

155
29.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE
DOVELAS PARA REVESTIMIENTO DE
TUNELES EN SUELOS BLANDOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

RODOLFO JOSE SALMON PEREYRA

MEXICO, D. F.

1987



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

Capítulo	Página
1.0 Introducción	1
1.1 Generales	1
1.2 Objetivos del estudio	2
2.0 Antecedentes	5
2.1 Generalidades	5
2.2 Criterios de análisis y diseño, y comportamiento observado del revestimiento de túneles en suelo blando	5
2.3 Ensayos experimentales en laboratorio de recubrimiento para túneles	10
3.0 Programa experimental	14
3.1 Objetivos	14
3.2 Descripción del espécimen ensayado	14
3.3 Criterios de selección del estado de cargas sobre el espécimen	15
3.4 Descripción del ensayo	18
3.4.1 Condiciones de apoyo y de carga	18
3.4.2 Instrumentación	20
3.4.3 Programa de pruebas	21

II

4.0	Resultados	23
4.1	Introducción	23
4.2	Resultados de los ensayos	23
4.2.1	Relaciones entre carga y desplazamiento	23
4.2.2	Elementos mecánicos obtenidos	27
4.2.3	Descripción del agrietamiento y configuración del espécimen en los niveles de cargas máximos	32
5.0	Interpretación de resultados	35
5.1	Introducción	35
5.2	Descripción de los modelos analíticos empleados	35
5.3	Comparación de desplazamientos obtenidos con métodos analíticos y experimentales	37
5.4	Capacidad máxima	41
5.4.1	Criterio que se propone para definir la capacidad máxima y comparación con los resultados de laboratorio y del túnel de Iztapalapa	41
5.4.2	Comentarios a la aplicación del criterio de capacidad máxima propuesto y aplicación a otros casos de túneles	45
6.0	Conclusiones y recomendaciones	48
6.1	Conclusiones	48
6.2	Recomendaciones	52
7.0	Referencias	55

1.0 INTRODUCCION

1.1 Generales

En los últimos años se ha recurrido en diversas partes del mundo a una nueva técnica de construcción de túneles en suelo blando; ésta consiste en la excavación del terreno mediante un escudo que a su vez coloca el recubrimiento, el cual es formado por dovelas prefabricadas de concreto reforzado. Estas dovelas se construyen mediante técnicas especiales que garantizan un buen control de calidad del producto terminado. Para formar el anillo del túnel, las dovelas se atornillan unas con otras, tanto en el sentido circunferencial, como en el longitudinal de éste. También dentro del proceso constructivo del túnel se recurre a rellenar mediante inyecciones la holgura que existe entre un anillo ya armado y el terreno.

Esta técnica ha sido aplicada también en la Ciudad de México especialmente para la construcción de túneles para el sistema de drenaje de la ciudad, y existe el interés de las autoridades del gobierno de la ciudad de aplicar este procedimiento en obras del tipo Metro subterráneo.

El comportamiento estructural de los túneles construidos con dovelas en suelos blandos depende en gran medida del procedimiento de construcción empleado y de las rigideces del recubrimiento y del terreno.

Para el análisis de este tipo de estructuras se suele recurrir a métodos simplificados que consideran la hipótesis de anillo continuo, y a una representación simplista de las presiones del terreno, considerando tanto acciones verticales como horizontales;

ignorando el problema de la interacción suelo-estructura.

En ciertos casos se recurre a modelos más elaborados del recubrimiento y suelo, pero ignorando problemas como el efecto de la holgura indicada anteriormente.

El comportamiento del recubrimiento a base de dovelas, observado en diversos países e incluso en México, sugiere que este sistema estructural debe revisarse también dentro de un criterio de deformaciones admisibles (o condiciones de servicio), puesto que se producen daños significativos antes de que se sobrepase la resistencia última de la estructura.

1.2 Objetivos del estudio

Este estudio tiene como objetivos verificar las hipótesis que se hacen en los análisis y diseño del recubrimiento a base de dovelas para túneles en suelo blando.

Esto es especialmente importante en este tipo de estructuras, ya que para lograr un nivel adecuado de seguridad estructural no basta sólo definir un nivel de capacidad máxima asociada a un criterio de resistencia última, sino también es necesario definir el nivel de deformaciones a partir del cual se empiezan a tener problemas estructurales.

También con un conocimiento más completo del problema podría decidirse si este tipo de recubrimiento puede funcionar como definitivo, sin que tenga que colarse posteriormente un segundo recubrimiento de concreto reforzado con fines estructurales, lo que conduciría a un ahorro bastante significativo en el costo total de la construcción.

Para cumplir con los objetivos anteriormente mencionados se realizaron en el Instituto de Ingeniería dos fases de

investigación.

En la primera fase de esta investigación se instrumentaron dos anillos de dovelas en un tramo de túnel del sistema de drenaje semiprofundo en Iztapalapa (ref. 1). Como resultado de las mediciones efectuadas en estos anillos se obtuvieron distribuciones aproximadas de deformaciones y elementos mecánicos, los que se compararon con los resultantes de aplicar las hipótesis de análisis empleadas usualmente para el diseño de este tipo de recubrimiento. Se encontró que ambos resultados concuerdan aproximadamente; sin embargo, los desplazamientos obtenidos a partir de los mencionados análisis fueron bastante menores que los obtenidos en el túnel a partir de medidas de convergencia. Esto se atribuyó al efecto de las rotaciones de las juntas de dovelas, que no se tomó en cuenta en el análisis efectuado.

En la segunda parte de la investigación, cuyos resultados se describen y analizan en este informe, se efectuaron estudios experimentales en el Laboratorio de Estructuras del Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., con un espécimen de dos anillos de dovelas idénticos a los empleados en el túnel de Iztapalapa. También se efectuaron estudios analíticos del comportamiento estructural del espécimen. Este fue instrumentado con medidores de deformaciones en el acero de refuerzo y en el concreto, como también con medidores eléctricos y mecánicos de desplazamientos. Las mediciones se registraron mientras el espécimen era sometido a cargas radiales conocidas mediante gatos hidráulicos.

Los objetivos de esta segunda parte de la investigación son de manera global los mencionados con anterioridad. Se pretendió mejorar el conocimiento de diversos aspectos del comportamiento

estructural de anillos de dovelas, cuando éstos son sometidos a cargas conocidas. Entre estos aspectos estructurales puede mencionarse la verificación de modelos analíticos empleados usualmente en el análisis de este tipo de estructuras. Otro ejemplo es el efecto que tienen las rotaciones de las juntas de dovelas como parámetro del comportamiento, y que debe tomarse en cuenta según se deduce de los resultados de la primera fase de la investigación. También se pretendía definir criterios de capacidad máxima del anillo de dovelas, especialmente ver a partir de que niveles de deformaciones la seguridad estructural de los anillos de dovelas era inadecuada. Este problema también se detectó en la primera parte de esta investigación, aun cuando en México ya existían experiencias anteriores con la ocurrencia de deformaciones importantes en túneles en suelo blando, construidos a base de dovelas.

En esta segunda parte de la investigación no se pretendía representar rigurosamente en el laboratorio a las acciones del terreno, sino más bien aplicar cargas conocidas a la estructura con el fin de mejorar el conocimiento de sus diversos aspectos estructurales. Sin embargo, tal como se describe en este estudio, algunos de sus resultados más importantes ayudan a explicar el comportamiento estructural de los anillos de dovelas del túnel de Iztapalapa, con las condiciones específicas de profundidad del terreno, características de éste, y nivel freático existente.

2.0 ANTECEDENTES SOBRE EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE REVESTIMIENTO DE TUNELES EN SUELO BLANDO.

2.1 Generalidades

El comportamiento observado en recubrimiento de concreto en túneles excavados en suelos blandos, según se deduce de la literatura existente (referencias 5, 9, 10 y 11), muestra que las deformaciones del recubrimiento permiten que se produzca una redistribución de las presiones en el terreno con respecto al túnel, y como resultado de esta interacción se producen elementos mecánicos menores de los que se tendrían en un recubrimiento más rígido. En general mientras más flexible es el recubrimiento, los elementos mecánicos serán menores, y por tanto se requerirán secciones también de dimensiones menores. Esto se debe a que el túnel bajo las acciones del terreno pasa de un estado inicial de forma circular a una forma de elipse, aumentando el confinamiento inicial, con los consiguientes efectos benéficos desde el punto de vista de elementos mecánicos (ref. 10). Este comportamiento depende de la relación de rigidez a flexión del suelo relativo al recubrimiento, lo que a su vez depende de propiedades del recubrimiento como son el módulo de elasticidad E , la relación de Poisson ν , el radio del túnel R , y el momento de inercia I . Así mismo depende de las propiedades del terreno, especialmente el módulo de elasticidad E_t , módulo de Poisson ν_t , y coeficiente de presión pasiva K_0 (ref. 10).

2.2 Criterios de análisis y diseño, y comportamiento observado del revestimiento de túneles en suelo blando

El problema de análisis y diseño de un túnel en suelo blando

considerando el efecto de la interacción con el terreno que lo rodea, ha sido estudiado por diversos autores (referencias 9, 11, 12 y 14). Sin embargo, aun no se ha llegado a un conocimiento definitivo del problema, y más bien estos estudios son sólo una referencia aplicable a casos específicos y simplistas, dejando aspectos importantes a juicio del ingeniero que analiza y diseña estos túneles.

Estos estudios parten de la hipótesis de que se conocen las características estructurales del túnel, en particular la rigidez de éste. Debido al comportamiento no lineal, agrietamiento, y especialmente a las juntas que unen a los segmentos prefabricados que forman el anillo, la rigidez del túnel es diferente a la que se supone con las hipótesis tradicionales. Se menciona por ejemplo en la literatura (ref. 13), que debido a la influencia de las juntas de los mencionados segmentos, la rigidez del túnel puede reducirse hasta la cuarta parte en el caso de un anillo formado por ocho segmentos.

El problema anteriormente descrito se vuelve más complejo si se considera la influencia de la excavación del túnel y de su proceso constructivo. Como lo describen Lo y sus colaboradores (ref. 4), la excavación del túnel en suelos blandos produce una holgura alrededor de éste, la magnitud de esta holgura dependerá de las características de la máquina que excave y del tipo de recubrimiento; sin embargo, puede lograrse una disminución de esta holgura mediante una adecuada inyección de mortero. La deformación en el recubrimiento ocurre cuando éste entra en contacto con el suelo, y generalmente en la clave el diámetro disminuye, y por el contrario el diámetro horizontal se expande.

Por las razones anteriores, en la actualidad aun no se cuenta con criterios razonables y confiables, que permitan analizar y diseñar el recubrimiento de túneles excavados en suelos blandos.

En la ref. 5, Chase propone un criterio simplista para diseñar estos tipos de recubrimientos. Este autor sugiere que el criterio de diseño de un recubrimiento circular de concreto en suelo blando se base en diseñar el túnel para la superposición de resultados de dos análisis. En el primer análisis se supone que el recubrimiento está sujeto a una presión uniforme radial igual a la presión total del terreno sobre el túnel. En el segundo análisis debe considerarse una presión uniforme vertical de un valor tal que produzca un cambio de diámetro en la clave igual a $\Delta D/D$, suponiendo para este parámetro un valor de 0.45%, que es sugerido por Peck (ref. 11). Estas condiciones de análisis se muestran en la fig. 2.1. Este criterio de diseño se aplicó en el túnel construido para el metro subterráneo de la Ciudad de México en el tramo de Tacubaya ubicado en la zona de transición (ref. 5). El anillo de este túnel estaba formado por tres dovelas con articulaciones de tipo "rodilla". Chase muestra (ref. 5) que si se toma en cuenta el agrietamiento y el efecto de las juntas de las dovelas, se reducen significativamente los valores de los elementos mecánicos de diseño.

En la primera parte de esta investigación (ref. 1), se instrumentaron con medidores de deformaciones dos anillos de dovelas de 3.85 m de diámetro exterior, ubicados en un tramo del drenaje semiprofundo de Iztapalapa. Las características del terreno corresponden a las de suelo blando. Un anillo se ubicaba en la posición 1 + 013.69 del túnel y el otro en 1 + 026.80. Las dovelas

de estos anillos eran idénticas a las estudiadas en la segunda parte de esta investigación.

La instrumentación de los anillos del túnel de Iztapalapa consistió en medidores de deformaciones en el acero de refuerzo y el concreto durante un periodo de aproximadamente cuatro meses, con el objeto de obtener la distribución de deformaciones y elementos mecánicos en los dos anillos de dovelas del túnel. Como resultado de esta investigación (ref. 1), se encontró que los elementos mecánicos obtenidos a partir de las deformaciones de campo que se consideraron confiables, concuerdan aproximadamente con los elementos mecánicos obtenidos con base en las hipótesis simplistas de análisis empleadas en el diseño de las dovelas de este túnel. Los momentos flexionantes obtenidos a partir de las deformaciones de campo fueron mayores que los obtenidos con los mismos métodos de análisis, pero empleando las condiciones de campo específicas de profundidad y de nivel freático de los anillos instrumentados. También se obtuvieron los cambios de diámetro en el túnel a partir de medidas de convergencia efectuadas por una empresa particular, y se compararon con los que se obtendrían empleando las hipótesis de análisis usuales para estas estructuras (anillo continuo y sin interacción suelo-estructura), y con la distribución de presiones empleada para el análisis de diseño de estas dovelas, pero modificando los valores de estas presiones con base en las condiciones específicas de campo. Se encontraron diferencias importantes entre los desplazamientos calculados y los medidos. Estos últimos fueron en los casos más extremos algo mayores a dos veces los desplazamientos calculados, aun cuando para estos se consideró un módulo de elasticidad reducido al 60 % del que se

obtendría con los criterios del Reglamento de Estructuras de Concreto para el D.F. (ref. 2). Estas diferencias se atribuyeron al efecto de las rotaciones de las juntas que no se consideraron en el análisis.

En la literatura pueden encontrarse ejemplos de la importante flexibilidad en túneles construidos a base de dovelas en suelos blandos. Puede mencionarse el caso de un túnel con estas características, construido en la zona del lago de la Ciudad de México a una profundidad de 26 m. Este túnel tenía un diámetro exterior de 6,2 m, con 25 cm de espesor, y estaba constituido por cuatro dovelas y una clave con juntas de tipo rodilla (ref. 7). En este caso los autores observaron un incremento del diámetro horizontal del orden de 0.01D después de dos semanas de excavado el túnel y de haber recibido las inyecciones de mortero en las holguras entre las dovelas y el terreno. Después de este lapso, la velocidad de deformación del túnel se redujo apreciablemente, pero alcanzando aun deformaciones importantes del orden de 0.05D, después de lo cual hubo necesidad de apuntalar el túnel. En esta misma referencia se menciona que en este túnel se inició el agrietamiento en las zonas en tensión del recubrimiento para cambios de diámetro horizontal del orden de 0.02D.

En la tabla 2.1 se resumen algunas características de túneles excavados en suelos blandos, en especial los valores de $\Delta D/D$ medidos en la clave y obtenidos en base a mediciones de campo efectuadas en diversos lugares (ref. 4), como también en la zona del lago de la Ciudad de México (referencias 1 y 9). Esta información da una idea de los valores de $\Delta D/D$ en túneles excavados en suelo blando, que se esperan para diferentes tipos de

recubrimiento y profundidades. Así mismo se observan en la tabla 2.1 valores máximos medidos en campo correspondientes a los casos de túneles del drenaje para la Ciudad de México. En éstos se tenían anillos formados por dovelas de concreto con uniones de rodilla, y se alcanzaron valores máximos para D/D que oscilaron entre 3.7 % y 5.3 %.

2.3 Ensayos experimentales en laboratorio de recubrimiento para túneles

De los comentarios anteriores se deduce que no es factible todavía representar en un laboratorio el comportamiento del conjunto túnel-suelo; y aun cuando en algún caso esto se haga, se estaría estudiando sólo un caso específico que generalmente no sería aplicable a otro caso encontrado en la práctica.

Esto ha hecho que para estudiar en laboratorio el comportamiento de un túnel, en algunos casos se ha recurrido a ensayos de recubrimiento de túneles bajo cargas concentradas y radiales de valor conocido. Ejemplos de este trabajo son los de W. Gamble (ref. 8), Ferrera y Paul (ref. 15), Paul y Sinnamon (ref. 17), Paul y Ferrera (ref. 16).

W. Gamble efectuó ensayos experimentales con anillos de siete dovelas de 5.3 m de diámetro con doce puntos de aplicación de la carga anteriormente mencionada. El criterio de aceptación requerido en este diseño era alcanzar deformaciones de al menos 0.005D sin tener daños apreciables; en el ensayo se encontró que se alcanzaba aproximadamente 0.012D sin llegar a niveles de daños apreciables. Este criterio de aceptación también es empleado por Hansmire (ref. 10), quien se basa en una deformación de 0.005D para el cambio de diámetro y así calcular los elementos mecánicos de diseño. Un

criterio similar es utilizado por Chase, como se mencionó anteriormente.

Ferrera y Paul (ref. 15) ensayaron dos especímenes que representaron a revestimientos continuos de concreto bajo cargas radiales. En el caso del espécimen sin reforzar se llegó a la falla con cambios de diámetro de aproximadamente $\Delta D/D$ igual a 0.02; para el caso del espécimen reforzado, se llegó a la falla con un valor $\Delta D/D$ igual a 0.04. Las cargas aplicadas fueron de tipo radial con un total de 12 puntos de aplicación de carga alrededor de la circunferencia del túnel. Estas cargas eran de dos tipos: en la zona de la proximidad de la clave se tenían las llamadas cargas activas, y en la parte lateral del túnel las cargas pasivas. Las líneas de presión hidráulica entre estos dos tipos de cargas eran diferentes, y el criterio de aplicación de carga consistía en aumentar los valores de las cargas activas, ajustando la presión de la línea de las llamadas cargas pasivas de modo que éstas siguieran una relación lineal carga-desplazamiento previamente establecida.

Ferrera y Paul encontraron igualmente que la relación carga-deformación del túnel no tiene características dúctiles, ya que para cargas cercanas a la última, no ocurrieron las deformaciones importantes que caracterizan a un tipo de falla dúctil. Estos autores encontraron que en los especímenes ensayados se produjeron aplastamientos importantes en el último 20% de la historia de carga. Esta característica y el agrietamiento importante que ocurrió aproximadamente para niveles cercanos a la mitad de la carga última, hacen que estos autores sugieran que la capacidad última del revestimiento no pueda utilizarse en su totalidad, y que más bien debiera emplearse un criterio de diseño

basado en condiciones de servicio.

También en la referencia anterior se estudiaron especímenes de concreto reforzado con fibra de vidrio, los que no mostraron una resistencia mayor que la de los especímenes sin reforzar, aunque si debe mencionarse que éstos últimos tuvieron un tipo de falla menos dúctil. Otra conclusión importante encontrada en la parte experimental del estudio anterior fue que un límite inferior de las deformaciones de compresión en el concreto asociadas a las cargas de falla, osciló entre 0.008 y 0.024, valores bastante mayores a los que sugieren conocidos reglamentos de construcción, como son el del Departamento del Distrito Federal (ref. 2), y el ACI (ref. 3). Esto también sugiere el nivel de daños asociado a las cargas últimas, y apoya el criterio de diseño basado en condiciones de servicio.

A raíz de los resultados experimentales, Ferrera y Paul hacen notar la importancia de las cargas pasivas descritas anteriormente, generadas por reacciones provocadas por la tendencia del túnel a expandirse lateralmente. Las cargas pasivas tienen una importancia fundamental para que el túnel adquiera una forma oval, lo que influye en los momentos y curvaturas en las secciones críticas. Según estos autores, la resistencia de un túnel puede incrementarse varias veces si se aumentan las rigideces de las fuerzas pasivas.

2.4 Estudios analíticos del problema

En general los estudios de este tipo se basan en la aplicación del método de elementos finitos. Como ejemplo de aplicación de este método al caso del estudio de túneles construidos con dovelas en suelos blandos puede mencionarse el trabajo de Sánchez Trejo y A. Moreno (ref. 9). Estos autores recurren a la representación de

los anillos de dovelas por medio de elementos finitos, y al suelo mediante resortes en un caso, o con una malla de elementos finitos en otros casos. Los resultados que obtuvieron se correlacionan aceptablemente con los experimentales; sin embargo, debe también observarse que esto depende de los valores de los parámetros que representan a las propiedades del terreno, estructura, y forma como se representa la acción del terreno.

Ferrera y Paul (ref. 15) igualmente recurren al método de elementos finitos para explicar los resultados experimentales con anillos continuos que encontraron en esta investigación. Ellos representan al revestimiento con elementos finitos del tipo viga, y al confinamiento mediante resortes. Para las propiedades de los materiales de los elementos viga, optaron por tomar en cuenta el comportamiento no lineal de las curvas esfuerzo-deformación observadas en el concreto y acero. Los resultados que estos autores encontraron en este estudio son comparables de manera aceptable con los resultados experimentales de los especímenes ensayados por ellos.

Debe mencionarse que los estudios anteriormente citados no dan recomendaciones a nivel de aplicación para el diseño de revestimientos de túneles en suelos blandos; se trata más bien de intentos de representar de manera analítica el comportamiento estructural observado en casos específicos, quedando aun por llegar a recomendaciones a nivel de diseño.

3.0 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Objetivos

Los objetivos del programa experimental llevado a cabo en el Laboratorio de Estructuras del Instituto de Ingeniería, fueron los de poder comparar el comportamiento observado en los ensayos experimentales de un espécimen de anillos de dovelas, y la respuesta obtenida con algunos criterios analíticos.

En esta investigación no se pretendió reproducir exactamente las sollicitaciones del terreno sobre la estructura, ni la interacción entre ésta y el suelo. El objetivo de esta investigación era estudiar el comportamiento de la estructura bajo un estado de cargas conocido, el cual está relacionado con ciertas hipótesis de distribución de presiones del terreno sobre el túnel. Esto se logró mediante la aplicación de cargas concentradas en los anillos de dovelas; los criterios de selección de los valores y distribución de estas cargas se comentan en la sección 3.3 de este trabajo.

3.2 Descripción del espécimen ensayado

El espécimen ensayado consistió en dos anillos de dovelas unidos entre sí mediante tornillos de fijación, fig.3.1, típico en estos sistemas de dovelas.

Cada anillo de dovelas está formado por cinco de éstas y una clave, unidas en el sentido circunferencial del túnel con tornillos semejantes a los del sentido longitudinal, fig.3.1. Estos anillos de dovelas fueron diseñados por la empresa Okumura Corporation (ref. 6) para el tramo de drenaje semiprofundo construido en Iztapalapa, Ciudad de México. La construcción de las dovelas del espécimen ensayado se efectuó siguiendo la práctica usual empleada

en dovelas similares para el mencionado tramo de drenaje. El colado se efectuó en moldes metálicos, con procedimientos de vibrado especiales y curado al vapor con que se construyen estas dovelas, por estos motivos la resistencia del concreto alcanzada al efectuar los ensayos fue de 600 kg/cm². Después de elaboradas las dovelas en su planta de construcción, se llevaron al Laboratorio de Estructuras del Instituto de Ingeniería, donde fueron armadas con los tornillos de fijación mencionados, operación realizada por el personal de la empresa constructora del túnel del drenaje semiprofundo de Iztapalapa.

3.3 Criterios de selección del estado de cargas sobre el espécimen

La selección del estado de cargas sobre el espécimen se hizo siguiendo los objetivos que se comentan en la sección 3.1 de este informe. Las cargas que se aplicaron fueron concentradas y formando ángulos específicos entre ellos, como se aprecia en la fig.3.2. La distribución de estas cargas se seleccionó con el criterio de obtener un diagrama de momentos flexionantes semejante en forma y valores al diagrama de momentos flexionantes de diseño empleado por Okumura Corporation (ref. 6), el cual se muestra en la fig.3.3a, correspondiente a un anillo de dovelas típico (de 1 m de longitud en el sentido longitudinal del túnel) en el tramo de drenaje semiprofundo construido en Iztapalapa. Se pretendió también representar el nivel de cargas axiales en la sección transversal existentes en las dovelas según el análisis efectuado en la referencia anterior, fig.3.3b.

En la figura 3.4 pueden observarse los diferentes diagramas de elementos mecánicos obtenidos de un análisis estructural de los

anillos de dovelas con cargas concentradas para un nivel correspondiente a la capacidad máxima esperada en los gatos hidráulicos instalados en el modelo. Este análisis se efectuó antes de ejecutar el ensayo y bajo la hipótesis de tener un comportamiento como vigas continuas en el intervalo elástico. Estos diagramas corresponden a la distribución y valores de las cargas concentradas que se muestran en la fig.3.5.

Adicionalmente se aplicaron otros dos tipos de carga incrementando la relación $P1/Pv$ con respecto a la anterior relación de carga. Pv es la carga concentrada en la clave del anillo, y $P1$ es la carga concentrada aplicada lateralmente en el anillo.

La relación $P1/Pv$ correspondiente a la primera condición de carga (condición I), fig. 3.6, fue de 0.56. Los otros dos tipos de carga mencionados, condiciones de carga tipo II y III, tuvieron para $P1/Pv$ las relaciones 0.87 y 1.09 respectivamente, como se aprecia en las figuras 3.7 y 3.8. Estos últimos valores corresponden a los máximos alcanzados en los ensayos respectivos. Las condiciones de carga II y III están asociadas a las máximas capacidades de los gatos, tanto en la de carreras disponibles de los émbolos en los gatos de cargas verticales (condición de carga tipo II), como en la capacidad de presión de las líneas respectivas (condición de carga tipo III). No obstante estas limitaciones de los gatos, para estos niveles de carga, el daño en la estructura, y las deformaciones asociadas fueron importantes, como se comenta en la sección respectiva de este informe.

Los diagramas de elementos mecánicos correspondientes a las condiciones de carga tipo II y III se muestran en las figuras 3.9 a la 3.12. Estos elementos mecánicos se obtuvieron a partir de

análisis con elementos finitos tipo viga y considerando de manera simplificada que el anillo es continuo.

Los valores máximos de los elementos mecánicos obtenidos con el criterio de análisis anterior, y para las tres condiciones de carga se resumen en la tabla 3.1. Estos valores se expresan como porcentajes de los valores de los elementos mecánicos obtenidos con el mismo criterio de análisis, pero con las cargas de diseño propuestas por Okumura Corp. (ref. 6). Análogamente pueden observarse en esta tabla estos mismos elementos mecánicos máximos, pero ahora expresados como porcentajes de los valores obtenidos de análisis similares a los anteriores considerando condiciones de carga específicas del túnel en Iztapalapa (por ejemplo, profundidad del túnel y nivel freático).

La carga normal existente en las secciones del túnel, influye en los momentos y curvaturas de las zonas críticas, características que a su vez están relacionadas con la tendencia del túnel a adquirir una forma oval. A mayor carga normal en las secciones del túnel, éste tendrá deformaciones por flexión menores, y por lo tanto una mayor capacidad de resistir eficientemente las acciones del terreno, ya que los esfuerzos en compresión en el túnel generalmente son bastante menores que los resistentes por el concreto.

El valor de esta carga normal se toma en este trabajo como una medida del confinamiento existente en el túnel, tanto en el laboratorio, como en el campo. Como en el caso del laboratorio existe una relación entre los valores P_1/P_v y la carga normal anterior, puede tomarse también a la relación P_1/P_v como una medida del confinamiento existente en los anillos de dovelas. Para

relacionar este confinamiento con el existente en el túnel según los criterios simplificados mencionados, puede recurrirse a los valores de la tabla 3.1. De esta tabla se concluye que el mínimo confinamiento, medido como carga normal, se obtuvo en la condición de carga I, en la que se alcanza sólo el 16 % del valor de la carga normal que existiría en el túnel con hipótesis de análisis simplificados y considerando las condiciones de campo. En el caso de la condición de carga III, se tiene el máximo confinamiento y el porcentaje anterior subiría al 78 %, con lo cual puede afirmarse que con esta condición de carga se estaría representando aproximadamente el confinamiento existente en el túnel de Iztapalapa.

3.4 Descripción del ensayo

3.4.1 Condiciones de apoyo y de carga

La distribución de elementos mecánicos que se propone en la sección 3.3 de este informe pudo obtenerse experimentalmente mediante la aplicación de cargas concentradas originadas por gatos hidráulicos. La ubicación de estos gatos se aprecia en la fig. 3.13. Por medio de cuatro gatos con capacidad de 28 ton cada uno (dos en cada lado del túnel), se intentó representar aproximadamente el confinamiento lateral del terreno; el valor de cada una de estas cargas se identifica como P1. Se pretendió representar la acción del terreno sobre la clave del anillo mediante las cargas de dos gatos de 100 ton de capacidad; el valor de cada una de estas cargas se identifica como Pv.

Todos los gatos contaban con una articulación esférica en sus bases, fig. 3.14, y el extremo del émbolo del gato se apoyaba en

una viga de acero de repartición, que a su vez descansaba en el espécimen, en unas juntas de apoyo que podían considerarse articuladas, ya que consistían en apoyos a base de rodillos, fig. 3.15. Con esta disposición de apoyos de los gatos se lograba que las cargas siempre tendieran a intersectarse en un punto, y por lo tanto se reducía al mínimo la posibilidad de giro como cuerpo rígido del espécimen alrededor de su eje longitudinal, problema que había sido ya notado por otros investigadores en ensayos similares (ref. 15).

Durante las etapas preliminares de los ensayos, se detectaron muy pequeños movimientos de cuerpo rígido alrededor del eje longitudinal, como también de cabeceo. Se impidió la ocurrencia de estos grados de libertad de cuerpo rígido colocando en el plano vertical de simetría del espécimen, tres barras guías lisas que permitían solamente el deslizamiento del espécimen sobre estas barras, como se aprecia en la fig. 3.16. Este es uno de los grados de libertad que verdaderamente debiera tener el espécimen. Las restricciones a los otros grados de libertad provocadas por las barras guías, no son significativas en el comportamiento estructural del espécimen, como se deduce de los resultados experimentales, y también de los resultados encontrados por otros investigadores (ref. 15).

Los cuatro gatos laterales, de 28 ton de capacidad, estaban alimentados por una sola línea de presión hidráulica. Otra línea de presión, independiente de la anterior alimentaba a los dos gatos de carga vertical, con capacidad de 100 ton. Mediante esta disposición de líneas de presión, pudieron obtenerse los valores requeridos de los distintos confinamientos con que se efectuaron los ensayos.

Se completaban los puntos de aplicación de carga en los anillos mediante dos puntos de apoyo en la plantilla, fig. 3.13, con lo que se llegaba a tener un total de ocho puntos de aplicación de carga por anillo. Estos dos puntos de apoyo consistían en rodillos de acero monolíticos con las vigas de repartición sobre el muro de carga, fig. 3.15, los que permitían que la reacción por apoyo sobre el espécimen fuese, por equilibrio, igual a la fuerza aplicada en uno de los gatos de capacidad de 100 ton. Además, estos rodillos de acero se apoyaban en placas de acero adheridas al espécimen, detalle 1(b) de la fig. 3.15, con lo que el espécimen podía deslizarse sobre los rodillos en la dirección circunferencial del mismo. De esta manera se evitaban restricciones a las deformaciones de compresión o tensión en la dirección circunferencial del espécimen entre los puntos de apoyo. En el caso de que hubiesen existido estas restricciones, se hubieran generado fuerzas de membrana bastante importantes, como se encontró en análisis preliminares efectuados para detectar este problema.

3.4.2 Instrumentación

El espécimen ensayado se instrumentó con extensómetros eléctricos (medidores de deformaciones), tanto en varillas de refuerzo como en las superficies del concreto. El número de extensómetros en las varillas de refuerzo fue de 36, y en el concreto se contó con 28. En la fig. 3.17 se aprecia la disposición de extensómetros en las varillas de refuerzo y en el concreto.

Las configuraciones de la deformada del espécimen y los cambios de diámetro se obtuvieron con micrómetros (medidores mecánicos de desplazamientos) y medidores eléctricos de desplazamientos (D.C.D.T.) respectivamente.

Los micrómetros se apoyaban en un sistema de referencia bastante rígido, por lo que puede considerarse que las mediciones obtenidas con estos medidores son de desplazamientos absolutos del espécimen. La disposición de los micrómetros se muestra en la fig. 3.18. Se disponía de un total de doce micrómetros para medir la deformada del espécimen, y dos que permitían detectar los movimientos de cuerpo libre generados por el cabeceo en el espécimen (micrómetros 13 y 14, fig. 3.18).

Los seis medidores eléctricos de desplazamientos en el espécimen tenían la disposición que se muestra en la fig. 3.19. Con estos medidores se obtenían cambios de diámetro, ya que el sistema consistía en medir el alargamiento o acortamiento de la distancia entre dos puntos situados en los extremos de un diámetro del espécimen.

El valor de las cargas aplicadas se obtuvo con el empleo de dos celdas de carga previamente calibradas. Una de ellas se conectaba a un gato con capacidad de 28 ton, y la otra a un gato con capacidad de 100 ton. No se consideró necesario disponer de más celdas de carga, ya que éstas medían la carga en los gatos representativos de cada uno de los grupos de carga, en los cuales a su vez existía una sola presión como se comentó anteriormente.

La señal de una de estas celdas de carga (en este caso colocada para un gato de 100 ton de capacidad) se conectaba a un graficador X - Y, al igual que la señal de un D.C.D.T., que medía la variación de diámetro entre la clave y la plantilla dentro del túnel.

3.4.3 Programa de pruebas

Se hicieron varias pruebas preliminares para niveles de carga asociados a elementos mecánicos menores del 10 % de los de diseño.

Estos ensayos se efectuaron con el fin de controlar el adecuado funcionamiento de la instrumentación del espécimen, mediante verificaciones hechas a partir de la simetría y linealidad que debían existir.

A continuación se efectuaron las pruebas definitivas sobre el espécimen, aplicándose las tres condiciones de carga diferentes, anteriormente mencionadas.

Todas las relaciones para P_l/P_v correspondientes a estas condiciones se obtuvieron aumentando o disminuyendo la presión en cada una de las dos líneas.

4.0 RESULTADOS

4.1 Introducción

En esta sección se describen los resultados de los estudios experimentales del anillo de dovelas ensayado en el Laboratorio de Estructuras del Instituto de Ingeniería. Estos resultados se refieren a las tres condiciones de carga descritas en el capítulo anterior, y su interpretación se efectúa en el capítulo cinco.

4.2 Resultados de los ensayos

4.2.1 Relaciones entre carga y desplazamiento

a) Condición de carga I

En la fig. 3.6 se muestra la distribución de cargas máximas alcanzadas en un anillo de dovelas para esta condición de carga, en la que se mantuvo constante una relación P_1/P_v de 0.56. Con los criterios de análisis y diseño propuestos por Okumura Corporation (ref. 6), con estas cargas máximas se obtendría en el túnel el 60% de los momentos flexionantes de diseño, y una carga axial de 12% de la de diseño, como puede verse en la tabla 3.1.

En la figura 4.1 se muestran las curvas carga-desplazamiento obtenidas de los ensayos experimentales para cada uno de los dos anillos de dovelas que conforman el espécimen.

La carga que se indica en esta figura corresponde a la carga P_v (a 15 grados de la clave), y el desplazamiento es el correspondiente al cambio de diámetro en la clave.

De esta figura pueden observarse dos características. Primero, que las deformadas de los dos anillos no son iguales, el anillo inferior siempre tuvo desplazamientos mayores que los del anillo

superior; la diferencia fue de aproximadamente 10% hasta la carga no.3, figura 4.1, alcanzándose valores mayores a un 20% en los niveles de carga máxima. Esto sugiere que existe un efecto no despreciable de las uniones atornilladas, ya que éstas se encuentran desfasadas en un anillo respecto al otro.

Una segunda característica que se observa de estas figuras es el comportamiento no lineal aun antes del inicio del primer agrietamiento, lo que ocurrió en la carga no.4 de la fig. 4.1. Esta característica también se observó en un ensayo anterior que resultó similar, como se muestra en la fig. 4.2 (a). Además se observa la curva carga-desplazamiento del ensayo final, fig. 4.2 (b). Ambas figuras se encuentran a la misma escala y son reproducciones de las gráficas obtenidas directamente en el ensayo a través de un graficador conectado a las señales eléctricas de la carga y del desplazamiento.

En la fig. 4.3 puede verse la gráfica de la curva carga-desplazamiento similar a las figuras anteriores, pero ahora los desplazamientos se refieren al promedio de los desplazamientos de los dos anillos. Además éstos se expresan en función de la relación $\Delta D/D$, en la que ΔD es el valor del cambio de longitud del diámetro en la clave y D es el diámetro del anillo. Esta relación, como se comentó anteriormente, es un parámetro que se utiliza para el análisis y diseño de túneles, y que posteriormente se emplea para la interpretación de resultados del caso en estudio.

En la figura 4.4 se muestra la deformada que tuvo el anillo de dovelas para el nivel de cargas máximas. Esta deformada se obtuvo a partir de medidores mecánicos de desplazamientos, referidos a un sistema fijo.

Los medidores eléctricos de desplazamientos registraron seis cambios de diámetro en los dos anillos. En la fig. 5.3 se muestran resultados típicos encontrados con estos medidores.

b) Condición de carga II

En la fig. 3.7 se muestra la distribución de las cargas máximas alcanzadas en un anillo para esta condición de carga, en que se mantuvo constante una relación P_1/P_v igual a 0.87.

Con los criterios de análisis y diseño propuestos por Okumura Corp. (ref. 6), para las cargas máximas de esta condición se obtendría en esta parte del túnel el 110% de los momentos flexionantes de diseño en la clave, el 128% de los momentos flexionantes de diseño a 90 grados de la clave, y una carga axial del 36% de la de diseño en la clave, tabla 3.1.

En la fig. 4.5 se muestran las curvas carga-desplazamiento obtenidas de los ensayos experimentales para cada uno de los dos anillos de dovelas que conforman el espécimen. La carga que se indica en esta figura corresponde a la carga P_v , y el desplazamiento es el correspondiente al cambio de diámetro entre la clave y la plantilla. Como se deduce de estas figuras, los dos anillos tienen desplazamientos diferentes; el anillo inferior siempre tuvo desplazamientos mayores a los del anillo superior; la diferencia alcanzó a ser de hasta un 25% en la carga no.3, fig. 4.5, y hasta un 40% en el nivel de la carga máxima, fig. 4.5.

En la fig. 4.6 se muestra la curva carga P_v (a 15 grados de la clave) versus el cambio de diámetro entre clave y plantilla (en porcentaje del diámetro).

En la fig. 4.7 se muestra la deformada que tuvo el anillo de

dovelas para el nivel de cargas máximas. Esta deformada se obtuvo a partir de medidores mecánicos de desplazamientos, referidos a un sistema fijo.

c) Condición de carga III

En la fig. 3.8 se muestra la distribución de cargas máximas alcanzadas en un anillo para esta condición de carga, en la que se mantuvo constante una relación P_1/P_v igual a 1.1.

Con estas cargas máximas y con los criterios de análisis y diseño propuestos por Okumura Corporation (ref. 6), en esta parte del túnel se obtendría el 100% de los momentos flexionantes de diseño en la clave, el 137% de los momentos flexionantes a 90 grados de la clave, y el 58% de la carga axial de diseño en la clave, tabla 3.1.

En la fig. 4.8 se muestran las curvas carga-desplazamiento obtenidas de los ensayos experimentales para cada uno de los anillos. La relación que se muestra se refiere como en los casos anteriores a la carga P_v , y al cambio de diámetro en la clave. De esta figura se deduce que también el anillo inferior tuvo desplazamientos mayores que el anillo superior, oscilando la diferencia entre un 25 y un 30%.

En la fig. 4.9 se muestra la curva de carga P_v versus el promedio del cambio de diámetro en los dos anillos entre la clave y la plantilla (en porcentaje del diámetro).

En la fig. 4.10 se muestra la deformada que tuvo el anillo de dovelas para el nivel de cargas máximas. Esta deformada se obtuvo a partir de medidores mecánicos de desplazamientos, referidos a un sistema fijo.

4.2.2 Elementos mecánicos obtenidos

4.2.2.1 Medición de deformaciones unitarias

Los dos anillos ensayados se instrumentaron con 64 deformímetros eléctricos, 40 en el anillo inferior y los restantes en el anillo superior. Desde el inicio de los ensayos dos deformímetros estuvieron fuera de servicio.

Los deformímetros colocados en el concreto se adhirieron a una capa de resina aplicada previamente en la superficie del concreto. Esta superficie fue el resultado de rebajar 1.0 cm a cada lado de la dovela, quedando por tanto la distancia entre los deformímetros de concreto igual a 15.5 cm.

La lectura de deformaciones unitarias para las cargas nulas, se tomó en general como la correspondiente al día del ensayo. Se procedió de esta manera ya que se descubrió que en varios casos la lectura que correspondía a las cargas nulas, variaba con respecto a otras lecturas para cargas nulas de días anteriores. Esto ocurría aun cuando el nivel de cargas aplicadas era tal que no se superaba el límite de proporcionalidad del concreto o del acero. Durante los diversos ensayos efectuados, se detectó la carga correspondiente a la superación del límite de proporcionalidad de las deformaciones leídas, lo cual ocurrió en 7 deformímetros en el concreto y 3 en el acero.

En la figura 4.11 se muestra una distribución típica de deformaciones obtenida en este caso para la condición de carga I.

Del análisis de esta figura pueden obtenerse algunas características típicas de este sistema de mediciones. En general la hipótesis de secciones planas tiende a cumplirse, excepto en algunos casos en que es evidente que la lectura es errónea. Debido

a la distribución de deformímetros, fig. 4.11, no es posible afirmar que en secciones de dovelas en la misma posición, pero en diferentes anillos, tengan las mismas deformaciones; en los pocos casos que se tienen deformímetros en la misma posición mencionada, las lecturas muestran que los dos anillos tienen diferentes deformaciones. También se aprecia de esta figura que el valor de las deformaciones en algunos casos es bajo; esto aumenta la incertidumbre en la confiabilidad de estas lecturas, ya que convierte en relevantes a los corrimientos del cero de deformaciones, aun cuando éstos fueran pequeños. Estos corrimientos, en la mayor parte de los casos son del orden de 20 a 30 unidades de deformación ($\text{cm/cm} \times 10^{-6}$), y en algunos casos alcanzan valores bastante mayores a éstos. Las características anteriormente mencionadas también pueden observarse en gráficas similares a la fig. 4.11, y correspondientes a los casos de condiciones de carga II y III, los que se muestran en las figuras 4.12 y 4.13 respectivamente.

Las observaciones que aquí se comentan respecto a las características de las lecturas de deformaciones en los anillos durante los ensayos respectivos, indican que en general la información que se obtiene de este tipo de lecturas es de carácter cualitativo más que cuantitativo, tal como se había encontrado en experiencias previas con dovelas similares, pero formando un túnel en obra (ref. 1). Esto también se deduce de la parte referente a la obtención de elementos mecánicos a partir de estas lecturas, y que se comenta a continuación.

4.2.2.2 Elementos mecánicos obtenidos a partir de las lecturas de deformaciones unitarias

A partir de la lectura de deformaciones unitarias en el concreto y en el acero, se obtuvieron momentos flexionantes y cargas axiales. Esto se hizo admitiendo la hipótesis que generalmente se emplea en la teoría de la flexión, es decir la de secciones planas. Se consideró además que los materiales tenían deformaciones menores a los límites de proporcionalidad respectivos; los casos en que esto no se cumplía, se descartaron.

Con base en la nomenclatura de fuerzas y deformaciones de la fig. 4.14, y considerando el equilibrio de fuerzas y los requisitos de compatibilidad necesarios, pueden obtenerse las siguientes expresiones para las fuerzas:

$$\begin{aligned} F_c &= 12.25 \times 10^6 (15.5 - c) \epsilon_c \\ F'_c &= 12.25 \times 10^6 c \epsilon'_c \\ F_s &= 28.8 \epsilon_s \times 10^6 \\ F'_s &= 28.8 \epsilon'_s \times 10^6 \dots\dots\dots 4.1 \end{aligned}$$

La expresión para la carga axial resistente será:

$$P = F_c + F'_c + F_s + F'_s \dots\dots\dots 4.2$$

Y los momentos se obtendrían por medio de:

$$\begin{aligned} M_{c1} &= F_c (2.58 + c/3) \\ M_{c2} &= -F'_c (7.75 - c/3) \\ M_{s1} &= 3.95 F_s \\ M_{s2} &= -3.95 F'_s \dots\dots\dots 4.3 \end{aligned}$$

La expresión para el momento resistente en la sección asociado a las fuerzas F_i actuantes es:

$$M = M_{c1} + M_{c2} + M_{s1} + M_{s2} \dots\dots\dots 4.4$$

La expresión par la profundidad del eje neutro "c" es:

$$c = \epsilon_c^- \times h / (\epsilon_c + \epsilon_c^-) \dots 4.5$$

Y la deformación unitaria en el acero:

$$\epsilon_s = \epsilon_c (h - c - 3.8) / (h - c) \dots 4.6$$

En la expresión anterior, h y c se expresan en cm.

Con base en las expresiones anteriores se encontraron los elementos mecánicos que corresponderían a las deformaciones respectivas y que a continuación se comentan.

CONDICION DE CARGA I

En la fig. 4.15 se muestra la distribución de momentos flexionantes que se obtendría para esta condición de carga a partir de las mediciones de deformaciones en el concreto y en el acero. Estos momentos se comparan con los que se obtendrían analíticamente según los criterios de análisis elásticos con elementos finitos que se describen en el capítulo 5 de este trabajo. En este análisis se considera que los anillos son continuos y con las condiciones de apoyo y carga correspondientes al caso I.

Como se muestra en esta figura, la distribución de momentos experimental tiene la forma que sugiere el modelo de elementos finitos; sin embargo, el ajuste es tan sólo cualitativo ya que la falta de simetría en los resultados que se mencionó anteriormente, y algunos valores desproporcionados, impiden concluir que el ajuste de los resultados experimentales y analíticos sea satisfactorio.

En la fig. 4.15 puede observarse la distribución de cargas normales a la sección transversal a la dovela, obtenidas con base en las lecturas de deformaciones en el concreto y en el acero. Como puede apreciarse en esta figura, la dispersión de resultados con respecto a los que daría el método de análisis por elementos finitos es bastante considerable. Una de las razones importantes

para esta dispersión es el hecho anteriormente mencionado de que se están obteniendo valores bajos de deformación en las diferentes secciones, con lo que pequeñas variaciones de estos valores (por ejemplo debido al corrimiento del cero) influyen considerablemente en los valores de las fuerzas internas en el concreto y el acero. Por otra parte estas variaciones son mayores a las que se tendrían al obtener momentos flexionantes en estas mismas secciones.

CONDICION DE CARGA II

En la fig. 4.16 se muestra la distribución de momentos flexionantes obtenida a partir de la lectura de deformaciones en el concreto y en el acero. La dispersión de resultados es similar a la que se encontró en la condición de carga tipo I. La distribución de momentos flexionantes de la fig. 4.16 corresponde al 40% de la carga asociada a la carga de diseño para momento flexionante según Okumura (ref. 6), y la fig. 4.17 corresponde al 80% de la misma carga.

La dispersión de cargas axiales para este caso fue similar a la de la condición de carga tipo I.

CONDICION DE CARGA III

En la fig. 4.18 puede verse la distribución de momentos flexionantes obtenidos a partir de la lectura de deformaciones en el acero y el concreto para la carga III correspondiente al 40% de las cargas teóricas de diseño según Okumura (ref. 6). Los resultados para este caso tienen las mismas características comentadas para los casos de condiciones de carga anteriores. Tal es el caso de la dispersión de cargas axiales que fue similar a la descrita para la condición de carga I.

4.2.3 Descripción del agrietamiento y configuración del espécimen en los niveles de cargas máximos

En la fig. 4.19 se aprecia el agrietamiento observado al alcanzar el nivel de carga máxima correspondiente a la condición de carga I. Este agrietamiento corresponde a una vista desde el exterior de los anillos, asociado a los esfuerzos en tensión provocados por los momentos flexionantes respectivos. Estos se producen aproximadamente a 90° y 270° de la clave. También aquí se puede notar que el agrietamiento mencionado es bastante más pronunciado en el anillo superior. Esto se explica si se considera que en el anillo inferior existen juntas de dovelas en la posición cercana a los máximos momentos, las que al abrirse permiten que el anillo sea más flexible sin necesidad de agrietarse, como sucede en el anillo superior. Esta última situación también se observa en la fig. 4.20, correspondiente a una vista superior de los anillos bajo aplicación de niveles de carga importantes durante un ensayo. En esta figura es claro que el anillo inferior se desplaza más que el superior.

La flexibilidad se pone también en evidencia por las mediciones de las separaciones de las juntas de dovelas que se efectuaron durante los ensayos. Para el nivel máximo de la condición de carga tipo I, se llegó a medir los siguientes incrementos en las separaciones. En la junta del anillo inferior a aproximadamente 90° de la clave, lado Este, el incremento fue de 3 mm. En la junta del anillo inferior, lado Oeste, el incremento fue de 2.5 mm. En la junta a 270° en el anillo superior, el incremento fue de 3.0 mm.

A continuación de la condición de carga I, se aplicó la

condición de carga III, la que no provocó agrietamientos adicionales a los que se produjeron en la condición de carga I. Esto sucedió principalmente porque la carga III ($P_1/P_v = 1.09$) tenía un mayor confinamiento que la carga tipo I ($P_1/P_v = 0.56$). Los incrementos de separación de las juntas para el nivel máximo de carga tipo III fueron los siguientes. Lado Este a 90° , inferior, de 4.5 mm; lado Oeste inferior, de 3.5 mm; y el lado Oeste superior (270°), de 3.5 mm. Debido al mayor confinamiento mencionado para la carga III, estas separaciones fueron semejantes a las anteriormente citadas para la carga I, a pesar de que los momentos flexionantes teóricos máximos para la carga III fueran 65% mayores que los de la carga I.

Finalmente se aplicó la condición de carga II ($P_1/P_v = 0.87$), obteniéndose la configuración de daños que se muestra en la fig. 4.21. Al observar esta figura, se deduce que la ampliación del agrietamiento inicial mencionado (a 90° y 270° de la clave) para la carga I, fue notorio.

También se aprecia el agrietamiento por esfuerzos de tensión que ocurren en el lado interior de la clave y plantilla. De manera similar al comportamiento descrito con anterioridad, en el caso de la clave del anillo inferior el agrietamiento en la vecindad de ésta es nulo, ya que sus juntas al abrirse impiden que se formen grietas, situación que sí ocurre en la clave del anillo superior por el hecho de no tener juntas.

Asociados a las aberturas de las juntas en cuestión, existen aplastamientos de éstas en las caras opuestas al lado en tensión, como se aprecia en la fig. 4.21. Esto ocurre principalmente en las secciones con mayores esfuerzos de los anillos, como son la clave,

plantilla, y secciones a 90° y 270° de la clave. En algunos casos el aplastamiento fue especialmente importante, puesto que incluso se produjeron desprendimientos del recubrimiento de concreto, como se observa en la fig. 4.21.

Con base en la descripción de los daños mencionados y en la configuración deformada que se muestra en la fig. 4.20, puede afirmarse que la deformada para el espécimen para niveles máximos de las cargas corresponde a una forma ovalada con el diámetro mayor en la dirección Este-Oeste, y con el diámetro menor en la dirección Norte-Sur, con los valores máximos de momentos flexionantes en estas mismas direcciones.

5.0 INTERPRETACION DE RESULTADOS.

5.1 Introducción:

Con el propósito de interpretar los resultados del comportamiento del túnel observado en los ensayos experimentales, se utilizaron modelos analíticos que consistieron en representar a los anillos de dovelas con elementos finitos en el intervalo elástico, considerando tanto elementos vigas como elementos placa-cascarón. En estos modelos se logró una representación adecuada de las condiciones de apoyo y carga existentes en los ensayos de laboratorio, sin tomar en cuenta el efecto de flexibilidad de las juntas.

5.2 Descripción de los modelos analíticos empleados

Se emplearon varios modelos analíticos para el estudio de la respuesta de las dovelas.

El modelo analítico I consistió en tomar medio anillo de dovelas y representarlo con elementos finitos tipo viga sin considerar la flexibilidad de las juntas de dovelas en el sentido circunferencial. Un esquema de este modelo se muestra en la fig.

5.1.

El modelo analítico II consistió en representar dos anillos de dovelas unidos en el sentido longitudinal del túnel por nudos comunes en la posición de los tornillos de fijación, y en el sentido circunferencial se tenían elementos placa-cascarón, sin representar las juntas de dovelas. En la fig. 5.2 se muestra la malla de elementos finitos para este modelo analítico.

Como se aprecia en las figuras 3.13 y 3.15, en la parte correspondiente a la zona de la plantilla se tenían apoyos del tipo rodi-

llo. Para representar analíticamente esta condición, se consideró como única restricción, que el grado de libertad del apoyo en la dirección radial estaba restringido mediante un resorte de rigidez infinita. Con esta idealización se permitía que el anillo también se desplazara en la dirección circunferencial.

Las cargas aplicadas eran radiales, y debido a la deformada que sufría el anillo, se perdía la simetría con respecto al plano horizontal (Este-Oeste), lo que obligaba al análisis de al menos la mitad del anillo.

Un criterio de diseño que también se consideró en este estudio es el comentado en el capítulo 2, propuesto por Chase (ref. 5). Este autor sugiere que una estimación del valor de la presión uniforme vertical que produce un cambio de diámetro dD/D esté dado por:

$$w = (12EI/R^3) (\Delta D/D) \quad \dots\dots 5.1$$

E es el módulo de elasticidad del concreto.

I es el momento de inercia de la sección transversal de la dovela.

R es el radio del anillo.

Sin embargo, este criterio no se aplicó porque no toma en cuenta el efecto del confinamiento en el túnel, parámetro de fundamental importancia en su comportamiento estructural, como se mencionó antes, y que también se confirmó en la interpretación de los resultados experimentales de esta investigación.

Un modelo analítico más elaborado para representar el comportamiento elástico de las dovelas es el modificar la malla de la fig. 5.2 de manera de introducir articulaciones o resortes con rigideces rotacionales en la ubicación de las juntas. Sin embargo,

las características de estas juntas pueden dar comportamientos totalmente diferentes entre una y otra, dependiendo del sentido en que giran y del nivel de la carga normal existente en la junta. Esto se debe a que la restricción al giro está dada por tornillos excéntricos respecto al centroide de la sección, colocados hacia el interior del anillo.

También, como se mencionó anteriormente, el nivel de la carga normal tiene una importancia fundamental en el momento flexionante y curvatura de una sección transversal, y es de esperar que en una junta su efecto sea similar.

Un análisis riguroso de esta estructura con este comportamiento de juntas obliga a aplicar un procedimiento iterativo. Esto se debe a que el tipo de restricción al giro (libre o con cierta rigidez) que inicialmente se supone en el análisis, debe verificarse con los resultados que éste indique. Debido a lo complejo de esta solución, que además podría tener problemas de convergencia, y a la incertidumbre en los valores de las rigideces locales de las juntas, este modelo no se aplicó en esta investigación. A pesar de esto, es posible que un análisis de este tipo sea justificable si la magnitud del proyecto del túnel lo amerita.

5.3 Comparación de desplazamientos obtenidos con métodos analíticos y experimentales

En las fig. 5.3, 5.4 y 5.5 se muestran las relaciones de desplazamientos experimentales y teóricos de los anillos, medidos como cambio de diámetro, contra la posición angular de la sección. Los desplazamientos experimentales se obtuvieron de lecturas de medidores eléctricos de desplazamientos (D.C.D.T.), y los

desplazamientos analíticos, del modelo de elementos finitos a base de vigas considerando el anillo continuo. Debe mencionarse que los resultados calculados con elementos finitos del tipo placa-cascarón fueron prácticamente iguales a los obtenidos con elementos finitos a base de vigas.

De la inspección de estas figuras, se concluye que existen diferencias importantes entre los desplazamientos medidos y los calculados con el modelo analítico. También se observa nuevamente que las configuraciones de desplazamientos de ambos anillos no coinciden, encontrándose por ejemplo en el caso de la condición de carga II, fig. 5.4, que los cambios de diámetro en la clave y a 90° fueron en promedio en un anillo 30% mayores que en el otro. En el caso de la condición de carga tipo I, este porcentaje fue de 15%, y para la condición de carga tipo III se tuvo el 18%.

De la comparación de las deformadas de las condiciones de carga II y III, en las que se llegó a máximos comparables, tabla 3.1, se concluye que el mayor confinamiento existente en el caso III hizo que la diferencia de desplazamientos entre un anillo y otro sea menor. Este hecho hace pensar que un mayor confinamiento disminuye la flexibilidad no sólo del anillo considerado como conjunto, sino también la flexibilidad de las juntas. También se pone en evidencia la importancia de la flexibilidad de las juntas si se comparan las deformadas analíticas (con el método de elementos finitos del anillo continuo antes descrito, y con el valor de EI íntegro), con las experimentales que ocurrieron en los diferentes casos de carga. En el caso III los desplazamientos experimentales oscilan entre 4 y 5 veces los desplazamientos analíticos, mientras que en los otros casos, I y II, la relación de desplazamientos experimentales a

analíticos fue aproximadamente 9 para el caso I y 7 para el caso II, figs. 5.3 a 5.5.

Los valores anteriores podrían reducirse a la mitad si se considera la hipótesis alternativa de emplear un valor de EI igual a la mitad del supuesto en los análisis hechos en este estudio. La aplicación de tal reducción puede explicarse por dos motivos: el módulo de elasticidad del concreto E disminuye con el tiempo debido al efecto de flujo plástico, que aquí no se está tomando en cuenta; y por otra parte existe el hecho de que el momento de inercia disminuye, ya que hay secciones que se agrietan para los valores de cargas máximas que se están estudiando.

Aun cuando el razonamiento anterior fuese aplicado en la interpretación de los resultados anteriores, la diferencia entre los desplazamientos teóricos y experimentales es importante. Esto lleva a concluir que, para propósitos de cálculo de desplazamientos en anillos de dovelas, es erróneo admitir la hipótesis de anillo continuo, ya que la flexibilidad de las juntas contribuye de manera fundamental en la flexibilidad del anillo.

De las figs. 4.3, 4.6 y 4.9 pueden compararse las rigideces iniciales según el modelo analítico en estudio y las experimentales. De esta comparación se observa que para el caso de la condición de carga I para niveles de carga bastante bajos, hay una correlación aceptable entre el comportamiento experimental y el teórico. Para valores mayores de las cargas de esta condición, asociadas a desplazamientos $\Delta D/D$ de aproximadamente 0.05%, se produce un incremento importante de la flexibilidad del anillo por la contribución de las juntas antes citada. Esta nueva rigidez se mantiene constante en una parte importante de la curva $Pv - \Delta D$,

como se aprecia en la fig. 4.3. En este trabajo se considera a esta rigidez como un parámetro de referencia para el diseño de los anillos, y en adelante se le identificará con el nombre de rigidez no lineal inicial.

El comportamiento anteriormente descrito para la carga tipo I es similar al observado para el caso de carga tipo II, fig. 4.6. Las diferencias que se encuentran pueden atribuirse al efecto del mayor confinamiento que existe en el caso II con respecto al del I, tabla 3.1. Este último efecto incrementa la rigidez tanto en el intervalo elástico, como inelástico, figs. 4.3 y 4.6. En el caso del intervalo no lineal inicial de la carga tipo II, el incremento de rigidez es aproximadamente 60% respecto al caso de carga tipo I.

El efecto de confinamiento máximo alcanzado, condición de carga III, indica incrementos mayores para las llamadas rigideces no lineales, alcanzando éstas valores de hasta 3.3 veces la rigidez en el mismo intervalo para el caso de carga I, fig. 4.3 y 4.9.

Una característica común a los tres tipos de carga es la pérdida del comportamiento lineal para cargas bastante menores que las de servicio, especialmente en los casos de menor confinamiento, condiciones de carga I y II. Esto pone en evidencia la importancia del confinamiento para disminuir la flexibilidad de las juntas. Más claramente se aprecia esta evidencia en la fig. 5.6 (a) en la que se muestra la relación de rigideces no lineales iniciales (definidas anteriormente), para los tres tipos de ensayos efectuados, y en función del confinamiento existente en el anillo en cada ensayo, el cual se relaciona con P_1/P_v , como se explicó antes. Estas rigideces se correlacionan con los desplazamientos medidos en el ensayo, mediante la fig. 5.6 (b), correspondiente a

dos niveles de carga vertical Pv. En esta figura también se indica el valor de $\Delta D/D$ igual a 0.45%, sugerido como valor de diseño por varios autores. Se observa que este criterio de diseño no es racional, ya que no basta considerar solamente al parámetro $\Delta D/D$ como base de diseño, sino también al valor del confinamiento existente. Por ejemplo, con la condición de carga tipo III, con máximo confinamiento logrado en el ensayo, se requirió en la clave una carga de aproximadamente 2.3 veces la carga requerida para lograr el mismo desplazamiento en la condición de carga I, fig. 5.6 (b).

En lo que se refiere a las deformadas del espécimen empleando las medidas de los micrómetros descritos anteriormente, en las figs. 4.4, 4.7 y 4.10 se muestran las correspondientes a los máximos alcanzados en los dos anillos para los diferentes tipos de carga. De manera análoga al caso de los desplazamientos medidos con los D.C.D.T., los valores analíticos difieren considerablemente de los experimentales, en proporciones semejantes a las mencionadas antes para los D.C.D.T.

Si se desprecian los movimientos de cuerpo rígido que pudieran ocurrir en los anillos, estas deformadas son representativas de los desplazamientos en los anillos, ya que el marco de referencia puede considerarse como fijo.

5.4 Capacidad máxima

5.4.1 Criterio que se propone para definir la capacidad máxima y comparación con los resultados de laboratorio y del túnel en Iztapalapa

De los resultados de los tres tipos de ensayo efectuados en este estudio, se encuentra que el valor del confinamiento influye

notablemente en la respuesta del anillo.

La importancia de la flexibilidad del túnel obliga a que ésta deba ser también un parámetro que se involucre en la capacidad máxima. Esta capacidad debe asociarse a las deformaciones del anillo, de manera que en éste no se supere un nivel de daños permisible. Por consiguiente este es el criterio que se tomó en este trabajo para definir la capacidad máxima del anillo.

De los resultados experimentales de este estudio se encontró que, dependiendo del grado de confinamiento, se cumplían ciertas relaciones entre las rigideces elásticas y las rigideces no lineales iniciales (definidas anteriormente como la segunda pendiente de la curva $P_v - \Delta D/D$). Estas relaciones fueron aproximadamente 7.4, 6.3 y 4.0 para las condiciones de carga I, II y III respectivamente. De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 3.1, esta última condición de carga puede tomarse como la que más se acercaría a las condiciones existentes en el túnel de Iztapalapa, aun cuando con la condición de carga III se alcanzó sólo el 58% de la carga normal a la sección transversal que se obtendría con las acciones del terreno propuestas para el diseño por Okumura (ref. 6). Si se compara la condición de carga III con las acciones del terreno según las condiciones específicas de campo en Iztapalapa, tabla 3.1, el porcentaje en cuestión subiría a 78%.

Con base en los resultados de las curvas $P_v - \Delta D/D$ anteriores, y teniendo en cuenta el nivel de daños observados en los ensayos, se sugiere que el valor de $\Delta D/D$ permisible deba ser 0.005 cuando se tiene una relación P_1/P_v similar a la de la condición de carga tipo III, fig. 4.9. Este valor también coincide razonablemente bien con el inicio de daños en los ensayos con carga tipo I, fig. 4.3, y es

un valor adecuado como cota inferior para el inicio de daños en la carga tipo II, fig. 4.6. Por otra parte, este valor coincide aproximadamente con el que sugieren otros autores (Peck, ref. 11).

Dentro del criterio de diseño que se propone en este trabajo, se sugiere emplear un análisis elástico convencional con el valor permisible de $\Delta D/D$ seleccionado en el párrafo anterior, pero usando una rigidez reducida. Esta se propone que sea la cuarta parte de la rigidez convencional (tomando en cuenta la sección bruta y el módulo de elasticidad del concreto E sin reducción) siempre y cuando el confinamiento sea similar al existente en el caso III. Es claro que para valores mayores de confinamiento la reducción debiera ser menor.

En esta investigación se planteó la necesidad de correlacionar las condiciones de carga aplicadas en el laboratorio con las existentes en un túnel construido en diferentes condiciones del terreno. Un intento en esta dirección se efectuó en el capítulo 3 de este informe, y como resultado en la tabla 3.1 se resumen las relaciones entre los elementos mecánicos existentes en las tres condiciones de carga en estudio y los elementos mecánicos resultantes de las acciones del terreno en el túnel del drenaje semiprofundo en Iztapalapa, considerando que todos estos resultados se obtienen con los criterios de análisis convencional, es decir ignorando el efecto de las juntas y tomando el valor de EI sin reducción alguna.

Los elementos mecánicos obtenidos en el ensayo con condición de carga tipo III son comparables a los que se obtendrían con los criterios de diseño para este tipo de anillo propuestos por Okumura

(ref. 6). En laboratorio se logró aproximadamente el 60% de la carga axial de diseño propuesta en la referencia anterior, además de obtenerse momentos con valores similares a los propuestos por Okumura (tabla 3.1). Este porcentaje subiría a aproximadamente un 80% si se consideran las acciones del terreno con las condiciones específicas del túnel de Iztapalapa, aunque los momentos flexionantes que se obtendrían con este criterio serían bastante mayores que los propuestos para el diseño.

En la primera parte de esta investigación (ref. 1), con base en mediciones de campo se obtuvieron elementos mecánicos y desplazamientos en un túnel construido con dovelas iguales a las de este estudio y ubicado en Iztapalapa, zona de suelo blando de la Ciudad de México. Los elementos mecánicos calculados con estas mediciones son comparables con los obtenidos a partir de hipótesis convencionales de análisis elástico con elementos finitos y considerando el anillo continuo.

Si se aplicara al túnel anteriormente mencionado el criterio de análisis del anillo de dovelas que aquí se propone, y si además se considera que las acciones del terreno provienen de las condiciones específicas de campo que se indican en la primera parte de esta investigación (ref. 1), y que se resumen en la tabla 3.1, se obtendría la configuración deformada del anillo que se muestra en la fig. 5.7. De la inspección de esta figura se concluye que con el criterio propuesto de análisis, se tendrían desplazamientos medidos como cambios de diámetro horizontal similares a aquellos obtenidos en las mediciones de campo (ref. 1). El modelo propuesto daría un cambio de diámetro horizontal igual con 0.0018D, valor muy parecido a los medidos en el túnel, que variaron entre 0.0014D y

0.0019D.

Esta semejanza de resultados apoya la validez del modelo de análisis propuesto en este trabajo para valores de carga de servicio. Esto igualmente hace suponer que existe una semejanza del confinamiento que se produce en el túnel construido y el del anillo del laboratorio, lo que también confirmaría los resultados de la tabla 3.1, aun cuando ambas condiciones de carga son diferentes una de la otra en su distribución, ya que unas son concentradas, y las otras distribuidas con participación de la interacción suelo-estructura.

5.4.2 Comentarios a la aplicación del criterio de capacidad máxima propuesto y aplicación a otros casos de túneles

Debe hacerse énfasis en que el valor de la reducción de la rigidez EI que aquí se propone para propósitos de diseño del túnel, es aplicable si en éste existe un confinamiento asociado al valor de P_l/P_v de la condición de carga III. Como se mostró anteriormente, tabla 3.1 y capítulo 3 de este informe, la relación P_l/P_v del caso III en el espécimen ensayado, conduce a cargas normales a la sección del túnel semejantes a las que existirían en el túnel en Iztapalapa, admitiendo como válidas las hipótesis de análisis convencionales. También anteriormente se definió como confinamiento al valor de esta carga normal, dado que es posible relacionar el confinamiento así definido con el valor de P_l/P_v , y se tomó a esta relación como una medida del confinamiento. Sin embargo, es imprescindible para el diseño de túneles saber cuál es el valor de la rigidez EI a emplear dentro del criterio de análisis que aquí se se propone si el valor del confinamiento (carga normal o relación P_l/P_v) es diferente al que existe en la condición de

carga III.

Si el túnel en cuestión tiene dovelas con iguales características que las estudiadas en esta investigación, puede recurrirse a figuras como las 5.3, 5.4 y 5.5 en las que se aprecia que el criterio de reducir el valor de EI a su cuarta parte no es aplicable a los casos de confinamiento con cargas I y II. Por lo tanto si la carga normal existente en el túnel que se pretende diseñar se acerca a alguna de las existentes en las cargas I y II, puede emplearse el valor de EI reducido que se deduce de las figs. 5.3 y 5.4 para los casos I y II respectivamente. Tal como puede observarse en estas figuras, para estas condiciones de carga puede emplearse el criterio de diseño por estado límite de servicio que aquí se propone, pero con una reducción de EI diferente a la propuesta para el confinamiento del caso III. Por ejemplo, para un confinamiento similar al caso I el valor de EI debe reducirse a la octava parte, y para el caso II la reducción será a la séptima parte. Para valores del confinamiento, P_1/P_v , intermedios entre los dados por los casos I y III, los factores de reducción de rigidez pueden obtenerse de la fig. 5.8.

Si se quisiera emplear el criterio de análisis que aquí se propone para un túnel a base de dovelas con características diferentes a las aquí estudiadas (dimensiones, cantidad de dovelas, tipos de juntas, etc.), ya no podría utilizarse la figura 5.8 para obtener los llamados factores de reducción de rigidez. Esto se debe a que los valores del confinamiento (carga normal o relación P_1/P_v) en esta figura corresponden solamente al túnel estudiado en esta investigación. En un túnel con características diferentes, aun cuando tenga la misma relación P_1/P_v , e incluso los

mismos elementos mecánicos, no puede hablarse de confinamientos similares, ya que es claro que también en la respuesta de este túnel influirá la diferencia en las características entre ambos túneles. Por estas razones los resultados de este estudio son aplicables sólo a túneles con dovelas similares a las aquí estudiadas.

6.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones:

De los estudios analíticos y experimentales efectuados en esta investigación pueden obtenerse las siguientes conclusiones:

1) La respuesta para los diversos niveles de confinamiento que se aplicaron al anillo de dovelas ensayado, muestra que este parámetro influye notablemente en la respuesta de la estructura (se define como confinamiento para el túnel en estudio al valor de la carga normal en la sección del túnel, o a la relación P_l/P_v respectiva). Se encontró que un mayor confinamiento disminuye la flexibilidad de las juntas.

La rigidez en la clave del anillo, definida como la carga radial en la clave que es necesaria para obtener un desplazamiento unitario de ésta en dirección radial, se incrementó en el caso de un ensayo con máximo confinamiento a 3.3 veces la rigidez en el caso de un ensayo con confinamiento mínimo. Este máximo confinamiento logrado en el laboratorio corresponde aproximadamente a un 60% del confinamiento que se obtendría en campo siguiendo los criterios con que se diseñó el túnel construido en Iztapalapa, el cual está formado por dovelas idénticas a las estudiadas en laboratorio. Si además se consideraran las condiciones observadas en campo (profundidad del túnel, nivel freático, coeficiente de empuje del terreno, etc.), que se comentan en la primera fase de este estudio, el mencionado porcentaje subiría a 80%.

2) También de los ensayos efectuados, en este estudio se detectó la importancia de las juntas entre dovelas, principalmente las existentes en el sentido circunferencial. Estas influyen en la

configuración del agrietamiento, flexibilidad de la estructura y modo de falla de ésta. En lo que se refiere al agrietamiento, cuando las juntas están ubicadas en las zonas de máximos momentos permiten que el anillo se deforme sin necesidad de agrietamientos importantes, mientras que en la misma sección para un anillo vecino y en la cual no haya una junta, sí ocurren agrietamientos importantes.

Para niveles de cargas máximas se encontraron casos en que la separación de las juntas era de aproximadamente 5mm.

También puede concluirse que el efecto de las juntas en el túnel en campo aumenta la flexibilidad de éste, y permite así que el túnel cambie de su configuración circular inicial a una de forma de elipse, con el consiguiente aumento benéfico del nivel de confinamiento en el anillo. Esto también ayuda a explicar el por qué del excelente comportamiento de los anillos de dovelas del túnel estudiado en la primera parte de esta investigación.

3) Se encontró que pueden determinarse elementos mecánicos razonablemente cercanos a los experimentales en el intervalo elástico, si se emplean los procedimientos usuales de análisis estructural considerando que el anillo es continuo y tomando en cuenta deformaciones únicamente por flexión. Al aplicarse un análisis elástico más elaborado, como es el de elementos finitos placa-cascarón, también continuo, se tendrían resultados similares.

4) De la observación del comportamiento estructural del anillo ensayado se encontró que es fundamental dimensionar el anillo de dovelas con base en un criterio de deformaciones admisibles. Esto se deduce igualmente por el comportamiento estudiado en diversos túneles con anillos de dovelas que se han construido en zonas de

suelo blando de la Ciudad de México, como se infiere de la información de la literatura existente.

El nivel de deformaciones asociado a los niveles admisibles anteriormente mencionados puede relacionarse con el parámetro $\Delta D/D$, donde D es el diámetro del anillo y ΔD es el cambio de longitud de éste. Los resultados encontrados en esta investigación muestran que un valor $\Delta D/D$ admisible es de 0.005, valor muy cercano al sugerido por otros autores con base en observaciones de campo en túneles existentes. El valor anteriormente mencionado se basa en que para este nivel de deformaciones el anillo de dovelas ensayado empezó a tener una serie de daños significativos cuando el anillo estaba bajo el máximo confinamiento logrado en el ensayo.

5) El criterio de deformaciones admisibles propuesto puede emplearse con los métodos convencionales de análisis estructural elástico, siempre y cuando se tome una rigidez modificada. Los resultados de esta investigación indican que en el caso de túneles construidos con dovelas similares a las aquí estudiadas, y con el nivel de confinamiento máximo logrado en el ensayo, puede calcularse la rigidez reducida, considerándose ésta como la cuarta parte de la rigidez convencional, definida como la calculada en base a la sección bruta y al módulo de elasticidad del concreto E propuesto por el reglamento del D.F. y sin reducción alguna.

En el caso de que se presentase un túnel con dovelas similares, pero con confinamiento distinto al máximo logrado en los ensayos, los valores para las rigideces reducidas se emplearán de acuerdo a los resultados experimentales de este estudio para los confinamientos respectivos.

En los casos de túneles construidos con dovelas de

características diferentes a las aquí estudiadas, no es posible definir el factor de reducción para la rigidez, ya que éste dependerá también de las características geométricas y cantidad de dovelas por anillo, además del tipo de juntas existentes entre ellas.

El valor que aquí se propone para la rigidez modificada toma en cuenta la flexibilidad proporcionada por las juntas de dovelas y el confinamiento logrado en el ensayo. Considerando los criterios usuales para el diseño de túneles, este confinamiento puede tomarse de manera razonablemente conservadora como representativo del existente en el túnel construido en Iztapalapa con dovelas de las mismas características de las estudiadas en esta investigación.

6) Si se aplicara al túnel de Iztapalapa el criterio de análisis que se mencionó en el inciso anterior, y con las condiciones de terreno observadas en el lugar, se calcularían desplazamientos (considerados como cambios de diámetro horizontal) similares a los obtenidos en las mediciones de campo, valores que pueden encontrarse en el informe de la primera de la primera fase de esta investigación. El modelo de análisis propuesto daría un cambio de diámetro horizontal igual a $0.0018D$, valor muy parecido a los medidos en el túnel, los cuales variaron entre $0.0014D$ y $0.0019D$.

Esta semejanza de resultados apoya la validez del modelo de análisis propuesto en este trabajo para valores de carga de servicio. Esto también apoya la hipótesis mencionada con anterioridad de que existe semejanza entre el confinamiento del túnel construido en Iztapalapa, y el del anillo de laboratorio, aun cuando ambas condiciones de carga son diferentes una de la otra en cuanto a su distribución, ya que unas pueden considerarse como

repartidas mientras que las otras son concentradas.

7) La comparación de los valores de las deformaciones del túnel de Iztapalapa, obtenidos de las mediciones de campo, y los valores de las deformaciones admisibles propuestos en este trabajo, indican que en el túnel de Iztapalapa existe una reserva importante de capacidad antes de llegar a la capacidad máxima, definida ésta con el criterio de deformaciones admisibles, que se explicó anteriormente. Esta afirmación también se fundamenta en que para el nivel de deformaciones máximas alcanzadas en el túnel de Iztapalapa, no se ha observado el inicio de algún daño o agrietamiento importante.

6.2 Recomendaciones:

Como resultado de esta investigación se dan las siguientes recomendaciones:

1) El dimensionamiento del recubrimiento de túneles en suelo blando construidos a base de dovelas se debe hacer no solamente con un criterio de resistencia última, sino también siguiendo un criterio de deformaciones admisibles.

Este criterio puede basarse en limitar el cambio de diámetro del túnel, bajo las acciones del terreno, al valor de $\Delta D/D$ igual con 0.005, donde ΔD es el cambio de diámetro y D el diámetro del túnel. Este valor se propone con base en los resultados experimentales encontrados en esta investigación y en lo propuesto por otros investigadores.

2) No debe ignorarse el efecto de la flexibilidad de las juntas en el comportamiento estructural del anillo, para lo cual puede seguirse el procedimiento que aquí se propone.

3) Además del criterio de deformaciones admisibles precedente,

pueden emplearse los métodos convencionales de análisis elástico siempre y cuando se emplee para la rigidez del anillo un valor diferente a la rigidez convencional. En el caso de túneles con dovelas de características similares a las aquí estudiadas, y con niveles de confinamiento semejantes a los máximos logrados en el ensayo, esta rigidez modificada puede tomarse como la cuarta parte de la rigidez convencional, definida ésta como la calculada con base en la sección bruta y con el módulo de elasticidad del concreto E, propuesto por el Reglamento del Distrito Federal, sin ningún tipo de reducción.

4) De tenerse túneles con dovelas también similares a las aquí estudiadas, pero con valores de confinamiento distintos al máximo logrado en el ensayo, puede recurrirse a los valores encontrados para otras condiciones de carga, que se muestran en la fig. 5.8.

En túneles con dovelas de características diferentes a las que tiene el túnel estudiado, los resultados de este trabajo no son aplicables, debido a que aun no es posible llegar a una definición general de confinamiento con base en las diferentes características que definen a un túnel a base de dovelas.

5) Dada la limitada cantidad de información que se tiene sobre el comportamiento de este tipo de recubrimientos en suelos blandos como los de la Ciudad de México, y también debido a que el empleo de este sistema tiende a ser mayor en la Ciudad de México, se recomienda continuar la investigación sobre el problema. Los aspectos que se sugiere estudiar en el laboratorio son:

- Efecto de un confinamiento mayor al que se logró en el laboratorio.

- Efecto de otros tipos de dovelas en el confinamiento de un

túnel.

- Comportamiento de un tramo de túnel formado por al menos tres anillos de dovelas.

- Revisión del límite de deformaciones admisibles que aquí se propone considerando los aspectos anteriores.

También se sugiere continuar las mediciones en campo que se han venido efectuando en este tipo de túneles en suelos blandos, especialmente cuando cambien las condiciones de terreno (profundidad del túnel, nivel freático, etc.), con el fin de poder comparar estas mediciones con los valores que se determinarían de los criterios analíticos que se propongan para explicar el comportamiento estructural del túnel.

7.0 REFERENCIAS

- (1) - Rodríguez, M., Meli, R., Olivares, A., Montero, M. "Comportamiento estructural de dovelas para revestimiento de túneles". Primera parte: mediciones de campo. Elaborado para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal. Proyecto 4725, Instituto de Ingeniería, mayo de 1987.
- (2) - "Diseño y construcción de estructuras de concreto", NTC del Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, pub. no. 401, Instituto de Ingeniería, julio 1977.
- (3) - ACI Comité 318 "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", 1983.
- (4) - Lo, K.Y., Ng, M.C., Rowe, R.K. "Predicting settlement due to tunnelling in clays", Tunnelling in soil and rock. Proc. of two sessions at Geotech 84, pag. 46-73. ASCE, mayo 1984.
- (5) - Chase, A.P. "Precast segmented tunnel lining for the Mexico City subway", RETC proceedings, vol. 1, pag. 439-467.
- (6) - Okumura Corporation, "Design of precast concrete segment for central de abastos, Mexico". Japón, agosto 1983.
- (7) - Schmitter, J.M., Moreno, A.F. "Túnel con deformaciones excesivas", 7^{mo} Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, 1984.
- (8) - Gamble, W.L. "Structural Behavior of Precast Concrete Tunnel Liners", ACI JOURNAL, no. 64-1, pag.1-11. Enero 1967.
- (9) - Sánchez Trejo, R., Moreno Fernández, A. "Behavior of a tunnel excavated through soft ground by means of a shield and compressed air chambers", International Symposium on Field

Measurements in Geomechanics, Zurich. Septiembre 1983.

(10) - Hansmire, W.H. "Example Analysis for Circular Tunnel Lining", Tunnelling in soil and rock, proc. Geotech 84, editor K.Y. Lo, pub. ASCE, pag. 30-45, Atlanta, E.U.A., mayo 1984.

(11) - Peck, R.B. "Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground", Proceedings, Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art volume, México D.F., México, pag. 225-290, 1969.

(12) - Ranken, R.E., Ghaboussi, J., Hendron, A.J. "Analysis of Ground-Liner Interaction for Tunnels", reporte no. UMTA-IL-06-0043-78-3, Departamento de Ingeniería Civil, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1978.

(13) - Muir Wood, A.M. "The Circular Tunnel in Elastic Ground", Geotechnique, vol.25, no. 1, pag. 115-127, 1975.

(14) - Mohraz, B., Hendron, A.J., Jr., Ranken, R.E., Salem M.H. "Liner-Medium Interaction in Tunnels", Journal of the Construction Division, ASCE, vol. 101, no. C01, pag. 127-141, 1975.

(15) - Ferrera-Boza, R.A., Paul, S.L. "Structural Behavior of Monolithic Concrete Tunnel Liner Models", reporte no. UILU-ENG-78-2028, Departamento de Ingeniería Civil, University of Illinois at Urbana-Champaign, diciembre 1978.

(16) - Paul, S.L., Ferrera-Boza, R.A. "Concrete Tunnel Liners. Structural Testing of Cast-in-Place Liners", University of Illinois at Urbana-Champaign, reporte no. FRA-OR&D75-94, agosto de 1975.

(17) - Paul, S.L., Sinnamon, G. K., Ferrera-Boza, R.A. "Structural Test of Cast-in-Place Tunnel Liners", University of Illinois at Urbana-Champaign, reporte no. DOT-TST 76T-18, agosto 1976.

8.0 AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las autoridades de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal por el patrocinio a este proyecto, y por el interés mostrado durante el desarrollo del mismo.

Se agradece a Roberto Meli por sus comentarios y sugerencias a este trabajo.

Este trabajo no hubiera sido posible sin la participación de técnicos y trabajadores del Instituto de Ingeniería. Rodolfo Peters y el personal de Instrumentación colaboraron en la preparación y adaptación de sistemas de medición. Oscar Weckmann colaboró eficientemente en la preparación de los ensayos experimentales.

Se agradece a la Coordinación de Ingeniería Sísmica del II, por permitir el empleo de la computadora PRIME, en la cual se efectuaron las corridas del programa SAP6 que se empleó en esta investigación para el análisis estructural con el método de elementos finitos.

TABLA 2.1: CARACTERISTICAS DE TUNELES EN SUELO BLANDO Y CAMBIOS DE DIAMETRO CON BASE EN MEDICIONES DE CAMPO.

TUNEL	PROFUNDIDAD AL CENTRO DEL TUNEL	D (m)	$\Delta D/D$ medido %	MATERIAL
Mississauga sewer (1)	13.1 m	4.27	0.28	Anillos de acero y placas de concreto.
Greenpark underground (1)	29.3 m	4.07	0.69	Dovelas de acero atornilladas.
Regents park (1)	34.1 m	4.15	0.72	Concreto colado en el lugar.
Ottawa outfallsewer (1)	18.3 m	3.04	2.47	Anillos corrugados de 8 dovelas de acero.
Grangemouth sewer (1)	10.0 m	2.44	3.11	Concreto colado en el lugar sobre anillos en "costilla" de acero.
Tyneside (1)	7.5 m	2.02	0.94	No se menciona.
Heathrow cargo (1)	13.5 m	10.90	0.16	No se menciona.
Interceptor central (México) (2)	23.0 m	6.00	3.72	Dovelas de concreto precolado con uniones de rodilla.
Drenaje profundo (México) (3)	26.0 m	6.06	5.28	Dovelas de concreto precolado con uniones de rodilla.
Drenaje semiprofundo Iztapalapa, México (4)	12.0 m	3.67	0.19	Dovelas de concreto precolado con uniones atornilladas.

(1) Ref. (4)

(2) Ref. (9)

(3) Ref. (7)

(4) Ref. (1)

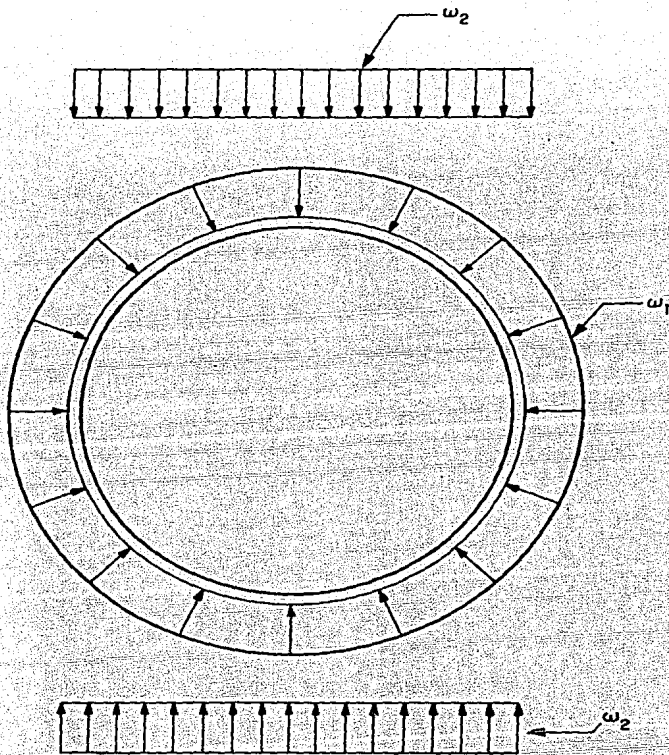
**TABLA 3.1: ELEMENTOS MECANICOS MAXIMOS ANALITICOS PARA LAS TRES
 CONDICIONES DE CARGA EMPLEADAS EN LABORATORIO (En porcentaje de los
 obtenidos con dos diferentes condiciones de carga del terreno para el
 análisis del túnel).**

	: CONDICION DE DISEÑO : : SEGUN OKUMURA CORP.* :		: CONDICIONES DE CAMPO : : EN IZTAPALAPA ** :	
ELEMENTO MECANICO	M	N	M	N
CONDICION DE CARGA DE LABORATORIO				
I (Pv/Pl=0.56)	60	12	170	16
II (Pv/Pl=0.87)	110	36	311	49
III (Pv/Pl=1.09)	100	58	281	78

M: momento flexionante en la clave
 N: carga normal en la clave

* Con 17 m de profundidad al centro del túnel y 8 m de nivel freático.

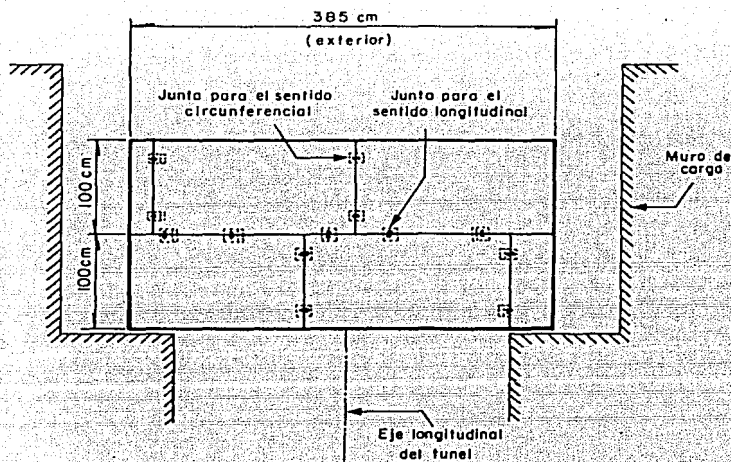
** Con 12 m de profundidad al centro del túnel y 3 m de nivel freático.



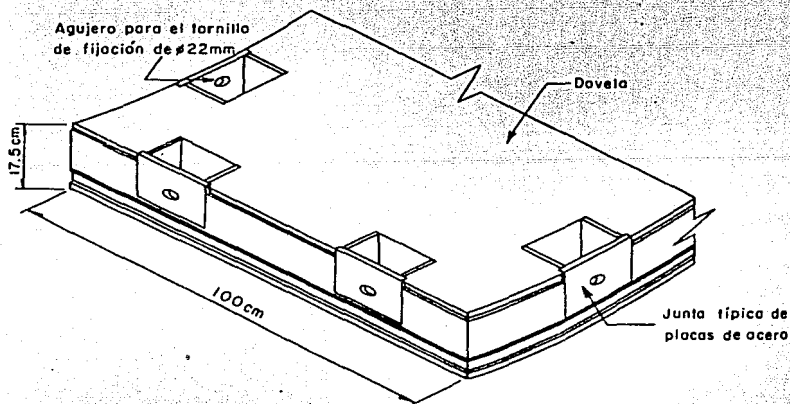
ω_1 : Carga de confinamiento por carga de suelo

ω_2 : Carga uniformemente repartida para producir el cambio de diámetro

Fig 2.1 Criterio para representar las acciones del terreno sobre un tunel según Chase(ref. 5)



a) Espécimen en el laboratorio



b) Detalle típico de una dovela

Fig 3.1 Esquema de la colocación de tornillos de unión entre dovelas

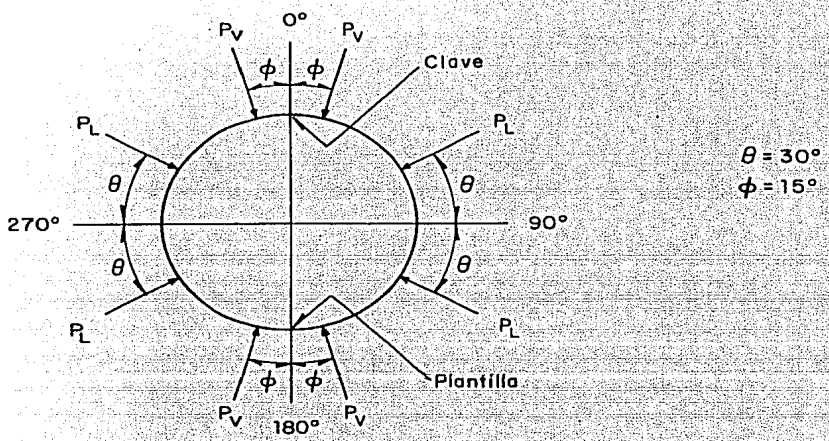


Fig 3.2 Distribución de las cargas aplicadas en el laboratorio

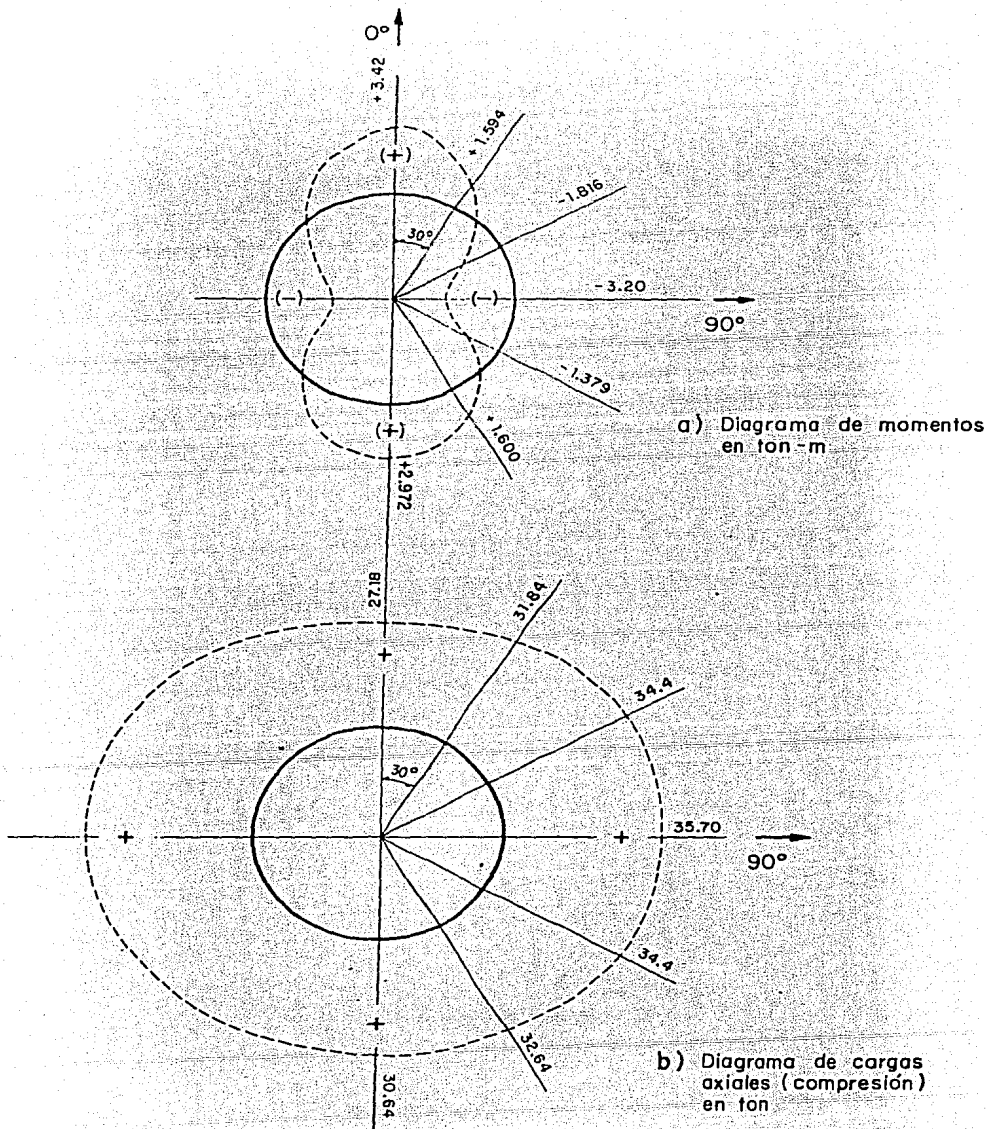


Fig 3.3 Diagramas de momentos y cargas axiales de diseño en el túnel de Iztapalapa, obtenidos de la memoria de cálculo de las dovelas efectuado por Okumura (ref. 6)

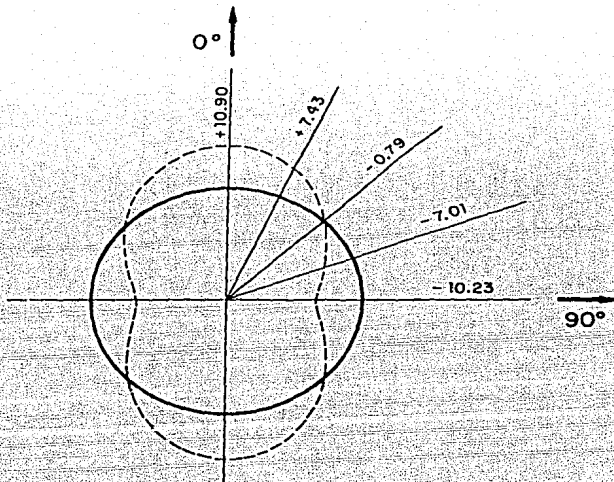


Diagrama de momentos flexionantes (ton-m)

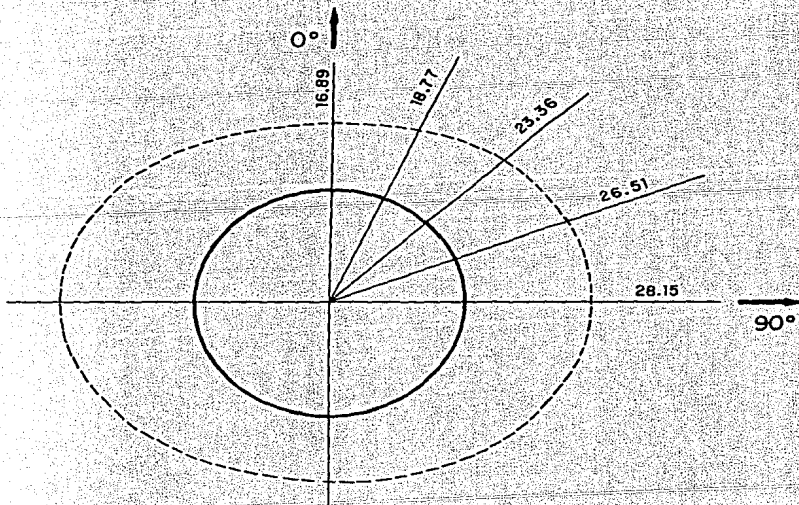


Diagrama de cargas axiales (ton)

Fig 3.4 Elementos mecánicos obtenidos a partir del análisis de un anillo de dovelas considerado continuo y con las cargas de la fig 3.5

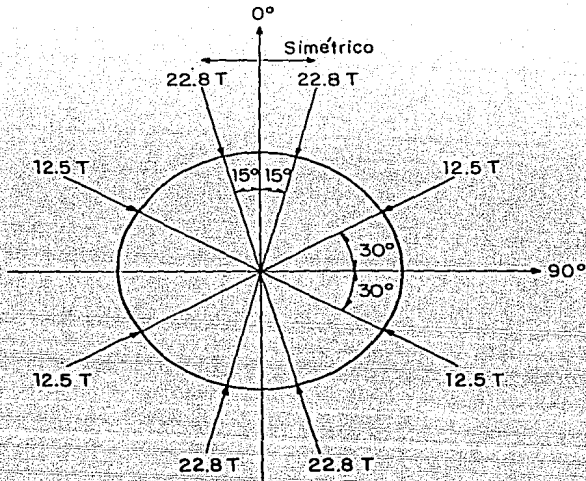


Fig 3.5 Condición de carga correspondiente a la distribución seleccionada de gatos hidráulicos para la capacidad esperada de éstos

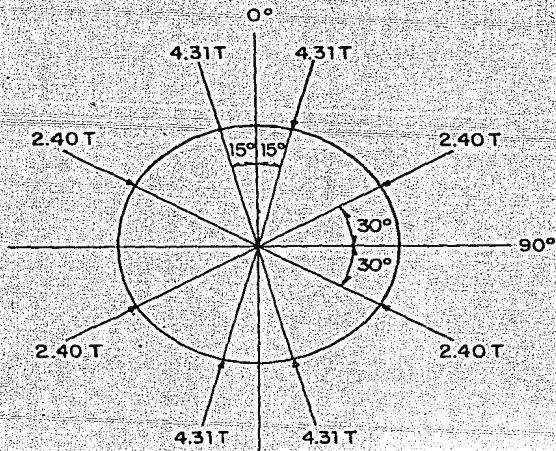


Fig 3.6 Condición de carga I correspondiente a una relación P_L/P_V de 0.56

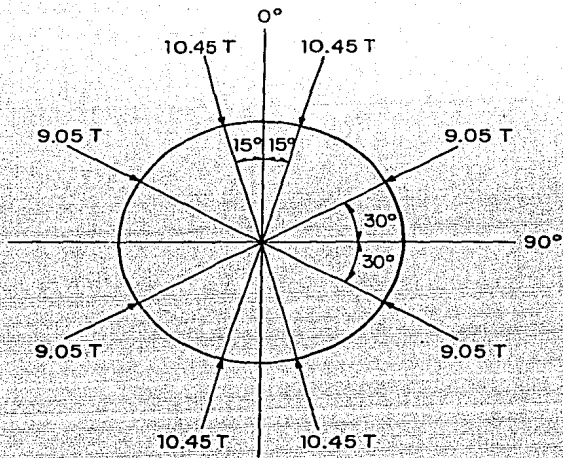


Fig 3.7 Condición de carga II correspondiente a una relación P_L/P_V de 0.87

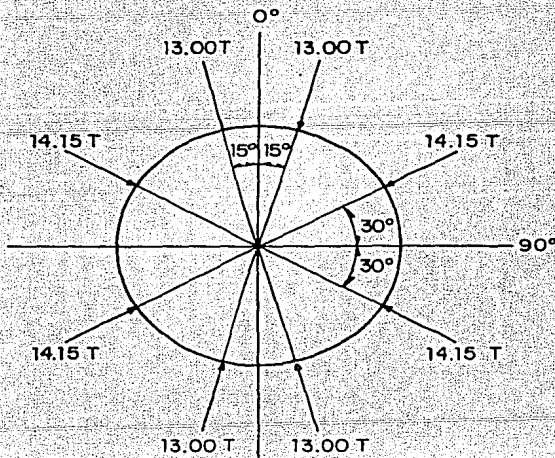


Fig 3.8 Condición de carga III correspondiente a una relación P_L/P_V de 1.09

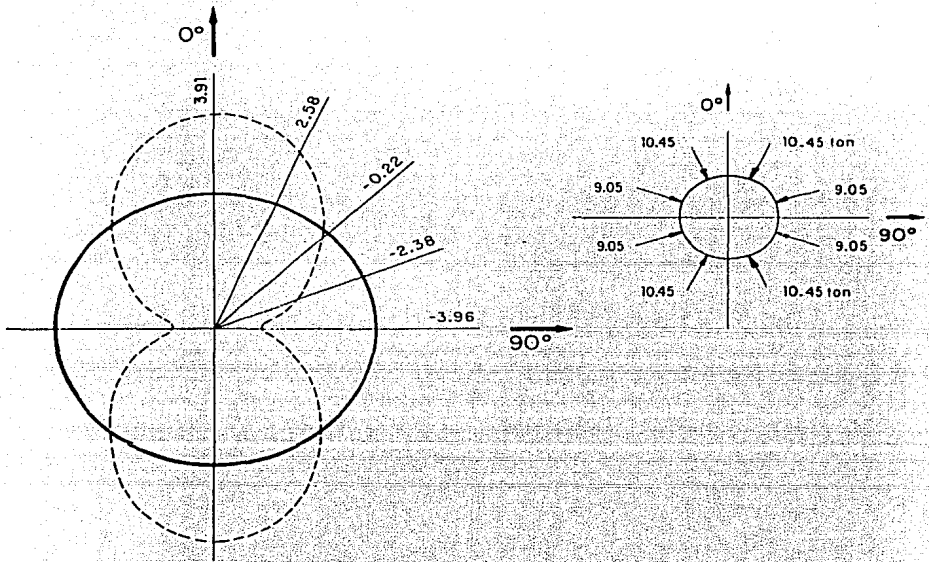


Fig 3.9 Momentos flexionantes obtenidos del análisis de un anillo para la condición de carga II

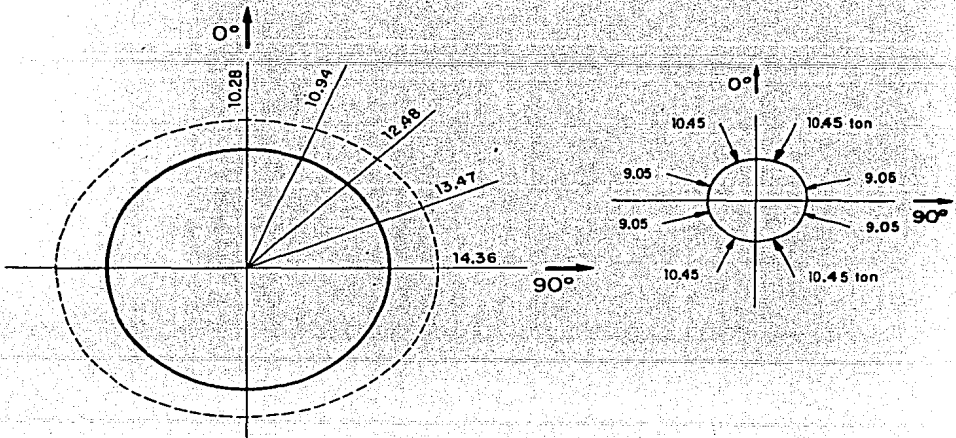


Fig 3.10 Cargas axiales obtenidas del análisis de un anillo para la condición de carga II

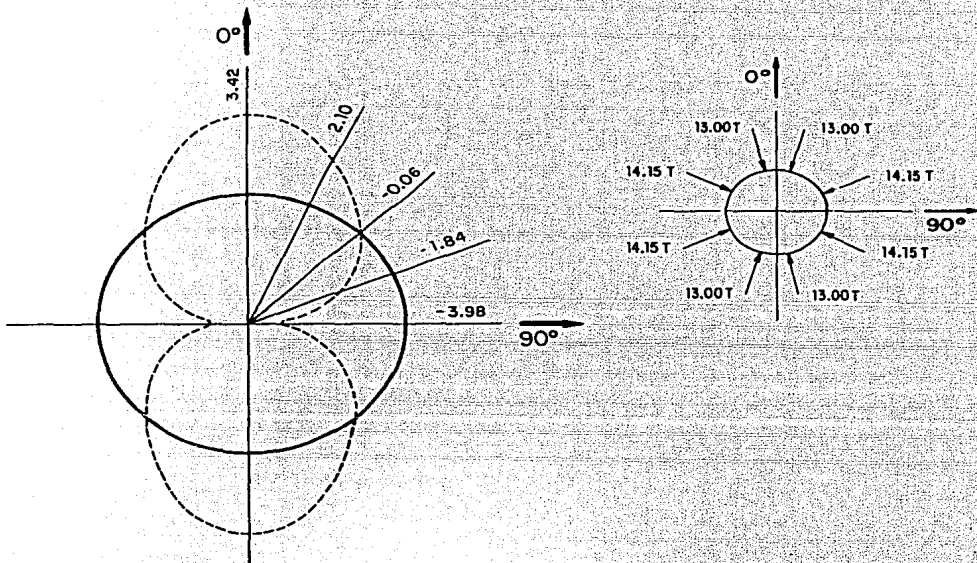


Fig 3.11 Momentos flexionantes obtenidos del análisis de un anillo para la condición de carga III

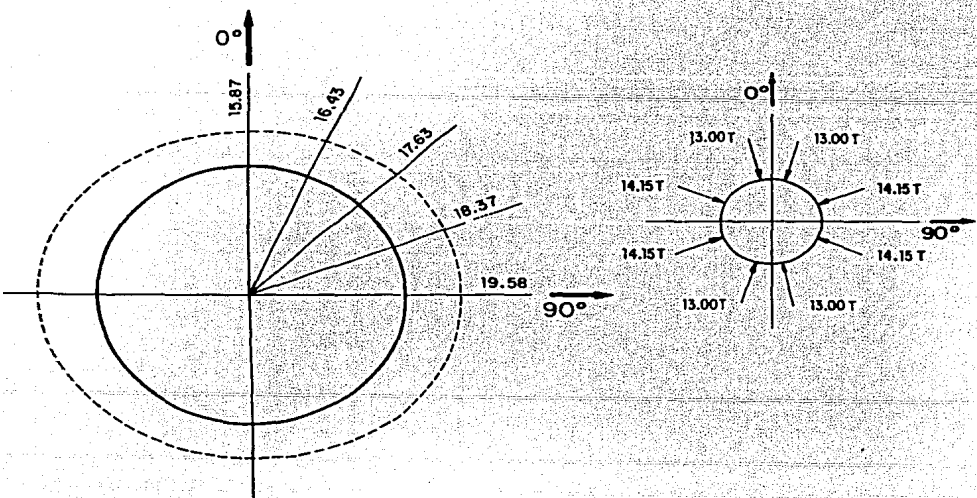
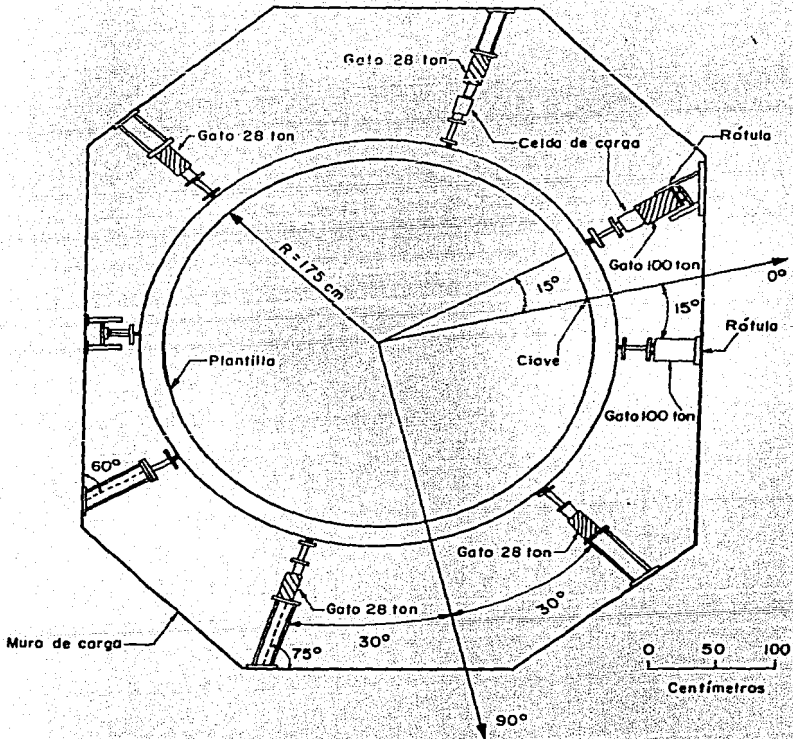


Fig 3.12 Cargas axiales obtenidas del análisis de un anillo para la condición de carga III



Planta General

Fig 3.13 Especimen ensayado y marco de carga

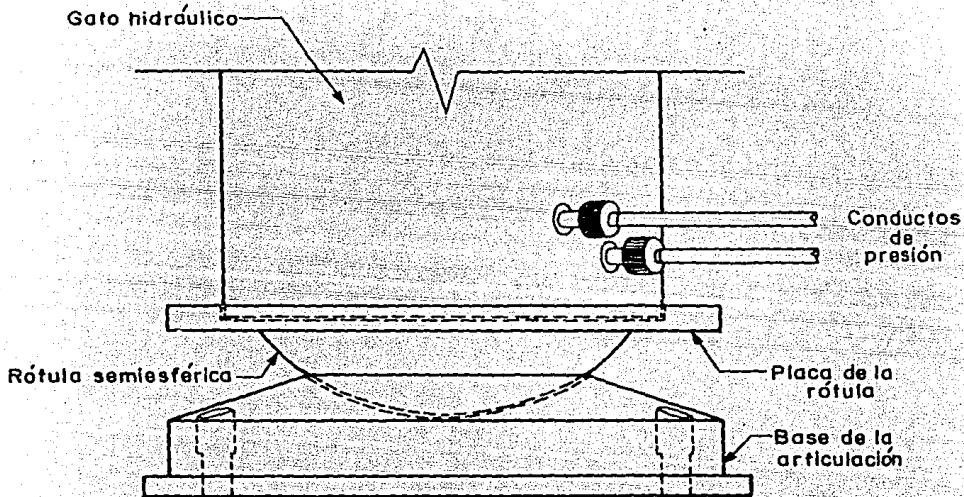


Fig 3.14 Articulación esférica en la base del gato y placa base

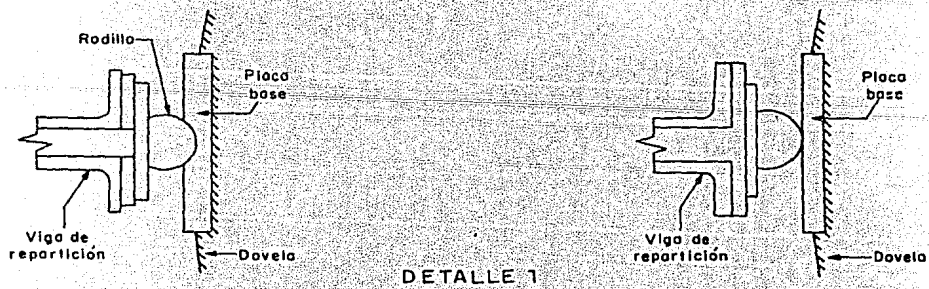
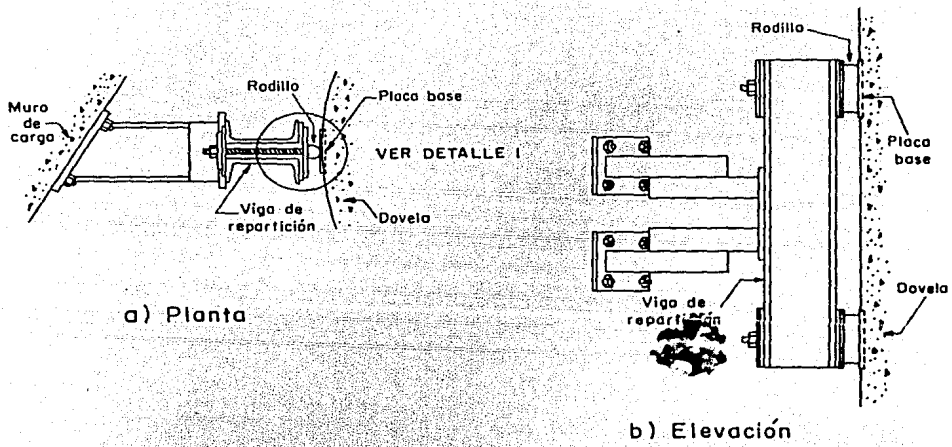
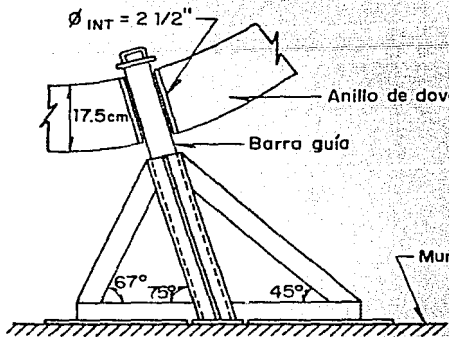
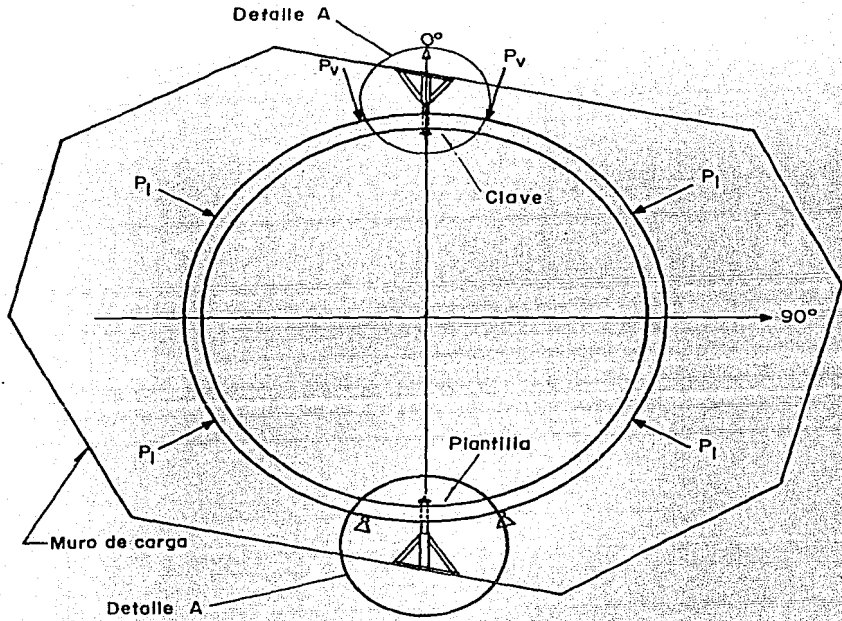
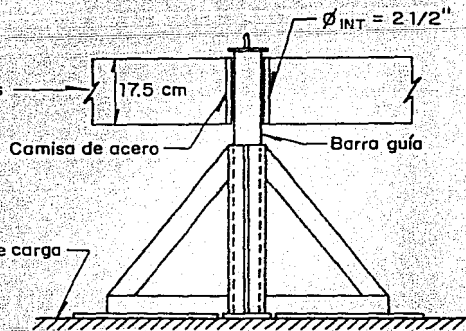


Fig 3.15 Detalles de las vigas de repartición



Detalle A Vista Superior



Detalle A Vista Lateral

Fig 3.16 Restricción de grado de libertad alrededor del eje longitudinal del túnel

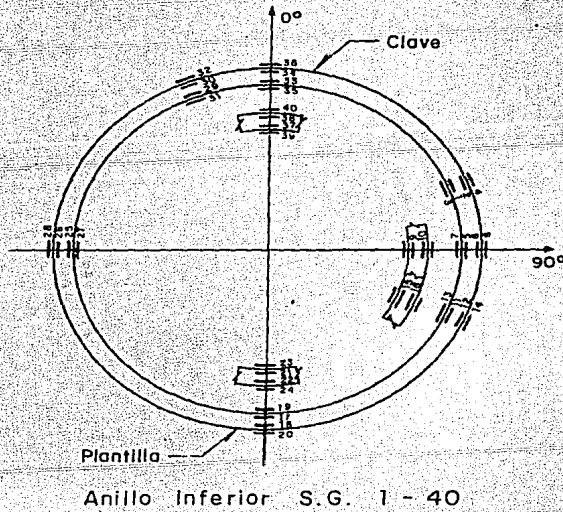
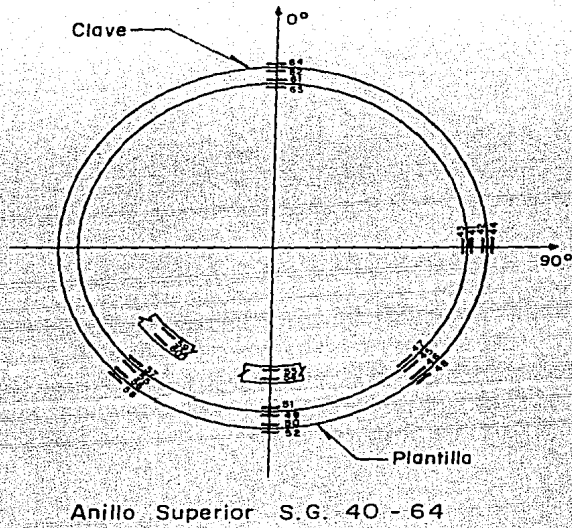
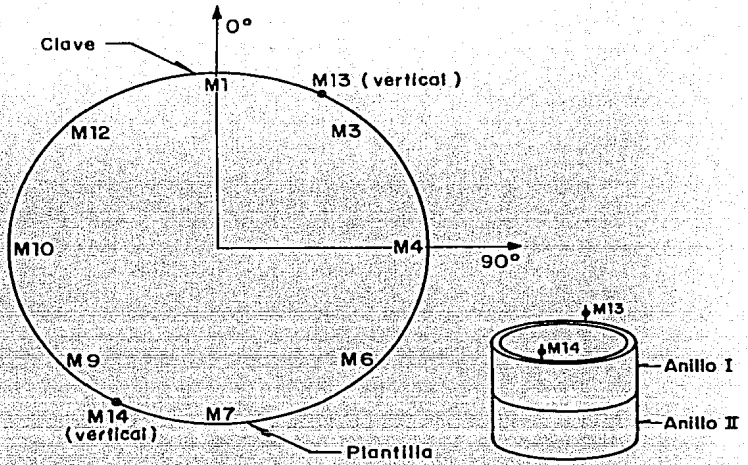
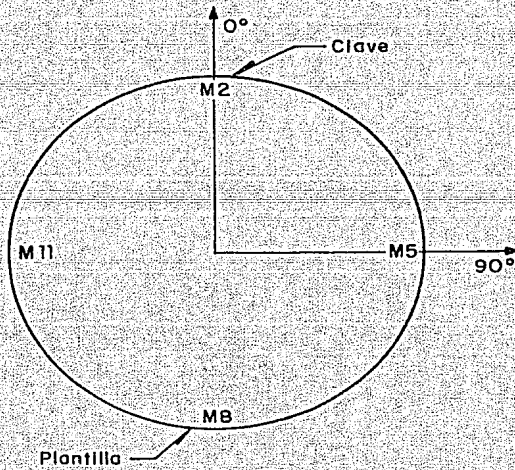


Fig 3.17 Distribución de medidores de deformaciones de anillos ensayados

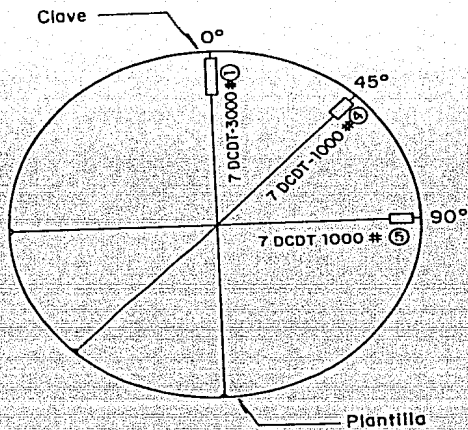


Anillo I (arriba)

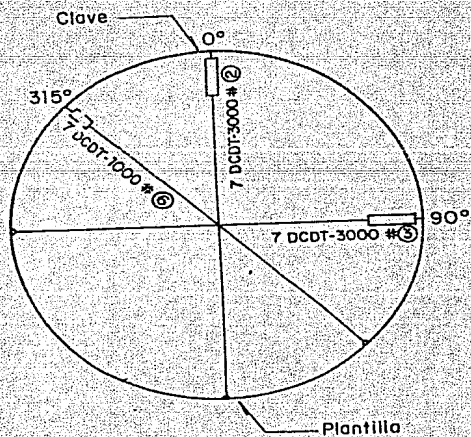


Anillo II (abajo)

Fig 3.18 Distribución de micrómetros en anillos ensayados

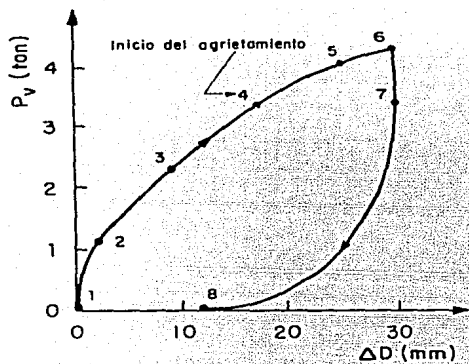


Anillo I (arriba)

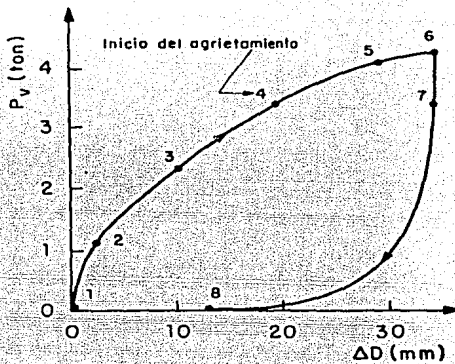


Anillo II (abajo)

Fig 3.19 Distribución de medidores eléctricos de cambios de diámetros

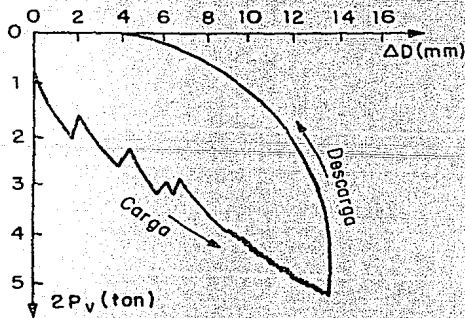


a) Anillo superior

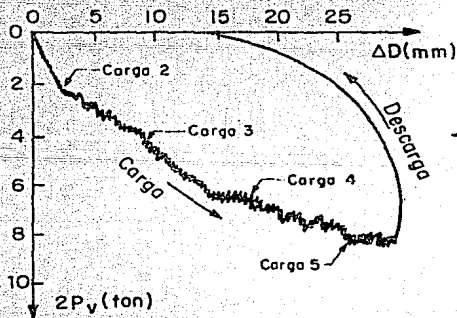


b) Anillo inferior

Fig 4.1 Curvas carga radial P_v en un anillo versus cambio de diámetro en la clave para el ensaye con carga I



a) Primer ensayo



b) Segundo ensayo

Fig 4.2 Curvas carga radial P_v versus cambio de diámetro en la clave obtenidas directamente del graficador X-Y para el ensaye con carga I

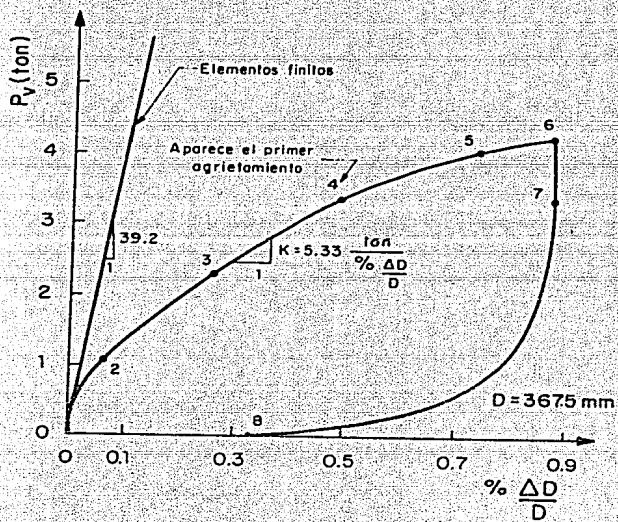


Fig 4.3 Curva P_v en un anillo versus porcentaje del promedio de cambio de diámetro en los dos anillos ensayados con carga tipo I

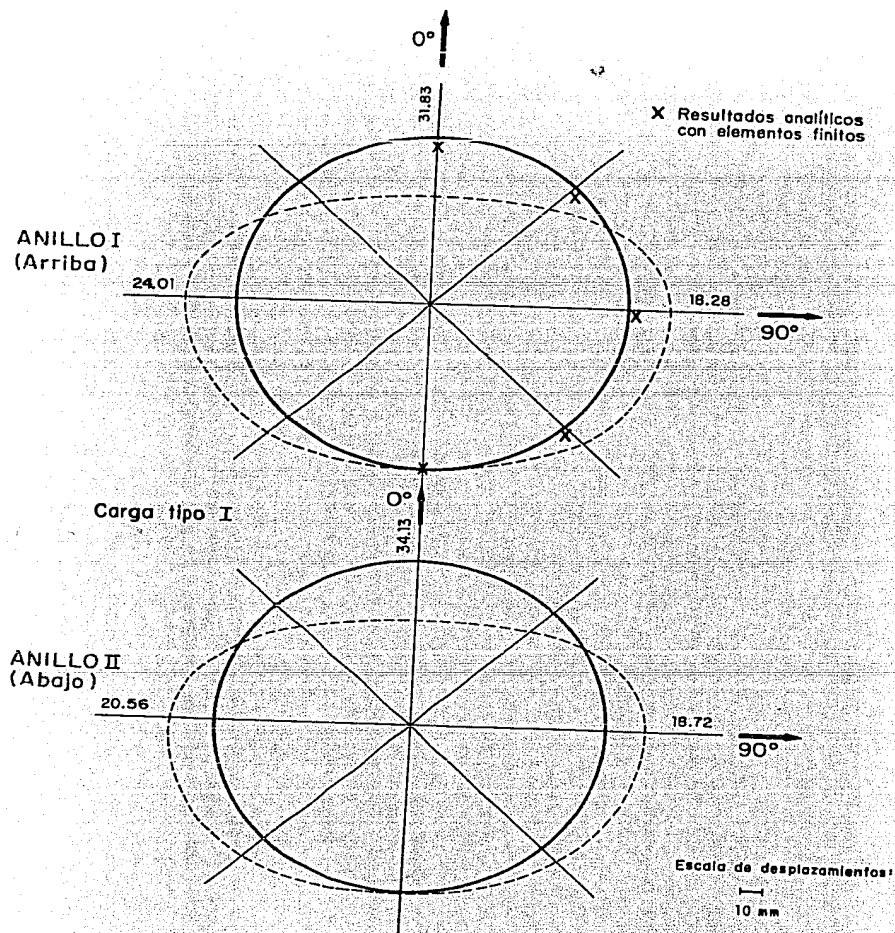
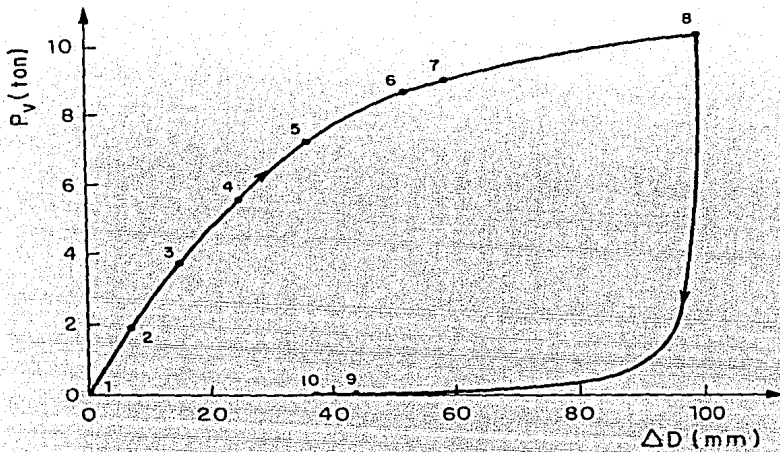
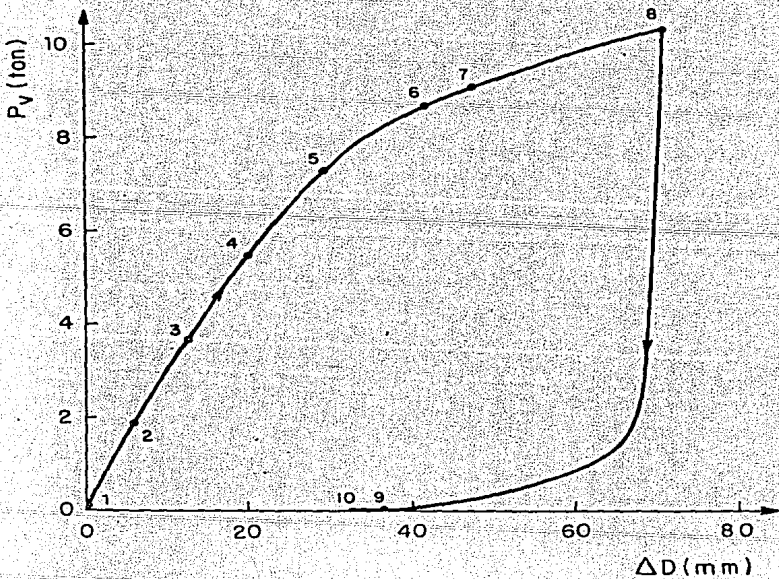


Fig 4.4 Deformadas de los anillos de dovelas obtenidas con las cargas máximas del ensayo con la carga tipo I y a partir de las lecturas de micrómetros



a) Anillo Inferior



b) Anillo superior

Fig 4.5 Curvas carga radial P_V versus cambio de diámetro en la clave para el ensayo con carga tipo II

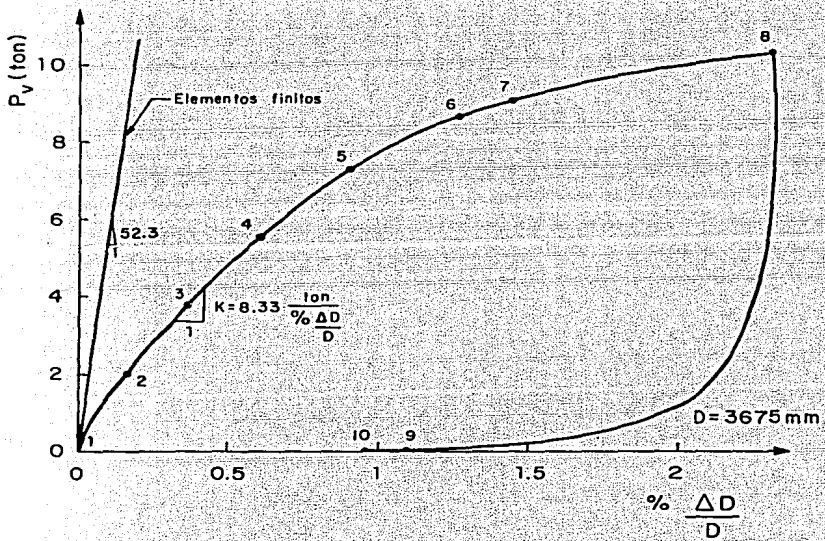


Fig 4.6 Curva P_v versus porcentaje del promedio de cambio de diámetro en los anillos ensayados con carga tipo II

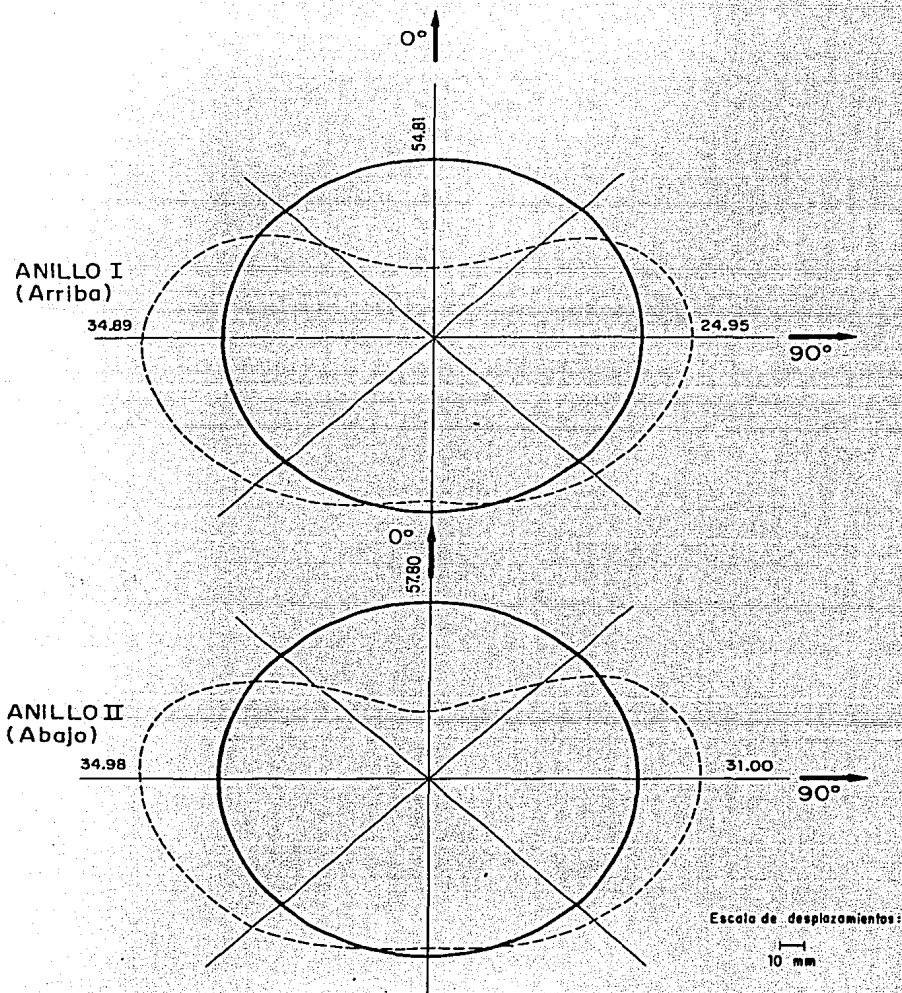


Fig 4.7 Deformadas de los dos anillos de dovelas obtenidas con las cargas máximas del ensayo con carga tipo II y a partir de las lecturas de micrómetros

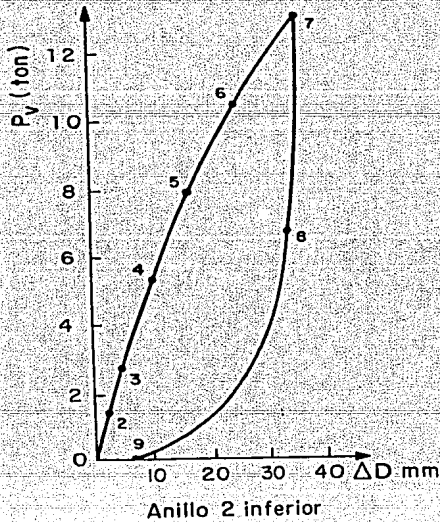
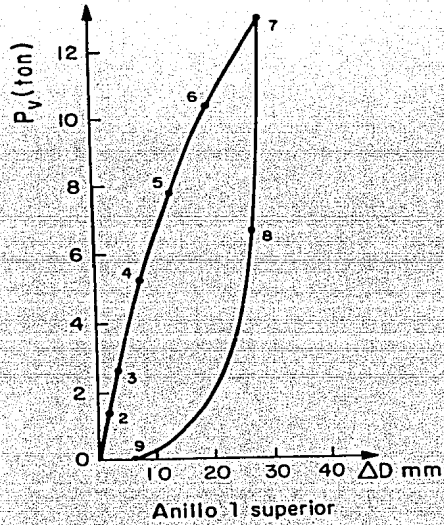


Fig 4.8 Curvas carga radial P_V versus cambios de diámetro en la clave para el ensayo con carga tipo III

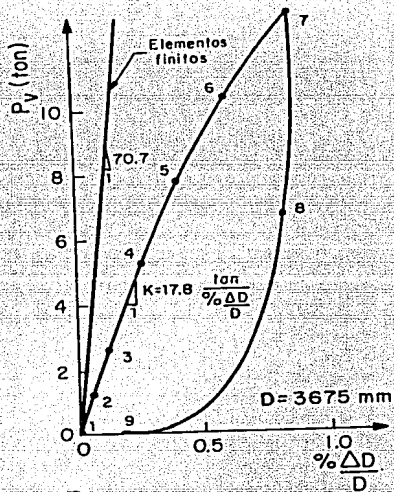


Fig 4.9 Curva P_V (en un anillo) versus porcentaje del promedio de cambio de diámetro en los anillos ensayados con carga tipo III

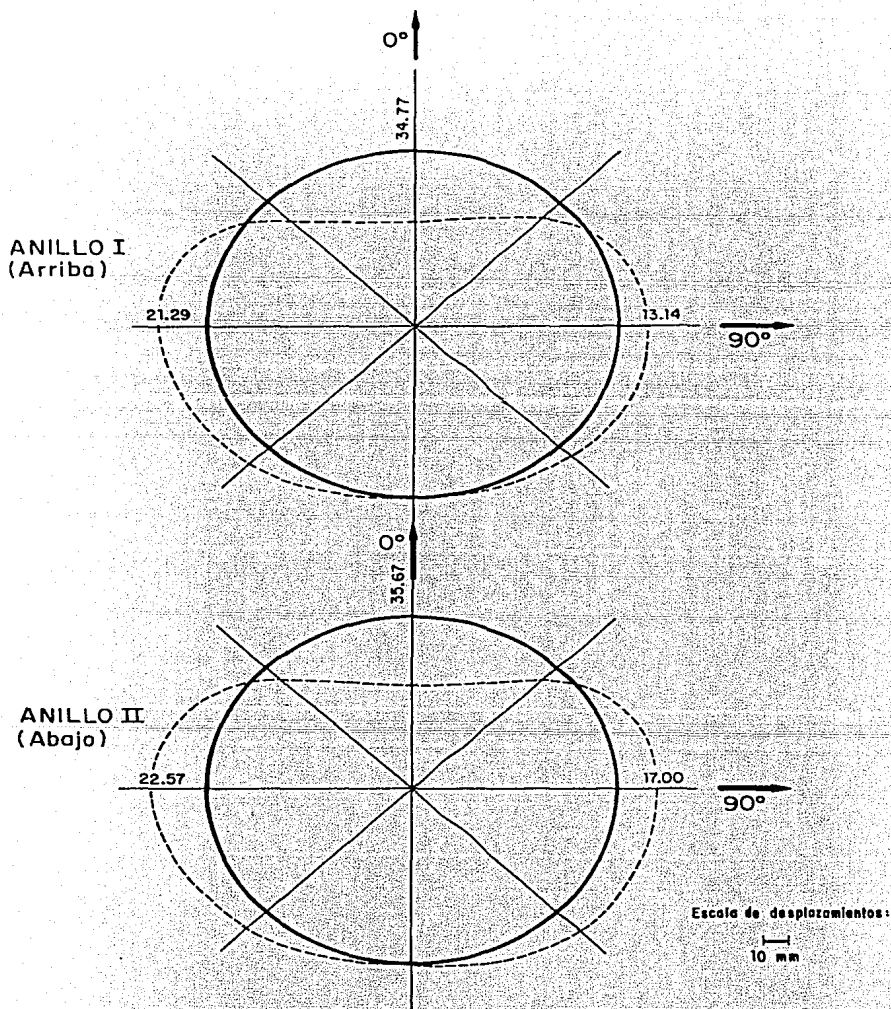
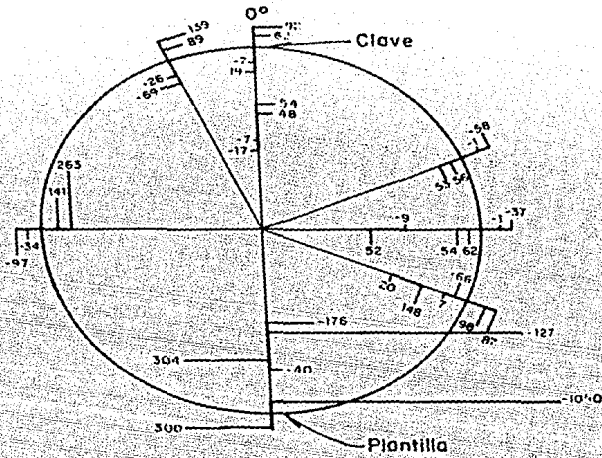
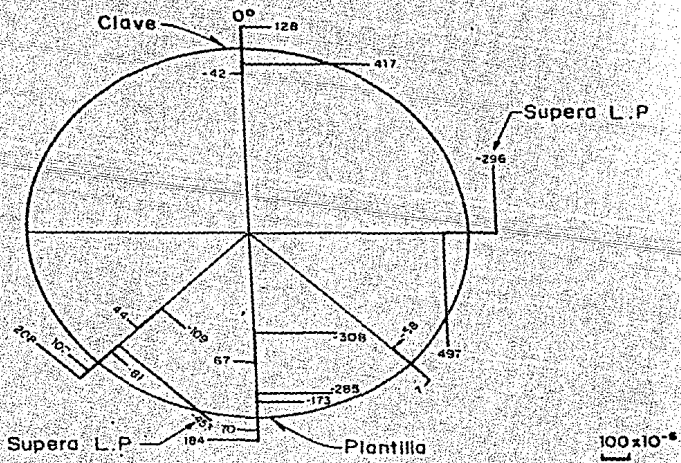


Fig 4.10 Deformadas de los dos anillos de dovelas obtenidas con las cargas máximas del ensayo con carga tipo III y a partir de las lecturas de micrómetros

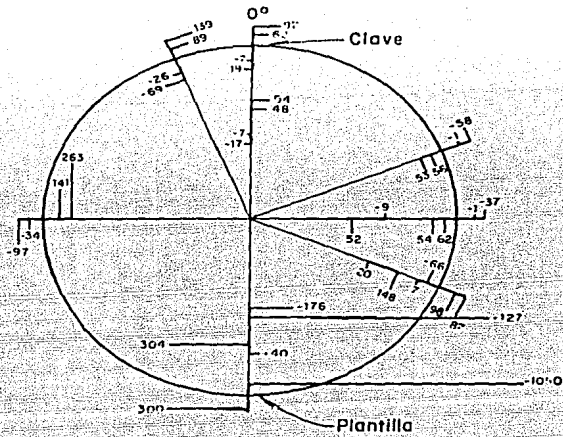


a) Abajo

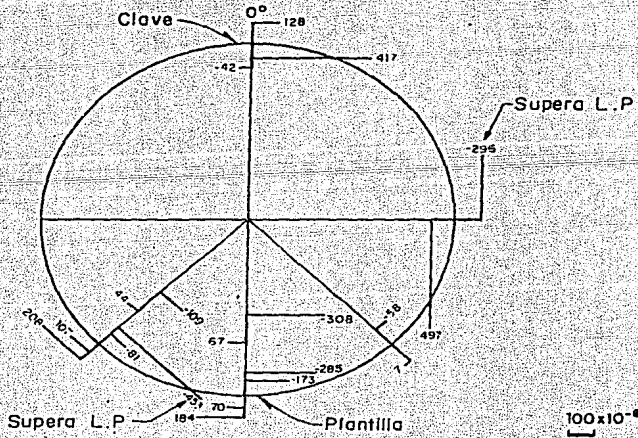


b) Arriba

Fig 4.11 Deformaciones (cm/cm x 10⁻⁶) obtenidas en el nivel de carga tipo I

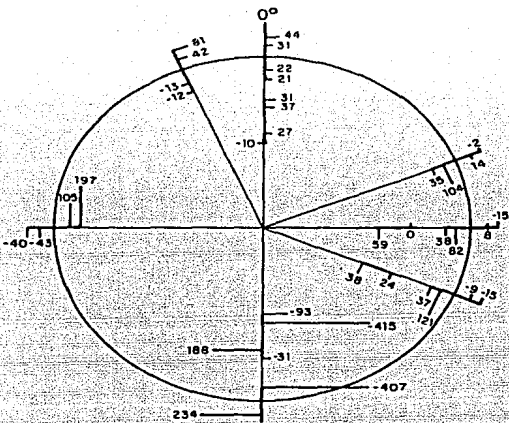


a) Abajo

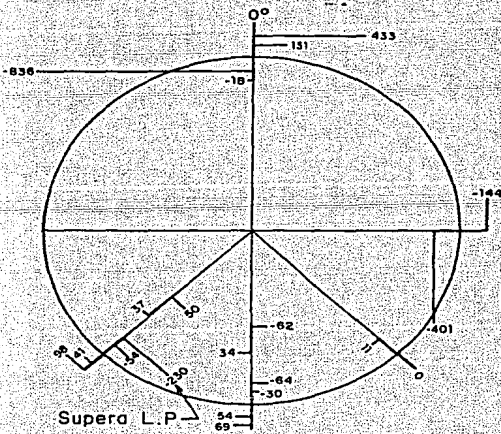


b) Arriba

Fig 4.11 Deformaciones ($\text{cm/cm} \times 10^{-6}$) obtenidas en el nivel de carga tipo I

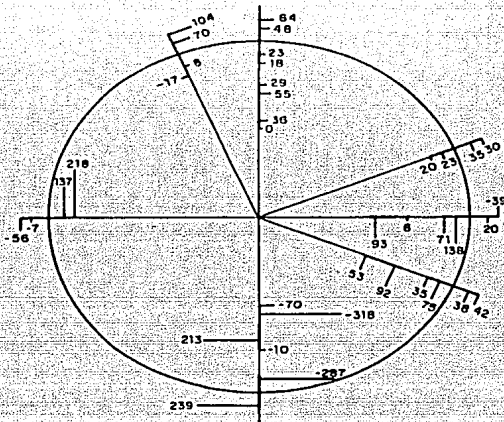


a) Abajo

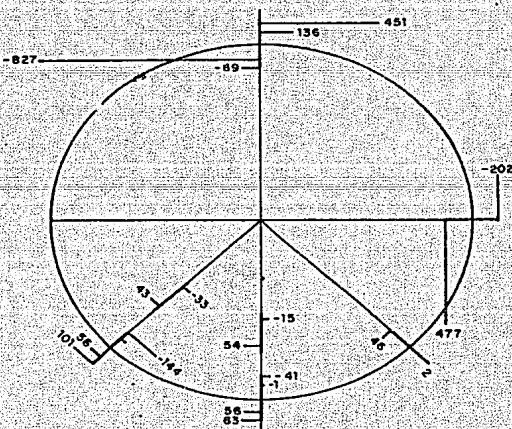


b) Arriba

Fig 4.12 Deformaciones ($\text{cm/cm} \times 10^{-6}$) obtenidas para el 40% del máximo alcanzado en la condición de carga tipo II

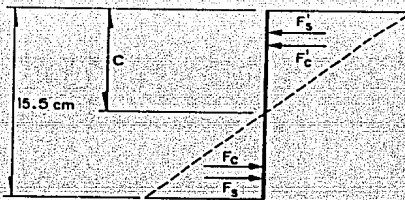


a) Abajo

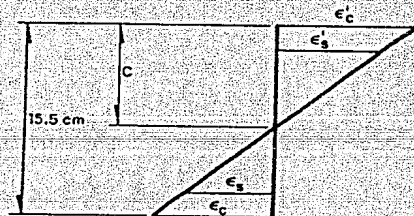


b) Arriba

Fig 4.13 Deformaciones ($\text{cm/cm} \times 10^{-6}$) obtenidas para el 40% del máximo alcanzado en la condición de carga tipo III



a) Fuerzas



b) Deformaciones

Fig 4.14 Nomenclatura de fuerzas y deformaciones en la sección plana

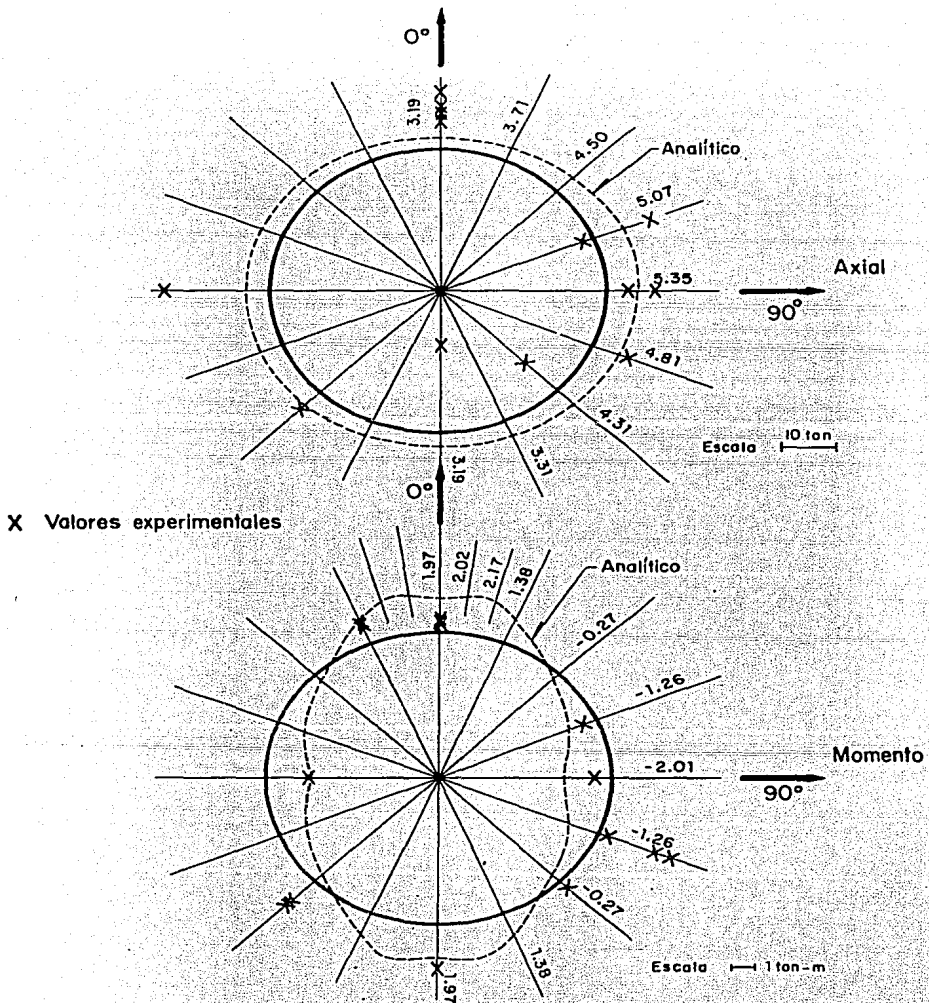


Fig 4.15 Distribución de momentos flexionantes y cargas axiales teóricas con los resultados experimentales del ensayo con carga tipo I

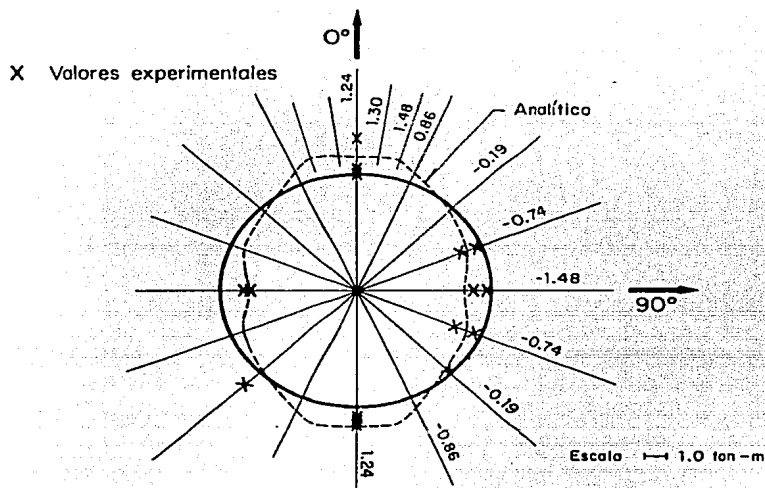


Fig 4.16 Distribución de momentos flexionantes teóricos con los resultados experimentales del ensayo con carga 40% de la carga máxima tipo II

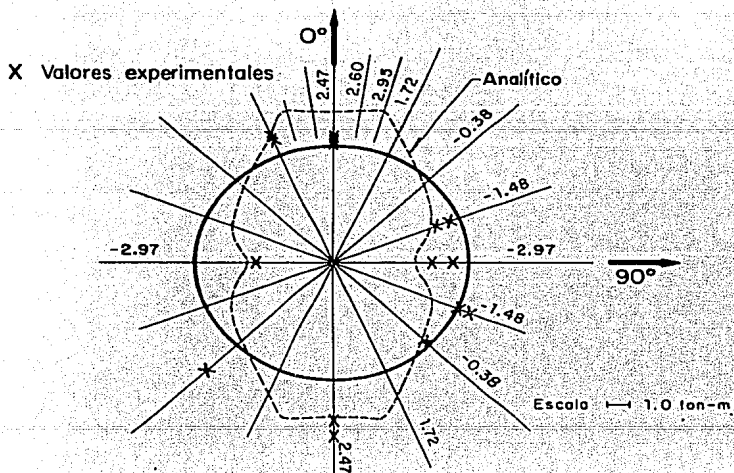


Fig 4.17 Distribución de momentos flexionantes teóricos con los resultados experimentales del ensayo con carga 80% de la carga máxima tipo II

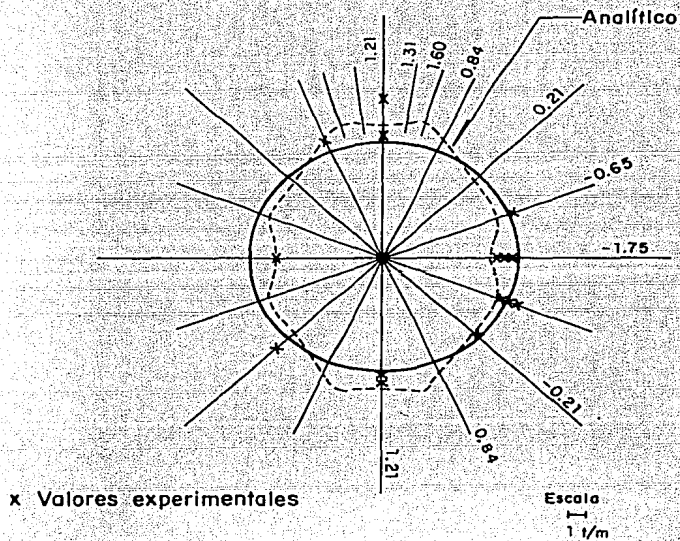


Fig 4.18 Distribución de momentos flexionantes teóricos con los resultados experimentales del ensayo con carga 40% de la carga máxima tipo III

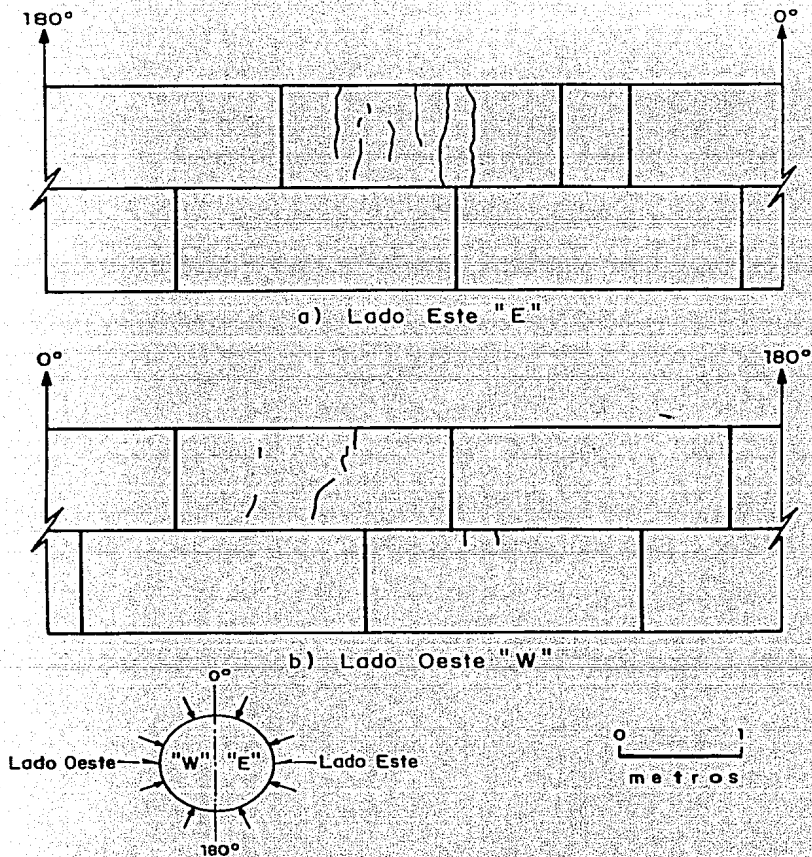
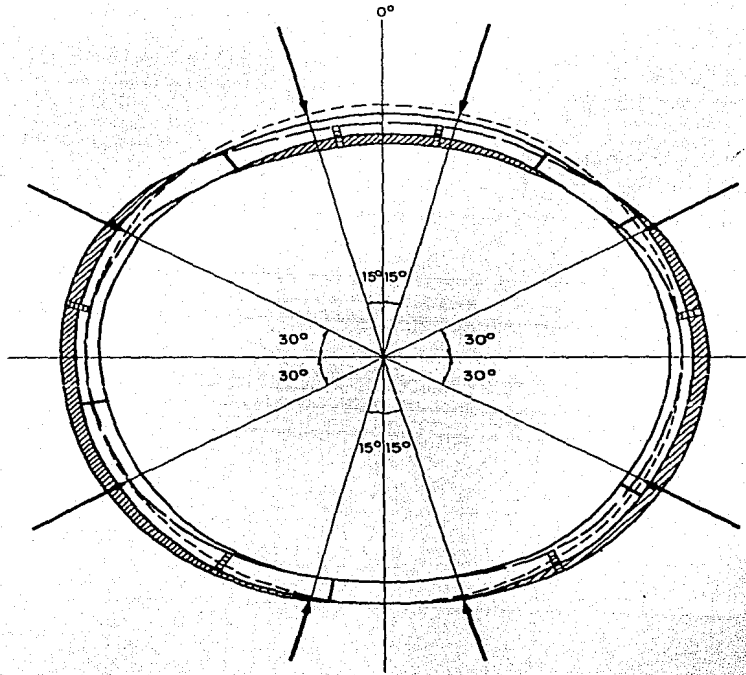


Fig 4.19 Agrietamiento observado al alcanzar el nivel de carga máxima tipo I



Vista desde la parte superior
(Planta)

- Posición inicial del diámetro exterior
- ▨ Anillo inferior
- Anillo superior
- / Articulación en el anillo superior
- / Articulación en el anillo inferior

Fig 4.20 Distribución típica de las deformadas de los dos anillos durante un ensayo

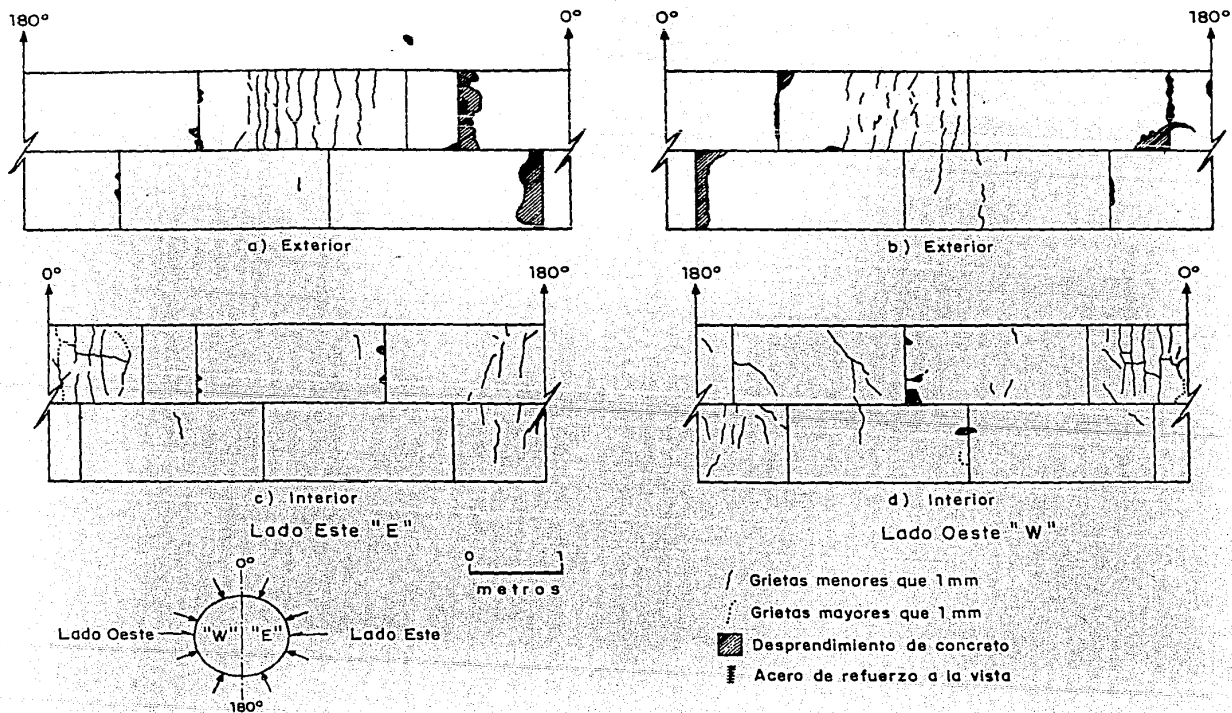


Fig 4.21 Levantamiento de daños al final del ensayo con condición de carga tipo II

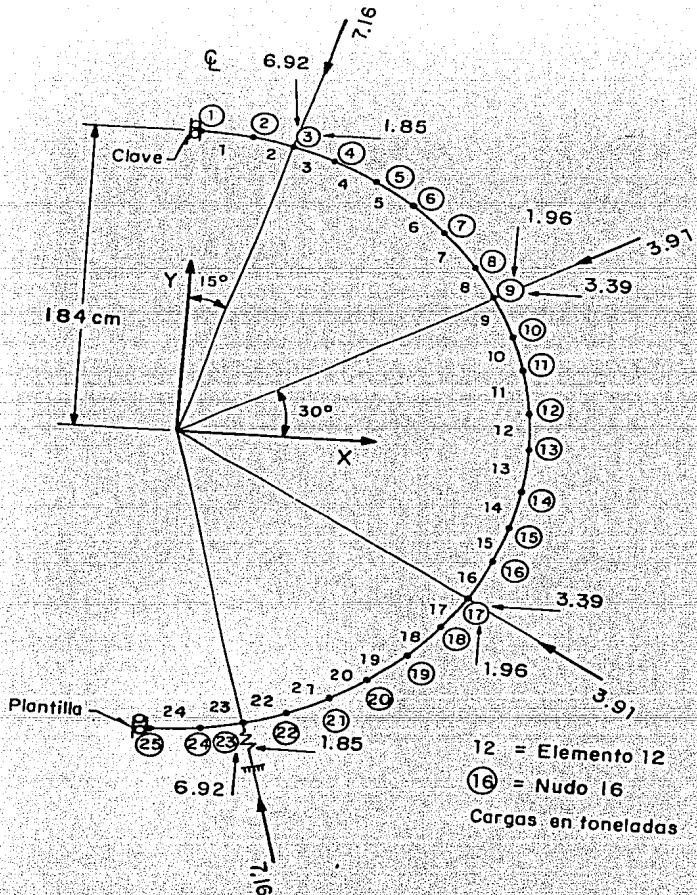
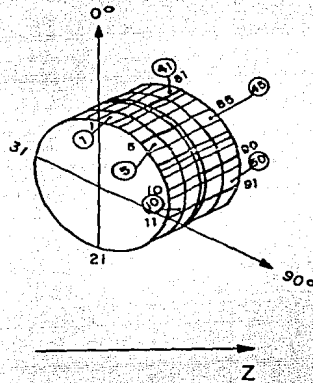
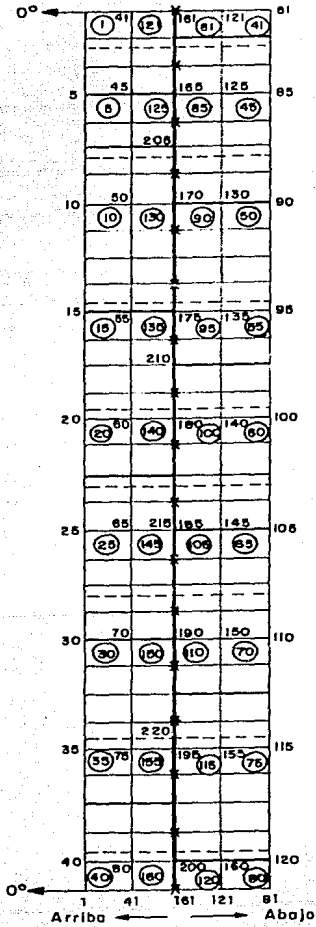


Fig. 5.1 Modelo de elementos finitos tipo viga considerado para el modelo analítico I de los anillos ensayados



- ⊙ Elemento 50
- 92 Nudo 92
- Articulación
- * Tornillo para el sentido longitudinal del túnel

1 m
Escala

Fig 5.2 Modelo de elementos finitos tipo cascarón-placa con — considerado para el modelo analítico II de los anillos ensayados

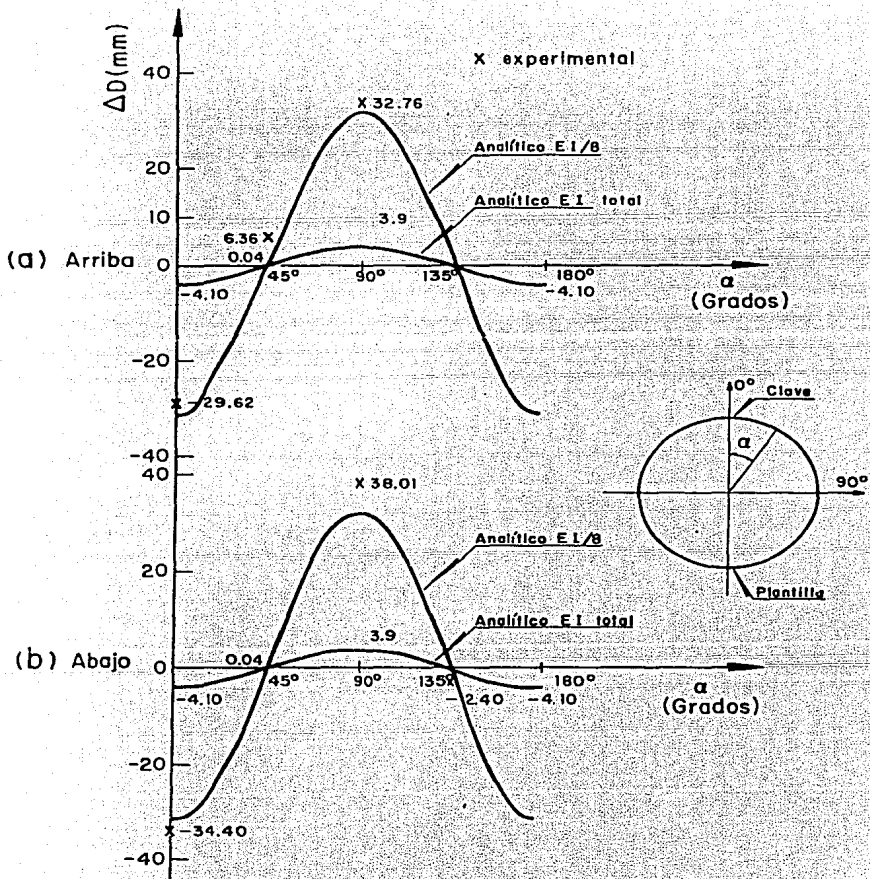


Fig 5.3 Cambios de diámetros obtenidos con DCDT en el ensayo con carga tipo I y los obtenidos con el modelo de elementos finitos tipo viga

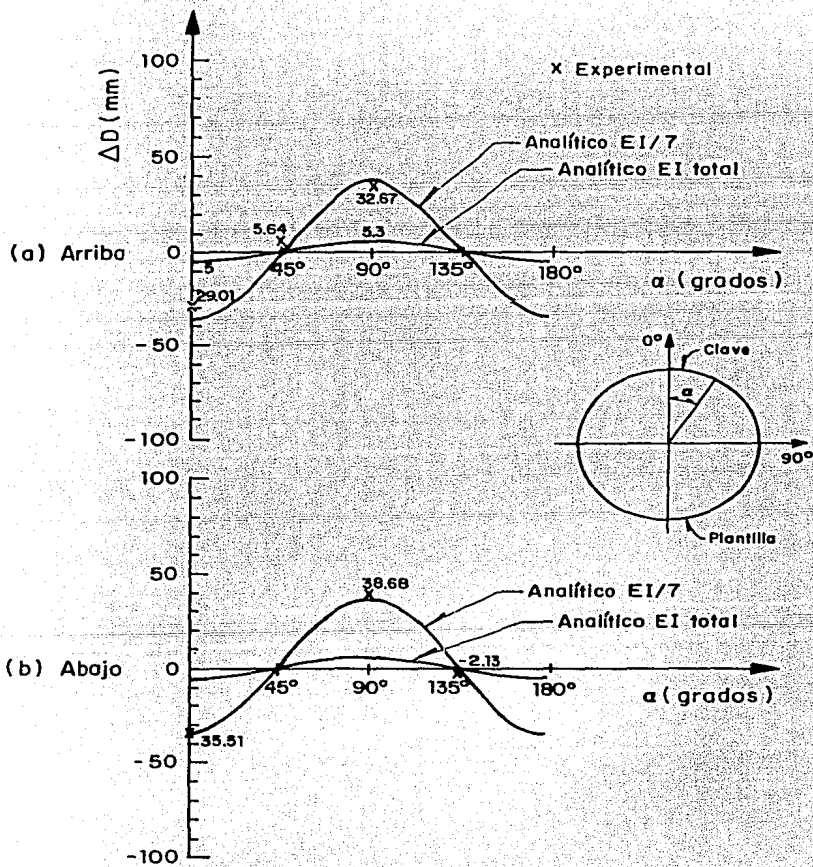


Fig 5.4 Cambios de diámetros obtenidos con DCDT en el ensayo con 70% de la carga máxima alcanzada de tipo II, y los obtenidos con el modelo de elementos finitos tipo vigas

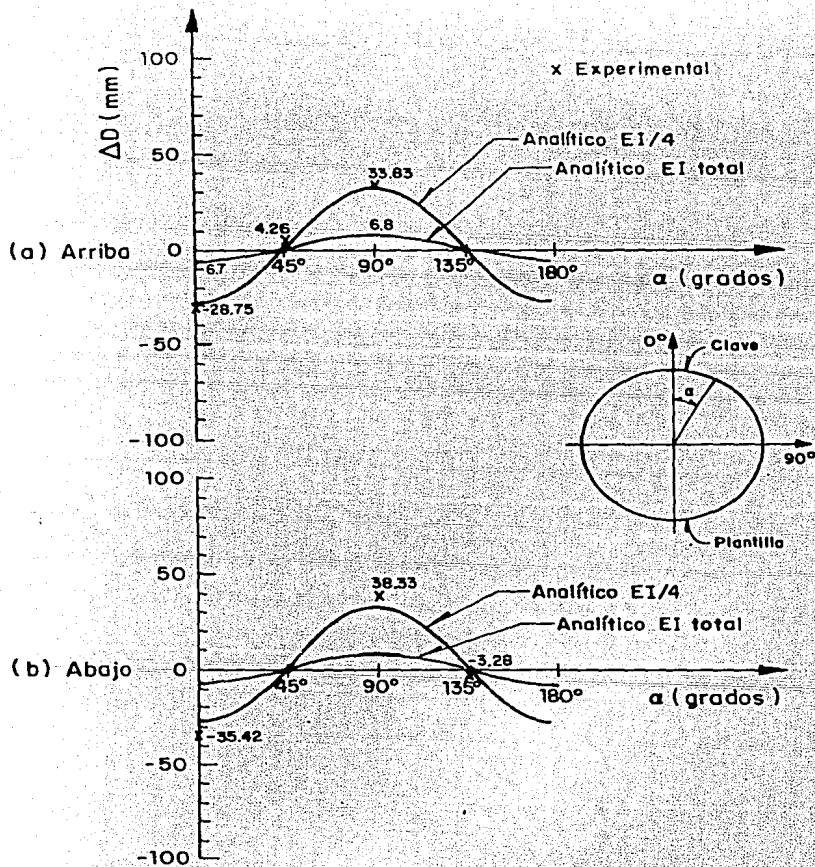
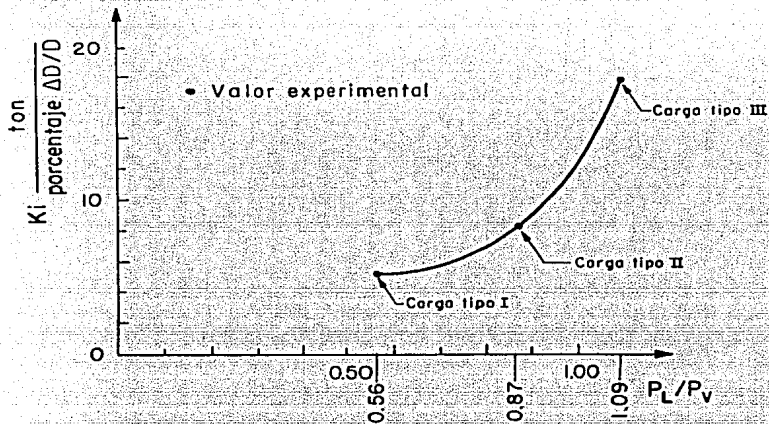
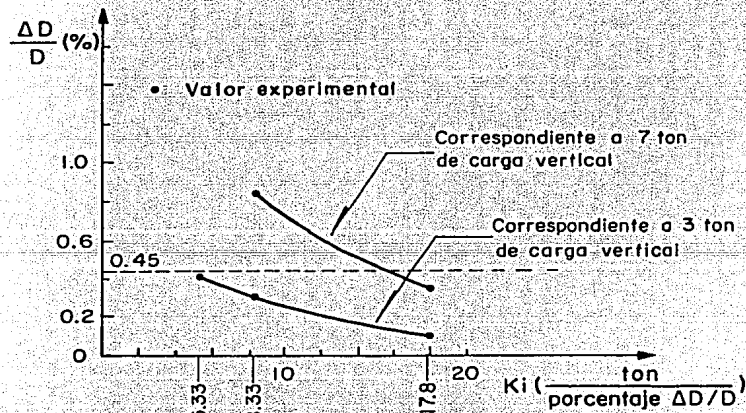


Fig 5.5 Cambios de diámetros obtenidos con DCDT en el ensayo con carga tipo III y los obtenidos con el modelo de elementos finitos tipo vigas



a) Rigideces no lineales iniciales K_i y confinamiento P_L/P_V



b) Relación entre cambios de diámetro en la clave y rigideces no lineales iniciales

Fig 5.6 Relaciones experimentales encontradas entre rigideces no lineales iniciales, confinamiento y cambios de diámetro en la clave

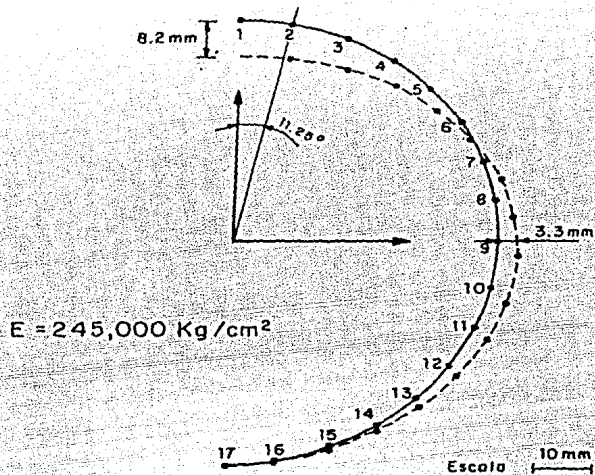


Fig 5.7 Configuración deformada de un anillo del túnel en Iztapalapa obtenida con análisis con elementos finitos para las condiciones específicas de campo y considerando el anillo continuo con la cuarta parte del valor EI total

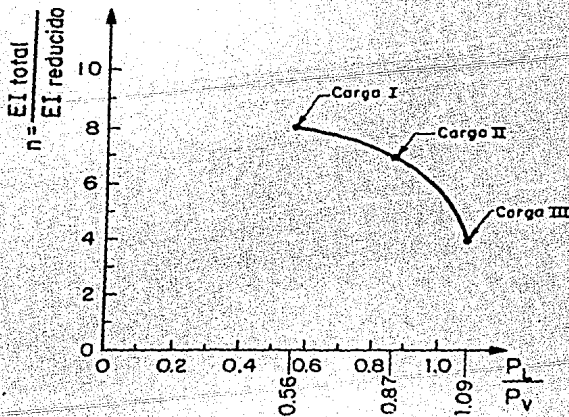
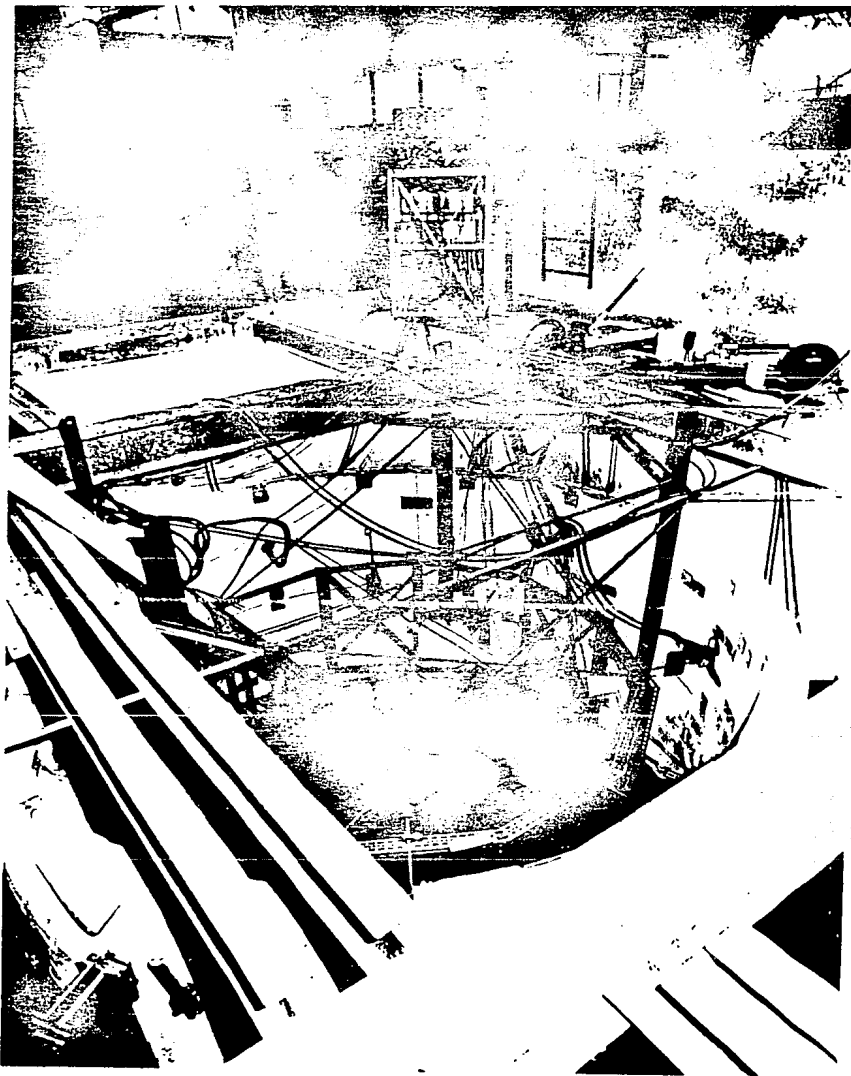


Fig 5.8 Factores de reducción de rigideces para el criterio propuesto de análisis por deformaciones admisibles en función del confinamiento



FOTOGRAFIA NO 1. VISTA DE LA ESTRUCTURA ENSAYADA, SISTEMA DE CARGA Y MEDICION