

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE BARRAS DE ACERO DE REFUERZO SOMETIDAS A CARGAS MONOTÓNICAS Y CÍCLICAS REVERSIBLES INCLUYENDO PANDEO

Mario E Rodríguez¹ y Juan C Botero¹

RESUMEN

Durante terremotos es de esperar que las barras de acero de refuerzo en estructuras de concreto, experimenten deformaciones cíclicas de tensión y compresión. Debido a separaciones inadecuadas del refuerzo transversal, el estado de deformaciones inelásticas de tipo cíclico reversible en barras de acero de refuerzo puede llevar al pandeo de estas barras. Aun cuando diversos reglamentos de construcción estipulan separaciones máximas de refuerzo transversal, dichas separaciones se basan generalmente en resultados de pocos estudios experimentales.

En esta investigación se efectuó un estudio experimental con el fin de evaluar el comportamiento de barras de acero de refuerzo cortas y esbeltas, sometidas a cargas de compresión monotónicas, así como cíclicas reversibles. Para la obtención de curvas esfuerzo-deformación de barras cortas de acero de refuerzo sometidas a ambos tipos de cargas se utilizaron modelos analíticos propuestos en la literatura, los cuales permiten definir este tipo de curvas a partir de la de tensión. La correlación de resultados obtenidos con estos modelos y los experimentales fue aceptable. Se comparan los resultados obtenidos en los ensayos experimentales ante cargas cíclicas reversibles de barras esbeltas, con los de un modelo analítico propuesto en la literatura, empleando además un criterio de definición de pandeo desarrollado en este estudio. Con base en los resultados obtenidos se dan recomendaciones para evaluar el fenómeno del pandeo de barras de refuerzo sometidas tanto a cargas monotónicas como cíclicas reversibles.

ABSTRACT

It is expected that during strong earthquakes, longitudinal reinforcing steel in reinforced concrete elements may undergo large tension and compression strain reversals. Due to insufficient tie spacing, this repeated loading into the inelastic range may lead to buckling of steel reinforcing bars. Although construction building codes have some provisions for tie spacing in RC elements, these provisions are based on few experimental studies on cyclic behavior of reinforcing bars including buckling.

In this research, deformed-steel reinforcing bars with a specified minimum yield strength of 420 MPa, currently produced in México, were experimentally evaluated under axial-strain-controlled monotonic and reversed cyclic tests. The tests were performed in machined specimens until they reached failure, in all cases under compressive loading. To study the effects of the ratio of lateral support (s_h) to bar diameter (D) on the inelastic buckling of reinforcing bars, tests were performed for s_h/D ratios of 2.5, 4, 6 and 8. Compression monotonic and reversal cyclic curves in reinforcing bars without buckling were obtained using an analytical model proposed in the literature and they were compared with experimental results. The comparison showed a good agreement. Based on observed buckling behavior in reinforcing bars under cyclic loading, a procedure is proposed for predicting onset of buckling. The use of this procedure along with an analytical model proposed in the literature for the cyclic behavior of reinforcing steel led to a good agreement with experimental results.

¹ *Instituto de Ingeniería, UNAM*

INTRODUCCIÓN

Una información relevante para evaluar la respuesta sísmica de estructuras de concreto reforzado es la que se obtiene de relaciones momento-curvatura de secciones críticas de elementos estructurales. Para estimar estas relaciones es necesario conocer no sólo las características del comportamiento cíclico del concreto, sino también las correspondientes a las barras de refuerzo, incluyendo la posibilidad de inestabilidad de éstas.

El problema de la inestabilidad de barras de refuerzo es tratado de manera superficial por reglamentos de construcción en zonas sísmicas (ACI 318-95, RDF-93). Aun cuando este problema ha sido objeto de diversas investigaciones, la mayor parte de ellas se han basado en un comportamiento del tipo monotónico. Una revisión de la literatura tanto de ensayos efectuados con este tipo de comportamiento, como de tipo cíclico reversible, muestra que existe dispersión en los resultados. Una razón que explica esta dispersión es que en la mayor parte de investigaciones efectuadas, la deformación en una barra de refuerzo asociada al inicio del pandeo se ha definido mediante procedimientos visuales, lo que origina una variabilidad alta en las mediciones de estas deformaciones. Además, una revisión de la literatura muestra que los ensayos de tipo cíclico se han efectuado en intervalos limitados de deformaciones. Otra fuente de incertidumbre en los resultados de estudios experimentales del problema del pandeo de barras de refuerzo en elementos de concreto reforzado ha sido la poca confiabilidad en la medición de deformaciones de estas barras después de la fluencia.

En este artículo se evalúan resultados de estudios analíticos y experimentales efectuados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM con el objeto de estudiar el comportamiento cíclico reversible de barras de acero de refuerzo, incluyendo la posibilidad de pandeo de éstas. Se propone un procedimiento para tomar en cuenta este modo de falla en análisis momento-curvatura. Este procedimiento se basa en la combinación del empleo de una deformación de pandeo definida con un criterio desarrollado en este estudio, así como de un modelo del comportamiento cíclico de barras cortas de refuerzo propuesto en la literatura.

COMPORTAMIENTO DE BARRAS DE ACERO DE REFUERZO CORTAS ANTE CARGAS MONOTÓNICAS

La fig 1 muestra una curva esfuerzo-deformación típica que se encuentra en ensayos a tensión de barras de refuerzo. Park y Paulay (1975), así como Mander *et al.* (1984), han propuesto expresiones para este tipo de curvas. Rodríguez y Botero (1996) encontraron una buena correlación entre resultados experimentales obtenidos con barras de refuerzo producidas en México y resultados analíticos con el modelo de Mander *et al.* (1984). De acuerdo con este modelo, en la zona de endurecimiento por deformación del acero, la relación entre el esfuerzo y la deformación a tensión, f_s y ϵ_s , respectivamente, está dada por:

$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su}) \left(\frac{\epsilon_{su} - \epsilon_s}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right)^P \quad (1)$$

En la expresión anterior el parámetro P se define como:

$$P = E_{sh} \frac{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}}{f_{su} - f_y} \quad (2)$$

Los diversos parámetros que intervienen en (1) y (2) se muestran en la fig 1.

Los ensayos de barras de refuerzo con cargas monotónicas en compresión efectuados en la literatura han sido bastante menos frecuentes que los de tensión, debido a problemas de inestabilidad inherentes al primer tipo de ensayos. Una revisión de la literatura muestra que en muchos estudios del comportamiento sísmico de estructuras de concreto reforzado, se ha supuesto que las curvas esfuerzo-deformación de barras cortas en tensión y compresión son iguales y con signos opuestos. Sin embargo, la evidencia experimental muestra que estas curvas son diferentes (Mander *et al.*, 1984). Dodd y Restrepo (1995) han mostrado que si se toma en cuenta la geometría instantánea de la barra corta de acero que se ensaya, mediante el empleo de las denominadas coordenadas naturales, las curvas esfuerzo-deformación en los casos en tensión y compresión son básicamente las mismas en estas coordenadas. Con este criterio, en el sistema de coordenadas de

uso común (coordenadas ingenieriles), es posible relacionar el esfuerzo y la deformación de compresión, f_{cs} , ϵ_{cs} , respectivamente, mediante las siguientes expresiones (Dodd y Restrepo, 1995):

$$f_{cs} = -f_s(1 + \epsilon_s)^2 \quad (3)$$

$$\epsilon_{cs} = \frac{-\epsilon_s}{1 + \epsilon_s} \quad (4)$$

La fig 2 muestra los resultados de ensayos de una probeta en tensión y otra en compresión sin problemas de inestabilidad (relación de esbeltez 2.5), encontrados en esta investigación. Estos resultados se comparan en el mismo cuadrante con la curva esfuerzo-deformación en compresión que se obtendría con las ecuaciones (3) y (4) empleando los resultados de ensayos en tensión obtenidos por Rodríguez y Botero (1996). La inspección de esta figura muestra las importantes diferencias entre los resultados experimentales de las curvas en tensión y compresión en coordenadas ingenieriles, así como la aceptable correlación entre los resultados de emplear las ecuaciones (3) y (4) y los que se obtienen del ensayo en compresión mencionado.

COMPORTAMIENTO DE BARRAS DE ACERO DE REFUERZO CORTAS ANTE CARGAS CÍCLICAS REVERSIBLES

Mander *et al.* (1984) han propuesto un modelo analítico para representar el comportamiento cíclico reversible de barras de refuerzo cortas. Dodd y Restrepo (1995) propusieron un modelo analítico con el mismo fin, el cual se basa en el empleo del sistema de coordenadas naturales. El modelo de Mander *et al.* (1984) se basa en el empleo de ciclos de histéresis que se definen en función de curvas de referencia, de tipo monotónicas en tensión o compresión en coordenadas ingenieriles. La fig 3 muestra las características de carga o descarga en la zona de endurecimiento por deformación que emplea el mencionado modelo. Los diversos parámetros que intervienen en esta curva han sido definidos por Mander *et al.* (1984). La fig 4 muestra los resultados de aplicar este modelo empleando los parámetros que definen las

curvas esfuerzo-deformación ante cargas monotónicas en tensión o compresión de una barra corta ensayada en esta investigación (relación de esbeltez 2.5), así como los resultados experimentales correspondientes. La comparación de estos resultados muestra que la predicción analítica del comportamiento cíclico en barras cortas lleva a resultados aceptables.

INESTABILIDAD EN BARRAS DE ACERO DE REFUERZO EN ELEMENTOS DE CONCRETO REFORZADO

Uno de los primeros estudios de la inestabilidad de barras de refuerzo fue efectuado por Bresler y Gilbert (1961), quienes emplearon criterios de análisis elástico para encontrar relaciones entre el pandeo de barras de refuerzo bajo cargas monotónicas y parámetros como espaciamiento y rigidez de estribos. Un estudio semejante para el caso de trabes fue realizado por Scribner (1986). Mander *et al.* (1984) efectuaron ensayos de tipo monotónico en compresión en probetas maquinadas de barras de refuerzo, los resultados se compararon con los obtenidos empleando modelos analíticos de pandeo inelástico que utilizan la teoría del doble módulo reducido (Salmon y Johnson, 1980); la comparación entre estos resultados fue aceptable. Papia *et al.* (1988) emplearon también la teoría del doble módulo reducido para el estudio de la inestabilidad bajo cargas monotónicas de barras de refuerzo en elementos de concreto reforzado, en dicho estudio se ignoró el efecto de la expansión del concreto confinado. Mau (1990) efectuó estudios analíticos de la validez del empleo de la teoría del módulo tangente (Salmon y Johnson, 1980) en la evaluación de la inestabilidad de barras de refuerzo bajo cargas monotónicas, la herramienta analítica empleada fue el método del elemento finito. Monti y Nuti (1992) efectuaron estudios analíticos y experimentales del problema de la inestabilidad en barras de refuerzo aisladas sometidas a carga monotónicas y cíclicas reversibles. El estudio experimental mencionado, en la condición de cargas cíclicas reversibles, se efectuó en un intervalo limitado de deformaciones y sin describir el criterio empleado para definir el inicio del pandeo. Además, el modelo analítico propuesto por estos investigadores es complejo y requiere de calibración con

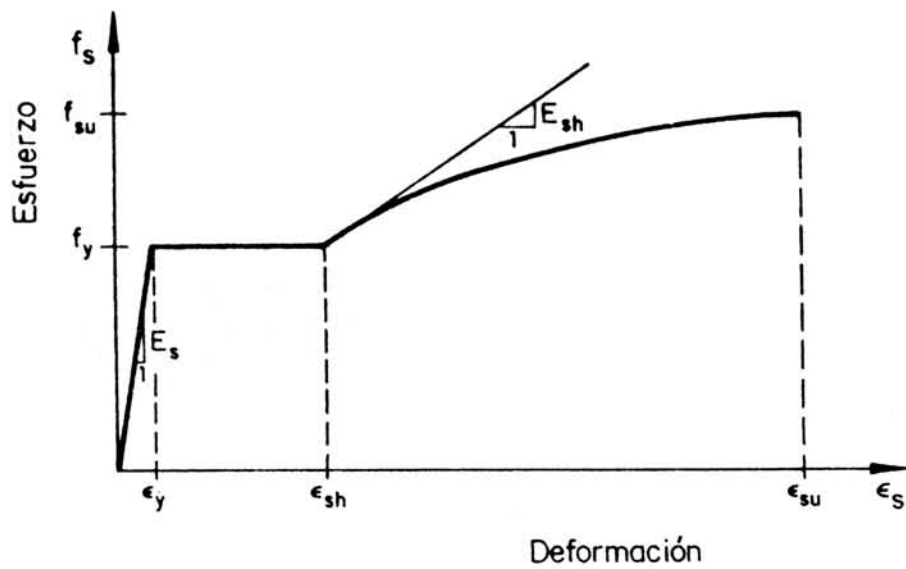


Fig 1. Curva esfuerzo-deformación típica de barras de acero de refuerzo sometidas a carga monótonica

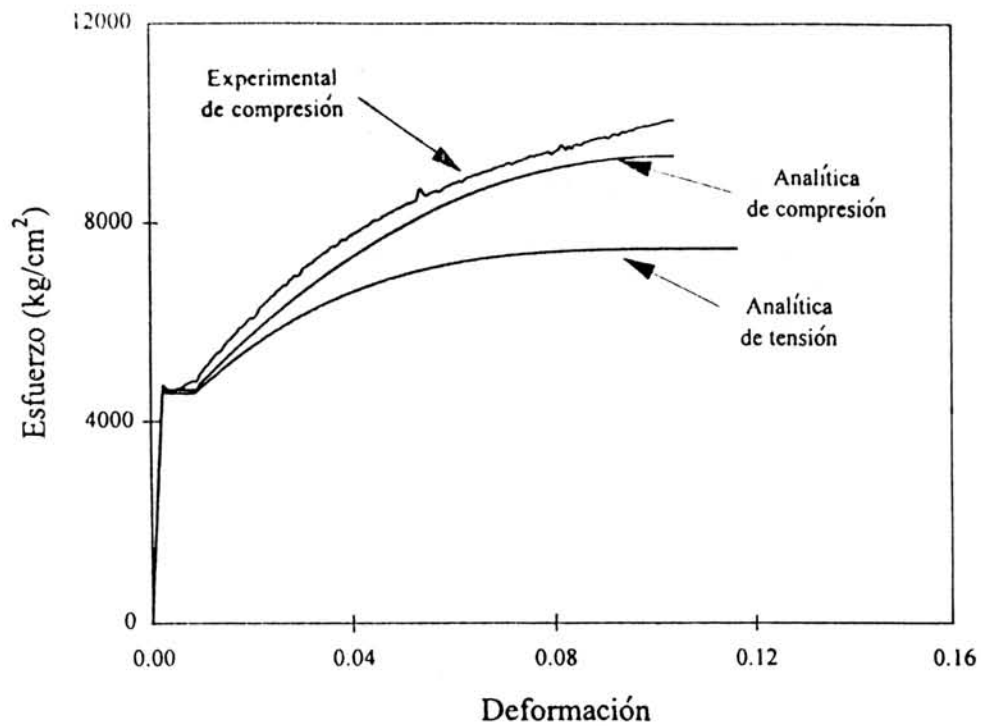


Fig 2. Comparación de curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales de barras de refuerzo en tensión o compresión

resultados experimentales de ensayos cíclicos reversibles, lo que no siempre es factible en los procedimientos usuales de diseño estructural. Suda *et al.* (1996) han efectuado en Japón el único estudio analítico-experimental, que los autores conocen, del problema de la inestabilidad de barras de refuerzo en elementos de concreto reforzado (columnas) sometidos a cargas cíclicas reversibles. De acuerdo con estos investigadores, un impedimento serio para la ejecución de este tipo de estudios en investigaciones experimentales anteriores ha sido la poca confiabilidad de las mediciones de deformaciones en aceros de refuerzo después de la fluencia. Por esta razón, en el mencionado estudio se desarrolló un nuevo procedimiento para medir deformaciones del acero de refuerzo después de la fluencia, lo que facilita el estudio de la inestabilidad de barras de refuerzo en elementos de concreto reforzado. Los resultados experimentales en la condición de cargas cíclicas reversibles mostraron que el inicio del pandeo puede ocurrir en la zona de deformaciones en tensión de la barra, antes de llegar a la aplicación de deformaciones en compresión. Con base en estos resultados, Suda *et al.* (1996) han propuesto un modelo para representar el comportamiento cíclico de barras de refuerzo en elementos de concreto reforzado, incluyendo el problema de inestabilidad de estas barras.

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE ENSAYES EN LABORATORIO

En lo que sigue se describe el programa experimental llevado a cabo en esta investigación, en el que se efectuaron tanto ensayos monotónicos en compresión, como del tipo cíclico reversible. Las barras de acero de refuerzo estudiadas fueron del mismo lote que se empleó para la fabricación de probetas para ensayos del tipo monotónico en tensión efectuados en una investigación anterior (Rodríguez y Botero, 1996). Las barras de refuerzo fueron de 31.8 mm de diámetro, las que se tornearon para fabricar probetas típicas (ASTM, 1993) de 16 mm de diámetro. La fig 5 muestra las características geométricas de las probetas estudiadas.

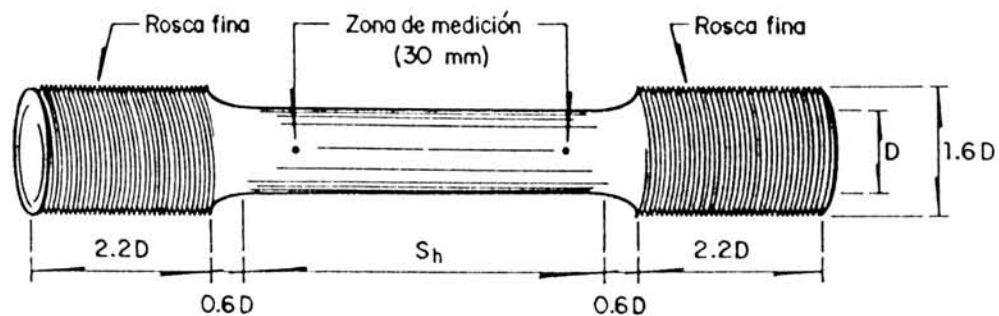
Se consideró que un parámetro importante en la inestabilidad de barras de refuerzo es la relación entre la longitud de la probeta (s_h)

y el diámetro de ésta (D) (relación de esbeltez). Estos parámetros tratan de representar a la separación de estribos y diámetro del refuerzo longitudinal, respectivamente. Se seleccionaron diferentes relaciones s_h/D , en un intervalo representativo de valores típicos de este parámetro en elementos de concreto reforzado. Los valores seleccionados para este parámetro fueron 2.5, 4, 6 y 8. El total de probetas para los ensayos monotónicos y cíclicos reversibles fue de 10 y 17, respectivamente.

Para la ejecución de los ensayos se utilizó una máquina universal MTS, con marco de carga MTS-810 y controlador MTS-442. Las probetas fueron atornilladas a un dispositivo especial fijo a la máquina universal MTS (fig 6). Debido a pequeños movimientos de cuerpo libre entre las probetas y el dispositivo mencionado, no fue posible lograr un empotramiento perfecto en los extremos de la probeta; sin embargo, esto no afectó la interpretación de los resultados obtenidos como se comenta posteriormente.

Las deformaciones en la probeta se obtuvieron mediante un dispositivo de medición descrito anteriormente (Rodríguez y Botero, 1996). Este dispositivo consta de deformímetros eléctricos que permitían medir el cambio de longitudes a cada lado de la barra, en una longitud de medición de 30 mm centrada en el sentido longitudinal de la probeta (figs 5 y 6).

Los ensayos de tipo monotónico en compresión se efectuaron con una velocidad lenta, con una duración de aproximadamente tres minutos. Los ensayos de tipo cíclico reversible tuvieron una excitación de tipo senoidal, con una frecuencia de 0.005 Hz, lo que llevó a una duración por ciclo de aproximadamente tres minutos. La amplitud de la onda senoidal fue controlada por desplazamiento, con el propósito de lograr aproximadamente cuatro niveles de deformación, con dos ciclos histeréticos por cada uno de estos niveles. Del total de probetas ensayadas bajo cargas cíclicas reversibles, ocho fueron sometidas a ciclos de deformaciones simétricas y nueve a ciclos asimétricos, en estos casos la relación entre las deformaciones máximas en tensión y compresión en cada ciclo fue aproximadamente igual a 2.3.



Tipo	S_h / D
1	2.5
2	4.0
3	6.0
4	8.0

$D = 1.6 \text{ cm}$

Fig 5. Características de las probetas utilizadas para los ensayos de tipo monotónico en compresión y ciclos reversibles

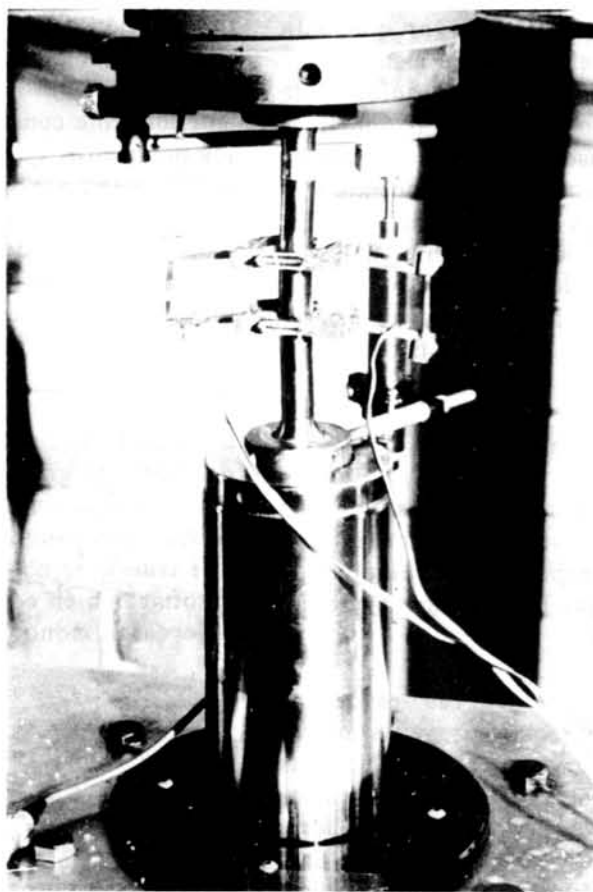


Fig 6. Marco de carga y dispositivos de medición de deformaciones en las probetas estudiadas

EVALUACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

ENSAYES MONOTÓNICOS EN COMPRESIÓN

a) Definición experimental del inicio de inestabilidad en probetas

La definición del inicio de la inestabilidad en ensayos a compresión de probetas empleando métodos visuales tiene el inconveniente de ser fuente de incertidumbres en el análisis de este tipo de ensayos, por este motivo, se consideró conveniente que esta definición se hiciera con base en la evaluación del estado de deformaciones medida en la probeta. Aprovechando que el dispositivo de medición empleado permitía conocer las deformaciones en caras opuestas de la probeta, se consideró que la inestabilidad de ésta se iniciaba cuando la diferencia entre las deformaciones mencionadas era igual o mayor al 20% de la deformación medida menor. La racionalidad de este criterio se basa en que se pudo observar que para valores mayores que el porcentaje mencionado, las diferencias entre las deformaciones de inestabilidad correspondientes y las obtenidas con el límite mencionado no eran significativas. Para valores menores que 20% se encontró que debido a limitaciones en la precisión de la medición de deformaciones, las diferencias de éstas en ambos lados de la probeta podían ser significativas, lo que impedía evaluar de manera confiable el inicio de la inestabilidad en la probeta.

b) Resultados experimentales

Los ensayos se terminaron cuando se alcanzó una configuración visible de pandeo, con excepción de las probetas con relación de esbeltez de 2.5, las que no presentaron problemas de inestabilidad.

La evaluación de las curvas esfuerzo-deformación de las probetas ensayadas mostró que a partir del inicio del pandeo, las deformaciones aumentan y disminuyen en los lados cóncavo y convexo de la probeta, respectivamente (Rodríguez *et al.* 1997). Esto se debe a que la flexión que se produce al inicio de la inestabilidad en la barra genera deformaciones de compresión en el lado

cóncavo que se suman a las ocasionadas por la carga aplicada. Por el contrario, la flexión mencionada genera deformaciones de tensión en el lado convexo, que se restan a las ocasionadas por la carga de compresión.

Es de interés comparar los resultados experimentales obtenidos con los resultantes de emplear un modelo analítico. Para este fin se empleó la teoría del doble módulo reducido, en la que el esfuerzo crítico de pandeo, f_p , se define como:

$$f_p = \pi^2 \frac{E_r}{\left(K \frac{S_h}{r_0} \right)} \quad (5)$$

En la expresión anterior el parámetro E_r es el doble módulo reducido del acero (Salmon y Johnson, 1980); K es el factor de longitud efectiva, y r_0 es el radio de giro de la sección. Para el empleo de la ecuación (5), es necesario conocer las características de la curva esfuerzo-deformación de una barra de refuerzo sometida a carga monotónica en compresión. Se empleó el criterio de Dodd y Restrepo (1995), anteriormente comentado, con el fin de evaluar los parámetros que definen la curva esfuerzo-deformación analítica mencionada, lo que se lleva a cabo a partir del empleo de los parámetros que definen a la curva esfuerzo-deformación del caso en tensión (ecuaciones (3) y (4)). Para esta evaluación se consideró de manera simplista que en los casos de las barras de refuerzo utilizadas en esta serie de ensayos, estos últimos parámetros son similares a los de la media de la población de las barras de diámetro grande ensayadas en tensión en una investigación anterior (Rodríguez y Botero, 1996). Los valores de los parámetros que con este criterio se obtienen para la curva esfuerzo-deformación en compresión de una barra corta bajo carga monotónica son:

$$\begin{aligned} f_{yc} &= - 4,660 \text{ kg/cm}^2 \\ f_{suc} &= - 9,350 \text{ kg/cm}^2 \\ \epsilon_{shc} &= - 0.0087 \\ \epsilon_{suc} &= - 0.1048 \\ P_c &= 2.092 \end{aligned}$$

En los parámetros anteriores el subíndice "c" indica que el parámetro respectivo corresponde a la curva para el caso en compresión en estudio

y el signo negativo está asociado a la condición en compresión.

La fig 7 muestra curvas analíticas que relacionan f_p con s_h/D , en las que f_p se obtuvo empleando la ecuación (5) con las características del acero en compresión definidas por los parámetros anteriormente mencionados y considerando diferentes condiciones de apoyo, asociadas éstas al parámetro K . Para este parámetro se emplearon los valores 0.5, 0.75 y 1, que cubren un posible intervalo que se puede considerar característico para las probetas ensayadas en este estudio. Los valores de K de 0.5 y 1 son representativos de longitudes efectivas asociadas a una condición de apoyo empotrada y articulada, respectivamente. La fig 8 muestra curvas que relacionan la deformación del pandeo, ε_p , con s_h/D , en las que ε_p se evaluó con las curvas de acero en compresión monotónica correspondientes, empleando en esta evaluación los valores de f_p mostrados en la fig 7. Además de los resultados analíticos mostrados en las figs 7 y 8, éstas también muestran, respectivamente, valores de esfuerzos y deformaciones asociados al inicio del pandeo, obtenidos a partir de mediciones en los ensayos bajo carga en compresión monotónica de probetas anteriormente comentados. En estos resultados el inicio del pandeo en la probeta se definió con el criterio experimental anteriormente descrito.

La comparación de resultados analíticos y experimentales mostrados en las figs 7 y 8 indica que es posible obtener una buena correlación entre ambos tipos de resultados si en la evaluación analítica se emplea el valor de 0.75 para K . Este valor representa una condición de apoyo en los extremos de las probetas que se puede considerar intermedia entre los casos empotrado y articulado, lo que se puede considerar producto de pequeños movimientos de cuerpo libre que pudieron ser medidos, que ocurrieron entre las probetas y el dispositivo de fijación de éstas.

ENSAYES CICLICOS REVERSIBLES

- a) Criterio de definición del inicio del pandeo en probetas

De manera semejante al caso de ensayos de probetas con cargas monotónicas en compresión,

en este estudio el criterio del inicio del pandeo en ensayos cíclicos reversibles se define a partir de la comparación de las deformaciones medidas en los dos deformímetros del dispositivo de medición anteriormente comentado. Con este criterio, el inicio del pandeo en probetas se define cuando la diferencia entre las deformaciones medidas en los deformímetros mencionados es mayor que 0.2 ($\varepsilon_m^+ - \varepsilon_m^-$), lo que se evalúa para cada nivel de deformación máxima en los ciclos de ensaye, en consecuencia, este valor de comparación varía para cada uno de estos niveles. La fig 9 muestra en forma esquemática el significado de los parámetros ε_m^+ y ε_m^- . El primero representa la deformación correspondiente al inicio de la descarga de tensión y el segundo representa la deformación correspondiente al inicio de la descarga de compresión. Este criterio tiene la ventaja de que es semejante al empleado en el caso de ensayos de compresión monotónicas. Esto se debe a que en este caso el punto donde comienza la aplicación de carga de compresión es el origen de coordenadas y cada punto de la curva esfuerzo-deformación es un punto potencial de descarga. Más adelante se propone un procedimiento de evaluación de la deformación de pandeo en el que se emplea el criterio descrito de definición de inicio de pandeo .

- b) Evaluación de resultados experimentales

En lo que sigue se evalúan resultados de ensayos cíclicos reversibles en 17 probetas. En una de estas probetas se efectuó un tipo de ensaye denominado "caso especial" que se describe más adelante y en 16 probetas se emplearon aproximadamente al menos cuatro niveles de deformaciones máximas (con dos ciclos de histéresis por nivel), o hasta alcanzar una configuración visual de pandeo.

Para el grupo de 16 probetas mencionado, en ocho de ellas los ciclos de histéresis fueron simétricos y en las otras ocho estos ciclos fueron asimétricos. Este último tipo de ciclo se caracterizó porque las deformaciones máximas en tensión y compresión fueron iguales a $0.7(\varepsilon_m^+ - \varepsilon_m^-)$ y $0.3(\varepsilon_m^+ - \varepsilon_m^-)$, respectivamente, aun cuando estos valores no corresponden a un caso específico en una estructura de concreto reforzado sometida a acciones sísmicas,

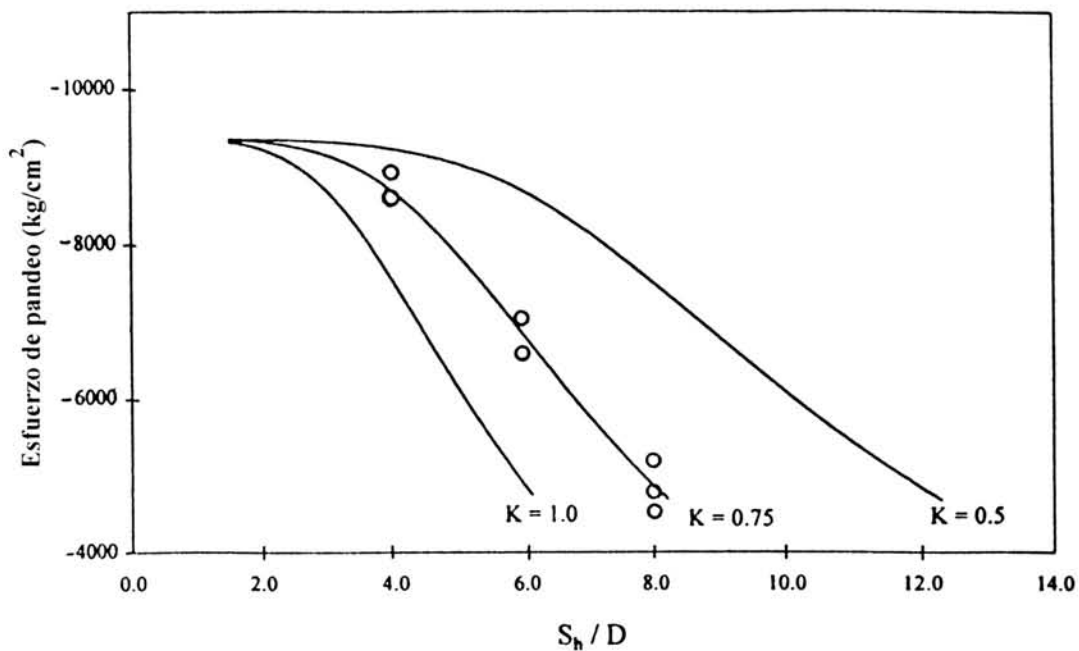


Fig 7. Curvas analíticas esfuerzo de pandeo-relación de esbeltez y resultados de ensayos en compresión de tipo monotónico

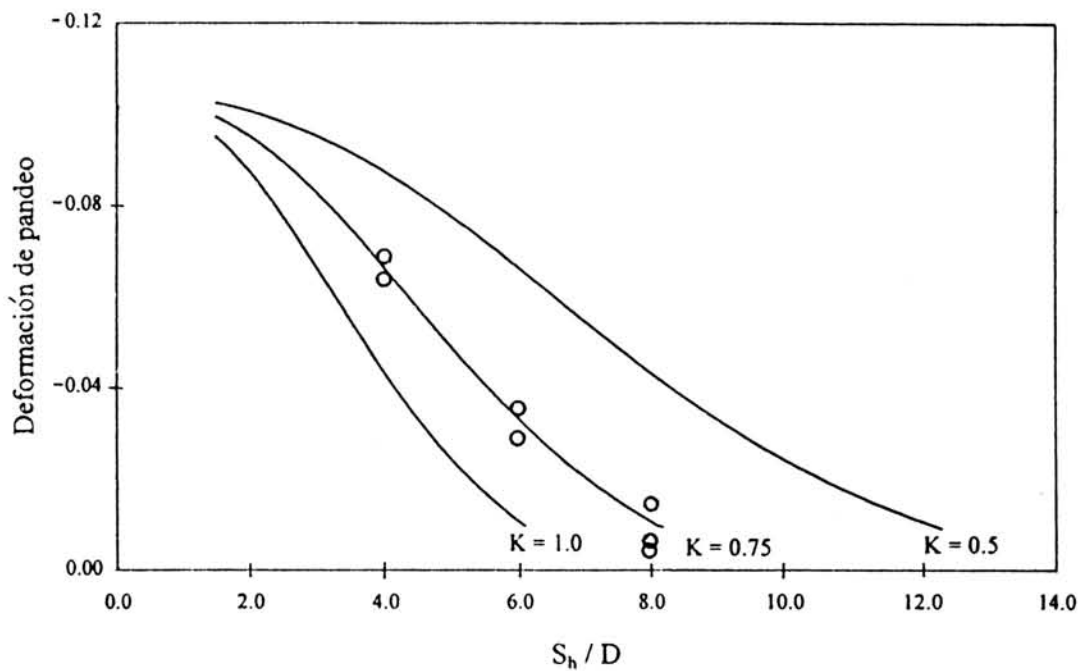


Fig 8. Curvas analíticas deformación de pandeo-relación de esbeltez y resultados de ensayos en compresión de tipo monotónico

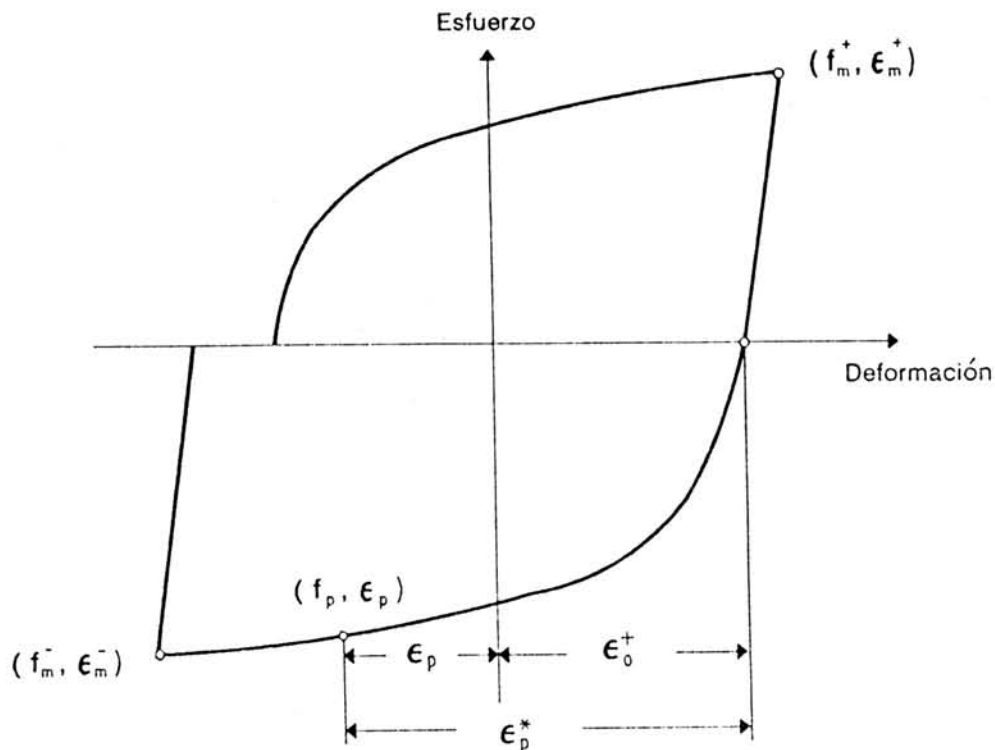


Fig 9. Parámetros que definen el inicio del pandeo de una barra de refuerzo sometida a carga cíclica reversible

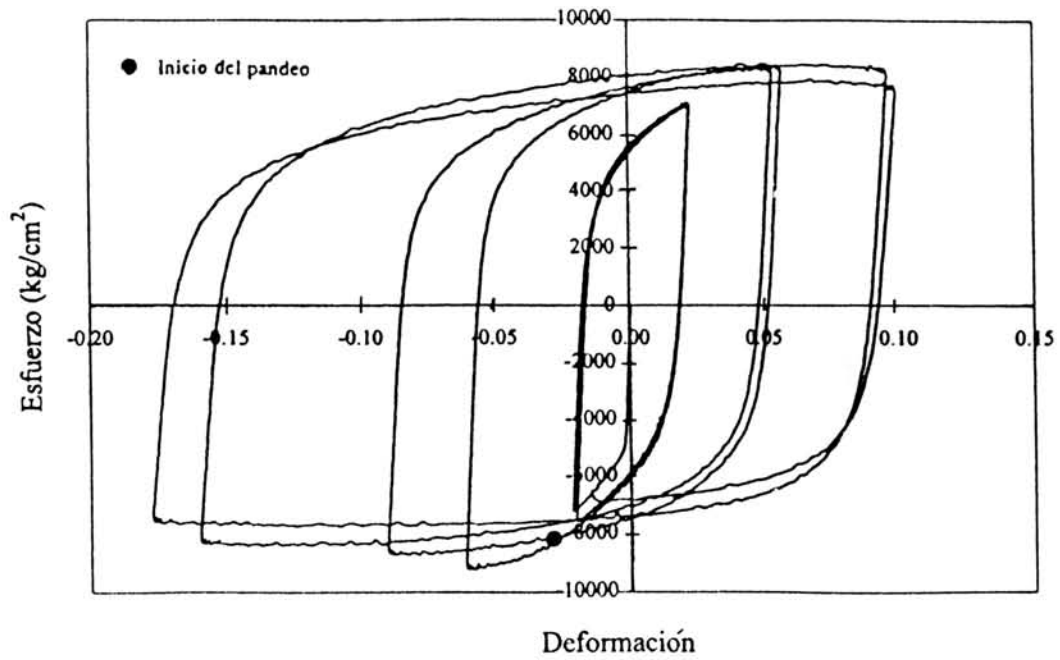
la asimetría en estos valores sugiere probables casos conservadores en este tipo de estructuras. El denominado “caso especial” se caracterizó por efectuarse en una probeta con un valor de 4 para s_H/D . Al inicio del ensaye en esta probeta, se aplicó una deformación máxima de tensión aproximadamente igual a 0.13, valor cercano al correspondiente a la media de ϵ_{su} , que fue aproximadamente igual a 0.12 (Rodríguez y Botero, 1996). Como se comenta posteriormente, en el siguiente medio ciclo se aplicó carga de compresión hasta alcanzar una configuración visual de pandeo.

La fig 10 presenta resultados de ciclos de histéresis esfuerzo-deformación obtenidos en los ensayos cíclicos reversibles en una probeta con relación s_H/D igual a cuatro. Ciclos cualitativamente semejantes fueron observados en probetas con otros valores para la mencionada relación (Rodríguez *et al.*, 1997). La fig 10 permite evaluar el criterio anteriormente comentado para definir el inicio del pandeo. En estos resul-

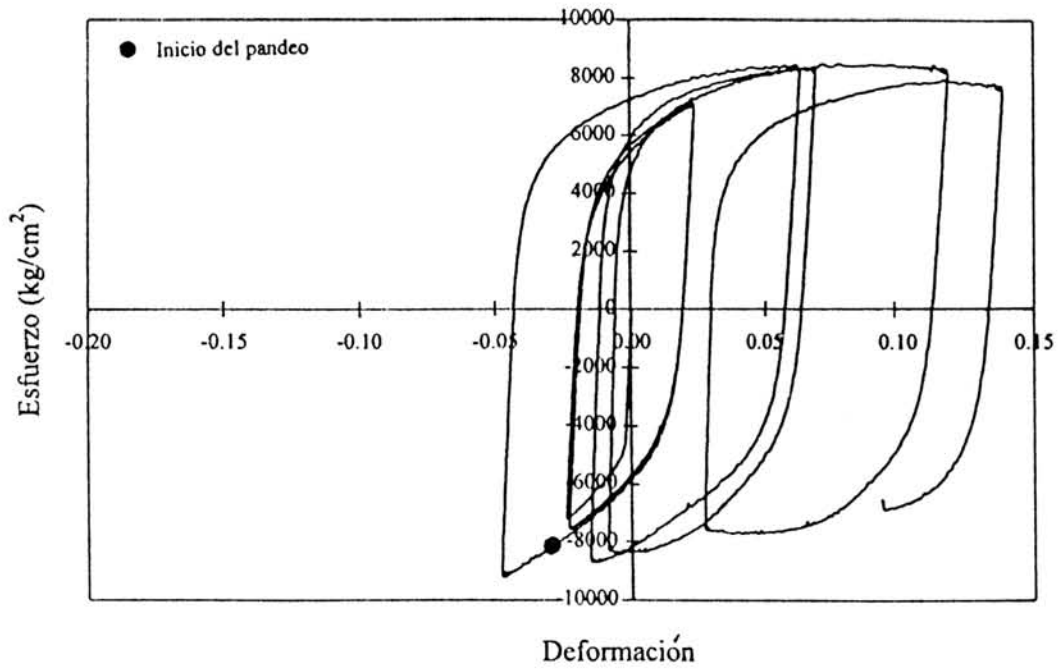
tados se aprecia la creciente diferencia de deformaciones en ambos lados de la probeta (cóncavo y convexo) después del inicio del pandeo. De acuerdo con el criterio de definición de pandeo empleado, las probetas con valores s_H/D iguales a 2.5 no tuvieron inicio de pandeo. La fig 11 muestra resultados del mismo tipo de los de la fig 10 anteriormente comentados, pero para el caso de ciclos asimétricos. Ambos casos coinciden en que la diferencia de deformaciones a ambos lados de la probeta son más importantes a medida que crece el nivel de deformaciones en la probeta después del inicio del pandeo.

c) Modelo analítico para definir el inicio del pandeo

En lo que sigue, el valor de la deformación en la probeta correspondiente al cambio de aplicación de carga de tensión a compresión del ciclo donde se presenta el pandeo, se define como ϵ_0^+ (fig 9). Se propone el empleo del

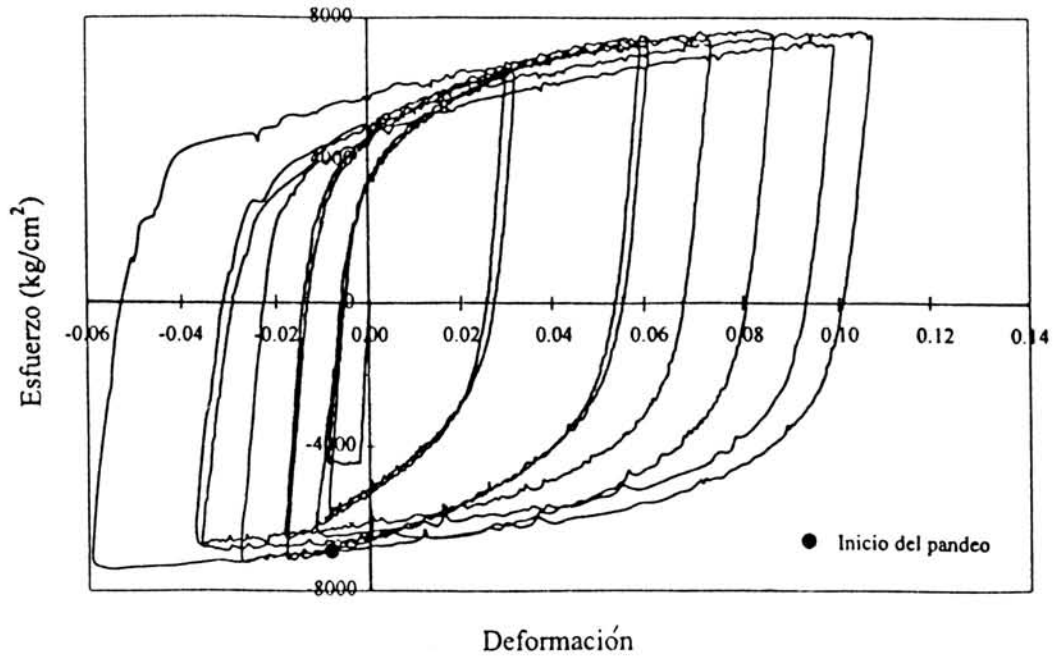


(a)



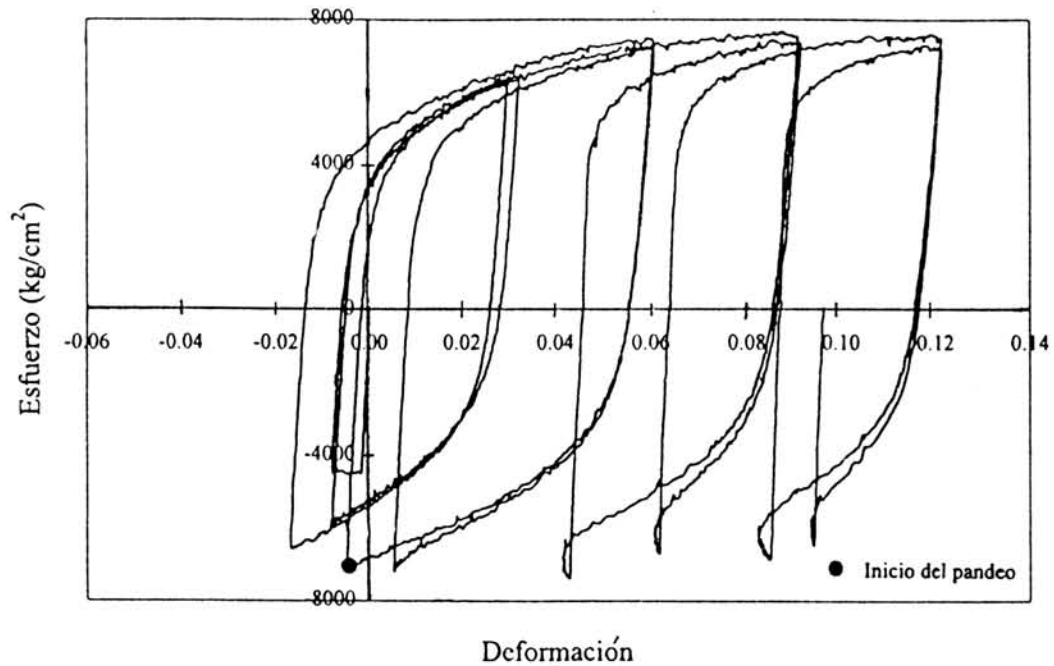
(b)

Fig 10. Resultados de ensayos cíclicos reversibles simétricos en una probeta con relación de esbeltez 4. (a) Lado cóncavo, (b) Lado convexo



Deformación

(a)



Deformación

(b)

Fig 11. Resultados de ensayos cíclicos reversibles asimétricos en una probeta con relación de esbeltez 4. (a) Lado cóncavo, (b) Lado convexo.

parámetro ε_p^* para evaluar el estado de deformaciones asociado al pandeo, este parámetro se define como la diferencia entre ε_0^+ y el valor de la deformación de pandeo, ε_p , es decir:

$$\varepsilon_p^* = \varepsilon_0^+ - \varepsilon_p \quad (6)$$

Las figs 12 y 13 muestran valores para f_p y ε_p^* , respectivamente, medidos en los ensayos cíclicos reversibles de las probetas estudiadas, incluyendo el denominado "caso especial". Una descripción detallada de estos resultados ha sido efectuada por Rodríguez *et al.* (1997). Las figs 12 y 13 presentan también las curvas analíticas correspondientes a los parámetros f_p y ε_p^* , respectivamente, en función del parámetro s_h/D , las que son las mismas que se presentaron en las figs 7 y 8, con la variante que el parámetro ε_p que interviene en éstas se reemplaza por el parámetro ε_p^* .

Los resultados de la fig 12 muestran que en algunos casos de ciclos simétricos, los esfuerzos de pandeo obtenidos a partir de los resultados experimentales presentan una correlación aceptable respecto a la curva analítica asociada al valor de 0.75 para K . Sin embargo, para el caso de ciclos asimétricos, la evaluación analítica lleva a resultados del lado de la inseguridad respecto a los experimentales. Estas diferencias sugieren que el empleo de un modelo basado en cargas monotónicas no es adecuado para la predicción de esfuerzos de pandeo en probetas sometidas a cargas del tipo cíclico reversible. Por esta razón, como se comenta posteriormente, para la evaluación de esfuerzos de pandeo en la condición de cargas cíclicas reversibles se propone emplear el modelo analítico de Mander *et al.*, anteriormente comentado, el cual considera este último tipo de cargas.

De manera diferente al caso de evaluación de esfuerzos de pandeo comentado (fig 12), los resultados de la fig 13 muestran que la evaluación de deformaciones de pandeo de acuerdo con el criterio del doble módulo reducido tiende a ser conservadora respecto a la curva analítica asociada al valor de 0.75 seleccionado para K .

Los resultados observados en esta investigación sugieren que los valores de las

deformaciones asociadas al inicio del pandeo en las probetas ensayadas dependen significativamente de la deformación máxima en tensión alcanzada en el ciclo de carga donde se inicia el pandeo. Estos resultados son semejantes a los anteriormente comentados para los casos estudiados por Suda *et al.* (1996). Una verificación adicional de este comportamiento la da los resultados encontrados en el denominado "caso especial", fig 14, correspondiente a las curvas experimentales esfuerzo-deformación de los lados cóncavo y convexo de la probeta. Como se aprecia en estos resultados, el inicio del pandeo de la probeta ensayada ocurrió para deformaciones en tensión y no en compresión, como fue el caso de las demás probetas sometidas a cargas del tipo cíclico reversible.

Los resultados encontrados en esta investigación indican que la teoría del doble módulo reducido se puede aplicar para definir el inicio del pandeo de barras sometidas tanto a carga monotónicas, como a cíclicas reversibles, siempre y cuando en este último caso se emplee el parámetro ε_p^* .

- d) Evaluación de curvas cíclicas reversibles esfuerzo-deformación en barras de refuerzo antes del inicio del pandeo

La fig 15 muestra curvas esfuerzo-deformación obtenidas al emplear el modelo analítico propuesto por Mander *et al.* (1984) para definir curvas esfuerzo-deformación de barras de acero de refuerzo sometidas a cargas cíclicas reversibles. En esta figura, se empleó el mencionado modelo con las historias de deformaciones experimentales antes del inicio del pandeo (definido con el criterio propuesto en este estudio), correspondientes a una probeta con valor 4 para s_h/D , ensayada con el tipo de ciclos asimétricos anteriormente descrito. Además, con este modelo se emplearon los parámetros que definen la curva esfuerzo-deformación de tensión y compresión representativos de la mencionada probeta. La fig 15 muestra, además, la curva esfuerzo-deformación correspondiente a la misma probeta obtenida en el ensaye de ésta. La comparación de los resultados analíticos y experimentales indica una buena correlación entre ellos. De acuerdo con Rodríguez *et al.* (1997) los

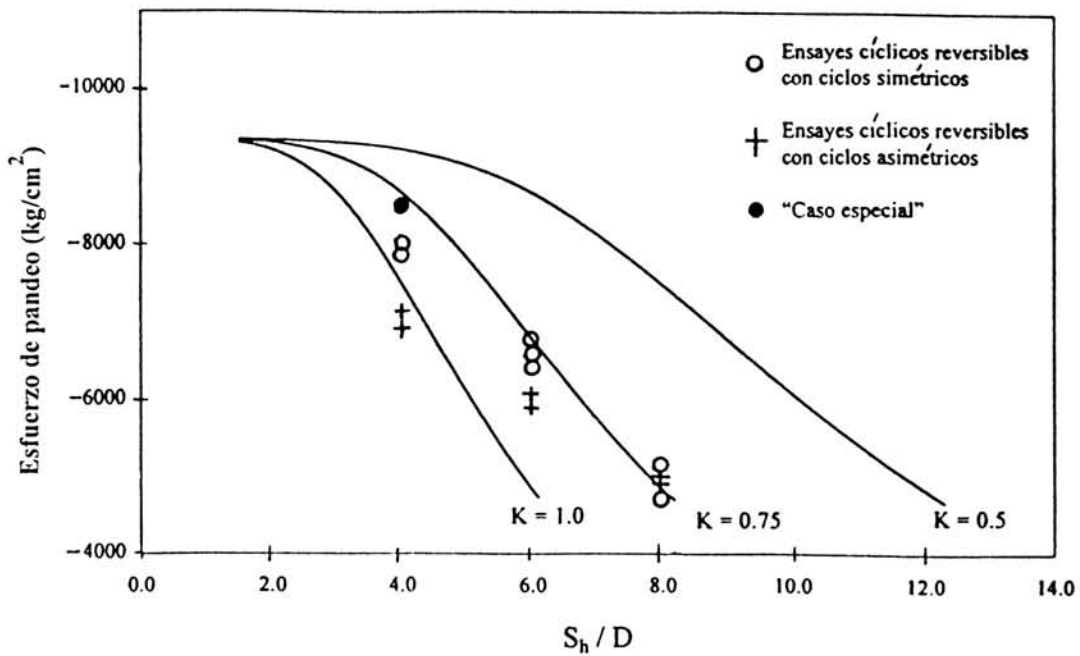


Fig 12. Curvas analíticas esfuerzo de pandeo-relación de esbeltez y resultados de ensayos cíclicos reversibles

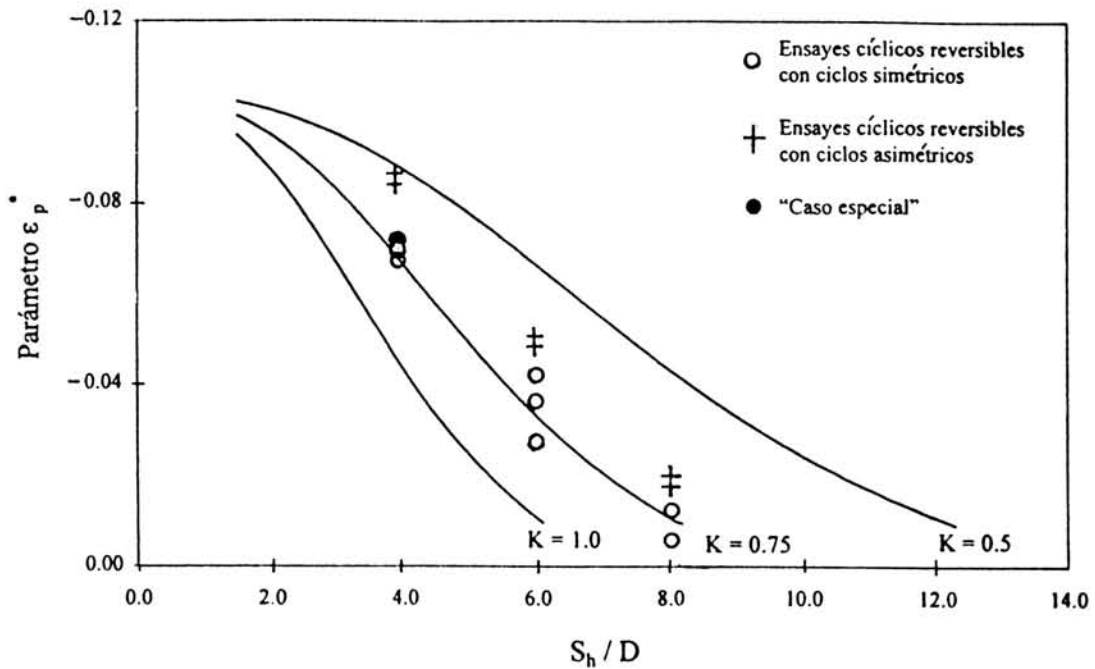
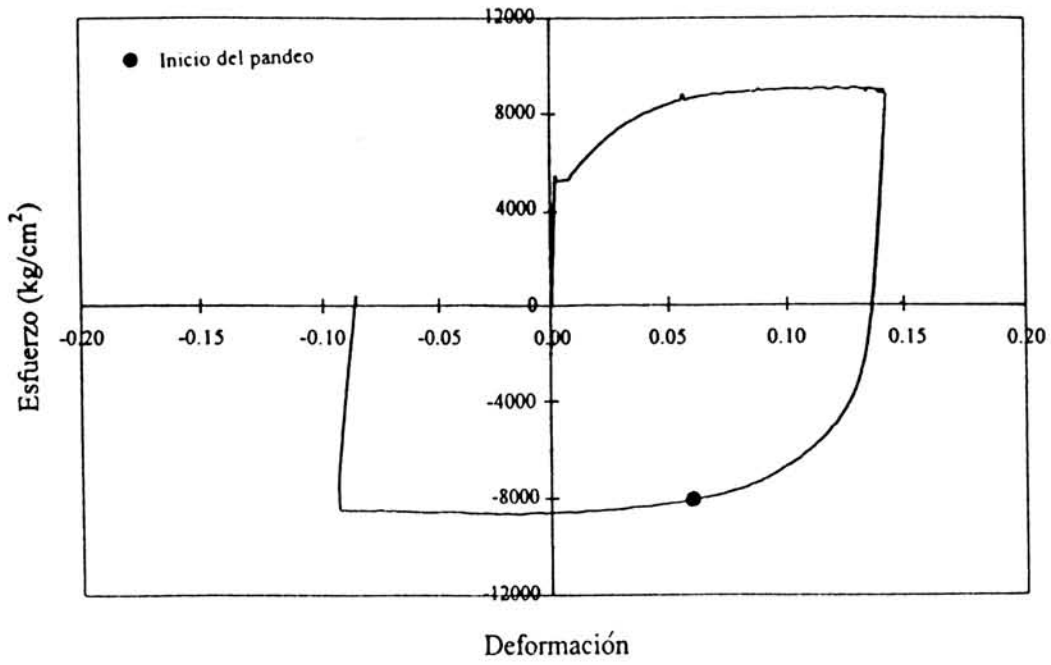
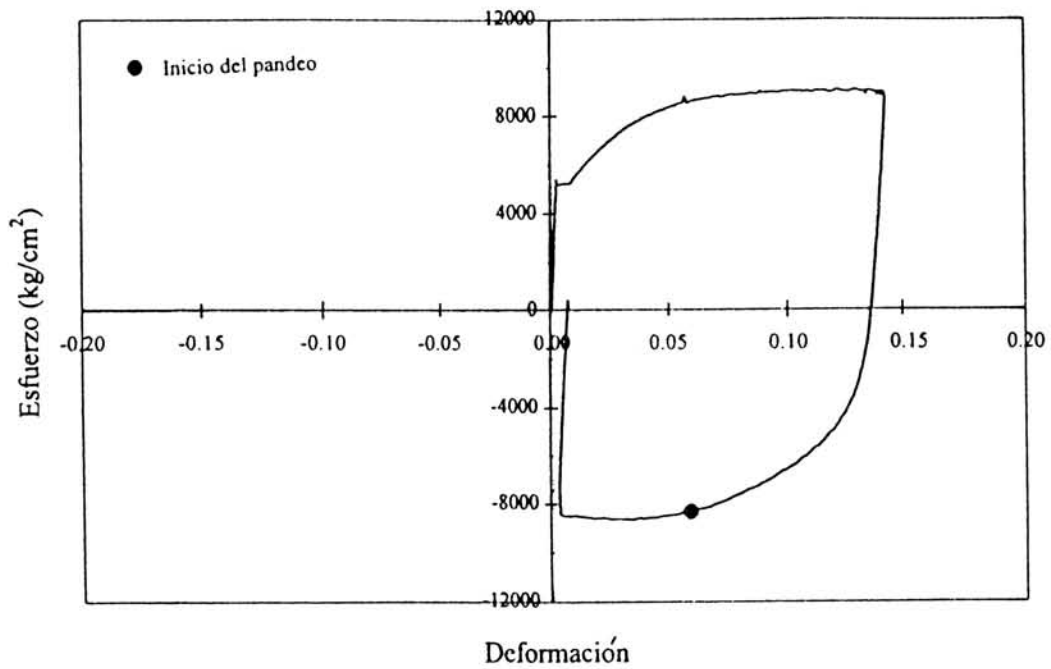


Fig 13. Curvas analíticas deformación de pandeo-relación de esbeltez y resultados de ensayos cíclicos reversibles



(a)



(b)

Fig 14. Resultados de ensayos cíclicos reversibles en el “caso especial”, relación de esbeltez 4. (a) Lado cóncavo, (b) Lado convexo

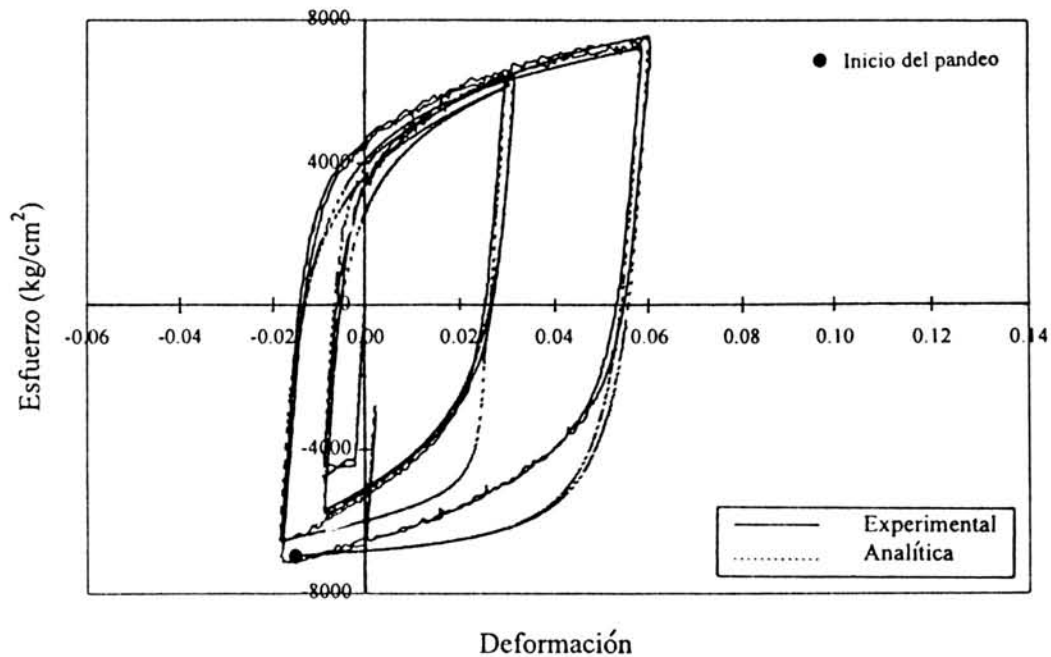


Fig 15. Curvas esfuerzo-deformación analítica y experimental con ciclos reversibles asimétricos antes el inicio del pandeo. Relación de esbeltez 4

resultados mostrados en la fig 15 son cualitativamente semejantes a los encontrados en la población restante de probetas ensayadas con cargas cíclicas reversibles, simétricas y asimétricas en deformaciones. Estos resultados sugieren que el modelo analítico propuesto por Mander *et al.* (1984) lleva a una buena correlación con los resultados experimentales obtenidos en este estudio, tanto para los casos de ciclos simétricos de deformaciones, como para los de tipo asimétrico.

CONCLUSIONES

En esta investigación se efectuaron estudios analíticos y experimentales con el objeto de definir el comportamiento de barras de acero de refuerzo considerando diferentes estados de carga, incluyendo la de tipo cíclico reversible. Se estudiaron los parámetros necesarios para describir las curvas esfuerzo-deformación para los tipos de carga analizados. Además, se definió y evaluó el modo de falla asociado al pandeo de barras de acero de refuerzo.

Con el objeto de obtener curvas esfuerzo-deformación de barras cortas de acero sometidas a carga de compresión se utilizó el modelo propuesto por Dodd y Restrepo (1995), el cual permite definir este tipo de curva a partir de la de tensión. La correlación de resultados obtenidos con este modelo y los obtenidos experimentalmente fue aceptable. Se debe mencionar que las características de las curvas esfuerzo-deformación de barras cortas en compresión, en intervalos de deformaciones relevantes en la respuesta sísmica, son significativamente diferentes a las de tensión, por lo que el empleo de éstas como representativas de las de una barra corta en compresión no es recomendable.

La mayoría de los casos de barras de refuerzo sometidas a carga monotónica en compresión presentaron un modo de falla asociado al efecto de pandeo, lo que ocurrió en barras con relaciones de esbeltez iguales o mayores que 4. Para el estudio del pandeo con este tipo de carga se utilizó la teoría del doble módulo

reducido. Se encontró que los resultados obtenidos experimentalmente presentaron una buena correlación con los analíticos.

Los resultados de esta investigación muestran que las barras de refuerzo sometidas a cargas cíclicas reversibles pueden presentar modos de falla asociados al pandeo tanto en la condición de deformaciones en compresión, como en la de tensión. Los ensayos efectuados fueron de dos tipos, simétricos y asimétricos en deformaciones. Como en el caso de carga monotónica en compresión, en este tipo de ensayos se encontró que el pandeo ocurrió para relaciones de esbeltez mayores o iguales a 4.

En la literatura revisada no se encontró un procedimiento que permitiera definir y evaluar, con un grado de dificultad y confiabilidad aceptable, el inicio del pandeo de barras de acero sometidas a cargas cíclicas reversibles. En el presente trabajo se propone el empleo del parámetro ϵ_p^* , para definir el inicio del pandeo en esta condición de carga. Este parámetro toma en cuenta el nivel de deformaciones en tensión en la barra antes del inicio del pandeo. Al evaluar los valores del parámetro ϵ_p^* para los casos de los ensayos con cargas cíclicas reversibles, se pudo observar que estos valores fueron similares a los de deformación de pandeo obtenidos en los ensayos monotónicos en compresión. Esto muestra las bondades e importancia del parámetro ϵ_p^* , ya que a partir del procedimiento de evaluación del pandeo monotónico empleando la teoría del doble módulo reducido, es factible evaluar el estado de deformaciones asociado al inicio del pandeo de barras de acero de refuerzo sometidas a acciones cíclicas. Se encontró además una correlación aceptable entre ϵ_p^* y la deformación de pandeo de las probetas sometidas a cargas monotónicas de compresión, la que es válida tanto para los ensayos sometidos a ciclos simétricos como para los asimétricos, aun cuando en este último caso los resultados son conservadores respecto a los del primero. Esto indica que los valores de las deformaciones de pandeo en ensayos cíclicos dependen significativamente de la deformación máxima en tensión alcanzada en el ciclo donde se produce el pandeo.

En esta investigación se encontró que el modelo utilizado para obtener la curva esfuerzo-defor-

mación de barras cortas de acero de refuerzo en compresión propuesto por Mander *et al.* (1984) puede emplearse para definir curvas esfuerzo-deformación de barras de refuerzo sometidas a cargas cíclicas reversibles antes del inicio de pandeo de éstas. Los resultados encontrados con este procedimiento presentaron una correlación aceptable con los obtenidos experimentalmente, tanto para los casos de ciclos simétricos como asimétricos. Estos resultados sugieren la bondad de este modelo para la evaluación analítica del estado de esfuerzos y deformaciones en barras de refuerzo sometidas a acciones de tipo cíclico reversible.

Los criterios descritos en esta investigación para definir curvas esfuerzo-deformación de barras de refuerzo sometidas a acciones cíclicas reversibles permiten evaluar de manera aproximada el comportamiento sísmico de elementos de concreto reforzado, tomando en cuenta el comportamiento de barras de refuerzo para diversos modos de falla de las secciones críticas, incluyendo el pandeo de estas barras. Sin embargo, estos criterios se desarrollaron con base en las condiciones de ensayo de las barras estudiadas en esta investigación, las que no representan totalmente a las existentes en elementos de concreto reforzado. En éstos, el refuerzo transversal restringe de diferentes maneras el pandeo del refuerzo longitudinal; además, la expansión del concreto confinado, en la dirección perpendicular a la del refuerzo longitudinal, causa un empuje lateral que es desfavorable en el fenómeno del pandeo. Estos efectos se deben estudiar en elementos de concreto reforzado, con el objeto de dar recomendaciones específicas para el diseño de estructuras de concreto reforzado sometidas a acciones sísmicas.

REFERENCIAS

- ACI 318-95 (1995). "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", ACI Committee 318 (ACI 318-95), American Concrete Institute, Detroit, U.S.A.
- ASTM (1993). "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", American Society for Testing and Materials. ASTM E 8M-93. U.S.A.

- Bresler, B. y Gilbert P.H. (1961). "Tie Requirements for Reinforced Concrete Columns", *Journal of the American Concrete Institute*, 555-569, November.
- Dodd, L.L. y Restrepo-Posada, J.I. (1995). "Model for Predicting Cyclic Behavior of Reinforcing Steel", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 3, March.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N. y Park, R. (1984). "Seismic Design of Bridge Piers", Report 84-2, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Mau, S.T. (1990). "Effect of Tie Spacing on Inelastic Buckling of Reinforcing Bars", *ACI Structural Journal*, Vol 87, No. 6, November-December.
- Monti, G. y Nuti, C. (1992). "Nonlinear Cyclic Behavior of Reinforcing Bars Including Buckling", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 12, December.
- Papia, M., Russo, G. y Zinzone G. (1988). "Instability of Longitudinal Bars in RC Columns", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol 114, No. 2, 445-461, February.
- Park, R. y Paulay, T. (1975). "Reinforced Concrete Structures", Ed. John Wiley & Sons, New York.
- RDF-93 (1993). "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal", *Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal*, México, junio.
- Rodríguez, M. y Botero, J.C. (1996). "Criterios de diseño sísmico de estructuras de concreto reforzado considerando las propiedades mecánicas de aceros de refuerzo producidos en México", *Publicación Series del Instituto de Ingeniería*, UNAM, No. 575, enero.
- Rodríguez, M., Botero, J.C. y Aire C. (1997). "Comportamiento de barras de refuerzo sometidas a cargas monotónicas y cíclicas reversibles incluyendo pandeo". Entregado para publicación en la Serie Azul del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Salmon, C.G. y Johnson, J.E. (1980). "Steel Structures: Design and Behavior", Harper Collins Publishers, Third Edition, U.S.A.
- Scribner Ch. (1986). "Reinforcement Buckling in Reinforced Concrete Flexural Members", *ACI Journal*, 966-973, November-December.
- Suda K., Murayama, Y., Ichinomiya T., y Shimbo H. (1996). "Buckling Behavior of Longitudinal Reinforcing Bars in Concrete Column subjected to Reverse lateral Loading", *Proceedings Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, June.

AGRADECIMIENTO

Se agradece al Departamento del Distrito Federal y al Instituto de Ingeniería (I de I), UNAM, por el patrocinio a esta investigación, así como a Sergio Santiago, anteriormente estudiante de Posgrado de la DEPFI, UNAM, y a Carlos Aire, Técnico Académico del I de I, por su colaboración en algunos de los ensayos efectuados.