

130 2g



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

COMPORTAMIENTO DE VARILLAS DE
REFUERZO ANCLADAS MEDIANTE RESINAS
EPOXICAS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
LEOBARDO SANCHEZ CRUZ



MEXICO, D. F.

TESIS CON
FALLA PE CRIGEN

1990



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

CONTENIDO

CAPITULO I. INTRODUCCION

Pág.

1 INTRODUCCION.....	1
---------------------	---

CAPITULO II. MODELOS REOLOGICOS PARA EL ESTUDIO DEL CONCRETO

2.1 ELEMENTOS BASICOS USADOS EN REOLOGIA.....	3
2.1.1 Cuerpo elástico.....	3
2.1.2 Cuerpo viscoso.....	4
2.2 CUERPOS VISCOELASTICOS.....	4
2.2.1 Modelo de Kelvin.....	5
2.2.2 Modelo de Maxwell.....	5
2.2.3 Modelo de Burgers.....	6
2.3 EXPERIMENTO DE FLUENCIA Y RELAJACION DE ESFUERZOS.....	6
2.3.1 Fluencia y relajación de esfuerzos en el modelo de Kelvin... 7	
2.3.2 Fluencia y relajación de esfuerzos en el modelo de Maxwell.. 9	
2.3.3 Fluencia y relajación de esfuerzos en el modelo de Burgers.. 10	
2.4 RESPUESTA DE FLUENCIA.....	11
2.5 MODELOS REOLOGICOS PARA EL CONCRETO.....	12
2.5.1 Modelo de Burgers.....	13
2.5.2 Modelo de Hansen.....	13
2.5.3 Modelo de Flügge.....	14
2.5.4 Curva característica de la fluencia en el concreto.....	14
2.6 CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS POLIMEROS.....	15
2.6.1 Fenómenos viscoelásticos en polímeros.....	16

CAPITULO III. PROGRAMA DE ENSAYES

Pág.

3.1	ESPECIMENES.....	18
3.2	MATERIALES.....	18
	3.2.1 Concreto.....	18
	3.2.2 Acero utilizado en el anclaje.....	19
	3.2.3 Resinas epóxicas.....	19
3.3	CONTROL DE CALIDAD SOBRE LOS PRODUCTOS EPOXICOS.....	20
	3.3.1 Prueba de adherencia.....	20
	3.3.2 Prueba de tensión.....	21
	3.3.3 Prueba de compresión.....	21
3.4	PROCEDIMIENTO DE LIMPIEZA.....	21
3.5	DISPOSITIVO DE PRUEBA.....	21

CAPITULO IV. CARGAS ALTERNADAS

4.1	CARGA CICLICA.....	23
	4.1.1 Anclaje con producto tipo 1.....	23
	4.1.2 Anclaje con producto tipo 2.....	24
	4.1.3 Anclaje con producto tipo 3.....	25
4.2	CARGAS ALTERNADAS.....	25
	4.2.1 Anclaje con producto tipo 1.....	26
	4.2.2 Anclaje con producto tipo 2.....	26
	4.2.3 Anclaje con producto tipo 3.....	27

CAPITULO V. CARGA SOSTENIDA

5.1	ANCLAJE CON PRODUCTO TIPO 1.....	28
5.2	ANCLAJE CON PRODUCTO TIPO 2.....	29
5.3	ANCLAJE CON PRODUCTO TIPO 3.....	28

CAPITULO VI. DISCUSION DE RESULTADOS

6.1 CARGAS ALTERNADAS.....	31
6.2 CARGA SOSTENIDA.....	32
6.2.1 Primera etapa.....	32
6.2.2 Segunda etapa.....	32

CAPITULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES.....	34
7.2 RECOMENDACIONES.....	35

BIBLIOGRAFIA.....	37
-------------------	----

TABLAS Y GRAFICAS.....	39
------------------------	----

CAPITULO I

INTRODUCCION

Desde que el Doctor Pierre Castan en 1936 obtuvo la primera patente conocida sobre resinas epóxicas, estas han tenido una gran variedad de aplicaciones en el campo de la ingeniería civil. Debido a la virtud que tienen de adherirse perfectamente al concreto bajo "cualquier" condición, se ha pensado en el anclaje de varillas mediante productos epóxicos, como una manera alternativa en la reparación de elementos estructurales de concreto reforzado.

A pesar de que actualmente existe una tendencia cada vez más generalizada de utilizar resinas epóxicas en elementos estructurales, se cuenta con muy poca información sobre la respuesta mecánica de estos productos cuando se encuentran sometidos a distintas condiciones de carga. Es por lo anterior que en la reparación y el refuerzo de edificios se presentan incertidumbres, ya que no existen en los reglamentos actuales recomendaciones de diseño que permitan prever la respuesta estructural después de agregar elementos de refuerzo.

Para contribuir a reducir las incertidumbres que se tienen con los productos epóxicos el objetivo de este trabajo es el de presentar información experimental y explicar el comportamiento de varillas ancladas con resinas epóxicas en el concreto, cuando sobre ellas actúan

solicitaciones tales como: carga estática, carga ciclica y carga sostenida, para ello este trabajo se ha desarrollado de la siguiente manera:

En el capítulo II se revisan los conceptos fundamentales de la viscoelásticidad, se describen algunos modelos para el concreto propuestos por diferentes investigadores y se presenta un breve resumen de las principales características reológicas de los polímeros.

En el capítulo III se explican los aspectos relacionados con el programa de pruebas: materiales utilizados, control de calidad sobre los productos epóxicos, procedimiento de limpieza y dispositivo de prueba.

En los capítulos IV y V se presentan las curvas experimentales carga-desplazamiento y desplazamiento-tiempo obtenidas en ensayos bajo cargas repetidas y carga sostenida respectivamente.

En el capítulo VI se discuten los resultados y se da una interpretación de las curvas experimentales tanto para cargas repetidas (ciclica y alternada) como para carga sostenida.

Finalmente en el capítulo VII se presentan las conclusiones obtenidas en este trabajo y se dan algunas recomendaciones para trabajos futuros.

CAPITULO II

MODELOS REOLOGICOS PARA EL ESTUDIO DEL CONCRETO

2.1. ELEMENTOS BASICOS USADOS EN REOLOGIA

En el proceso de idealización de los materiales para tratar de comprender su comportamiento ante distintas sollicitaciones, es frecuente el uso de modelos analógicos, que representan los extremos de una amplia gama de materiales, tales modelos son; el cuerpo elástico (hookeano) y el cuerpo viscoso (newtoniano) representados por un resorte y un amortiguador respectivamente, a continuación se presenta una descripción breve de los modelos y algunas de sus combinaciones.

2.1.1. CUERPO ELASTICO

Un cuerpo elástico es aquel, en el que las deformaciones son proporcionales a los esfuerzos y en el cual una vez retirado el sistema de cargas aplicado recupera su estado natural o no deformado. El modelo analógico del cuerpo elástico (fig. 1) es un resorte helicoidal con una constante elástica de respuesta (E , en Kg/cm^2), el esfuerzo (σ) en el resorte esta relacionado con su deformación (ϵ) por:

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.1)$$

La curva esfuerzo-deformación (fig. 2) de un cuerpo elástico esta constituida por una recta que sale del origen de las coordenadas (ϵ, σ). esto resulta de la ec. (2.1), de ella también se desprende que, si a un cuerpo

elástico se le aplica un esfuerzo σ_0 súbitamente y se mantiene constante con el tiempo (t), se alcanza una deformación instantánea c_0 la cual permanecerá constante mientras dure σ_0 (fig. 3).

2 1.2. CUERPO VISCOZO

Un cuerpo viscoso es aquel en el que, el estado de esfuerzos está relacionado con la velocidad de deformación, además los cuerpos viscosos no presentan ninguna tendencia a una recuperación de su estado natural o no deformado. El modelo analógico de un cuerpo viscoso (fig. 4) está constituido por un amortiguador, cuya fricción simula una viscosidad constante (η , en Kgs/m²), la relación entre el esfuerzo y la deformación (fig. 5) está dada por ;

$$\sigma = \eta \frac{dc}{dt} \quad (2.2)$$

Para tener una idea más amplia de las deformaciones en un cuerpo viscoso, supongase que se le aplica instantáneamente un esfuerzo σ_0 y que se mantiene constante; se observa que no hay respuesta instantánea y que la deformación aumenta linealmente, según la ec. (2.2), la utilización simultánea de las gráficas (fig. 6), permite obtener la deformación para un tiempo t_1 .

2.2. CUERPOS VISCOELÁSTICOS

Se denomina cuerpo viscoelástico al material que presenta en su comportamiento una combinación de las características elásticas y viscosas, aunque los materiales viscoelásticos son sensibles a la temperatura, sus principales características serán tratadas en condiciones isotérmicas.

2.2.1. MODELO DE KELVIN

El modelo de Kelvin también llamado de Kelvin-Voigt, cuyo modelo analógico lo constituyen un resorte y un amortiguador dispuestos en paralelo (fig. 7), trata de simular un comportamiento a la vez elástico que viscoso. Si al modelo de Kelvin se le aplica un esfuerzo de tensión (σ), es fácil observar que la deformación del resorte y del amortiguador es la misma, mientras que el esfuerzo (σ) será igual a la suma del esfuerzo desarrollado en cada uno de ellos en forma individual, de lo anterior y a partir de las ecs. (2.1) y (2.2) se tiene que;

$$\sigma = E\epsilon + \eta \frac{d\epsilon}{dt} \quad (2.3)$$

a la expresión anterior se le conoce como la ecuación constitutiva del modelo de Kelvin.

2.2.2. MODELO DE MAXWELL

El modelo de Maxwell, se esquematiza mediante la combinación de un resorte y un amortiguador dispuestos en serie (fig. 8), con lo cual se pretende representar el comportamiento de un material que bajo la acción de un esfuerzo de tensión (σ), tenga una respuesta elástica instantánea y a medida que pasa el tiempo una respuesta viscosa, si la carga se mantiene constante. Para obtener la ecuación constitutiva del modelo de Maxwell supongase que se aplica un esfuerzo (σ) de tensión, es fácil observar que el esfuerzo desarrollado en los elementos del modelo es el mismo, mientras que la deformación total del sistema será la suma de la deformación de cada uno de los componentes, a partir de las expresiones (2.1) y (2.2) se tiene que

la ecuación constitutiva del modelo de Maxwell es de la forma;

$$E \frac{dc}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E}{\eta} \sigma \quad (2.4)$$

2.2.3. MODELO DE BURGERS²

El modelo de Burgers (fig. 9) esta constituido por una unidad de Kelvin y una unidad de Maxwell en serie, este modelo es capaz de dar las tres respuestas viscoelásticas basicas, es decir; una "respuesta elástica instantánea", un "flujo viscoso" debido a la unidad de Maxwell y finalmente una "respuesta elástica retardada" debido a la unidad de Kelvin. La ecuación constitutiva del modelo de Burgers se puede obtener a partir de las ecuaciones constitutivas de los modelos de Maxwell y Kelvin, es decir; el esfuerzo es igual en ambas unidades, en cambio la deformación sera la suma de la deformación de cada una de las unidades, de acuerdo a las expresiones (2.3) y (2.4) se tiene;

$$\frac{\eta_k \eta_M}{E_k} \frac{d^2 c}{dt^2} + \eta_M \frac{dc}{dt} = \frac{\eta_k \eta_M}{E_k E_M} \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \left[\frac{\eta_M}{E_M} + \frac{\eta_M}{E_k} + \frac{\eta_k}{E_k} \right] \frac{d\sigma}{dt} + \sigma \quad (2.5)$$

los subíndices k y M se refieren a los modelos de Kelvin y Maxwell respectivamente.

2.3. EXPERIMENTO DE FLUENCIA Y RELAJACION DE ESFUERZOS

Existen dos experimentos básicos que se pueden realizar en los materiales viscoelásticos; el de fluencia y el de relajación. El "EXPERIMENTO DE FLUENCIA" que consiste en la aplicación instantánea de un esfuerzo de tensión (σ_0) a una probeta viscoelástica, en la cual manteniendo

la tensión constante se mide la deformación (respuesta de fluencia) como una función del tiempo. En el "EXPERIMENTO DE RELAJACION" se impone una deformación instantánea (c_0) y se mantiene constante en la probeta mientras se mide la tensión (relajación de esfuerzos) como una función del tiempo.

2.3.1. FLUENCIA Y RELAJACION DE ESFUERZOS EN UN MODELO DE KELVIN

La respuesta de fluencia para un material de Kelvin se determina al resolver la ecuación diferencial (2.3), tomando en cuenta algunas condiciones iniciales, supongase, que a un material de Kelvin se le aplica instantáneamente un esfuerzo (σ_0) y se mantiene constante, la ec. (2.3) toma la forma;

$$E \left[\tau \frac{dc}{dt} + c \right] = \sigma_0 \quad (2.6)$$

la solución a la ecuación anterior es de la forma;

$$c(t) = c_1 e^{-\frac{1}{\tau} t} + \frac{\sigma_0}{E} \quad (2.7)$$

en la que el parámetro τ es de la forma;

$$\tau = \frac{\eta}{E}$$

y al cual se le denomina tiempo de retardo, para valuar la constante c_1 se toman en cuenta las condiciones iniciales. Si se establece que en el instante inicial el material se halla indeformado, y que en ese momento se aplica (σ_0), se tendrá una deformación $c_0=0$, debido a que el amortiguador impide al resorte dar la respuesta inmediata que éste daría si estuviera solo. Reemplazando $c(t=0)=c_0$, se obtiene que;

$$c_1 = \frac{\sigma_0}{E} \quad (2.9)$$

por lo que finalmente tenemos;

$$c(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left[1 - e^{-\frac{1}{\tau} t} \right] \quad (2.10)$$

La ecuación (2.10) tiene como límite superior la recta;

$$c = \frac{\sigma_0}{E} \quad (2.11)$$

límite hacia el cual tiende la deformación con el tiempo, (fig. 10), se observa claramente que el comportamiento del cuerpo de Kelvin, empieza primeramente con características viscosas y termina con características elásticas.

Para entender el fenómeno de relajación de esfuerzos en el modelo de Kelvin, supongase que este ha sido cargado como en el caso anterior, con un esfuerzo σ_0 , como en el caso de fluencia, la deformación en el tiempo tiende a c_0 asociada a σ_0 , pero si se le impone una deformación c_1 correspondiente a un tiempo t_1 , menor que c_0 (este efecto se puede lograr por confinamiento) y se mantiene constante, es claro que se verifica una relajación de esfuerzos (fig. 11), en la siguiente proporción;

$$\sigma_0 e^{-\frac{1}{\tau} t_1}$$

hasta alcanzar un esfuerzo σ_1 .

2.3.2. FLUENCIA Y RELAJACION DE ESFUERZOS EN UN MODELO DE MAXWELL

La respuesta de fluencia, se verifica cuando a un material se le aplica un esfuerzo instantáneo (σ_0) el cual se mantiene constante con el tiempo, para el caso del modelo de Maxwell, al aplicar tal esfuerzo se observa una respuesta elástica inmediata;

$$\epsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E} \quad (2.12)$$

a partir de la cual solo trabaja el amortiguador, por lo que el material entra en un estado de fluencia (fig. 12). Bajo tales condiciones se verifica que la respuesta de fluencia esta dada por la solución de la ecuación (2.4), la cual es de forma;

$$\epsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E} + \frac{1}{\eta} t \right] \quad (2.13)$$

La relajación de esfuerzos en un modelo de Maxwell se obtiene, cuando a este se le induce una deformación instantánea ϵ_0 y se mantiene constante, es claro que a una deformación ϵ_0 corresponde un esfuerzo σ_0 , bajo tales condiciones se puede comprobar que la relajación de esfuerzos esta dada por;

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\frac{1}{\tau} t} \quad (2.14)$$

en la expresión anterior se puede observar que para un tiempo muy grande el esfuerzo tiende a anularse (fig. 13).

2.3.3. FLUENCIA Y RELAJACION EN UN MODELO DE BURGERS

Los materiales que presentan flujo plástico, también son capaces de presentar relajación de esfuerzos, el hecho de haber comentado ambos fenómenos en los modelos anteriores, se debe a que en ambos procesos el comportamiento de los materiales presenta un mismo mecanismo. Sin embargo en la parte experimental del presente trabajo no se desarrollaron pruebas de relajación de esfuerzos; por ello en la parte que resta del capítulo solo se comentaran los aspectos que permitan tener una idea más clara del fenómeno de fluencia, dado que las pruebas desarrolladas son de éste tipo.

Para obtener la respuesta de fluencia de este modelo, se procede de manera similar conforme a los modelos anteriores, es decir; para un esfuerzo instantáneo (σ_0), que se mantiene constante en el tiempo, es fácil verificar que la respuesta, es la suma de las respuestas de los modelos (Kelvin y Maxwell) en forma individual, a partir de las expresiones (2.10) y (2.13), se tiene que la respuesta de fluencia para el modelo de Burgers (fig. 9) es de la forma;

$$e(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_M} + \frac{t}{\eta_M} + \frac{1}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K} t} \right) \right] \quad (2.15)$$

en la curva característica (fig. 14) para este modelo se observa que para $t=0$, se tiene una respuesta instantánea;

$$e_0 = \frac{\sigma_0}{E_M} \quad (2.16)$$

En el caso de que se presente una descarga total en el instante t_1 (fig. 15), el resorte responde inmediatamente, devolviendo la deformación

inicial (ϵ_0). El cuerpo de Kelvin y el amortiguador por el contrario regresan paulatinamente, el primero recupera su estado original o no deformado, no así el amortiguador, el cual quedara con una deformación permanente (ϵ_p), ecuación (2.17), correspondiente al instante t_1 .

$$\epsilon_p = \frac{\sigma_0}{\eta_R} t_1 \quad (2.17)$$

2.4. RESPUESTA DE FLUENCIA

La respuesta de fluencia para cualquier material (modelo), se puede escribir de la siguiente forma;

$$\epsilon(t) = \sigma_0 \psi(t) \quad (2.18)$$

donde $\psi(t)$ se conoce como función de fluencia. Por ejemplo, esta función para el modelo de Kelvin, esta determinada por (2.10), siendo;

$$\psi(t) = \frac{1}{E} \left[1 - e^{-\frac{1}{\tau} t} \right] \quad (2.19)$$

En problemas viscoelásticos es válido el principio de superposición, así, el "efecto" total de una suma de "causas" es igual a la suma de los "efectos" de cada una de las "causas". Si para un material la función de fluencia es $\psi(t)$, y si se aplica una historia escalonada de tensiones (fig. 16) la respuesta de fluencia sera;

$$\epsilon(t) = \sigma_0 \psi(t) + \sigma_1 \psi(t-t_1) + \dots + \sigma_n \psi(t-t_n) \quad (2.20)$$

Para una historia de tensiones arbitraria $\sigma = \sigma(t)$ (fig. 17), se puede analizar como una infinidad de tensiones escalonadas cada una de magnitud $d\sigma$, la respuesta de fluencia está determinada por la integral de superposición;

$$c(t) = \int_{-\infty}^t \frac{d\sigma(t')}{dt'} \psi(t-t') dt' \quad (2.21)$$

tal integral se conoce como integral hereditaria, ya que la deformación en cualquier instante depende de la historia de tensiones completa. Para un material inicialmente libre de tensiones y deformaciones en el instante cero la expresión (2.21) se puede escribir de la siguiente forma;

$$c(t) = \int_0^t \frac{d\sigma(t')}{dt'} \psi(t-t') dt' \quad (2.22)$$

Si para un tiempo $t=0$, la carga de tensión origina una discontinuidad escalonada de magnitud σ_0 , la respuesta (deformación en el tiempo) de fluencia toma la forma;

$$c(t) = \sigma_0 \psi(t) + \int_0^t \frac{d\sigma(t')}{dt'} \psi(t-t') dt' \quad (2.23)$$

2.5. MODELOS REOLOGICOS PARA EL CONCRETO

Los distintos modelos reologicos del concreto (entendido este como un material viscoelástico), que pretenden explicar el fenómeno de fluencia bajo ciertas condiciones de carga, estan formados por modelos, que tratan de

simular el comportamiento de los elementos que lo integran. El problema de tratar de integrar todos los factores que tienen relación con el fenómeno de fluencia, ha desembocado en la elaboración de modelos cada vez mas complejos³, que pretenden en mayor o menor grado representar el fenómeno de fluencia en el concreto.

2.5.1. MODELO DE BURGERS²

Este modelo que esta formado (fig. 9) por una unidad de Kelvin y una de Maxwell dispuestas en serie, tiene ventajas sobre otros modelos, no solo por la sencillez con que se obtiene su función de fluencia, ecuación (2.15), sino porque es capaz de incluir los tres modos de respuesta viscoelástica básicos, es decir, una "respuesta elástica instantánea", asociada a los agregados pétreos, un "flujo viscoso" y finalmente una "respuesta elástica retardada", la cual junto con el flujo viscoso se asocia con el comportamiento de la pasta de cemento.

2.5.2. MODELO DE HANSEN⁴

Los elementos que forman este modelo (fig. 18) estan dispuestos, de tal forma, que pretenden representar el comportamiento de los materiales que constituyen el concreto, así tenemos que al modelo lo integran; un modelo de Burgers², que simula el comportamiento de la pasta de cemento, un amortiguador que representa los espacios vacios y un resorte elástico, el cual representa los agregados pétreos. Todos ellos en conjunto tratan de representar el fenómeno de fluencia plástica en el concreto.

2.5.3. MODELO DE FLÜGGE⁸

Basandose en los resultados experimentales de R. E. Davis⁸ y W. H. Granville⁹ Flügge desarrolló varios modelos reológicos para el concreto, uno de esos modelos (fig. 19), consiste de un modelo de Kelvin en serie con dos amortiguadores, uno de los cuales (A), tiene una constante de viscosidad η_A y el otro (B) presenta una viscosidad η_B , que se incrementa en relación no lineal ($\eta_B = \beta t^2$) respecto del tiempo. El modelo de Kelvin está formado por un resorte con una constante elástica E_K y un amortiguador que tiene una viscosidad η_K que crece en forma lineal ($\eta_K = \alpha t$) con el tiempo. En este modelo se puede observar que, bajo un esfuerzo constante (σ), las deformaciones en los amortiguadores; "B" y de Kelvin, disminuyen con el tiempo, no así la deformación en el amortiguador "A", la cual crece indefinidamente.

2.5.4 CURVA CARACTERISTICA DE LA FLUENCIA EN EL CONCRETO

Las características viscoelásticas del concreto, hacen que éste presente el fenómeno de la fluencia (creep), el cual es resultado de las acciones a largo plazo a las que éste está sujeto. Así tenemos que el comportamiento del concreto bajo acciones de larga duración está determinado por multitud de factores, entre los cuales destaca; la edad del concreto al momento de aplicar la carga, tal como se pone de manifiesto en las curvas experimentales obtenidas en ensayos de fluencia bajo carga axial de tensión (fig. 20)¹², así como del nivel de carga.

2.6. CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS POLIMEROS¹⁰

Las propiedades mecánicas de los polímeros (resinas) no pueden ser separadas de sus propiedades físicas. En particular, las temperaturas de transición vítrea y la de fusión. Por debajo de su temperatura de transición vítrea, los polímeros son sólidos, rígidos, elásticos, pero generalmente frágiles, su ruptura se produce cuando alcanza alargamientos del orden del 10 % . Por encima de esta temperatura de transición, el comportamiento mecánico de los polímeros depende de su naturaleza cristalina. Para este caso, presentan, para pequeños alargamientos, las propiedades elásticas normales, para alargamientos más grandes, un comportamiento plástico, la ruptura se produce para alargamientos superiores al 500 % .

Los distintos comportamientos mecánicos observados en función de la temperatura se encuentran cuando se examina, a una temperatura determinada, la influencia del tiempo de aplicación de las tensiones sobre las propiedades mecánicas del polímero. Desde el punto de vista de estas propiedades, existe una equivalencia entre la temperatura y la duración de aplicación de las tensiones. Si después de haber aplicado instantáneamente una deformación se sigue la evolución en función del tiempo, el comportamiento mecánico del material, caracterizado, por ejemplo, por el módulo de elasticidad, está representado por la figura 21. El comportamiento observado para tiempos pequeños, inferiores a 10^{-5} seg. en el caso estudiado, corresponde a un comportamiento a bajas temperaturas y el módulo de elasticidad en esta zona permanece aproximadamente constante, del orden de 200 Kg/mm^2 (fig. 21, esquema A). El polímero se comporta como un sólido rígido, elástico pero frágil.

Para tiempos grandes, en el ejemplo elegido, comprendido entre 1 y 10^{10} seg. (fig. 21, esquema C), el comportamiento depende de la estructura del polímero, de la misma manera que para temperaturas superiores a la transición vítrea. Si el compuesto es amorfo, su módulo de elasticidad toma un valor próximo de 2×10^{-1} Kg/mm², que disminuye ligeramente cuando el tiempo aumenta.

En la zona de tiempos reducidos — para el caso tratado, entre 10^{-5} seg. y 1.0 seg.—, llamada zona de transición (fig. 21, esquema B), las propiedades mecánicas dependen considerablemente del tiempo de observación. Se habla entonces de fenómenos viscoelásticos y, por ejemplo, la relación entre las fuerzas y los alargamientos llegan a ser función del tiempo.

2.6.1. FENOMENOS VISCOELASTICOS EN LOS POLIMEROS

Ya se ha indicado que en la zona llamada de transición, situada en las proximidades de la temperatura de transición vítrea, así como en la zona de fusión, las propiedades mecánicas, en particular el módulo de elasticidad, dependen de la duración de los esfuerzos. Este comportamiento, conocido con el nombre de viscoelasticidad, se pone de manifiesto, particularmente, en dos fenómenos característicos:

- a) Fenómeno de relajación, que como ya se ha explicado, corresponde a la disminución, con el tiempo, de la fuerza de tensión necesaria para mantener un alargamiento constante.
- b) Fenómeno de flujo (creep), que se traduce por un aumento, con el tiempo, del alargamiento bajo una fuerza de tensión constante. Hay que decir que si estos fenómenos de viscoelasticidad son muy importantes en

las zonas indicadas anteriormente, se encuentra cada vez que el valor del módulo de elasticidad varía con la duración de la aplicación de los esfuerzos.

Los trabajos realizados por Lee⁹ y colaboradores sobre anclaje con resinas epóxicas en concreto, demuestran que las características viscoelásticas de las resinas juegan un papel importante en el comportamiento del anclaje con respecto al tiempo así como del nivel de carga, como queda de manifiesto en las curvas experimentales (fig. 22) obtenidas por estos investigadores. La respuesta del anclaje que se puede observar para los distintos niveles de carga y para las diferentes longitudes de anclaje (100 y 75 mm), se pueden resumir en tres etapas; una primera y una segunda donde el desplazamiento del anclaje con el tiempo es más o menos estable y una tercera etapa donde el nivel de la carga juega un papel importante en el fenómeno de fluencia. Las principales características del tipo de anclaje son las siguientes: Se utilizaron tornillos que en uno de sus extremos (parte anclada) la sección tiene un " ensanchamiento " (22mm de diámetro y 25mm de longitud) y un agujero para el anclaje de 25mm de diámetro.

Otros trabajos realizados entre ellos el del Dr. Daws¹¹, han puesto de manifiesto la variabilidad de las características (creep) de las resinas epóxicas con respecto al tiempo, así como la importancia de la longitud de anclaje y el nivel de carga. En las curvas experimentales (fig. 23) presentadas por el Dr. Daws se puede apreciar que para un mismo nivel de carga pero diferentes longitudes de anclaje el fenómeno de fluencia (creep) tiene variaciones importantes.

CAPITULO III

PROGRAMA DE ENSAYES

3.1. ESPECIMENES

Los espécimenes utilizados en pruebas de extracción de varillas, tienen las siguientes dimensiones; 30 x 25 x 50 cm (fig. 24) que intentan reproducir la sección transversal de elementos estructurales tales como columnas o vigas. Los espécimenes se reforzaron con varillas del No. 3 para evitar la falla frágil del concreto (splitting) y para confinar el anclaje, el armado consiste de dos anillos; uno de 24 x 24 cm y otro más grande de 44 x 24 cm colocados en tres capas repartidos en la altura del espécimen (fig. 24). Las dimensiones del anillo más reducido se escogieron de tal forma que se evite su interferencia con el cono de falla del concreto, supuesto con una inclinación de 45° al extraer la varilla.

3.2. MATERIALES

3.2.1. CONCRETO

El concreto presentó una resistencia a la compresión, que varió entre 390 y 460 Kg/cm^2 , la resistencia a la tensión fue medida mediante ensayos tipo "brasileño" y en promedio se obtuvo un valor de 30 Kg/cm^2 . Los ensayos a compresión y tensión se realizaron un día anterior a la prueba de extracción de la varilla. El proporcionamiento por metro cubico de concreto fue; 1000 Kg de grava, 857 Kg de arena, 320 Kg de cemento y 216 lt. de agua.

3.2.2. ACERO UTILIZADO EN EL ANCLAJE

El diámetro de varilla utilizado en el anclaje fue 5/8 de pulgada, el módulo de elasticidad, medido en una maquina universal fue de 1.95×10^6 Kg/cm² y el esfuerzo de fluencia promedio fue de 4270 Kg/cm².

3.2.3. RESINAS EPOXICAS

Los productos epóxicos se formulan en dos partes: parte "A", porción que contiene la resina epóxica y parte "B", que contiene un sistema endurecedor.

PRODUCTO 1.

Este producto consta, además de la parte "A" y "B" (en proporción de 3:1, en volumen), de la cantidad de arena necesaria para hacer viscosa la mezcla.

PRODUCTO 2.

Comercialmente este producto consta solamente de las partes "A" y "B" (en proporción de 2:1, en volumen), para utilizarlo se le agregó arena sílica en una cantidad tal que se estimó más conveniente para hacerla trabajable.

PRODUCTO 3.

Consta de una parte "A" cargada con fibras de acero y de la parte "B", no se recomienda específicamente para anclaje de varillas, pero como es un producto conocido y muy utilizado, se incluyó en este trabajo.

3.3. CONTROL DE CALIDAD SOBRE LOS PRODUCTOS EPOXICOS

La norma ASTM C881 establece la forma de clasificar los productos epóxicos de acuerdo con su aplicación, grado de viscosidad y rango de temperatura en la que se pueden usar. Sin embargo, los productos que se manejan en este trabajo no caen en esta clasificación por tratarse de sistemas epóxicos que incluyen ya sea arenas o fibras de acero. Se consideraron básicamente tres pruebas para el control de calidad de los productos epóxicos:

- a) Prueba de adherencia, que sigue los procedimientos establecidos en la norma ASTM C882.

- b) Prueba de tensión, basada en la norma ASTM C307.

- c) Prueba de compresión, según la norma ASTM C579.

3.3.1. PRUEBA DE ADHERENCIA

Para obtener el espécimen que establece la norma ASTM se procedió a cortar (en dos partes) en diagonal un cilindro de concreto de 7.5x15 cm, que posteriormente se unió con mortero epóxico. Los cilindros de concreto en esta prueba se ensayaron a los 7 días de acuerdo con lo establecido en la mencionada norma. El esfuerzo de adherencia se obtuvo dividiendo la carga máxima entre la superficie diagonal del cilindro (aprox. 92 cm^2). En la tabla No. 1 se muestran los valores de esfuerzo de adherencia para los distintos productos.

3.3.2. PRUEBA DE TENSION

La extracción de varillas ancladas en concreto no provoca directamente esfuerzos de tensión en el mortero epóxico sin embargo, esta prueba permite establecer una comparación en resistencia entre los distintos productos que se utilizan. En la tabla No. 1 se muestran los valores promedio obtenidos en tensión para los distintos productos.

3.3.3. PRUEBA DE COMPRESION

Esta prueba permite, al igual que la de tensión, comparar en resistencia los productos que se utilizan. Los espécimenes utilizados en esta prueba fueron cubos de 5 cm por lado, en la tabla No. 1 se muestran los valores obtenidos, de los distintos productos para esta prueba.

3.4. PROCEDIMIENTO DE LIMPIEZA

Una vez hecho el agujero donde se va a anclar la varilla, el procedimiento de limpieza como siguiente paso representa una de las etapas más importante en el anclaje de varillas mediante resinas epóxicas. Con el objeto de garantizar una "buena" adherencia entre concreto y varilla se implemento un proceso de limpieza en el cual se utilizaron cepillos de cerdas de plastico (para el agujero) y de alambre (para el oxido de la varilla) , asi como el uso de una compresora de aire, que permitiera retirar todas las particulas de polvo, para garantizar una "buena" limpieza.

3.5. DISPOSITIVO DE PRUEBA

El ensaye de los espécimenes (extracción de varilla) se realizo en una maquina M.T.S. (fig. 25) en la cual se pueden simular sollicitaciones

dinamicas, estaticas y de carga sostenida entre otras. Los instrumentos de medición consistieron en micrómetros con una aproximación de lectura a 0.01 mm.

CAPITULO IV

CARGAS ALTERNADAS

4.1. CARGA CICLICA

En la aplicación de carga cíclica de extracción en los especímenes se han generado gráficas carga-desplazamiento, en las cuales es posible observar los cambios que experimentan los materiales bajo tal sollicitación. Cuando estos cambios significan reducciones de esfuerzo, para deformaciones dadas o cuando éstas están asociadas con la aparición de signos visibles de daño (fig. 26), estaremos hablando del deterioro de los materiales (especímen).

4.1.1. ANCLAJE CON PRODUCTO TIPO 1

En la gráfica carga-desplazamiento (fig. 27) se puede observar, que para un nivel bajo de carga, del orden del 60% de la carga máxima (obtenida a partir de un ensaye estático), y para los primeros ciclos de carga, el comportamiento se puede acercar a una relación lineal carga-desplazamiento, durante esta etapa es más o menos válida la suposición de que el material no ha sufrido deterioro. Sin embargo al aumentar el nivel de carga (en 20%), se observa una cierta degradación, que se acentúa a partir del tercer ciclo (fig. 27), donde se distingue una deformación residual significativa y una pérdida de rigidez lo cual se traduce en la presencia de pequeñas grietas que aumentan de tamaño a medida que se incrementa el número de ciclos, hasta que finalmente el espécimen se fragmenta en varias partes (fig. 26).

Es interesante ver que para los primeros ciclos de carga el desplazamiento que se alcanza es del orden de 0.175 mm, mientras que el desplazamiento máximo alcanzado antes de la falla es de 2.54 mm, lo que representa un notable incremento en el desplazamiento final, del orden de 14 veces el inicial. Aquí también se puede destacar que hubo una reducción en la resistencia como resultado de los daños en los materiales, especialmente en el concreto, la reducción se verificó al reducirse la capacidad de carga de 5.0 a 3.6 toneladas al momento de la falla.

4.1.2. ANCLAJE CON PRODUCTO TIPO 2

El comportamiento observado en este modelo es similar al explicado en el modelo anterior, es decir; que para niveles bajos de carga y para los primeros ciclos, se distingue una relación carga-desplazamiento (fig. 28) lineal, en la cual, se supone que el material no ha sufrido daño. Sin embargo hay que destacar que para niveles altos de carga (80% de la máxima), y aquí la diferencia con el producto anterior, este modelo no presenta una pérdida de rigidez significativa, es decir, la pendiente de la curva carga-desplazamiento tiene poca variación, hasta el momento de la falla y puede verse que la deformación residual es menor, además puede notarse que el número de ciclos para alcanzar la falla es mayor. El desplazamiento máximo alcanzado por este modelo, antes de la falla fue de 2.36 mm, lo que representa un incremento del orden de 11 veces el desplazamiento inicial, correspondiente a los primeros ciclos de carga, donde el material denota un comportamiento casi lineal. En este ensayo no se registraron reducciones importantes en la resistencia de los materiales, pues la diferencia entre el valor de la carga máxima (5.4 ton.) y el valor de la carga al momento de la falla (5.0 ton.), es del orden del 7%.

4.1.3. ANCLAJE CON PRODUCTO TIPO 3

En este ensaye se puede apreciar el nivel creciente de daños en los materiales a medida que aumenta el número de ciclos, lo anterior se desprende de los cambios que presenta la curva carga-desplazamiento (fig. 29), donde se puede distinguir un comportamiento casi lineal para los primeros ciclos de carga, un cierto nivel de daños en los materiales (agrietamiento en el concreto). También se puede notar como las deformaciones residuales van creciendo en cada ciclo lo cual se relaciona con la formación de grietas de gran tamaño (fig. 28); otra característica que se puede destacar es el hecho de que, en los ciclos de carga anteriores a la falla, no se observaron reducciones en la capacidad de carga, es decir, que en cada ciclo fue posible alcanzar el nivel de carga del ciclo anterior, hasta que finalmente se alcanzó la falla, el valor promedio de la carga durante el ensaye fue de 5.3 ton. y al momento de la falla fue de 4.6 ton. El desplazamiento que se registro en los primeros ciclos de carga y al momento de la falla fue de 0.45 mm y 7.54 mm respectivamente, lo que demuestra que para alcanzar la falla se presentan grandes desplazamientos.

4.2. CARGAS ALTERNADAS

En la aplicación de cargas repetidas y preferentemente en cargas alternadas (tensión y compresión), se pueden apreciar claramente los ciclos de histéresis (figs. 31 32 y 33), en los cuales es posible señalar, que la energía de deformación (area dentro del ciclo de histéresis) disipada aumenta a medida que lo hacen los ciclos de carga, hecho que se manifiesta en un incremento de los daños a los materiales, a continuación se describe el comportamiento de los modelos ensayados bajo este tipo de carga, a través de las curvas carga-desplazamiento.

4.2.1. ANCLAJE CON PRODUCTO TIPO 1

En la curva carga-desplazamiento (fig. 31) correspondiente a este producto, se puede ver que el comportamiento inicial del material es casi lineal, pero esta linealidad se pierde a medida que el nivel de carga y el número de ciclos aumenta, esto se ve claro al observar que la energía de deformación aumenta en cada ciclo de histéresis. Puede verse también la degradación que sufre el material (fig. 30), al presentar deformaciones plástica (permanentes) significativas, que se relacionan con la aparición de grietas en el concreto, las que provocan que éste pierda rigidez en cada ciclo. Lo anterior se hace patente en el hecho de que el módulo de elasticidad del material va disminuyendo (tiende a cero) en cada ciclo. Es importante destacar, que para los primeros ciclos de carga, los ciclos de histéresis son "cerrados" (la energía de deformación es muy pequeña), por lo que se puede decir, que en esta etapa, no existe daño importante ya que el estado final reproduce el estado inicial del material.

4.2.2. ANCLAJE CON PRODUCTO TIPO 2

El comportamiento de varillas ancladas con este tipo de producto, esta caracterizado en la curva carga-desplazamiento (fig. 32), en ella se puede distinguir una parte con comportamiento cercano a una relación lineal, donde la energía de deformación disipada en cada ciclo de histéresis es pequeña, la cual se puede asociar a un incipiente daño en el material (microgrietamiento del concreto) y otra, basicamente en los dos últimos ciclos, donde se puede ver que al aumentar el nivel de carga, la energía de deformación es mayor, en esta etapa se observa una relación directa con las deformaciones plásticas, las cuales son significativamente mayores que las observadas en los primeros ciclos, lo anterior esta relacionado con la aparición de grietas de gran tamaño. El nivel de carga alcanzado durante la

prueba, no tuvo reducciones, el valor máximo de la carga se alcanzó al momento de la falla, este fue de 5.2 ton.

4.2.3. ANCLAJE CON PRODUCTO TIPO 3

Las principales características en el comportamiento de este espécimen se pueden determinar a partir de los cambios en la curva carga-desplazamiento (fig. 33). En ella se distingue una primera parte con características elásticas, para niveles bajos de carga, donde los ciclos de histéresis son casi "cerrados" y una última parte donde se tiene que para niveles altos de carga el material entra en una zona de fluencia. El hecho de que el material tenga deformaciones permanentes es un signo claro de su degradación, la que se acusa en pérdida de rigidez, con respecto a la resistencia, no se registraron reducciones significativas en la misma, lo cual se puede comprobar en la curva carga-desplazamiento.

CAPITULO V

CARGA SOSTENIDA

El objetivo principal de estas pruebas, es el de observar el comportamiento de los materiales cuando actúan sistemas de carga que se mantienen constantes en el tiempo. Para lograr lo anterior, la carga se aplicó en dos etapas: primeramente se llegó a un nivel de carga del orden del 60% de la máxima, obtenida esta mediante un ensayo estático (figs. 34 y 35). Mientras este primer nivel de carga se mantiene constante durante un cierto tiempo, es posible inferir el comportamiento del material, a través de los cambios observados en las deformaciones (respuesta de fluencia). En la segunda etapa se incrementó la carga hasta un 75%, aquí también fue posible medir la respuesta de fluencia, hasta que finalmente se alcanzó la falla (fig. 36).

5.1. ANCLAJE CON PRODUCTO TIPO 1

Las características más importantes del comportamiento (respuesta de fluencia) del material se pueden observar en la curva desplazamiento-tiempo (fig. 37). En ella se puede ver un desplazamiento de 0.13 mm, que se asocia con una respuesta elástica instantánea debido a la aplicación súbita de la carga, un proceso de fluencia que en las primeras 43 hrs. (antes de la primera descarga), alcanza una rapidez de flujo de 0.00122 mm/hr que se mantiene más o menos constante hasta la segunda descarga. Es interesante hacer notar que en la primera y segunda descarga (para el primer nivel de carga) hay una recuperación elástica del material, la cual corresponde, en valor a la deformación elástica instantánea (0.13 mm), registrada en el inicio de la prueba, así como una deformación permanente de 0.052 mm que

resulta de la fluencia. Es importante señalar que para un incremento en el nivel de carga (75 % de la máxima), la rapidez de flujo aumenta significativamente, a partir de la segunda descarga, de 0.0012 a 0.0028 mm/hr, lo que significa un rápido deterioro en el material, sin embargo se nota (tercer descarga), que el material no ha perdido totalmente sus propiedades elásticas, pues el valor de la deformación elástica recuperada (al momento de la descarga), corresponde a la respuesta elástica instantánea para el segundo nivel de carga, aun cuando la deformación permanente se halla incrementado de manera significativa.

5.2. ANCLAJE CON PRODUCTO TIPO 2

De los principales parámetros que se pueden destacar en los problemas de flujo, tal vez los mas importantes sean: la rapidez de flujo y las deformaciones permanentes, las cuales dependen principalmente del nivel de la carga y del tiempo que ésta dure. En la respuesta de fluencia (fig. 38), se distingue que para el primer nivel de carga se presenta una disminución en la rapidez de flujo de 0.114 a 0.036 mm/hr, lo que significa que a medida que el tiempo pasa, el flujo en el material tiende a estabilizarse (la rapidez de flujo tiende a cero). No sucede lo mismo al aumentar el nivel de carga (75% de la máxima), aquí la rapidez de flujo se incrementa de 0.29 a 0.37 mm/hr lo que refleja un rápido crecimiento en las deformaciones permanentes y con ello un rápido deterioro del material hasta alcanzar la falla (fig. 36).

5.3. ANCLAJE CON PRODUCTO TIPO 3

Las característica de flujo para este producto se puede entender a partir de las curvas desplazamiento-tiempo (figs. 39 y 40), en la primera curva (fig. 39) se distingue una primera etapa donde la rapidez de flujo

alcanza un valor de 0.0019 mm/hr, correspondiente al primer nivel de carga (60% de la máxima, fig. 35) y una deformación de 0.047 mm en un tiempo de 24 hrs. aproximadamente. Para el segundo nivel de carga, la rapidez de flujo aumenta a una razón de 0.01 mm/hr lo anterior significa un incremento en los daños de los materiales, el comportamiento de la última etapa esta caracterizado por el rápido crecimiento de la rapidez de flujo. Los valores de la rapidez de flujo plástico obtenidos en el segundo ensaye (fig. 40) para el primer (50%) y segundo (75%) nivel de carga fueron: 0.0039 y 0.0074 mm/hr respectivamente. Se puede hacer notar que en ambos ensayes (figs. 39 y 40), los daños que se provocan en el material por flujo son función directa del nivel de carga, lo anterior se concluye del hecho que, a mayor nivel de carga mayor es la rapidez de flujo.

CAPITULO VI

DISCUSION DE RESULTADOS

El análisis comparativo de las curvas carga-desplazamiento y desplazamiento-tiempo obtenidas en ensayos bajo distintos sistemas de carga (cíclica, alternada y sostenida), así como de las configuraciones de agrietamiento y modos de falla, permiten tener una idea más o menos clara del comportamiento de varillas ancladas con productos epóxicos. Si observamos las gráficas correspondientes a los ensayos bajo carga cíclica, se ve claramente, que bajo este sistema de carga los espécimenes, se deterioraron de manera significativa, sin embargo, si comparamos los modos de falla y los patrones de agrietamiento correspondientes a los ensayos de carga alternada (fig. 30), con los modos de falla para ensayos bajo carga cíclica (fig. 26), se observa, que en las pruebas de carga alternada el nivel de daños en los espécimenes es significativamente mayor, en este tipo de prueba la falla del concreto es por fracturamiento total.

6.1. CARGAS ALTERNADAS

Ya los trabajos realizados por Shah y Chandra⁷, demuestran que el microagrietamiento en el concreto aumenta de manera considerable bajo los efectos de carga cíclica, no obstante que el mayor nivel de daños se registró en los ensayos de carga alternada, es en ésta prueba donde mayor estabilidad se observó en cuanto a la capacidad de carga (tabla No 2) de los espécimenes, es decir, no se registraron reducciones en la capacidad de carga más allá del 6 % excepto para el producto tipo 1, que presentó una variación del 15 %. Es en los ensayos de carga cíclica donde se presentan reducciones significativas en la capacidad de carga (tabla No 2) y donde se

alcanzan mayores desplazamientos (tabia No 3).

El tipo de falla que se presentó, fragmentación en el concreto, especialmente por cargas repetidas, es resultado de la aparición de microgrietas, las cuales se han propagado debido a que se ha rebasado la capacidad en tensión del concreto. Ya algunos trabajos^{13,14}, han demostrado que los mayores microgrietamientos se alcanzan cuando se rebasa el 70 y 80% de la capacidad del concreto, tanto a compresión como a tensión respectivamente.

6.2. CARGA SOSTENIDA

6.2.1. PRIMERA ETAPA

En esta primera etapa los espécimenes presentan muy poca variación en su rapidez de flujo (tabia No 3), debido principalmente a que la fluencia, para este nivel de carga, es más significativa en las resinas que en el concreto, sin embargo, la poca fluencia en el concreto puede inducir un incipiente microgrietamiento al interior del concreto.

6.2.2. SEGUNDA ETAPA

En esta segunda etapa, correspondiente al segundo nivel de carga, las variaciones en la rapidez de flujo se acentúa para todos los productos, pero de manera notable se presenta en el producto tipo 2, en este producto se presenta una gran "inestabilidad" ante carga sostenida, pues se presenta una rapidez de flujo que tiende a un valor muy grande (fig. 41), lo anterior se desprende del hecho, que la falla se alcanzó en un lapso de tiempo muy corto en comparación con los otros productos. Es en esta etapa también donde el

microagrietamiento al interior del concreto se manifiesta de manera significativa, como resultado no solo del incremento en el nivel de la carga sino, como un efecto del fenómeno de la fluencia, tanto en las resinas como en el concreto. Otra característica que se puede destacar en cuanto a los efectos de la carga sostenida, es el referente a la disminución en la capacidad de carga (figs. 42 y 43), la disminución que se observó es más o menos del 30%, referido a la carga máxima obtenida en un ensaye estático.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en las distintas pruebas, se pueden realizar algunas observaciones a manera de conclusiones:

En los resultados obtenidos en las pruebas bajo carga cíclica y alternada se observó que el principal modo de falla en los especímenes (para los distintos productos epóxicos) fue por fracturamiento en el concreto, en ninguno de ellos se presentó la falla por deslizamiento de la varilla, lo cual demuestra que el esfuerzo de adherencia desarrollado por la resina entre el concreto y la varilla es "bueno".

De los resultados obtenidos al someter el anclaje a cargas cíclicas y alternadas se observó que el deterioro del espécimen comenzaba para niveles de carga del 70-75 % de la carga máxima: medido este deterioro por las gráficas carga-desplazamiento, ya que se observó un ensanchamiento de las curvas después de rebasado ese nivel de carga.

Para el caso de cargas sostenidas, se observó que hasta niveles del 50 % de la máxima, los efectos de la carga no parecen jugar un papel importante en la resistencia del anclaje, los desplazamientos tienden a estabilizarse rápidamente, después de una variación inicial debido probablemente a la fluencia de las resinas. Para niveles de carga mayores del 60 % de la máxima, los desplazamientos aumentan rápidamente y se

conjugan los efectos de la fluencia de la resina con el microagrietamiento del concreto para provocar la ruptura del espécimen.

En conclusión, se puede afirmar que de acuerdo con el estudio experimental llevado a cabo, es conveniente que el anclaje de varillas con resinas epóxicas este limitado a niveles de carga menores del 50 % de la resistencia máxima del anclaje, para evitar problemas de fluencia de las resinas y de microagrietamientos en el concreto.

7.2. RECOMENDACIONES

El número de pruebas no ha permitido tener un conocimiento más completo de las distintas variables que intervienen de manera significativa en el comportamiento de varillas ancladas con resinas epóxicas, sin embargo, se puede recomendar que en el caso de varillas ancladas con resinas epóxicas conviene para fines de diseño considerar una resistencia del 50% de la capacidad máxima de extracción. Sin embargo sería recomendable realizar un número más amplio de pruebas, sobre todo, pruebas de fluencia, dado que es un fenómeno del cual se tiene poco conocimiento, en cuanto a su mecanismo, no solo en el concreto como material individual, sino en interacción con otros materiales, en este caso los productos epóxicos.

Con el fin de tomar en cuenta la interacción concreto-resina epóxica, en las pruebas de fluencia se podrían tomar en cuenta las siguientes variables:

- a) Humedad relativa del concreto
- b) Estado inicial de microgrietas en el concreto
- c) Edad del concreto al momento de aplicar la carga
- d) Temperatura

de estas pruebas se podría determinar además, algunos parámetros (constantes elásticas y viscosas), que permitan representar el fenómeno de la fluencia a partir del punto de vista de la reología, mediante la aplicación de algún modelo con alguna modificación para tomar en cuenta los efectos de las resinas epóxicas.

BIBLIOGRAFIA

1. MASE, G. E., MECANICA DEL MEDIO CONTINUO
MC-GRAW HILL, MEXICO D.F.
2. LEVI, E., ELEMENTOS DE MECANICA DEL MEDIO CONTINUO
LIMUSA, MEXICO D.F.
3. NEVILLE, A. M., CREEP OF CONCRETE: PLAIN, REINFORCED, AND PRESTRESSED.
WORTH-HOLLAND PUBLISHING Co AMSTERDAN.
4. HANSEN, T. C., CREEP OF CONCRETE, SWEDISH CEMENT AND CONCRETE.
RESEARCH INSTITUTE, STOCKHOLM, BULLITIN No. 33, 1958, 48 pp.
5. FLÜGGE, W., MECHANICAL MODELS ON PLASTICITY AND USE OF INTERPRETATION OF
CREEP IN CONCRETE.
DIVISION OF ENGINEERING MECHANICS, STANFORD UNVRSITY, CALIFORNIA,
TECHNICAL REPORT No. 8 NOV. 1950, 35 pp.
6. LEE, N. K., MAYFIELD, B. AND SNELL, C., " RESIN ANCHORS IN CONCRETE "
PART II, CIVIL ENGINEERING, JUNE 1980, 47-53 pp.
7. SHAH, SURENDRA P., AND CHANDRA, SUSHIL. FRACTURE OF CONCRETE SUBJETED TO
CYCLE AND SUSTAINED LOADING. ACI PROC. VOL. 67, No 10, OCT. 1970 818-824
pp.
8. DAVIS, R. E. AND DAVIS, H. E., FLOW OF CONCRETE UNDER THE ACTION OF
SUSTAINED LOADS, ACI JORNAL, PROC. 27, 1931, 837-910 pp.

9. GRANVELLE, W. H., STUDIES IN REINFORCED-III: THE CREEP OF FLOW OF CONCRETE UNDER LOAD. DEPT. OF SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH, BUILDING RESEARCH TECHNICAL PEPER No. 12, LONDON, 1930, 39 pp.
10. CHAMPETIER, G. Y MONNERIE, L., INTRODUCCION A LA QUIMICA MACROMOLECULAR. ESPARSA-CALPE, MADRID 1973.
11. DAWS, G., " RESIN ANCHORS ", PART. I
CIVIL ENGINEERING OCT. 1978, 71-75 pp.
12. ILLSTON, J. M.. " THE CREEP OF CONCRETE UNDER UNIAXIAL TENSION "
MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH, VOL. 17 No. 50, MARCH. 1975, 77-84 pp.
13. HSU, THOMAS T. C., FLOYD O., STURMAN GERALD M. AND WITER GEORGE.
" MICROCRACKING OF PLIN CONCRETE AND THE SHEP OF STRESS-STRAIN CURVE "
ACI JORNAL, PROC. VOL. 60 No. 2, FEB. 1963, 209-224 pp.
14. EVANS, R. H., AND MARATHE, M. S.
" MICROCRACKING AND STRESS-STRAIN CURVE OF CONCRETE IN TENSION "
MATERIALS AND STRUCTURES RESEARCH AND TESTING (PARIS), VOL. No. 1 ENERO
1968, PAGES. 61-64.

PRODUCTO TIPO	ADHERENCIA (Kg/cm ²)	COMPRESION (Kg/cm ²)	TENSION (Kg/cm ²)
1	152.45	746.20	84.42
2	149.52	477.00	46.80
3	102.82	-----	-----

Tabla 1. Valores de esfuerzos obtenidos en diferentes pruebas de acuerdo a la A.S.T.M.

PRODUCTO TIPO	CARGA CICLICA (TON.)		CARGA ALTERNADA (TON.)		CARGA SOSTENIDA (TON.)
	CARGA MAXIMA ALCANZADA	CARGA AL MOMENTO DE LA FALLA	CARGA MAXIMA ALCANZADA	CARGA AL MOMENTO DE LA FALLA	
	1	5.00	3.60	5.30	
2	5.40	5.00	5.00	5.00	5.00
3	5.30	4.60	5.50	5.20	5.30

Tabla 2. Variación de la resistencia de acuerdo con el tipo de carga

PRODUCTO TIPO	TIPO DE CARGA					
	CICLICA		ALTERNADA		SOSTENIDA	
	DESPLAZAMIENTO EN LOS PRIMEROS CICLOS DE CARGA --	DESPLAZAMIENTO MAXIMO --	DESPLAZAMIENTO EN LOS PRIMEROS CICLOS DE CARGA --	DESPLAZAMIENTO MAXIMO --	VELOCIDAD DE FLUJO EN EL PRIMER NIVEL DE CARGA -- kg	VELOCIDAD DE FLUJO EN EL SEGUNDO NIVEL DE CARGA -- kg
1	0.17	2.54	0.20	4.52	0.0012	0.0012
2	0.21	2.30	0.07	1.44	0.0114	0.0290
3	0.45	7.54	0.08	1.98	0.0019	0.0100

Tabla 3. Efectos del tipo de carga en el desplazamiento

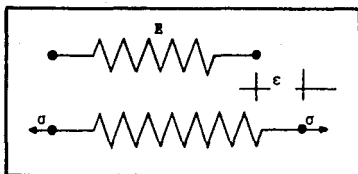


Fig. 1 Modelo analógico de un cuerpo elástico

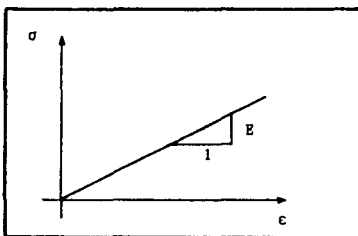


Fig. 2 Curva esfuerzo-deformación de un cuerpo elástico

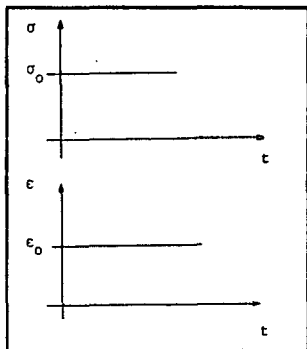


Fig. 3 Cuerpo elástico sometido a un esfuerzo σ_0 constante con el tiempo

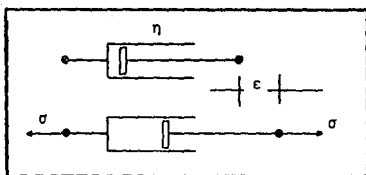


Fig. 4 Modelo analógico de un cuerpo viscoso

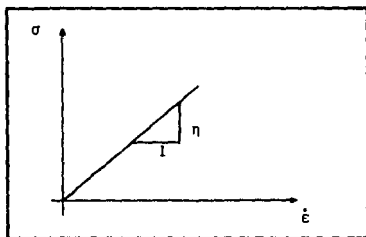


Fig. 5 Curva esfuerzo velocidad de deformación de un cuerpo viscoso

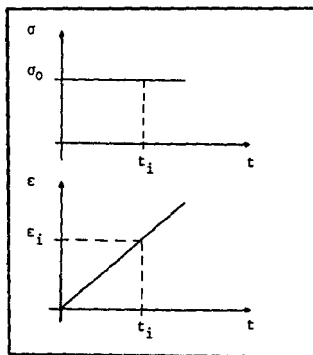


Fig. 6 Cuerpo viscoso sometido a un esfuerzo σ_0 constante con el tiempo

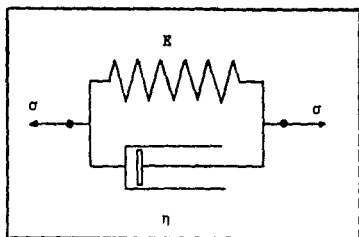


Fig. 7 Modelo de Kelvin

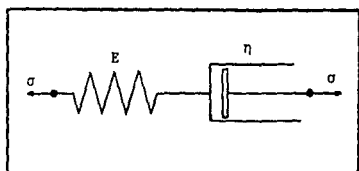


Fig. 8 Modelo de Maxwell

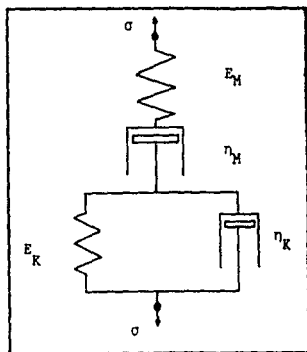


Fig. 9 Modelo de Burgers

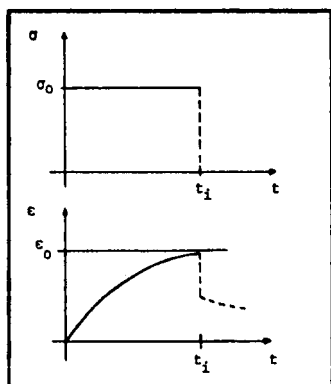


Fig. 10 Deformación de un cuerpo de Kelvin sometido a un esfuerzo constante σ_0

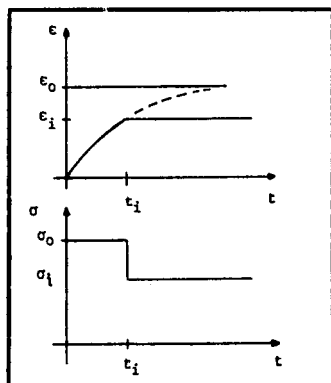


Fig. 11 Reducción de esfuerzos en un cuerpo de Kelvin

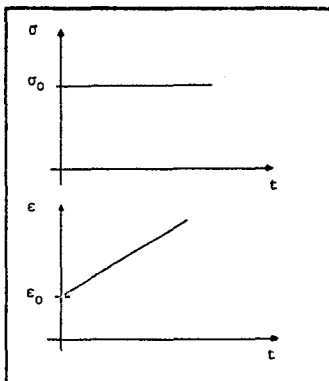


Fig. 12 Deformación de un cuerpo de Maxwell sometido a esfuerzo constante con el tiempo

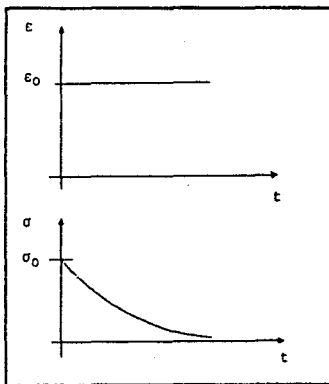


Fig. 13 Reducción (relajación) de los esfuerzos en un cuerpo de Maxwell, bajo una deformación constante en el tiempo

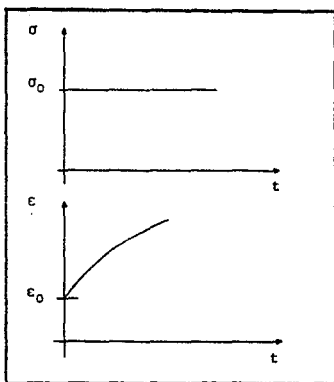


Fig. 14 Variación de la deformación en un cuerpo de Burgers para un esfuerzo constante en el tiempo

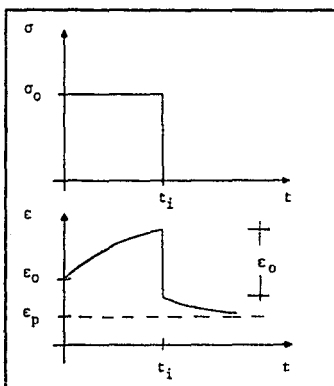


Fig. 15 Variación de la deformación de un cuerpo de Burgers ante una descarga total

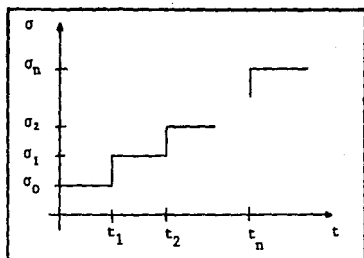


Fig. 16 Historia escalonada de tensiones como una función discreta en el tiempo

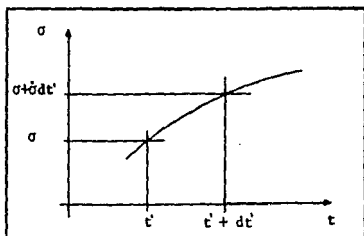


Fig. 17 Historia de tensiones arbitraria como una función continua en el tiempo

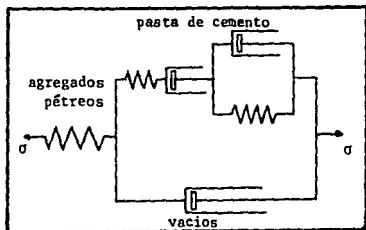


Fig. 18 Modelo reológico propuesto por Hansen para el concreto

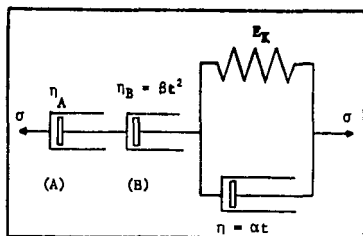


Fig. 19 Modelo reológico propuesto por Flügge para el concreto

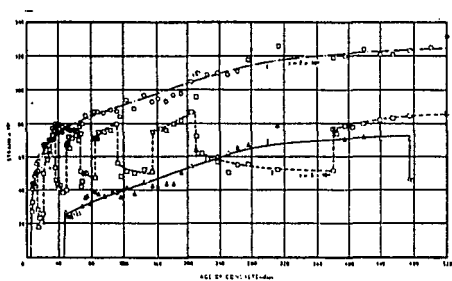


Fig. 20 Flujo (creep) en concreto de diferentes edades, en tensión

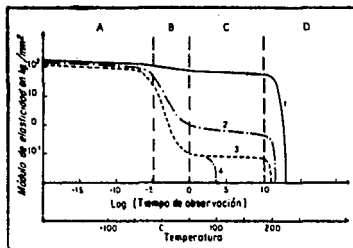


Fig. 21 Variación del módulo de elasticidad con el logaritmo del tiempo de observación o con la temperatura

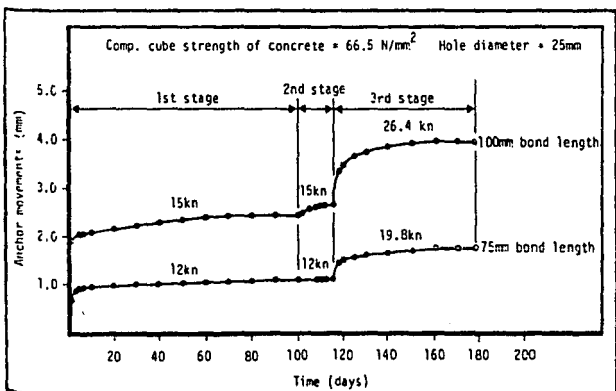
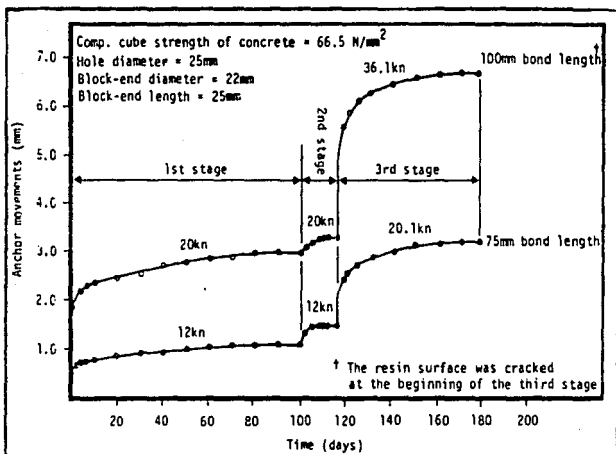


Fig. 22 Ensayes de fluencia en anclajes con resinas epoxicas

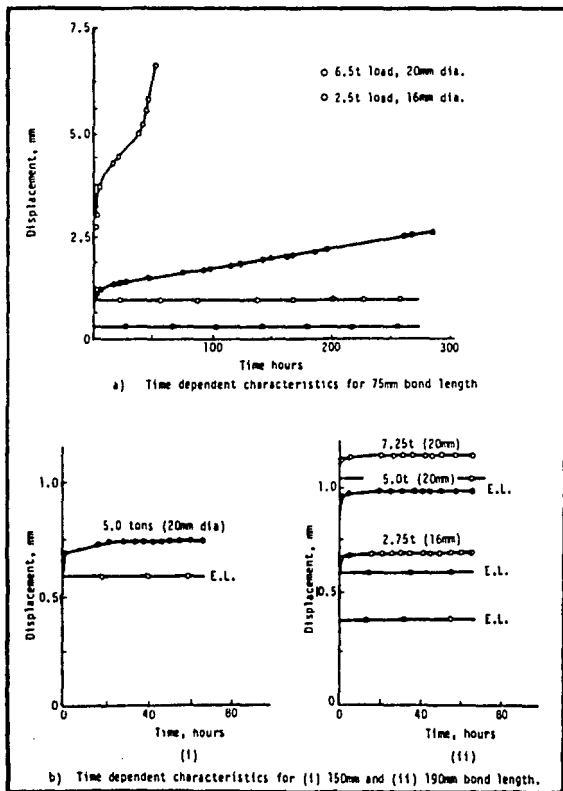


Fig. 23 Ensayes de fluencia en anclajes con resinas epóxicas para diferentes longitudes de anclaje

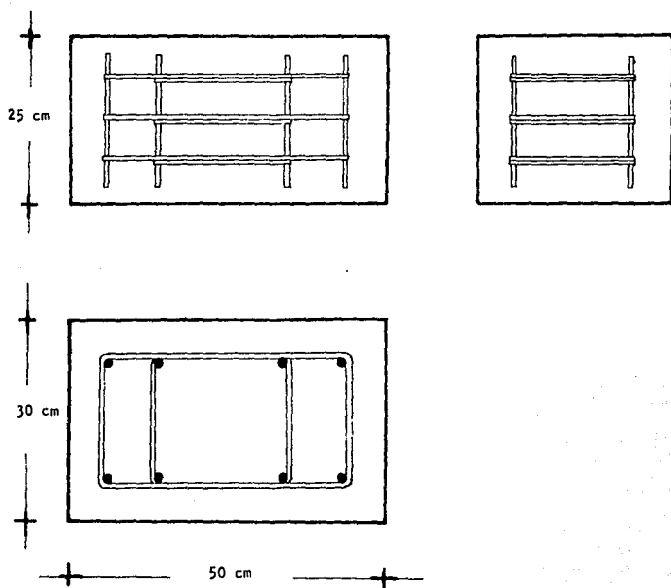
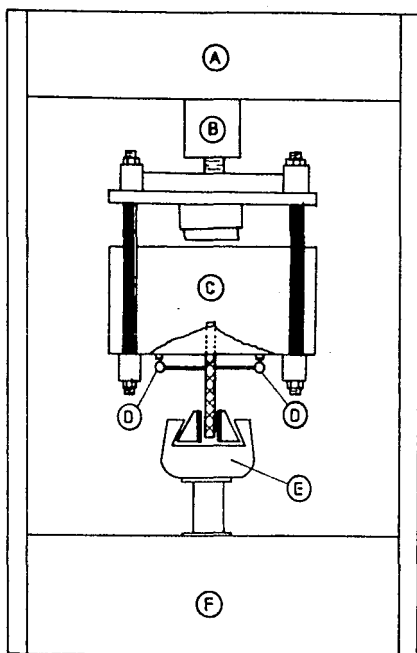


Fig. 24 Dimensiones y distribución del acero de refuerzo en los especímenes



- (A) MARCO DE CARGA
- (B) CELDA DE CARGA
- (C) ESPECIMEN CON VARILLA ANCLADA
- (D) MICROMETROS
- (E) MORDAZAS
- (F) ACTUADOR ESTÁTICO Y DINÁMICO

Fig. 25 Esquema de la máquina de ensayos (M.T.S.)

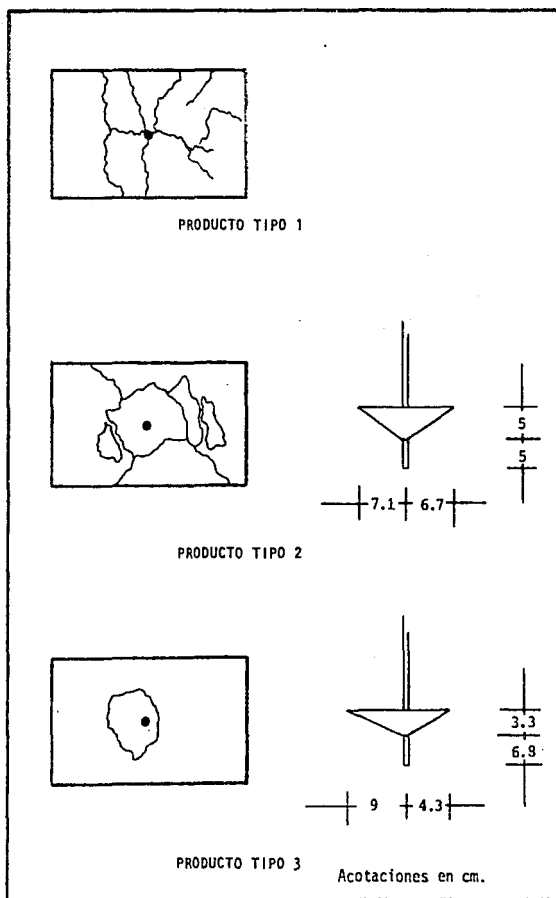


Fig. 26 Configuración de los modos de falla de varillas ancladas en concreto reforzado bajo carga cíclica

PRODUCTO 1

Carga Cíclica

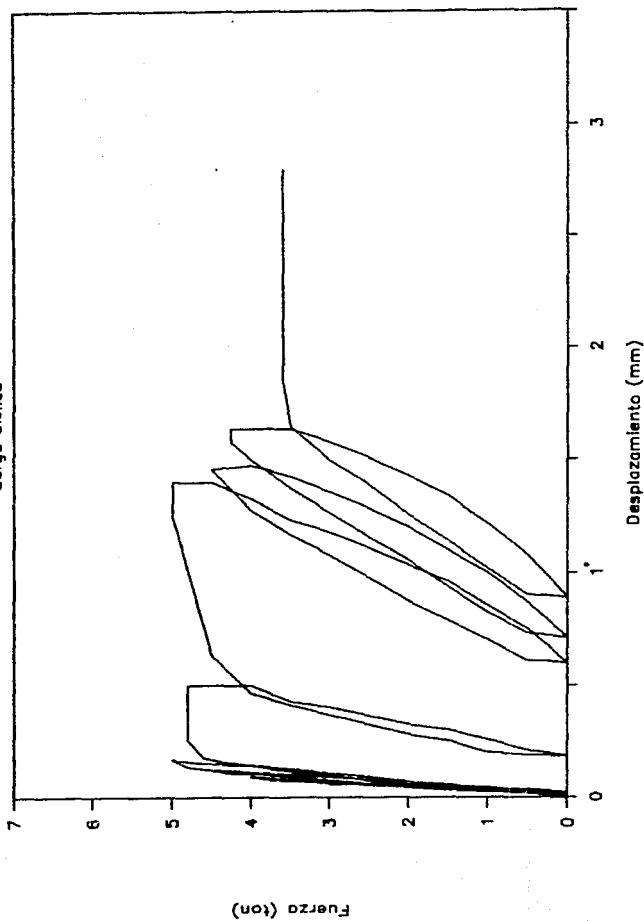


Fig 27. Comportamiento del anclaje ante cargas cíclicas

PRODUCTO 2

Carga Cíclica

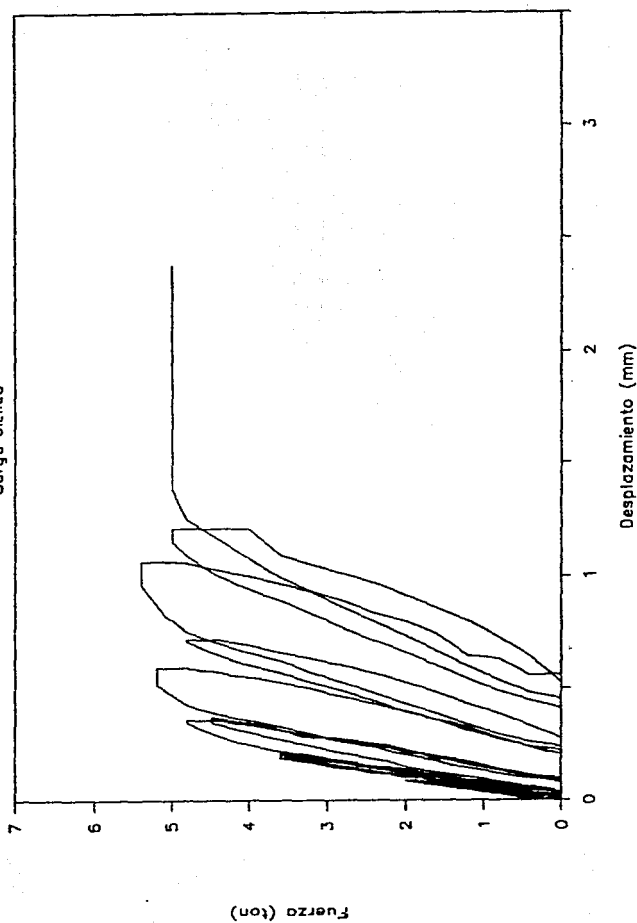


Fig 28. Comportamiento del anclaje ante cargas cíclicas

PRODUCTO 3

Carga Cíclica

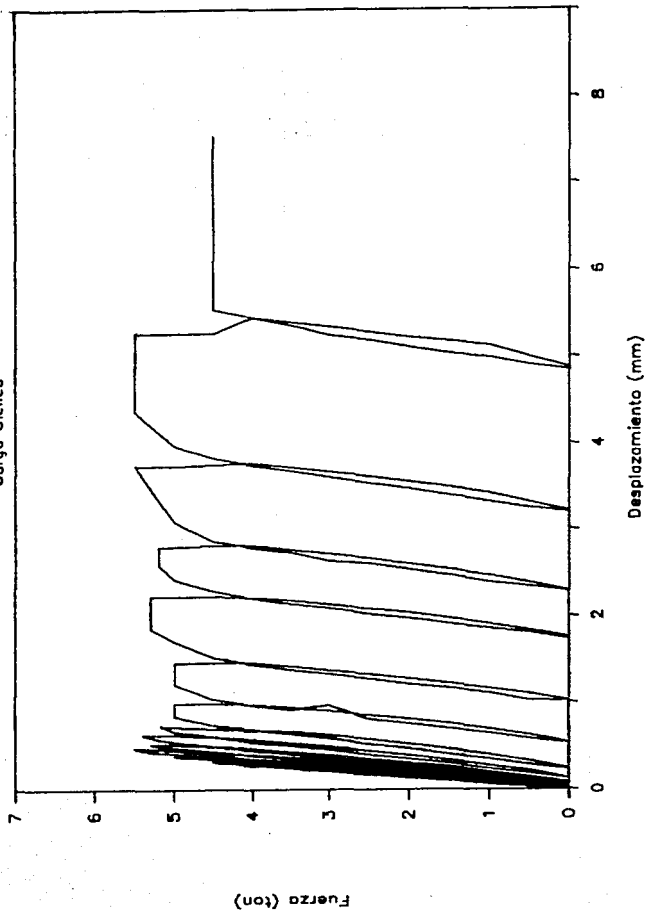


Fig 29. Comportamiento del anclaje ante cargas cíclicas

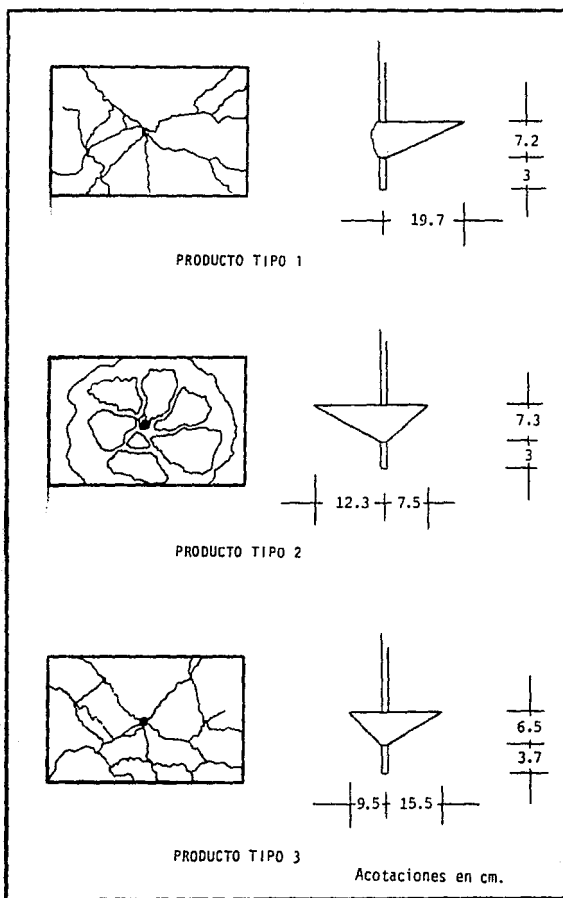


Fig. 30 Configuración de los modos de falla de varillas ancladas en concreto reforzado bajo carga alternada

PRODUCTO 1

Carga Alternada

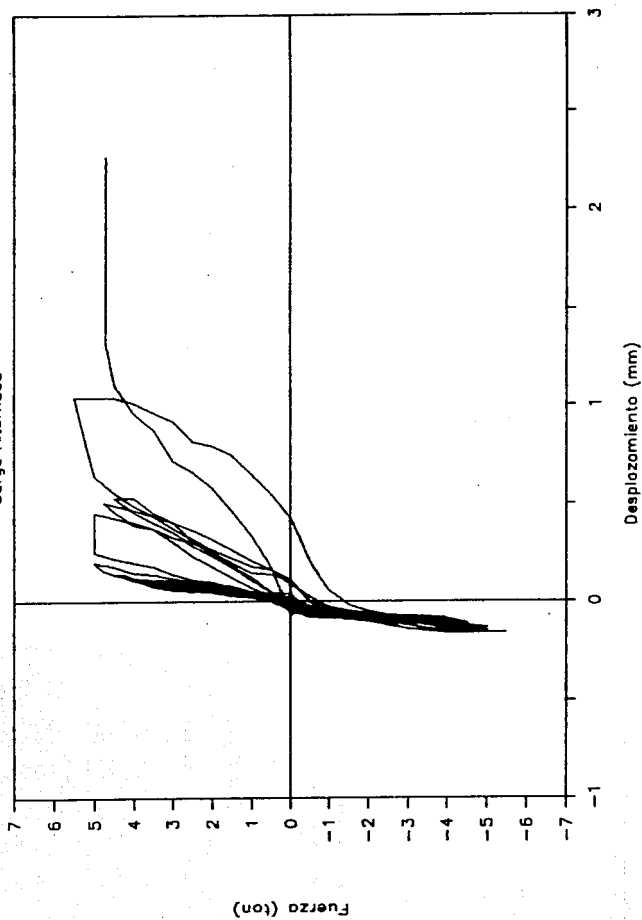


Fig 31. Comportamiento del anclaje ante cargas alternadas

PRODUCTO 2

Carga Alternada

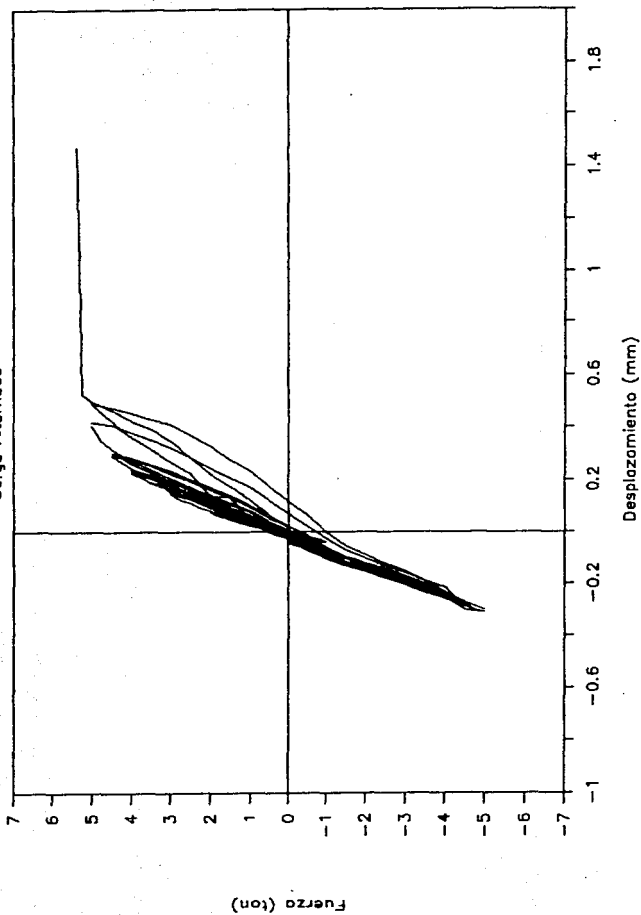


Fig 32. Comportamiento del anclaje ante cargas alternadas

PRODUCTO 3

Carga Alternada

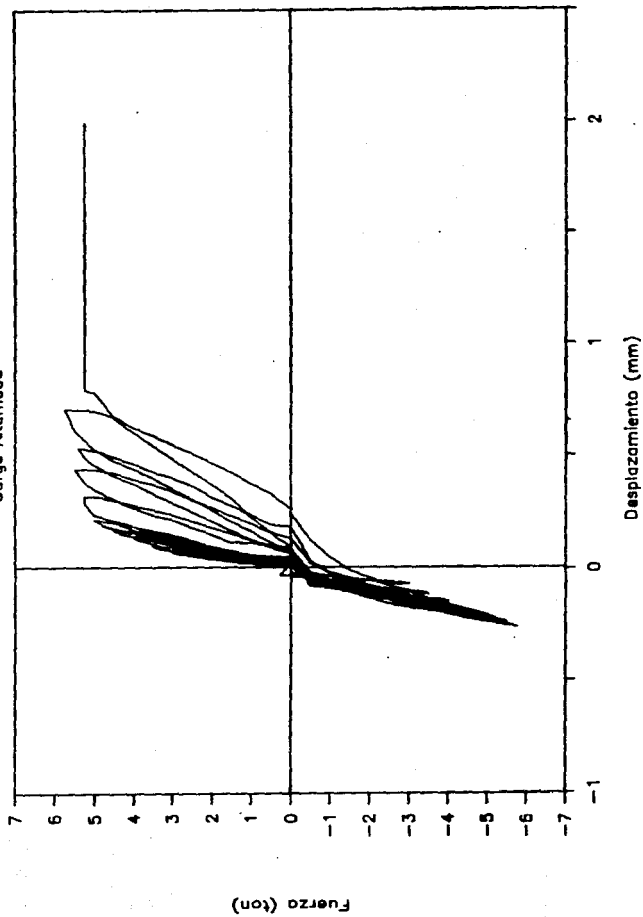


Fig 33. Comportamiento del anclaje ante cargas alternadas

PRODUCTO NUM. 1

CARGA MÁXIMA

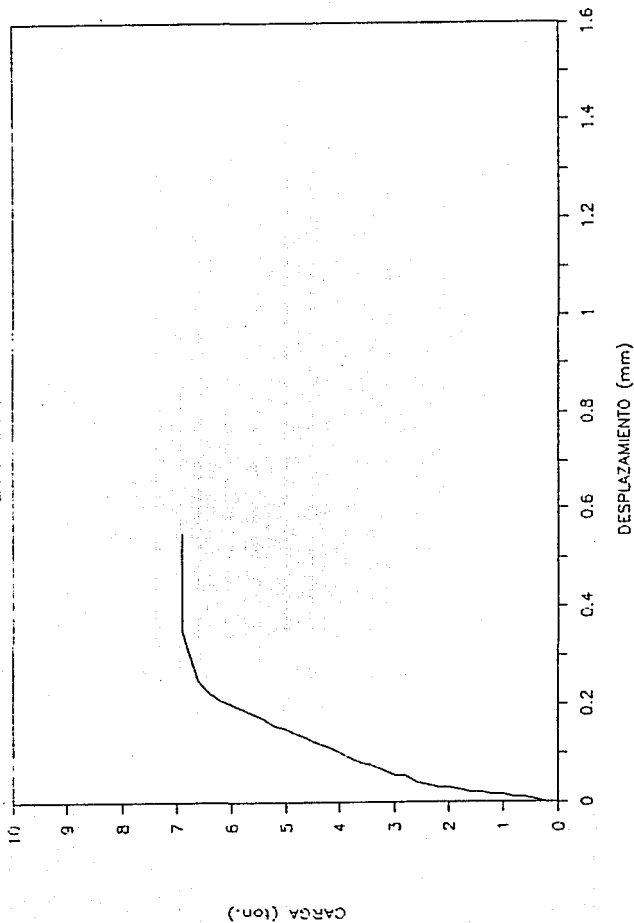


Fig. 34 Curva carga-desplazamiento de varillas ancladas en concreto reforzado

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

PRODUCTO NUM. 3

CARGA MAXIMA

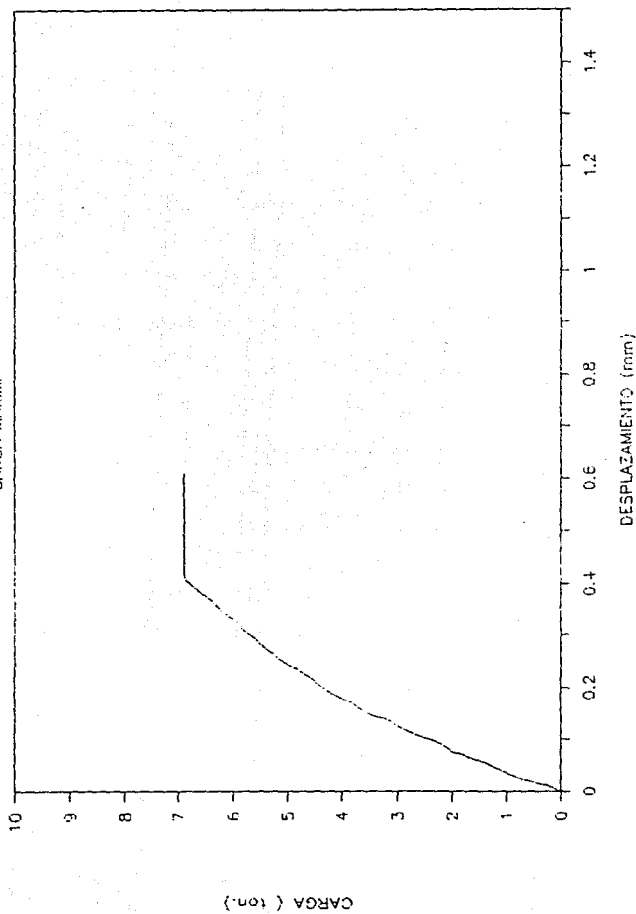
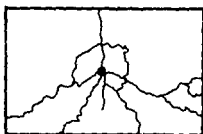
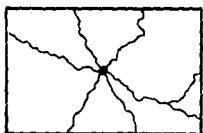


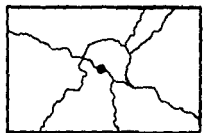
Fig. 35 Curva carga-desplazamiento de varillas ancladas en concreto reforzado



PRODUCTO TIPO 1



PRODUCTO TIPO 2



PRODUCTO TIPO 3

Fig. 36 Configuración de los modos de falla de varillas ancladas en concreto reforzado bajo carga sostenida

PRODUCTO NUM. 1 CARGA SOSTENIDA

60 % y 75 % DE LA CARGA MAX.

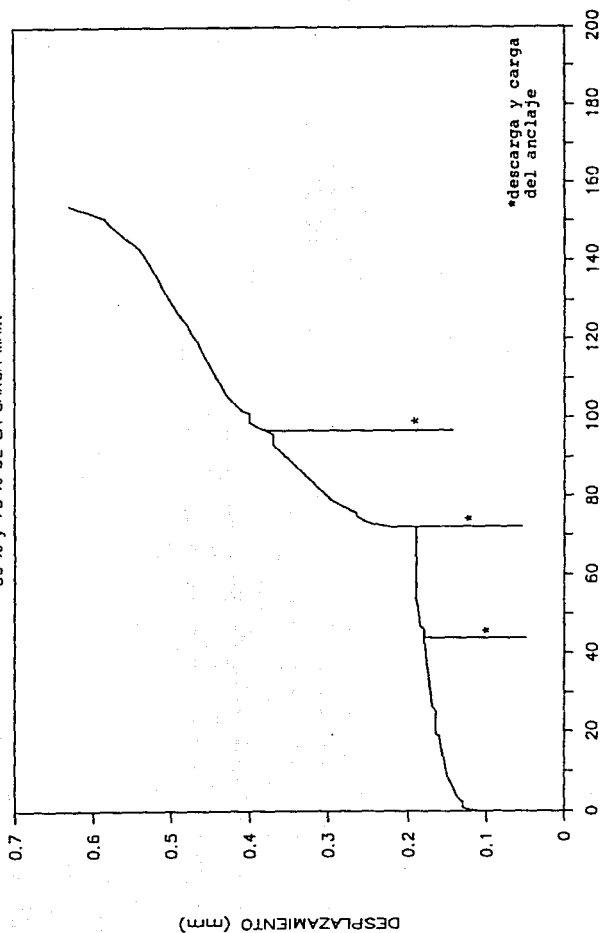


Fig 37. Variación del desplazamiento para dos niveles de carga sostenida

PRODUCTO NUM. 2 CARGA SOSTENIDA

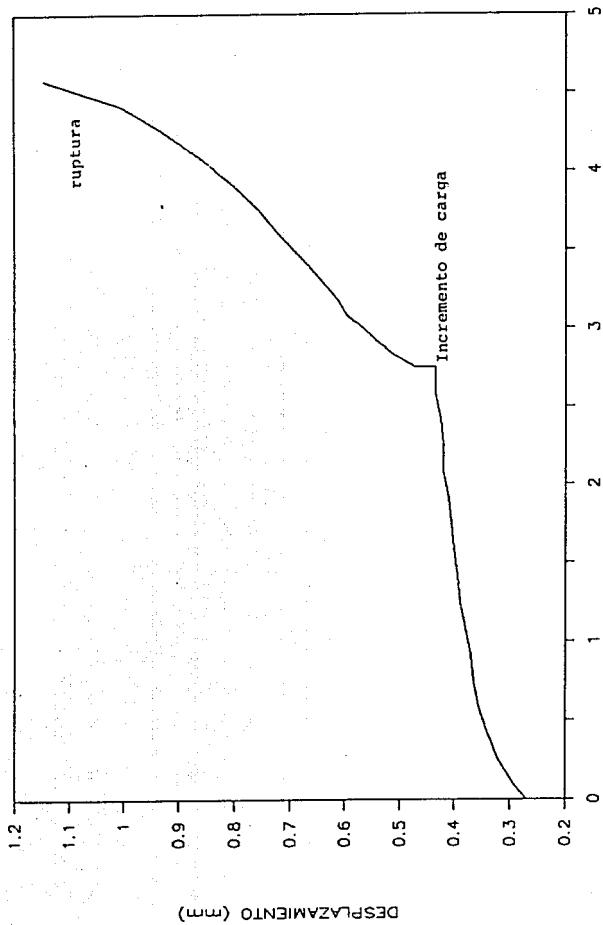


Fig 38. Variación del desplazamiento para dos niveles de carga

PRODUCTO NUM.3 CARGA SOSTENIDA

60 % y 75 % DE LA CARGA MAX.

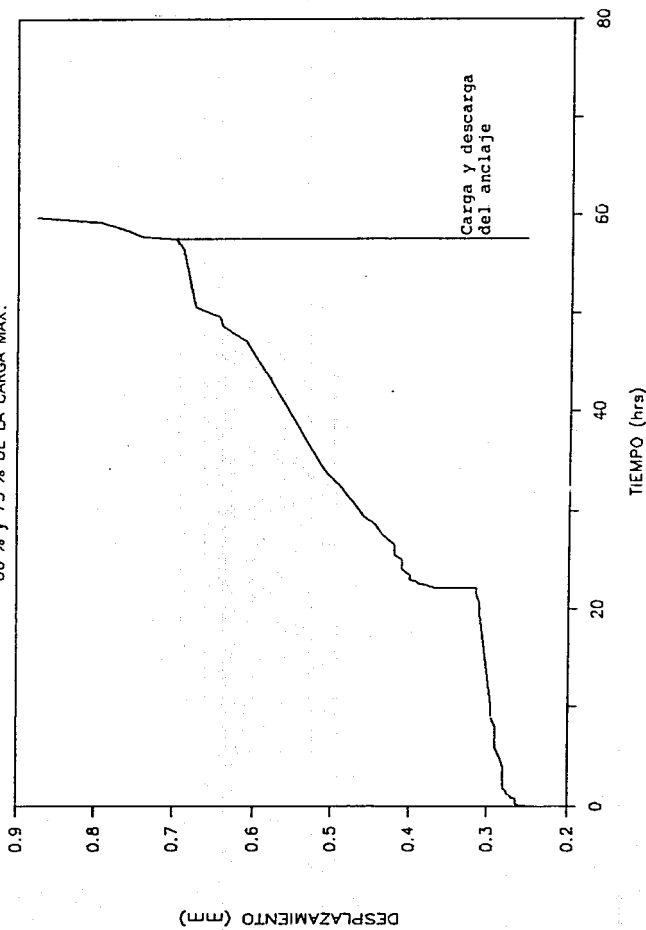


Fig 39. Variación del desplazamiento relativo del anclaje para dos niveles de carga

PRODUCTO NUM. 3 CARGA SOSTENIDA

50% Y 75% DE LA CARGA MÁXIMA

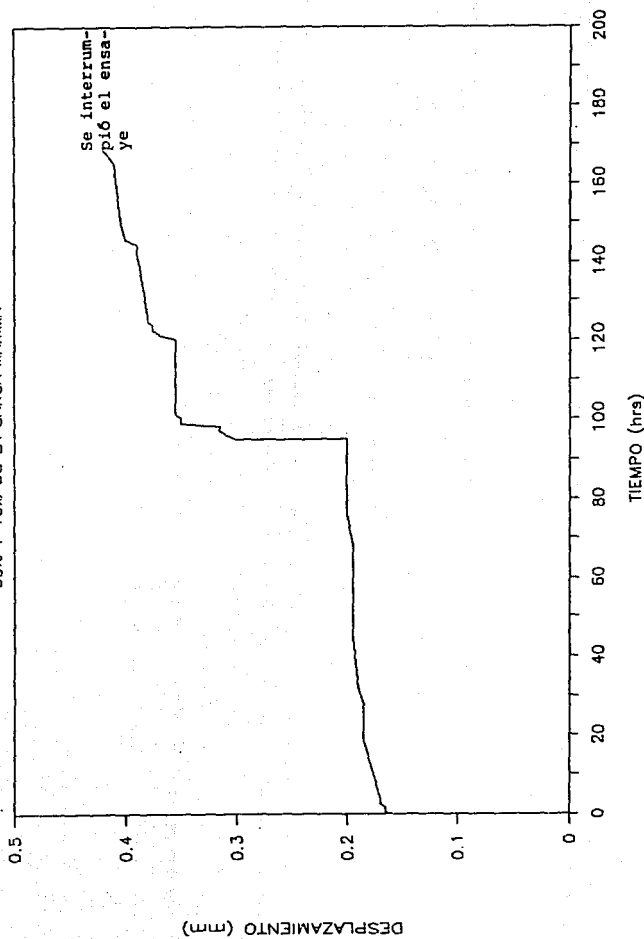


Fig 40. Variación del desplazamiento relativo del anclaje para dos niveles de carga

CARGA SOSTENIDA

50% Y 75% DE LA CARGA MÁXIMA

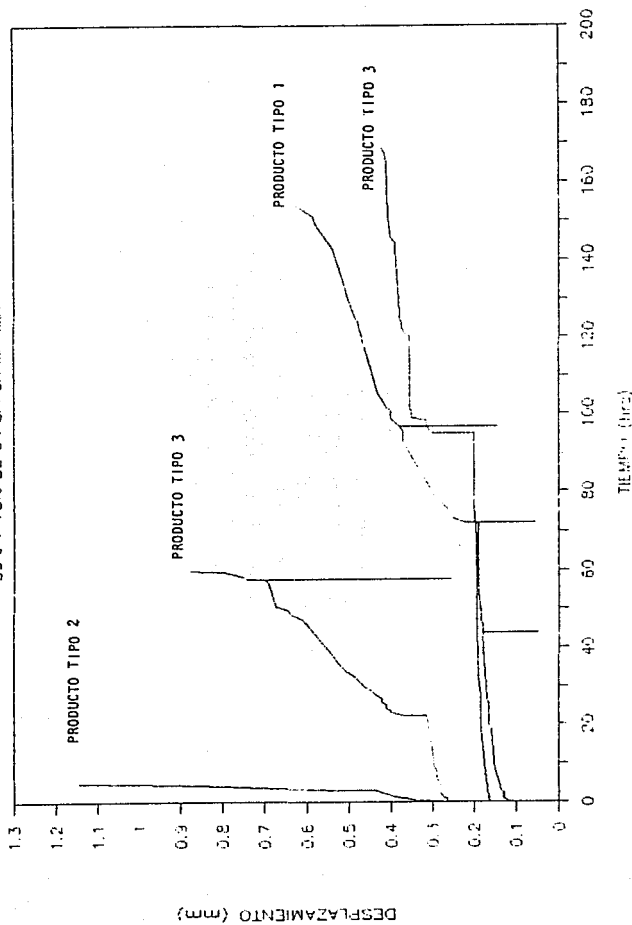


Fig. 41 Comportamiento en el tiempo de varillas ancladas con resinas epóxicas ante la acción de una carga constante

PRODUCTO NUM. 1

CARGA MÁXIMA Y SOSTENIDA

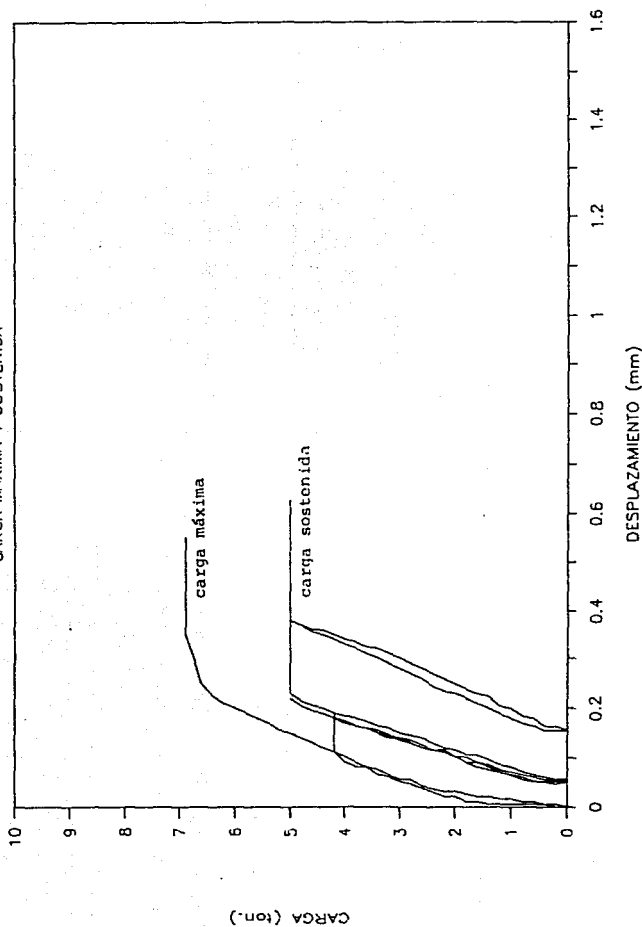


Fig 42. Comparación de la respuesta del anclaje ante cargas estáticas y cargas sostenidas

PRODUCTO NUM. 3

CARGA MÁXIMA Y SOSTENIDA

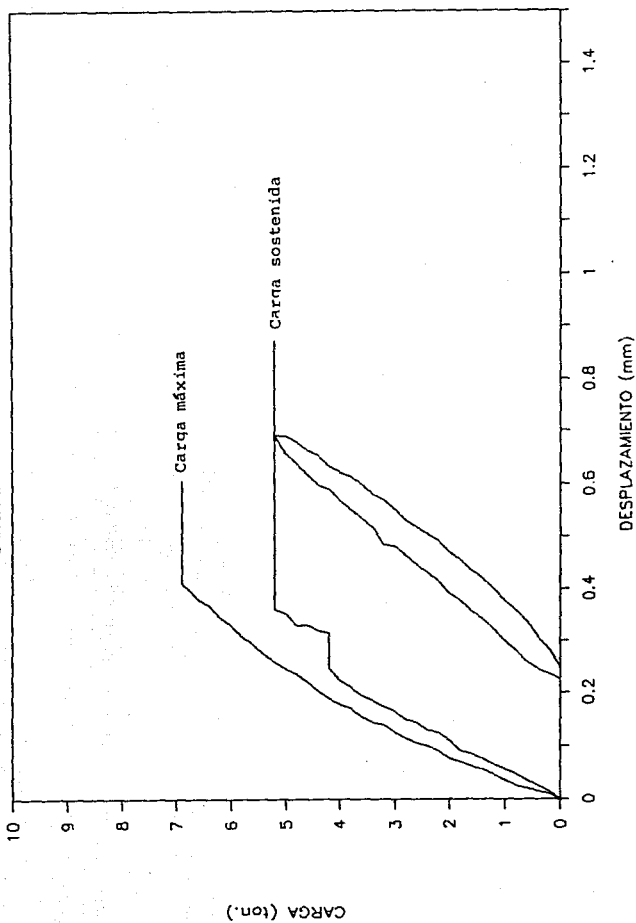


Fig 43. Respuesta carga-desplazamiento para dos tipos de carga