

37  
28j

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



DETERIODO DEL CONCRETO SIMPLE ANTE  
CICLOS DE CARGA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

FRANCISCO HUGO CELESTINO GONZALEZ

México, D. F.

1987



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

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

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

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

# I N D I C E

	pag.
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1 ESTADO DEL ARTE	3
CAPITULO 2 METODOLOGIA DEL ENSAYE	8
2.1 Materiales y mezclas	8
2.1.1 Características de los materiales utilizados	8
2.1.2 Diseño de la mezcla de concreto	9
2.2 Diseño de los experimentos	11
2.2.1 Variables	11
2.2.1.1 Resistencia a compresión	11
2.2.1.2 Módulo de elasticidad estático	12
2.2.1.3 Velocidad de propagación de pulso	12
2.2.1.4 Frecuencia fundamental de resonancia	13
2.2.2 Diseño de los especímenes	15
2.3 Etapa experimental	15
2.3.1 Colados	15
2.3.1.1 Primera etapa	15
2.3.1.2 Segunda etapa	16
2.3.2 Curado	16
2.3.3 Procedimiento de ensaye	16
CAPITULO 3 RESULTADOS DE ENSAYES	23
3.1 Presentación de resultados	23
3.2 Influencia del tamaño de los especímenes en	

los parámetros estudiados	24
3.3 Interpretación de resultados	25
3.3.1 Concreto andesítico	26
3.3.1.1 Resistencia a compresión	26
3.3.1.2 Módulo de elasticidad estático	26
3.3.1.3 Módulo de elasticidad dinámico	27
3.3.1.4 Velocidad de propagación de pulso	28
3.3.1.5 Coeficiente de amortiguamiento	28
3.3.2 Concreto calizo	29
3.3.2.1 Resistencia a compresión	29
3.3.2.2 Módulo de elasticidad estático	29
3.3.2.3 Módulo de elasticidad dinámico	31
3.3.2.4 Velocidad de propagación de pulso	31
3.3.2.5 Coeficiente de amortiguamiento	32
3.3.2.6 Deformación unitaria permanente	32
3.3.3 Analogías con estudios anteriores	33
3.3.4 Respuesta a la fatiga	34
CAPITULO 4 CONCLUSIONES	35
REFERENCIAS	
TABLAS	
FIGURAS	

## INTRODUCCION

Para los ingenieros dedicados al análisis y diseño de estructuras es una preocupación permanente conocer cada vez mejor el comportamiento de las estructuras ante cargas cíclicas, sobretodo si están situadas en zonas urbanas de alto riesgo sísmico. Para que los modelos matemáticos representen el comportamiento real de las estructuras, es necesario que tomen en cuenta las propiedades de los materiales empleados en su construcción, así como los cambios que experimentan estas propiedades al estar sometidos los materiales a la acción de cargas repetidas.

En países como México con situación económica difícil, es común utilizar el concreto reforzado para construir la mayor parte de las estructuras, dado que resulta económicamente ventajoso el empleo de este material sobre otros, como podría ser el acero estructural.

A raíz de los sismos de septiembre de 1985 y como

consecuencia de los daños observados, se agudizó el interés en conocer como se comportan los citados materiales ante ciclos de carga y esta preocupación condujo a realizar el trabajo "Deterioro del concreto simple ante ciclos de carga" que se presenta como tesis.

El objetivo del estudio es determinar el efecto que tiene en la resistencia a compresión y en la rigidez del concreto simple la repetición de cargas, baja en número pero alta en intensidad, similares a las que un sismo puede introducir en una estructura.

En la primera etapa se estudia el comportamiento del concreto fabricado con agregados andesíticos y en la segunda se compara el comportamiento del concreto con agregados andesíticos respecto al concreto fabricado con agregados calizos.

En el capítulo 1 se citan algunos resultados obtenidos en otros estudios; con ellos se pretende ilustrar el avance logrado en este campo hasta la fecha.

En el capítulo 2 se describen en forma detallada las propiedades de los materiales utilizados en la fabricación de los concretos. Así mismo se plantean las variables que se consideran en el estudio y se cita el procedimiento seguido en los ensayos correspondientes a la primera y segunda etapas de pruebas.

En el capítulo 3 se hace la presentación e interpretación de los resultados correspondientes a cada una de las etapas en que se dividió el trabajo.

Finalmente en el capítulo 4 se presentan las conclusiones obtenidas.

## 1. ESTADO DEL ARTE

Se han realizado estudios sobre el comportamiento del concreto simple y reforzado ante ciclos de carga, a diferentes niveles de esfuerzo.

La mayor parte de ellos están encaminados a determinar la vida a la fatiga, tanto del concreto simple como del reforzado; solo en algunos casos se registran resultados intermedios que pudieran ser comparados con los obtenidos en este trabajo ( Refs 1 a 5 ).

Se ha encontrado, a través de experimentos realizados sobre especímenes de concreto simple, sometidos a 5 y 20 ciclos de carga para diferentes niveles de esfuerzo de compresión uniaxial, que existe un "límite de fractura" situado entre 88 y 95 por ciento de la resistencia última bajo carga simple. Dicho límite es muy significativo en el comportamiento del concreto ya que cargas repetidas por abajo del mismo, no alteran su

capacidad de carga determinada por compresión simple, mientras que cargas repetidas por encima de él, dañan su integridad.

Lo anterior se puede reforzar con la siguiente observación: para especímenes sujetos a cargas repetidas por abajo del límite de fractura, el incremento en las deformaciones, ya sea para la carga máxima ó para la mínima, es significativamente menor a medida que aumenta el número de ciclos, mientras que para los especímenes cargados repetidamente por encima de ese límite de fractura, los incrementos en las deformaciones son del mismo orden en magnitud para cada ciclo adicional. Esta diferencia es considerada indicativa de la existencia del límite de fractura. Dicho límite es aproximadamente igual al de la carga crítica determinada tomando en cuenta la expansión del volúmen y el microagrietamiento a través del mortero.

El límite de fractura se observa también en estudios experimentales sobre modelos del micro-comportamiento interno del concreto. También se observa que aunque se presenta agrietamiento en la unión entre el agregado y el mortero para niveles de carga por abajo del límite de fractura, este hecho no reduce la resistencia determinada después de la aplicación de cargas repetidas.

Para el concreto cargado por encima del límite de fractura, se reduce la capacidad de deformación más que la capacidad de resistencia. Así, la existencia del límite de fractura puede restringir la capacidad de rotación disponible de las estructuras de concreto sobrerreforzadas( Ref. 1 ). En otras palabras, como la

capacidad de rotación de las estructuras de concreto sobrerreforzadas está regida por la capacidad de deformación al aplastamiento del concreto (0.003 según las Normas de Concreto), el hecho que se presenten cargas por encima del límite de fractura, conduce a una disminución en dicha deformación y consecuentemente la capacidad de rotación tiende a ser menor.

Por otro lado, ha sido motivo de estudio el comportamiento a la fatiga del concreto, cuando éste se encuentra sumergido en agua. El trabajo incluye un estudio estadístico, en el que los resultados se discuten principalmente en términos de la relación agua/cemento. Estos resultados se comparan con los obtenidos en especímenes ensayados en condiciones ambientes. En condiciones sumergidas se presenta una reducción excesiva en la resistencia a la fatiga, especialmente para relaciones a/c altas. Desde el punto de vista de seguridad contra cargas cíclicas, se recomienda el uso de concreto denso, que tenga una relación a/c tan pequeña como sea posible, congruente con su uso en estructuras marinas ( Ref 2 ).

El agrietamiento del concreto se detecta a través de pruebas hechas con aparatos que se basan en ondas ultrasónicas, sin que se afecte físicamente las propiedades del concreto. Se ha demostrado que la velocidad de propagación de ondas elásticas, se reduce gradualmente a medida que el número de ciclos de carga aumenta. El inicio de esta reducción es anterior a la aparición de grietas visibles. Se puede decir que en los concretos sometidos a cargas cercanas a la de ruptura ó bien a cargas altas

repetidas, la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas se reduce notablemente. Actualmente, solo por medio de la sonimetría se pueden detectar los daños internos que ocurren en el concreto, los cuales corresponden a la microfisuración del mismo.

Una reducción en la resistencia del concreto implica también una reducción en la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas; de esto se puede concluir, que el coeficiente de seguridad en construcciones que presenten este efecto, se encuentra igualmente reducido.

En el caso de construcciones que han sufrido los efectos de movimientos sísmicos, la reducción de velocidad de propagación de ondas en el concreto, es índice de peligrosidad, pues se puede asumir que es evidencia de un agrietamiento originado por cargas repetidas que alcanzan valores próximos a la ruptura del concreto considerado( Ref 3 ).

Otro de los factores que influye en el comportamiento del concreto ante cargas cíclicas, es la frecuencia con la que se presenten las cargas. Esto ya ha sido estudiado por muchos investigadores y una conclusión común es que la frecuencia de carga entre 50 y 900 ciclos por minuto (0.833 y 15 Hertz), tiene poco efecto en la resistencia a la fatiga, siempre y cuando el nivel de esfuerzo máximo sea menor que el 75% de la resistencia estática. Para niveles de esfuerzo mayores, hay una reducción significativa en la resistencia a la fatiga.

Otro efecto en las propiedades del concreto que se debe tomar en cuenta, es el originado por los periodos de suspensión

## 2. METODOLOGIA DEL ENSAYE

### 2.1 Materiales y mezclas

#### 2.1.1 Características de los materiales utilizados

En la fabricación del concreto se emplearon los siguientes materiales:

AGUA

CEMENTO NORMAL ( TIPO I )

GRAVA ANDESITICA

ARENA ANDESITICA

El tamaño máximo de la grava se fijó en 19 mm (3/4"); ésto se hizo con el fin de que dicho tamaño sea menor que la tercera parte de la mínima dimensión del espécimen. Los agregados utilizados se obtuvieron en el banco de materiales "La Guadalupeana".

en la aplicación de las cargas, siendo más significativa la frecuencia con que se suspenden éstas, que la duración del lapso de suspensión.

La deformación lateral también se ve afectada por la aplicación de cargas cíclicas. La relación de Poisson se incrementa con el número de ciclos para todos los especímenes que fallen a la fatiga ( Ref 4 ).

Del mismo modo, se ha encontrado que especímenes de concreto ensayados bajo un estado de esfuerzos biaxial, exhiben una resistencia a la fatiga mayor para cualquier número de ciclos de carga que los probados uniaxialmente.

La respuesta esfuerzo-deformación del concreto es dependiente del nivel de esfuerzos y número de repeticiones de carga, para estados de esfuerzo uniaxial y biaxial, por lo que el estado de esfuerzos es una variable importante en el estudio de las características del concreto a la fatiga ( Ref 5 ).

En el presente trabajo, se explora el comportamiento del concreto a diferentes niveles de esfuerzo, cuando se ensaya uniaxialmente a compresión con un número de ciclos de cargas bajo.

Cabe mencionar que las características de los concretos utilizados en los estudios comentados difieren de las que tienen los concretos fabricados con agregados comunes en el Valle de México, por lo que es de esperarse que las respuestas de estos últimos ante la acción de los ciclos de carga también presenten algunas discrepancias respecto a lo previamente comentado.

Para obtener las propiedades de los agregados, se llevaron a cabo pruebas físicas para determinar granulometrías, densidades (pesos específicos) y pesos volumétricos compactos; principalmente. Adicionalmente, a la arena también se le realizó la prueba de pérdida por lavado.

Cabe señalar que todas las pruebas mencionadas se realizaron de acuerdo con los métodos de prueba especificados en las Normas ASTM para Cemento y Concreto ( Ref 6 ).

En la Tabla 2.1 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a la arena, y en la Tabla 2.2 se hace lo propio para el caso de la grava.

#### 2.1.2 Diseño de la mezcla de concreto

El diseño de la mezcla de concreto se hizo de acuerdo con Prácticas recomendables para dosificar concretos de peso normal-ACI 211.1-70 ( Ref 10 ).

La resistencia a compresión media bajo carga estática fue  $250 \text{ kg/cm}^2$ , el tamaño máximo del agregado, 19 mm (3/4") y el módulo de finura de la arena, 3.05. Las contaminaciones por sub y sobre tamaño de los agregados se pueden observar en las Tablas 2.1 y 2.2.

Una vez hechas todas las consideraciones pertinentes y siguiendo de cerca el procedimiento recomendado, se obtuvo la siguiente dosificación de los materiales, para un metro cúbico de concreto:

AGUA(neta de la mezcla)	191 kg
CEMENTO	308 kg
GRAVA(seca)	777 kg
ARENA(seca)	765 kg

Se considera necesario hacer la siguiente observación. A la dosificación de los materiales antes presentada, se le requirió hacer algunos ajustes, dado que la resistencia a compresión bajo carga estática que se estaba obteniendo, era tal que impedía realizar ensayos a porcentajes altos de la resistencia, debido a la capacidad que tiene la máquina para pruebas dinámicas (MTS) del Instituto de Ingeniería. Solo fueron tres las series que se fabricaron con esta dosificación y correspondieron al 50, 60 y 70 por ciento de  $\bar{f}_c$ , como nivel de esfuerzo máximo, mismas que corresponden a la primera etapa de pruebas.

En los ensayos posteriores, la dosificación empleada fue la que se indica a continuación para fabricar un metro cúbico de concreto:

AGUA(neta de la mezcla)	177 kg
CEMENTO	242 kg
GRAVA(seca)	815 kg
ARENA(seca)	790 kg

Por otro lado, con carácter meramente comparativo, se fabricó una serie con grava caliza. Las propiedades de este material se presentan en la Tabla 2.3 y la dosificación empleada para fabricar un metro cúbico de concreto, se indica a continuación:

AGUA (neta de la mezcla)	183 kg
CEMENTO	251 kg
GRAVA CALIZA (seca)	854 kg
ARENA ANDESITICA (seca)	851 kg

Cabe hacer notar que a excepción de la grava los otros materiales fueron los mismos que se venían utilizando.

## 2.2 Diseño de los experimentos

### 2.2.1 Variables

Los experimentos se diseñaron para obtener los siguientes parámetros: resistencia a compresión bajo carga estática ( $f_c$ ), módulo de elasticidad estático ( $E$ ), velocidad de propagación de pulso (VPP) y frecuencia fundamental de resonancia ( $f_0$ ). A través de estos parámetros se pretende determinar el deterioro que experimenta el concreto cuando se le somete a ciclos de carga.

#### 2.2.1.1 Resistencia a compresión bajo carga estática ( $f_c$ ).

Este parámetro es el menos sensible ante el deterioro del concreto, cuando los niveles de esfuerzo a los que se aplican los ciclos de carga son relativamente bajos. Para determinarlo se siguió el procedimiento recomendado en la norma ASTM C 39-61 ( Ref 6 ).

### 2.2.1.2 Módulo de elasticidad estático (E).-

El procedimiento para determinar este parámetro es el recomendado en la norma ASTM C 469-63 ( Ref 6 ).

### 2.2.1.3 Velocidad de propagación de pulso (VPP).-

Se trata de una prueba no-destructiva que se utiliza para detectar cambios en las propiedades de los materiales y muy favorable para detectar agrietamiento en estructuras de concreto. El equipo utilizado en el estudio fue el V-METER. Dicho equipo consta de un dispositivo de control, con el que se puede determinar el tiempo que tarda una onda sonora en pasar a través del espécimen. La onda sonora es emitida y recibida por unos transductores que se colocan con la orientación correspondiente al sentido para el que se desee hacer la medición (transversal o longitudinal). Por otro lado, se debe medir la distancia que existe entre ambos transductores; a esta distancia se le denomina "longitud de trayectoria de la onda". En el estudio, esta medición se efectuó con la ayuda de un flexómetro con una precisión de un milímetro.

Una vez que se cuenta con estos valores, se procede a calcular la VPP de la siguiente manera:

$$VPP = d/t$$

donde: VPP, velocidad de propagación de pulso ,  $10^6$  cm/s

d, longitud de trayectoria de la onda , cm

t, tiempo de transmisión de la onda ,  $10^{-6}$  s

Dado que la trayectoria que puede seguir la onda sonora entre el emisor y el receptor, es variable; se pueden tener lecturas diferentes del tiempo de recorrido. En este caso, se busca el tiempo mínimo para garantizar que se está leyendo a lo largo de la distancia más corta entre los transductores.

La fundamentación teórica del funcionamiento del equipo, se puede consultar en la Ref 8.

Por otro lado, con este parámetro también se puede obtener el módulo de elasticidad dinámico, a partir de la siguiente expresión( Ref 8 ):

$$ED = ( (\rho(1+\nu)(1-2\nu)) / (g(1-\nu)) ) (VPP^2)$$

donde: ED, módulo de elasticidad dinámico ,  $\text{kg/cm}^2$

$\rho$ , densidad del material ,  $\text{kg/cm}^3$

$\nu$ , módulo de Poisson , 0.15

g, aceleración de la gravedad ,  $\text{cm/s}^2$

VPP, velocidad de propagación de pulso ,  $10^6$  cm/s

#### 2.2.1.4 Frecuencia fundamental de resonancia( $\eta_0$ ).-

Este parámetro se obtuvo con un equipo llamado: E-METER, el cual consta de un dispositivo de control o unidad principal, una mesa estándar y unos transductores. El procedimiento empleado para obtener dicho valor, se ilustra ampliamente en la Ref 9.

A partir de este valor se puede determinar el módulo de elasticidad dinámico(ED) por medio de la siguiente expresión:

$$ED = KW(\eta_0^2)$$

donde: ED, módulo de elasticidad dinámico ,  $\text{kg/cm}^2$   
 W, peso del espécimen seco , kg  
 $\eta_0$ , frecuencia fundamental de resonancia longitudinal  
 , Hertz  
 K,  $519.4 \times 10^{-5} (\text{L/d}^2)$  ,  $\text{s}^2/\text{cm}^2$   
 L, longitud del espécimen , cm  
 d, diámetro del espécimen , cm

Otro valor que se puede obtener con el uso de este equipo, es el coeficiente de amortiguamiento ( $\xi$ ). Para esto, adicionalmente a  $\eta_0$ , habrá que determinar otras dos frecuencias ( $\eta_1$  y  $\eta_2$ ), que son la frecuencia mayor y menor respectivamente, correspondientes al 70.7 por ciento de la amplitud fundamental de resonancia, Fig 2.1( Ref 7 ).

Una vez obtenidos estos valores, se determina el coeficiente de amortiguamiento de la siguiente manera:

$$\xi = (\eta_1 - \eta_2) / \eta_0$$

donde:  $\xi$ , coeficiente de amortiguamiento , %  
 $\eta_0$ , frecuencia fundamental de resonancia , Hertz  
 $\eta_1$ , frecuencia de vibración mayor, Fig 2.1 , Hertz  
 $\eta_2$ , frecuencia de vibración menor, Fig 2.1 , Hertz

Estos dos parámetros, ED y  $\xi$ , sirven de gran ayuda para observar el deterioro del concreto, después de haber aplicado los ciclos de carga a los especímenes. Cabe señalar, que el amortiguamiento es más sensible que el módulo de elasticidad dinámico ante el deterioro; esto es, con el primero se puede

observar el deterioro aunque éste sea incipiente.

## 2.2.2 Diseño de los especímenes

En el estudio, se manejan tres tamaños de especímenes, a saber: 7.5x15 cm, 10x20 cm y 15x30 cm.

Los especímenes más pequeños y los más grandes se consideran para observar el efecto del tamaño en los resultados.

Los de 10x20 cm se usan para la parte medular del estudio; a dichos cilindros se les aplican ciclos de carga, registrando el deterioro que sufren una vez aplicados dichos ciclos. El tamaño de los especímenes quedó condicionado a la capacidad del equipo para pruebas dinámicas con que cuenta el Instituto de Ingeniería, la cual es de 19 ton. Si se toma en cuenta que la resistencia de diseño de la mezcla de concreto es de  $250 \text{ kg/cm}^2$  el tamaño de los cilindros se limita a 10x20 cm, ya que dicha capacidad se excedería para cilindros de mayores dimensiones.

## 2.3 Etapa experimental

### 2.3.1 Colados

#### 2.3.1.1 Primera etapa.-

Por cada serie se colaron 16 cilindros: 2 de 7.5x15 cm, 2 de 15x30 cm y 12 de 10x20 cm.

El llenado de los cilindros se efectuó en tres capas. Cada capa se compactó con 25 penetraciones de barra estándar, siguiendo una espiral de afuera hacia adentro; posteriormente se le dieron 10 golpes por la cara externa del molde, con el fin de eliminar el aire que pudiera quedar atrapado.

#### 2.3.1.2 Segunda etapa.-

Por cada serie se colaron 20 cilindros de 10x20 cm, siguiendo el procedimiento indicado arriba.

#### 2.3.2 Curado

Los cilindros recibieron un curado húmedo por un lapso de 14 días. Después de esto, se sacaron al medio ambiente, para permanecer en esta condición durante 7 días. Finalmente se secaron en un horno a 50°C, durante 7 días.

El tratamiento de secado se le aplicó porque se requería que los especímenes estuvieran en condiciones similares de humedad, ya que ésta afecta la velocidad de propagación de pulso.

#### 2.3.3 Procedimiento de ensaye

Para determinar la velocidad de propagación de pulso (VPP), se requiere que las superficies de contacto entre los transductores y el espécimen, se encuentren lo más uniforme

posible; por ello es necesario preparar las cabezas de los cilindros, limándolas con una piedra esmeriladora. Incluso, para garantizar que el contacto sea el adecuado, se coloca una película de grasa entre el transductor y el espécimen.

Determinado el tiempo de transmisión de la onda con el V-METER y aplicando la fórmula presentada en este capítulo, se procede a calcular la VPP, tomando en cuenta las dimensiones del espécimen.

Para determinar las frecuencias de vibración  $\eta_0$ ,  $\eta_1$  y  $\eta_2$ , se utiliza el E-METER y se sigue el procedimiento que a continuación se indica:

- a) Se varía la frecuencia de vibración del espécimen, hasta que se presente la amplitud pico en el medidor, misma que corresponde a la frecuencia fundamental de resonancia ( $\eta_0$ ).
- b) Se ajusta el control de ganancia del medidor de entrada, hasta que la lectura indique que esta amplitud corresponde al 100% de la ganancia.
- c) Usando el control de frecuencia más fino, se incrementa la misma hasta que la lectura corresponda al 70.7 por ciento de la amplitud fundamental de resonancia, registrando esta frecuencia como  $\eta_1$ . Se disminuye la frecuencia hasta que se obtenga el valor correspondiente al 70.7 por ciento de la amplitud fundamental de resonancia, solo que ahora por abajo de la frecuencia fundamental y se registra el valor de la frecuencia como

$n_2$ , Fig 2.1.

En este caso, se aprovecha la preparación hecha en el paso anterior.

El siguiente paso consiste en la aplicación de las cargas cíclicas a compresión, ya sea en forma manual ó automatizada. Previamente a ello, se procedió a cabecear los cilindros con el método usual (azufre fundido) y en todos los casos se espera entre 2 y 3 horas, antes de iniciar el ensaye.

El ensaye a compresión bajo carga estática, se realiza siguiendo el procedimiento recomendado en la norma ASTM C 39-61, haciendo uso de una máquina universal. Dicha máquina cuenta con un dispositivo, el cual permite obtener la gráfica esfuerzo-deformación para cilindros de 10x20 cm y 15x30 cm y consecuentemente, el módulo de elasticidad estático. En el caso de los cilindros de 7.5x15 cm, se hace uso de un marco acondicionado con micrómetros para registrar las deformaciones. Al efectuar el ensaye a compresión, se aplican precargas, teniendo cuidado en no exceder el 40 por ciento de la carga máxima probable, con objeto de que la deformación del espécimen sea uniforme, lo cual se logra cuando los micrómetros representen el mismo fenómeno de compresión y las lecturas sean similares. Después se llevan a la falla, tomando lecturas en los micrómetros a cada 500 kg, hasta alcanzar 6 ton y a partir de entonces, a cada tonelada hasta la falla.

A partir de la resistencia obtenida en los cilindros testigos, se determinan los niveles de esfuerzo requeridos en

cada caso. Se toma como límite superior, el que corresponde al nivel de esfuerzo en estudio, mientras que el límite mínimo fue siempre el 10 por ciento de la resistencia a compresión, obtenida de los especímenes testigos en cada caso. Esto fija la amplitud de los ciclos. El hecho de que haya un límite mínimo y no se produzca la descarga total, obedece a la intención de evitar el probable golpeteo del cabezal de la máquina contra la superficie expuesta del cilindro.

Los cilindros sometidos a 1 y 10 ciclos, se ensayaron manualmente en la máquina universal, a una velocidad de 9 ton/min. Para aplicar 50 y 100 ciclos, se hizo uso del equipo para pruebas dinámicas (MTS) del Instituto de Ingeniería; la frecuencia empleada fue de 0.1 Hertz (6 ciclos/min). Las pruebas de fatiga se realizan a una frecuencia de 8 Hertz (300 ciclos/min).

Para la segunda etapa del estudio, se emplea la máquina universal, con el fin de obtener gráficas esfuerzo-deformación de todos los ciclos hasta completar 100.

Con el propósito de tener un registro de la forma en que se agrietan los cilindros, se toman fotografías en las que se puede observar la trayectoria de la grieta, fig 2.2.

Los pasos seguidos en la primera etapa de ensayos se indican a continuación:

- i) Medición de las dimensiones y peso de los especímenes.

- ii) Medición del tiempo de transmisión de la onda y de los valores de  $\eta_0$ ,  $\eta_1$  y  $\eta_2$ .
- iii) Cabeceo de toda la serie.
- iv) Prueba de resistencia a compresión bajo carga estática, obteniendo al mismo tiempo la gráfica esfuerzo-deformación, de los cilindros de 7.5x15 cm, 15x30 cm y dos testigos de 10x20 cm.
- v) Aplicación de un ciclo de carga con el nivel de esfuerzo máximo que corresponda a dos cilindros de 10x20 cm.
- vi) Aplicación de 10 ciclos de carga al mismo nivel de esfuerzo, a otros dos cilindros de 10x20 cm.
- vii) Aplicación de 50 ciclos de carga al mismo nivel de esfuerzo, a otros dos cilindros de 10x20 cm.
- viii) Aplicación de 100 ciclos de carga al mismo nivel de esfuerzo, a otros dos cilindros de 10x20 cm.
- ix) Prueba de fatiga al mismo nivel de esfuerzo, a los dos últimos cilindros.
- x) Eliminación del cabeceo, de los cilindros previamente sometidos a 1, 10, 50 y 100 ciclos de carga, con el objeto de medir el tiempo de transmisión de onda y los valores de  $\eta_0$ ,  $\eta_1$  y  $\eta_2$ ; en estas condiciones.
- xi) Cabeceo y prueba de resistencia a compresión bajo carga estática de estos últimos cilindros, en estas condiciones.
- xii) Toma de fotografías.

xiii) Se repite el procedimiento anterior para cinco series; de tal forma, que a cada serie corresponda un nivel de esfuerzo de 50, 60, 70, 80 ó 90 por ciento, respectivamente.

Para la segunda etapa se modifica ligeramente la secuencia de actividades, quedando como se indica a continuación:

- i) Medición de las dimensiones y peso de los especímenes.
- ii) Medición del tiempo de transmisión de onda y de los valores de  $\eta_0$ ,  $\eta_1$  y  $\eta_2$ .
- iii) Prueba de resistencia a compresión bajo carga estática a 5 cilindros testigos, obteniendo al mismo tiempo la gráfica esfuerzo-deformación.
- iv) Aplicación de 100 ciclos de carga a otros 3 cilindros, con un nivel de esfuerzo igual al 75 por ciento de la resistencia. Simultáneamente se obtiene la gráfica esfuerzo-deformación para cada uno de los ciclos.
- v) Aplicación de 100 ciclos de carga a los otros cuatro grupos restantes de 3 cilindros, con un nivel de esfuerzo igual a 80, 85, 90 y 95 por ciento, respectivamente. Simultáneamente se obtiene la gráfica esfuerzo-deformación para cada uno de los ciclos.
- vi) Eliminación del cabeceo de los cilindros previamente sometidos a ciclos de carga, con el objeto de medir el tiempo de transmisión de onda y los valores de  $\eta_0$ ,  $\eta_1$  y

$n_2$ ; en estas condiciones.

vii) Cabeceo y prueba de resistencia a compresión bajo carga estática de estos últimos cilindros, en estas condiciones.

viii) Toma de fotografías.

Es necesario señalar, que hay casos en los que se puede producir la falla antes de que se cumplan los 100 ciclos, lo cual está en función del nivel de esfuerzo.

### 3. RESULTADOS DE ENSAYES

#### 3.1 Presentación de resultados

Una vez hecha la depuración de los resultados obtenidos en la parte experimental, se presentan éstos en tablas, en las que se relacionan los valores determinados antes y después de la aplicación de los ciclos de cargas. En todos los casos, el subíndice cero significa que el valor se ha determinado antes de la aplicación de las cargas.  $\bar{f}_c$  representa el valor de la resistencia a compresión promedio obtenida a partir de los cilindros testigos.

Las cantidades presentadas, son el promedio de los valores determinados en cilindros compañeros.

En las Tablas 3.1 a la 3.5 se cubre la primera etapa de pruebas. En éstas, se observan resultados que ilustran la influencia de ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo,

en los diferentes parámetros manejados en el estudio, a saber: resistencia a compresión (Tabla 3.1), módulo de elasticidad estático (Tabla 3.2), módulo elástico dinámico (Tabla 3.3), velocidad de propagación de pulso (Tabla 3.4) y coeficiente de amortiguamiento (Tabla 3.5).

La segunda etapa de pruebas se cubre en las Tablas de la 3.6 a la 3.10 y 3.12 a 3.14A. En éstas, se presentan resultados que sirven para comparar el comportamiento ante ciclos de carga de concretos calizos respecto a concretos andesíticos. Esto se logra al observar la influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo, en los parámetros tratados en el estudio, para ambos concretos. Así, la Tabla 3.6 se refiere a la resistencia a compresión, las Tablas 3.7 y 3.7A, al módulo elástico estático; la Tabla 3.8, al módulo elástico dinámico; la Tabla 3.9, a la velocidad de propagación de pulso; la Tabla 3.10, al coeficiente de amortiguamiento. En esta etapa, también se puede observar el comportamiento respecto a la deformación unitaria permanente (Tablas 3.13 a 3.14A).

Tanto para la primera etapa de pruebas como para la segunda, se anexan gráficas correspondientes a cada tabla de resultados ( Figs 3.1 a 3.12 ).

### 3.2 Influencia del tamaño de los especímenes en los parámetros estudiados

Con el fin de determinar la influencia del tamaño de los

especímenes en el valor de los parámetros considerados en el estudio, a continuación se presentan las relaciones obtenidas entre los resultados de los cilindros de 15x30 cm, 7.5x15 cm y los de 10x20 cm, tomando como patrón los valores correspondientes a los cilindros de 15x30 cm.

	$\bar{f}_c$	$E_o$	$ED_o$	$VPP_o$	$\xi_o$
(1)/(2)	1.00	1.00	1.05	1.01	1.18
(1)/(3)	0.99	1.04	1.10	1.03	1.54

- (1), parámetro correspondiente al espécimen de tamaño 15x30 cm  
 (2), " " " " " 10x20 "  
 (3), " " " " " 7.5x15 "

En dichas relaciones se puede ver que los valores de los parámetros determinados en los especímenes de 15x30 cm y los obtenidos en los especímenes de 10x20 cm, sólo difieren en forma apreciable en el coeficiente de amortiguamiento y en el módulo de elasticidad dinámico. No resulta así para el caso de los especímenes de 7.5x15 cm, donde a excepción de la resistencia a compresión, todos los demás parámetros presentan diferencias significativas. Con ésto se corrobora que el tamaño seleccionado de 10x20 cm, no modifica sustancialmente los parámetros más importantes.

### 3.3 Interpretación de resultados

### 3.3.1 Concreto andesítico

3.3.1.1 Resistencia a compresión.- Se puede observar a través de los resultados, que en cuanto a resistencia a compresión, el concreto simple tiene una respuesta favorable; no siendo así cuando la respuesta se mide en términos de deformaciones.

Es notorio que la resistencia a compresión no se ve afectada por los ciclos de carga, siempre que el número de éstos sea pequeño, aunque el nivel de esfuerzo sea alto (Tabla 3.1). En algunos casos se presentan aumentos en la resistencia y en otros reducciones en la misma, independientemente del nivel de esfuerzo y de la cantidad de ciclos, aunque estas variaciones en ningún caso exceden del 5 por ciento. Aparentemente la variabilidad entre especímenes compañeros, resulta del mismo orden que la influencia de las cargas repetidas en la resistencia, por lo que es poco sensible ante este efecto. En los especímenes probados a fatiga, si el nivel de esfuerzo es menor a 70 por ciento, el concreto es capaz de soportar más de  $2 \times 10^6$  ciclos de carga; incluso presenta una resistencia residual, una vez que se le ha aplicado tal cantidad de ciclos, del orden de 93 por ciento respecto a la resistencia testigo. Para niveles de esfuerzo iguales o mayores al 70 por ciento, los cilindros no alcanzaron los dos millones de ciclos, presentando un decremento en el número de ciclos de acuerdo con el nivel de esfuerzo.

3.3.1.2 Módulo de elasticidad estático.- En cuanto al módulo de

elasticidad estático (Tabla 3.2), se puede observar que para niveles de esfuerzo menores a 80 por ciento de la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad no presenta una tendencia definida, fluctuando entre  $\pm 5$  por ciento del valor del módulo de elasticidad obtenido en los especímenes testigos. Sin embargo, para el 80 por ciento, se nota que con 50 ciclos existe un decremento en el módulo de elasticidad, llegando a ser del orden de 94 por ciento del testigo para 100 ciclos.

Para niveles mayores de esfuerzo, la diferencia ya es notoria y para el nivel de esfuerzo de 90 por ciento, se puede ver que para los cien ciclos, la disminución en el módulo elástico estático es del orden del 50 por ciento.

Para niveles bajos de esfuerzo (menores a 70%), después de aplicarle  $2 \times 10^6$  ciclos de carga al concreto, la disminución en E es del orden del 20 por ciento. Para niveles de esfuerzo iguales ó mayores a 70 por ciento, se produce la falla antes de que se alcancen los dos millones de ciclos.

3.3.1.3 Módulo de elasticidad dinámico.- Con respecto al módulo de elasticidad dinámico (Tabla 3.3), la tendencia a disminuir se presenta tanto a niveles de esfuerzo bajos como altos. Así, se puede decir que para niveles de esfuerzo menores a 80 por ciento del esfuerzo máximo, el comportamiento es semejante independientemente del nivel de esfuerzo, alcanzando un decremento hasta de 10 por ciento a los 100 ciclos. Para 100 ciclos de carga y niveles de esfuerzo de 80 por ciento del

esfuerzo máximo, el decremento es del orden de 15 por ciento, mientras que para el 90 por ciento del esfuerzo máximo, es del 20 por ciento. Para cilindros con dos millones de ciclos y con un nivel de esfuerzo máximo del 50 por ciento, se presenta un deterioro del orden de 20 por ciento, mientras que para el mismo número de ciclos, pero con un nivel de esfuerzo del 60 por ciento, el decremento presentado es de 30 por ciento. Para niveles de esfuerzo mayores, se produce la falla antes de alcanzar los  $2 \times 10^6$  ciclos.

3.3.1.4 Velocidad de propagación de pulso.- La velocidad de propagación de pulso (Tabla 3.4), observa un decremento respecto a los valores testigos del orden de 4 por ciento, para niveles de esfuerzo máximo del 70 por ciento y 100 ciclos de carga. Para niveles de esfuerzo mayores el deterioro llega a ser hasta de 10 por ciento. Para cilindros con  $2 \times 10^6$  ciclos, el deterioro es hasta de 10 por ciento para niveles de esfuerzo máximo del 50 por ciento, mientras que para un nivel de esfuerzo máximo del 60 por ciento, el deterioro llega a ser de 15 por ciento. Para niveles de esfuerzo mayores, se produce la falla antes de que se alcancen los dos millones de ciclos.

La tendencia a disminuir de este parámetro con el nivel de esfuerzo y el número de ciclos, es marcada y se puede observar en la figura 3.4.

3.3.1.5 Coeficiente de amortiguamiento.- El coeficiente de

amortiguamiento (Tabla 3.5), presenta un incremento del orden de 7 por ciento después de 100 ciclos de carga al 50 por ciento del esfuerzo máximo y de 10 por ciento, después de 100 ciclos de carga al 80 por ciento de dicho esfuerzo. Para el 90 por ciento del esfuerzo máximo y 100 ciclos de carga el incremento en el amortiguamiento llega hasta 30 por ciento.

### 3.3.2 Concreto calizo

Se comenta el comportamiento del concreto calizo bajo el efecto de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo y se compara con el del concreto andesítico.

3.3.2.1 Resistencia a compresión.- En la Tabla 3.6 se puede ver que para el concreto calizo, la aplicación de 100 ciclos de carga a niveles de esfuerzo de hasta 90 por ciento, prácticamente no tiene efecto en la resistencia a compresión y que para 95 por ciento de su resistencia, se produce la falla antes de que se alcancen los cien ciclos, en tanto que para los concretos andesíticos los ciclos de carga empiezan a tener efectos a niveles de esfuerzo más bajos y a menor número de ciclos. Por lo anterior se puede decir que aparentemente el concreto calizo es más resistente a las cargas repetidas que el andesítico.

3.3.2.2 Módulo elástico estático.- En la Tabla 3.7 se presenta el efecto de las cargas repetidas en el módulo elástico estático,

en concretos calizos. En este caso, se ve que para niveles de esfuerzo entre 75 y 90 por ciento del esfuerzo máximo, el deterioro es del orden de 42 por ciento y para el 95 por ciento del esfuerzo máximo los cilindros fallaron a los 31 ciclos de carga (Tabla 3.12).

En la Tabla 3.7A se puede ver el comportamiento del módulo elástico estático para concretos andesíticos. En dicha tabla se observa que para niveles de esfuerzo menores o iguales al 85 por ciento del esfuerzo máximo y 100 ciclos de carga se reduce el módulo de elasticidad en 10 por ciento aproximadamente, mientras que para niveles de esfuerzo iguales a 90 por ciento del esfuerzo máximo y 24 ciclos (Tabla 3.12), la reducción en el módulo de elasticidad es de 24 por ciento. Por lo anterior se puede decir que, no obstante que el concreto calizo resulta mucho más rígido que el andesítico para resistencias equivalentes y que tiene más capacidad para soportar los ciclos de carga, cuando se agrieta, la pérdida de rigidez es mucho mayor en el primero. Sin embargo, y a pesar de esta circunstancia, los módulos de elasticidad de los concretos calizos, para igualdad de circunstancias, siguen siendo mayores que los de los concretos andesíticos.

Cabe hacer notar que en la evaluación del módulo de elasticidad se ha empleado el registro gráfico de las curvas esfuerzo-deformación de todos los ciclos, muchas de las cuales se encuentran encimadas por lo que se hace difícil la lectura precisa de las mismas y por tanto los valores presentados pueden tener errores importantes.

3.3.2.3 Módulo elástico dinámico.- En la Tabla 3.8 se puede observar que para ambos concretos el módulo de elasticidad, determinado en forma dinámica, se reduce a medida que el nivel de esfuerzo máximo es más alto. Así, se puede ver que para 100 ciclos de carga y niveles de esfuerzo máximo de 75 a 85 por ciento, el deterioro del concreto calizo varía de 7 a 11 por ciento, en tanto que para los concretos andesíticos la reducción varió entre 13 y 21 por ciento. La tendencia observada en estas pruebas resulta contraria a la que presenta el módulo de elasticidad determinado en forma estática, sin embargo, las pruebas dinámicas no tienen la incertidumbre de los registros de las pruebas estáticas antes señaladas. Por tanto, se puede decir que la rigidez dinámica en los concretos calizos, es mayor que la de los concretos andesíticos, aún después de los ciclos de carga.

3.3.2.4 Velocidad de propagación de pulso.- Al igual que en las otras propiedades del concreto, la velocidad de propagación de pulso se reduce con el número de ciclos y con el nivel de esfuerzo máximo a que es sometido. En la Tabla 3.9 se observa que esta reducción es ligeramente mayor para el concreto andesítico. Después de 100 ciclos la reducción varió de 4 a 7 por ciento para el concreto calizo al pasar los esfuerzos máximos de 75 a 85 por ciento de la resistencia, en tanto que para el concreto andesítico pasó de 7 a 11 por ciento para los mismos niveles de esfuerzos.

Si se toman estas reducciones como indicativas del

microagrietamiento presentado, es evidente que a igualdad de condiciones de carga el concreto andesítico se agrieta más rápidamente.

3.3.2.5 Coeficiente de amortiguamiento.- Antes del ensaye a cargas repetidas el coeficiente de amortiguamiento en concretos calizos es ligeramente menor que el coeficiente correspondiente a los concretos andesíticos. En la Tabla 3.10 se puede observar que mientras los primeros tienen un valor muy cercano a 0.8 por ciento, los segundos alcanzan un valor alrededor de 1.0 por ciento. Después del ensaye a 100 ciclos esta diferencia se conserva. Si se mide el deterioro como el cambio en los valores del amortiguamiento, en la misma tabla se puede ver que un incremento más grande en el coeficiente de amortiguamiento de los concretos calizos, es indicativo que estos últimos tuvieron un deterioro mayor en su estructura intrínseca.

3.3.2.6 Deformación permanente.- En la Tabla 3.13 se puede observar que a medida que el nivel de esfuerzo máximo aumenta, la deformación permanente de los concretos calizo y andesítico también se incrementa, siendo siempre mayores las deformaciones en los concretos andesíticos. Además, en los concretos calizos, para niveles de esfuerzo hasta de 90 por ciento del esfuerzo máximo, la deformación permanente correspondiente a cada ciclo adicional, tiende a decrecer hasta que se uniformiza. Para niveles mayores el efecto es inverso, ya que la deformación

correspondiente a cada ciclo adicional tiende a aumentar hasta que se produce la falla( Fig 3.13 ). En los concretos andesíticos ocurre un efecto semejante pero este cambio en el comportamiento se produce para niveles de esfuerzos máximos superiores a 85 por ciento( Tablas 3.14 y 3.14A ).

### 3.3.3 Analogías con estudios anteriores

Si se toma como referencia la falla producida en el concreto al aplicarle un número bajo de ciclos de cargas, se puede decir que para el concreto andesítico existe un límite de fractura entre el 85 y 90 por ciento del esfuerzo máximo y para el concreto calizo dicho límite se encuentra entre 90 y 95 por ciento del esfuerzo máximo. Se observa que lo anterior es congruente con resultados encontrados en otros estudios( Cap 1 ). Considerando que el límite mencionado en dicho capítulo comprende los presentados en este estudio, tanto para los concretos andesíticos como para los calizos, se puede decir que en términos de capacidad de carga no influye el tipo de agregados.

En términos de deformaciones si influye el efecto de la densidad de los agregados, lo cual se comenta oportunamente al analizar cada uno de los parámetros que ilustran el efecto de los ciclos de carga en la capacidad de deformación disponible del concreto, a saber:  $E$ ,  $ED$ ,  $VPP$  y  $\xi$ .

Por otro lado, el deterioro en la capacidad de carga es congruente con la disminución en  $E$ ,  $ED$  y  $VPP$  y con el aumento en

ξ. Así, se puede decir que un cambio de 10 por ciento en estos parámetros, es indicativo de que el concreto ha sido severamente dañado y su capacidad de servicio es insuficiente, es decir, se está cerca del límite de fractura. Esta observación es congruente con los resultados alcanzados en estudios anteriores ( Cap 1 ).

### 3.3.4 Respuesta a la fatiga

En las Tablas 3.11 y 3.12 se pueden observar los resultados respecto al comportamiento a la fatiga de los concretos en estudio, en las dos etapas de ensaye. Es necesario recalcar que las condiciones de ensaye en una y otra etapa fueron distintas y por tanto es justificable la divergencia presentada en los resultados. Sin embargo, en ambos casos se observa un decremento en el número de ciclos a los que se produce la falla a medida que el nivel de esfuerzo máximo aumenta; dicho comportamiento describe curvas cóncavas hacia arriba, Figuras 3.11 y 3.12. Este comportamiento ya ha sido observado en otras ocasiones ( Fig 3, Ref 14 ).

En la Figura 3.12 se puede ver que el concreto calizo tiene una respuesta más favorable que el concreto andesítico en términos de resistencia a la fatiga.

#### 4. CONCLUSIONES

Dado que las condiciones de ensaye en las dos etapas son distintas, se presentan por separado las conclusiones respectivas.

##### a) Concreto andesítico

1. El efecto que tiene un bajo número de ciclos de carga, a diferentes niveles de esfuerzo, en la resistencia a compresión es prácticamente nulo.
2. Para niveles de esfuerzo menores al 70 por ciento del máximo, el concreto es capaz de soportar más de  $2 \times 10^6$  ciclos de carga, presentando una resistencia residual menor en 7 por ciento respecto a la resistencia testigo. Para niveles iguales o mayores a 70 por ciento del esfuerzo máximo se produce la falla antes de alcanzar los  $2 \times 10^6$

ciclos de carga y el decremento que se presenta en el número de ciclos, conforme el nivel de esfuerzo es mayor, describe una curva con concavidad hacia arriba (gráfica nivel de esfuerzo contra número de ciclos a los que se produce la falla), Fig 3.11.

3. Tomando como referencia el módulo elástico estático, se puede decir que para niveles de esfuerzo menores a 80 por ciento del esfuerzo máximo, el concreto no presenta una tendencia definida, cuando se le aplica un número bajo de ciclos de carga; esto es, prácticamente no sufre cambio respecto a este parámetro. Sin embargo, para niveles de esfuerzo iguales ó mayores a 80 por ciento del máximo, se nota un decremento que llega a ser del orden de 50 por ciento, para 100 ciclos de carga a 90 por ciento de la resistencia.
4. Después de  $2 \times 10^6$  ciclos de carga, el módulo de elasticidad del concreto presenta una reducción de 20 por ciento en el módulo elástico estático, para niveles de esfuerzo menores a 70 por ciento de la resistencia.
5. El módulo elástico dinámico es muy sensible al deterioro del concreto, ya que, la tendencia a disminuir se presenta desde niveles de esfuerzo bajos. Para niveles menores a 80 por ciento del esfuerzo máximo la reducción es aproximadamente constante presentando un decremento hasta de 10 por ciento para 100 ciclos de carga. Para el 80 por ciento de su resistencia, el decremento alcanzado es del 15

por ciento y para el 90 por ciento de la resistencia es del orden de 20 por ciento.

6. Después de  $2 \times 10^6$  ciclos de carga y para un nivel de esfuerzo de 50 por ciento del máximo, se presenta una reducción de 20 por ciento en el módulo elástico dinámico, mientras que para el 60 por ciento de su resistencia, la reducción es de 30 por ciento.
7. Para niveles de esfuerzo hasta del 70 por ciento del máximo, la velocidad de propagación de pulso se ve disminuida en un 4 por ciento, después de 100 ciclos de carga. Para niveles mayores, la reducción que se presenta llega a ser hasta de 10 por ciento.
8. Después de  $2 \times 10^6$  ciclos de carga a 50 por ciento de su resistencia la velocidad de propagación de pulso disminuye en un 10 por ciento; mientras que a 60 por ciento de su resistencia, la baja es de 15 por ciento.
9. El coeficiente de amortiguamiento aumenta en un 7 por ciento después de 100 ciclos de carga, para un nivel de esfuerzo de 50 por ciento del máximo. Para el 80 por ciento del esfuerzo máximo, el incremento es de 10 por ciento y para el 90 por ciento de su resistencia, es de 30 por ciento.

b) Concreto calizo

Con la intención de comparar el comportamiento del concreto

calizo respecto al andesítico ante ciclos de carga se pueden sacar las siguientes conclusiones:

10. El concreto calizo es más resistente a la fatiga que el concreto andesítico.
11. Después de la aplicación de los ciclos de carga, la reducción en el módulo de elasticidad estático del concreto andesítico es menor que la reducción que se presenta en el concreto calizo, para niveles de esfuerzo y número de ciclos similares.
12. La rigidez dinámica en el concreto calizo disminuye en menor escala que en el concreto andesítico, cuando se les somete a ciclos de carga.
13. El microagrietamiento producido por ciclos de carga, es semejante en ambos concretos; ésto se deduce del comportamiento de la velocidad de propagación de pulso.
14. Después de los ciclos de carga el amortiguamiento aumenta en menor porcentaje para el concreto calizo que para el andesítico, lo cual es indicativo que estos últimos tuvieron un deterioro mayor en su estructura intrínseca.
15. Para niveles de esfuerzo hasta del 90 por ciento del máximo, la deformación permanente correspondiente a cada ciclo adicional, tiende a decrecer hasta que se uniformiza. Para niveles mayores, el efecto es inverso, ya que la deformación permanente correspondiente a cada ciclo adicional tiende a aumentar hasta que se produce la falla.

Este fenómeno se observa tanto en el concreto calizo como en el andesítico.

16. El concreto andesítico tiene un límite de fractura que está entre el 85 y 90 por ciento del esfuerzo máximo y en el caso del concreto calizo, dicho límite se encuentra entre 90 y 95 por ciento del esfuerzo máximo.
17. El deterioro en la capacidad de carga es congruente con la disminución en  $E$ ,  $ED$  y  $VPP$ , y con el aumento en  $\xi$ . Un cambio del orden de 10 por ciento en cualquiera de estos parámetros es indicativo de que el concreto ha sido severamente dañado y su capacidad ya es insuficiente, es decir, se está cerca del límite de fractura.
18. El problema que se presenta en los concretos sometidos a ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo, es de deformación y no de resistencia.

## REFERENCIAS

1. Shah, S.P. and Winter, G., "Response of concrete to repeated loading", submitted to R.I.L.E.M. International Symposium on the Effects of Repeated Loading on Materials and Structural Elements, September 15 to 17, 1966, México City, México.
2. Mugurama, H. and Watanabe, F., "Low-cycle fatigue behaviors of plain concrete under submerged condition", reprinted from Transactions of the Japan Concrete Institute, 1984. (Proc. of 27th Japan Congress on Materials Research, pp 219-224).
3. Baez, J., "Influencia de la microfisuración sobre la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en el concreto", Separata del IMME, Número 26, Abril-Junio, 1969.
4. Holmen, J.O., "Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading", submitted to Symposium of Fatigue of Concrete Structures, SP 75-4, ACI, 1982, pp 71-110.
5. Traina, L.A. and Jeragh, A.A., "Fatigue of plain concrete subjected to biaxial-cyclical loading", submitted to Symposium of Fatigue Concrete Structures, SP 75-10, ACI, 1982, pp 217-234.

6. Normas AS'™ para cemento y concreto:

- "Peso por metro cúbico, rendimiento y contenido de aire(gravimétrico) del concreto, C 138-144, 1939 ", revista IMCYC, V.1, No. 3, Julio 1963, pp 75-76.
- "Revenimiento de concreto hecho con cemento Portland, C 143-58, 1939 ", revista IMCYC, V.1, No. 3, Julio 1963, pp 77-78.
- "Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de concreto, C 39-61, 1959 ", revista IMCYC, V.2, No. 7, Marzo 1964, pp 101-102.
- "Módulo de elasticidad estático de Young y relación de Poisson en compresión para especímenes cilíndricos de concreto, C 469-63, 1961 ", revista IMCYC, V.2, No. 7, Marzo 1964, pp 110-113.
- "Obtención de materiales que pasan la malla No. 200 en agregados minerales por medio de lavado, C 117-62T, 1961 ", revista IMCYC, V.2, No. 9, Julio 1964, pp 75-76.
- "Agregados para concreto, C 33-63, 1961 ", revista IMCYC, V.2, No. 10, Septiembre 1964, pp 52-57.
- "Peso unitario de agregados, C 29-60, 1960 ", revista IMCYC, V.2, No. 12, Enero 1965, pp 82-83.
- "Gravedad específica y absorción del agregado grueso, C 127-59, 1939 ", revista IMCYC, V.2, No. 12, Enero 1965, pp 85-86.

- " Gravedad específica y absorción del agregado fino, C 128-59, 1939 ", revista IMCYC, V.2, No. 12, Enero 1965, pp 87-88.
- " Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos, C 136-63, 1963 ", revista IMCYC, V.3, No. 14, Mayo-Junio 1965, pp 53-54.
- " Determinación de la humedad superficial en agregado fino, C 70-47, 1947 ", revista IMCYC, V.3, No. 17, Noviembre 1965, pp 53-54.
- 7. James Instruments Inc., " E-METER Resonant Frequency Tester ", instructivo, Chicago, Illinois.
- 8. James Electronics Inc., " V-METER Technical Application Papers ", instructivo, 1986.
- 9. " Prácticas recomendables para dosificar concretos de peso normal( ACI 211.1-70 ) ", IMCYC.
- 10. Tepfers, R., " Fatigue of plain concrete subjected to stress reversals ", submitted to Symposium of Fatigue Concrete Structures, SP 75-9, ACI, 1982.
- 11. " Método de ensayo para determinar la velocidad de propagación de ondas en el concreto ", presentado en el IMME, No. 22, Abril-Junio 1968, Caracas.
- 12. Gómez Toledo, C.A., " Resistencia del concreto en estructuras terminadas ", Tesis de Licenciatura en Ing. Civil, México D.F., 1973.

13. Swartz, S.E., Huang, C.M.J. and Hu, K.K., " Crack growth and fracture in plain concrete-static versus fatigue loading ", submitted to Symposium of Fatigue Concrete Structures, SP 75-3, ACI, 1982.
14. Mendoza, C.J., " Comportamiento a la fatiga de concretos fabricados con agregados del D.F. ", Instituto de Ingenieria-UNAM, Marzo 1982.
15. Venuti, W. J., " A statistical approach to the analysis of fatigue failure of prestressed concrete beams ", ACI Journal, proceedings V.62, No. 11, November 1965, pp 1375-1394.

1. Material más grueso que la malla No. 4	10.97 %
2. Material más fino que la malla No. 200	12.16 %
3. Densidad	2.33
4. Absorción	6.79 %
5. Pesos volumétricos: suelto	1389 kg/m <sup>3</sup>
compacto	1493 "

TABLA 2.1 Propiedades físicas de la arena andesítica.

1. Material más fino que la malla No. 4	7.86 %
2. Densidad	2.33
3. Absorción	6.48 %
4. Pesos volumétricos: suelto	1234 kg/m <sup>3</sup>
compacto	1322 "

TABLA 2.2 Propiedades físicas de la grava andesítica.

1. Material más fino que la malla No. 4	4.0 %
2. Densidad	2.63
3. Absorción	0.74 %
4. Pesos volumétricos: suelto	1306 kg/m <sup>3</sup>
compacto	1460 "

TABLA 2.3 Propiedades físicas de la grava caliza.

NUMERO DE CICLOS	0.5 $\bar{f}_c$		0.6 $\bar{f}_c$		0.7 $\bar{f}_c$		0.8 $\bar{f}_c$		0.9 $\bar{f}_c$	
	$f_c$	$f_c/\bar{f}_c$								
0	330	1.00	326	1.00	296	1.00	244	1.00	216	1.00
1	338	1.02	327	1.00	309	1.04	228	0.93	220	1.02
10	338	1.02	344	1.06	316	1.06	231	0.95	221	1.02
50	344	1.04	337	1.03	306	1.03	225	0.92	225	1.04
100	321	0.97	312	0.96	303	1.04	228	0.96	219	1.01
$2 \times 10^6$	305	0.92	307	0.94	-	-	-	-	-	-

TABLA 3.1 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en la resistencia a compresión,  $f_c$  en  $\text{kg/cm}^2$ .

NUMERO DE CICLOS	0.5 $\bar{f}_c$		0.6 $\bar{f}_c$		0.7 $\bar{f}_c$		0.8 $\bar{f}_c$		0.9 $\bar{f}_c$	
	E	E/E <sub>0</sub>								
0	143428	1.00	132844	1.00	130373	1.00	117651	1.00	103220	1.00
1	133289	0.93	133831	1.01	130373	1.00	113741	0.97	86267	0.84
10	140099	0.98	146172	1.03	133354	1.02	117544	1.00	80674	0.79
50	143630	1.00	143422	1.00	132522	1.02	109225	0.93	59290	0.58
100	141450	0.99	134804	1.01	132465	1.02	110223	0.94	52849	0.51
$2 \times 10^6$	122039	0.86	107486	0.81	-	-	-	-	-	-

TABLA 3.2 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en el módulo de elasticidad estático, E en  $\text{kg/cm}^2$ .

NUMERO DE CICLOS	0.5f <sub>c</sub>		0.6f <sub>c</sub>		0.7f <sub>c</sub>		0.8f <sub>c</sub>		0.9f <sub>c</sub>	
	ED	ED/ED <sub>0</sub>								
0	162354	1.00	163509	1.00	163651	1.00	166208	1.00	152023	1.00
1	173470	0.95	177648	0.97	170680	0.93	158334	0.94	130032	0.87
10	170527	0.94	172515	0.94	171994	0.94	149750	0.89	120478	0.95
50	169500	0.93	169902	0.93	167318	0.91	143684	0.85	121773	0.81
100	170006	0.93	166302	0.91	167074	0.81	144360	0.86	119024	0.79
2x10 <sup>4</sup>	147202	0.81	126606	0.69	-	-	-	-	-	-

TABLA 3.3 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo, en el módulo de elasticidad dinámico, ED en kg/cm<sup>2</sup>.

NUMERO DE CICLOS	0.5f <sub>c</sub>		0.6f <sub>c</sub>		0.7f <sub>c</sub>		0.8f <sub>c</sub>		0.9f <sub>c</sub>	
	VPP	VPP/VPP <sub>0</sub>								
0	0.3477	1.00	0.3473	1.00	0.3482	1.00	0.3356	1.00	0.3199	1.00
1	0.3400	0.98	0.3433	0.99	0.3386	0.97	0.3250	0.97	0.3003	0.94
10	0.3380	0.97	0.3362	0.97	0.3381	0.97	0.3166	0.94	0.2968	0.93
50	0.3343	0.96	0.3357	0.97	0.3336	0.96	0.3112	0.93	0.2880	0.90
100	0.3360	0.97	0.3325	0.96	0.3320	0.96	0.3109	0.93	0.2867	0.90
2x10 <sup>4</sup>	0.3122	0.90	0.2902	0.84	-	-	-	-	-	-

TABLA 3.4 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en la velocidad de propagación de pulso, VPP en 10<sup>3</sup> cm/seg.

NUMERO DE CICLOS	0.5fc		0.6fc		0.7fc		0.8fc		0.9fc	
	fc	fc/fc0	fc	fc/fc0	fc	fc/fc0	fc	fc/fc0	fc	fc/fc0
0	9.9874	1.00	"	"	"	"	10.8185	1.00	9.2744	1.00
1	9.8697	0.99	"	"	"	"	11.8066	1.12	10.7420	1.16
10	10.5089	1.05	"	"	"	"	10.4218	0.98	9.8246	1.07
50	10.8195	1.08	"	"	"	"	11.7077	1.10	9.3768	1.01
100	10.6884	1.06	"	"	"	"	11.7487	1.11	12.1610	1.31
2x10 <sup>3</sup>	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"

(\*) no hay datos

TABLA 3.5 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en el coeficiente de amortiguamiento  $\gamma$  en 10<sup>-1</sup>%

NUMERO DE CICLOS	0.75fc		0.80fc		0.85fc		0.90fc		0.95fc		
	fc	fc/fc									
CONC.	0	262	1.00	262	1.00	262	1.00	262	1.00	262	1.00
CALIZO	100	263	1.00	262	1.00	265	1.01	264	1.01	-	-
CONC.	0	231	1.00	231	1.00	231	1.00	231	1.00	231	1.00
ANDES.	100	230	1.00	214	0.93	226	0.98	-	-	-	-

TABLA 3.6 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en la resistencia a compresión de los concretos calizos y andesíticos, fc en kg/cm<sup>2</sup>

NUMERO DE CICLOS	0.75f <sub>c</sub>		0.80f <sub>c</sub>		0.85f <sub>c</sub>		0.90f <sub>c</sub>		0.95f <sub>c</sub>	
	E	E/E <sub>0</sub>								
0	192627	1.00	197003	1.00	107069	1.00	179245	1.00	166625	1.00
1	200000	1.07	170005	0.90	104711	0.80	176354	0.90	117602	0.70
20	111920	0.58	119142	0.60	100025	0.58	115034	0.64	97549	0.58
40	100935	0.56	112401	0.57	106015	0.57	127121	0.71	85785	0.51
60	109292	0.56	100209	0.55	109112	0.58	124363	0.69	-	-
80	100010	0.56	107521	0.54	110693	0.59	116134	0.65	-	-
100	100018	0.56	107094	0.54	109112	0.58	112491	0.63	-	-

TABLA 3.7 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en el módulo de elasticidad estático de los concretos calizos, E en kg/cm<sup>2</sup>.

NUMERO DE CICLOS	0.75f <sub>c</sub>		0.80f <sub>c</sub>		0.85f <sub>c</sub>		0.90f <sub>c</sub>		0.95f <sub>c</sub>	
	E	E/E <sub>0</sub>								
0	79005	1.00	112271	1.00	110545	1.00	81332	1.00	94648	1.00
1	74313	0.94	120000	1.00	114947	1.04	73420	0.90	-	-
20	77420	0.98	110096	1.05	79113	0.72	70744	0.87	-	-
40	76700	0.97	110091	1.03	75935	0.89	81616	0.76	-	-
60	77092	0.98	113063	1.01	73004	0.86	-	-	-	-
80	76903	0.97	110943	0.99	80376	0.88	-	-	-	-
100	77717	0.98	109127	0.97	85200	0.77	-	-	-	-

TABLA 3.7A Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en el módulo de elasticidad estático de los concretos andesíticos, E en kg/cm<sup>2</sup>.

NUMERO DE CICLOS	0.75f <sub>c</sub>		0.80f <sub>c</sub>		0.85f <sub>c</sub>		0.90f <sub>c</sub>		0.95f <sub>c</sub>		
	ED	ED/ED <sub>0</sub>									
CONC.	0	271276	1.00	271276	1.00	271276	1.00	271276	1.00	271276	1.00
CALIZO	100	252381	0.93	242812	0.90	242352	0.90	222592	0.82	-	-
CONC.	0	156052	1.00	156052	1.00	156052	1.00	156052	1.00	156052	1.00
ANDES.	100	137088	0.87	126384	0.80	123518	0.78	-	-	-	-

TABLA 3.8 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en el módulo de elasticidad dinámico de los concretos calizos y andesíticos, ED en kg/cm<sup>2</sup>.

NUMERO DE CICLOS	0.75f <sub>c</sub>		0.80f <sub>c</sub>		0.85f <sub>c</sub>		0.90f <sub>c</sub>		0.95f <sub>c</sub>		
	VPP	VPP/VPP <sub>0</sub>									
CONC.	0	0.4098	1.00	0.4098	1.00	0.4098	1.00	0.4098	1.00	0.4098	1.00
CALIZO	100	0.3914	0.96	0.3922	0.96	0.3808	0.93	0.3728	0.91	-	-
CONC.	0	0.3258	1.00	0.3258	1.00	0.3258	1.00	0.3258	1.00	0.3258	1.00
ANDES.	100	0.3043	0.93	0.2928	0.90	0.2997	0.89	-	-	-	-

TABLA 3.9 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en la velocidad de propagación de pulso de los concretos calizos y andesíticos, VPP en 10<sup>3</sup> cm/seg.

	NUMERO DE CICLOS	0.75 $\bar{f}_c$		0.80 $\bar{f}_c$		0.85 $\bar{f}_c$		0.90 $\bar{f}_c$		0.95 $\bar{f}_c$	
		$\bar{N}$	$\bar{N}/\bar{S}$								
CONC.	0	0.03	1.00	0.03	1.00	0.03	1.00	0.03	1.00	0.03	1.00
CALIZO	100	0.00	1.10	1.01	1.22	1.14	1.20	1.05	1.20	-	-
CONC.	0	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
ANDES.	100	1.17	1.10	1.22	1.25	1.10	1.10	-	-	-	-

TABLA 3.10 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en el coeficiente de amortiguamiento de los concretos calizos y andesíticos,  $\bar{N}$  en %

	0.5 $\bar{f}_c$	0.6 $\bar{f}_c$	0.7 $\bar{f}_c$	0.8 $\bar{f}_c$	0.9 $\bar{f}_c$
NUMERO DE CICLOS	$2 \times 10^6 \rightarrow$	$2 \times 10^6 \rightarrow$	250010	20200	3663

(\*) promedio al que se produce la falla

TABLA 3.11 Influencia del nivel de esfuerzo en la fatiga del concreto andesítico (1a. etapa)

	0.75 $\bar{f}_c$	0.80 $\bar{f}_c$	0.85 $\bar{f}_c$	0.90 $\bar{f}_c$	0.95 $\bar{f}_c$
NO. CICLOS <sup>m</sup> C. CALIZO	100 $\rightarrow$	100 $\rightarrow$	100 $\rightarrow$	100 $\rightarrow$	31
NO. CICLOS <sup>m</sup> C. ANDESIT.	100 $\rightarrow$	100 $\rightarrow$	100 $\rightarrow$	24	1

(\*) promedio al que se produce la falla

TABLA 3.12 Influencia del nivel de esfuerzo en la fatiga de los concretos calizos y andesíticos (2a. etapa).

	NUMERO DE CICLOS	0.75f <sub>c</sub>	0.80f <sub>c</sub>	0.85f <sub>c</sub>	0.90f <sub>c</sub>	0.95f <sub>c</sub>
		ε <sub>perm</sub>				
C. CALIZO	100	5.00	7.60	9.85	11.70	>24.60
C. ANDESITICO	100	0.95	11.00	9.65	>21.40	-

TABLA 3.13 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en la deformación unitaria permanente de los concretos calizos y andesíticos, ε<sub>perm</sub> en 10<sup>-4</sup> cm/cm.

NUMERO DE CICLOS	0.75f <sub>c</sub>	0.80f <sub>c</sub>	0.85f <sub>c</sub>	0.90f <sub>c</sub>	0.95f <sub>c</sub>
	ε <sub>perm</sub>				
0	-	-	-	-	-
1	2.7	2.8	3.0	4.2	6.6
20	0.6	1.8	2.8	3.0	7.8
40	0.6	0.7	1.2	1.4	10.2 <sup>F</sup>
60	0.7	0.5	0.8	1.2	-
80	0.4	0.6	0.8	0.9	-
100	0.0	1.2	0.4	1.0	-

TABLA 3.14 Incremento en las deformaciones permanentes en los concretos calizos con el número de ciclos, ε<sub>perm</sub> en 10<sup>-4</sup> cm/cm.

NUMERO DE CICLOS	0.75f <sub>c</sub>	0.80f <sub>c</sub>	0.85f <sub>c</sub>	0.90f <sub>c</sub>	0.95f <sub>c</sub>
	ε <sub>perm</sub>				
0	-	-	-	-	-
1	3.4	5.8	4.8	9.4	-
20	3.6	2.8	2.2	7.8	-
40	0.8	1.2	1.2	4.2 <sup>F</sup>	-
60	0.7	0.8	0.7	-	-
80	0.5	0.6	0.4	-	-
100	0.0	0.6	0.4	-	-

TABLA 3.14A Incremento en las deformaciones permanentes en los concretos andesíticos con el número de ciclos, ε<sub>perm</sub> en 10<sup>-4</sup> cm/cm.

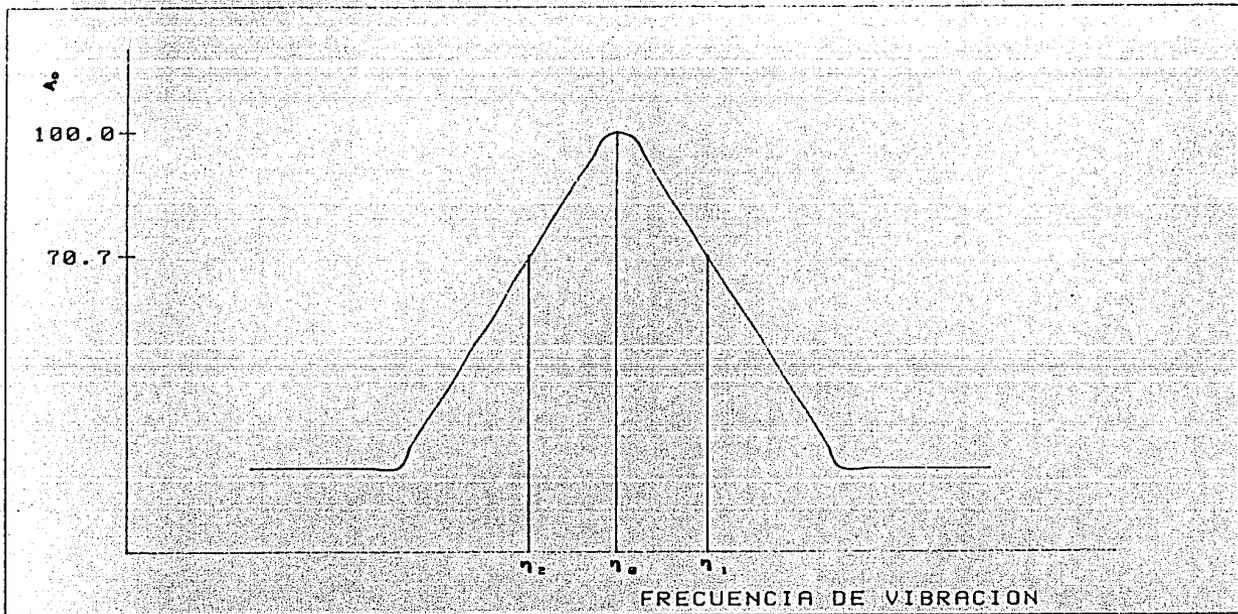


FIG 2.1 Curva típica de la amplitud de frecuencias de vibración.

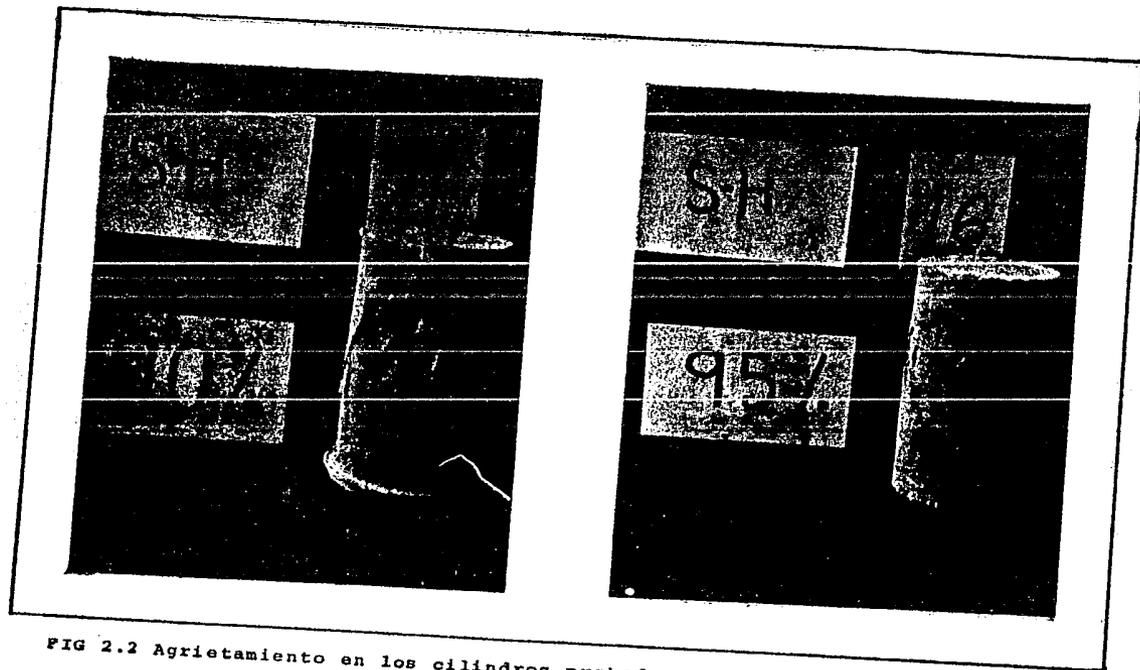


FIG 2.2 Agrietamiento en los cilindros probados a base de cargas repetidas.

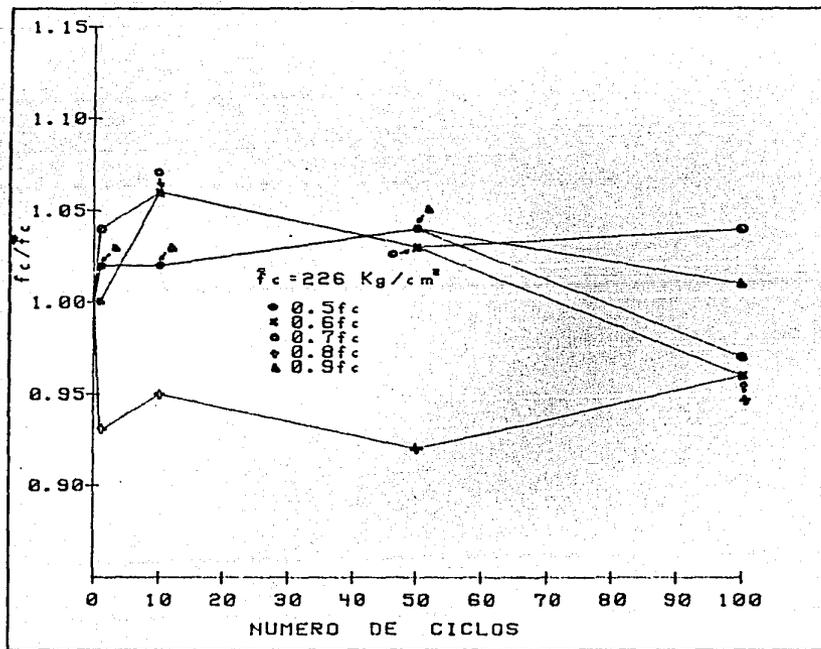


FIG 3.1 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en la resistencia a compresión.

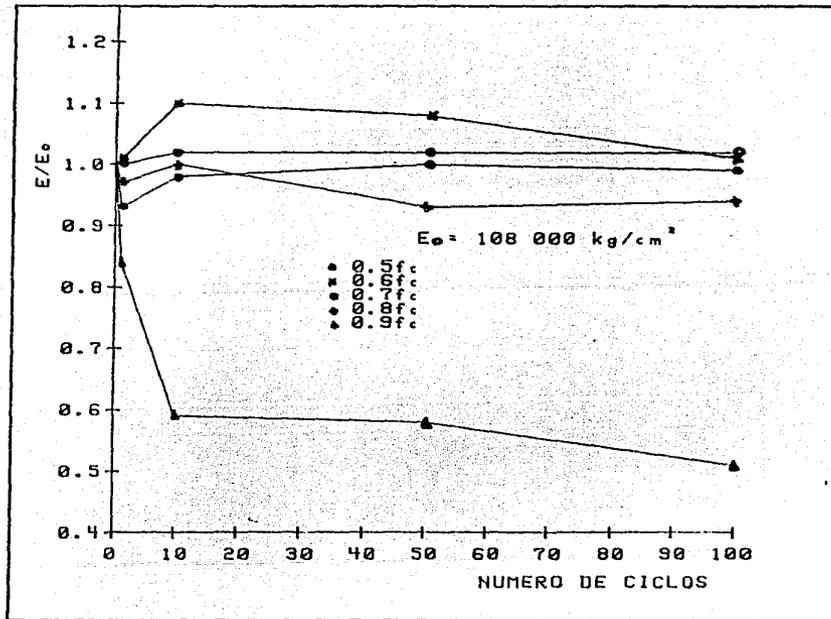


FIG 3.2 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en el módulo de elasticidad estático.



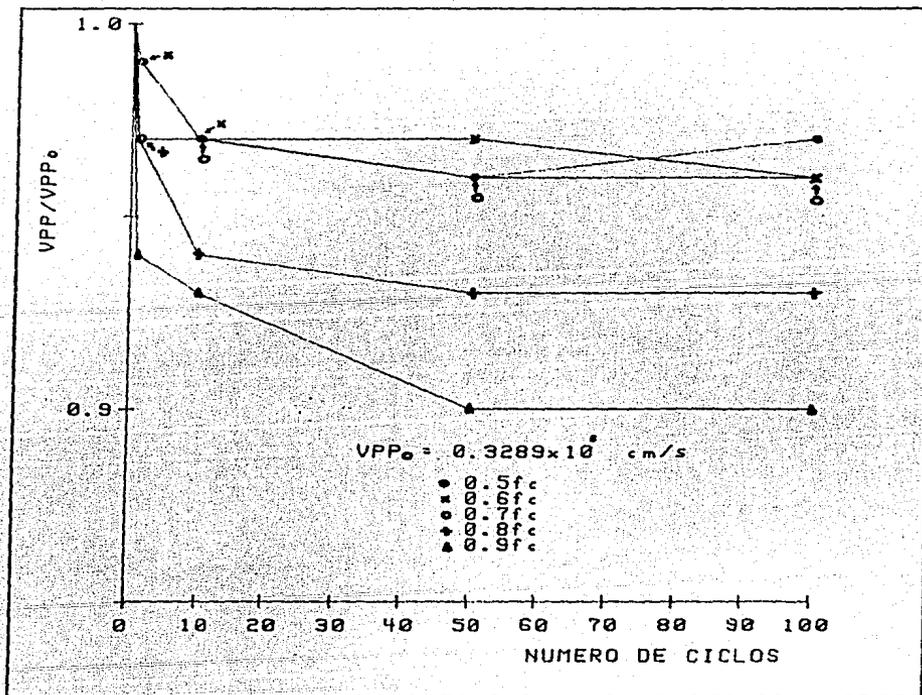


FIG 3.4 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en la Velocidad de propagación de pulso.

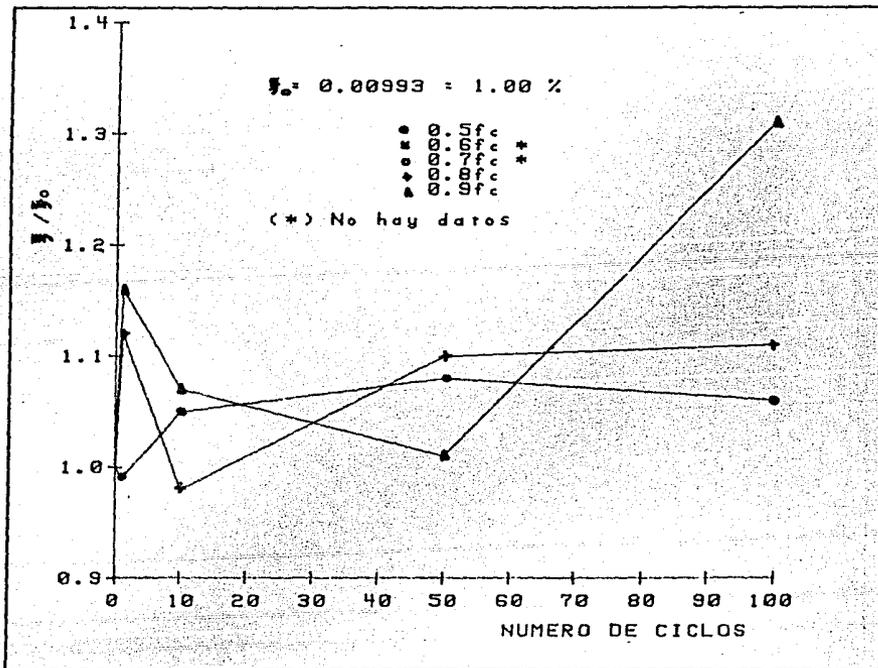


FIG 3.5 Influencia de los ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en el coeficiente de amortiguamiento.

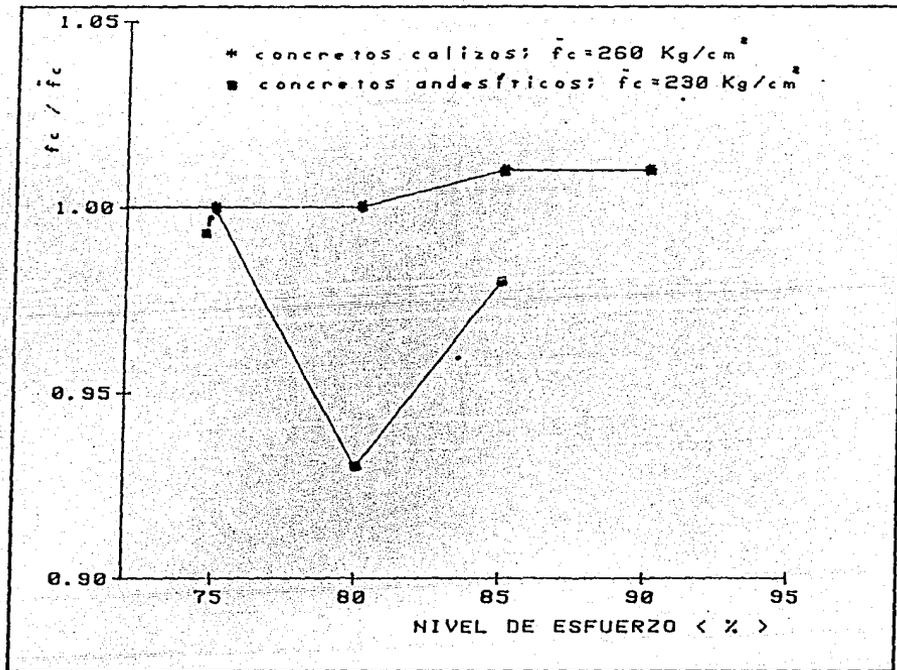


FIG 3.6 Influencia de 100 ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en la resistencia a compresión de los concretos calizos y andesíticos.

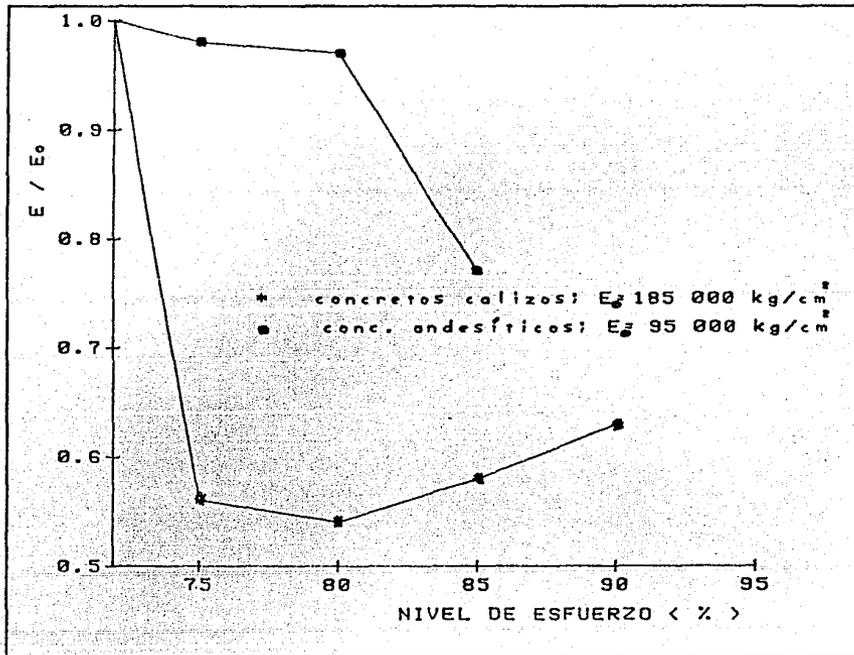


FIG 3.7 Influencia de 100 ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en el módulo de elasticidad estático de los concretos calizos y andesíticos.

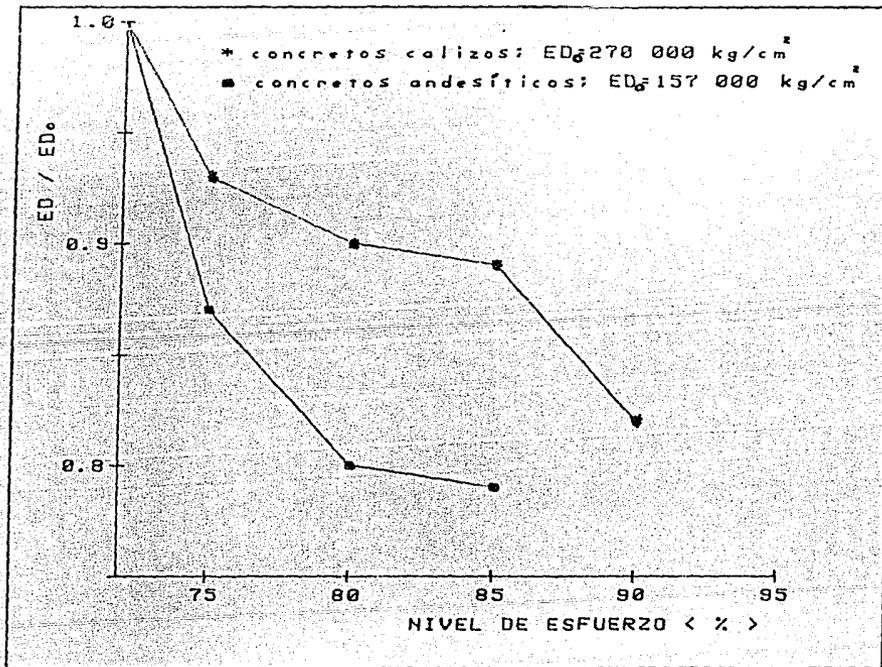


FIG 3.0 Influencia de 100 ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en el módulo de elasticidad dinámico de los concretos calizos y andesíticos.

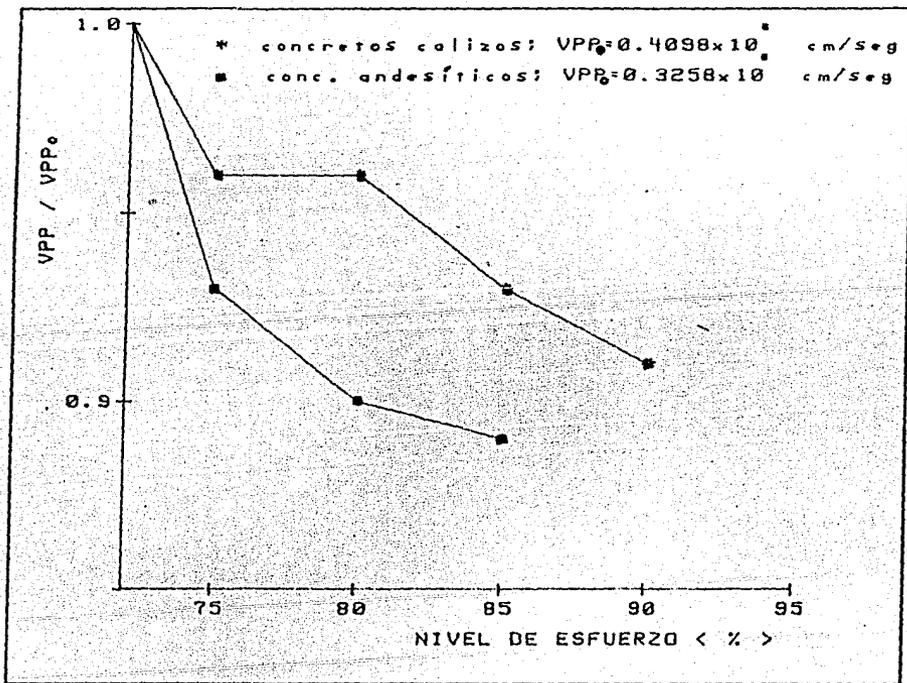


FIG 3.9 Influencia de 100 ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en la Velocidad de propagación de pulso de los concretos calizos y andesíticos.

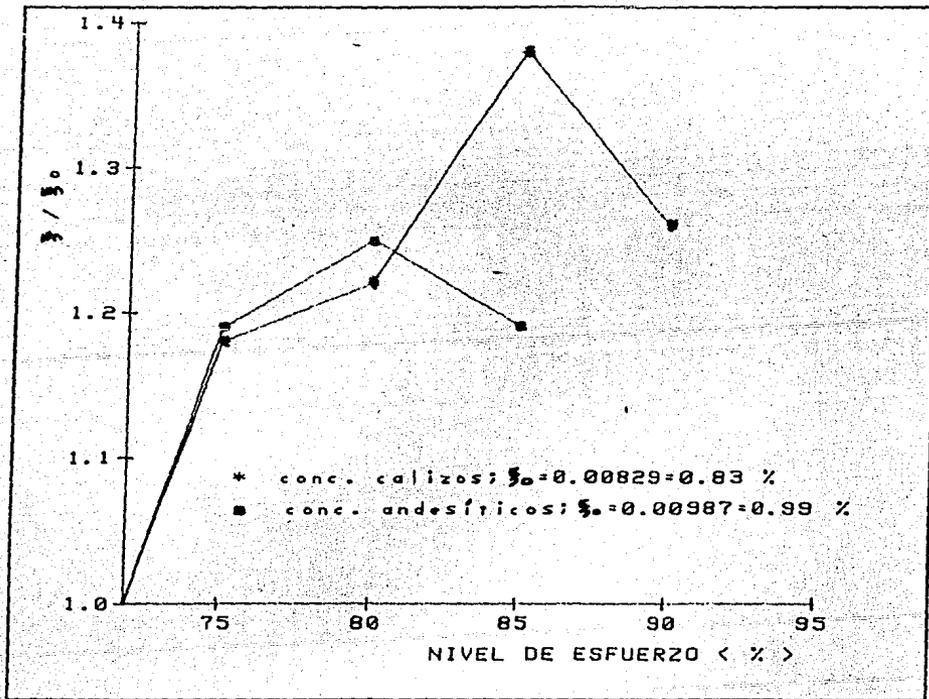


FIG 3.10 Influencia de 100 ciclos de carga a diferentes niveles de esfuerzo en el coeficiente de amortiguamiento de los concretos calizos y andesíticos.

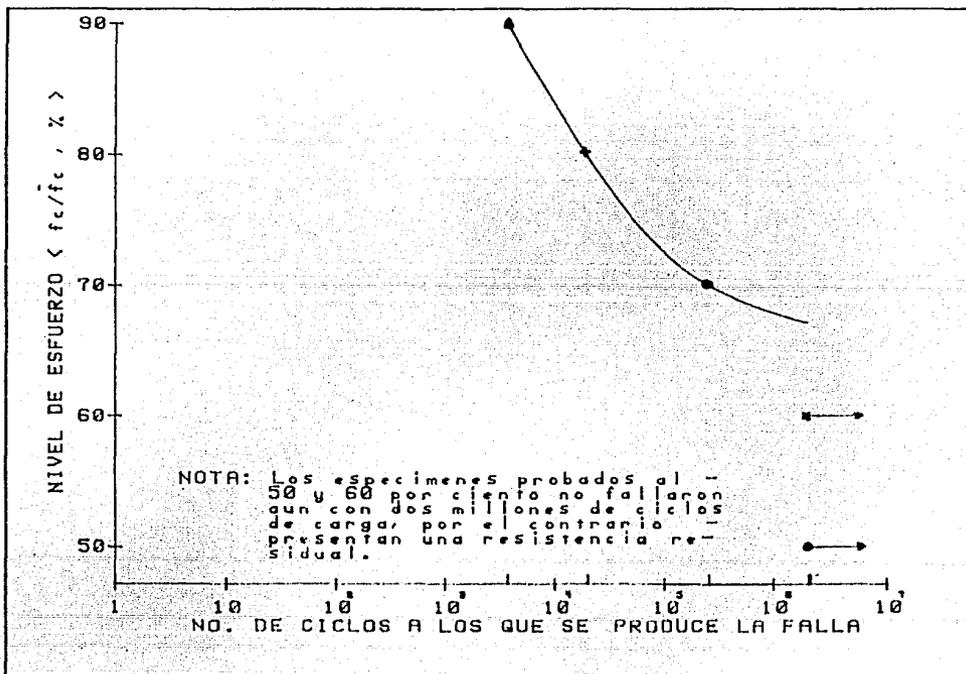


FIG 3.11 Falla por fatiga en función del nivel de esfuerzo con una frecuencia en la aplicación de cargas de 8 Hertz.

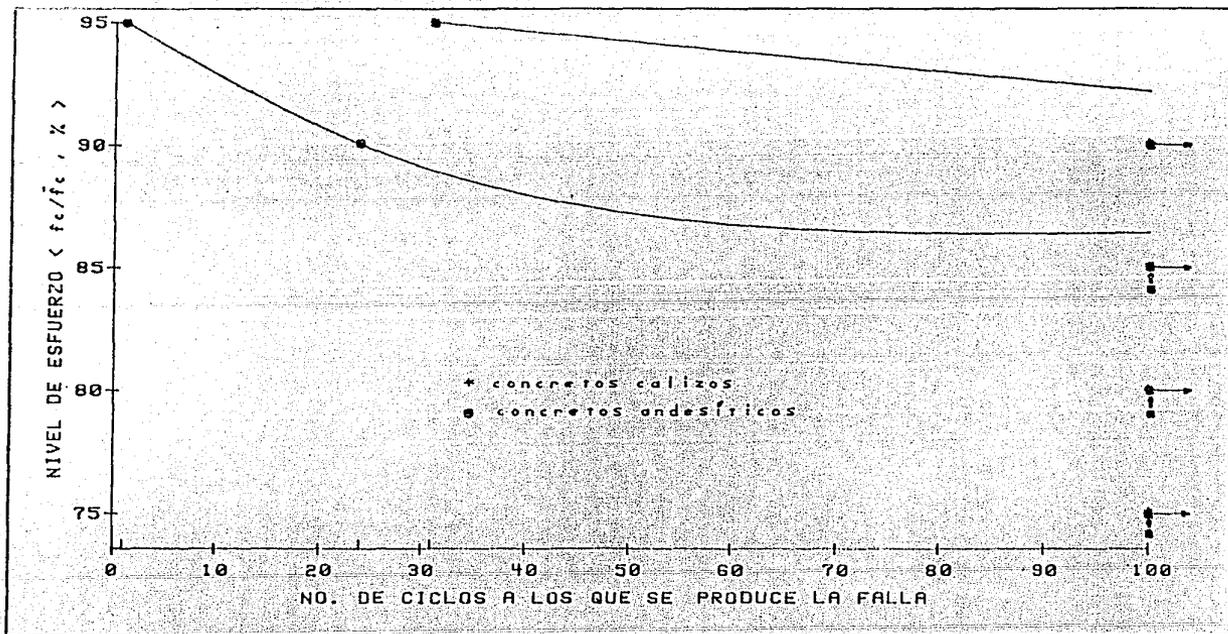


FIG 3.12 Falla por fatiga en función del nivel de esfuerzo.

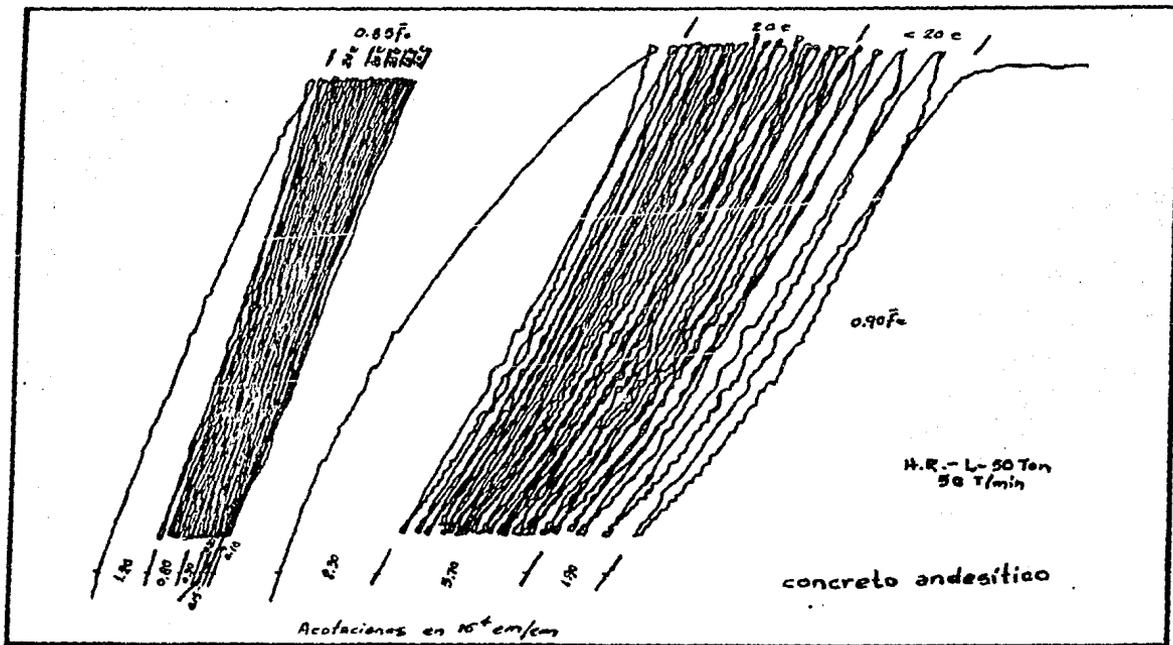


FIG 3.13 Influencia del nivel de esfuerzo máximo en la deformación unitaria - permanente.