensión se podría considerar, en este modelo, como infinita.

### *5.1 Modelo con cohesión nula*

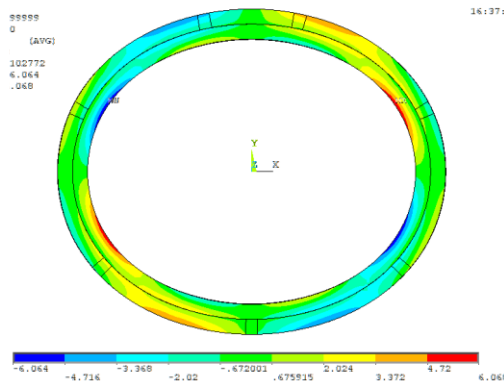
Primero se tratará el caso donde la cohesión en la interfaz entre revestimientos es nula. A pesar de estar en contacto en todo momento los revestimientos; los materiales de estos tendrán una cohesión nula y así estarán actuando con cierta libertad los revestimientos.

#### *5.1.1 Mapas de esfuerzo axial y de cortante en el anillo*

Los mapas de esfuerzo axial y de cortante, muestran una aparente compatibilidad de esfuerzos axiales más no de esfuerzos cortantes para valores de  $K_0$  pequeñas, a partir de un valor de 0.7 (figura 5.1 y 5.2). Principalmente en los mapas axiales, se muestra un comportamiento similar al de un único anillo de un valor de  $K_0$  de 0.7 y mayores. Sin embargo, en los riñones del anillo se tienen un comportamiento individual que se va acentuando conforme la relación de carga disminuye. Los esfuerzos de cortante en los riñones del anillo nos están indicando que la compatibilidad no existe debido a que se presentan deslizamientos en la interfaz entre revestimientos.



**Fig. 5. 1. Mapas de esfuerzos axiales ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) y deformadas del anillo permitiendo solo deslizamiento (cohesión nula) para un  $K_0$  de 0.6: a) horizontal; b) vertical**

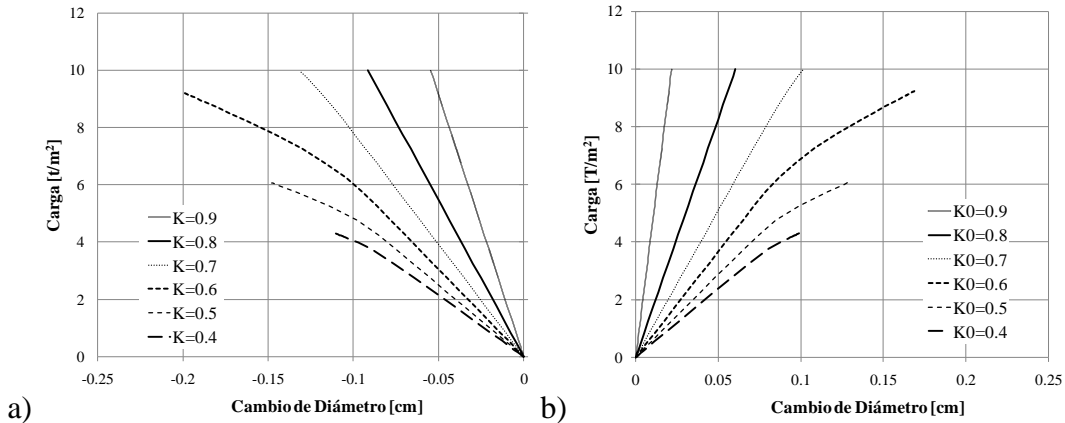


**Fig. 5. 2. Mapa de esfuerzos cortantes ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) y deformada del anillo permitiendo solo deslizamiento para un  $K_0$  de 0.6**

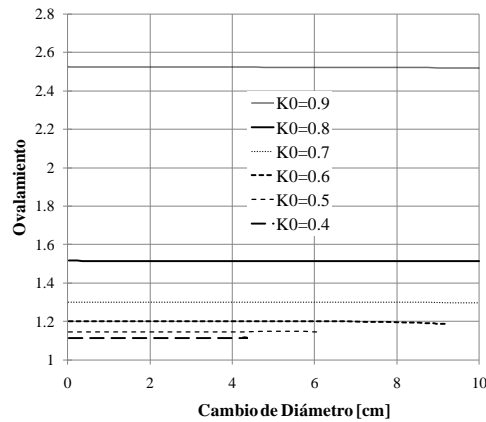
### 5.1.2 Cambios de diámetro y ovalamiento del anillo

En las curvas carga-cambio diámetro (figura 5.3), el diámetro vertical se acorta y el horizontal se alarga; y a menor relación de carga mayor el cambio de diámetro. Dos aspectos que se resaltan en estas curvas es que a partir de un  $K_0 = 0.7$  y menores se presenta una degradación de la rigidez global de anillo debido al deslizamiento que se presenta entre los revestimientos. Para relaciones de carga menores a 0.7 el análisis deja de converger debido a los deslizamientos que se presentan. El otro aspecto que hay que resaltar es que las curvas para relaciones de carga de 0.9 y 0.8 son similares al del modelo donde se tiene contacto perfecto, lo que nos indicaría que el comportamiento es el de un anillo único y los revestimientos se encuentran unidos sin presentar deslizamientos.

En cuanto al ovalamiento, las curvas también son similares con la del modelo con contacto perfecto, siendo ligeramente menores para este modelo, probablemente debido a errores numéricos (figura 5.4). El ovalamiento es constante para cualquier incremento de carga, indicando que los cambios de diámetro tiene una razón de cambio proporcional entre estos.



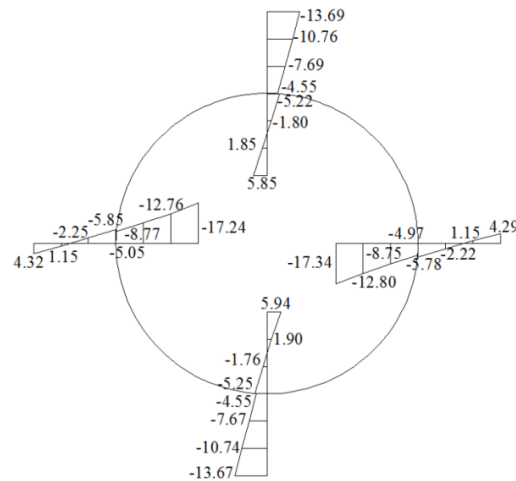
**Fig. 5.3. Curvas carga – cambio de diámetro del anillo permitiendo solo deslizamiento (cohesión nula): a) diámetro vertical; b) diámetro horizontal**



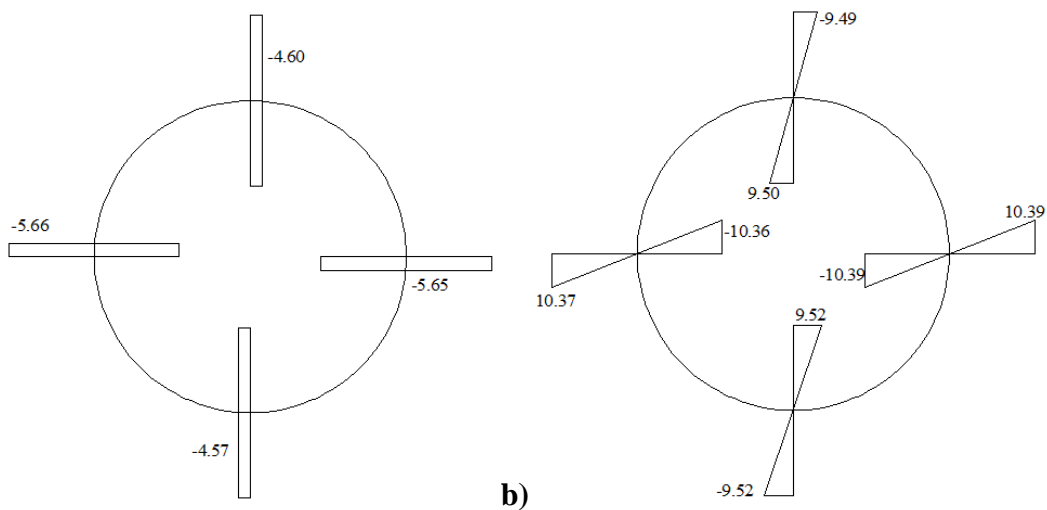
**Fig. 5.4. Curvas ovalamiento – carga del modelo permitiendo sólo deslizamiento**

### 5.1.3 Elementos mecánicos en las zonas donde el esfuerzo axial es máximo

Al observar las distribuciones de esfuerzo axial en clave, cubeta y hastiales se tiene que son prácticamente lineales y son similares a los que se tienen con el modelo con contacto perfecto. Las distribuciones de esfuerzo axial se presentan en la figura 5.5 para un valor de  $K_0$  igual a 0.7, que es la relación de carga más pequeña donde converge el modelo. Debido a que el comportamiento de este modelo se asemeja mucho en los esfuerzos axiales y de cortante al del modelo sin interfaz, se calcularon los elementos mecánicos considerando un único anillo. En la figura 5.6 se muestran los esquemas de las distribuciones de esfuerzo por carga axial y flexión. Estas distribuciones son semejantes a las distribuciones de la figura 3.8. Teniendo los máximos esfuerzos por carga axial y de flexión en los hastiales, debido a que las presiones laterales son menores a las presiones verticales.



**Fig. 5. 5. Esquemas de la distribución de esfuerzos axiales en la cubeta, clave y hastiales en  $kg/cm^2$ , caso  $K_0 = 0.7$ . Modelo permitiendo solo deslizamiento**



**Fig. 5. 6. Esquemas de distribución de esfuerzos en  $kg/cm^2$ . Modelo permitiendo solo deslizamiento, caso  $K_0 = 0.7$ : a) por carga axial, b) flexión**

La tabla 5.1 se muestran los momentos flexionantes en las zonas de la clave, los hastiales y la cubeta. Los momentos son mayores cuando el factor  $K_0$  es menor y son mayores en los hastiales porque las presiones en el eje vertical son mayores. Los momentos flexionantes son simétricos entre la clave y cubeta y entre hastiales. La tabla 5.2 se muestran las cargas axiales actuando en la sección transversal del anillo. Los resultados muestran que las cargas axiales son de compresión por la forma en cómo se aplican las presiones. Las cargas de compresión son simétricas entre la clave y cubeta y entre hastiales. Existe un mayor cambio de carga de compresión en los hastiales al disminuir la carga lateral en el anillo, que el cambio de carga de compresión en la clave y cubeta, principalmente para relaciones de

carga de 0.7, 0.8 y 0.9. La carga de compresión será menor al ser menor el factor  $K_0$ , debido a que la carga lateral en el anillo es menor.

**Tabla 5. 1. Momentos flexionantes para diferentes relaciones de carga en diferentes zonas considerando que los revestimientos trabajan como un solo anillo, en  $t - m$**

Zona	$K_0 = 0.9$	$K_0 = 0.8$	$K_0 = 0.7$	$K_0 = 0.6$	$K_0 = 0.5$	$K_0 = 0.4$
Clave	3.45	7.66	11.63	14.00	11.78	10.43
Hastial izq.	-4.53	-8.62	-12.69	-15.23	-12.71	-11.21
Cubeta	3.46	7.62	11.66	14.02	11.82	10.47
Hastial der.	-4.56	-8.65	-12.73	-15.25	-12.72	-11.21

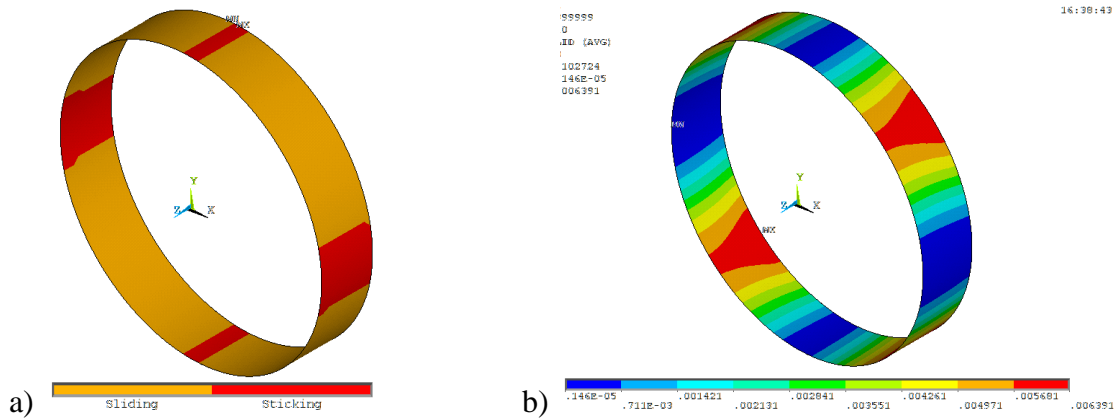
NOTA: Los momentos se consideran positivos en sentido anti horario

**Tabla 5. 2. Cargas axiales en la sección transversal del anillo, en toneladas**

Zona	$K_0 = 0.9$	$K_0 = 0.8$	$K_0 = 0.7$	$K_0 = 0.6$	$K_0 = 0.5$	$K_0 = 0.4$
Clave	58.00	53.14	48.26	40.26	24.54	16.35
Hastial izq	61.53	60.30	59.40	53.66	35.87	26.36
Cubeta	57.91	52.94	47.95	39.90	24.25	16.09
Hastial der.	61.51	60.28	59.38	53.66	35.86	26.36

#### 5.1.4 Fricción y deslizamiento en los riñones del anillo

En la figura 5.7a se muestra la interfaz entre revestimientos donde se marca en color rojo las zonas en contacto y en color naranja las zonas que deslizan entre sí los revestimientos. El deslizamiento rige en el comportamiento en la interacción entre revestimientos, existiendo solo contacto sin deslizarse en las zonas de la clave, cubeta y hastiales. En la figura 5.8b se observa que los deslizamientos se concentran en los riñones del anillo, y a pesar de ello no existen grandes deslizamientos entre revestimientos como lo indica la tabla 5.3, donde se muestra que el deslizamiento entre revestimientos aumenta conforme la relación de carga es menor. Cabe señalar que los valores de los deslizamientos para relaciones de carga de 0.5 y 0.4 disminuyen, contradiciendo lo anterior, pero es debido a que el análisis no terminó por problemas de convergencia.

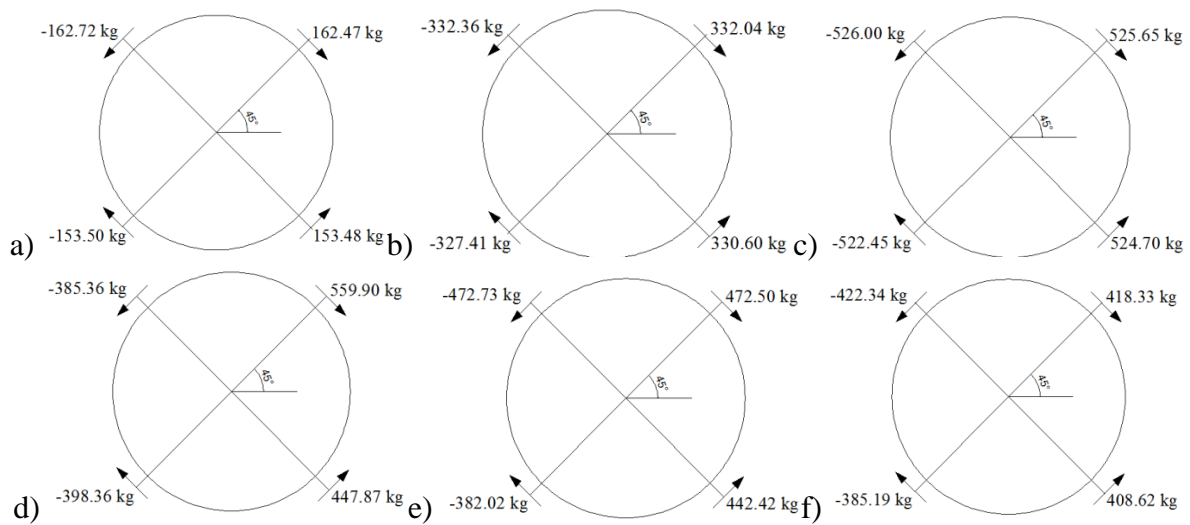


**Fig. 5. 7. Interfaz entre revestimientos para un  $K_0$  de 0.6: a) comportamiento; b) deslizamiento**

**Tabla 5. 3. Deslizamiento en la interfaz a diferentes ángulos para el modelo donde sólo se permite deslizamiento, en mm**

Ángulo [°]	$K_0=0.9$	$K_0=0.8$	$K_0=0.7$	$K_0=0.6$	$K_0=0.5$	$K_0=0.4$
45	0.002	0.003	0.011	0.058	0.034	0.022
135	0.002	0.003	0.011	0.058	0.034	0.022
225	0.002	0.003	0.011	0.058	0.034	0.022
315	0.002	0.003	0.011	0.058	0.034	0.022

En la figura 5.8 se muestran los vectores de las fuerzas de fricción, donde tienen una dirección y magnitud que el modelo sin elementos de contacto. El diámetro vertical tiende a contraerse y el horizontal se alarga, por tanto el revestimiento primario empuja hacia abajo al revestimiento secundario en la mitad superior del anillo, y en caso contrario en la mitad inferior. Conforme disminuye la relación de carga el anillo tiende a deformarse más y por tanto en la interfaz existen mayores deslizamientos, de tal forma que las fuerzas de fricción también aumentan.



**Fig. 5. 8. Vectores de fuerzas de fricción en los riñones del anillo, modelo permitiendo solo deslizamiento: a)  $K_0 = 0.9$ ; b)  $K_0 = 0.8$ ; c)  $K_0 = 0.7$ ; d)  $K_0 = 0.6$ ; e)  $K_0 = 0.5$ ; f)  $K_0 = 0.4$**

La tabla 5.4 muestra que los esfuerzos de fricción aumentan conforme la relación de carga disminuye. Los esfuerzos de fricción son mayores al del modelo anterior porque existen separaciones en la interfaz.

**Tabla 5. 4. Esfuerzos de fricción en los riñones del anillo medidos en la interfaz entre revestimientos ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )**

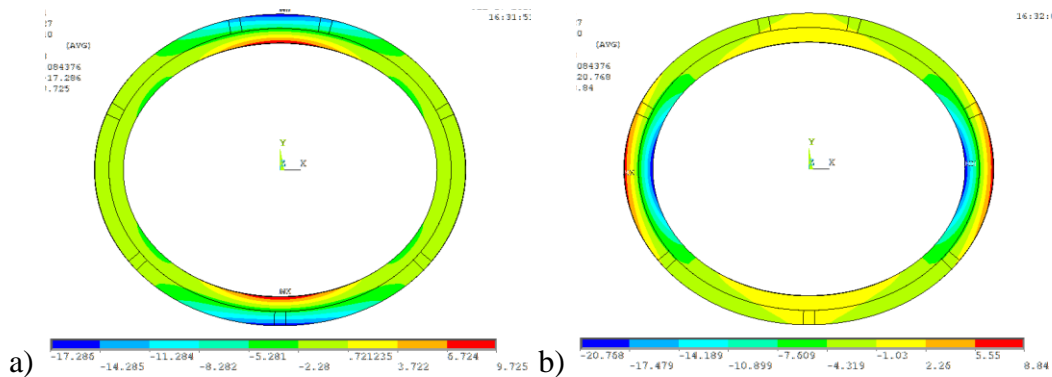
Ángulo [°]	$K_0=0.9$	$K_0=0.8$	$K_0=0.7$	$K_0=0.6$	$K_0=0.5$	$K_0=0.4$
45°	0.0126	0.0314	0.0543	0.0784	0.1087	0.1418
135°	0.0164	0.0354	0.0577	0.0835	0.1144	0.1483
225°	0.0188	0.0377	0.0597	0.0850	0.1154	0.1488
315°	0.0159	0.0348	0.0572	0.0823	0.1128	0.1463

## 5.2 Modelo con cohesión mínima ( $1 \text{ kg/cm}^2$ )

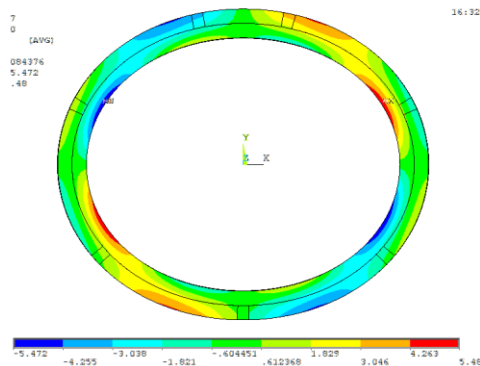
Para este modelo donde se permite únicamente el deslizamiento en la interacción entre ambos revestimientos se aumentó la cohesión para observar la influencia de este parámetro en el comportamiento en la interfaz y globalmente en el anillo.

### 5.2.1 Mapas de esfuerzo axial y de cortante en el anillo

Al incrementarse la cohesión la compatibilidad de esfuerzos y deformaciones se refinan más, teniendo un comportamiento mucho más cercano al que tiene el modelo donde se considera un solo anillo (figura 3.1 y 3.2). A diferencia del modelo con cohesión nula, se muestra una mejor compatibilidad de esfuerzos de cortante como se ve en la figura 5.9 y 5.10. Se tienen esfuerzos de tensión en el intradós del anillo en la clave y cubeta, y en el extradós de los hastiales. Los esfuerzos de compresión se presentan en el extradós de la clave y cubeta, y en el intradós de los hastiales.



**Fig. 5. 9. Mapas de esfuerzos axiales ( $\text{kg/cm}^2$ ) y deformadas del anillo permitiendo solo deslizamiento con cohesión mínima para un  $K_0$  de 0.6: a) horizontal; b) vertical**



**Fig. 5. 10. Mapa de esfuerzos cortantes ( $\text{kg/cm}^2$ ) y deformada del anillo permitiendo solo deslizamiento con cohesión mínima para un  $K_0$  de 0.6**



5.2.2 Cambios de diámetro y ovalamiento del anillo

Las curvas carga-cambio de diámetro muestran que existe una menor degradación de la rigidez global del anillo debido al aumento de la cohesión que evita que los revestimientos deslicen en la superficie de interacción. Aun así, conforme la relación de cargas disminuya y los incrementos de carga aumenten empezará a existir una degradación de la rigidez del anillo (figura 5.11). En cuanto las curvas ovalamiento-carga, son prácticamente iguales que las curvas respectivas al modelo con cohesión nula, y a su vez cuando se considera un solo anillo (figura 5.12). La principal diferencia en el ovalamiento, con respecto al modelo con cohesión nula, es que se tiene una mejor convergencia en el análisis. Debido a que el aumento de la cohesión evita la presencia de deslizamiento en la interacción entre ambos revestimientos.

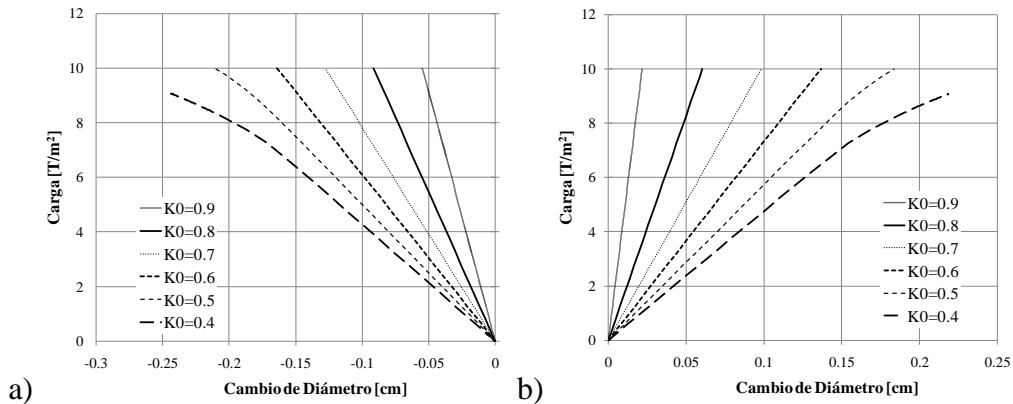


Fig. 5. 11. Curvas carga – cambio de diámetro del modelo permitiendo solo deslizamiento y cohesión mínima: a) diámetro vertical; b) diámetro horizontal

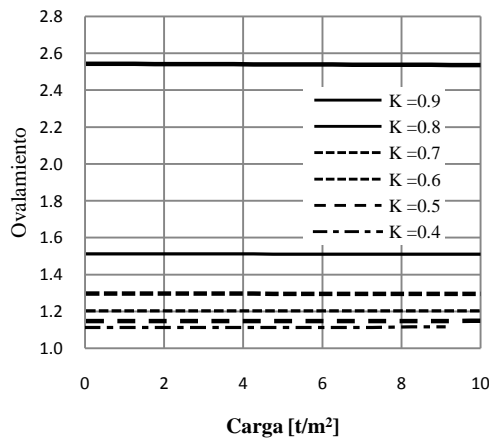
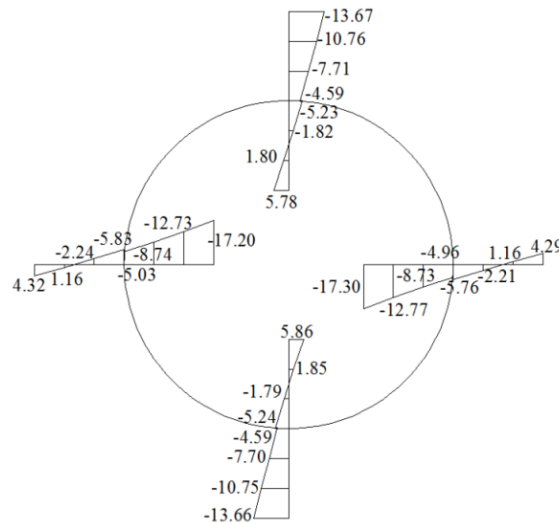


Fig. 5. 12. Curvas ovalamiento – carga del modelo permitiendo solo deslizamiento con cohesión mínima

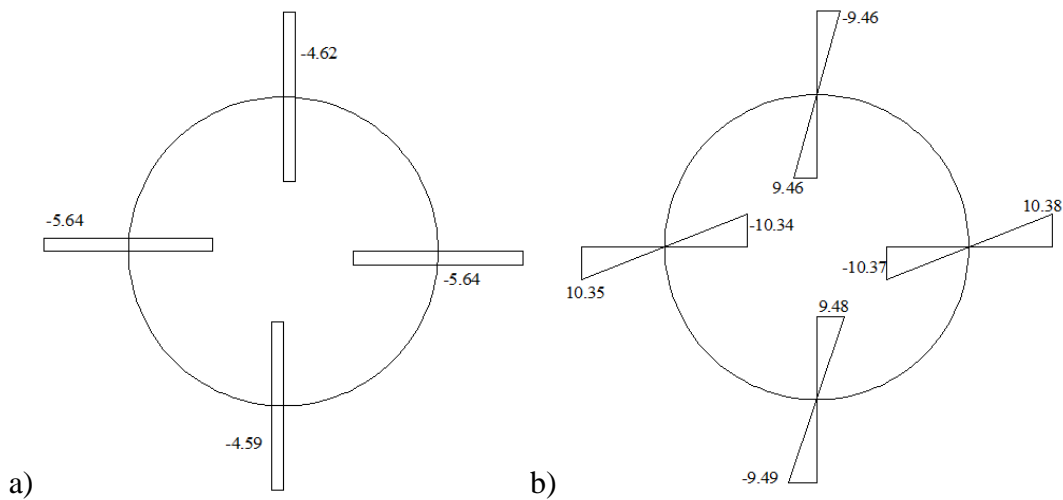
Si comparamos las curvas de carga-cambió de diámetro con las del modelo con contacto perfecto se observa que para relaciones de carga de 0.9, 0.8 y 0.7 las curvas son prácticamente iguales, y para las demás relaciones existen variaciones en las curvas principalmente por la degradación de la rigidez del anillo debido a los deslizamientos que se presentan en la interfaz entre revestimientos.

### 5.2.3 Elementos mecánicos en las zonas donde el esfuerzo axial es máximo

Las distribuciones de esfuerzo axial en las zonas donde estas son máximas son lineales como se ha visto en los modelos anteriores. Las figuras 5.13 y 5.14 muestran las distribuciones de esfuerzo axiales y las distribuciones de esfuerzo debidas a carga axial y flexión, respectivamente. Al igual que en el caso de tener una cohesión nula, las distribuciones de esfuerzo axial son similares a las correspondientes del modelo con contacto perfecto; sin existir una variación importante en los resultados debido a que estas zonas están siempre en contacto y no presentan deslizamientos. Por consecuencia, los esfuerzos por fuerza axial y por flexión tienen los mismos resultados, prácticamente, que en el caso con cohesión nula.



**Fig. 5. 13. Esquema de la distribución de esfuerzos axiales en la cubeta, clave y hastiales en  $\text{kg/cm}^2$ , caso  $K_0 = 0.7$ . Modelo permitiendo solo deslizamiento (cohesión mínima)**



**Fig. 5. 14. Esquema de la distribución de esfuerzos del modelo permitiendo solo deslizamiento (cohesión nula) en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ : a) por carga axial, b) flexión**

Los momentos para relaciones de carga de 0.9, 0.8 y 0.7 son iguales a los obtenidos con una cohesión igual a cero. De igual forma, al presentarse una mayor deformación los momentos aumentan (tabla 5.5). Para menores relaciones de carga, las diferencias de diámetro aumentan, teniendo así un mayor brazo de momento. En este caso también se presenta simetría de los momentos.

**Tabla 5. 5. Momentos flexionantes para diferentes relaciones de carga, a diferentes ángulos considerando que los revestimientos trabajan como un solo anillo, en t-m**

Zona	$K_0 = 0.9$	$K_0 = 0.8$	$K_0 = 0.7$	$K_0 = 0.6$	$K_0 = 0.5$	$K_0 = 0.4$
Clave	3.45	7.66	11.59	14.00	19.33	20.83
Hastial izq.	-4.53	-8.62	-12.67	-15.23	-20.61	-22.25
Cubeta	3.46	7.62	11.62	14.02	19.38	20.89
Hastial der.	-4.56	-8.65	-12.70	-15.25	-20.65	-22.31

En la tabla 5.6 se muestran las cargas de compresión en la sección transversal del anillo en las zonas donde los esfuerzos axiales en el anillo son máximos. Presentándose disminución de las cargas de compresión, conforme la carga lateral sea menor. Y siendo menores en la zona de la clave y de la cubeta, por ser menor la carga lateral para cualquier relación de carga utilizada. Las cargas de compresión son similares a la tabla 3.2, sobre todo para valores de  $K_0$  de 0.9 y 0.8. A partir de una relación de carga de 0.7 y menores, varía el resultado, debido a que es a partir de esta relación de carga cuando empieza a tomar importancia el deslizamiento y se presenta una degradación de la rigidez global del anillo. Una cosa que hay que hacer notar es que la carga de compresión disminuye conforme la carga lateral es menor, pero la disminución de un valor de  $K_0$  de 0.7 a 0.6 es mayor en los

hastiales. Y para un valor del factor  $K_0$  de 0.5 se tiene una carga de compresión mayor en el caso donde  $K_0$  es 0.6. Al tener las mismas presiones en cualquier modelo, pero con un aumento de la carga de compresión en la sección transversal, indica que el problema se produce en el comportamiento del anillo en la zona de los hastiales, por la transferencia de esfuerzos axiales, debido a los deslizamientos que se producen en la interacción entre ambos revestimientos degradando la rigidez del anillo.

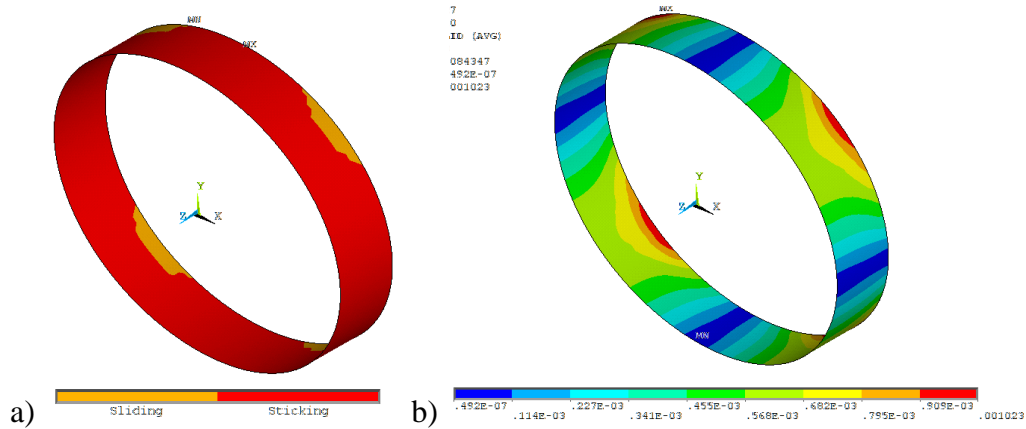
**Tabla 5. 6. Cargas axiales en la sección transversal del anillo, en toneladas**

Zona	$K_0 = 0.9$	$K_0 = 0.8$	$K_0 = 0.7$	$K_0 = 0.6$	$K_0 = 0.5$	$K_0 = 0.4$
Clave	58.00	53.14	48.54	40.26	39.38	32.11
Hastial izq.	61.53	60.30	59.21	53.66	57.70	52.04
Cubeta	57.91	52.94	48.24	39.90	38.87	31.58
Hastial der.	61.51	60.28	59.20	53.66	57.69	51.79

#### ***5.2.4 Fricción y deslizamiento en los riñones del anillo***

En la interfaz entre revestimientos (figura 5.15), la disminución de los deslizamientos es notoria, aumentando las zonas de simple contacto y disminuyendo las zonas con deslizamiento respecto a la figura 5.7a, donde la cohesión es nula. En la figura 5.15a se muestra en color rojo las zonas sin deslizamiento y en color naranja las zonas con deslizamiento. En la figura 5.15b se presentan los deslizamientos en la interfaz, teniendo los máximos en los riñones del anillo. Cabe hacer notar que los deslizamientos se empiezan a presentar en una pequeña porción de los riñones en la interfaz sin cubrir todo el ancho de la interfaz y es debido a las restricciones asignadas en una de las caras del anillo del plano  $xy$ .

Los deslizamientos aumentan conforme la relación de carga disminuye y estos se concentran en los riñones del anillo. Para relaciones de carga cercanos a la unidad los deslizamientos son prácticamente nulos (tabla 5.7). Como se observa los deslizamientos disminuyen con un aumento mínimo de la cohesión.

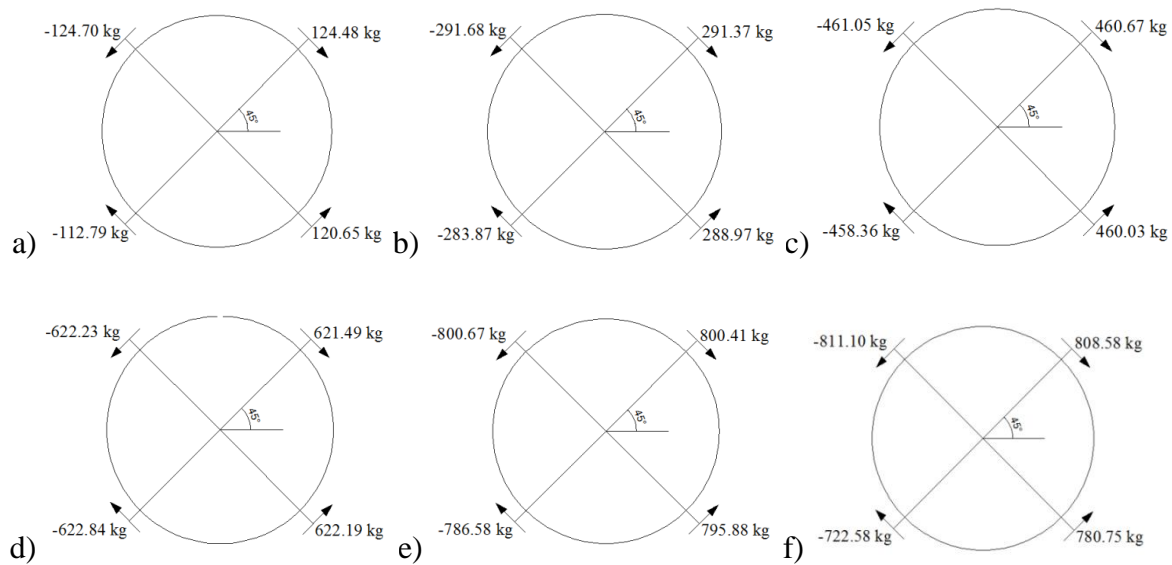


**Fig. 5. 15. Interfaz entre revestimientos para el modelo permitiendo solo deslizamiento (cohesión mínima),  $K_{\theta}$  de 0.6: a) separación entre elementos; b) deslizamiento en la interfaz**

**Tabla 5. 7. Deslizamiento entre revestimientos medidos en los riñones del anillo a diferentes ángulos, en mm**

Ángulo [°]	$K_{\theta}=0.9$	$K_{\theta}=0.8$	$K_{\theta}=0.7$	$K_{\theta}=0.6$	$K_{\theta}=0.5$	$K_{\theta}=0.4$
45	0.002	0.003	0.005	0.007	0.021	0.045
135	0.002	0.003	0.005	0.007	0.021	0.045
225	0.002	0.003	0.005	0.007	0.021	0.045
315	0.002	0.004	0.006	0.007	0.022	0.047

La magnitud y sentido de las fuerzas de deslizamiento se presentan en la figura 5.16. Se muestra en la figura las fuerzas que se generan en la superficie de interacción del revestimiento primario, así como en los demás modelos, donde el revestimiento primario hacia abajo en la parte superior del anillo respecto al eje horizontal y hacia arriba en la parte inferior del anillo respecto al eje horizontal. Así como las fuerzas de fricción disminuyeron con el aumento de la cohesión, por consecuencia los esfuerzos de fricción también son menores, como se observa en la tabla 5.8. Al disminuir la carga lateral existe un aumento de las fuerzas de deslizamiento; por tanto, a menor relación de carga, mayor serán los esfuerzos y fuerzas de fricción.



**Fig. 5. 16. Vectores de fuerzas de fricción en los riñones del anillo permitiendo solo deslizamiento (cohesión mínima): a)  $K_0 = 0.9$ ; b)  $K_0 = 0.8$ ; c)  $K_0 = 0.7$ ; d)  $K_0 = 0.6$ ; e)  $K_0 = 0.5$ ; f)  $K_0 = 0.4$**

**Tabla 5. 8. Esfuerzos de fricción en los riñones del anillo medidos en la interfaz entre revestimientos ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )**

Ángulo [°]	$K_0=0.9$	$K_0=0.8$	$K_0=0.7$	$K_0=0.6$	$K_0=0.5$	$K_0=0.4$
45°	0.2737	0.5502	0.8306	1.0971	1.3914	1.4081
135°	0.2741	0.5507	0.8312	1.0981	1.3920	1.4133
225°	0.2679	0.5409	0.8183	1.0808	1.3275	1.1916
315°	0.2678	0.5388	0.8143	1.0751	1.3232	1.1808

## CAPÍTULO 6

### MODELO CONSIDERANDO CIERTA CANTIDAD DE SEPARACIÓN Y DESLIZAMIENTO

En los modelos anteriores donde se tomó en cuenta la existencia de los elementos de contacto, se les permitía un comportamiento libre o restricción total. Para este modelo se desea tomar en cuenta una cierta liga en la interfaz entre revestimientos. En este modelo se mantienen en contacto los revestimientos hasta que alcanza un límite de carga que produzca tensión y se presenten las separaciones. De tal forma que al estar en contacto siguen una ley tipo Coulomb donde existe una transferencia de esfuerzos, hasta un punto donde se rebase la resistencia a esfuerzo a tensión y se separen los revestimientos, perdiéndose toda transferencia de esfuerzos de cualquier tipo.

Para conocer la influencia de la resistencia al esfuerzo de tensión en el comportamiento en la interfaz del anillo se tienen dos casos: uno donde se tiene una resistencia mínima al esfuerzo a la tensión y el segundo caso donde se aumenta esta resistencia a la tensión.

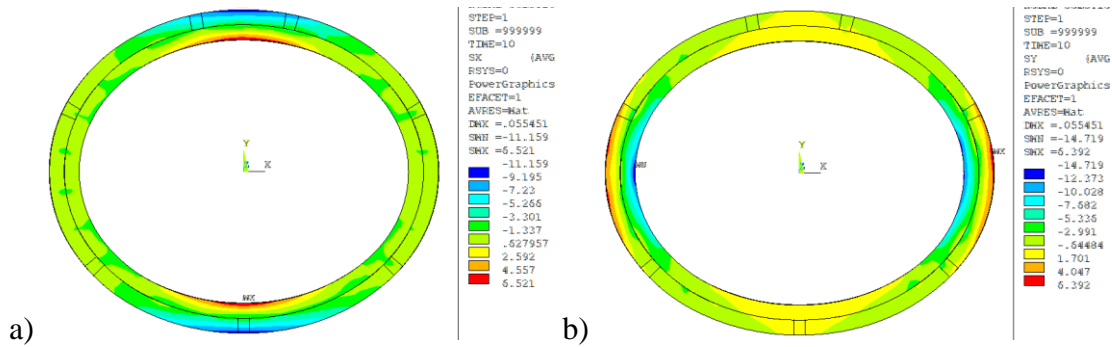
#### *6.1 Modelo con resistencia al esfuerzo a la tensión de $0.1 \text{ kg/cm}^2$*

Para este caso se asignará una resistencia mínima al esfuerzo de tensión en la zona cohesiva. Como en el modelo donde se permitía separación y deslizamiento, la cohesión no tenía influencia en la presencia de una separación; en este caso se empleará una propiedad mecánica de los elementos.

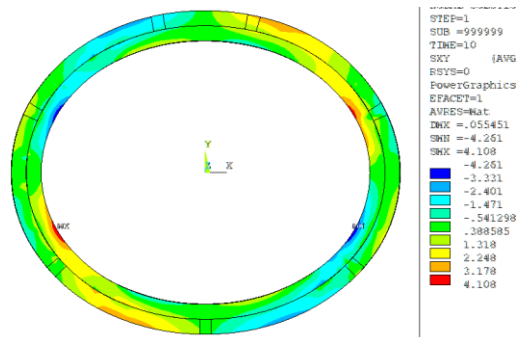
##### *6.1.1 Mapas de esfuerzo axial y de cortante en el anillo*

La deformada es similar a los modelos anteriores, reduciéndose el diámetro vertical y alargándose el diámetro horizontal. Los mapas de esfuerzos axiales y de cortante de las figuras 6.1 y 6.2 no tienen una transferencia uniforme de los esfuerzos para relaciones de carga menores a 0.6. Es posible que se deba a la presencia de separaciones, rebasándose el límite de resistencia a la tensión en ciertas zonas. Entonces, al presentarse las separaciones, se pierde toda transferencia de esfuerzos y estos se concentran en otras zonas; por lo que no

se tiene un mapa de esfuerzos con cambios graduales. De igual forma que en modelos anteriores, los esfuerzos máximos axiales se presentan en los ejes vertical y horizontal del anillo; y los esfuerzos a cortante prácticamente se presentan sus máximos en los riñones del anillo.



**Fig. 6. 1. Mapas de esfuerzos axiales ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) y deformadas del anillo permitiendo cierta cantidad de separación y deslizamiento (resistencia a la tensión de  $0.1 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ) para un  $K_0$  de 0.6: a) horizontal; b) vertical**



**Fig. 6. 2. Mapa de esfuerzos cortantes ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) y deformada del anillo permitiendo cierta cantidad de separación y deslizamiento ( $0.1 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ) para un  $K_0$  de 0.6**

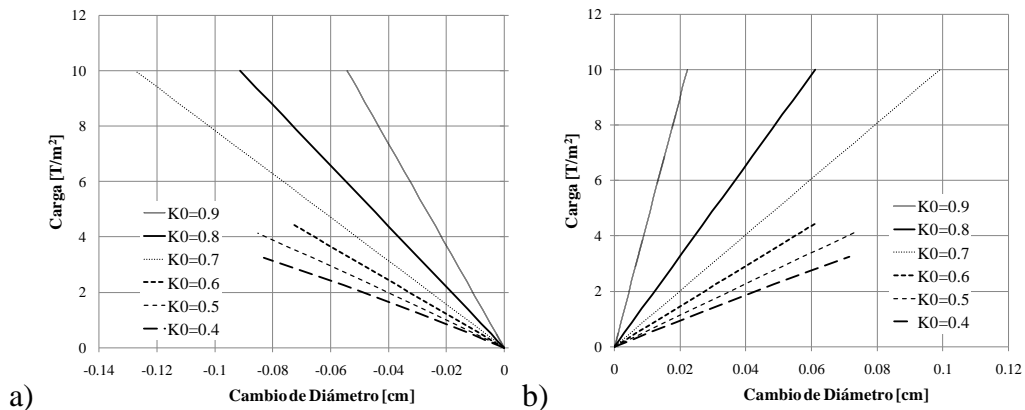
### 6.1.2 Cambios de diámetro y ovalamiento del anillo

Las curvas carga-diferencia de diámetro muestran un comportamiento similar al que tiene el modelo considerando un solo anillo a pesar de que se presenten separaciones las cuales no influyen de manera importante a nivel global (figura 6.3). El anillo tiende a deformarse más al disminuir las cargas laterales y al aplicar mayores incrementos de carga. Para valores de  $K_0$  de 0.6, 0.5 y 0.4, los análisis terminan de forma súbita por problemas de convergencia, debido a los deslizamiento que se presentan. La rigidez del anillo se degrada porque se presentan mayores deslizamientos que en el modelo donde se permite que se separen los revestimientos libremente; y las curvas ovalamiento-carga tienen un cambio de

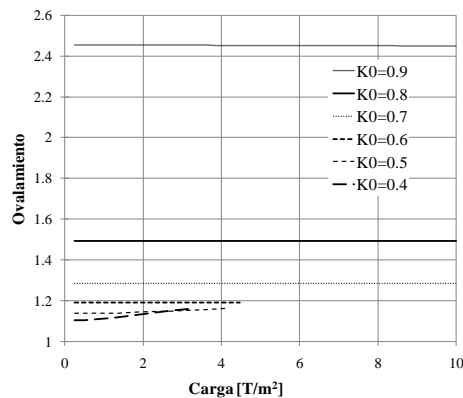


pendiente (figura 6.4). Entonces, considerando lo anterior, desde un principio se presentan las separaciones en menor grado y en ciertas zonas, y en combinación con los deslizamientos en la interfaz se pierde la convergencia.

En las curvas ovalamiento-carga, se tienen resultados similares con el modelo de contacto perfecto. En estas curvas se puede notar cómo se degradó la rigidez del anillo antes de perder la convergencia, para relaciones de carga de 0.5 y 0.4 principalmente. Para todas las demás relaciones de carga, el ovalamiento se mantiene constante en los incrementos de carga proporcionados indicando que para cualquier incremento de éste, en la medida que el diámetro vertical cambie, el horizontal lo hará en la misma proporción. En el caso en que existe cambio de pendiente en las curvas, cambia la proporción de los cambios de diámetros. El aumento del ovalamiento se da por un aumento mayor del diámetro vertical que se tenía respecto al horizontal.



**Fig. 6. 3. Curvas carga – cambio de diámetro del modelo permitiendo cierta cantidad de separación y deslizamiento (resistencia a la tensión de 0.1 kg/cm<sup>2</sup>): a) diámetro vertical; b) diámetro horizontal**

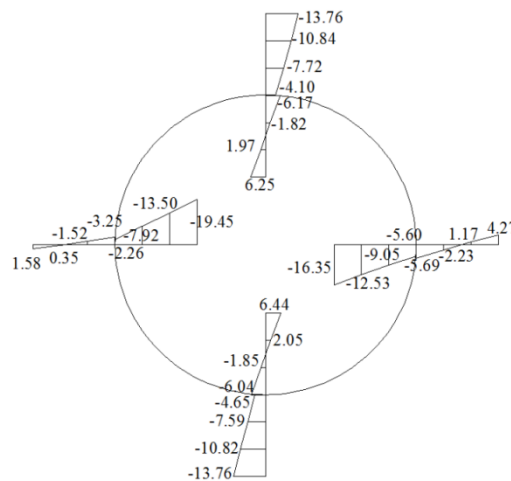


**Fig. 6. 4. Curvas ovalamiento – carga del modelo permitiendo cierta cantidad de separación y deslizamiento (resistencia a la tensión de 0.1 kg/cm<sup>2</sup>)**

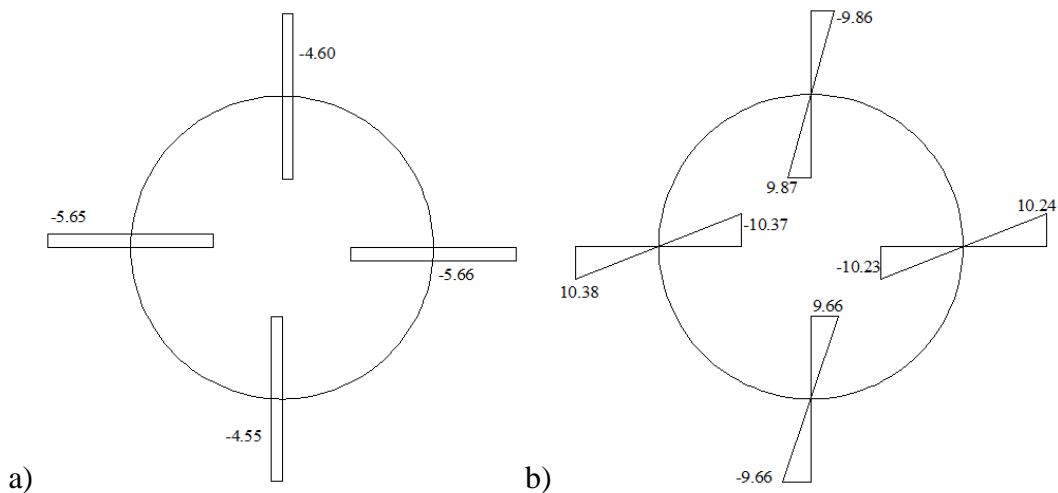
**6.1.3 Elementos mecánicos en las zonas donde el esfuerzo axial es máximo**

Las distribuciones de esfuerzo axial donde estos son máximos, se tienen una magnitud similar a las distribuciones donde solo se consideró un anillo. En la interfaz hay una diferencia más notoria de los esfuerzos axiales, probablemente debido a la presencia de las separaciones. Sin embargo, estas diferencias se pueden considerar despreciables debido a que no son tan grandes. A continuación se muestran las distribuciones de esfuerzo axial máximas para una relación de carga de 0.7 (figura 6.5). En los hastiales se tiene cierta variación de los esfuerzos axiales, perdiendo un poco la simetría; probablemente se deba a errores numéricos durante el análisis. La figura 6.6 muestra esquemáticamente las distribuciones de esfuerzo debido a carga axial y flexión, teniendo resultados similares con la figura 3.8, considerando que los revestimientos no trabajan de forma individual como es el caso de la figura 4.5, donde es notorio el comportamiento individual de los revestimientos.

En la tabla 6.1 se muestran los momentos flexionantes en las zonas en estudio, considerando que los revestimientos no trabajan de forma independiente. Rigurosamente, el comportamiento global del anillo no es igual al comportamiento del modelo sin interfaz; pero los resultados son similares y las variaciones que se muestran pueden no ser de consideración. Los momentos, como ya se ha visto en los otros modelos, aumentan conforme la carga lateral disminuye. Los momentos obtenidos son muy similares a los de la tabla 3.1.



**Fig. 6. 5. Esquema de la distribución de esfuerzos axiales en la cubeta, clave y hastiales para el modelo con cierta cantidad de separación y deslizamiento (resistencia a la tensión de 0.1 kg/cm<sup>2</sup>), en kg/cm<sup>2</sup>, K<sub>0</sub> = 0.7**



**Fig. 6. 6. Esquema de la distribución de esfuerzos por fuerza axial y flexión modelo permitiendo cierta cantidad de separación y deslizamiento (resistencia a la tensión de  $0.1 \text{ kg/cm}^2$ ), en  $\text{kg/cm}^2$ : a) por carga axial, b) flexión**

**Tabla 6. 1. Momentos para diferentes relaciones de carga y a diferentes ángulos, en  $t \cdot m$**

Zona	$K_0=0.9$	$K_0=0.8$	$K_0=0.7$	$K_0=0.6$	$K_0=0.5$	$K_0=0.4$
Clave	3.80	7.94	12.08	7.15	5.83	5.21
Hastial izq.	-4.54	-8.51	-12.71	-7.45	-6.15	-5.52
Cubeta	3.67	7.87	11.83	6.96	5.73	5.00
Hastial der.	-4.39	-8.49	-12.54	-7.35	-6.09	-5.49

NOTA: Los momentos se consideran positivos en sentido anti horario

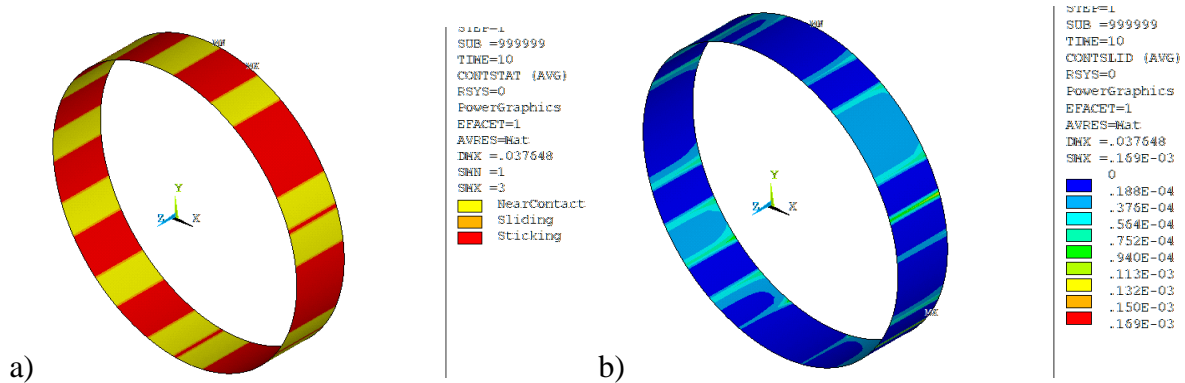
En la tabla 6.2 se presentan los valores de las cargas de compresión en la sección transversal del anillo. Como se observa en la tabla, conforme sea menor la carga lateral, menor será la carga de compresión, principalmente en la clave y la cubeta. Los resultados se asemejan mucho a los de la tabla 3.2, correspondiente al modelo donde no se consideraron los elementos de contacto.

**Tabla 6. 2. Cargas axiales en la sección transversal del anillo, en toneladas**

Zona	$K_0 = 0.9$	$K_0 = 0.8$	$K_0 = 0.7$	$K_0 = 0.6$	$K_0 = 0.5$	$K_0 = 0.4$
Clave	58.07	52.65	48.31	19.79	12.01	8.46
Hastial izq.	61.55	60.36	59.32	26.12	17.19	12.77
Cubeta	56.11	51.84	47.80	19.69	12.19	8.62
Hastial der.	61.65	60.48	59.45	26.19	17.26	12.84

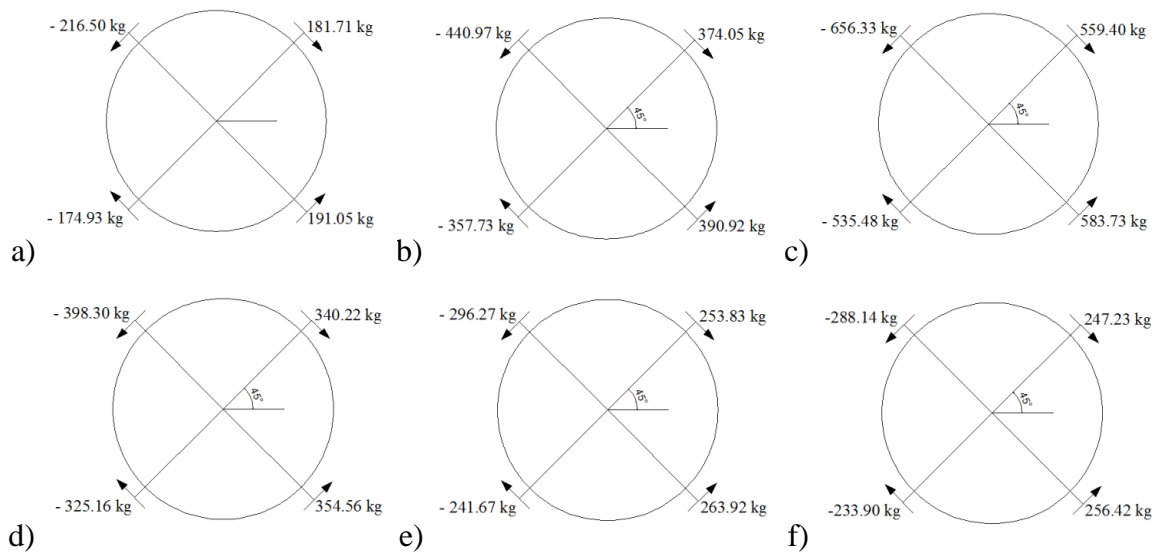
### 6.1.4 Fricción y deslizamiento en los riñones del anillo

En la figura 6.7a tenemos el comportamiento en la interfaz entre revestimientos, la cual es similar a la que se presenta con el modelo donde se permite separación y deslizamiento. En color rojo se muestran las zonas donde los revestimientos se encuentran en contacto, en color amarillo las zonas donde se separan y en color naranja las zonas donde los revestimientos deslizan entre sí. La clave, cubeta y hastiales se encuentran en contacto y prácticamente en las zonas de las juntas se presentan separaciones. En la zona de los riñones del anillo se concentran los deslizamientos, como se ha presentado en los demás modelos (figura 6.7b)



**Fig. 6. 7. Interfaz entre revestimientos del modelo permitiendo una cierta cantidad de separación y deslizamiento (resistencia a la tensión de  $0.1 \text{ kg/cm}^2$ ), para un  $K_0$  de 0.6:**  
 a) separación entre elementos; b) deslizamiento en la interfaz

Las fuerzas de deslizamiento que se presentan en la superficie de interacción aumentan conforme la relación de carga disminuye (figura 6.8). Estas fuerzas de deslizamiento son mayores en relación a los modelos anteriores donde solo se permitía el deslizamiento, lo que nos indica que se presenta una mayor deformación del anillo. De igual forma, los esfuerzos de fricción son mayores que para el modelo donde solo se permite deslizamiento, y son mayores conforme la relación de carga disminuya ya que el anillo tiene una mayor deformación. Los esfuerzos de fricción se presentan en la tabla 6.3, para diferentes relaciones de carga.



**Fig. 6. 8. Vectores de fuerzas de fricción en los riñones del anillo donde se permite cierta cantidad de separación y deslizamiento (resistencia a la tensión de  $0.1 \text{ kg/cm}^2$ ):**  
 a)  $K_0 = 0.9$ ; b)  $K_0 = 0.8$ ; c)  $K_0 = 0.7$ ; d)  $K_0 = 0.6$ ; e)  $K_0 = 0.5$ ; f)  $K_0 = 0.4$

**Tabla 6. 3. Esfuerzos de fricción en los riñones del anillo medidos en la interfaz entre revestimientos ( $\text{kg/cm}^2$ )**

Ángulo [°]	$K_0=0.9$	$K_0=0.8$	$K_0=0.7$	$K_0=0.6$	$K_0=0.5$	$K_0=0.4$
45°	0.3121	0.6242	0.9253	0.5602	0.4168	0.4053
135°	0.3650	0.7293	1.0791	0.6528	0.4847	0.4707
225°	0.3313	0.6652	0.9901	0.5994	0.4447	0.4299
315°	0.3361	0.6729	0.9981	0.6041	0.4487	0.4353

## **6.2 Modelo con una resistencia a la tensión de $1 \text{ kg/cm}^2$**

Se aumentó la resistencia a la tensión para evitar que se generen separaciones en la interfaz entre revestimientos. Se pretende conocer la influencia de la resistencia a la tensión en el comportamiento global del anillo.

### **6.2.1 Mapas de esfuerzo axial y de cortante en el anillo**

Los mapas de esfuerzos axiales de cortante se muestran en las figuras 6.9 y 6.10, respectivamente. Las separaciones que se presentan son en menor grado, debido al aumento de la resistencia a la tensión. La transición de los esfuerzos (axiales y de cortante) es más gradual entre revestimientos y también la transferencia de los esfuerzos en la interfaz. Aun se muestran zonas donde no hay una transición uniforme de los esfuerzos axiales y de cortante, por lo que estrictamente hablando no hay una compatibilidad de esfuerzos. Pero las diferencias son pequeñas por lo que se podrían omitir. Los máximos esfuerzos de tensión se presentan en el intradós de la clave y cubeta, y en el extradós de los hastiales. En cuanto a los esfuerzos de compresión, se presentan los máximos en el extradós de la clave y cubeta, y en el intradós de los hastiales.

### **6.2.2 Cambios de diámetro y ovalamiento del anillo**

Con el aumento de la resistencia a tensión, los revestimientos permanecen unidos a mayores incrementos de carga. Cuando la carga lateral sea menor existirá una mayor tendencia al cambio de diámetro (figuras 6.11). Las curvas cambio de diámetro – carga, son similares a las curvas de la figura 3.4. En cuanto al ovalamiento, aun se presenta un cambio de pendiente en las curvas de la figura 6.12, pero es muy pequeño. En general, el ovalamiento se mantiene constante para cualquier incremento de carga. El cambio de diámetro vertical es proporcional al cambio de diámetro horizontal. Cuando se presenta un cambio en la pendiente del ovalamiento, indica que se pierde esa proporción en el cambio de diámetro vertical con el cambio de diámetro horizontal, siendo mayor este último.

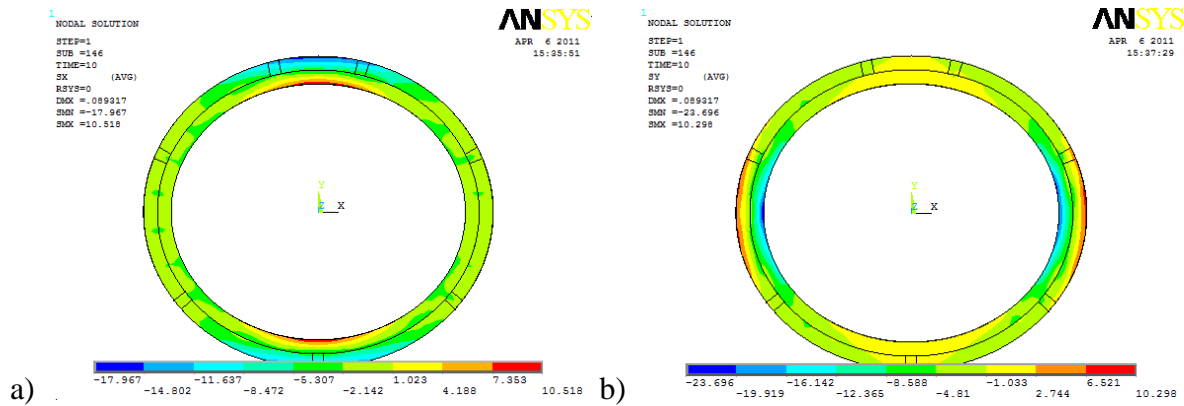


Fig. 6. 9. Mapas de esfuerzos axiales ( $\text{kg/cm}^2$ ) y deformadas del anillo permitiendo cierta magnitud de separación y deslizamiento (resistencia a la tensión de  $1 \text{ kg/cm}^2$ ) para un  $K_0$  de 0.6: a) horizontal; b) vertical

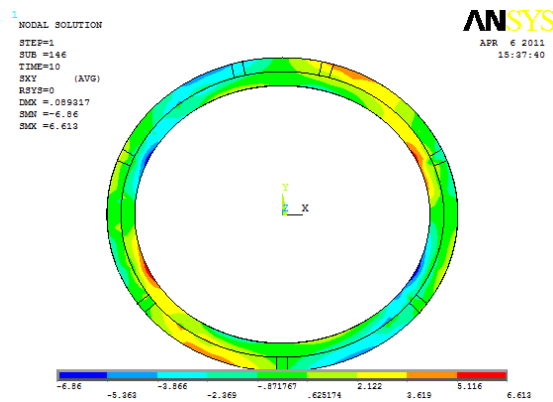


Fig. 6. 10. Mapa de esfuerzos cortantes ( $\text{kg/cm}^2$ ) y deformada del permitiendo cierta magnitud de separación y deslizamiento (resistencia a la tensión de  $1 \text{ kg/cm}^2$ ) para un  $K_0$  de 0.6

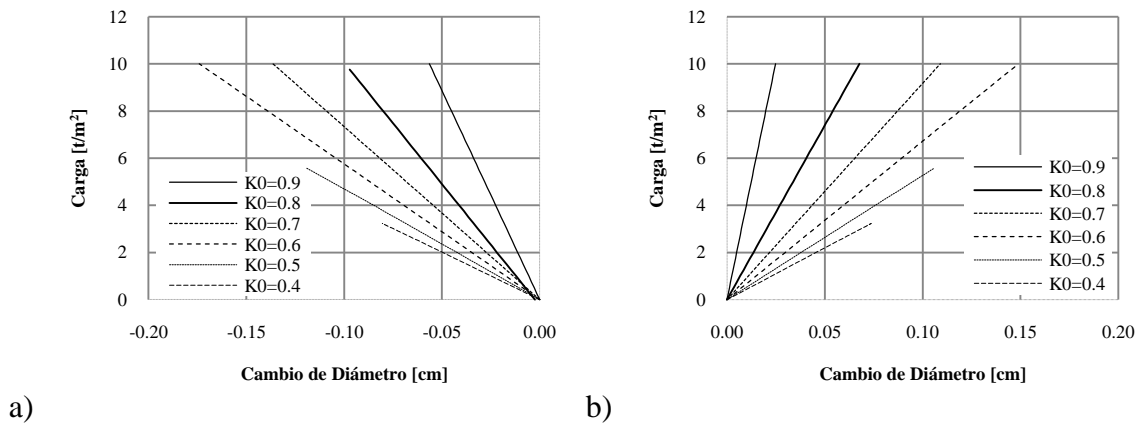
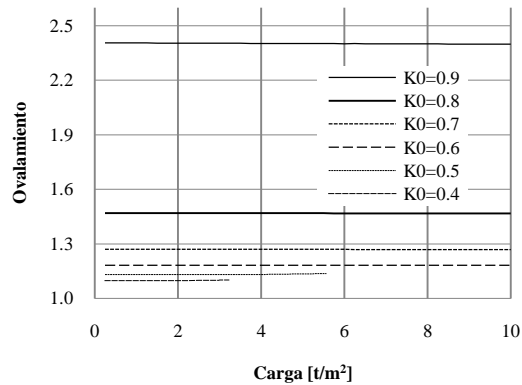


Fig. 6. 11. Curvas carga – cambio de diámetro del modelo permitiendo cierta magnitud de separación y deslizamiento ( $1 \text{ kg/cm}^2$ ): a) diámetro vertical; b) diámetro horizontal

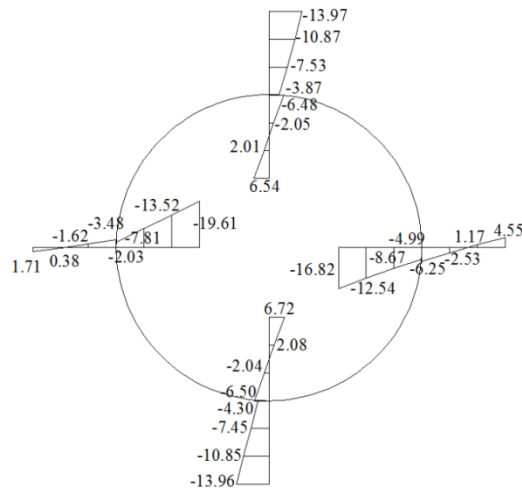


**Fig. 6. 12. Curvas ovalamiento – carga del modelo permitiendo una cierta cantidad de separación y deslizamiento (resistencia a la tensión de 1 kg/cm<sup>2</sup>)**

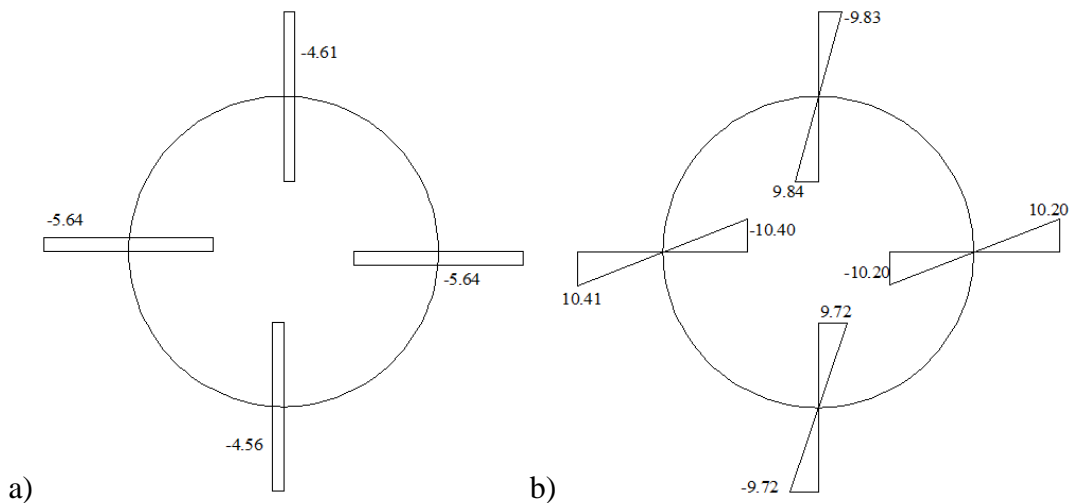
### 6.2.3 Elementos mecánicos en las zonas donde el esfuerzo axial es máximo

En la figura 6.13 se muestran esquemáticamente las distribuciones de esfuerzo axial en la clave, cubeta y hastiales. Estas distribuciones de esfuerzo axial son prácticamente iguales que las que se tienen con una resistencia a la tensión de 0.1 kg/cm<sup>2</sup>. Como se vio en los mapas de esfuerzo axial, en la interfaz se muestra una mejor compatibilidad de esfuerzos con el aumento de la resistencia a la tensión. Entonces se evita en mayor grado las separaciones entre revestimientos. Se podría asumir un comportamiento global del anillo como el de uno solo, donde los revestimientos no trabajan de forma independiente como en el caso donde la resistencia a la tensión es mínima. En la figura 6.14, se muestran esquemáticamente las distribuciones de esfuerzos debidas a carga axial y a flexión. Estas distribuciones son similares a las que se obtuvieron en la figura 3.8, por lo que refuerza la consideración de que el comportamiento no es independiente de los revestimientos.





**Fig. 6. 13. Distribución de esfuerzos máximos axiales en el modelo con cierta cantidad de separación y deslizamiento en la interfaz (resistencia a la tensión  $1 \text{ kg/cm}^2$ ), en  $\text{kg/cm}^2$ , caso  $K_0 = 0.7$**



**Fig. 6. 14. Distribución de esfuerzos en el modelo permitiendo cierta cantidad de separación y deslizamiento (resistencia a la tensión de  $1 \text{ kg/cm}^2$ ), en  $\text{kg/cm}^2$ : a) por carga axial, b) flexión**

Para valores menores de  $K_0$  se pierde un poco la transferencia de esfuerzos de cualquier tipo por las separaciones que se generan. La tabla 6.4 muestra los valores de los momentos calculados considerándolo que se comporta como un único anillo. Los momentos calculados son similares a los obtenidos en la tabla 3.1. Estos momentos aumentan conforme la carga lateral sea menor, debido a que hay una mayor deformación del anillo y los brazos de palanca son mayores.

**Tabla 6. 4. Momentos flexionantes donde los esfuerzos axiales son máximos, en t-m**

Zona	$K_0=0.9$	$K_0=0.8$	$K_0=0.7$	$K_0=0.6$	$K_0=0.5$	$K_0=0.4$
Clave	3.65	7.96	12.05	15.92	11.88	7.76
Hastial izq	-4.54	-8.54	-12.75	-16.73	-12.31	-8.22
Cubeta	3.72	7.92	11.90	15.64	11.61	7.61
Hastial der.	-4.37	-8.46	-12.49	-16.38	-12.14	-8.01

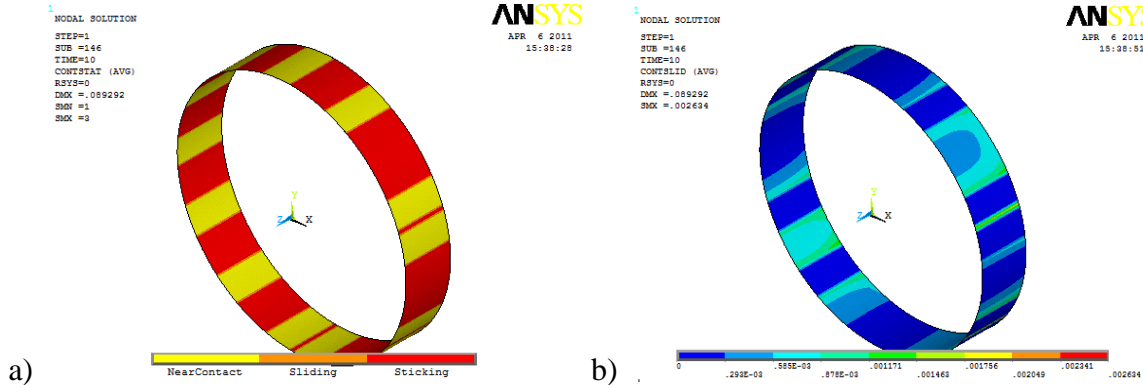
En la tabla 6.5 se tiene los valores de las cargas axiales en la sección transversal de las zonas en estudio; las cuales, debido a las condiciones de frontera, son de compresión. Estas cargas de compresión disminuyen conforme la carga lateral también es menor, principalmente en las zonas de la clave y cubeta. En los hastiales, la disminución de las cargas de compresión es pequeña, debido a que la presión vertical aplicada en el anillo es la misma. Los resultados son similares a los que se tienen en la tabla 3.2, que corresponden a los resultados del modelo con contacto perfecto. Tanto los valores de los momentos flexionantes como las cargas de compresión son simétricos entre clave y cubeta y entre hastiales.

**Tabla 6. 5. Cargas axiales en la sección transversal del anillo, en toneladas**

Zona	$K_0 = 0.9$	$K_0 = 0.8$	$K_0 = 0.7$	$K_0 = 0.6$	$K_0 = 0.5$	$K_0 = 0.4$
Clave	57.28	52.72	48.40	44.32	24.04	12.22
Hastial izq.	61.55	60.33	59.26	58.31	34.34	18.96
Cubeta	56.16	51.92	47.92	44.19	24.23	12.39
Hastial der.	61.59	60.36	59.26	58.29	34.35	18.94

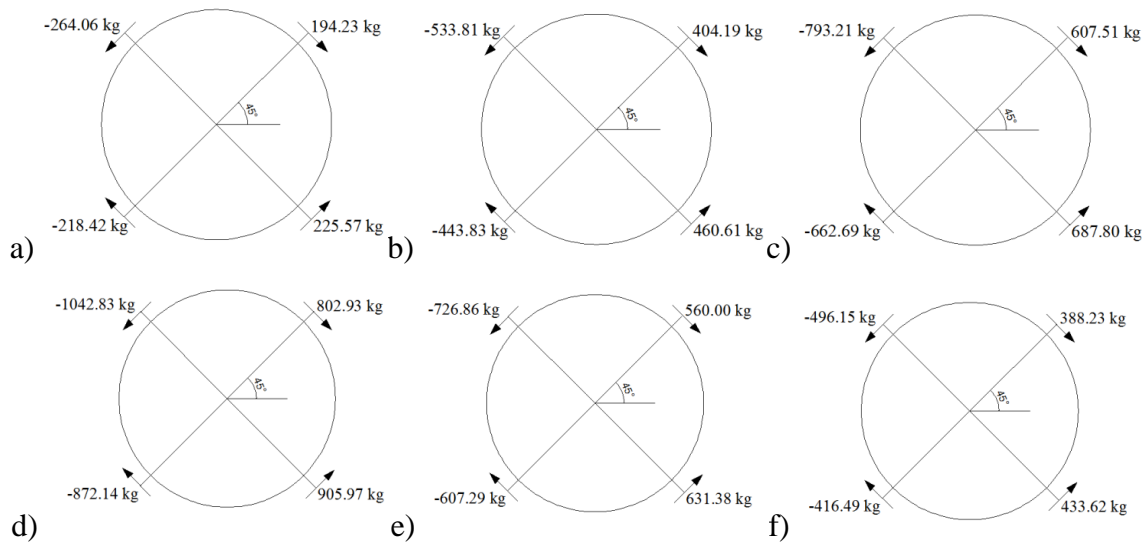
#### 6.2.4 Fricción y deslizamiento en los riñones del anillo

La figura 6.15 muestra en color rojo las zonas en contacto, en color amarillo las zonas que se separan y en color naranja las zonas donde deslizan los revestimientos entre sí. Se tiene un comportamiento similar que en el caso anterior, en donde la clave, cubeta y hastiales se encuentran contacto y en los riñones del anillo se presentan los máximos esfuerzos de fricción. Aunque los deslizamientos que se presentan son menores a 0.5 [mm], estos son mayores que en el caso con resistencia al esfuerzo de tensión mínima. Ya que al mantener a los revestimientos unidos para mayores relaciones de carga, estos empiezan a deslizarse antes de presentarse en mayor grado las separaciones. Conforme la carga horizontal disminuya el anillo se deformará más y al evitar que se presenten con mayor grado los revestimientos, los deslizamientos que se presenten en la superficie de interacción entre revestimientos aumentará.



**Fig. 6. 15. Interfaz entre revestimientos para un  $K_{\theta}$  de 0.6: a) separación entre elementos; b) deslizamiento en la interfaz**

Al aumentar la resistencia al esfuerzo a tensión, ayuda a que los revestimientos se mantengan en contacto a un mayor incremento de carga. Entonces, al aplicar más carga existe una mayor deformación del anillo, y como se mantienen en contacto los revestimientos se genera una mayor fuerza de deslizamiento en comparación al caso donde la resistencia al esfuerzo a tensión es menor. La figura 6.16 muestra los resultados de las fuerzas de deslizamiento en la superficie de interacción en los riñones del anillo sobre la superficie de interacción, se muestran la magnitud y sentido respecto al revestimiento primario. Donde la mitad superior del anillo empuja al revestimiento secundario hacia abajo y la mitad inferior lo hace hacia arriba. El revestimiento secundario intenta oponerse a este movimiento. A una menor relación de carga las fuerzas de deslizamiento aumentan, y a relaciones de carga cercanos a la unidad se tiene poca deformación del anillo por lo que sus fuerzas de deslizamiento son menores. Los esfuerzos de fricción (tabla 6.6) son similares que en el caso anterior donde la resistencia al esfuerzo a tensión es mínima; y mayores para el modelo donde solo se permite deslizamiento que es el modelo que más se asemeja al comportamiento de un solo anillo. La razón por la que son ligeramente mayores a los esfuerzos de fricción que en el modelo donde solo se permite deslizamiento, puede ser que al presentarse una mayor deformación en este modelo respecto al modelo anterior; los esfuerzos de fricción se concentran más.



**Fig. 6. 16. Vectores de fuerzas de fricción en los riñones del anillo donde se permite cierta cantidad de separación y deslizamiento (resistencia a la tensión de  $1 \text{ kg/cm}^2$ ): a)  $K_0 = 0.9$ ; b)  $K_0 = 0.8$ ; c)  $K_0 = 0.7$ ; d)  $K_0 = 0.6$ ; e)  $K_0 = 0.5$ ; f)  $K_0 = 0.4$**

**Tabla 6. 6. Esfuerzos de fricción en los riñones del anillo medidos en la interfaz entre revestimientos ( $\text{kg/cm}^2$ )**

Ángulo [°]	$K_0=0.9$	$K_0=0.8$	$K_0=0.7$	$K_0=0.6$	$K_0=0.5$	$K_0=0.4$
45°	0.3326	0.6733	1.0036	1.3209	0.9190	0.6361
135°	0.4426	0.8811	1.3030	1.7087	1.1891	0.8110
225°	0.4100	0.8210	1.2203	1.6021	1.1140	0.7634
315°	0.3951	0.7918	1.1757	1.5439	1.0740	0.7368

# CAPÍTULO 7

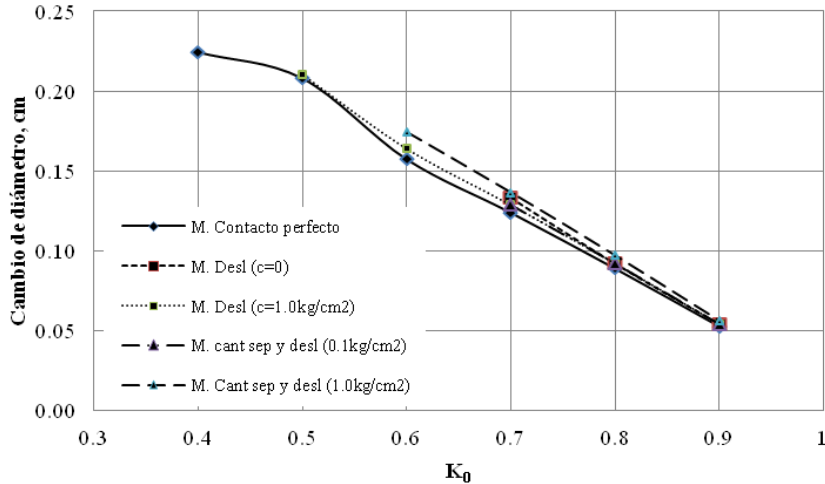
## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En los capítulos anteriores (capítulos 3 a 6) se revisó el comportamiento de los modelos considerados en este trabajo de forma individual, bajo las presiones verticales y horizontales propuestas. Se pudo observar que los modelos donde únicamente se permite deslizamiento y una cierta cantidad de separación y deslizamiento, tienen un comportamiento similar al modelo donde no se tomaron en cuenta los elementos de contacto. Para cada modelo mencionado anteriormente, se estudió el comportamiento tanto global como en la interfaz entre revestimientos. A continuación se relacionan los comportamientos de los modelos donde se permite sólo el deslizamiento y donde se permite una cantidad de separación y deslizamiento, con el modelo con contacto perfecto.

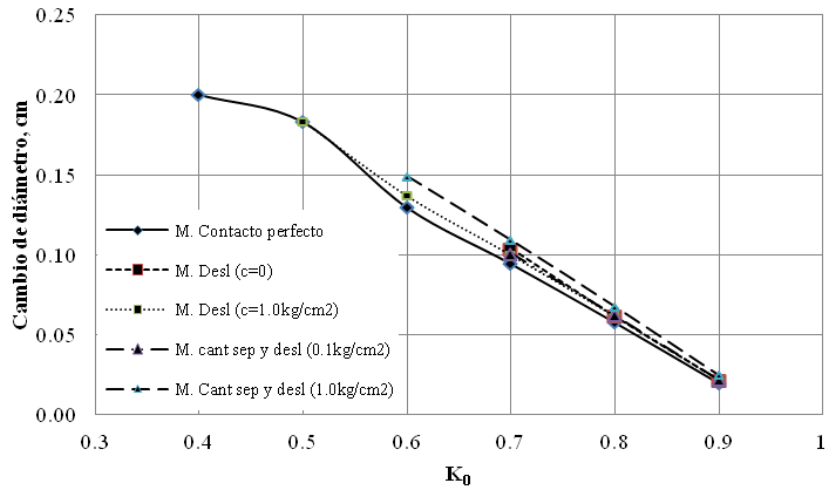
### *7.1 Cambio de diámetro y ovalamiento*

En la figura 7.1 se muestran las curvas cambio de diámetro – relación de carga, tanto para el eje vertical como para el horizontal. Sólo se tomó en cuenta el cambio de diámetro para valores del factor  $K_0$  donde convergió el análisis, debido a que los demás valores que no alcanzaron el máximo incremento de carga de  $10 \text{ t/m}^2$  pueden causar confusión en las comparaciones. Tanto para el cambio de diámetro vertical como para el horizontal, se tienen curvas muy similares entre los modelos considerando elementos de contacto con el modelo con contacto perfecto. A pesar de estas similitudes, estrictamente hablando, los modelos donde se consideró una interfaz son más flexibles que el modelo con contacto perfecto; deformándose más los modelos con interfaz entre revestimientos. Un comportamiento interesante en el modelo con contacto perfecto, es que para valores de  $K_0$  de 0.9 a 0.6 las diferencias de diámetro guardan una relación lineal. Sin embargo, se pierde esta relación lineal para un valor del factor  $K_0$  de 0.5; teniendo un cambio en la pendiente de la curva. Y de un valor de  $K_0$  de 0.4 a 0.5, la pendiente de la curva es muy pequeña. Es decir, para relaciones de carga pequeñas los cambios de diámetro serán similares; debido a que va a regir la presión vertical en el anillo. Para relaciones de carga intermedias, la carga lateral en el anillo tomará mayor importancia para tener cambios de diámetros grandes o pequeños. Y para relaciones de carga cercanos a la unidad, los cambios de diámetro tendrán una proporción lineal de cambio conforme varíe la carga lateral. Los modelos más flexibles son aquellos donde se permite una cierta cantidad de separación y deslizamiento.

Probablemente por la presencia, justamente, de las separaciones en la interfaz entre revestimientos.



a)

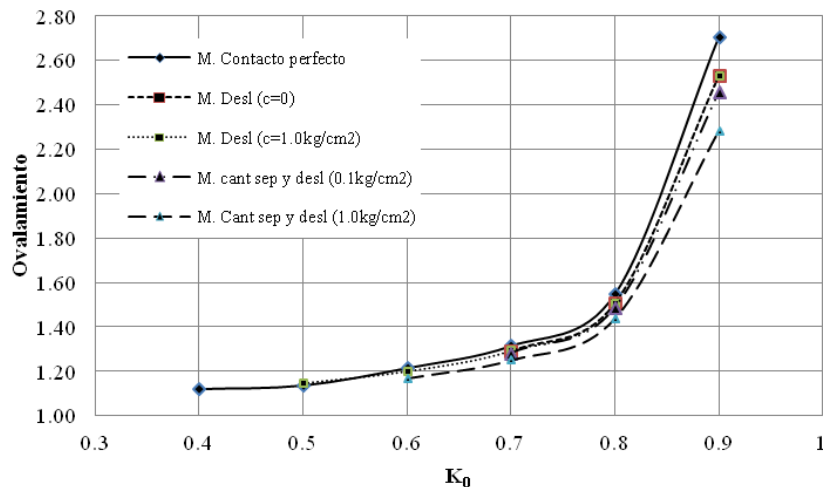


b)

**Fig. 7. 1. Curvas cambio de diámetro - relación de carga, con un incremento de carga de 10 t/m<sup>2</sup>: a) vertical, b) horizontal**

En la figura 7.2 se presentan las curvas ovalamiento-relación de carga, para incrementos de carga de 10 t/m<sup>2</sup>; de los modelos: contacto perfecto, únicamente permitiendo deslizamiento y con cierta cantidad de separación y deslizamiento. Para relaciones de carga  $K_0$  cercanos a la unidad, los ovalamientos de los modelos con elementos de contacto varían respecto al modelo con contacto perfecto, siendo estos menores. La carga lateral es relativamente grande en el anillo por lo que la deformación en el eje horizontal será menor respecto al de los modelos con elementos de contacto; siendo estos más flexibles por la presencia de deslizamientos y separaciones en la interfaz. Para valores de  $K_0$  pequeños, el ovalamiento

de los modelos con interfaz tenderá a ser igual al del modelo con contacto perfecto. La proporción de la deformación horizontal con la vertical en cada modelo será igual, debido a que rige la presión vertical en el anillo. Para estas relaciones de carga pequeñas, lo que cambie el diámetro vertical del anillo, cambiará el diámetro horizontal para cada modelo; tendiendo a la unidad el ovalamiento.

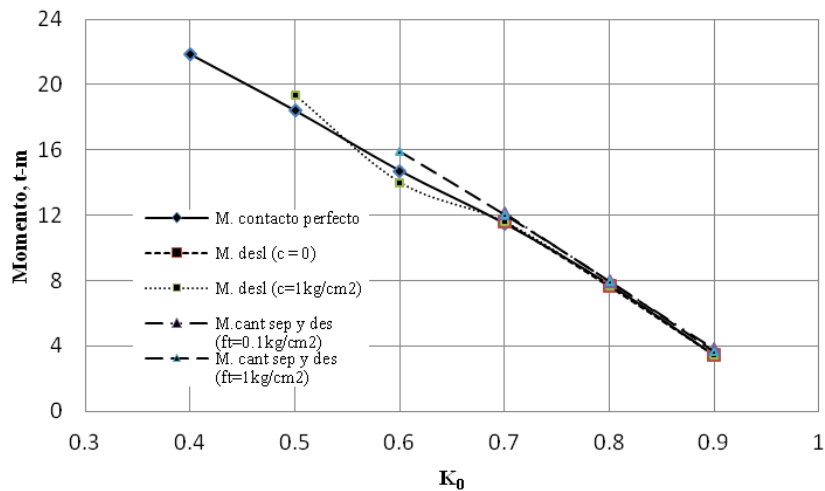


**Fig. 7. 2. Curvas ovalamiento - relación de carga, para un incremento de carga de  $10t/m^2$**

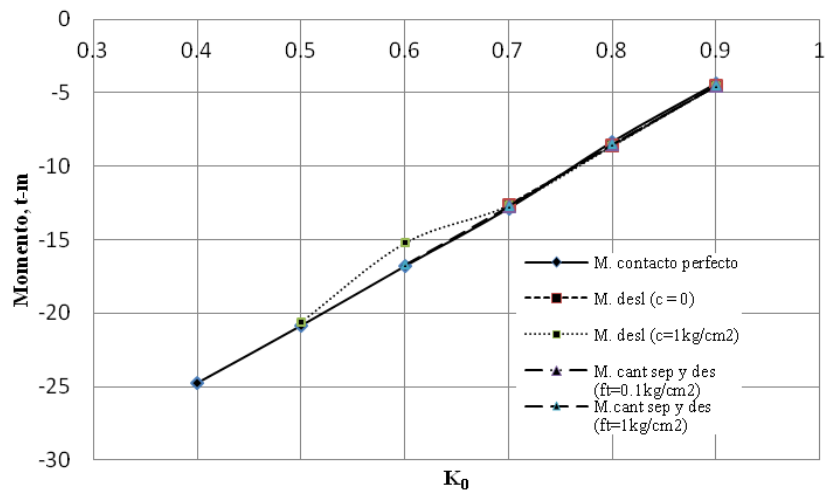
### **7.2 Elementos mecánicos en las zonas donde el esfuerzo axial es máximo (clave, cubeta y hastiales)**

Debido a que se tienen una simetría de los elementos mecánicos entre cubeta y clave, y entre hastiales; se tomó en cuenta solo los elementos mecánicos de cada uno. Se dividió en vertical y horizontal, ya que los esfuerzos máximos axiales coinciden con estos ejes. En términos generales, los momentos flexionantes de los modelos donde se consideran elementos de contacto serán prácticamente iguales con los momentos del modelo con contacto perfecto (figura 7.3). Los momentos flexionantes mantienen una proporción al disminuir la carga lateral en el anillo. Se tienen una relación prácticamente lineal de las curvas momento-relación de carga. Conforme el factor  $K_0$  tienda a la unidad, la deformación del anillo será menor (ver figuras 7.1a y 7.1b); y por tanto, el momento flexionante en estas zonas también será menor. En el modelo donde solo se permite el deslizamiento, se tiene un comportamiento distinto al del modelo sin elementos de contacto, específicamente para un  $K_0$  de 0.6. Para esta relación de carga el deslizamiento juega un papel muy importante en los momentos flexionantes, el cual es menor que en el modelo con contacto perfecto. Ya que es a partir de esta relación de carga en la que se presenta una degradación de la rigidez global del anillo como se observa en las figuras 5.3

y 5.11. En las tablas 5.3 y 5.7 se muestra que el deslizamiento tiene un mayor aumento relativo respecto a una relación de carga superior. Es decir, que conforme disminuya la carga lateral en el anillo, va aumentando el deslizamiento en la interfaz entre revestimientos con una cierta proporción, la cual aumenta dicha proporción al pasar de un valor de  $K_0$  de 0.7 a 0.6. Se pierde, por decirlo de alguna manera, la transmisión de la carga axial en la sección transversal del anillo (figura 7.4). Entonces, al perderse la transferencia de esfuerzos axiales por la presencia del deslizamiento en la interacción entre revestimientos; la compresión en la sección transversal del anillo será menor al del modelo con contacto perfecto y por consecuencia también lo será el momento flexionante.



a)

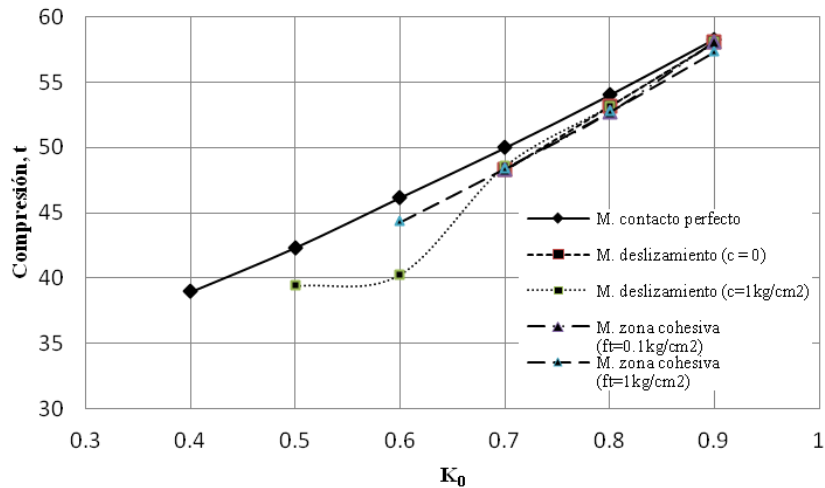


b)

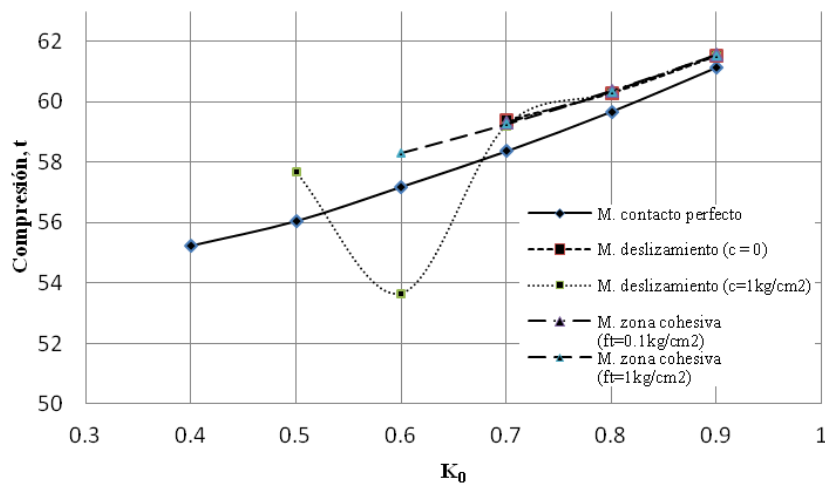
**Fig. 7. 3. Curvas Momento-relación de carga, para un incremento de carga de  $10t/m^2$ :  
a) vertical, b) horizontal**



En la figura 7.4 se muestran las curvas carga axial (compresión)-relación de carga. En estas curvas se observa que debido a la interfaz entre revestimientos, las cargas axiales varían con las cargas axiales del modelo con contacto perfecto. En la figura 7.4a se tienen las curvas en el eje vertical y en la 7.4b se tiene las curvas en el eje horizontal. Las cargas axiales disminuyen conforme la carga lateral sea menor. Las cargas de compresión de los modelos con interfaz en la sección transversal del anillo son menores a las del modelo con contacto perfecto. Caso contrario sucede en la figura 7.4b, donde las cargas axiales son mayores de los modelos con elementos de contacto, respecto a las cargas axiales del modelo con un único anillo. Lo anterior nos estaría indicando la importancia de la carga lateral en el anillo; teniendo, probablemente, una mejor transferencia de esfuerzos axiales en los hastiales, que en las zonas de la clave y cubeta.



a)



b)

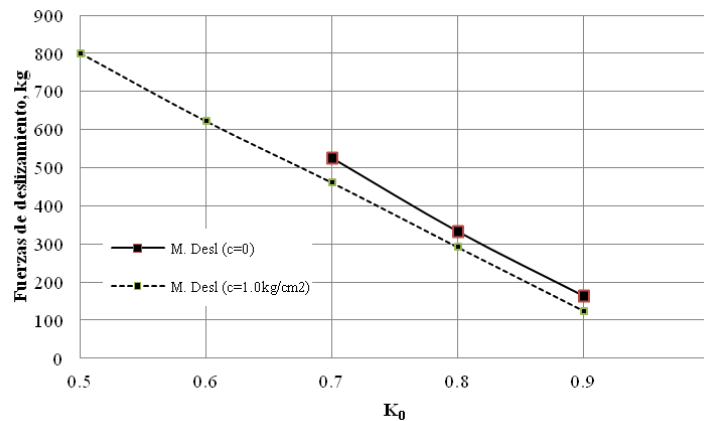
**Fig. 7. 4. Curvas carga axial-relación de carga, para un incremento de carga de 10t/m<sup>2</sup>: a) vertical, b) horizontal**

### 7.3 Fuerzas de deslizamiento en los riñones del anillo

Se comparan las fuerzas de deslizamiento para cada relación de carga, para los modelos considerando solo deslizamiento y permitiendo una cierta cantidad de separación y deslizamiento. Se trata de medir la influencia que guardan los parámetros como la cohesión y la resistencia al esfuerzo a tensión.

#### 7.3.1 Modelo permitiendo únicamente deslizamiento

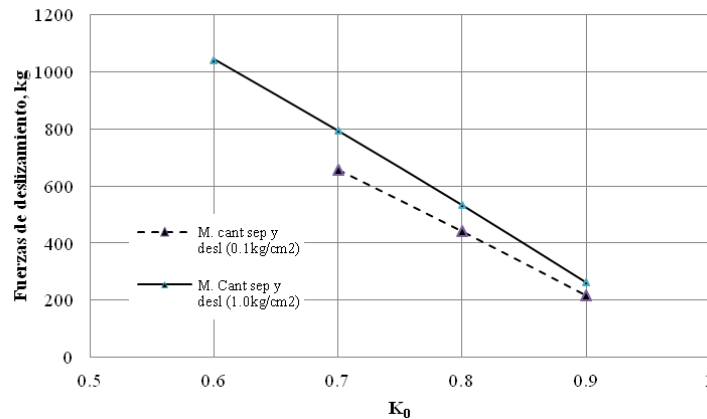
En la figura 7.5 se muestran las curvas de las fuerzas de deslizamiento – relación de carga, del modelo considerando únicamente el deslizamiento en sus dos casos: con cohesión nula y con cohesión mínima. Como las fuerzas de deslizamiento guardan una cierta simetría en los riñones del anillo, se utilizaron los máximos valores para cada relación de carga. Se puede observar en esta figura que las fuerzas de deslizamiento son mayores al tener una cohesión nula. Como al aumentar la cohesión en el modelo provoca que los revestimientos se mantengan unidos; por tanto, la tendencia a deslizar será menor. Para ambos casos, las fuerzas de deslizamiento serán menores, cuando la carga lateral en el anillo sea mayor. Van a presentarse mayores deslizamientos cuando la presión vertical gobierne el comportamiento del anillo.



**Fig. 7. 5. Curvas fuerzas de deslizamiento-relación de carga del modelo considerando sólo deslizamiento, para incrementos de carga de 10t/m<sup>2</sup>**

### 7.3.2 Modelo permitiendo una cierta cantidad de separación y deslizamiento

En la figura 7.6 se muestran las curvas fuerzas de deslizamiento-relación de carga para los dos casos del modelo permitiendo una cierta cantidad de separación y deslizamiento. Se mide la influencia del aumento de la resistencia al esfuerzo de tensión en las fuerzas de deslizamiento en las zonas donde se tienen los máximos deslizamientos (riñones). En este caso, con el aumento de la resistencia a tensión, las fuerzas de deslizamiento disminuyen. Con el aumento de la resistencia del esfuerzo a tensión, se evita que se presenten separaciones; de tal forma, que los revestimientos se deslizarán con una mayor magnitud como se puede observar en el aumento del esfuerzo de fricción de las tablas 6.3 y 6.6. Las fuerzas de deslizamiento aumentan al disminuir la carga lateral en el anillo; ya que los modelos tienden a una mayor deformación presentándose mayores deslizamientos.



**Fig. 7. 6. Curvas fuerzas de deslizamiento-relación de carga del modelo permitiendo una cierta cantidad de separación y deslizamiento, para incrementos de carga de  $10t/m^2$**



## CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrollaron tres modelos numéricos para estudiar el comportamiento global de un anillo representativo de un túnel dovelado del anillo. De particular interés resultó evaluar la interacción entre los recubrimientos primario y secundario. El primer modelo consideró un comportamiento libre en la interfaz entre revestimientos, es decir, que no existe ninguna “ligazón” entre revestimientos, por lo que se puede presentar la separación y el deslizamiento libremente entre ambos. En un segundo modelo se consideró una “ligazón” en la interfaz, permitiendo que se genere únicamente el deslizamiento en la interacción entre ambos revestimientos. Y el tercer modelo, es una combinación de los dos anteriores; donde se le da una cierta “ligazón” en la interfaz entre revestimiento hasta un cierto límite; rebasando este límite se pierde esta “ligazón”. Este último comportamiento corresponde al modelo permitiendo una cierta cantidad de separación y deslizamiento.

El modelo donde se permite separación y deslizamiento presenta el comportamiento más desfavorable. Esto es debido a que no se tiene una compatibilidad de esfuerzos y deformaciones y los revestimientos van a trabajar de forma independiente. Lo que provoca que el anillo sea muy flexible, porque el momento de inercia es la mitad si se considera un solo anillo. A pesar de que se presentan deslizamientos en los riñones del anillo, son las separaciones las que gobiernan el comportamiento global del anillo. Al presentarse una separación, se pierde toda transferencia de esfuerzos de cualquier tipo. Se observó que, incluso al aumentar el valor de la cohesión en los elementos de contacto, el comportamiento del anillo es el mismo. El valor de la cohesión es una propiedad de los materiales y no influye en la generación de separaciones. Sin embargo, a pesar de que en la interfaz no existe ninguna “liga” mecánica o química, factores como la rugosidad de las superficies de los revestimientos probablemente contribuirá a que los revestimientos estén unidos en un principio. Por tanto, este comportamiento se puede considerar como un caso conservador.

Para los modelos donde se permite únicamente el deslizamiento, el comportamiento es muy similar al comportamiento de un modelo considerando ambos recubrimientos unidos monolíticamente. Como los revestimientos van a estar unidos en todo momento, se tiene una compatibilidad de esfuerzos y deformaciones. La presencia de deslizamientos en la interfaz entre revestimientos va a influir en el comportamiento global del anillo. Ya que los deslizamientos, dependiendo de la relación de cargas, pueden provocar que se tenga una degradación de la rigidez global del anillo. Los máximos deslizamiento se presentan en los riñones del anillo y estos varían según los siguientes parámetros:

- El valor del factor  $K_0$
- El valor de la cohesión
- El valor del coeficiente de fricción

A valores pequeños del factor  $K_0$ , los deslizamientos serán más grandes; y en caso contrario cuando se tienen valores de  $K_0$  cercanos a la unidad. La carga lateral en el anillo, ayudará a éste manteniéndolo confinado. Para la relación de carga de 0.6 se tiene un comportamiento intermedio entre un comportamiento prácticamente igual al de un solo anillo con deslizamientos relativamente pequeños; y un comportamiento con deslizamientos relativamente grandes. Con un aumento de la cohesión, se tiene una disminución de los deslizamientos. Y de igual forma, al aumentar el coeficiente de fricción, los revestimientos van a permanecer en contacto simple y los deslizamientos serán menores.

Sin embargo, este comportamiento es el otro extremo del modelo con separación y deslizamiento. No hay nada que nos garantice que los revestimientos se van a mantener unidos en todo instante. Este comportamiento sería ideal, ya que a pequeños incrementos de la cohesión existe una mejor compatibilidad de esfuerzos y deformaciones.

Al proporcionarle una cierta resistencia al esfuerzo de tensión a los revestimientos, se evita hasta cierto punto la presencia de separaciones en la interfaz. Los deslizamientos son menores que en el caso donde no se permite la separación. A pesar de que hay deslizamientos, el comportamiento es muy similar al del modelo sin tomar en cuenta los elementos de contacto. Así como para el modelo donde solo se permiten los deslizamientos se tienen parámetros que influyen en la presencia de éstos, para este caso se le agrega la resistencia al esfuerzo de tensión. Con un aumento de la resistencia a la tensión, el comportamiento se asemejará más al comportamiento de un único anillo. Así como también, provoca que los revestimientos se mantengan unidos a mayores incrementos de carga; por tanto, los deslizamientos aumentarán.

De forma general, el comportamiento de un anillo con revestimiento primario y revestimiento secundario se encuentra relacionado con:

- La presencia de separaciones y deslizamientos pueden degradar la rigidez global del anillo.
- El valor del factor  $K_0$  influye en el comportamiento del anillo. Con valores pequeños del factor, los deslizamientos son más grandes. Las deformaciones del anillo serán mayores al disminuir este factor. Con valores cercanos a la unidad, el comportamiento del anillo es similar al de un anillo con contacto perfecto.

- A pequeños incrementos de la resistencia al esfuerzo de tensión, mayores los deslizamientos en la interfaz. El comportamiento se asemejará al de un único anillo.
- A mayores valores de la cohesión y del coeficiente de fricción, menores los deslizamientos en la interfaz. Sin embargo, la cohesión no influye en las zonas donde aparecen separaciones





## REFERENCIAS

1. Abbas Majdi, Hamed A., Kayumars E. (2010). “Numerical evaluation of the influence of bolted – and non-bolted – joints on segmental tunnel lining behavior in line 4 Tehran Subways”. 6<sup>th</sup> Asian rock Mechanics Symposium, Octubre 2010, Nueva Delhi , India.
2. ACI 318 (2008). “Building code Requirements for Structural Concrete and Commentary”. American Concrete Institute Committee 318 (ACI 318.08). Detroit, Michigan.
3. ANSYS (2006). “Documentation for ANSYS”. ANSYS Workbench Release 11.0. ANSYS Inc. USA.
4. Blom CBM (2002). “Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils”. Tesis de Doctorado, Universidad Tecnológica de Delft.
5. Blom CBM (2003). “The structural (un)safety of tunnels explained by analytical approach”. Heron, Vol. 48, No. 1, pp. 17-32.
6. Carnicero A. “Introducción al método de elementos finitos”. Formato disponible en: [http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/sistemasinteligentes/FFlexible/Introduccion\\_al\\_MEF.pdf](http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/sistemasinteligentes/FFlexible/Introduccion_al_MEF.pdf)
7. CONAGUA (2011). Programa de sustentabilidad hídrica del valle de México, Túnel Emisor Oriente, Avances y retos tecnológicos. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/sustentabilidadhidricadelValledeMexico/AvancesRetos.aspx>
8. Ding W.Q., Yue Z.Q., Tham L.G., Zhu H.H., Lee, C.F. and Hashimoto T. “Analysis of shield tunnel”. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, Vol. 28, pp. 57-91.
9. Galera F. (2008). “Métodos constrictivos para la excavación de túneles en suelos”. Simposio Presente y futuro de las obras subterráneas en la minería e infraestructuras chilenas. Santiago de Chile, 9 de Enero 2008.
10. Ge X. (2002). “Response of a shield-driven tunnel to deep excavations in soft clay”. Tesis de Doctorado, Universidad de Ciencias y Tecnología de Hong Kong.
11. Gutiérrez P. “Análisis y diseño del revestimiento de un túnel en suelos del valle de México”. Proyecto terminal en Ingeniería Civil, Universidad Autónoma Metropolitana.
12. Luttikholt (2007). “Ultimate Limit State Analysis of a Segmented Tunnel Lining – Results of full-scale test compared to finite element analysis -”. Facultad de Ingeniería Civil y Geociencias, Universidad Tecnológica de Delft. Disponible en: [http://www.mechanics.citg.tudelft.nl/~pierre/MSc\\_projects/reportLuttikholt.pdf](http://www.mechanics.citg.tudelft.nl/~pierre/MSc_projects/reportLuttikholt.pdf)
13. NTC-C (2004). “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto”. Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal, Tomo I, No. 103-Bis, México.

14. Peña F (2009). “Comportamiento estructural de las juntas entre dovelas del Túnel Emisor Oriente”. Informe realizado para la Comisión Nacional del Agua. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
15. Peña F (2010). “Evaluación de modelos simplificados para el análisis estructural de túneles dovelados”. Informe realizado para la Comisión Nacional del Agua. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
16. Peña F., Meli R., Galván A. (2010). “Resultados del ensaye experimental de juntas entre dovelas”. Informe elaborado para Ingenieros Civiles Asociados. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
17. Popov E (1983). “Introducción a la mecánica de sólidos”. Editorial Limusa, México, versión en español 1983. Capítulo 6, Tema: vigas curvas, pág. 255 – 261.
18. 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, UNAM.
19. Yoo C. (2009). “Performance of multi-faced tunneling – A 3D numerical investigation”. Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 24, pp. 562-573.
20. Zienkiewicz O.C. y Taylor R.L. “El método de los elementos finitos”. Volumen I, cuarta edición en español.



