



# **DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

## **Facultad de Ingeniería**

**REPARACIÓN DE ELEMENTOS DE CONCRETO REFORZADO  
CON ALTO GRADO DE DAÑO.**

**Fermin León Bello.**

### **TRABAJO**

**Presentado a la División de Estudios de Posgrado de la**

**FACULTAD DE INGENIERIA  
DE LA  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**como requisito para obtener  
el grado de  
MAESTRO EN INGENIERIA**

**( ESTRUCTURAS. )**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**Agosto 1991.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

A Mercedes  
alimento de mi espíritu.

REPARACIÓN DE ELEMENTOS DE CONCRETO REFORZADO  
CON ALTO GRADO DE DAÑO.

502136



DEPFI

T. UNAM

1 9 9 1

LEO

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.	1
2.	TÉCNICAS DE REPARACIÓN.	3
2.1.	Desarrollos recientes.	3
2.2.	Inyección.	7
2.3.	Replazo.	9
2.4.	Encamisado.	9
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.	12
3.1.	Especímenes ensayados.	12
3.2.	Instrumentación.	14
3.3.	Técnicas de reparación aplicadas.	16
4.	RESULTADOS DE LOS ENSAYES.	19
4.1.	Especímenes D7 y D7R.	19
4.2.	Especímenes D8 y D8R.	27
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	32
	REFERENCIAS.	36
	TABLAS.	39
	FIGURAS.	41
	FOTOGRAFÍAS.	79
	AGRADECIMIENTOS.	

## 1. INTRODUCCIÓN.

Actualmente, en el diseño estructural se plantea que toda estructura debe ser capaz de resistir acciones sísmicas severas sin llegar al colapso, aceptando la posibilidad de disipar energía por medio de deformaciones inelásticas. Lo anterior implica el hecho de que en ciertas partes de las estructuras se desarrollen articulaciones plásticas que permitan deformaciones angulares importantes sin disminuir su resistencia. Al aplicar este criterio al caso de estructuras de concreto reforzado, será necesario tomar en cuenta que el concreto localizado en las zonas donde se desarrollan las articulaciones plásticas se verá sujeto a un agrietamiento importante. De lo anterior se reconoce la necesidad de estudiar la aplicación de métodos de reparación que permitan restablecer las características elásticas de estructuras sujetas a daño sísmico.

La importancia del desarrollo de métodos adecuados de reparación estriba en la necesidad que se tiene de conocer cómo será el comportamiento de las estructuras una vez reparadas; es decir, es necesario estar seguros de que el método de reparación aplicado permite restablecer la resistencia de los elementos dañados y reponer a la estructura su capacidad para desarrollar deformaciones importantes en el rango inelástico que le permitan soportar la acción de otro sismo fuerte.

En años recientes ha sido práctica común en la Ciudad de México rehabilitar edificios dañados añadiendo elementos estructurales de refuerzo, los cuales aumentan la rigidez global de

la estructura y le permiten admitir fuerzas sísmicas mayores. No es objetivo de este trabajo discutir la aplicación de métodos de reforzamiento de estructuras, sino evaluar la eficiencia que se tiene al aplicar diferentes métodos de reparación de elementos estructurales que se han visto dañados por acciones sísmicas.

En los siguientes capítulos se hace una breve descripción de las diferentes técnicas que se aplican en la reparación de elementos de concreto reforzado. Se describe también el desarrollo y las conclusiones obtenidas de diferentes investigaciones realizadas en años recientes. Así mismo, se indican detalles del desarrollo de un programa experimental llevado a cabo en las instalaciones del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) que incluye la reparación de uniones viga-columna de concreto reforzado. Se analizan los resultados y se establecen conclusiones respecto al comportamiento de los especímenes en relación con el tipo de reparación realizada. Se busca también evaluar la eficiencia de la aplicación de diferentes técnicas de reparación y recomendar prácticas adecuadas.

## **2. TÉCNICAS DE REPARACIÓN.**

### **2.1. Desarrollos recientes.**

Las primeras aplicaciones de resinas epóxicas en la reparación de estructuras tales como puentes de caminos y losas de almacén, se realizaron en la década de los sesenta.

Uno de los primeros estudios que se hicieron con el fin de evaluar la eficiencia de la inyección de resinas epóxicas en elementos de concreto reforzado fue llevado a cabo por Mahin y Bertero, ref.1. Ensayaron vigas de concreto reforzado sujetándolas a cierto nivel de carga con el objeto de provocar cierto grado de agrietamiento, el cual fuese posible reparar por medio de la inyección de resinas epóxicas. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios en cuanto al comportamiento de las resinas; se encontró que la resistencia máxima de los especímenes reparados fué un 10% menor que la original. Se piensa que la razón principal de esta diferencia es que la inyección no alcanza a restablecer la adherencia entre acero y concreto, de modo que al comenzar a agrietarse el elemento reparado, la pérdida remanente de adherencia no permite la transmisión de esfuerzos entre acero y concreto.

Celebi y Penzien, ref.2, también aplicaron la técnica de inyección de resinas en vigas de concreto reforzado; encontraron incrementos considerables en la resistencia de las vigas en las zonas reparadas, lo cual cambia el comportamiento observado en ellas antes de la reparación. Obtuvieron en general un aumento en

la rigidez y un alargamiento de la zona de fluencia en los ciclos carga-desplazamiento.

En una investigación realizada en 1980 por Velkov y Gavrilovic, ref.3, se ensayaron uniones viga-columna de concreto reforzado bajo carga cíclica reversible. De la comparación de los resultados obtenidos de los especímenes originales con los reparados, se encontró que la inyección de resinas epóxicas tuvo efectos favorables en la reparación de los elementos. Se menciona también que el evidente deterioro sufrido por los elementos reparados causó una disminución en la rigidez de los elementos, provocando cambios en su respuesta. Estos cambios deberán ser tomados en cuenta siempre que se intente la reparación de estructuras dañadas. Finalmente, se concluye en esta investigación que si se desea obtener resultados de alta calidad en la reparación, ésta se debe realizar combinando el uso de resinas y morteros epóxicos y empleando refuerzo adicional en las zonas donde se esperan grandes deformaciones.

En la ref.4, se encuentra una clasificación de las diferentes técnicas de reparación, donde Migliacci, et al., distinguen dos diferentes categorías. En la primera, después de remover el concreto agrietado y limpiar las superficies, se remplazan los segmentos dañados usando diferentes materiales, con o sin inyección previa de resinas epóxicas en las grietas. En algunos casos se suele añadir estribos de acero en la zona de remplazo. En la segunda técnica, después de restaurar los elementos dañados de concreto mediante el empleo de morteros ordinarios de cemento y

arena, se refuerza la zona reparada por medio de ángulos y soleras de acero, encamisando al elemento con objeto de dar un mayor confinamiento al concreto.

En algunos casos se han reparado columnas mediante el uso de collares de concreto reforzados con acero circular, ref.5. Su función crítica es la de transmitir adecuadamente la carga vertical a la columna, lo cual se logra por medio de fricción entre la superficie externa de la columna y la superficie interna del collar. Este tipo de reparación se ha probado en laboratorio y se han obtenido resultados satisfactorios, pero es necesario tener cuidado al aplicar el coeficiente de fricción adecuado para transmitir la carga vertical a la columna.

Se han realizado programas experimentales muy interesantes y ambiciosos, tal es el caso de las pruebas hechas por Owen, et al., ref.6, en las cuales se aplicaron vibraciones forzadas sobre una estructura a escala natural de concreto reforzado. La reparación se hizo inyectando resinas epóxicas en las grietas, y se encontró un desempeño satisfactorio en la estructura reparada, la cual mostró en general una disminución en su rigidez. Se concluyó en estas pruebas que debe observarse el comportamiento de los compuestos a base de resinas a largo plazo, así como también debe tenerse en cuenta que bajo altas temperaturas dichos compuestos pueden derretirse y aún quemarse.

Recientemente (1989), Mansur y Ong ref.7, reportaron resultados satisfactorios empleando resinas epóxicas en la inyección de grietas en vigas de concreto reforzado. Sus

conclusiones indican que las grietas inyectadas no se abrieron de nuevo al volver a ensayar las vigas. Las grietas obtenidas fueron menos anchas que las iniciales y en general, las vigas reparadas aumentaron su resistencia última respecto al ensaye original.

Otras pruebas realizadas sobre vigas de concreto reforzado reparadas mediante el método de remplazo, muestran buenos resultados. Andrews y Sharma ref.8, hicieron ensayos en que las vigas reparadas presentan un modo de falla dúctil, con patrones de grietas muy similares entre si.

Wolfgram, et. al., ref.9, ensayaron especímenes reparados con dos diferentes técnicas de inyección de resinas, inyección a presión e inyección por impregnación al vacío. Ambas técnicas funcionaron bien. Los elementos reparados alcanzaron un 85% de la rigidez inicial. Las grietas inyectadas no volvieron a abrirse sino que hubo una tendencia a que aparecieran nuevas grietas adyacentes a las reparadas. En suma, fue posible restaurar la resistencia y la capacidad de disipación de energía en los elementos. La ventaja de reparar a base de impregnación al vacío se hace patente al inyectar regiones de daño grandes, donde es posible impregnar toda la zona en un solo intento, mientras que aplicando inyección a presión se tendría que reparar grieta por grieta.

Las técnicas principales de reparación en estructuras de concreto se clasifican en tres tipos, que son; por inyección, por remplazo y por encamisado. Estas técnicas pueden aplicarse en forma combinada de acuerdo con el elemento que se vaya a reparar y con el grado de deterioro que presente.

En la ref.10, se tratan con mayor detalle estas técnicas y se indican también los criterios que se aplican al elegir las técnicas apropiadas en casos específicos.

## **2.2. Inyección.**

La inyección de resinas epóxicas se aplica cuando el grado de deterioro es bajo y no se tienen desprendimientos del concreto. En este caso es posible restablecer la resistencia a flexión y cortante del elemento, obteniendo por lo general valores menores en rigidez debido a que la inyección no alcanza a penetrar sus microgrietas. Si las grietas son de 0.1 mm a 0.5 mm de ancho, es necesario tener una viscosidad baja (500 cP) con objeto de tener una buena penetración. Si las grietas son más anchas (0.5 a 1.0 mm), se debe colocar un aditivo a la resina para reducir las contracciones, el flujo plástico y los efectos de la temperatura. Para grietas de 1.0 a 1.5 mm, es posible añadir a la resina polvo de vidrio o cuarzo y para grietas de 1.5 a 5.0 mm se puede emplear arena fina.

Antes de la inyección se debe asegurar que las grietas estén libres de polvo, para lo cual se emplea aire comprimido. Si se tienen sustancias como aceite o grasa, será necesario aplicar solventes que las eliminen; dichos solventes deben ser retirados en su totalidad antes de la inyección empleando agua limpia. Si se desea obtener una mejor adherencia, es preferible eliminar el agua remanente o esperar a que seque completamente.

La inyección se realiza por medio de tubos de plástico o metal que han sido insertados previamente en agujeros hechos con taladro a todo lo largo de la grieta. Para evitar el sangrado de la resina es necesario sellar las grietas en toda su longitud, para lo cual se puede emplear resina epóxica de alta viscosidad.

Es posible determinar experimentalmente las características de penetración de los diferentes tipos de resinas epóxicas. Plecnik, et al., ref.11, encontraron que la presión de inyección no es el único factor importante que garantiza una buena penetración del adhesivo epóxico, sino que también intervienen otros factores tales como la temperatura, la viscosidad y el tiempo de fraguado de la resina. De este modo, para obtener penetraciones altas se recomienda emplear viscosidades bajas, entre 100 y 1000 cP, y tiempos de fraguado de la resina mayores de 4 horas.

Popov y Bertero, ref.12, recomiendan el uso de resinas epóxicas en la inyección de elementos de concreto siempre y cuando no se tenga degradación por pérdida de adherencia entre concreto y acero de refuerzo. En situaciones en que se tenga desconchamiento del concreto de recubrimiento se puede emplear mortero epóxico. Si el daño en el concreto interior es severo, se recomienda demoler la parte dañada y remplazar con concreto nuevo. En uniones viga-columna de concreto reforzado es muy común que se tenga degradación de adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo longitudinal de la viga, en este caso la inyección de resinas epóxicas no es recomendable, ya que no llega a penetrar en los espacios entre concreto y acero, además de que la acumulación de polvo de concreto

en esa zona evita la adherencia entre concreto, resina y acero. Finalmente, se cuestiona el empleo de resinas epóxicas en el caso de que estén expuestas a altas temperaturas, ya que pueden derretirse, y perder sus propiedades adherentes.

### **2.3. Reemplazo.**

La técnica de reemplazo del concreto consiste en demoler la zona dañada y volver a colar concreto nuevo, buscando preferentemente que la resistencia del concreto nuevo sea mayor que la del anterior. Este método se emplea cuando las grietas tienen un ancho mayor de 5.0 mm, y se tiene aplastamiento del concreto y en algunos casos pandeo del refuerzo longitudinal. Antes de aplicar el concreto de reemplazo se deben preparar las superficies de contacto, liberándolas de polvo, grasa y aplicando un aditivo que mejore la adherencia entre concreto viejo y nuevo. En algunos casos, es necesario enderezar o reemplazar barras de refuerzo tanto longitudinal como transversal. Debe tenerse cuidado en apuntalar correctamente a la estructura para descargar la zona en reparación y no tener deformaciones excesivas que provoquen mayores daños o el desplome de los elementos estructurales.

### **2.4. Encamisado.**

La técnica de encamisado puede ser realizada en dos formas: encamisado de concreto o encamisado de acero. Ambos casos se

aplican en elementos muy dañados para los cuales es necesario dar mayor capacidad resistente aumentando la sección transversal mediante elementos que rodean al anterior, proporcionando confinamiento al concreto viejo. Para encamisar con concreto es importante preparar la superficie de contacto para tener la mayor adherencia posible entre el concreto viejo y el nuevo. El diseño de la cimbra es muy importante para facilitar la labor de colado y vibrado. También debe aplicarse un revenimiento y un tamaño máximo de agregado grueso de acuerdo con la separación mínima del refuerzo y la distancia mínima entre cimbra y concreto viejo.

El encamisado con acero se logra empleando ángulos y soleras y tiene mayores ventajas sobre el encamisado con concreto, debido a que su aplicación es directa y no es necesaria la colocación de cimbra. En ciertos casos las placas de acero del encamisado se pegan a la superficie de concreto con el fin de crear una sección compuesta. Para pegar dichas placas se pueden emplear morteros epóxicos que garanticen una adherencia alta entre acero y concreto. También es posible aplicar cierto presfuerzo al colocar el acero, y dar mayor confinamiento al concreto. Este presfuerzo se puede aplicar mediante el uso de placas de acero y barras roscadas que conecten dichas placas, de modo que al aplicar tensión en las barras se logre que las placas de acero compriman cierta zona del concreto. Otra forma de aplicar fuerzas de confinamiento es por medio de zunchos de acero colocados en la zona de interés. Estos zunchos tendrán un mecanismo que permita apretarlos fuertemente contra la superficie de concreto.

La técnica de encamisado no solo permite reparar los elementos, sino que además logra aumentar la resistencia y la rigidez originales. De esta forma, el encamisado se considera también como un método de refuerzo.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.

#### 3.1. Especímenes ensayados.

El origen del programa experimental que trata este trabajo fue un proyecto realizado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, que consistió en el ensaye de cinco especímenes correspondientes a uniones viga-columna de concreto reforzado. Los detalles del proyecto pueden consultarse en las refs.13, 14 y 15. De dicho programa anterior se han elegido dos especímenes, que por sus características y modos de falla resultaron adecuados para ser reparados y vueltos a ensayar en el presente programa. De esta forma se escogieron los especímenes D7 y D8, los cuales al ser reparados pasaron a nombrarse D7R y D8R respectivamente. El programa experimental que incluye la reparación y el ensaye de los especímenes D7R y D8R, se llevó a cabo en las instalaciones del Centro Nacional de Prevención de Desastres de la Secretaría de Gobernación.

El espécimen D7 se escogió debido a que durante su ensaye presentó un comportamiento muy satisfactorio, en el sentido de que se obtuvo una gran estabilidad en sus ciclos histeréticos, y presentó un comportamiento dúctil con ciclos en que disipó una gran cantidad de energía. La falla de este espécimen consistió en la formación de una articulación plástica en la viga, y se tuvo la presencia de pandeo del refuerzo longitudinal de la viga, ref.16. Se obtuvo también cierto grado de deterioro en la zona del nudo y

pérdida de adherencia entre el refuerzo longitudinal de la viga y el concreto de la junta, foto.1.

Los motivos que originaron el interés por conocer los resultados del ensaye del espécimen D8, han sido más académicos que prácticos. Este espécimen fue reforzado en forma especial con el objeto de lograr en laboratorio la falla por flexocompresión en la columna, ref.15. Se consideró conveniente la reparación de este espécimen debido a que en el ensaye original se registró con mayor detalle el desarrollo de los diferentes ciclos de carga. En términos generales, este espécimen presentó un comportamiento dúctil con ciclos histeréticos estables aún para grandes deformaciones. La falla no se dió por flexocompresión en la columna como se esperaba, sino que debido a grandes concentraciones de esfuerzos en el nudo, se tuvo gran deterioro del concreto en dicha zona, con lo cual se llegó a la falla de la conexión. En la columna se presentaron algunos indicios de falla por flexocompresión a ambos lados de la junta.

En la tabla 1 se muestran las características de refuerzo de los especímenes, así como los momentos resistentes en viga y columna, calculados con las resistencias reales del concreto y del acero con que fueron construidos.

En el armado de la junta de los especímenes D8 y D8R se incluyeron cuatro soleras de acero, con la finalidad de poder evitar el deslizamiento del refuerzo longitudinal de la viga por pérdida de adherencia. La posición de las soleras mencionadas se muestra en la fig.1.

Los cuatro especímenes estuvieron sujetos a cargas reversibles en la viga y a carga axial constante en la columna. La historia de cargas se dividió en dos etapas. En la primera etapa se aplicaron cargas dentro del rango elástico, definiendo al límite elástico con la carga que produciría el momento resistente teórico calculado. La segunda etapa quedó controlada mediante desplazamientos, ya que al sobrepasar el límite elástico se tiene poca variación de la carga y mayor variación en los desplazamientos. Los desplazamientos aplicados pueden relacionarse con el desplazamiento obtenido en la carga que define al límite elástico, de esta forma se obtienen diferentes ductilidades controladas en cada ciclo.

### 3.2. Instrumentación.

La instrumentación de los especímenes está encaminada a conocer los desplazamientos y deformaciones en diferentes puntos de interés. En la fig.2 se tiene la ubicación de los diferentes transductores de desplazamiento colocados en los especímenes D7 y D7R, los cuales registraron los desplazamientos exteriores de los puntos indicados. También se tiene en la fig.3 la ubicación de los deformímetros eléctricos que fueron pegados en varios puntos del acero de refuerzo de los especímenes D7 y D7R y que registraron los diferentes valores de la deformación del acero a lo largo del ensaye.

En la reparación del espécimen D7 se decidió reducir la separación de estribos de 11 cm a 7 cm en la zona de la viga donde

se reemplazó el concreto, ocupando de esta forma seis estribos a cada 7 cm en dicha zona. Se colocaron siete deformímetros, cinco en las barras longitudinales de la viga, incluyendo la barra que presentó el pandeo y que no había sido instrumentada anteriormente, y dos deformímetros se pegaron en el tercer estribo de la viga.

Para los especímenes D8 y D8R se contó con la información registrada por los transductores de desplazamiento cuya ubicación se muestra en la fig.4.

La ubicación e identificación de los diferentes instrumentos es importante para realizar un análisis adecuado de los resultados y hacer las comparaciones necesarias para evaluar el comportamiento de los especímenes y definir las diferencias provocadas por la práctica de reparación realizada en cada uno de ellos.

Es importante indicar la posición de los especímenes durante el ensaye. La columna se ubicó en forma horizontal y la viga en posición vertical como puede verse en la fig.5. Se decidió adoptar esta posición para los ensayos por comodidad y sencillez en la forma de aplicación de las cargas. De este modo, la carga reversible en la viga se aplicó por medio de un sistema de gatos hidráulicos en posición horizontal, apoyado sobre un marco de carga. La carga axial en la columna se aplicó con un gato en posición horizontal reaccionando contra un marco independiente formado por las vigas V1, fig.5, conectadas entre si por dos barras longitudinales de acero. El sistema de apoyo de la columna en los puntos de inflexión A y B, fig.5, se dió por medio de un sistema de rótulas que permiten el giro de esas secciones. Las vigas V2

impiden el desplazamiento vertical en los puntos A y B.

Al realizar las pruebas en las instalaciones del CENAPRED, fue necesario adaptar todo el sistema a las nuevas condiciones del laboratorio, respetando la posición general de los especímenes. De esta forma, fue posible aplicar carga lateral en la viga con un solo gato en posición horizontal, apoyado sobre el muro de reacción, foto.2.

En la fig.6, se muestran las dimensiones generales de los especímenes y la posición de los puntos de carga y de apoyo que se dieron en los ensayos. Las dimensiones de viga y columna se indican en la tabla 1 y fueron las mismas en todos los especímenes estudiados en este proyecto. Una variante interesante fue la posición de la carga reversible en la viga, la cual fue de 170 cm a partir del paño de la columna en los especímenes D7 y D7R y de 200 cm en los especímenes D8 y D8R. Esta diferencia se debe a que en los especímenes D8 y D8R se buscó que el efecto de la flexión fuera más importante que el efecto del cortante, lo cual se logró aumentando el brazo de la carga reversible.

### **3.3. Técnicas de reparación aplicadas.**

En la reparación del espécimen D7 se tomó en cuenta que el mayor agrietamiento se presentó en la viga, en la zona cercana al paño de la columna, teniendo pandeo de las barras de refuerzo longitudinal del lado débil, foto.1. La zona de la junta presentó cierto grado de agrietamiento menor, con pérdida de adherencia

entre el acero longitudinal de la viga y el concreto en la junta. Bajo estas circunstancias, se pensó realizar la reparación aplicando dos técnicas, la de remplazo en la zona más dañada y la de inyección en el resto del espécimen. En la zona del nudo, antes de hacer la inyección, se retiró el concreto de recubrimiento, foto.3, el cual se encontraba muy dañado. Es importante indicar que la inyección se realizó manualmente, pues no fue posible contar con el equipo de bombeo. Se ocuparon cuatro litros de compuesto de resina, y se tuvo un desperdicio del 50%. De los dos litros de resina que penetraron, un 80% se inyectó en la junta y un 20% en el resto del espécimen.

Una vez inyectada la resina, se iniciaron los preparativos para colar el concreto de remplazo en la viga. Antes del colado se aplicó un aditivo en la superficie del concreto viejo con el fin de garantizar la adherencia con el concreto de remplazo. Finalmente, en la zona del nudo donde se había retirado el concreto de recubrimiento, se aplicó mortero epóxico, usando antes un aditivo adherente en la superficie del concreto viejo.

Debido a su forma especial de armado, el espécimen D8 presentó poco agrietamiento en la viga, foto.4. El daño mayor se concentró en la zona del nudo. En la reparación de este espécimen se aplicó la técnica de remplazo en la junta, y se dejaron sin reparar las grietas obtenidas en el resto del espécimen. Inicialmente se retiró el concreto dañado en el nudo. Después se intentó enderezar la columna, que había perdido su eje recto, foto.5. También se enderezaron algunas varillas que se habían pandeado y se soldó un

estribo que se había fracturado. Hecho lo anterior, se procedió al colado del concreto de remplazo, usando un aditivo adherente en la superficie del concreto viejo.

Las reparaciones realizadas en laboratorio son más sencillas que las hechas en estructuras reales, ya que el manejo de los elementos y la aplicación de fuerzas para enderezarlos se facilita más en un laboratorio donde se cuenta con mayor espacio de trabajo, gatos y puntos de apoyo, mientras que en una estructura real es muy difícil encontrar el apoyo suficiente para enderezar un elemento. El peso propio de la estructura real es un aspecto que debe tomarse en cuenta si se desea hacer labores de remplazo, ya que si no se aplican soportes suficientes los elementos a reparar pueden quedar deformados después de la reparación.

#### 4. RESULTADOS DE LOS ENSAYES.

##### 4.1. Especímenes D7 y D7R.

Las figs.7 y 8 muestran las curvas carga-desplazamiento en el punto de aplicación de la carga reversible en el extremo de la viga para los especímenes D7 y D7R respectivamente. En el espécimen D7 se aplicaron en total 24.5 ciclos, en los cuales pueden distinguirse los ciclos aplicados antes de alcanzar la carga de fluencia de los ciclos en que se aplicaron diferentes ductilidades controladas. En contraste, al espécimen D7R se le aplicaron 13 ciclos, en los cuales no es posible definir el rango elástico ni la carga de fluencia, ya que desde los primeros ciclos se tienen desplazamientos grandes y áreas incluidas en los ciclos histeréticos. La carga máxima positiva fue de 26 ton para el D7 y 22.5 ton para el D7R. La carga máxima negativa fue 15 ton para el D7 y 14.5 ton para el D7R. Al examinar los ciclos de histéresis se observa que la reparación aplicada al espécimen D7 no fue suficiente para restablecer las características de rigidez y la capacidad de disipación de energía del espécimen, aun cuando los valores de la carga máxima sean muy similares entre sí.

El desplazamiento en el extremo de la viga a lo largo del ensaye puede verse en las figs.9 y 10 para los especímenes D7 y D7R. En el espécimen D7, el desplazamiento máximo positivo fue de 8 cm y correspondió a la falla del espécimen, foto.1. El desplazamiento máximo negativo fue de 6 cm y se dió en las últimas

tres cargas aplicadas. Para el espécimen D7R los desplazamientos máximos positivo y negativo fueron 7 y 6 cm respectivamente, y se obtuvo la falla del espécimen con la formación de una articulación plástica en la junta, foto.7. El orden de los desplazamientos máximos alcanzados en ambos especímenes fue muy similar, pero el tipo de falla resultó diferente.

Al centro del claro de la viga se tienen los resultados del desplazamiento lateral registrados por el micrómetro M2, figs.11 y 12. Los desplazamientos máximos en ambos sentidos de la carga reversible son 4 cm en el espécimen D7 y 2 cm en el D7R. Estos registros indican que el espécimen D7R presentó desplazamientos más pronunciados en el extremo que en la zona media, o bien, que el elemento es más rígido en la zona de remplazo y menos rígido en la zona de inyección. La relación del desplazamiento máximo en la punta entre el desplazamiento máximo en la sección media es de 2 para el espécimen D7 y de 3.5 para el D7R. Con ésto, es lógico esperar grietas pronunciadas en la parte superior de la viga del espécimen reparado que justifiquen el aumento en la deformación. Es necesario recordar que en la parte superior de la viga predomina el efecto del cortante sobre la flexión; en la foto.6, puede observarse el agrietamiento diagonal en la parte superior de la viga. Hablando en términos de deformaciones angulares unitarias por cortante en la mitad superior de la viga, la deformación en el espécimen D7 fue de 0.04, que corresponde al estado de agrietamiento obtenido en el ensaye original. Por otra parte, la deformación en el espécimen reparado fue de 0.05. No fue posible

observar gran deterioro del concreto en las secciones de la parte superior de la viga debido a que los efectos de la flexión son muy reducidos, por lo cual no se tiene aplastamiento del concreto en compresión.

Los desplazamientos laterales del yugo 2, registrados por el micrómetro M3, figs.13 y 14, apoyan la hipótesis de que el espécimen reparado es más rígido en la zona de remplazo, ya que los desplazamientos son del orden de la mitad de los obtenidos en el ensaye original, a pesar de que se aplicaron cargas máximas de magnitud similar. La fig.13 para el D7 presenta valores muy regulares para ambos efectos de la carga reversible, mientras que la fig.14 para el D7R presenta un dominio de los desplazamientos debidos a carga positiva, esto se generó debido a un corrimiento del cero, es decir, que al regresar de una carga, el espécimen quedaba con una deformación permanente en ese sentido, a partir de la cual comienza a aplicarse la carga en sentido negativo. Por esto, aunque en el espécimen D7R se aplicaron iguales desplazamientos en ambos sentidos de la carga reversible, los valores de la gráfica registraron efectos menores bajo carga negativa.

En forma análoga, en las figs.15 y 16, los desplazamientos horizontales del yugo 1 muestran diferencias en el comportamiento de los especímenes D7 y D7R. En el D7, los desplazamientos son mayores que en el D7R debido a que el D7 tuvo mayor agrietamiento en esa sección, mientras que el espécimen D7R conservó su sección transversal sin gran daño.

Las figs.17 y 23, corresponden a desplazamientos verticales a partir de los cuales se puede calcular el giro del yugo 2 para el espécimen D7 y las figs.18 y 24 presentan los mismos desplazamientos para el espécimen D7R. En ambos juegos de figuras se observa que al girar el yugo por efecto de la carga reversible, el lado que está en tensión registra mayor desplazamiento que el de compresión. Comparando los resultados entre los especímenes D7 y D7R, en este último los giros del yugo 2 fueron significativamente menores que los obtenidos en el yugo 2 del espécimen D7; esto indica que la zona de la viga comprendida entre los yugos 1 y 2 tuvo deformaciones mayores en el D7.

Por otra parte, las figs.19 y 21 muestran los desplazamientos verticales que permiten calcular el giro del yugo 1 en el espécimen D7 y las figs.20 y 22 registran los mismos desplazamientos para el espécimen D7R. Se observa en estas gráficas que la diferencia de los giros del yugo 1 entre los especímenes D7 y D7R es menor que lo obtenido en el yugo 2. El desplazamiento máximo registrado por el micrómetro M11 del D7, fig.21, fue de -10 mm, mientras que el registrado para su análogo en el D7R, fig.22, fue de -6 mm. Así mismo, en el micrómetro M7 del espécimen D7, fig.19, se registró un desplazamiento máximo de -8.5 mm, mientras que en el M7 del D7R se obtuvo un desplazamiento de -5.5 mm. Los giros del yugo 1 registraron los efectos de la pérdida de adherencia entre el concreto y el acero longitudinal de la viga, y muestran poca diferencia en este sentido para los dos especímenes.

Se cuenta también con el registro de los deformímetros

eléctricos pegados en el acero longitudinal de la viga que son análogos entre los especímenes D7 y D7R. Las figs.25 a 28 muestran las deformaciones en el acero longitudinal del lado fuerte. Se observan en general mayores deformaciones en el espécimen D7 en comparación al D7R, indicando que esta sección de la viga estuvo sujeta a menores esfuerzos en el espécimen reparado, o bien, la zona de remplazo presentó mayor resistencia que las zonas de inyección. De esta forma, al agrietarse el espécimen en las mismas zonas en que fue inyectado, se provocó que el deterioro del concreto se concentrara en esas secciones, mientras que la zona de remplazo solo sufrió poco agrietamiento sin deterioro del concreto. El hecho de que el agrietamiento se presente desde el inicio en las zonas de inyección, y partiendo del principio de equilibrio, en dichas zonas se obliga a que las secciones agrietadas se vean sujetas a deformaciones mayores. Con este hecho se explica que el espécimen reparado (D7R), no tenga la capacidad para alcanzar el 100% de su resistencia original.

La fig.29 corresponde al registro del deformímetro pegado en la barra central del lado débil de la viga, la cual presentó pandeo en el ensaye original del espécimen D7. Con este deformímetro se intentó rastrear las deformaciones de la barra antes y durante el pandeo en el ensaye del espécimen reparado. No existe el registro análogo en el ensaye original ya que en éste no se colocó dicho deformímetro. Debido a que en el ensaye del espécimen reparado el deterioro del concreto no se presentó en la zona de la viga sujeta a momento flexionante máximo, tampoco se llegó a deformaciones que

produjeron el pandeo de la barra, y en consecuencia no fue posible rastrear las deformaciones correspondientes al pandeo. Sin embargo, se cuenta con el registro de deformaciones que superan al valor de fluencia en el acero ( $0.002 \epsilon$ ), de donde se concluye que la barra en cuestión desarrolló un nivel alto de esfuerzos sin presentar problemas de inestabilidad por la falta de apoyo transversal. Es necesario indicar que en la reparación realizada se disminuyó la separación de los estribos en la zona crítica de la viga, lo cual incrementa el apoyo transversal de la barra.

Respecto a las deformaciones del acero longitudinal de la viga del lado débil, se cuenta con el registro de los deformímetros SG19 y SG20, figs.30 a 33. Aquí puede observarse que las deformaciones fueron menores en el espécimen D7R, lo que indica que la zona de la viga donde se reemplazó el concreto sufrió menores deformaciones y, por lo tanto, un estado de esfuerzos también menor. En el registro de estos deformímetros para el espécimen D7, figs.30 y 32, se observa después de la deformación máxima una zona en la que los registros presentan una tendencia a disminuir su valor, lo que indica el efecto del deterioro sufrido por el concreto en esa zona en combinación con el fenómeno de pérdida de adherencia del refuerzo longitudinal de la viga en la zona del nudo. Esta zona de deterioro no se observa en el registro para el espécimen reparado, pudiéndose afirmar entonces que a pesar de que se tuvieron deformaciones superiores a la de fluencia, el deterioro del concreto no se presentó en la zona de la viga.

Las deformaciones en el acero de refuerzo transversal de la

viga se tienen graficadas en las figs.34 a 37. Estas deformaciones corresponden al tercer estribo ubicado a partir del paño de la columna. En términos generales se tienen deformaciones muy grandes para el espécimen D7 con valores máximos entre 0.0024 y 0.0028  $\epsilon$ , mientras que para el espécimen D7R las deformaciones máximas son de 0.0008 a 0.0012  $\epsilon$ , que corresponden a valores menores al de fluencia del acero (0.002  $\epsilon$ ). Lo anterior indica que el agrietamiento por cortante en esa zona de la viga del espécimen D7R no fue suficiente como para transmitir fuerzas cortantes importantes al estribo.

Las figs.38 a 41 muestran los niveles de participación de diferentes fenómenos en el desplazamiento total de la viga, tomando en cuenta los dos efectos de la carga reversible. Los fenómenos indicados son el desplazamiento total (DT), el desplazamiento horizontal debido a la flexión de la viga (FV), el desplazamiento horizontal debido a pérdida de adherencia del refuerzo longitudinal de la viga en la junta (PA) y el desplazamiento horizontal debido al cortante en viga (CV). Existen otros efectos que contribuyen en menor medida al desplazamiento total del extremo de la viga. De ellos, el más importante es el debido al giro del nudo por flexión de la columna. En las figuras solo se han incluido aquellos efectos que están directamente relacionados con la viga y la conexión. El desplazamiento total (DT), corresponde al registro del micrómetro M1 a lo largo del ensaye. La flexión en viga (FV), se calculó con los registros del giro del yugo 2, multiplicándolo por la distancia vertical del yugo al punto de aplicación de la carga reversible. La

pérdida de adherencia (PA), se calculó multiplicando el giro del yugo 1 por la distancia vertical del yugo al punto de aplicación de la carga reversible. Finalmente, el cortante en viga se calculó restando al desplazamiento en el centro del claro de la viga, los desplazamientos debidos a FV y a PA en esa sección y multiplicando el resultado por dos. Para el efecto de la carga positiva, figs.38 y 39, predomina la participación de la pérdida de adherencia (PA) sobre los demás fenómenos; a continuación le siguen los efectos del cortante en viga (CV) y finalmente se tiene la flexión en viga (FV). Los efectos de la carga negativa, figs.40 y 41, permiten distinguir que para el espécimen D7 domina el cortante sobre la flexión y la pérdida de adherencia, las cuales conservan niveles similares a lo largo del ensaye. En contraste, el efecto de la carga negativa en el espécimen D7R muestra un dominio de la pérdida de adherencia durante todo el ensaye sobre el cortante y la flexión en viga.

Con todo lo anterior es posible justificar el comportamiento del espécimen D7R respecto al ensaye original. La práctica de reparación aplicada en este caso tuvo consecuencias negativas en cuanto al comportamiento en general. El tipo de falla cambió radicalmente de un caso al otro. Mientras en el D7 se obtuvo una articulación plástica en la viga, con cierto grado de pérdida de adherencia del refuerzo longitudinal de la viga en la junta, en el D7R se obtuvo la falla en la conexión, pérdida de adherencia en el refuerzo longitudinal de la viga en la junta y un alto grado de deterioro del concreto en la columna.

#### 4.2. Especímenes D8 y D8R.

Los resultados que se presentan a continuación se refieren a los micrómetros colocados en viga y columna de los especímenes D8 y D8R. Dicha ubicación se encuentra en forma esquemática en la fig.4.

Las figs.42 y 43 muestran el comportamiento global de los especímenes D8 y D8R mediante el registro de la carga reversible contra el desplazamiento obtenido en el extremo de la viga. En el espécimen D8, fig.42, se muestran 23 ciclos de carga aplicados, mientras que en el D8R, fig.43 se tienen 13.5 ciclos. Los desplazamientos máximos impuestos a ambos especímenes fueron iguales a 7 cm para los dos sentidos de la carga. Por otra parte, las cargas máximas aplicadas fueron diferentes de un espécimen a otro. En el D8 se alcanzaron 29 ton en ambos sentidos de la carga reversible, en cambio en el D8R se alcanzaron solo 22 ton también en ambos sentidos. Esta diferencia en la capacidad resistente entre ambos especímenes es muy importante, y se debe principalmente al hecho de que el espécimen reparado no fue inyectado con resinas epóxicas en las secciones de viga y columna. Esto obligó a que las secciones agrietadas tuvieran que desarrollar deformaciones grandes para cumplir con las condiciones de equilibrio general. El deterioro en las zonas agrietadas y las grandes deformaciones que deben experimentar dichas secciones, evita la posibilidad de transmitir esfuerzos mayores a la zona de remplazo, obligando a que el daño se concentre en las secciones más débiles.

El espécimen reparado (D8R), presenta una menor rigidez inicial, pero sus ciclos encierran superficies regulares que indican un comportamiento dúctil con buena disipación de energía. Sin embargo, al comparar los ciclos del D8R con los del D8, se observa un mejor comportamiento en el espécimen original.

Al igual que en los especímenes D7 y D7R, se cuenta con el registro de los desplazamientos horizontales en cuatro puntos a lo largo de la viga. Estos puntos son el extremo, en la sección media, en el yugo 2 y en el yugo 1. Los registros a lo largo del ensaye están graficados en las figs.44 a 51. En el extremo de la viga se obtuvieron desplazamientos del mismo orden de magnitud en ambos especímenes y para los dos efectos de la carga reversible. En la zona media se observan valores mayores de desplazamiento en el D8 que en el D8R. Para el yugo 2 se tienen desplazamientos del mismo orden en ambos especímenes mientras que en el yugo 1 se tiene un corrimiento del cero provocado por el efecto de la aplicación de la carga axial en la columna en el espécimen D8R, fig.51.

Las figs.52 y 62 tienen el registro de los micrómetros M6 y M12 que miden los desplazamientos verticales que permiten calcular el giro del yugo 2 a lo largo del ensaye para el espécimen D8. Análogamente, las figs.53 y 63 registran los desplazamientos verticales que permiten calcular el giro del mismo yugo para el espécimen D8R. En el espécimen D8 se puede ver un corrimiento del cero en las lecturas que corresponden al agrietamiento por flexión, haciendo que el micrómetro que se encuentra del lado de tensión registre mayores desplazamientos en ese sentido. Esto está asociado

a la variación en la posición del eje neutro de la sección bajo el efecto de la carga reversible. Es interesante notar que para el espécimen D8R no se observa este efecto, ya que los registros presentan una forma simétrica. Lo anterior se explica si recordamos que la viga del espécimen D8 no fue reparada mediante inyección de resinas, lo que indica que el estado de agrietamiento se conservó tal cual en el ensaye del espécimen D8R. Al registrar un nuevo cero, y como el espécimen no presentó mayor agrietamiento del que tenía, se tiene como resultado la simetría que se observa en las figs.53 y 63, que indican poca variación de la posición del eje neutro a lo largo del ensaye. Este mismo efecto pero en mayor escala se puede observar en los registros de los micrómetros M7 y M11 que dan los desplazamientos verticales que permiten calcular el giro del yugo 1. Las figs.54 y 60 muestran dichos desplazamientos para el espécimen D8 y las figs.55 y 61 lo hacen para el D8R. Los giros en el yugo 1 fueron mayores que en el yugo 2, esto debido a que los especímenes presentaron gran deterioro en la zona del nudo y el yugo 1 registró los giros de la sección de la viga tomando como referencia el paño de la columna.

Los registros de los micrómetros M8 y M10 dan el giro en las secciones de apoyo a ambos extremos de la columna. Las figs.56 y 58 corresponden al D8 y las figs.57 y 59 al D8R. Para el espécimen D8, el giro de la sección que registra el M8 presenta al final del ensaye una tendencia a permanecer con giros contrarios a las manecillas del reloj, debidos al efecto de la carga negativa. En contraste, en el espécimen D8R se observa el efecto contrario,

presentándose esta tendencia desde el inicio del ensaye. Lo anterior se explica porque durante la reparación fue muy difícil volver a colocar al espécimen en posición recta, de tal modo que las deformaciones iniciales hacen que al aplicar la carga axial se provoque un efecto P- $\Delta$  desde el inicio del ensaye. De los registros del micrómetro M10 se observa en el ensaye original una tendencia a conservar deformaciones provocadas por el efecto de la carga positiva, lo que equivale a giros a favor de las manecillas del reloj. No obstante, en el espécimen D8R se observa el efecto contrario, por lo que permanecen las deformaciones debidas al efecto de la carga negativa.

Otros registros de desplazamiento en la columna corresponden a los micrómetros M15 y M16, mostrados en las figs.64 a 67 para los especímenes D8 y D8R. Dichos micrómetros dan el acortamiento de la columna medido en los puntos mostrados en la fig.4. En general, los acortamientos de la columna fueron mayores en el espécimen reparado que en el original, esto se explica porque la columna en su mayor parte permaneció con el agrietamiento que obtuvo en el ensaye original, mientras que solo la región del nudo fue reparada mediante remplazo del concreto, de tal modo que dicho agrietamiento le permitió sobrellevar deformaciones más grandes tanto a flexión como a carga axial. Este comportamiento en la columna permitió desarrollar deformaciones que resultaron en una falla por flexocompresión, la cual no había sido posible lograr en el ensaye original

De todo lo anterior se puede decir que la reparación del espécimen D8 no pudo restablecer la capacidad de carga y la rigidez originales. Pero por otra parte, la forma de falla cambió de tal modo que fue posible lograr la falla por flexocompresión en la columna, foto.8. El deterioro en la región del nudo fue determinante, ya que se desarrolló a pesar de que en esa zona se reemplazó el concreto. Las soleras de refuerzo colocadas en la junta de este espécimen provocaron concentraciones de esfuerzos en el nudo, y deterioro del concreto que facilitó el desarrollo de grandes deformaciones angulares, y pandeo de algunas barras del refuerzo longitudinal en la columna.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

1. Se encontró en las pruebas realizadas en este proyecto que no es posible distinguir el rango elástico inicial en el comportamiento general de los especímenes reparados, a pesar de que se aplicaron historias de carga similares a las aplicadas en los ensayos originales.
2. En las pruebas de los especímenes D7R y D8R solo fue posible aplicar poco más de la mitad de los ciclos que se aplicaron en las pruebas originales. Esto se debió a que la rigidez y la capacidad de carga de los especímenes reparados fueron menores, y se tuvo desde el inicio ciclos histeréticos con áreas reducidas.
3. Como experiencia de este proyecto se concluye que no es posible admitir el hecho de que la inyección de resinas epóxicas se realice sin contar con un equipo de bombeo adecuado, ya que en el ensayo del espécimen D7R se observó que desde el inicio las grietas inyectadas se abrieron nuevamente.
4. Los ensayos permiten concluir que al practicar técnicas de reparación en elementos de concreto reforzado es posible cambiar radicalmente el comportamiento y la forma de falla finales, por lo que es necesario realizar estudios más profundos que permitan definir técnicas adecuadas de reparación.

5. De los ensayos realizados en los especímenes reparados se puede distinguir que las zonas en que se reemplazó el concreto se alcanzan a restablecer las condiciones de adherencia entre acero de refuerzo y concreto. Este hecho es muy importante pues indica que es preferible aplicar esta técnica en regiones donde predomina la presencia de este fenómeno.

6. Para que la penetración de la resina en las grietas sea adecuada, se recomienda controlar la viscosidad del compuesto durante la inyección, de acuerdo con el espesor y profundidad de las grietas.

7. Es necesario tener en cuenta que los elementos reparados por medio de inyección de resinas epóxicas no recuperan el 100% de su rigidez. Por lo tanto, será necesario evaluar el cambio en el comportamiento dinámico de estructuras reparadas y considerar la posibilidad de que tales estructuras necesiten ser rigidizadas en su conjunto.

8. Se recomienda aplicar siempre la técnica de reemplazo en la junta, independientemente del grado de agrietamiento que ésta presente. Esto se debe a que al reemplazar el concreto se restablece la adherencia entre concreto y acero de refuerzo, lo cual no se logra por medio de la inyección.

9. Se ha encontrado que la pérdida de adherencia del refuerzo longitudinal de la viga en la junta es un fenómeno que afecta en gran medida a los desplazamientos totales en los especímenes. Para evitarlo, se recomienda que al diseñar se de el mayor número de barras posible con los diámetros más pequeños; de esta forma se aumenta la superficie de adherencia y se disminuyen los efectos de este fenómeno.

10. Es importante tomar en cuenta que un diseño que emplea el criterio de columna fuerte y viga débil resulta muy positivo si se desea evitar que las juntas sean regiones críticas en el comportamiento de marcos dúctiles de concreto reforzado. El término "columna fuerte" debe indicar un aumento en la sección de concreto, más que un aumento en el acero de refuerzo, con el objeto de conservar la ductilidad de las secciones.

11. Se demuestra en este trabajo que la práctica de reparación en elementos de concreto reforzado puede cambiar radicalmente el comportamiento y el tipo de falla de los elementos. Se deben tomar precauciones al elegir y aplicar diferentes técnicas; se recomienda ser más conservadores al reparar zonas que pueden ser críticas, como son las uniones viga-columna.

12. A la luz de los resultados obtenidos en la aplicación de técnicas de reparación, es posible reconocer que pudieron haberse obtenido mejores resultados si al espécimen D7 se le hubiese remplazado el concreto en la junta y si la inyección se hubiese realizado con equipo de bombeo. Para el caso del espécimen D8, puede decirse que una práctica adecuada hubiera sido remplazar en la junta con un concreto de alta resistencia, e inyectar resinas epóxicas con equipo de bombeo tanto en viga como en columna.

## REFERENCIAS.

1. Mahin, S. A., and, Bertero, V. V. "Rate of Loading Effects on Uncracked and Repaired Reinforced Concrete Members". Report No. EERC 72-9, December, 1972. University of California, Berkeley, California, USA.
2. Celebi, M., and, Penzien, J. "Hysteretic Behavior of Epoxy-Repaired Reinforced Concrete Beams". Report No. EERC 73-5, February, 1973. University of California, Berkeley, California, USA.
3. Velkov, M., and, Gavrilevic, P. M. "Repaired Reinforced Concrete Members and Joints Under Cyclic Loading". 7th WCEE. Istambul Turkey, Vol. 4 pp. 297-304. 1980.
4. Migliacci, A., et. al. "Repair Techniques of Reinforced Concrete Beam-Column Joints". IABSE Symposium. Venecia. 1983. pp. 355-362.
5. Klein, G. J., and, Gouwens, A. J. "Repair of Columns Using Collars with Circular Reinforcement". Concrete International, ACI, pp. 23-31. July 1984.

6. Owen, N. G., et. al. "Vibration Testing of an Epoxy-Repaired Full-Scale Reinforced Concrete Structure". 8th WCEE, San Fco. USA. Vol. I. pp 517-523. 1984.
7. Mansur, M. A., and, Ong, K. C. G. "Epoxy Repaired Beams". Repairs of Concrete Structures-Assessments, Methods and Risks. Seminar Course Manual/SCM-21(89), pp. 246-250. ACI. 1989.
8. Andrews, G., and, Sharma, A. K. "Repaired Reinforced Concrete Beams". Repairs of Concrete Structures-Assessments, Methods and Risks. Seminar Course Manual/SCM-21(89), pp. 49-53. ACI. 1989.
9. Wolfgram, F. C., et. al. "Epoxy Repair Techniques for Moderate Earthquake Damage". ACI Structural Journal, V 87, No.4, July-August, 1990.
10. Teran, A. "Review of Repair Techniques for Earthquake Damaged Reinforced Concrete Buildings". Thesis Presented to the Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin. December 1988.
11. Plecnik, J. M., et. al. "Epoxy Penetration". Concrete International, ACI., pp. 47-50. February 1986.

12. Popov, E. P., Bertero, V. V. "Repaired R/C Members Under Cyclic Loading". 3th Congress, Yugoslav Association for Earthquake Engineering, Budva, Yugoslavia, October 1974.

13. Baeza, J. "Comportamiento de Conexiones Viga-Columna de Concreto Reforzado". (primera etapa). Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 8716, Junio 1988.

14. Baeza, J., León, F., Meli, R. "Comportamiento de Conexiones Viga-Columna de Concreto Reforzado". (segunda etapa). Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 8716, Abril 1989.

15. Baeza, J., León, F. "Comportamiento de Conexiones Viga-Columna de Concreto Reforzado". (tercero y último informe). Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 8716, Abril 1991.

16. León, F., Baeza, J. "Pandeo del Refuerzo Longitudinal de Elementos de Concreto Reforzado Sujetos a Flexión". VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Acapulco, Gro., México. Noviembre 1989.

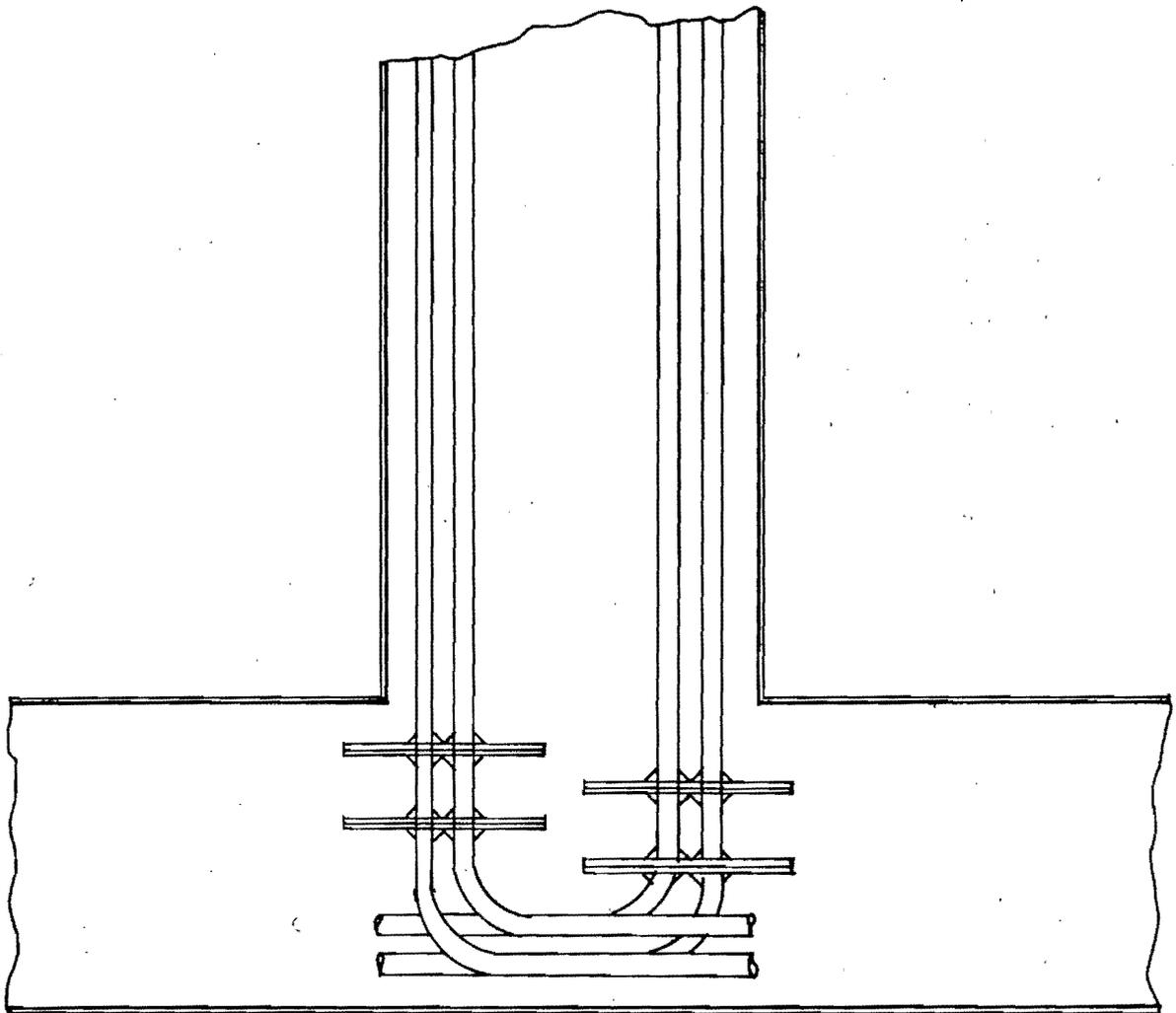
**TABLAS.**

CONCEPTO	ESPÉCIMEN	
	D7 y D7R	D8 y D8R
As (viga)	6 $\phi$ # 6	8 $\phi$ # 8
A's (viga)	3 $\phi$ # 6	8 $\phi$ # 8
As (columna)	8 $\phi$ # 8	8 $\phi$ # 5
Estribos en la junta	8 $\phi$ # 3 @ 9	8 $\phi$ # 3 @ 9
Estribos en la columna	$\phi$ # 3 @ 18	$\phi$ # 3 @ 18
Estribos en la viga	* 8 $\phi$ # 2.5 @ 11 $\phi$ # 2.5 @ 16 el resto	8 $\phi$ # 2.5 @ 11 $\phi$ # 2.5 @ 16 el resto
Mr (viga)	Lado fuerte: 32.83 ton-m Lado débil: 16.87 ton-m	77.55 ton-m ambos lados
Mr (columna) P=200 ton	22.68 ton-m	20.31 ton-m
Dimensiones en viga (bxh)	30x50 cm	30x50 cm
Dimensiones en columna (bxh)	35x40 cm	35x40 cm
f'c	200 Kg/cm <sup>2</sup>	297 Kg/cm <sup>2</sup>
fy	4200 Kg/cm <sup>2</sup>	4850 Kg/cm <sup>2</sup>

\* Para el espécimen D7R se colocaron 6  $\phi$  # 2.5 @ 7 cm.

Tabla 1. Características de los Especímenes.

**FIGURAS.**



**Fig.1. Soleras de refuerzo en la junta de los especímenes DB y DBR.**

VISTA FRONTAL

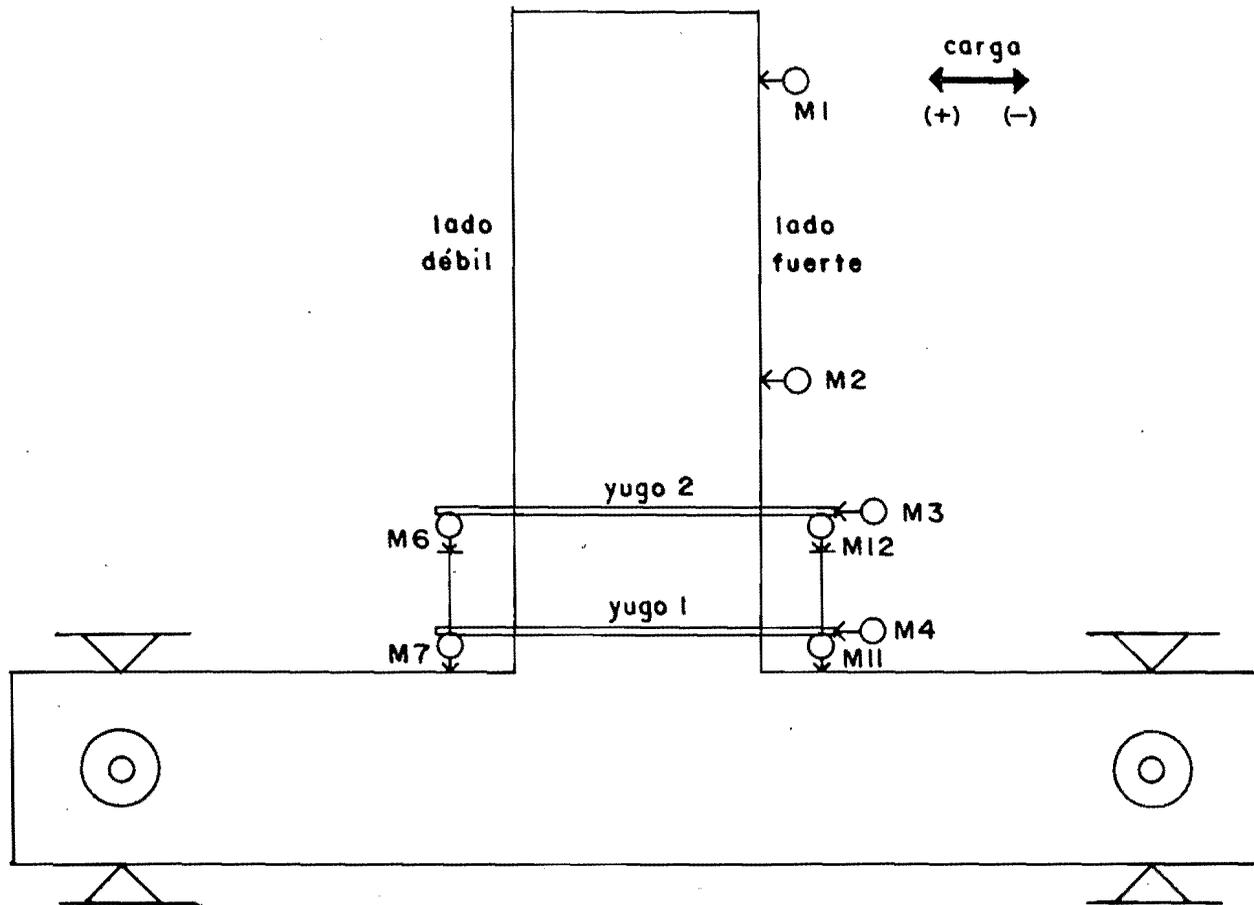


Fig.2. Transductores de desplazamiento ubicados en los especímenes D7 y D7R.

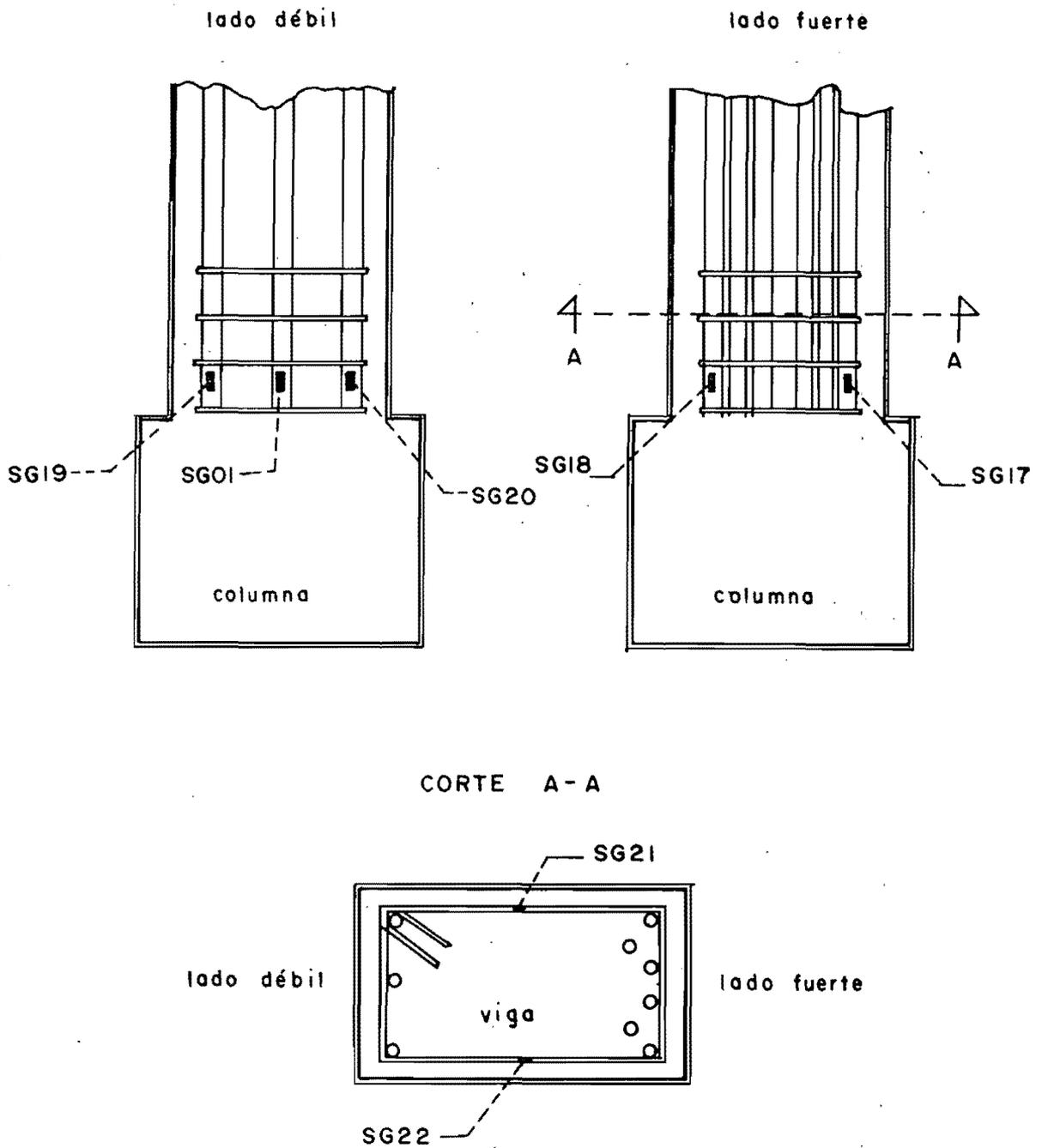


Fig. 3. Deformímetros eléctricos ubicados en los especímenes D7 y D7R.

VISTA FRONTAL

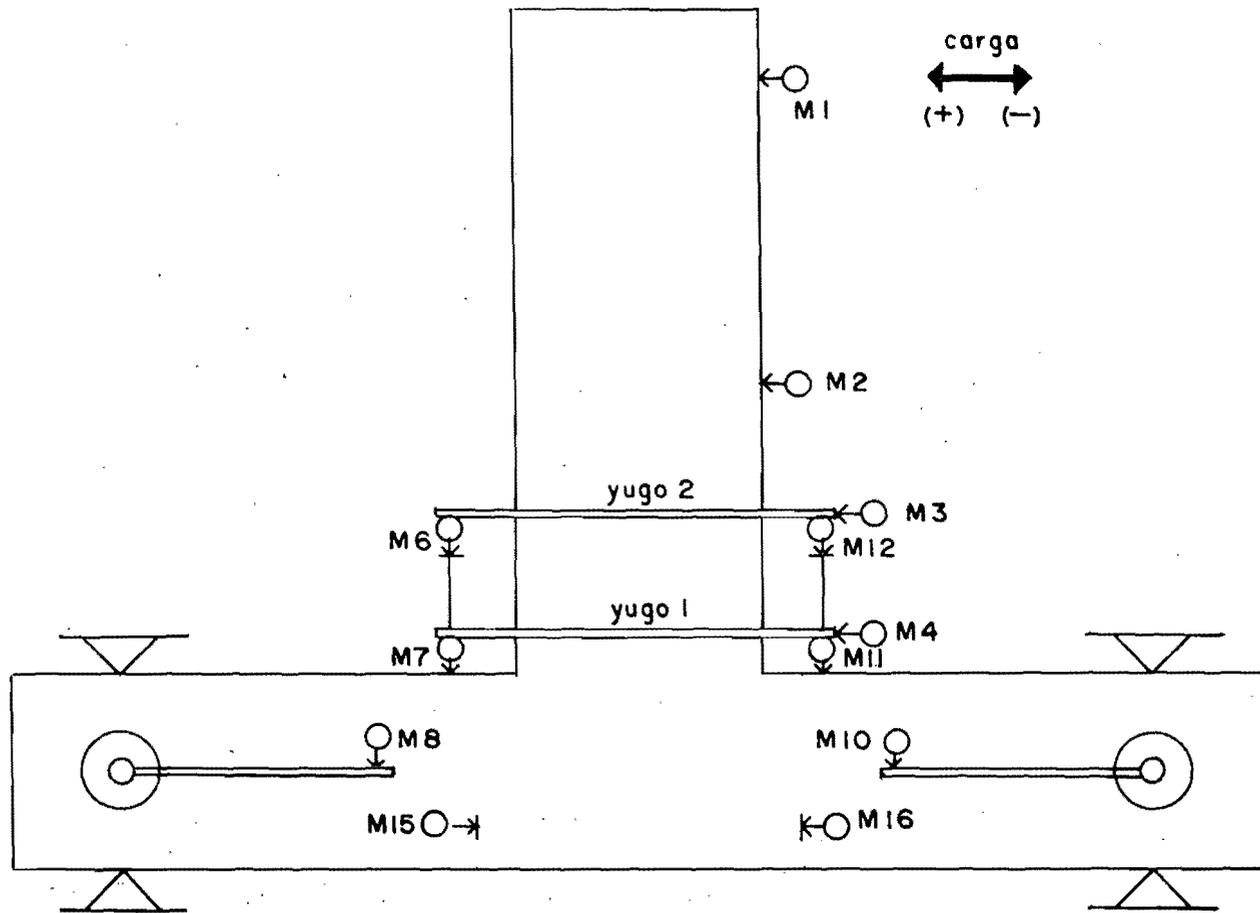


Fig. 4. Transductores de desplazamiento ubicados en los especímenes D8 y D8R.

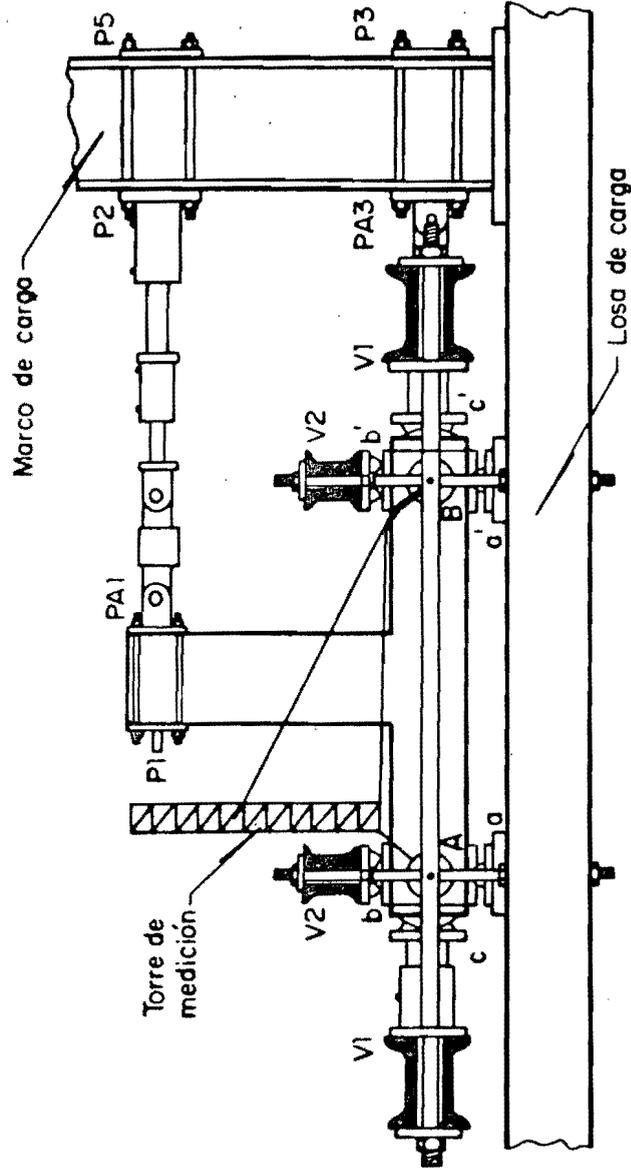


Fig. 5. Posición del ensaye.

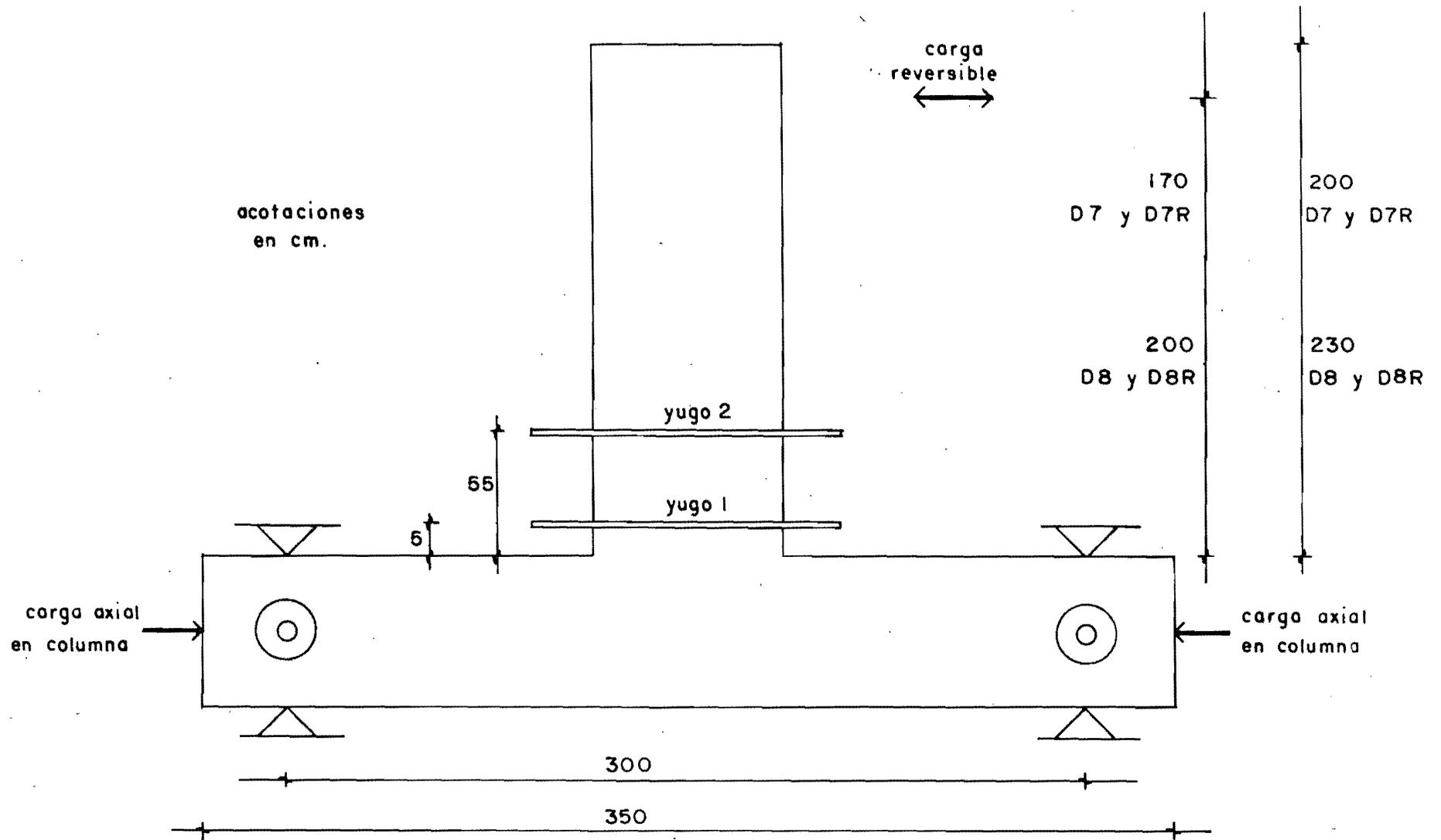


Fig. 6. Dimensiones generales.

Fig.7. Curvas Carga-Desplazamiento.

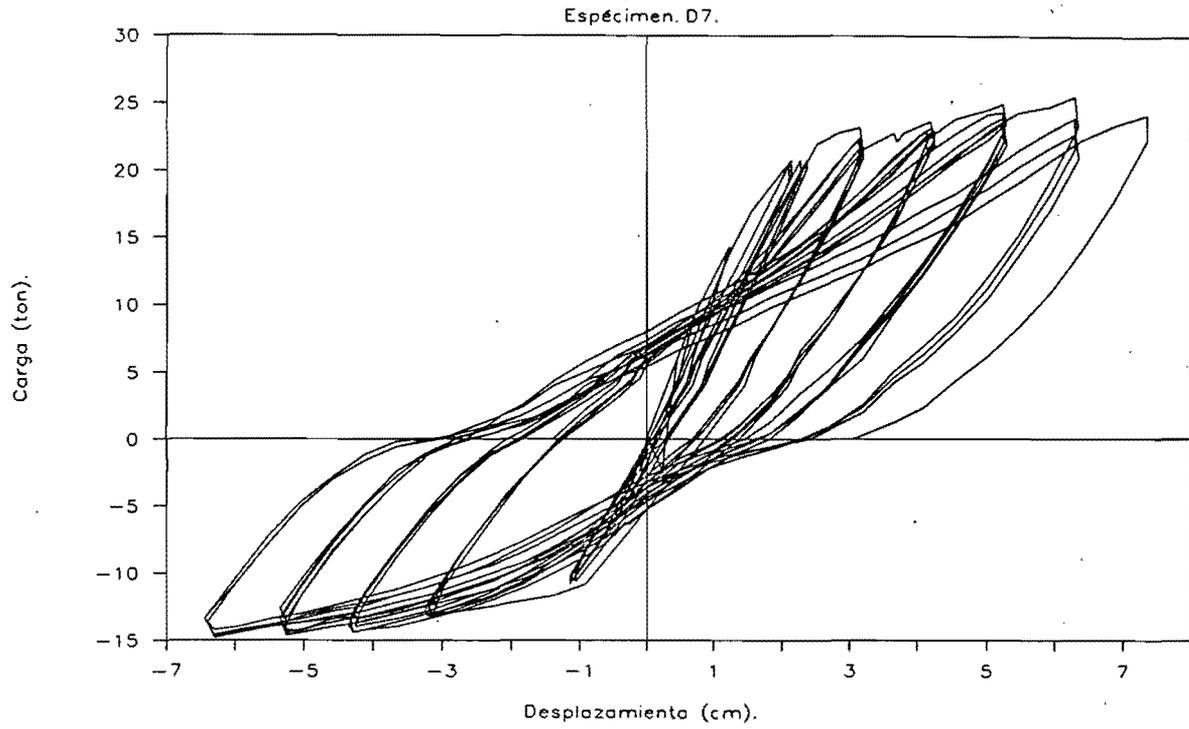


Fig.8. Curvas Carga-Desplazamiento.

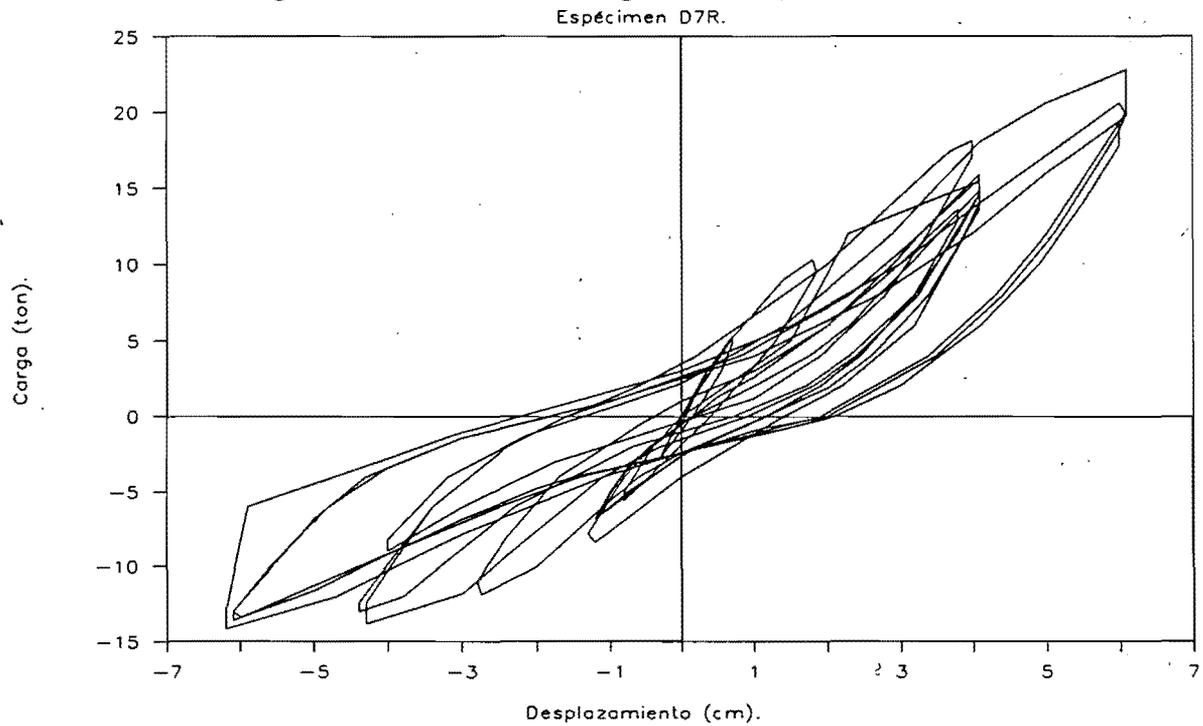


Fig.9. Micrómetro M1.  
Especimen D7.

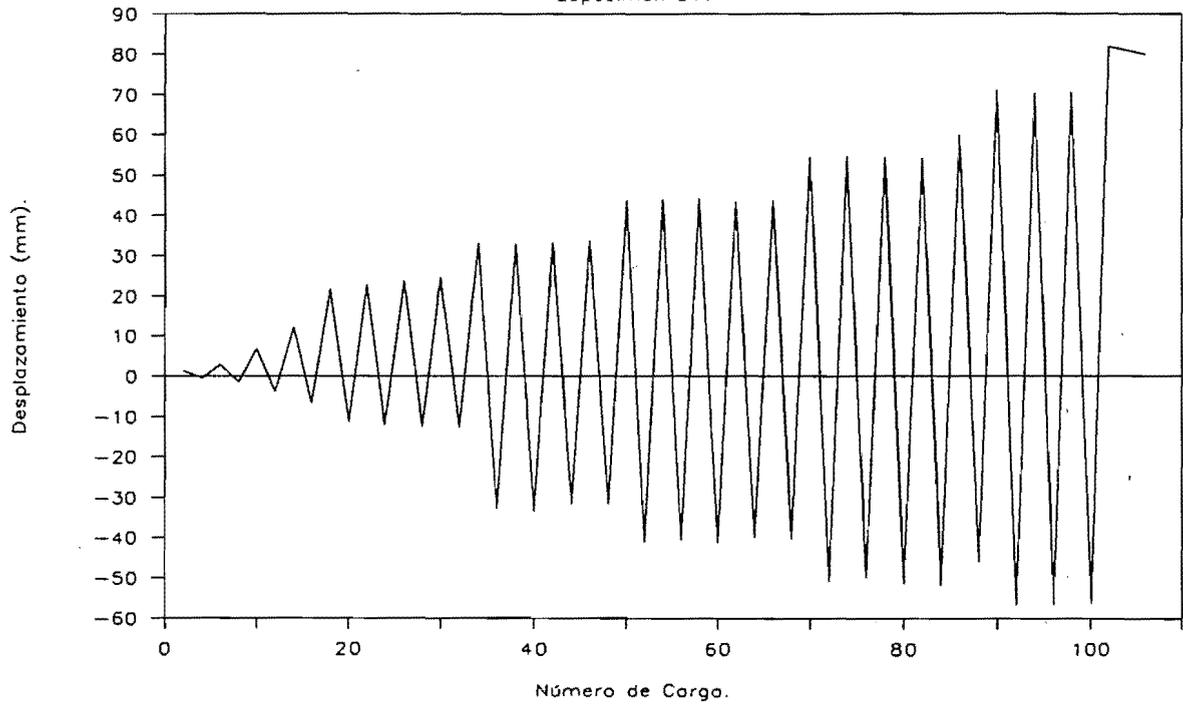


Fig.10. Micrómetro M1-000.  
Especimen D7R.

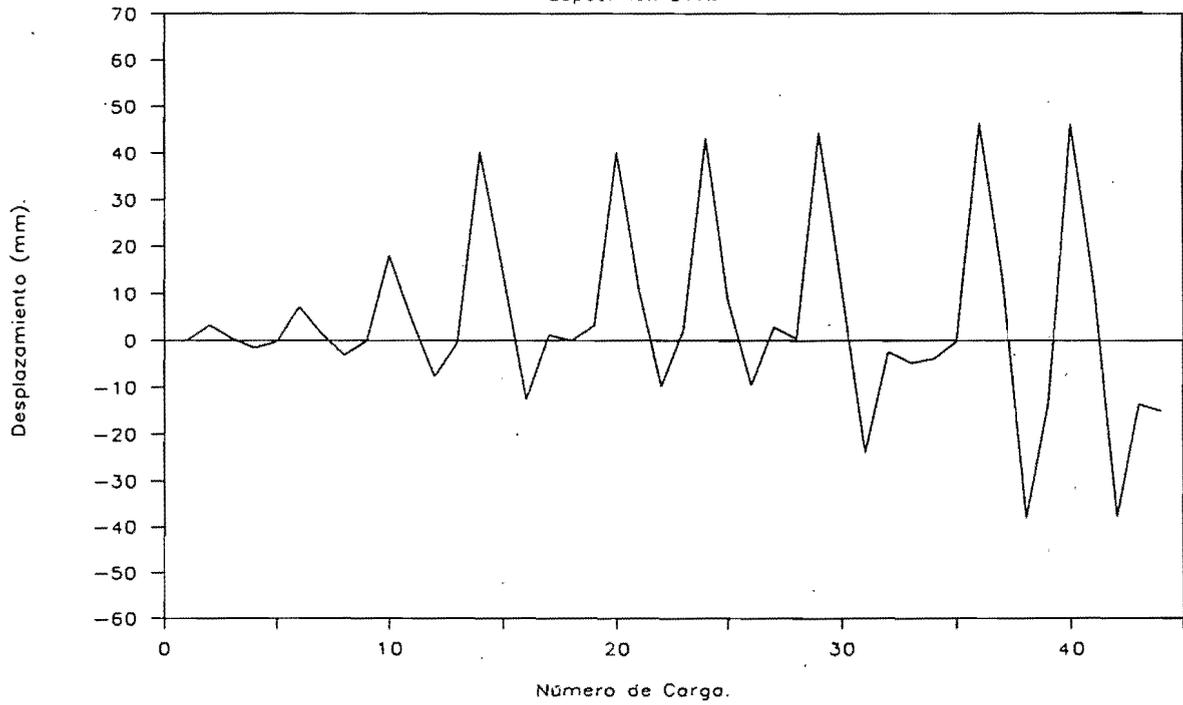


Fig.11. Micrómetro M2.

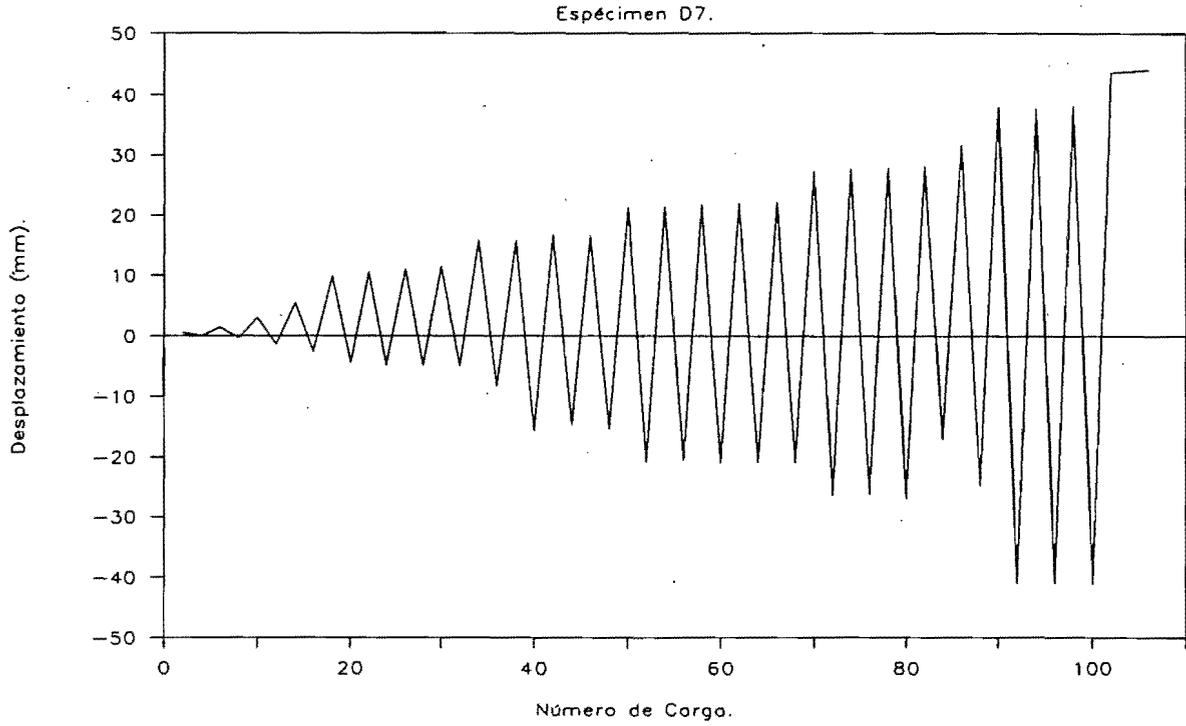


Fig.12. Micrómetro M2-001.

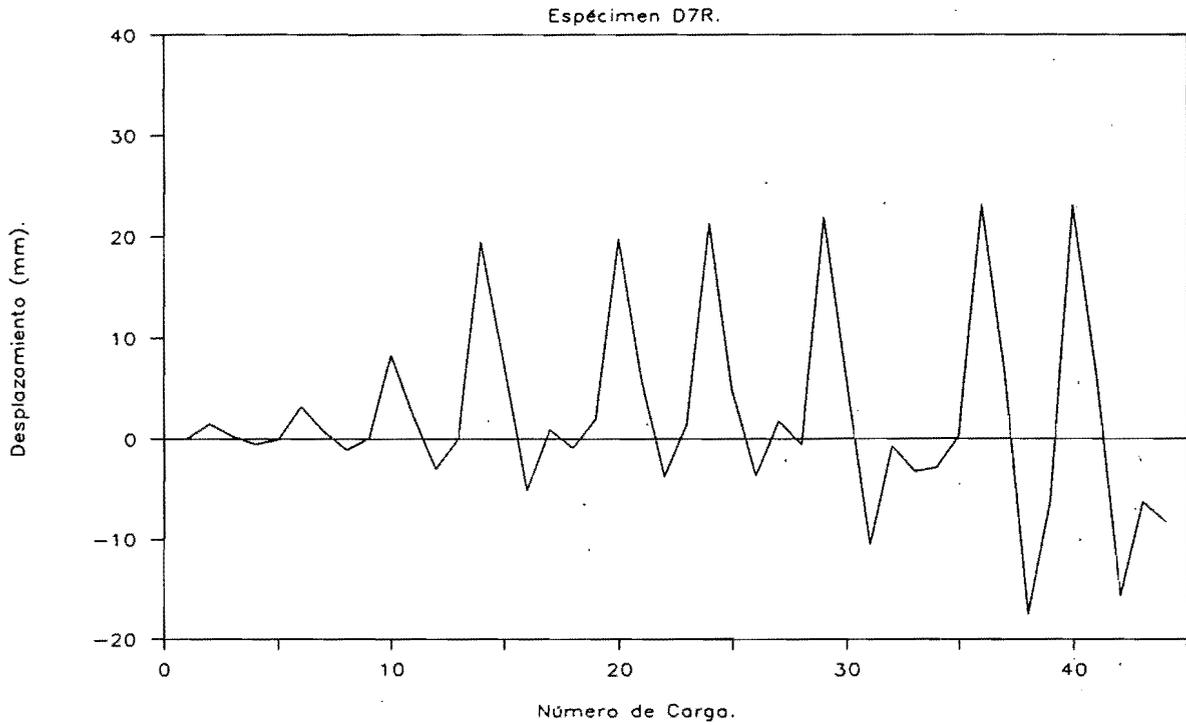


Fig.13. Micrómetro M3.  
Especimen D7.

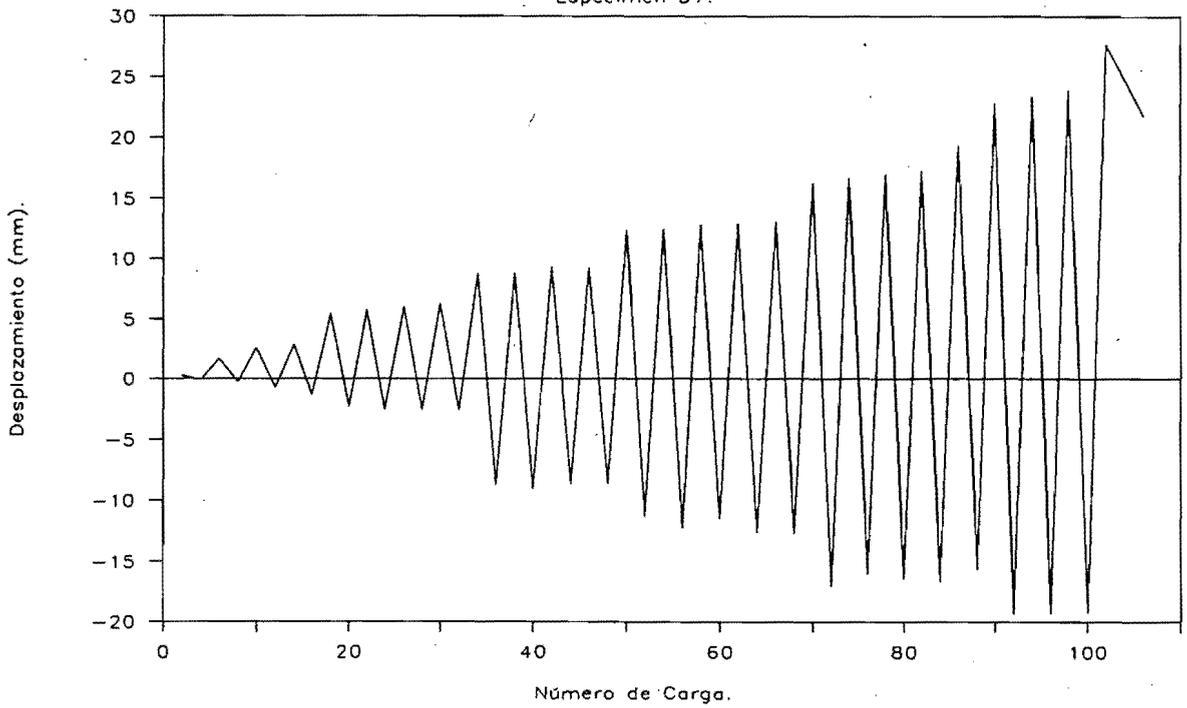


Fig.14. Micrómetro M3-002.  
Especimen D7R.

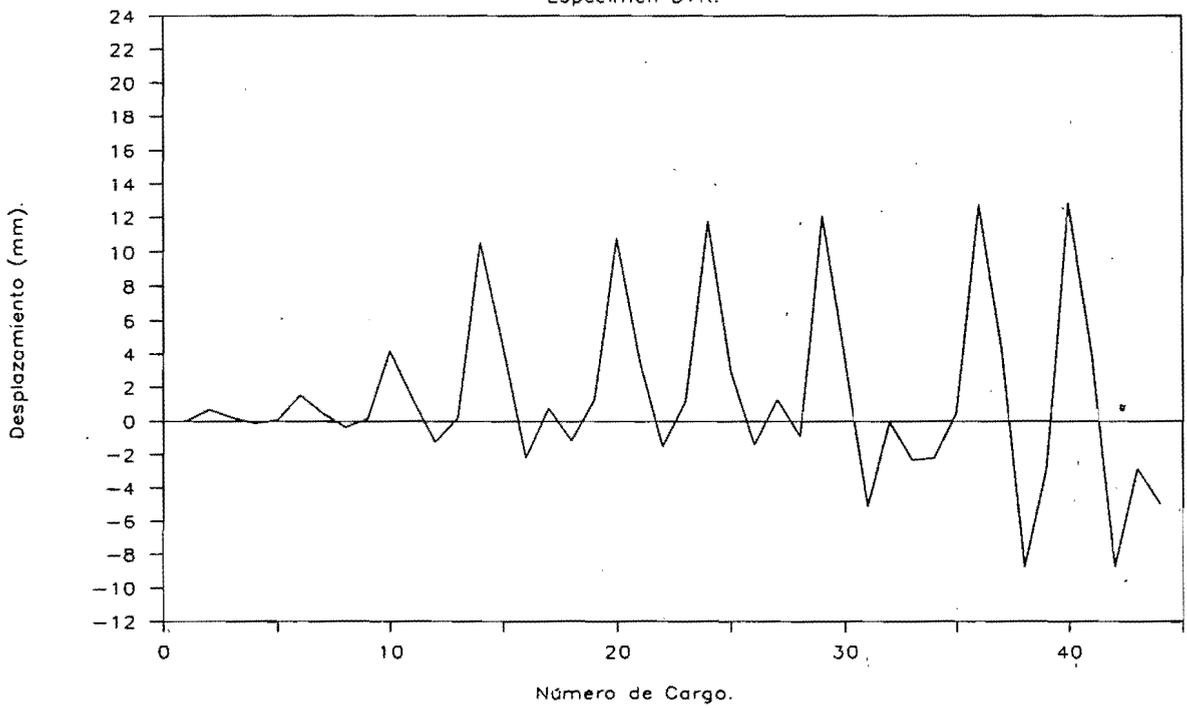


Fig.15. Micrómetro M4.

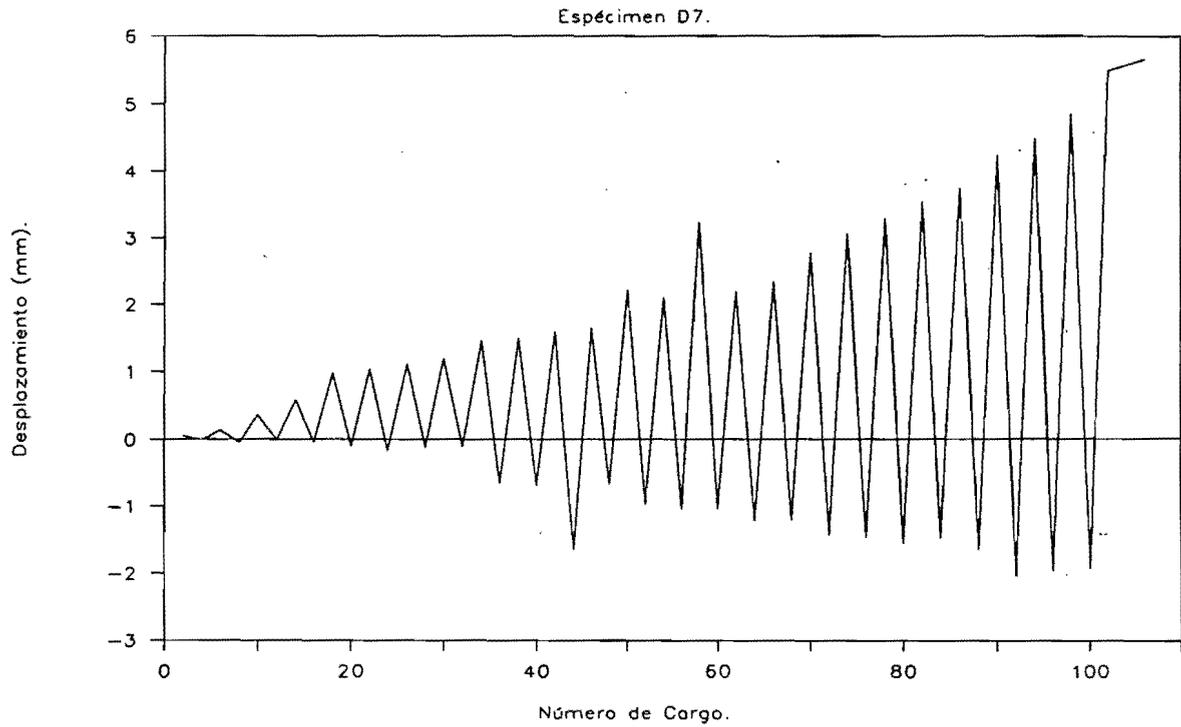


Fig.16. Micrómetro M4-005.

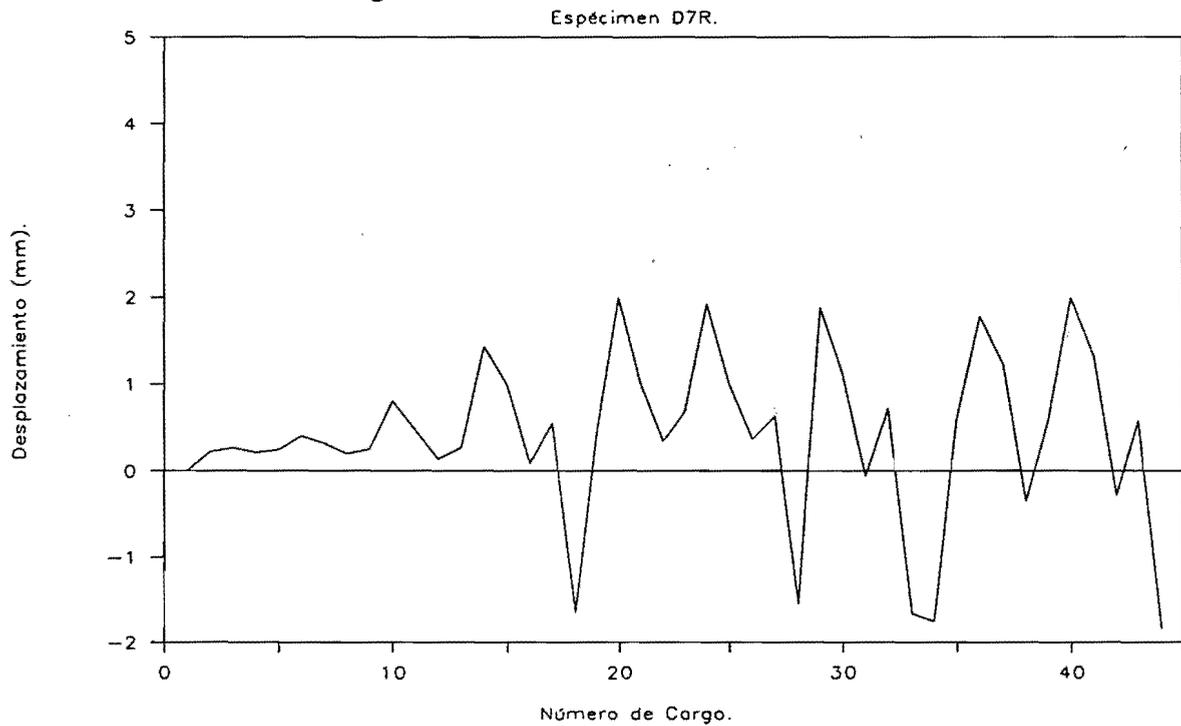


Fig.17. Micrómetro M6.

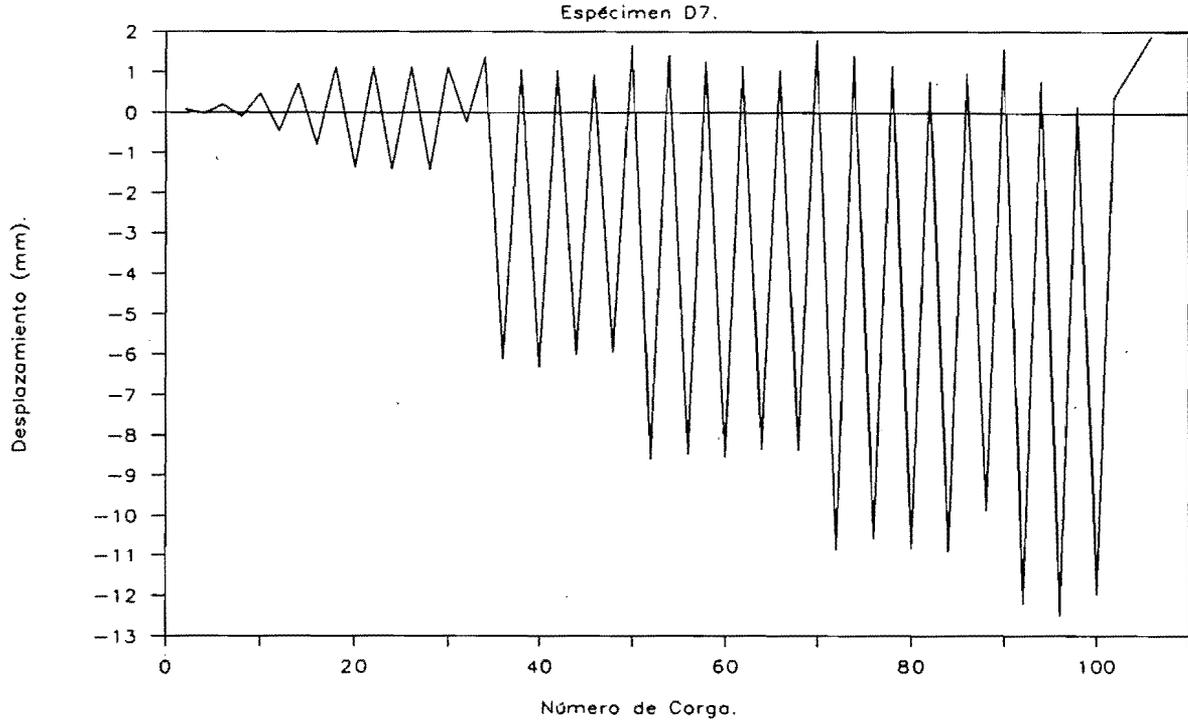


Fig.18. Micrómetro M6-006.

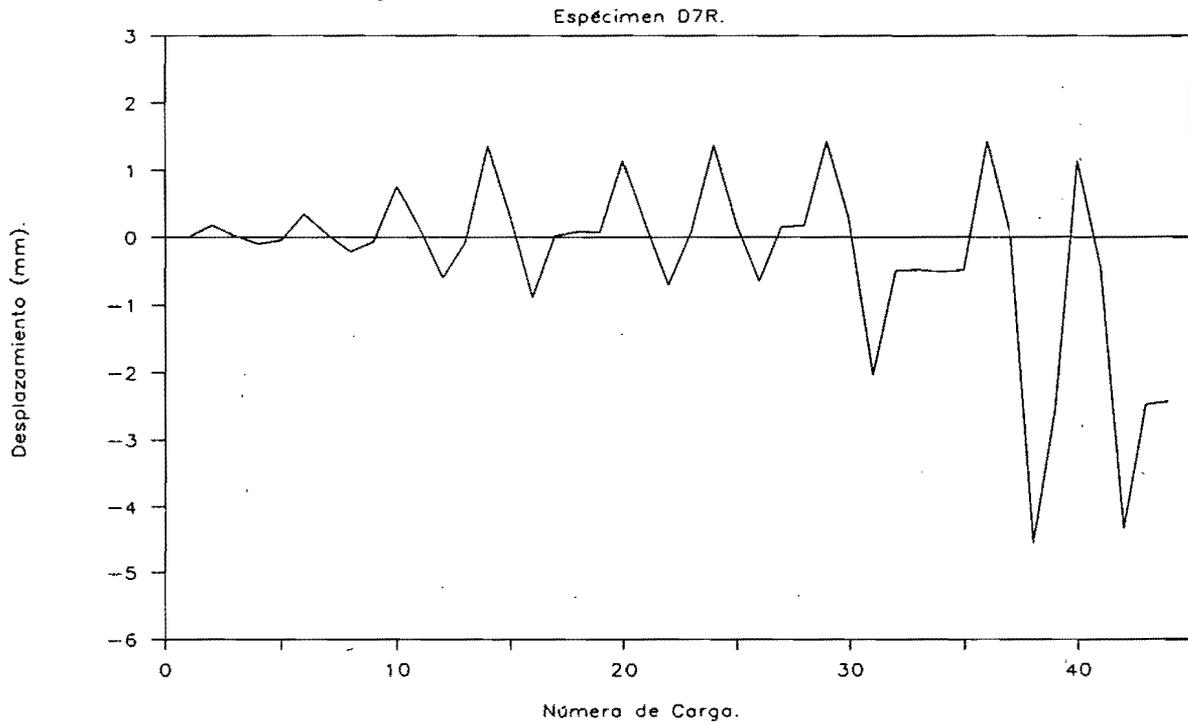


Fig.19. Micrómetro M7.

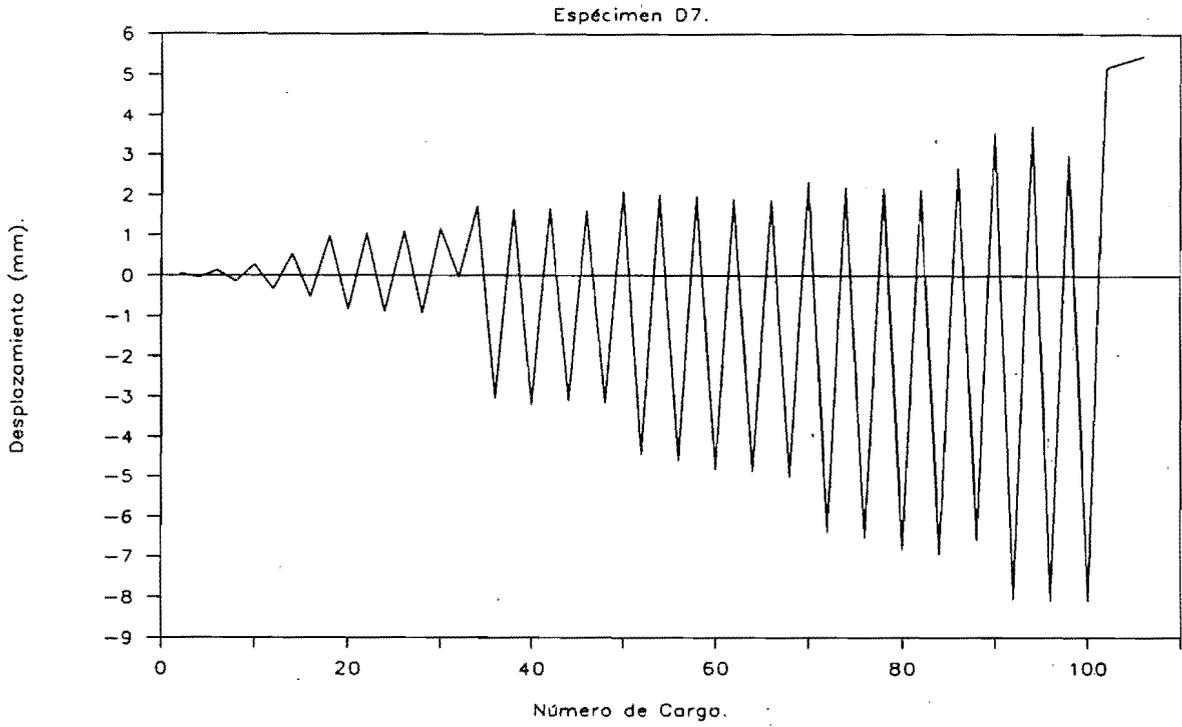


Fig.20. Micrómetro M7-008.

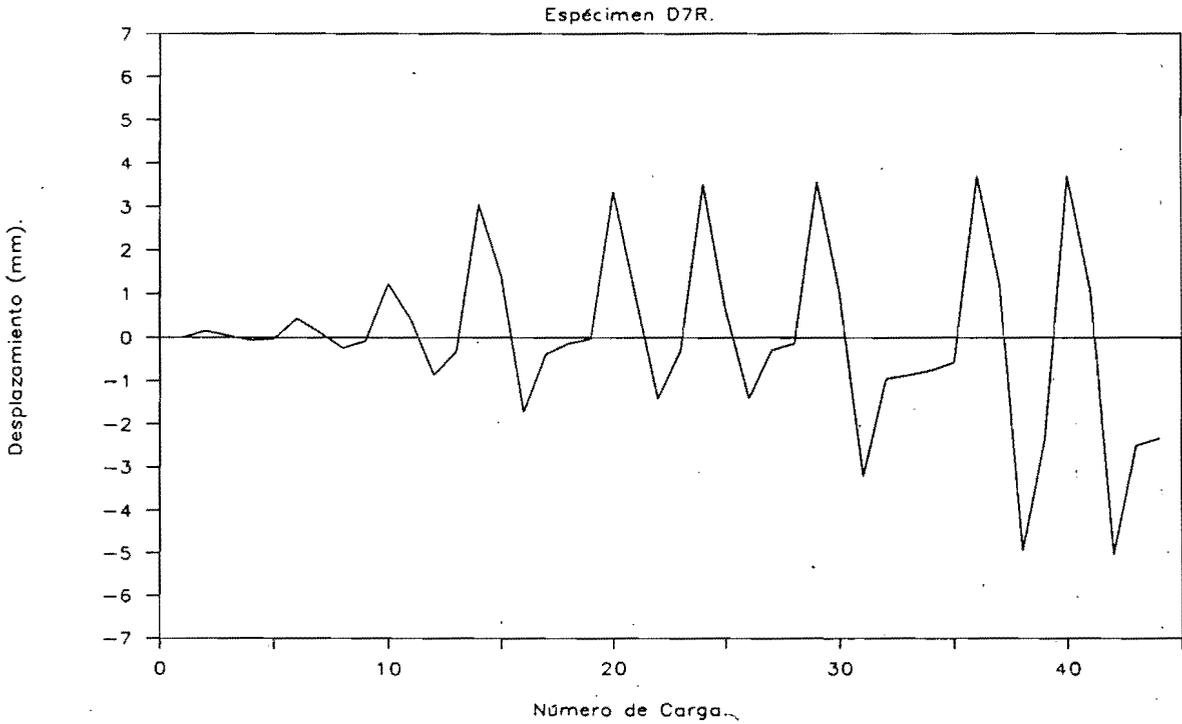


Fig.21. Micrómetro M11.

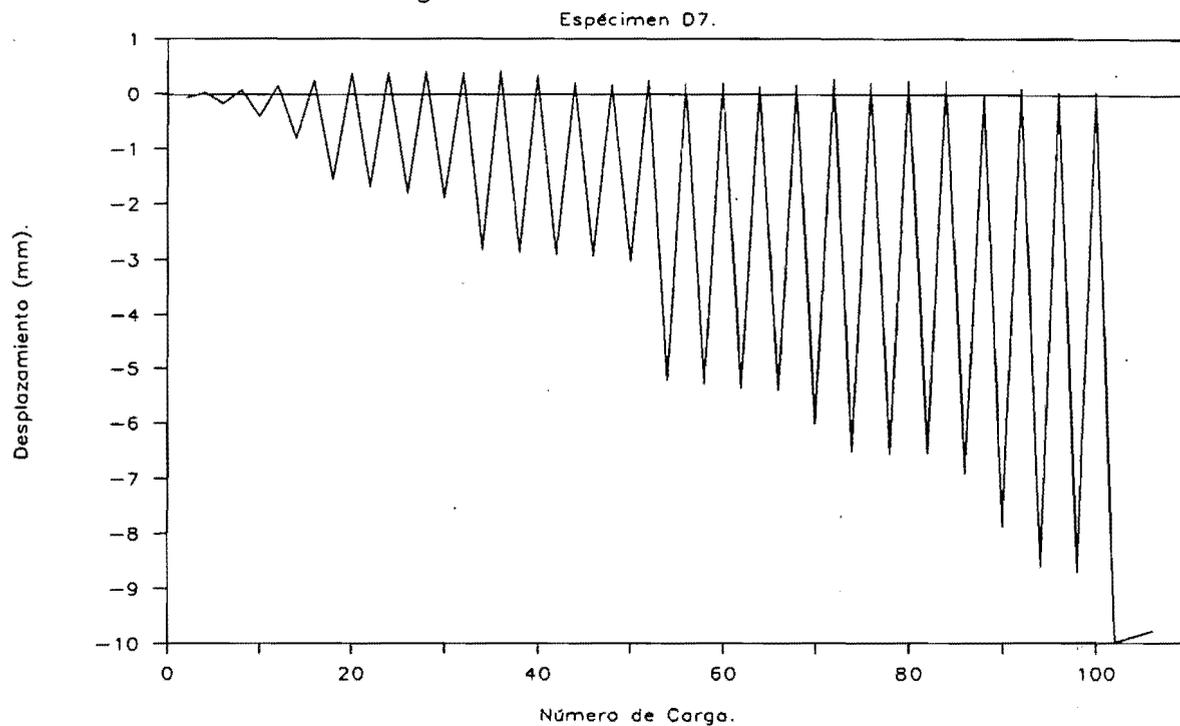


Fig.22. Micrómetro M11-009.

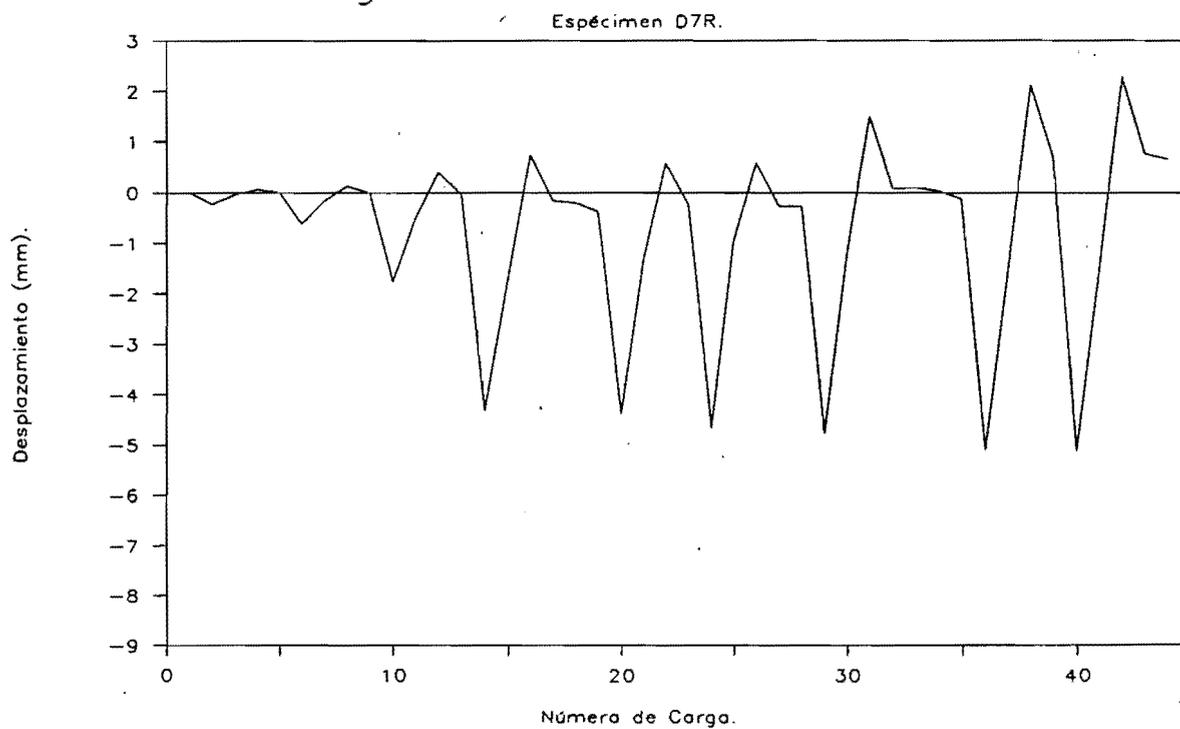


Fig.23. Micrómetro M12.

Espécimen D7.

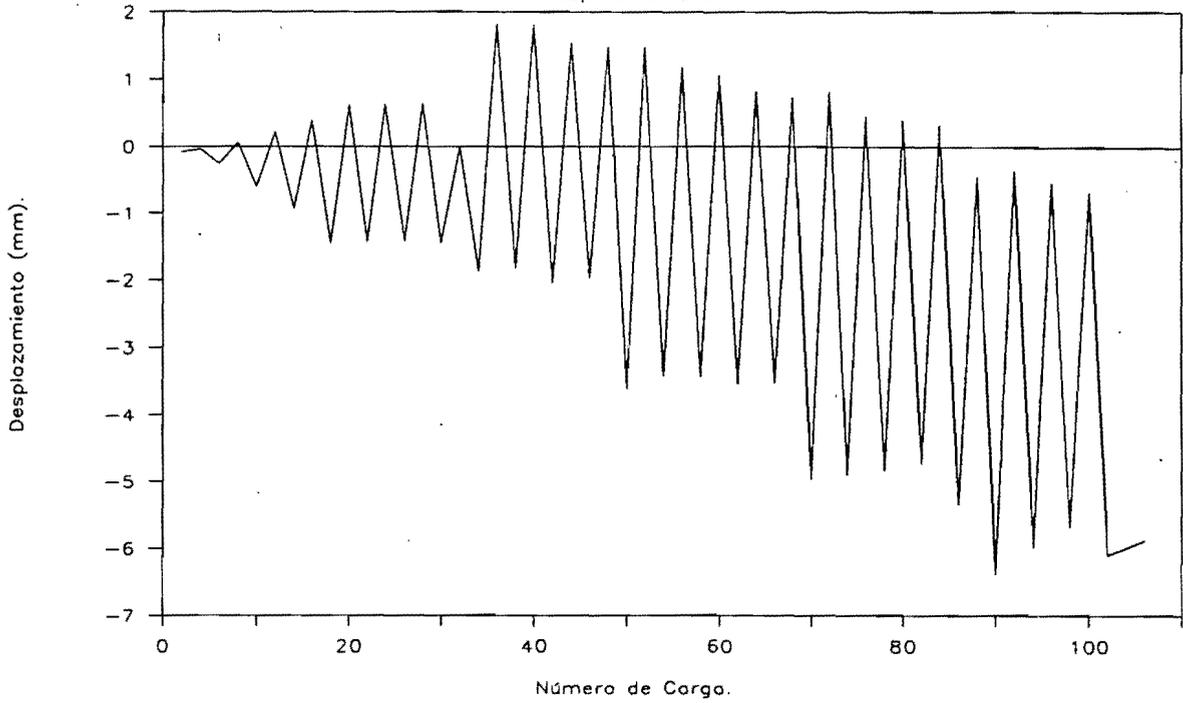


Fig.24. Micrómetro M12-007.

Espécimen D7R.

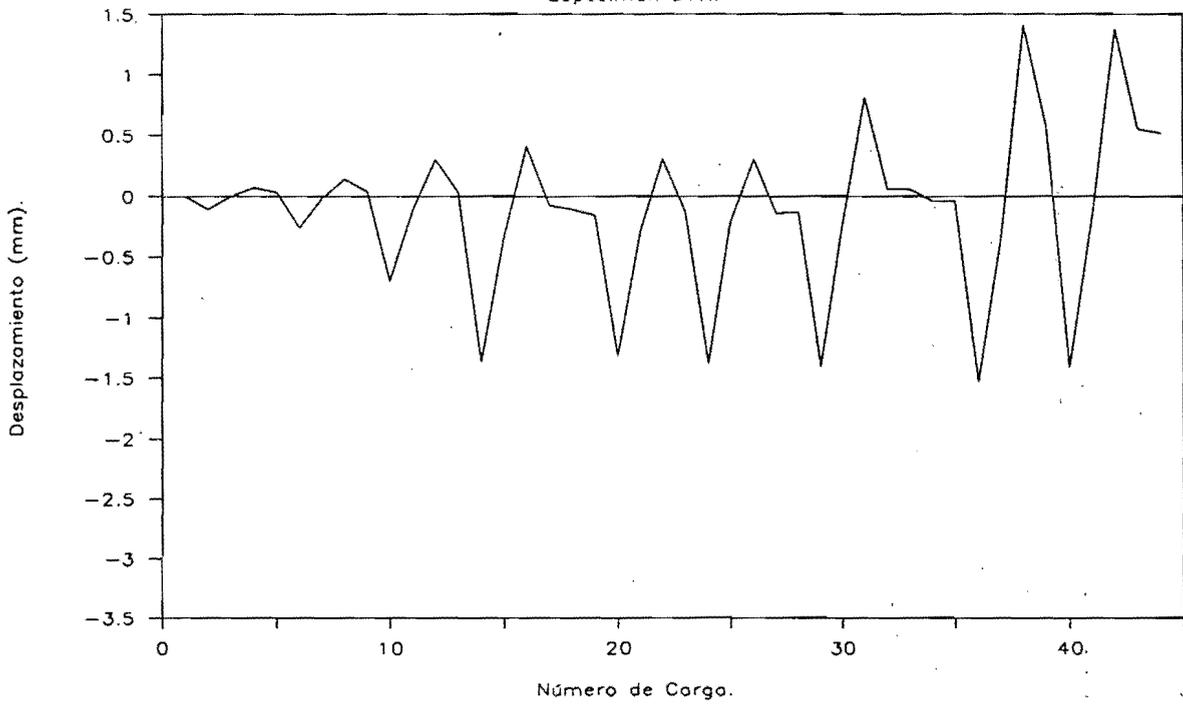


Fig.25. Deformación del Acero SG17.

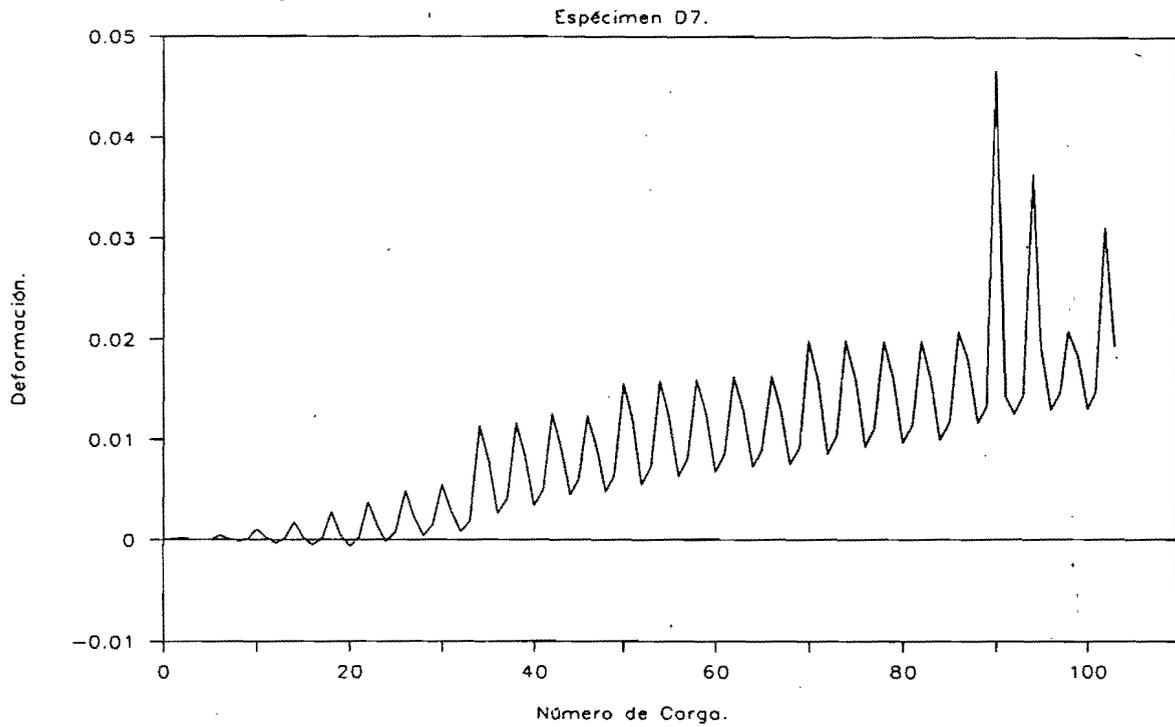


Fig.26. Deformación del Acero SG17-014.

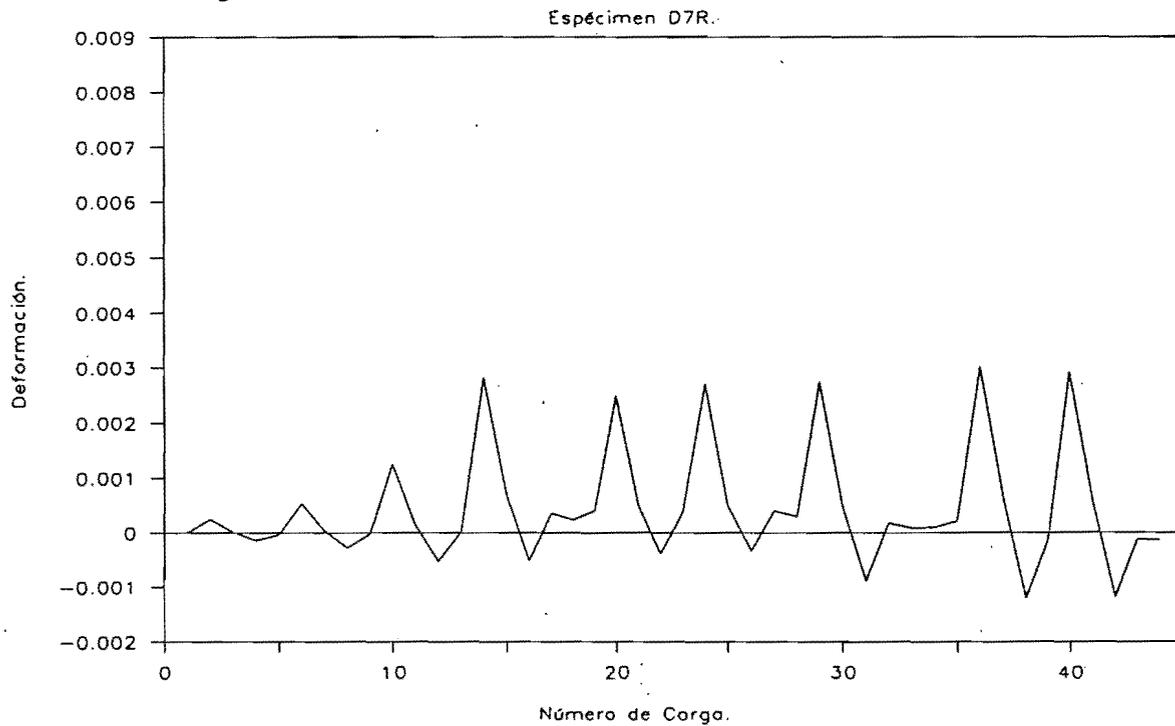


Fig.27. Deformación del Acero SG18.

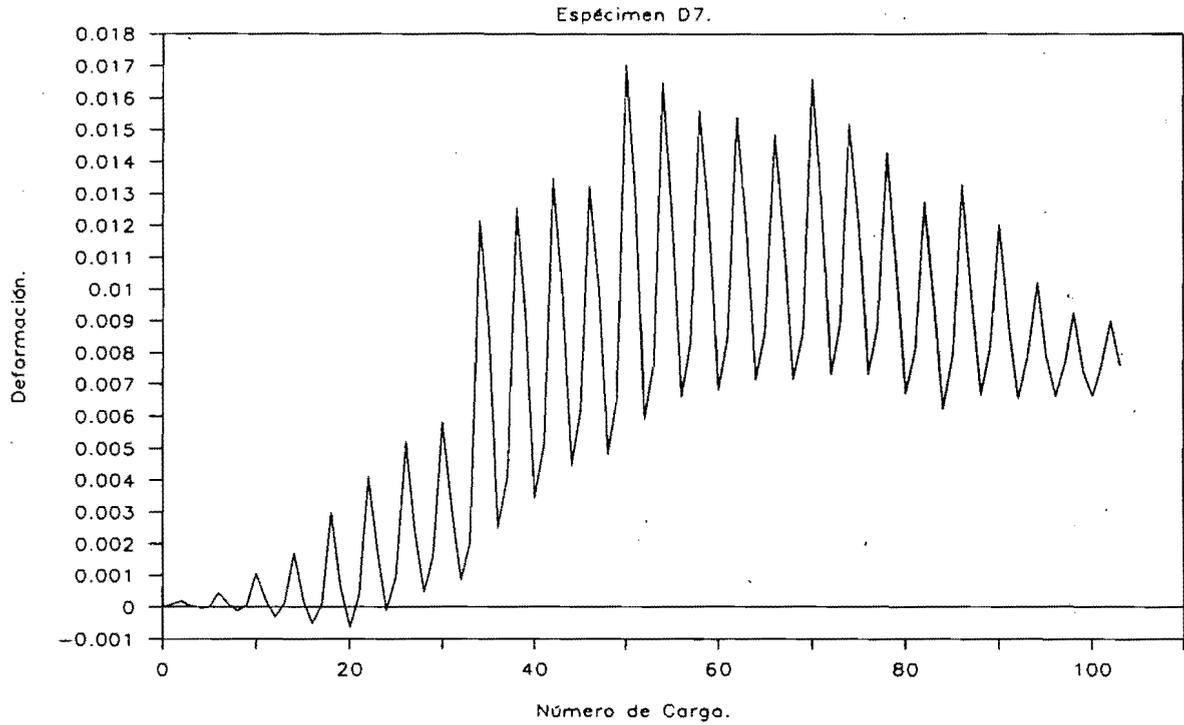


Fig.28. Deformación del Acero SG18-013.

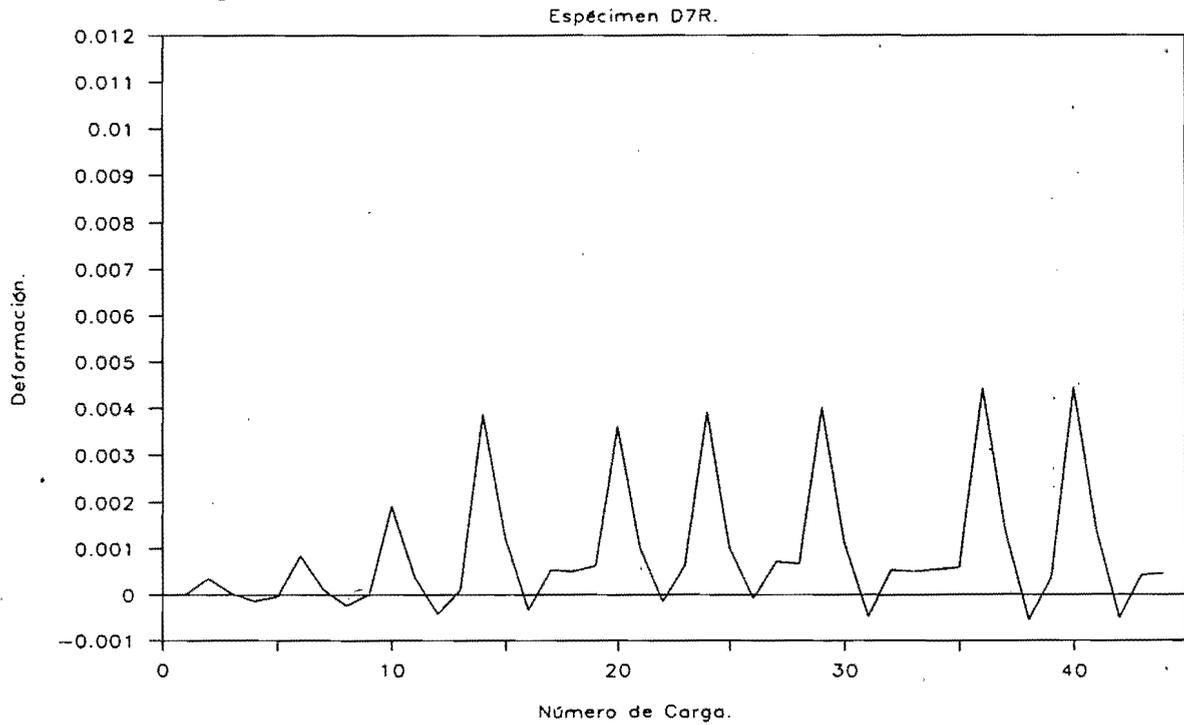


Fig.29. Deformación del Acero SG01-011.

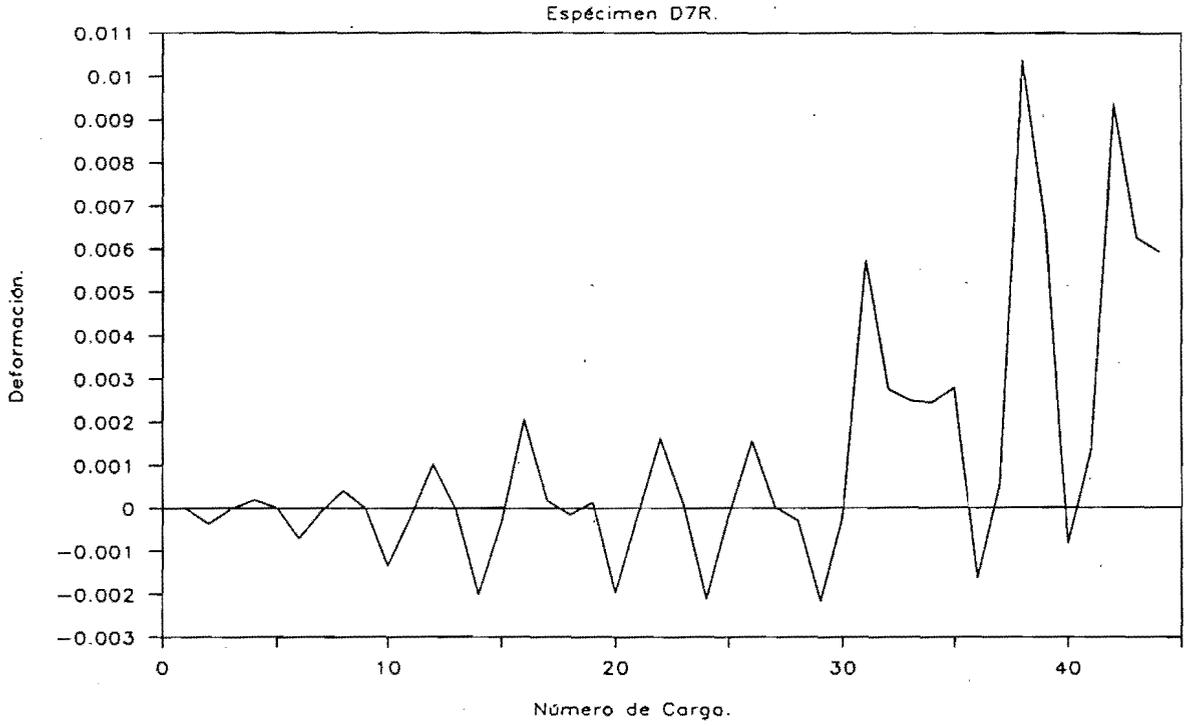


Fig.30. Deformación del Acero SG19.

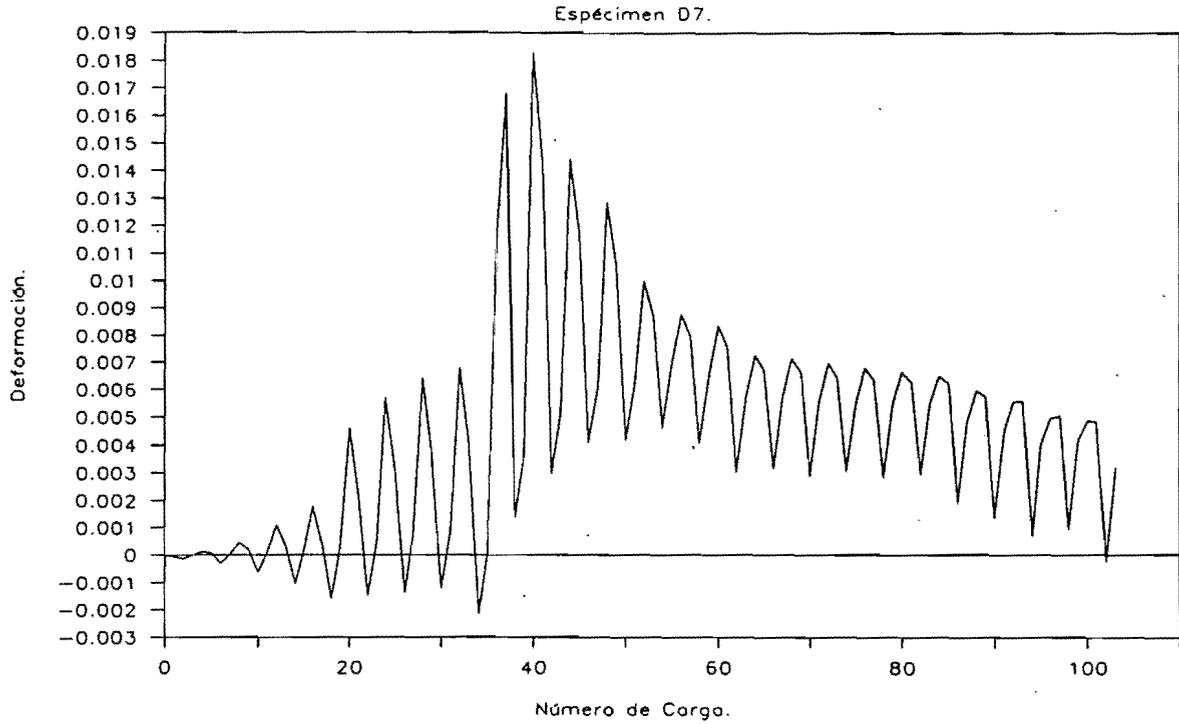


Fig.31. Deformación del Acero SG19-010.

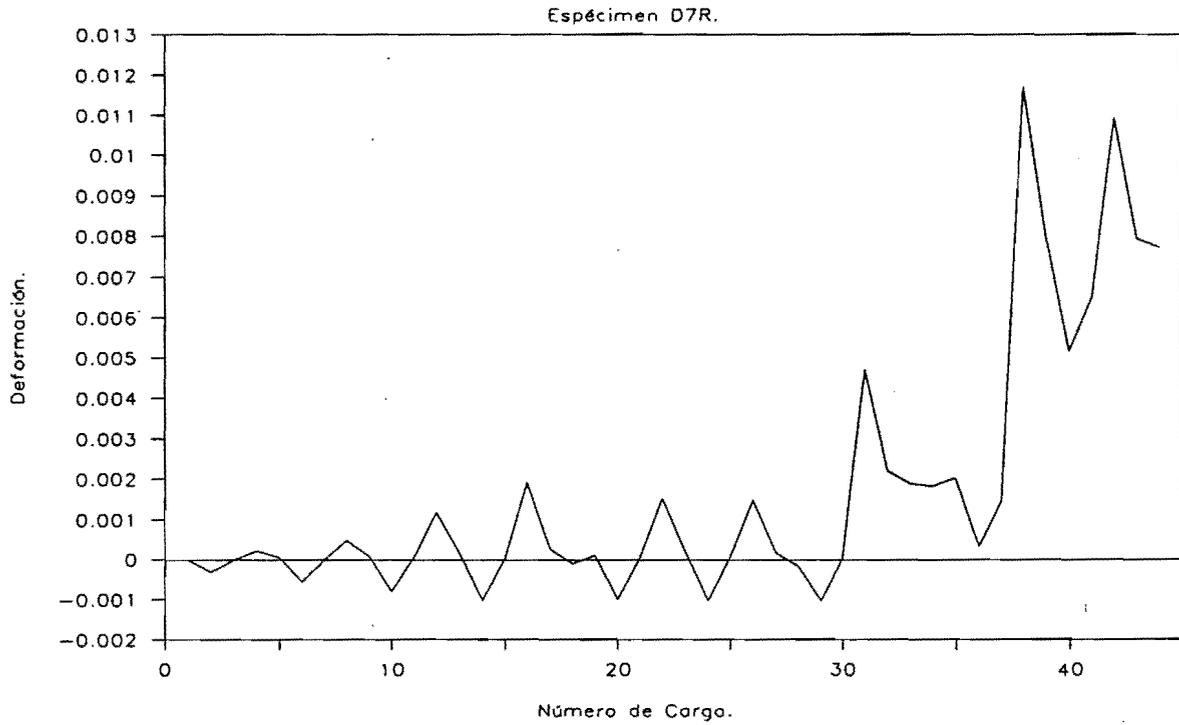


Fig.32. Deformación del Acero SG20.

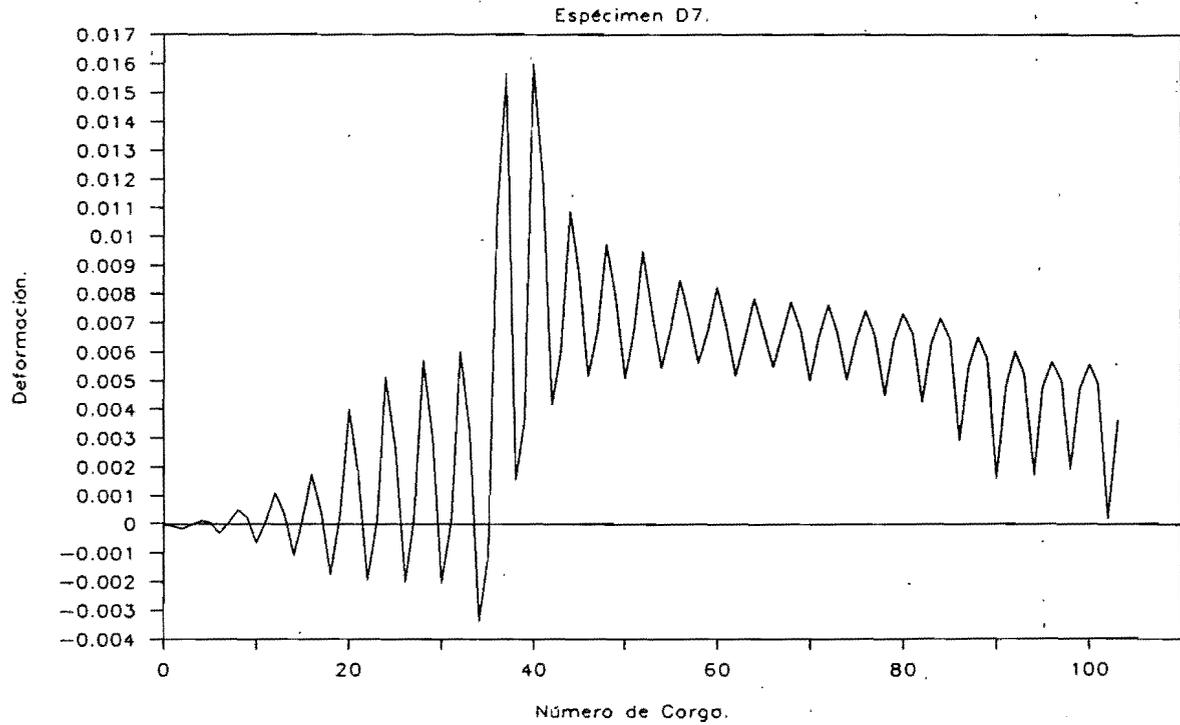


Fig.33. Deformación del Acero SG20-012.

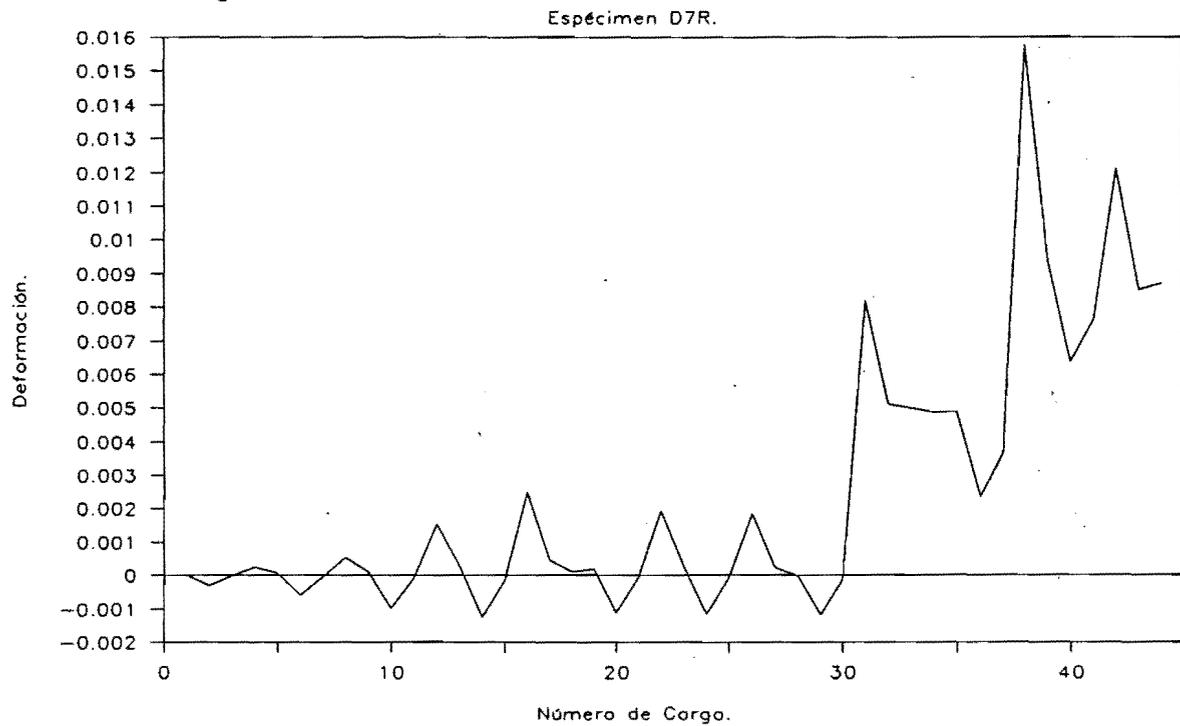


Fig.34. Deformación del Acero SG21.

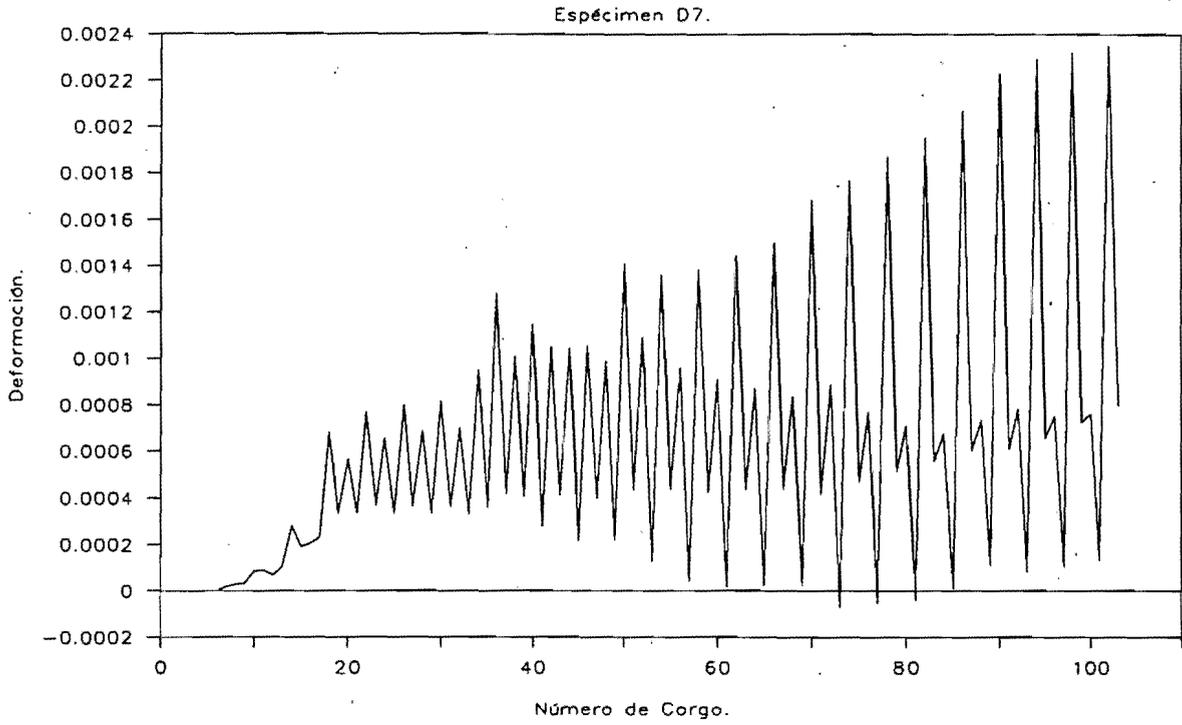


Fig.35. Deformación del Acero SG21-016.

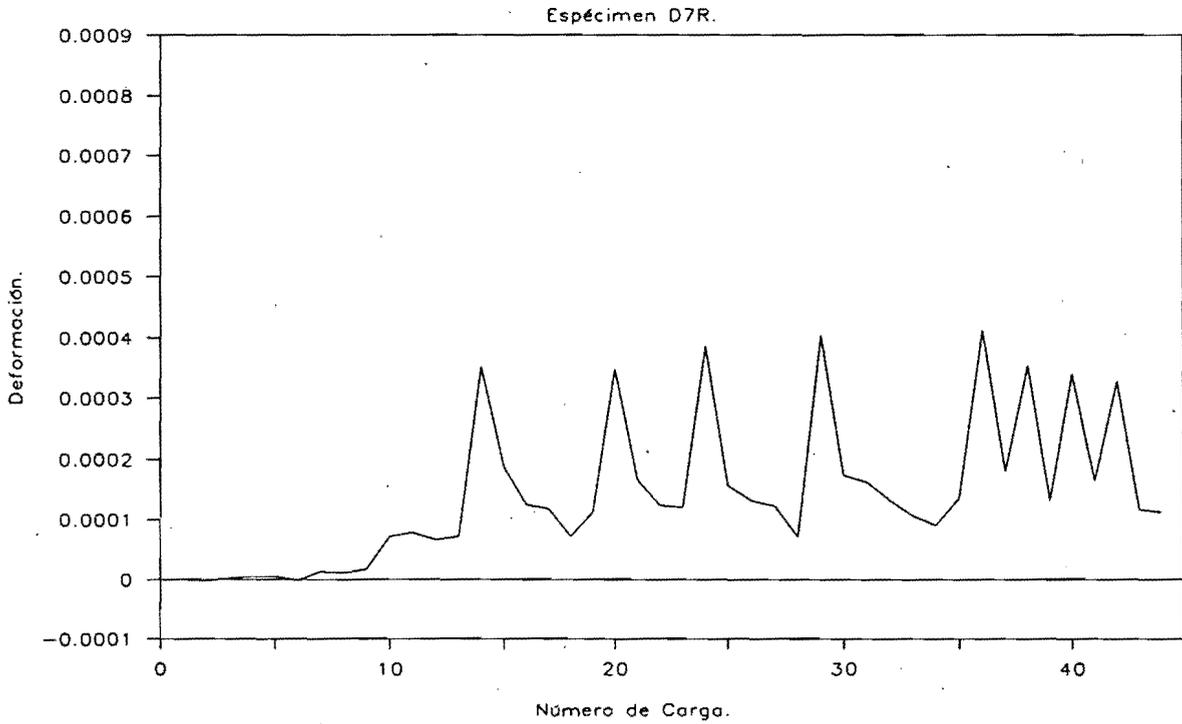


Fig.36. Deformación del Acero SG22.

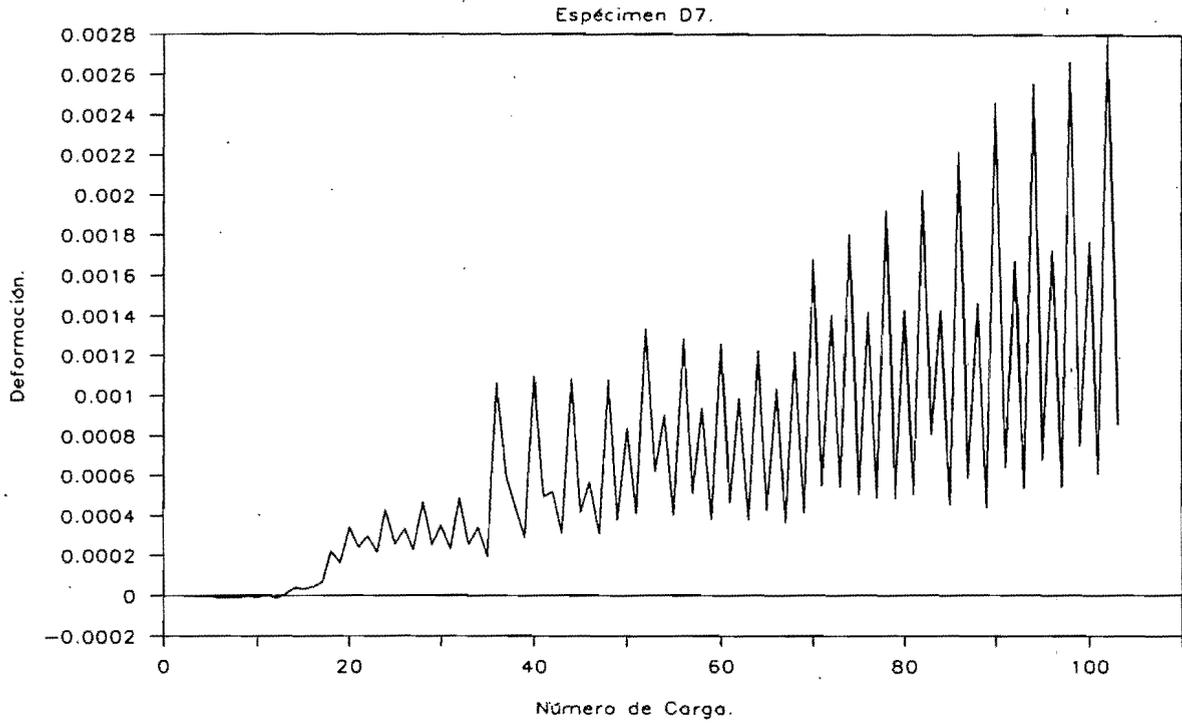


Fig.37. Deformación del Acero SG22-015.

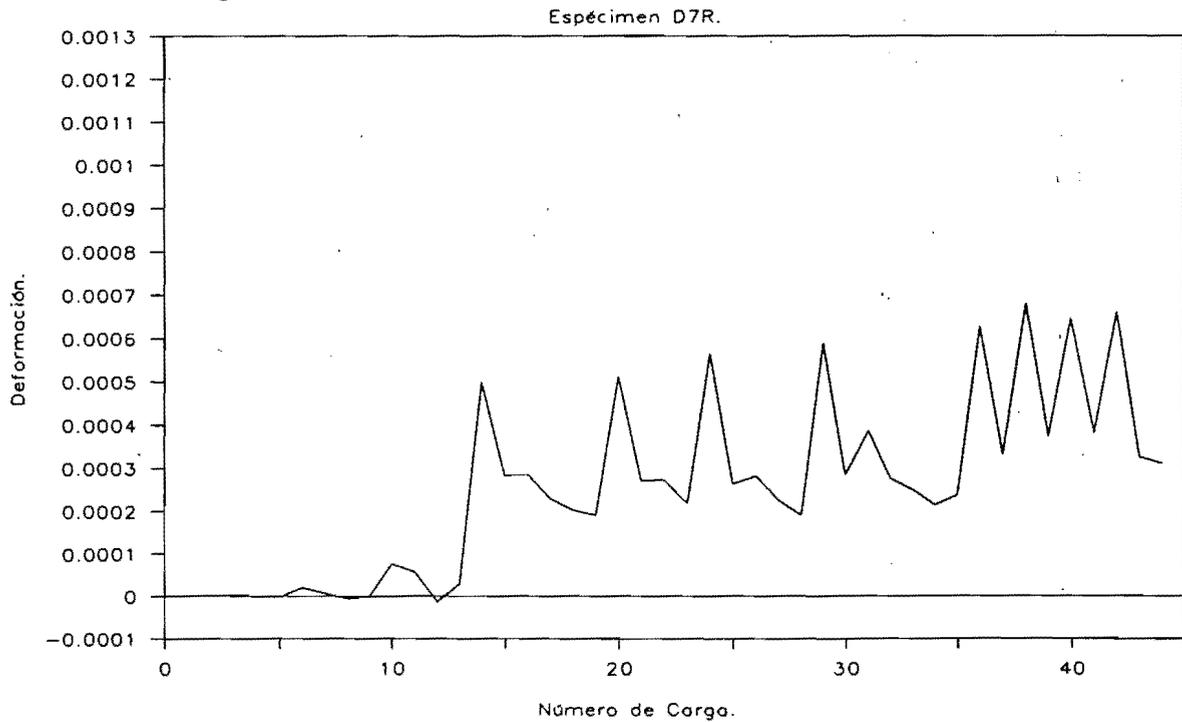


Fig.38. Participación Bajo Carga (+).

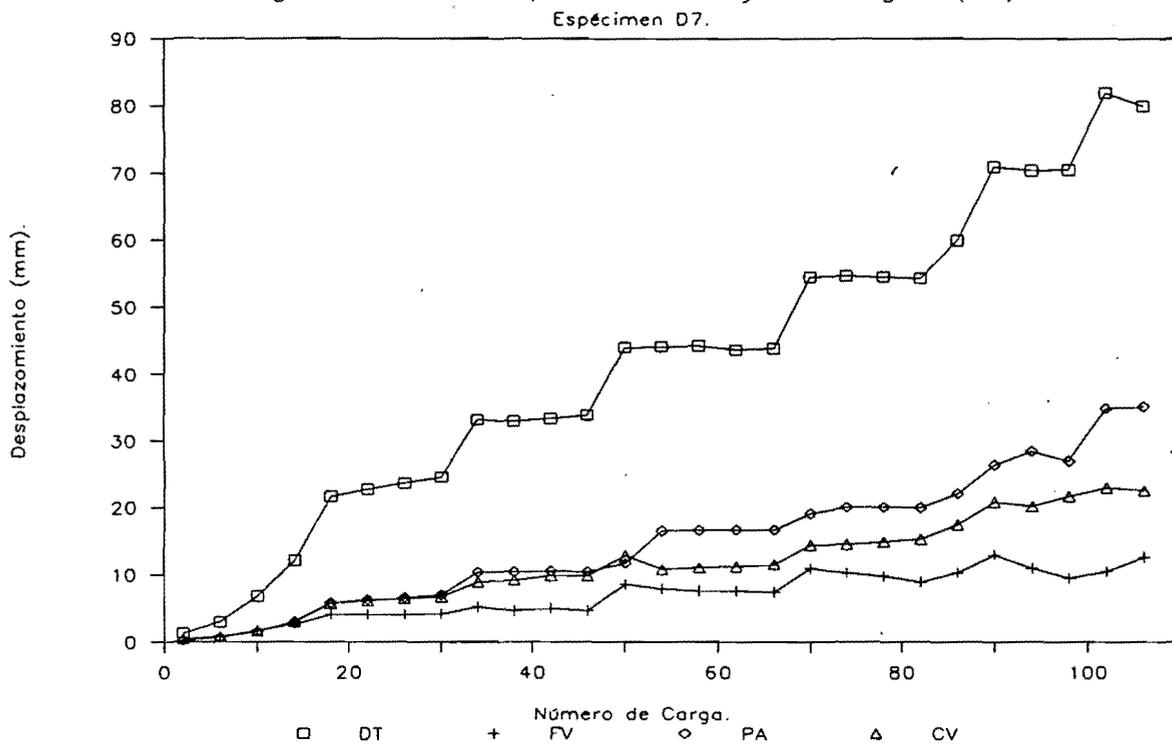


Fig.39. Participación Bajo Carga (+).

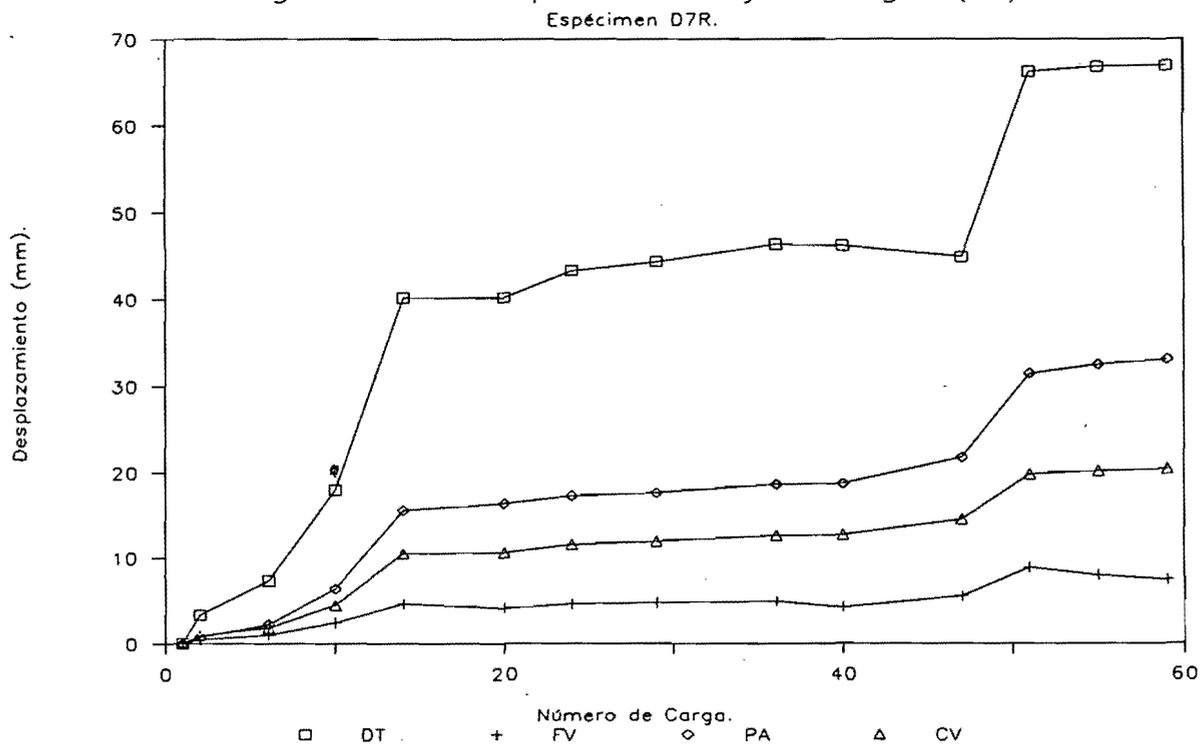


Fig.40. Participación Bajo Carga (-).

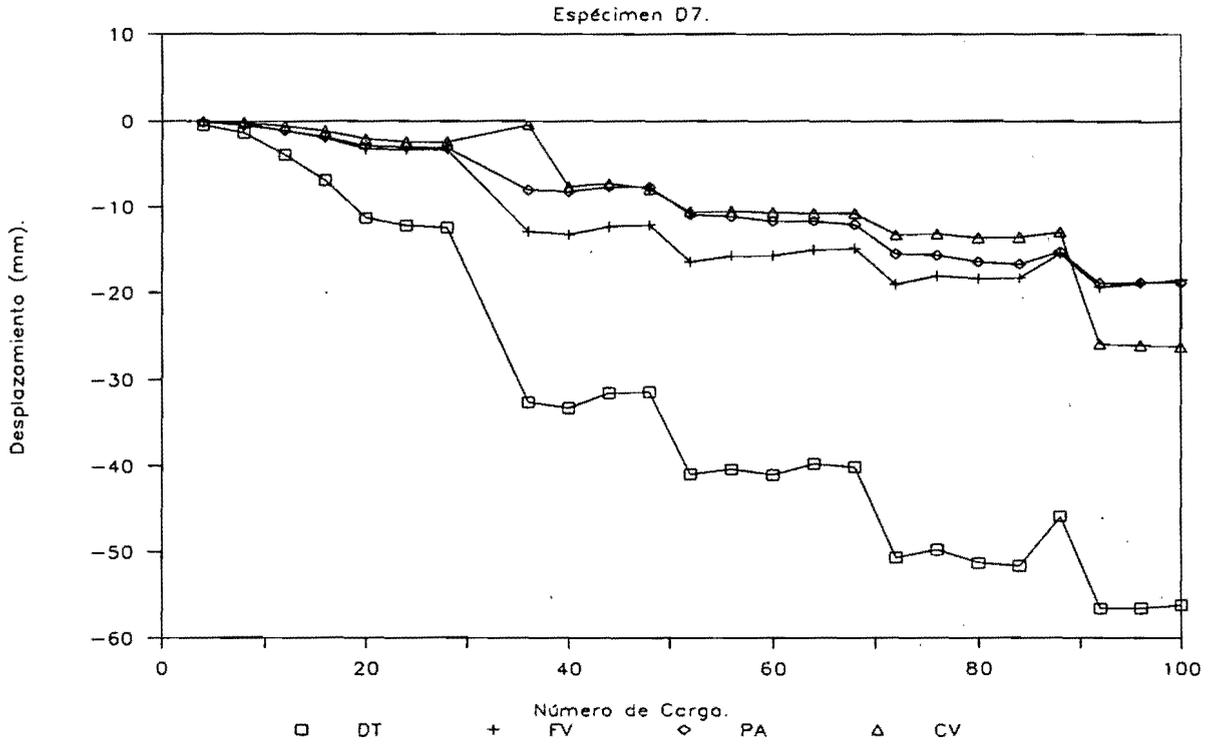


Fig.41. Participación Bajo Carga (-).

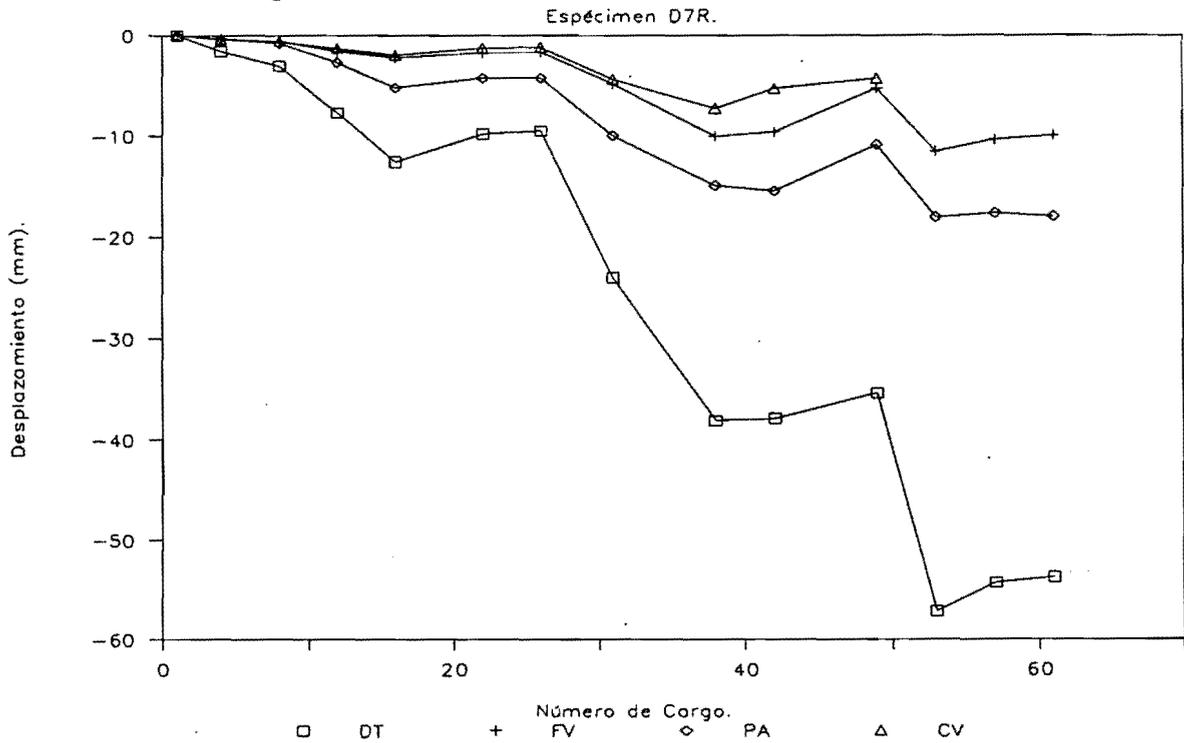


Fig.42. Curvas Carga-Desplazamiento.

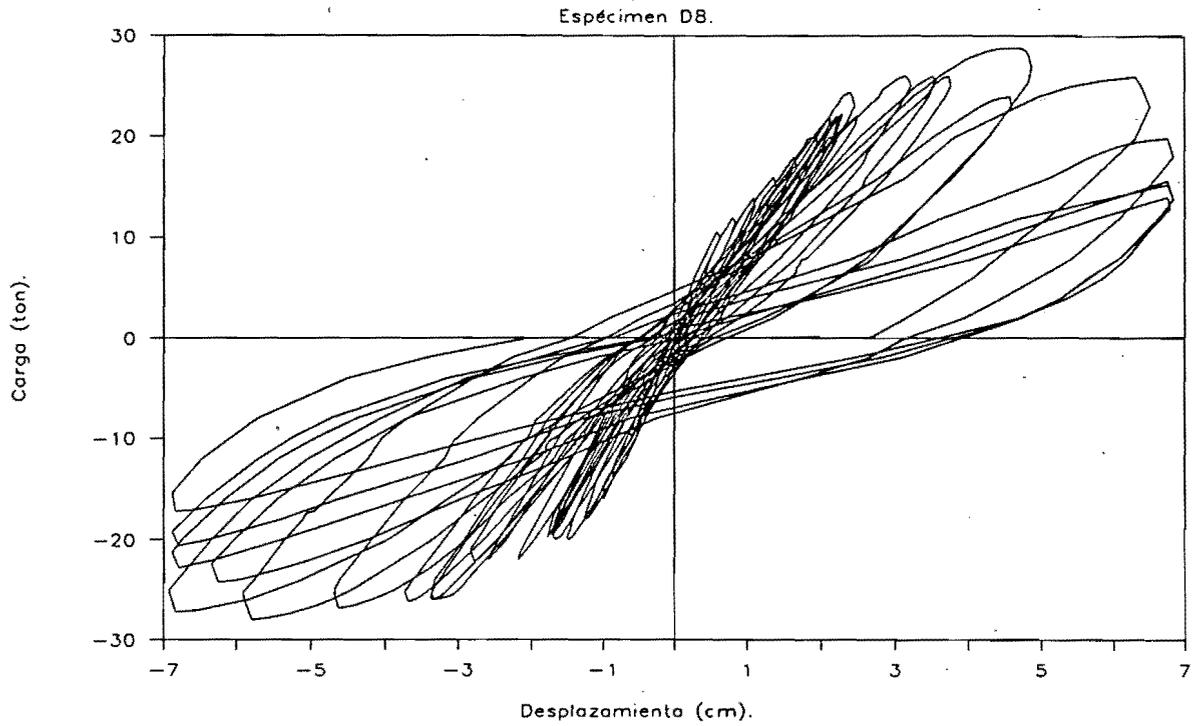


Fig.43. Curvas Carga-Desplazamiento.

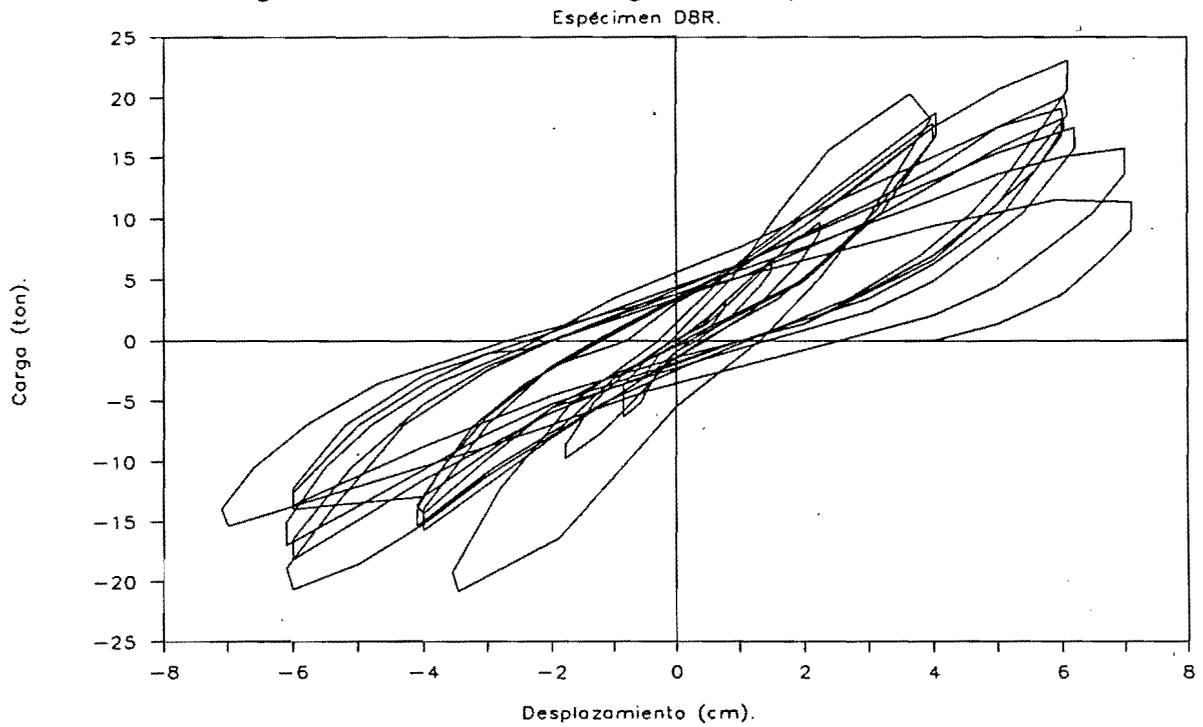


Fig.44. Micrómetro M1.

Espécimen D8.

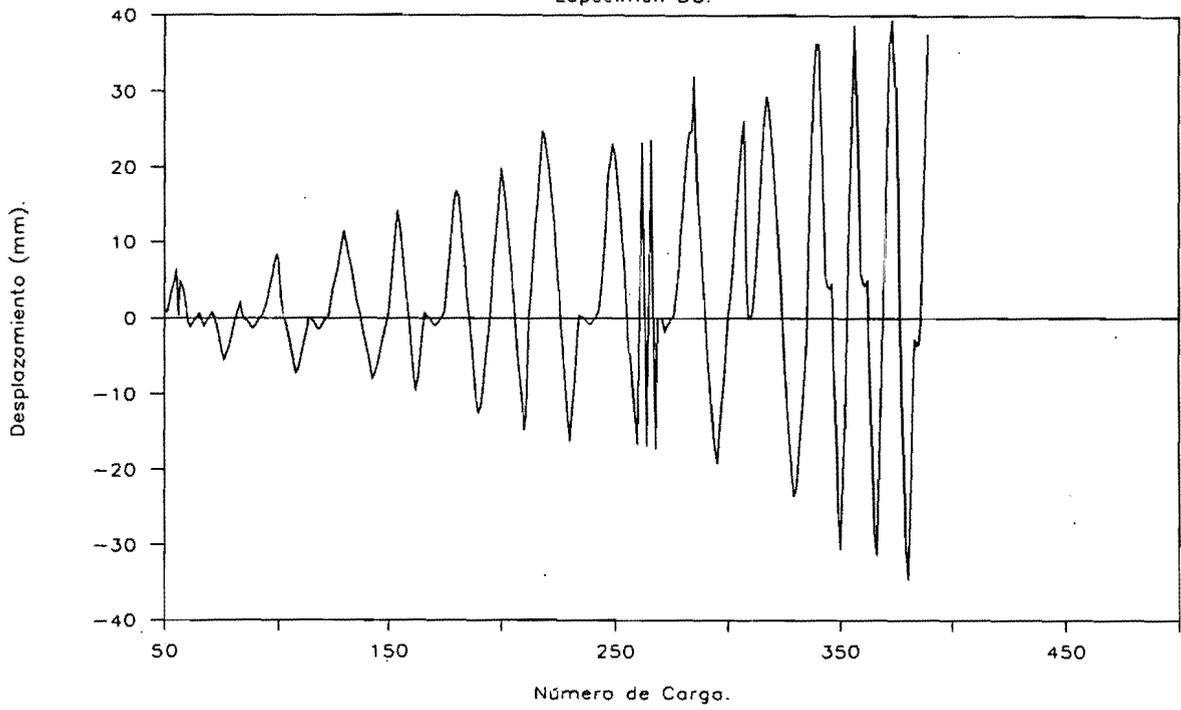


Fig.45. Micrómetro M1-021.

Espécimen D8R.

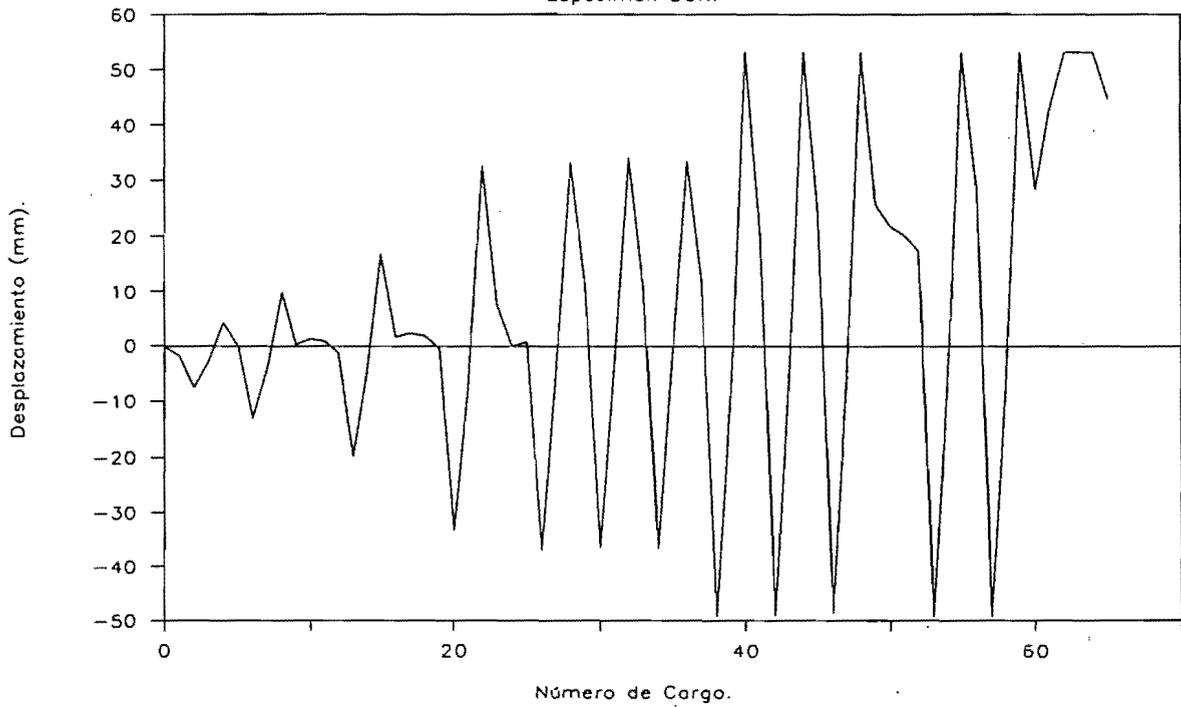


Fig.46. Micrómetro M2.

Espécimen DB.

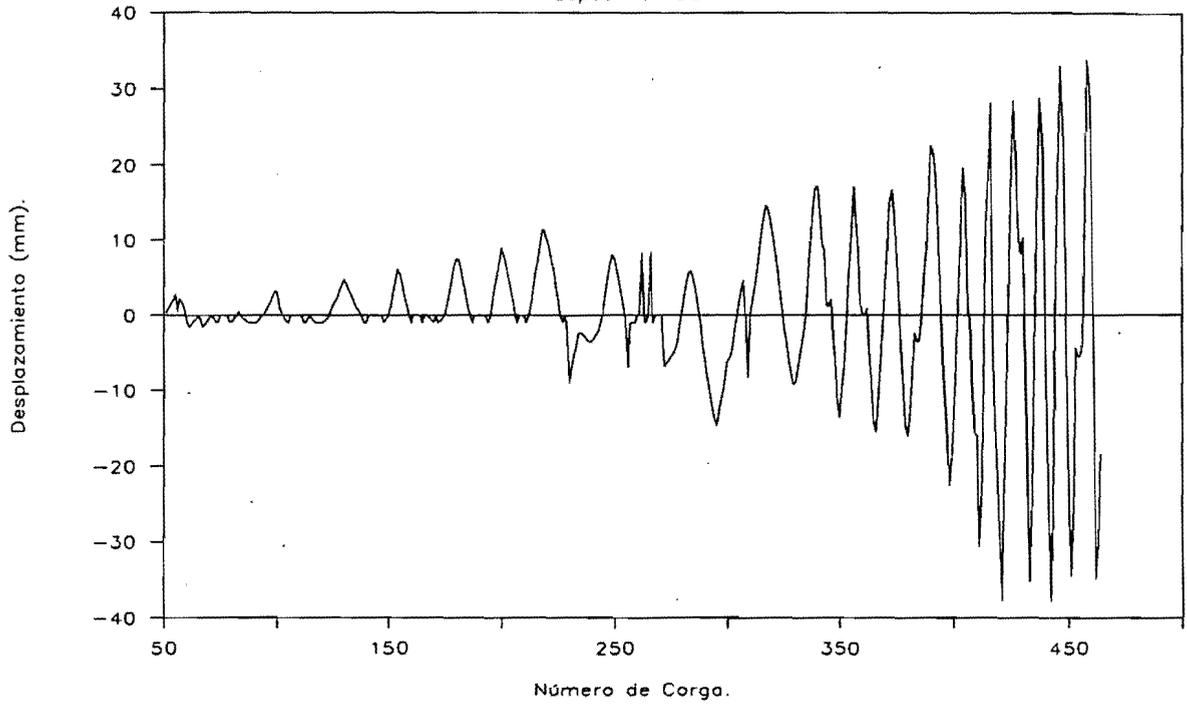


Fig.47. Micrómetro M2-022.

Espécimen DBR.

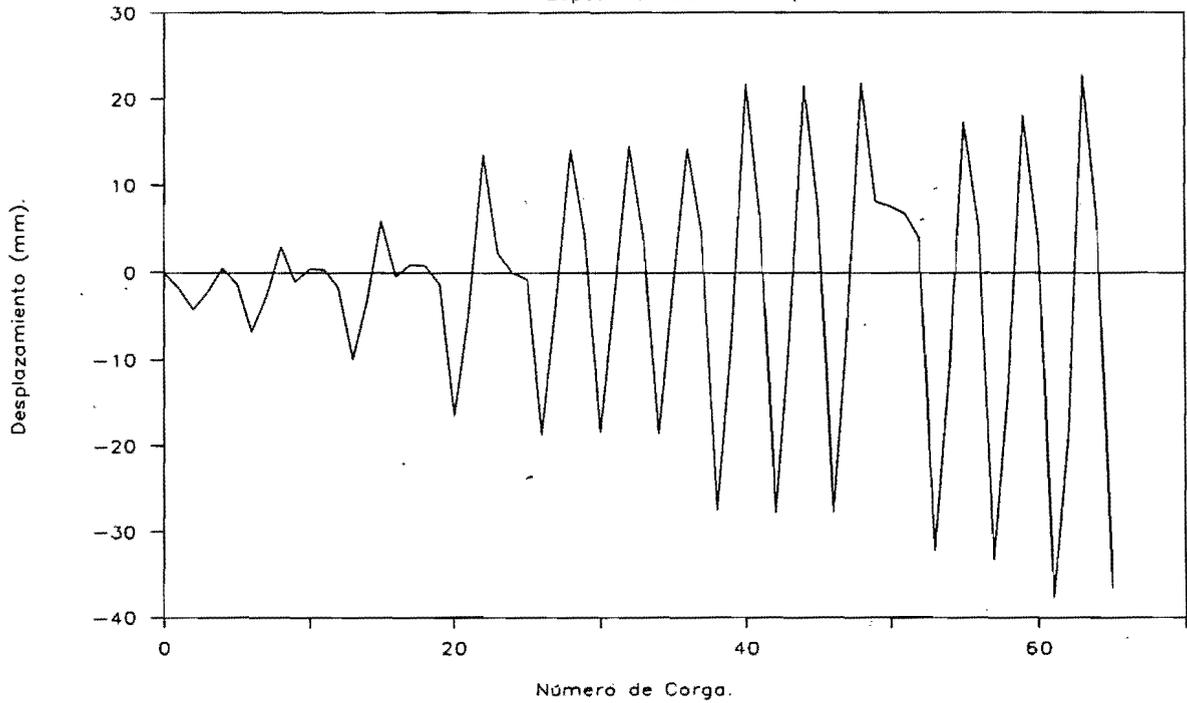


Fig.48. Micrómetro M3.

Espécimen DB.

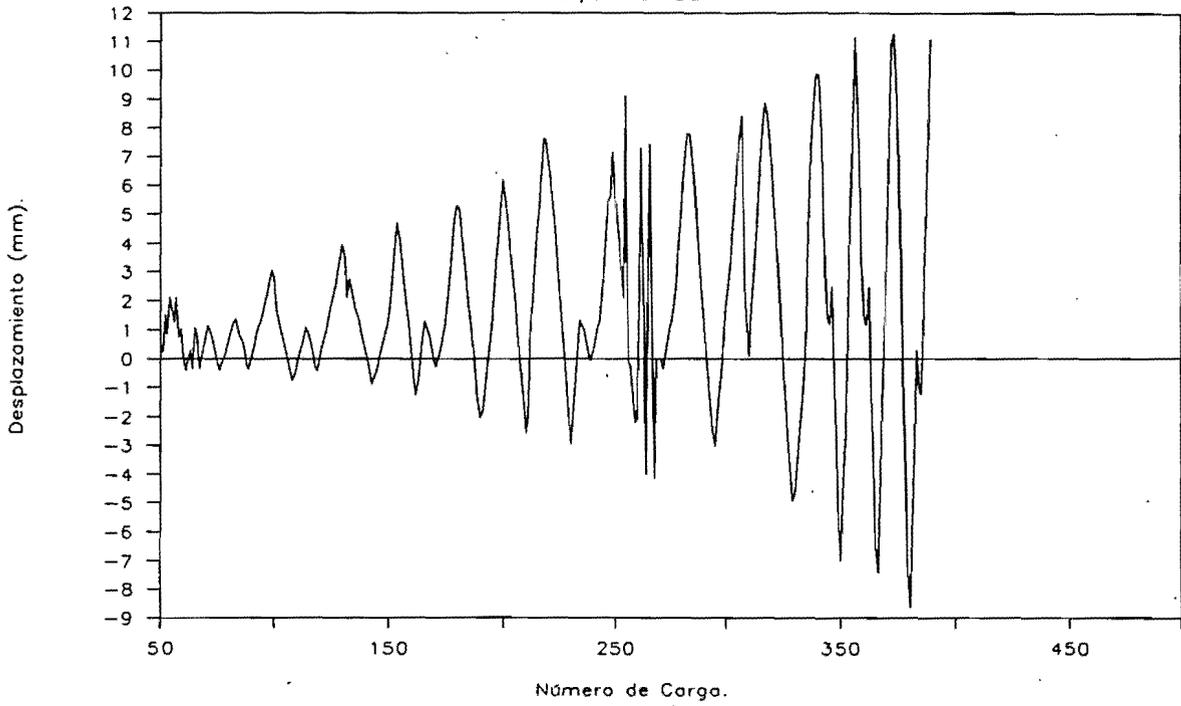


Fig.49. Micrómetro M3-023.

Espécimen DBR.

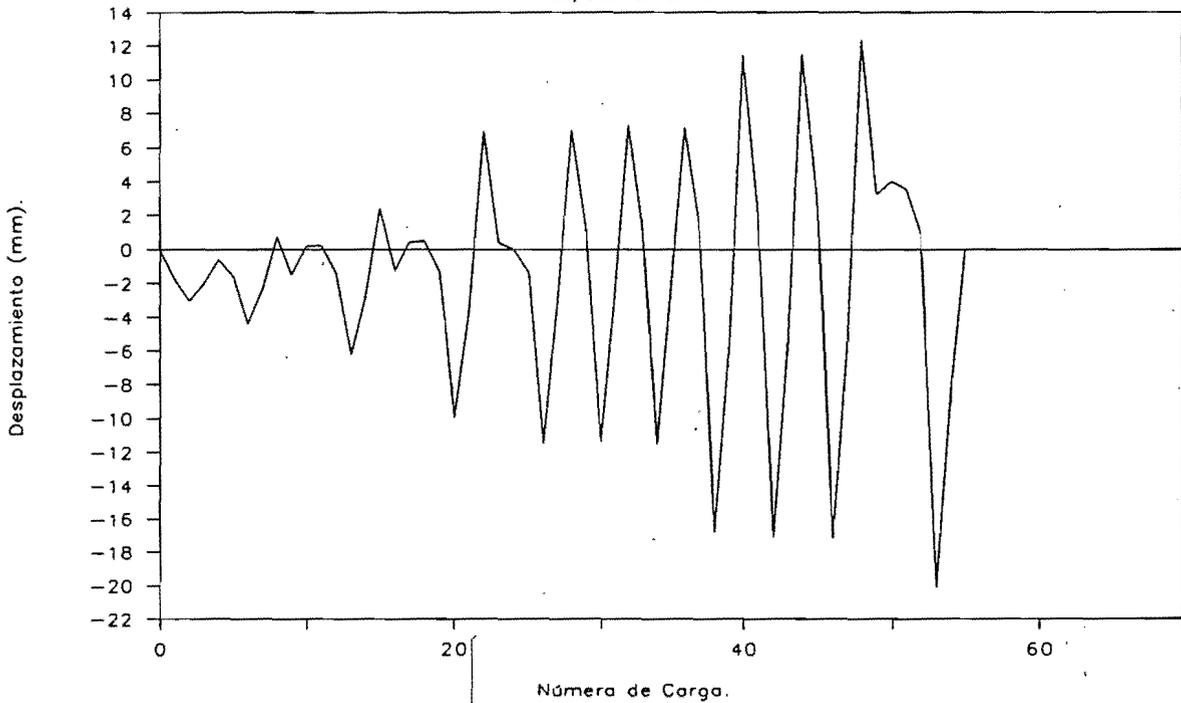


Fig.50. Micrómetro M4.  
Espécimen D8.

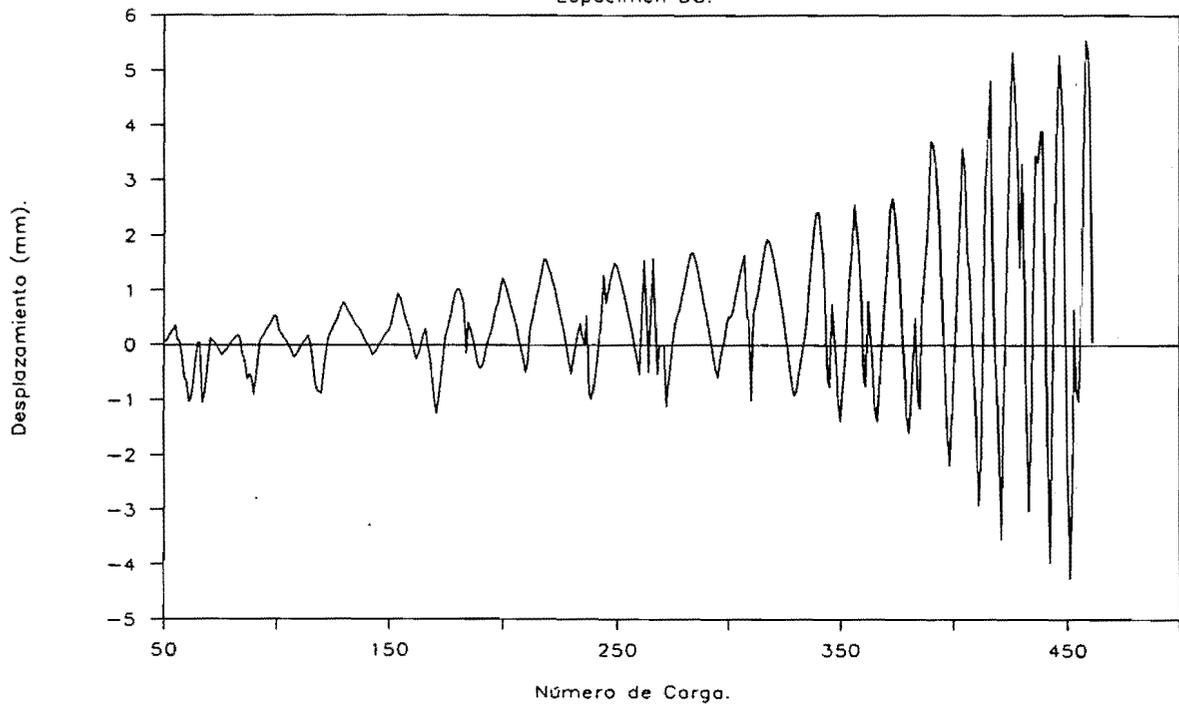


Fig.51. Micrómetro M4-027.  
Espécimen D8R.

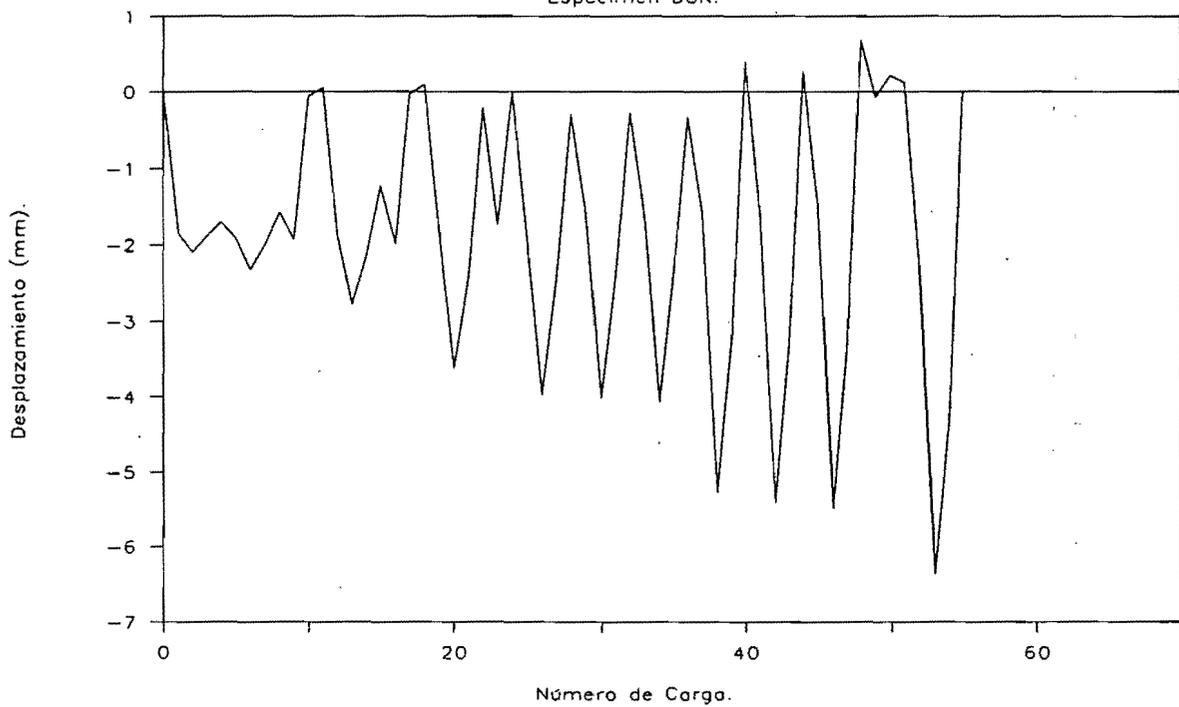


Fig.52. Micrómetro M6.

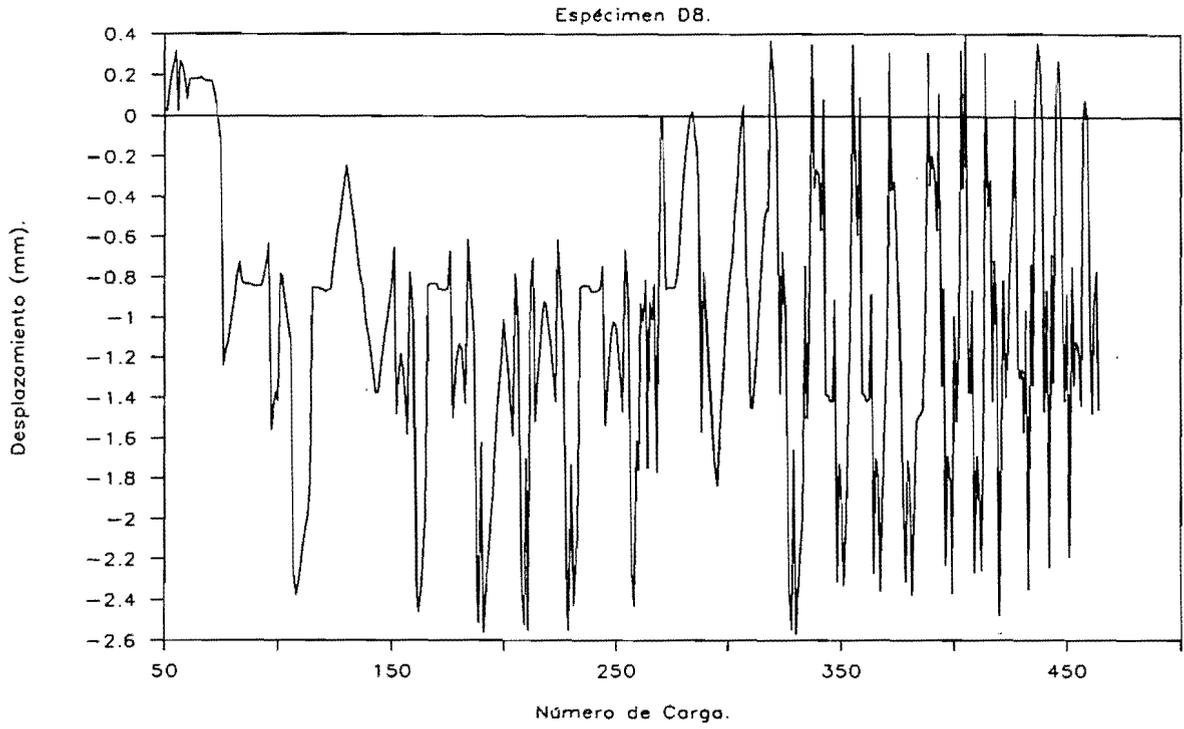


Fig.53. Micrómetro M6-024.

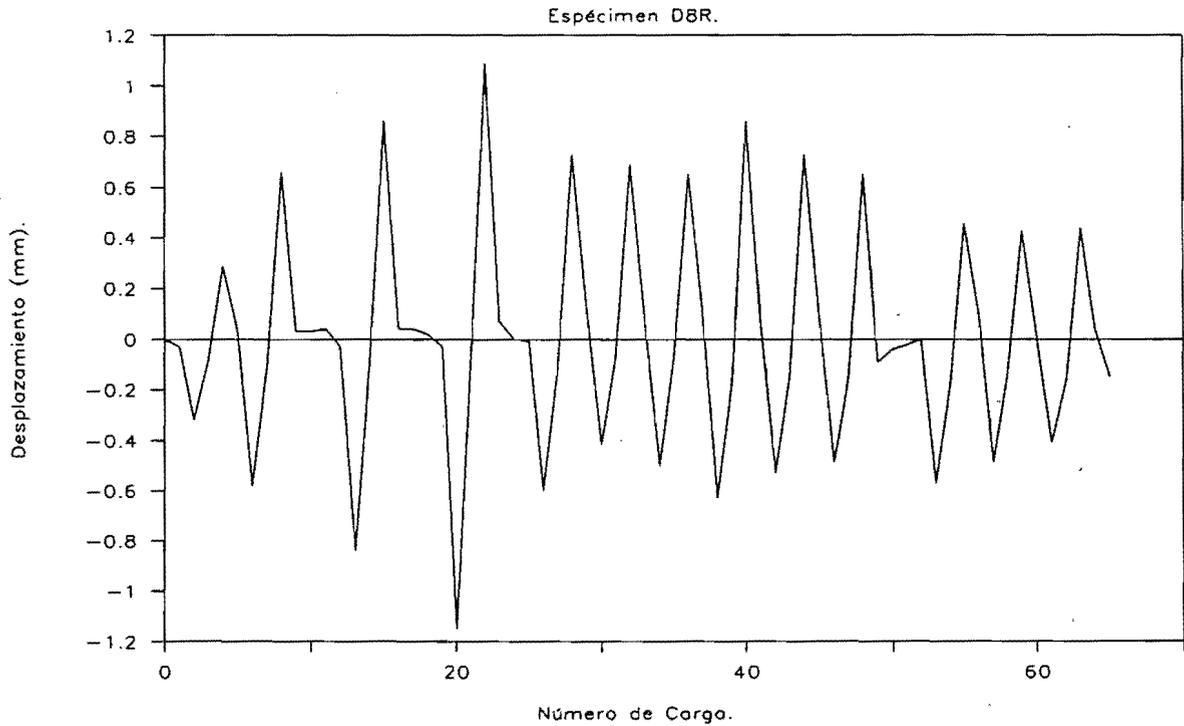


Fig.54. Micrómetro M7.

Espécimen D8.

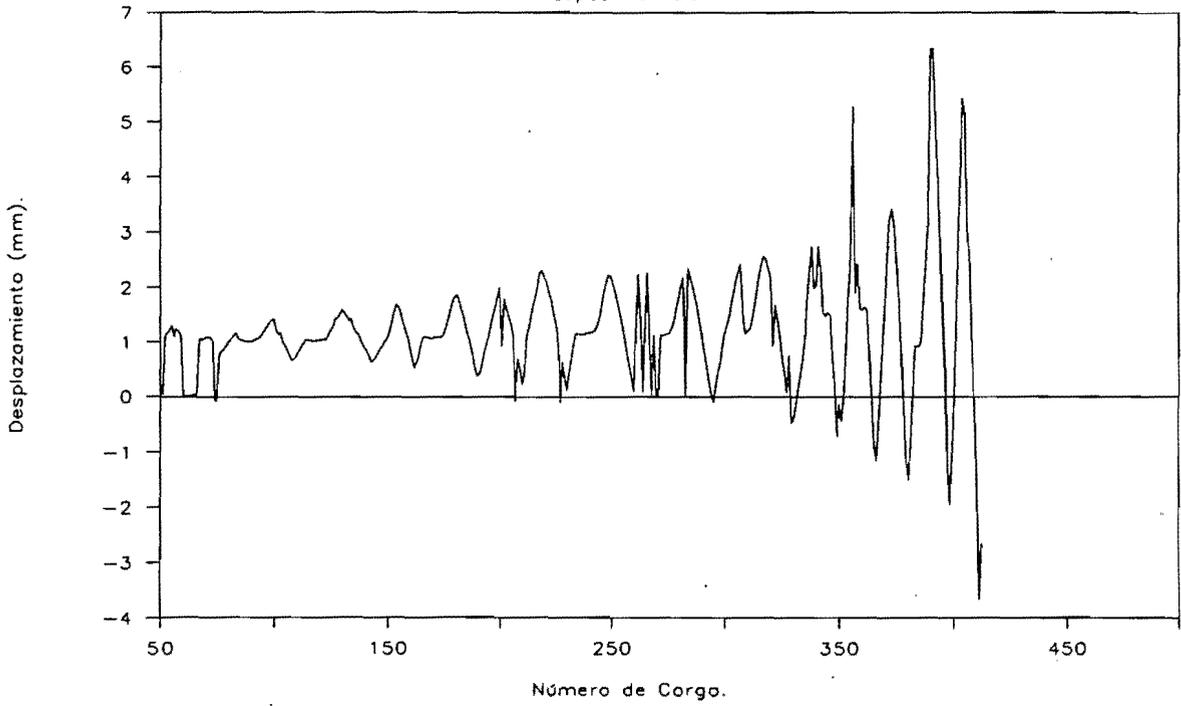


Fig.55. Micrómetro M7-026.

Espécimen DBR.

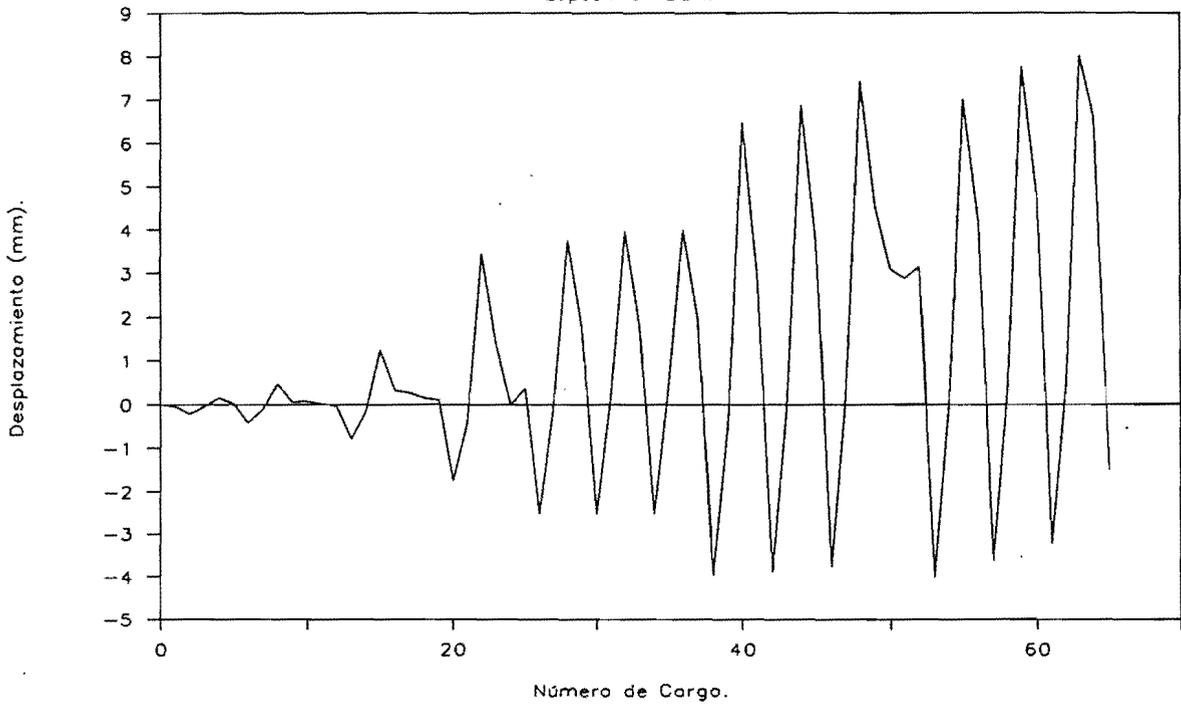


Fig.56. Micrómetro M8.

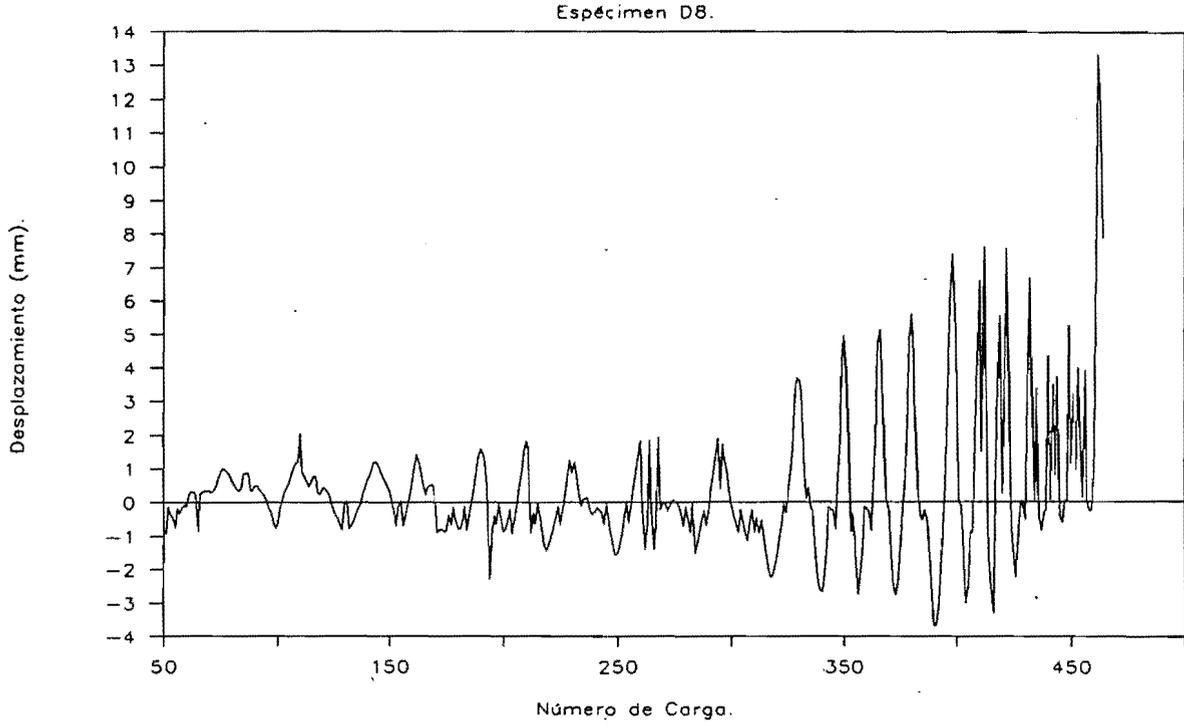


Fig.57. Micrómetro M8-025.

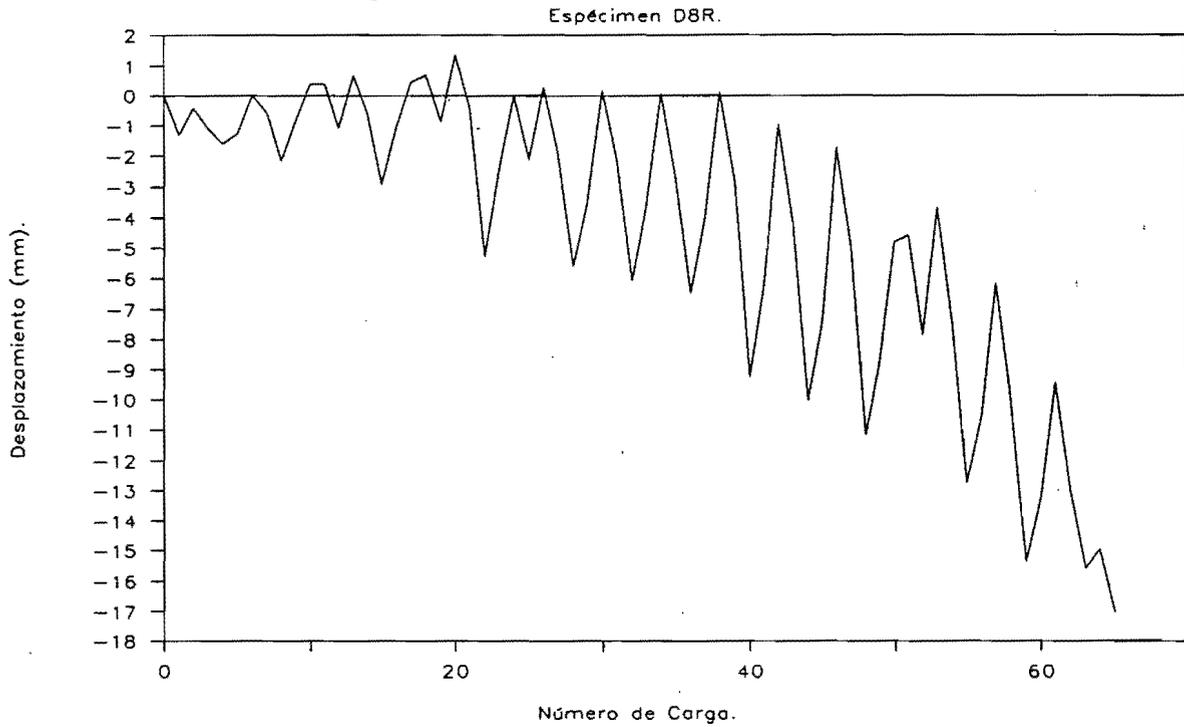


Fig.58. Micrómetro M10.

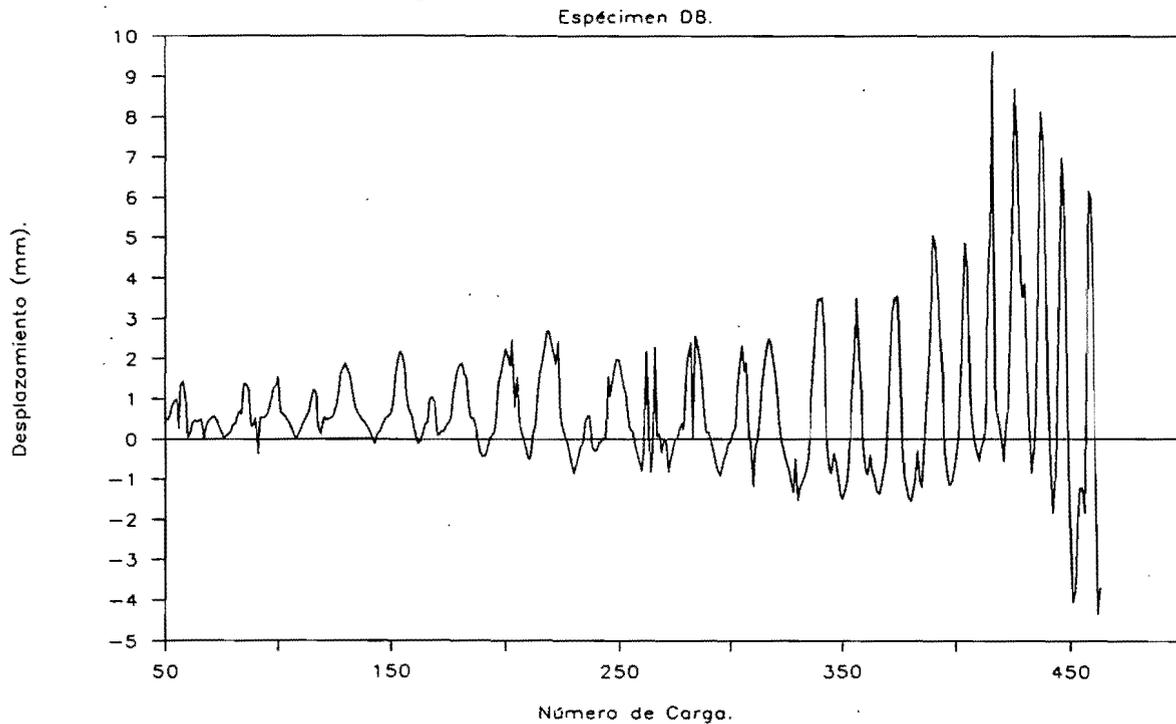


Fig.59. Micrómetro M10-031.

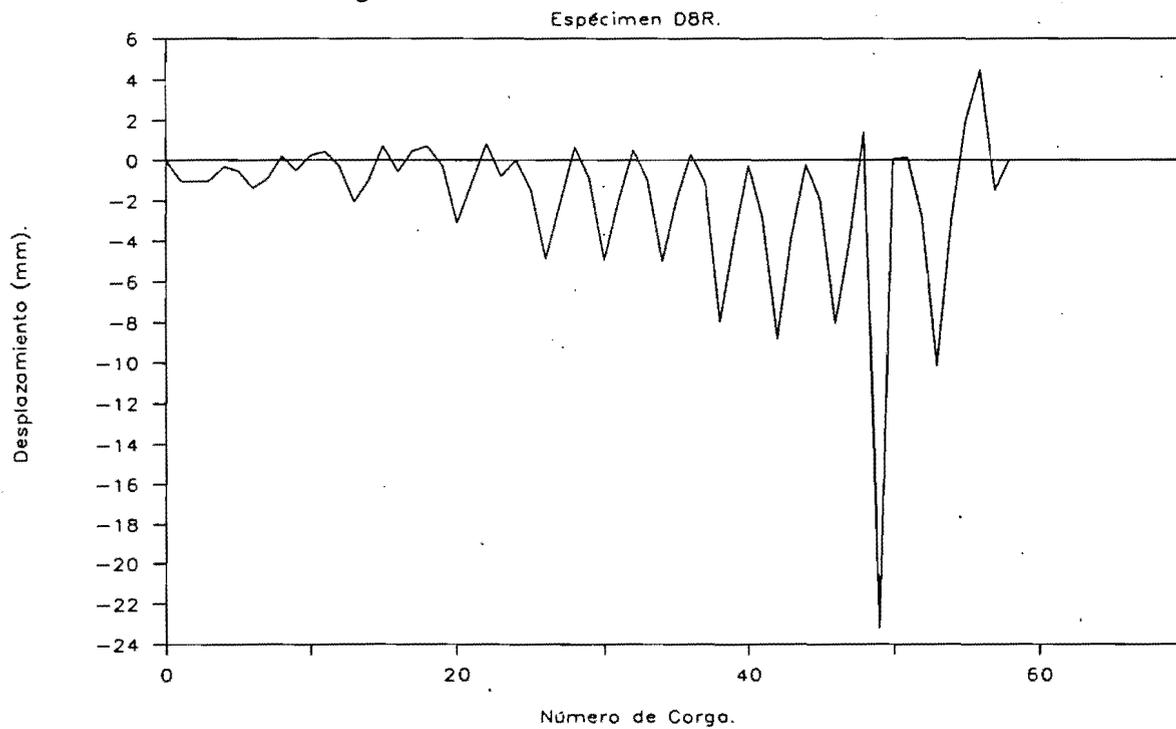


Fig.60. Micrómetro M11.

Espécimen D8.

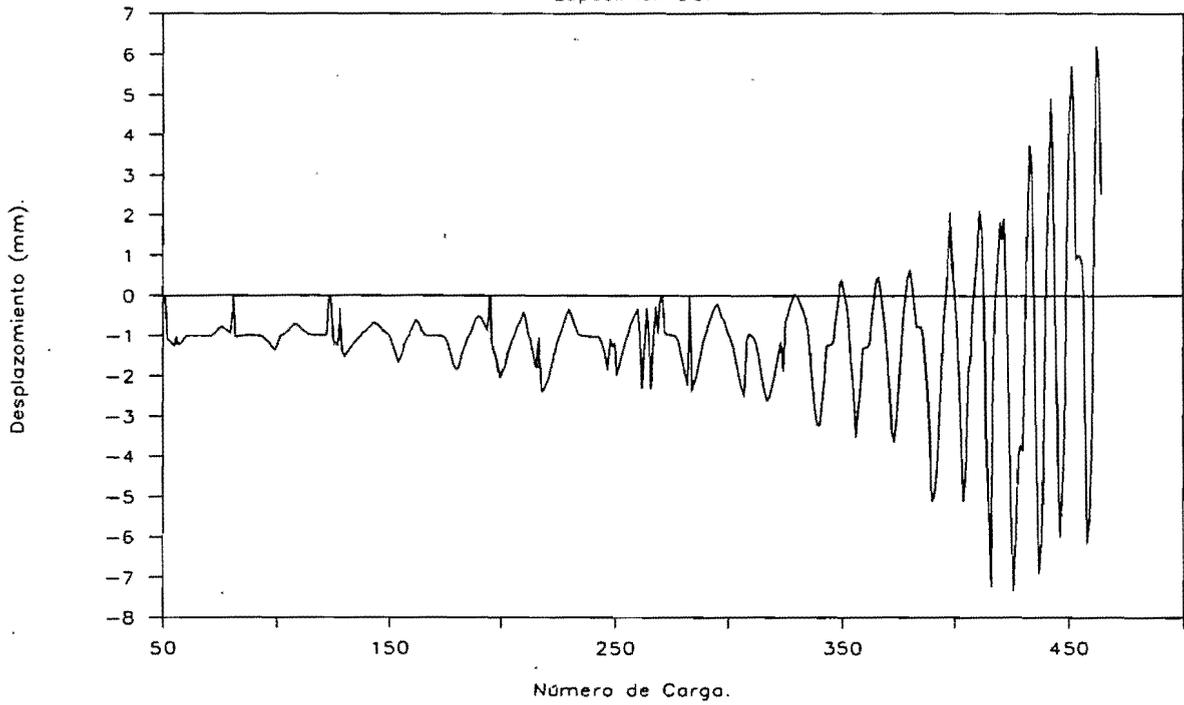


Fig.61. Micrómetro M11-030.

Espécimen D8R.

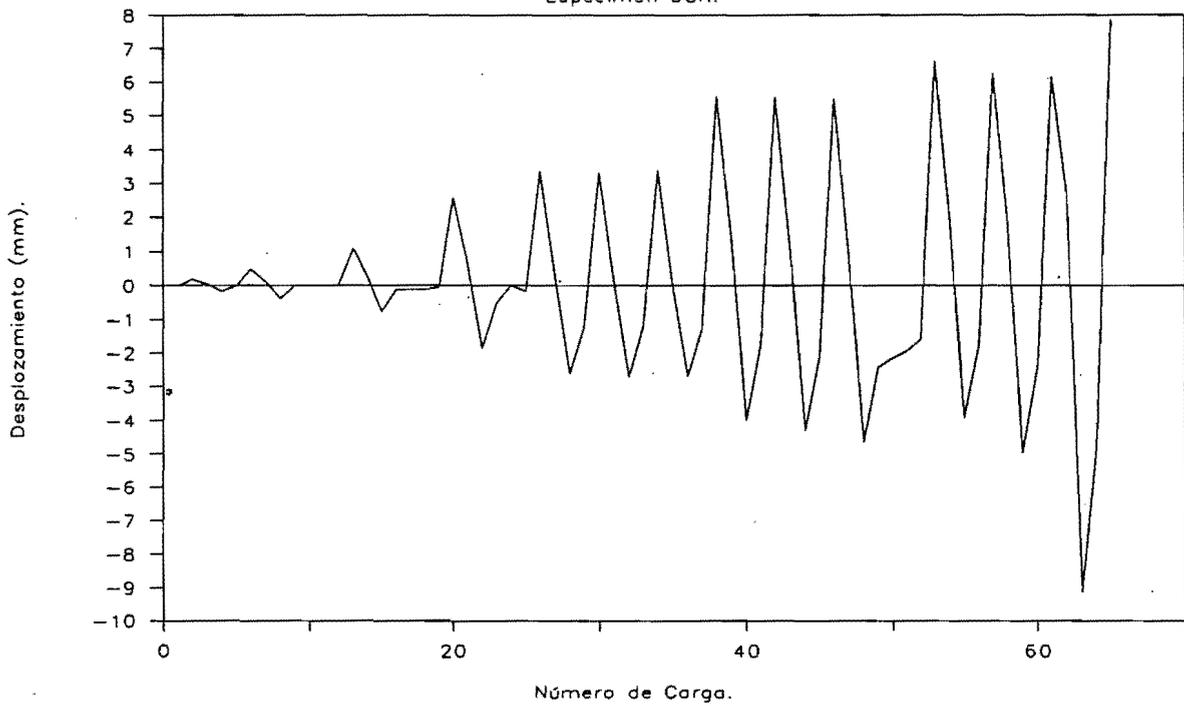


Fig.62. Micrómetro M12.

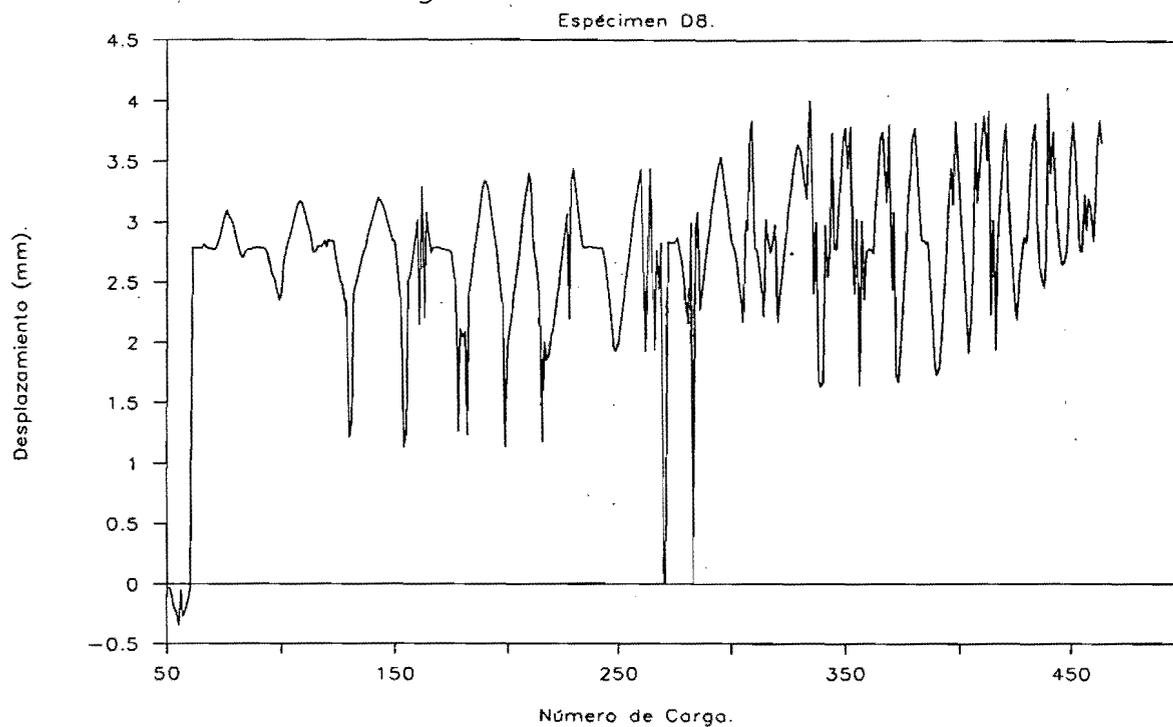


Fig.63. Micrómetro M12-029.

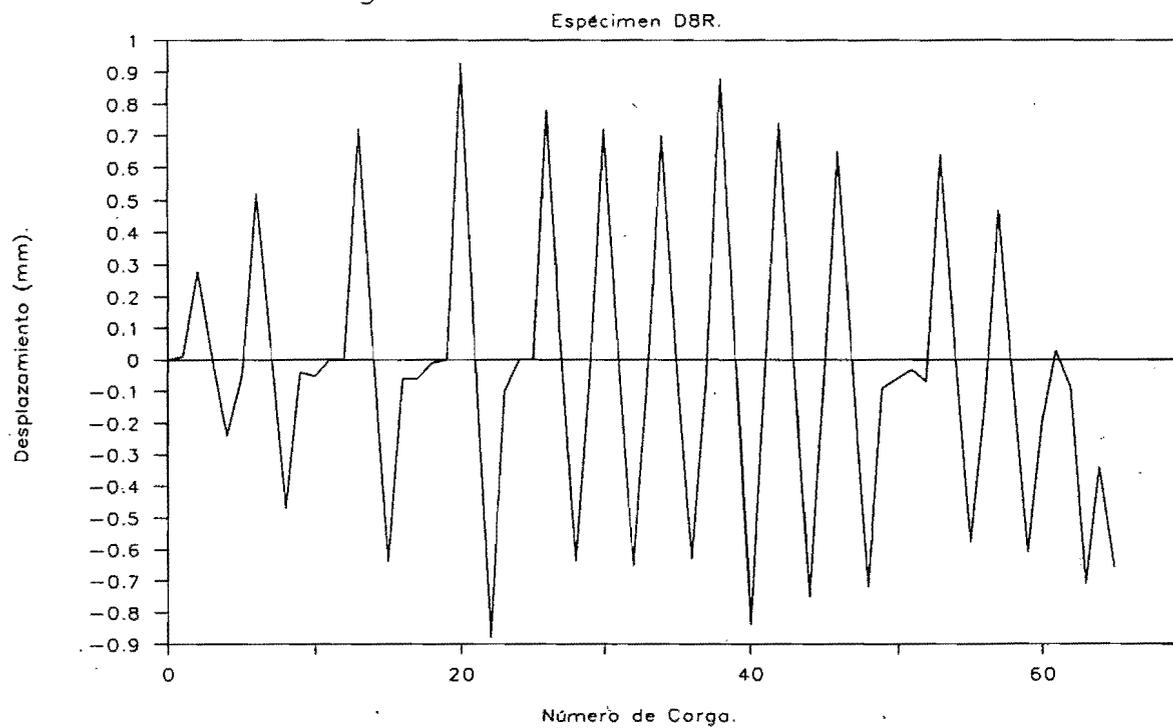


Fig.64. Micrómetro M15.

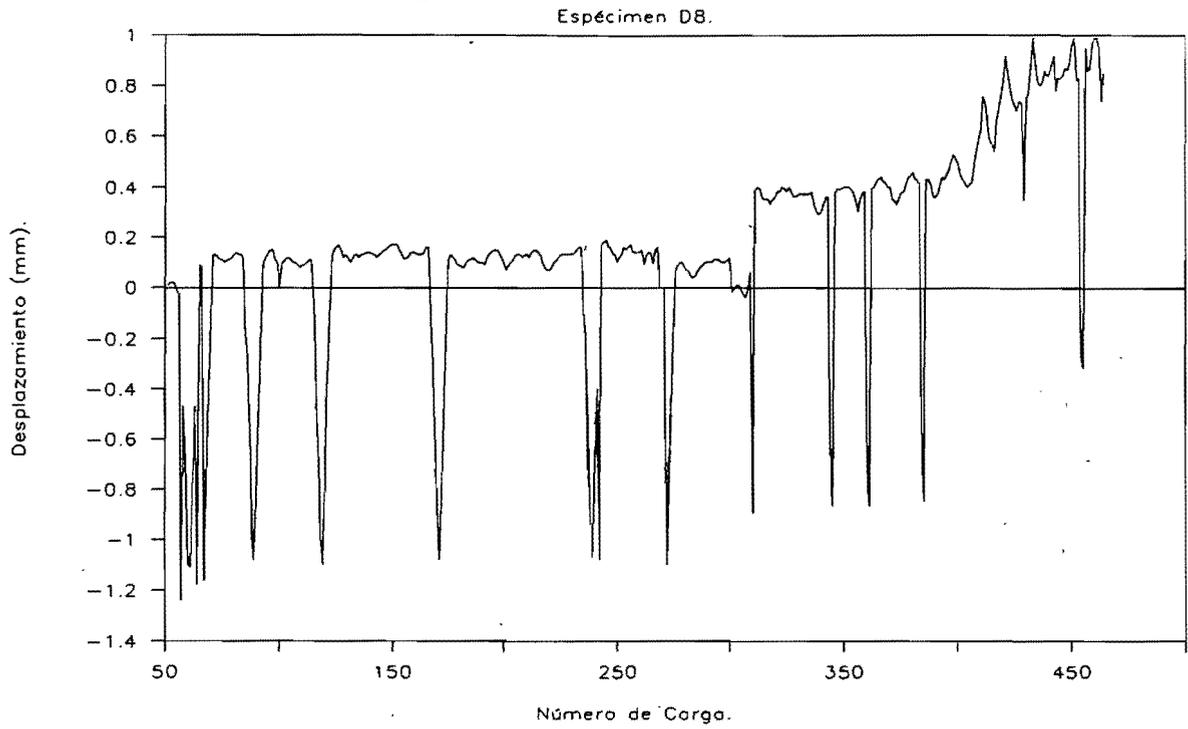


Fig.65. Micrómetro M15-028.

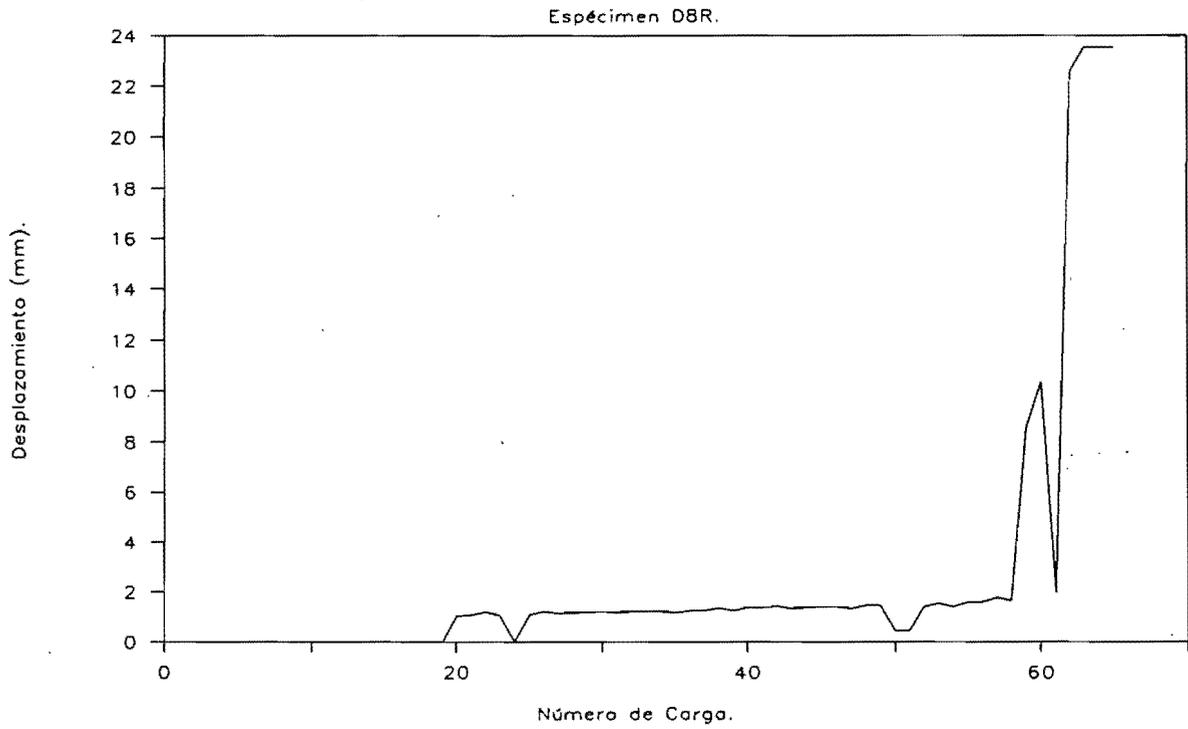


Fig.66. Micrómetro M16.

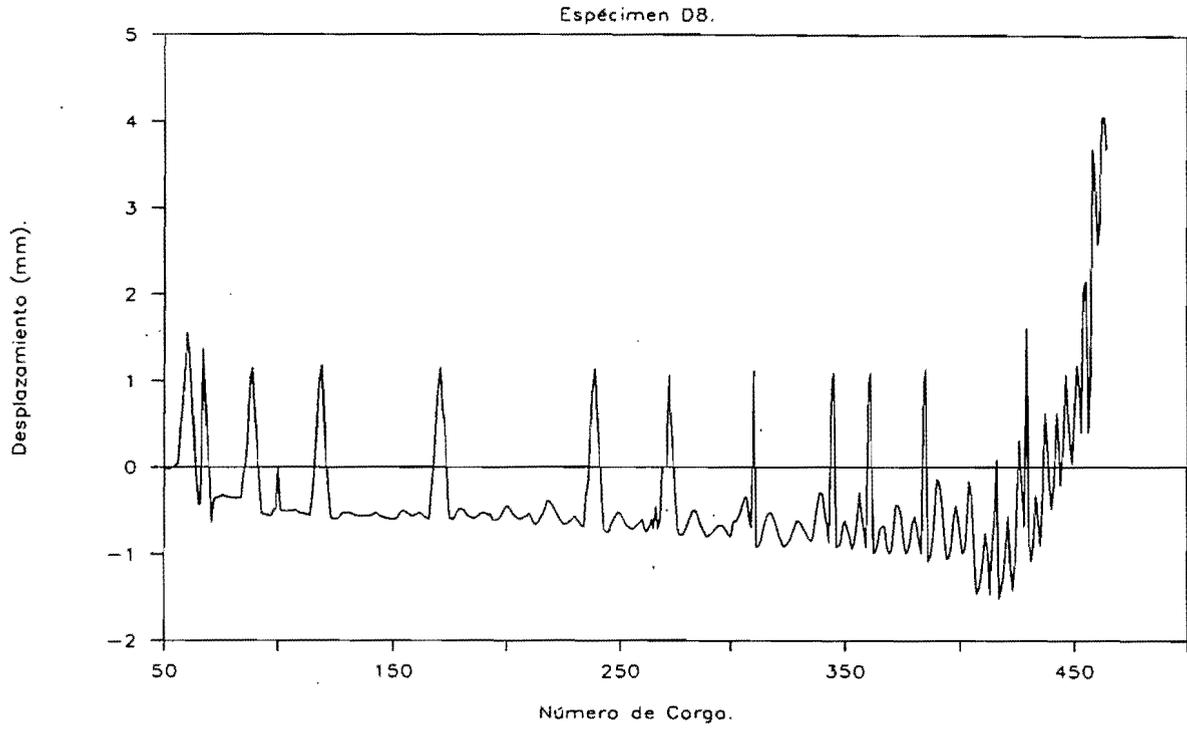
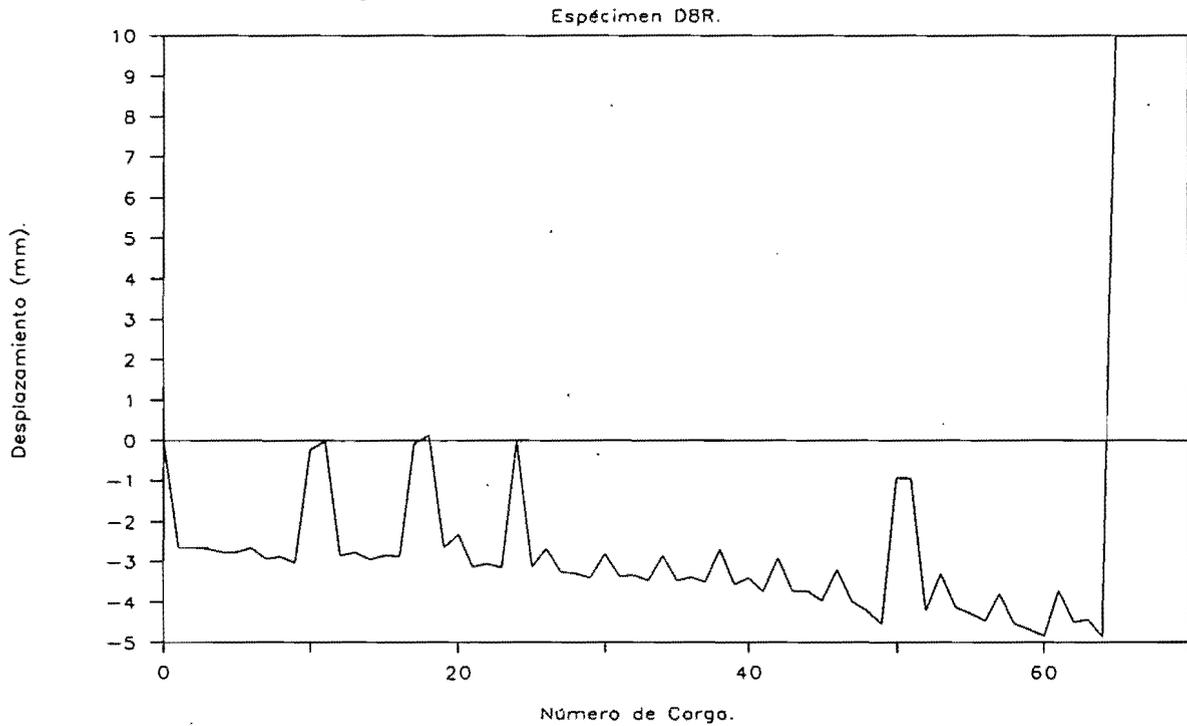


Fig.67. Micrómetro M16-032.



**FOTOGRAFÍAS.**



DEPFI

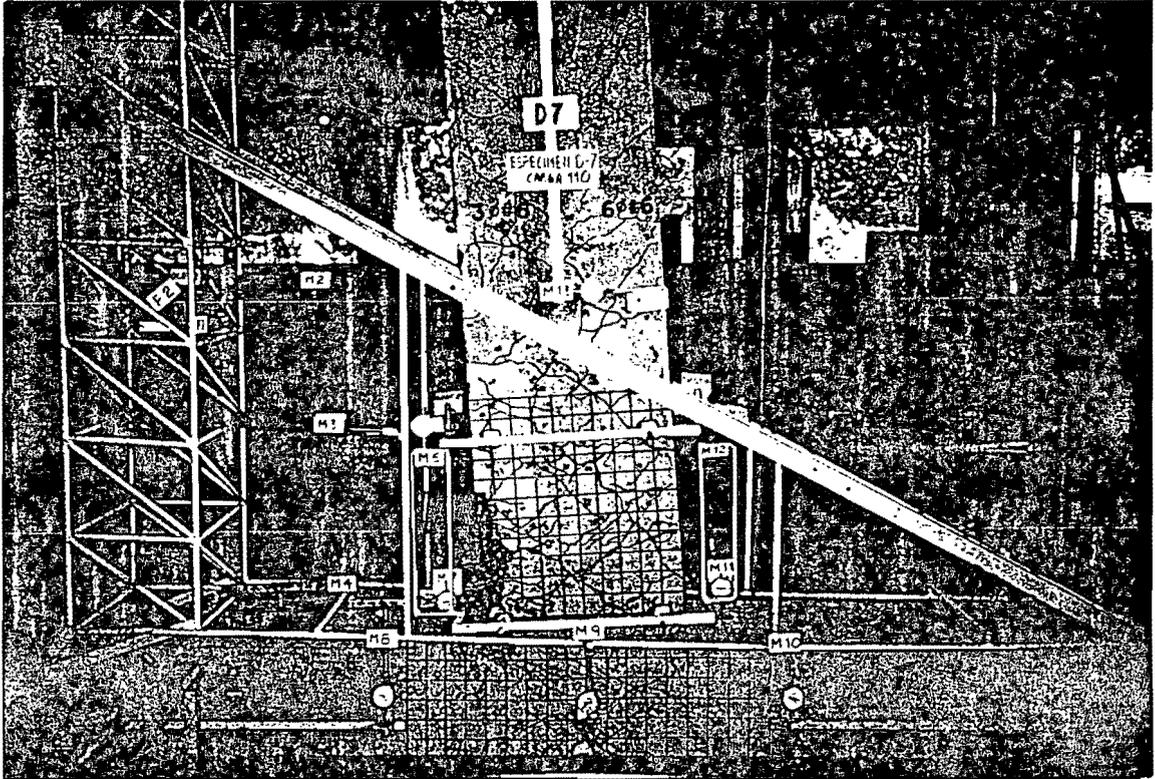


Foto.1. Falla del espécimen D7.

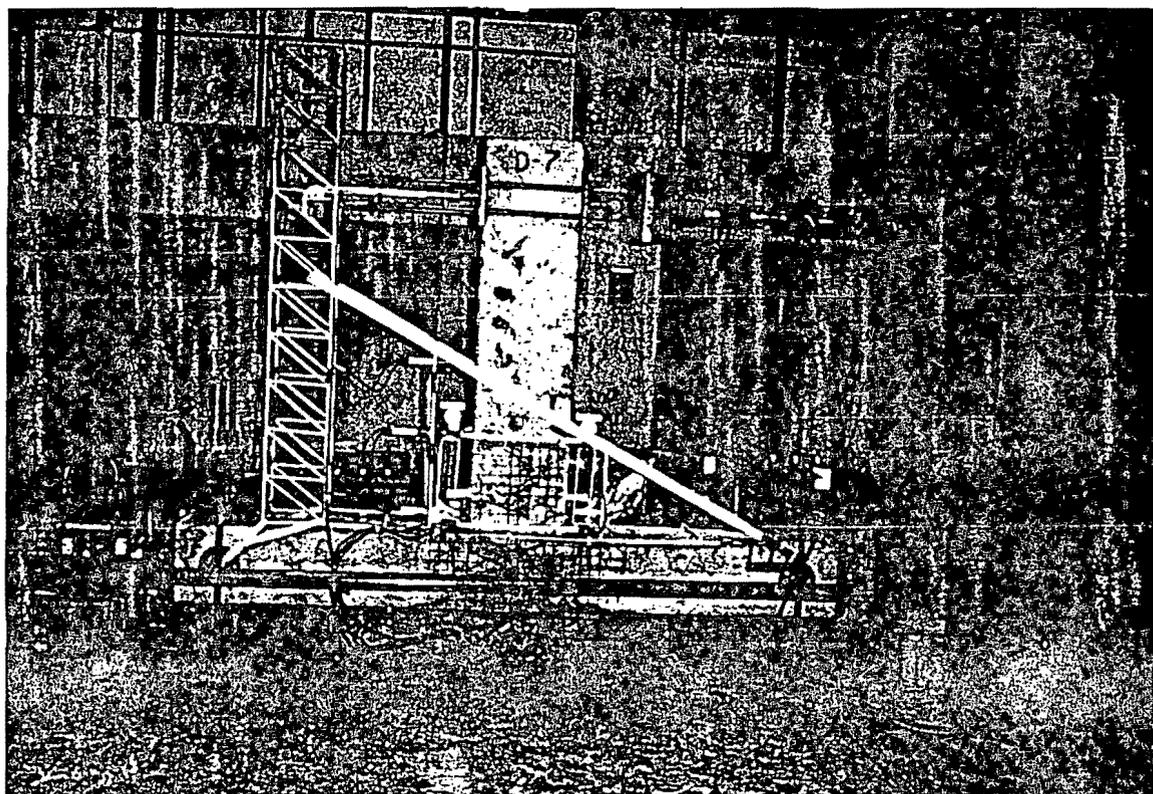


Foto.2. Posición de ensaye en las intalaciones  
del CENAPRED.

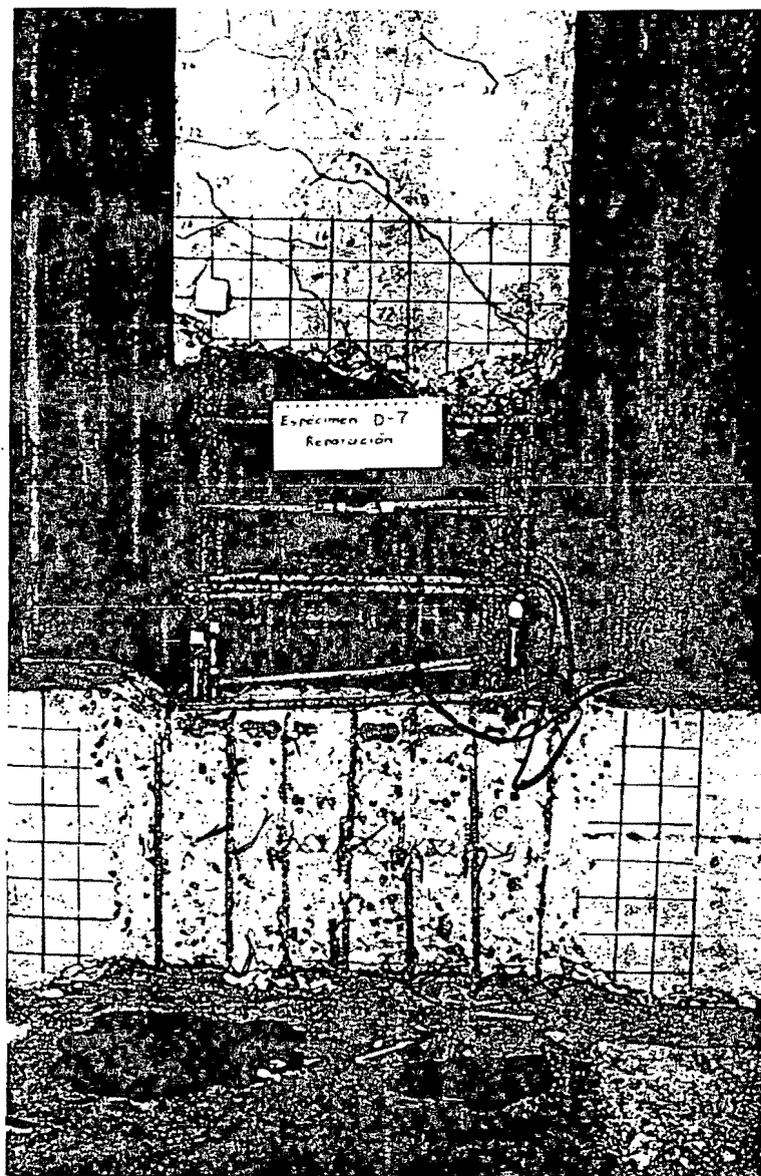


Foto.3. Reparación del espécimen D7.

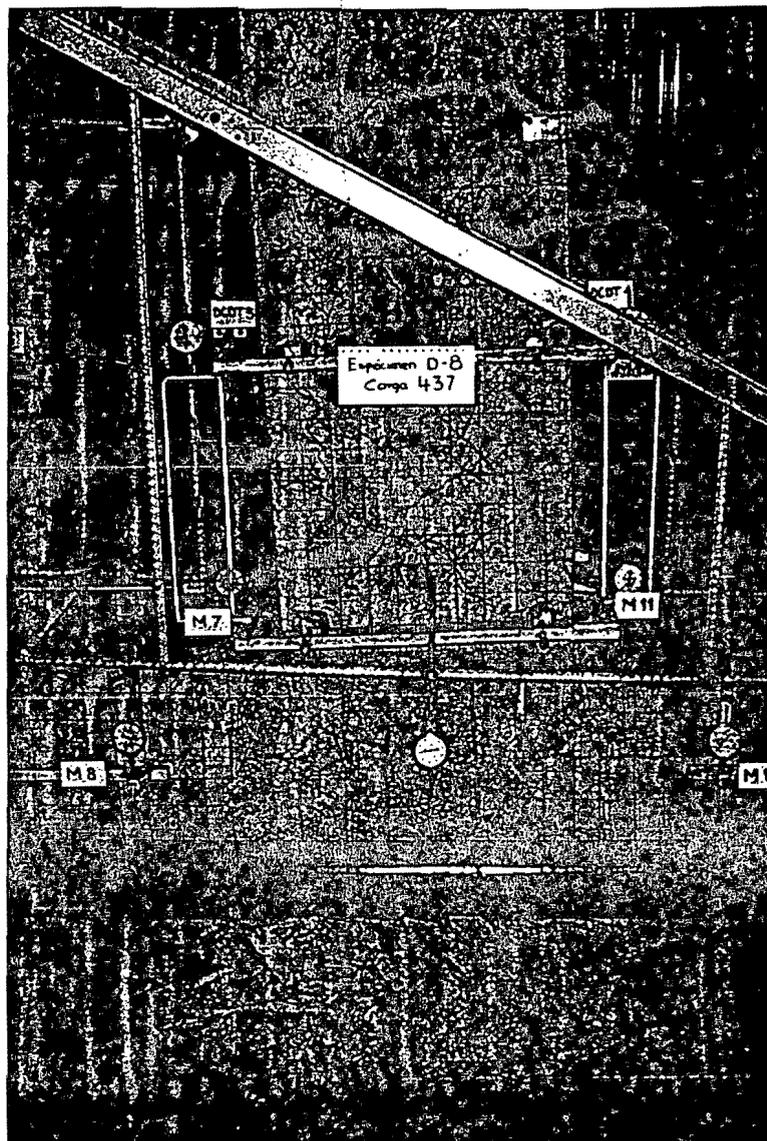


Foto.4. Agrietamiento en el espécimen D8.

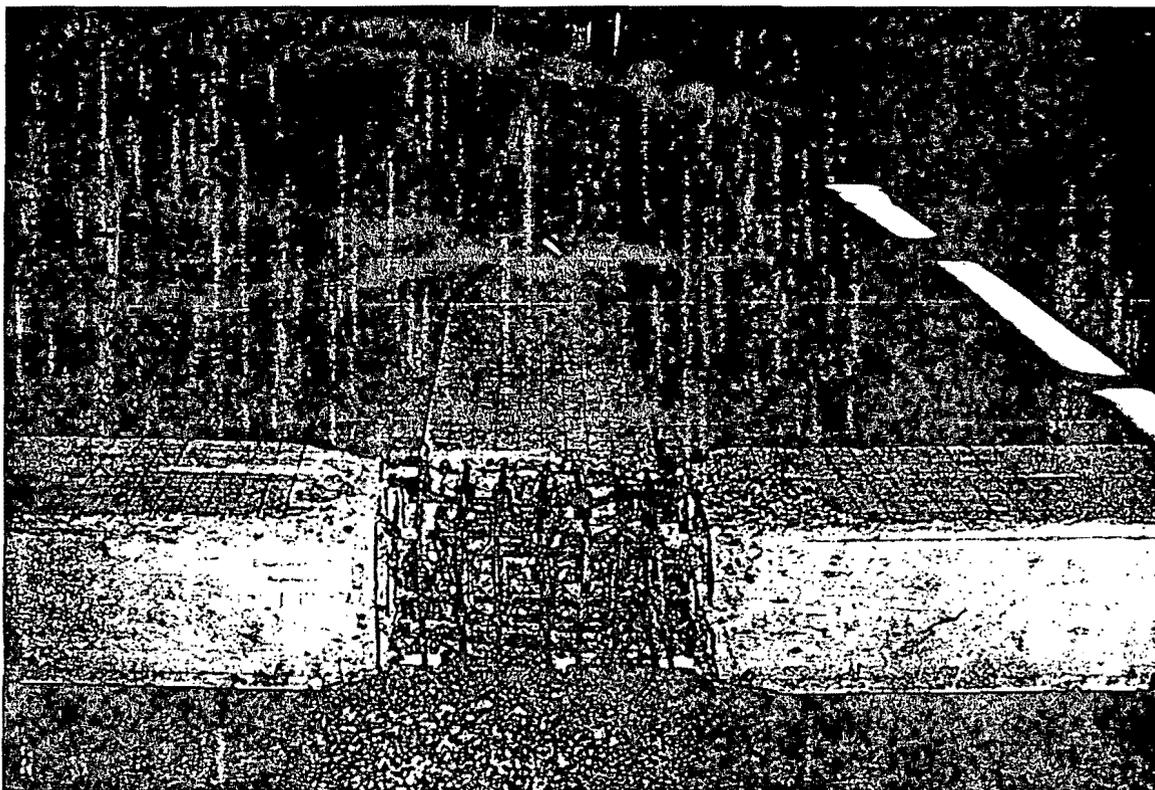


Foto.5. Reparación del espécimen D8.

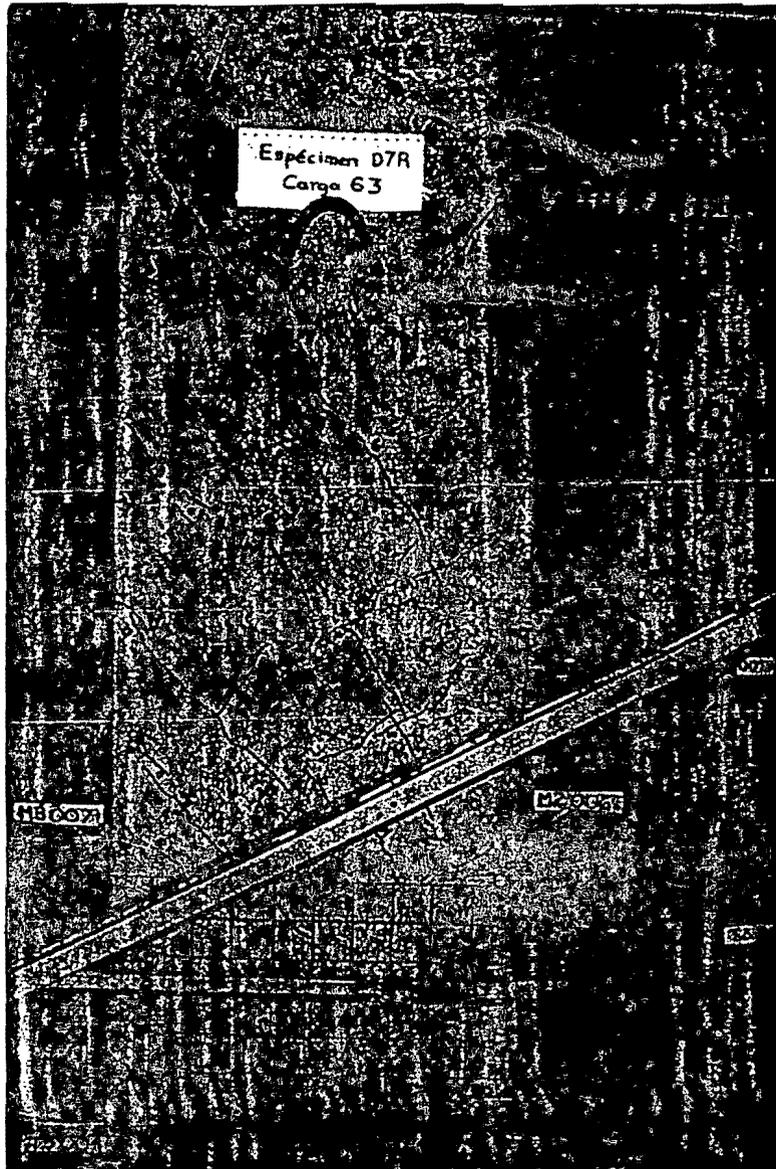


Foto.6. Agrietamiento en la viga del  
especimen D7R.

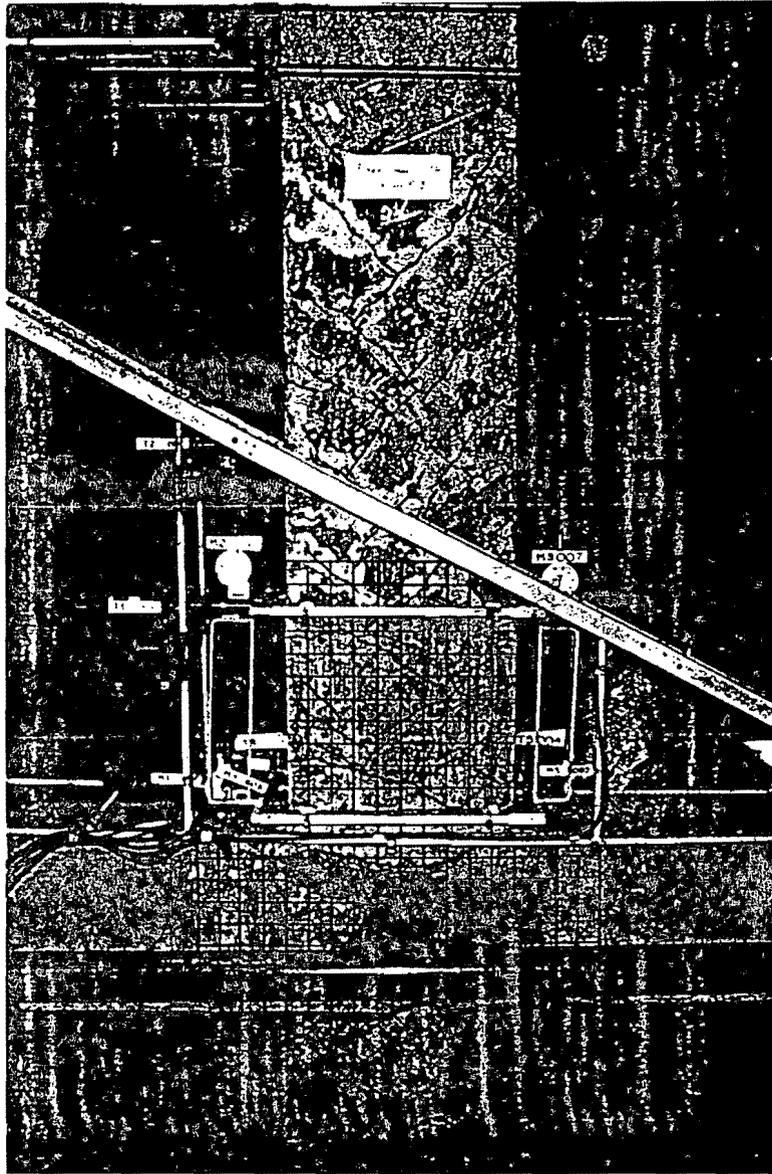


Foto.7. Falla del espécimen D7R.

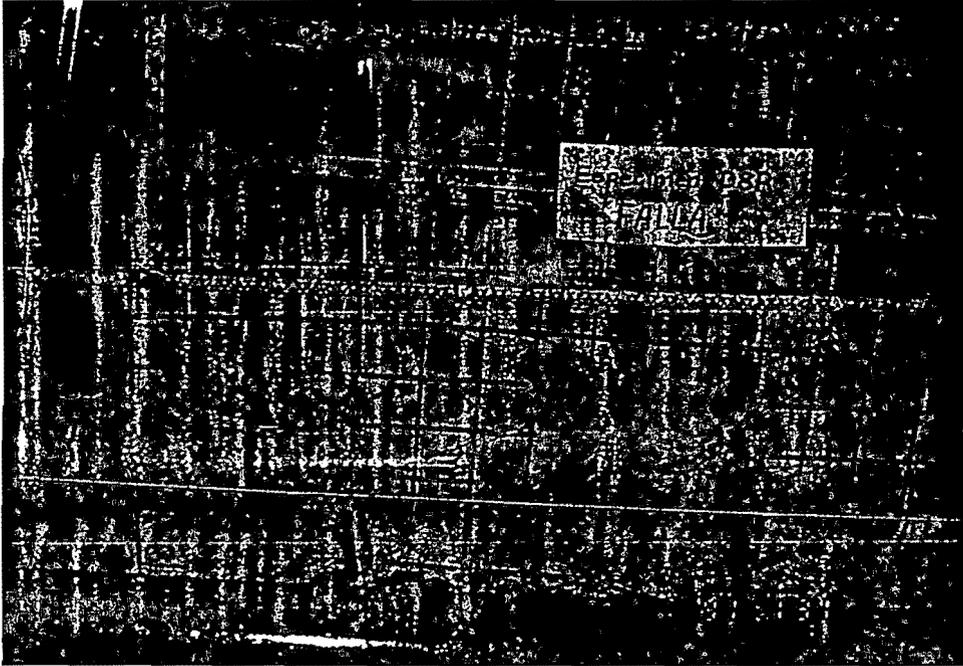


Foto.8. Falla del espécimen D8R.

## AGRADECIMIENTOS.

Mi profundo agradecimiento al Dr. Roberto Meli por su apoyo y asesoría prestados para la realización de este trabajo.

Los ensayos originales se desarrollaron en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, gracias al trabajo de Julio Baeza, a quien agradezco su contribución al desarrollo de muchas de las ideas expresadas en este trabajo.

Los ensayos de los especímenes reparados se realizaron en el laboratorio de ensayos sísmicos del CENAPRED, gracias a la participación de Lorenzo Sánchez, Pablo Olmos, Juan Manuel Velasco y Edgardo García.

Agradezco a Sergio Alcocer el haberme facilitado la obtención de referencias bibliográficas para consulta y por sus sugerencias respecto al tema.