
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

01/06/96 3
29

**PANDEO EN BARRAS DE REFUERZO SOMETIDAS A
CARGAS MONOTÓNICAS Y CÍCLICAS REVERSIBLES.**

JUAN CARLOS BOTERO PALACIO

TESIS

PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA
(ESTRUCTURAS)

DIRECTOR DE TESIS: DR. MARIO RODRÍGUEZ R.

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

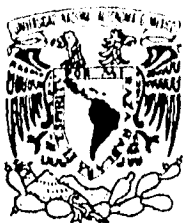


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Profesor:
DR. MARIO RODRIGUEZ RODRIGUEZ
P r e s e n t e.

Comunico a usted que a propuesta del Jefe de la Sección de Ingeniería (Estructuras), ha sido designado director de tesis del alumno JUAN CARLOS BOTERO PALACIO, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería (Estructuras).

Mucho he de agradecerle su comunicación por escrito a la aceptación a esta designación y el nombre de la tesis a desarrollar.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, 8 de enero de 1996
LA SECRETARIA ACADEMICA


M EN I. NORMA ELENA URIBE MEMIJE

BJS*jac.

Todos necesitamos alguien que desee vernos triunfar,
alguien que nos estimule a grandes esfuerzos,
alguien que nos proporcione una razón ajena,
a nosotros mismos para lograr el éxito.
Puede ser un padre o una madre que nos amen,
puede ser un amigo que nos inspire,
un jefe que espere más de nosotros
y nos obligue a superarnos.

ARTHUR GORDON.

A Judith y a Andrés,
A Margarita,
A Tere y a Lura,
Por su amor, entrega,
confianza y apoyo,
Razones suficientes para vivir
y seguir adelante.
GRACIAS.

INDICE

INDICE	i
LISTA DE TABLAS ..	iv
LISTA DE FIGURAS	v
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Alcance y objetivos	2
2. COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO SOMETIDO A CARGAS MONOTÓNICAS Y CÍCLICAS REVERSIBLES	3
2.1. Comportamiento del acero de refuerzo sometido a cargas monotónicas de tensión y compresión	3
2.1.1. Zona elástica lineal	4
2.1.2. Zona de fluencia	4
2.1.3. Zona de endurecimiento por deformación	5
2.1.3.1. Modelo propuesto por Park y Paulay (1978) para evaluar la curva esfuerzo- deformación en barras de acero sometidas a carga monotónica en tensión	6
2.1.3.2. Modelo propuesto por Mander et al. (1984) para evaluar la curva esfuerzo- deformación en barras de acero sometidas a carga monotónica en tensión	6
2.1.4. Evaluación de la curva esfuerzo-deformación en barras de acero cortas sometidas a carga monotónica de compresión	8
2.2. Comportamiento del acero de refuerzo sometido a cargas cíclicas reversibles	9
2.2.1. Modelo propuesto por Mander et al. (1984) para evaluar la curva esfuerzo- deformación en barras de acero sometidas a cargas cíclicas reversibles	10
2.2.1.1. Zona elástica lineal	11
2.2.1.2. Zona de fluencia	11

2.2.1.3.	Zona de endurecimiento por deformación	12
2.2.1.4.	Zona de descarga lineal partiendo de la curva monotónica	12
2.2.1.5.	Zona suavizada debido al efecto de Bauschinger	14
2.2.1.6.	Zona de descarga lineal partiendo de la curva suavizada debido al efecto de Bauschinger	18
3.	PANDEO EN BARRAS DE REFUERZO	19
3.1.	Introducción	19
3.2.	Evaluación del pandeo bajo cargas monotónicas empleando la teoría del doble módulo reducido	22
3.3.	Procedimiento para calcular el pandeo con empleo de gráficas, aplicando la teoría del doble módulo reducido	28
3.4.	Ejemplo de aplicación	30
4.	DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL	32
4.1.	Ensayes monotónicos a tensión	32
4.1.1.	Descripción de especímenes	32
4.1.2.	Descripción del marco de carga	33
4.1.3.	Instrumentación y adquisición de datos	33
4.2.	Ensayes monotónicos a compresión y cíclicos reversibles	35
4.2.1.	Descripción de especímenes	35
4.2.2.	Descripción del marco de carga	36
4.2.3.	Instrumentación y adquisición de datos	36
5.	EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	38
5.1.	Ensayes monotónicos a tensión	38
5.2.	Ensayes monotónicos a compresión	42
5.3.	Ensayes cíclicos reversibles	48
5.3.1.	Evaluación del pandeo en barras de refuerzo	48

5.3.2. Evaluación de curvas cíclicas reversibles esfuerzo-deformación en barras de refuerzo antes de que ocurra el pandeo	55
5.3.3. Comentarios finales	56
6. CONCLUSIONES	57
7. REFERENCIAS	61
APÉNDICE 1 Programa de cómputo para calcular esfuerzos de una barra de acero sometida a carga cíclica	65
APÉNDICE 2. Programa de cómputo para calcular las curvas esfuerzo y deformación de pandeo, para diferentes relaciones de esbeltez	70
APÉNDICE 3. Programa de cómputo para calcular la curva que relaciona los valores de E'_t/E_s y E_t/E_s	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1. Estadísticas de barra de diámetro grande.

Tabla 5.2. Estadísticas de barra de diámetro pequeño.

Tabla 5.3. Resultados experimentales de las probetas sometidas a cargas monotónicas a compresión.

Tabla 5.4. Resultados experimentales de las probetas sometidas a cargas cíclicas reversibles con ciclos simétricos.

Tabla 5.5. Resultados experimentales de las probetas sometidas a cargas cíclicas reversibles con ciclos asimétricos.

Tabla 5.6. Valores del esfuerzo de pandeo y del parámetro ϵ_p^* obtenidos de los ensayos cíclicos reversibles, con ciclos simétricos.

Tabla 5.7. Valores del esfuerzo de pandeo y del parámetro ϵ_p^* obtenidos de los ensayos cíclicos reversibles, con ciclos asimétricos.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1. Curva esfuerzo-deformación típica de barras de acero de refuerzo sometidas a cargas monotónicas.
- Figura 2.2. Curva esfuerzo-deformación típica de un ciclo reversible con descarga en la zona de fluencia (Mander et al., 1984).
- Figura 2.3. Curva esfuerzo-deformación típica de un ciclo reversible con descarga en la zona de endurecimiento por deformación (Mander et al., 1984).
- Figura 2.4. Curva que ilustra los parámetros E_m , f_{ch} y Q_m para la zona suavizada debido al efecto de Bauschinger (Menegotto y Pinto, 1973).
- Figura 2.5. Curva que ilustra la variación del parámetro R para la zona suavizada debido al efecto de Bauschinger, cuando Q es igual a cero (Mander et al., 1984).
- Figura 2.6. Curva que ilustra la variación del parámetro R para la zona suavizada debido al efecto de Bauschinger, cuando Q es igual a 0.1 (Mander et al., 1984).
- Figura 3.1. Sección transversal de una probeta de acero luego de que comienza el efecto de pandeo.
- Figura 3.2. Curva que relaciona los valores de E'_1/E_s y E_r/E_s de una probeta de acero de sección circular.
- Figura 4.1. Aparato para medir deformaciones en ensayos de barras de refuerzo.

-
- Figura 4.2. Esquema del equipo utilizado para los ensayos del tipo monotónico a tensión.
- Figura 4.3. Características de las probetas utilizadas para los ensayos del tipo monotónico a compresión y cíclicos reversibles.
- Figura 4.4. Esquema del equipo utilizado para los ensayos del tipo monotónico a compresión y cíclico reversible.
- Figura 5.1. Curva esfuerzo-deformación comparativa entre los modelos analíticos y los resultados experimentales de una barra de acero de refuerzo con diámetro igual a 1-1/4 plg.
- Figura 5.2. Curva esfuerzo-deformación comparativa entre los modelos analíticos y los resultados experimentales de una barra de acero de refuerzo con diámetro igual a 1 plg.
- Figura 5.3. Curva esfuerzo-deformación comparativa entre los modelos analíticos y los resultados experimentales de una barra de acero de refuerzo con diámetro igual a 3/4 plg.
- Figura 5.4. Curva esfuerzo-deformación comparativa entre los modelos analíticos y los resultados experimentales de una barra de acero de refuerzo con diámetro igual a 5/8 plg.
- Figura 5.5. Ajuste de distribución de probabilidad normal a la muestra de diámetros grandes. Esfuerzo de fluencia.
- Figura 5.6. Ajuste de distribución de probabilidad normal a la muestra de diámetros pequeños. Esfuerzo de fluencia.

Figura 5.7. Ajuste de distribución de probabilidad normal a la muestra de diámetros grandes. Esfuerzo máximo.

Figura 5.8. Ajuste de distribución de probabilidad normal a la muestra de diámetros pequeños. Esfuerzo máximo.

Figura 5.9. Curva esfuerzo-deformación representativa de la población de diámetros grandes.

Figura 5.10. Curva esfuerzo-deformación representativa de la población de diámetros pequeños.

Figura 5.11. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 2.5 sometida a carga monotónica de compresión. Lado cóncavo.

Figura 5.12. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 2.5 sometida a carga monotónica de compresión. Lado convexo.

Figura 5.13. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga monotónica de compresión. Lado cóncavo.

Figura 5.14. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga monotónica de compresión. Lado convexo.

Figura 5.15. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 6.0 sometida a carga monotónica de compresión. Lado cóncavo.

Figura 5.16. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 6.0 sometida a carga monotónica de compresión. Lado convexo.

- Figura 5.17. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 8.0 sometida a carga monotónica de compresión. Lado cóncavo.
- Figura 5.18. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 8.0 sometida a carga monotónica de compresión. Lado convexo.
- Figura 5.19. Curvas esfuerzo-deformación experimental y analíticas de barras de acero sometidas a carga monotónicas de compresión. Comparación de curvas analíticas de tensión y compresión.
- Figura 5.20. Curvas que relacionan el esfuerzo de pandeo y la relación de esbeltez. Comparación con resultados monotónicos experimentales.
- Figura 5.21. Curvas que relacionan la deformación de pandeo y la relación de esbeltez. Comparación con resultados monotónicos experimentales.
- Figura 5.22. Curva esfuerzo-deformación esquemática que ilustra los parámetros que definen el pandeo de una barra de acero sometida a carga cíclica reversible.
- Figura 5.23. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 2.5 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado cóncavo.
- Figura 5.24. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 2.5 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado convexo.
- Figura 5.25. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado cóncavo.
- Figura 5.26. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado convexo.

Figura 5.27. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 6.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado cóncavo.

Figura 5.28. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 6.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado convexo.

Figura 5.29. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 8.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado cóncavo.

Figura 5.30. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 8.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado convexo.

Figura 5.31. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 2.5 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado cóncavo.

Figura 5.32. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 2.5 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado convexo.

Figura 5.33. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado cóncavo.

Figura 5.34. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado convexo.

Figura 5.35. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 6.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado cóncavo.

Figura 5.36. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 6.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado convexo.

Figura 5.37. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 8.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado cóncavo.

Figura 5.38. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 8.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado convexo.

Figura 5.39. Curvas que relacionan el esfuerzo de pandeo y la relación de esbeltez. Comparación con resultados cíclicos reversibles experimentales, de barras sometidas a ciclos simétricos y asimétricos. Incluye el "Caso especial".

Figura 5.40. Curvas que relacionan el parámetro ϵ_p^* y la relación de esbeltez. Comparación con resultados cíclicos reversibles experimentales, de barras sometidas a ciclos simétricos y asimétricos. Incluye el "Caso especial".

Figura 5.41. Curva esfuerzo-deformación de la probeta "Caso especial" con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga de tensión y compresión. Lado cóncavo.

Figura 5.42. Curva esfuerzo-deformación de la probeta "Caso especial" con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga de tensión y compresión. Lado convexo.

Figura 5.43. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos simétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 2.5.

Figura 5.44. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos simétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 4.0.

Figura 5.45. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos simétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 6.0.

Figura 5.46. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos simétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 8.0.

Figura 5.47. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos asimétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 2.5.

Figura 5.48. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos asimétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 4.0.

Figura 5.49. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos asimétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 6.0.

Figura 5.50. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos asimétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 8.0.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Existe evidencia que muestra que ante solicitaciones cíclicas, como son las acciones sísmicas, el pandeo del acero de refuerzo longitudinal en elementos de concreto reforzado es uno de los modos de falla más usuales. Este modo de falla se ha presentado en terremotos de gran intensidad como el de México en 1985, Northridge en 1994, Kobe en 1995, Mazanillo en 1995, por mencionar algunos, en los cuales se observaron evidencias de pandeo en el refuerzo longitudinal.

Las fallas estructurales por inestabilidad o efectos de pandeo son espectaculares y muy peligrosas, ya que pueden generar colapsos de las estructuras en forma intempestiva. Los reglamentos de diseño de estructuras pretenden evitar este tipo de fallas.

Reglamentos como el del ACI 318R-89 (Estados Unidos), el RDF-93 (México), el NZS 3109-1987 (Nueva Zelanda), el CCCSR-84 (Colombia), estipulan separaciones máximas de refuerzo transversal con el fin de retrasar el efecto de pandeo del refuerzo longitudinal; sin embargo, estos requisitos se basan en escasos resultados de estudios experimentales del problema de pandeo.

Existen en la literatura estudios importantes que describen el comportamiento de barras de acero sometidas a cargas monotónicas de compresión, las cuales pretenden definir el efecto de pandeo en la zona inelástica de la curva de esfuerzo-deformación; sin embargo, son pocos los estudios que describen el efecto de pandeo en barras de acero sometidas a cargas cíclicas reversibles. Se debe mencionar que existe un vacío

importante en el estudio del efecto de pandeo cuando éste ocurre en la zona inelástica, ya que el efecto de pandeo en la zona elástica está claramente definido.

1.2. ALCANCE Y OBJETIVOS

En este trabajo se pretende definir de manera experimental el comportamiento de barras de refuerzo producidas en México utilizando diagramas esfuerzo-deformación obtenidos en ensayos de barras de refuerzo sometidas a cargas monotónicas y cíclicas reversibles, haciendo énfasis en el efecto de pandeo en la zona inelástica de la curva esfuerzo-deformación.

Inicialmente se hace una revisión de la literatura existente para definir modelos que permitan obtener la curva de esfuerzo-deformación de barras de refuerzo sometidas a cargas monotónicas y cíclicas reversibles. Posteriormente, se describe el efecto de pandeo para barras de refuerzo sometidas a cargas monotónicas y se presenta una definición del efecto de pandeo para barras de refuerzo sometidas a cargas cíclicas reversibles. Luego se describe detalladamente la forma cómo se realizaron los ensayos experimentales y por último se pretende encontrar la correlación entre los resultados empleando los modelos seleccionados y los obtenidos en forma experimental, con base en estos resultados se dan recomendaciones que permitan encontrar en forma simple las características fundamentales para definir el efecto de pandeo. Este trabajo es sólo un punto de partida para el desarrollo de futuras investigaciones que permitan definir de una mejor manera el efecto de pandeo de barras de refuerzo en elementos de concreto.

importante en el estudio del efecto de pandeo cuando éste ocurre en la zona inelástica, ya que el efecto de pandeo en la zona elástica está claramente definido.

1.2. ALCANCE Y OBJETIVOS

En este trabajo se pretende definir de manera experimental el comportamiento de barras de refuerzo producidas en México utilizando diagramas esfuerzo-deformación obtenidos en ensayos de barras de refuerzo sometidas a cargas monotónicas y cíclicas reversibles, haciendo énfasis en el efecto de pandeo en la zona inelástica de la curva esfuerzo-deformación.

Inicialmente se hace una revisión de la literatura existente para definir modelos que permitan obtener la curva de esfuerzo-deformación de barras de refuerzo sometidas a cargas monotónicas y cíclicas reversibles. Posteriormente, se describe el efecto de pandeo para barras de refuerzo sometidas a cargas monotónicas y se presenta una definición del efecto de pandeo para barras de refuerzo sometidas a cargas cíclicas reversibles. Luego se describe detalladamente la forma cómo se realizaron los ensayos experimentales y por último se pretende encontrar la correlación entre los resultados empleando los modelos seleccionados y los obtenidos en forma experimental, con base en estos resultados se dan recomendaciones que permitan encontrar en forma simple las características fundamentales para definir el efecto de pandeo. Este trabajo es sólo un punto de partida para el desarrollo de futuras investigaciones que permitan definir de una mejor manera el efecto de pandeo de barras de refuerzo en elementos de concreto.

2. COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO SOMETIDO A CARGAS MONÓTONICAS Y CÍCLICAS REVERSIBLES

2.1. COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO SOMETIDO A CARGAS MONOTÓNICAS DE TENSIÓN Y COMPRESIÓN

En el análisis sísmico de estructuras de concreto reforzado, es común considerar para el acero un modelo de la curva esfuerzo-deformación de tipo elastoplástico, es decir, en el cual el material se conserva elástico hasta alcanzar el valor del esfuerzo de fluencia, f_y , el cual está asociado a la deformación de fluencia, ϵ_y . Para deformaciones mayores a ϵ_y , el modelo elastoplástico considera que el esfuerzo permanece constante e igual a f_y . Este modelo es poco representativo, ya que está subestimando la capacidad del acero de absorber mayores esfuerzos luego de sobrepasar el esfuerzo de fluencia f_y .

Como resultado de una revisión de la literatura existente se seleccionaron dos modelos que permiten definir la curva esfuerzo-deformación del acero. El primer modelo empleado en el presente trabajo es descrito por Park y Paulay (1978) y el segundo corresponde al propuesto por Mander et al. (1984). Ambos modelos dividen la curva esfuerzo-deformación del acero de refuerzo en tres zonas: zona elástica lineal, zona de fluencia y zona de endurecimiento por deformación, tal como se ilustra en la figura 2.1. La diferencia entre estos dos modelos radica sólo en la forma como se representa la zona de endurecimiento por deformación. A continuación se describen las tres zonas mencionadas, que definen el comportamiento del acero de refuerzo sometido a la acción de cargas monotónicas en tensión. También se comentan criterios para definir curvas monotónicas de esfuerzo-deformación de barras cortas a compresión, a partir de las curvas correspondientes de barras a tensión.

2.1.1. Zona elástica lineal

Cuando se aplica carga a una barra de acero de refuerzo, ésta produce una distorsión no permanente en la estructura cristalográfica del acero, ya que cuando el material es descargado, esta estructura regresa a su configuración inicial, liberando así, toda la energía de deformación acumulada en el proceso de carga. Esta zona está limitada por el intervalo de deformaciones $0 \leq \epsilon_s \leq \epsilon_y$ y su principal característica es que los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones y al módulo de elasticidad o de Young, E_s . El valor del esfuerzo en esta zona, se puede obtener utilizando la siguiente expresión:

$$f_s = E_s \epsilon_s \quad (2.1)$$

$$E_t = E_s \quad (2.2)$$

Donde f_s y ϵ_s es el valor de los esfuerzos y las deformaciones respectivamente en cualquier punto de la curva esfuerzo-deformación y E_t es el valor del módulo tangente en cualquier punto de la curva esfuerzo-deformación. Cuando el valor de ϵ_s alcanza su valor máximo dentro de esta zona (ϵ_y) el esfuerzo asociado a dicha deformación queda definido por :

$$f_y = E_s \epsilon_y \quad (2.3)$$

Donde f_y y ϵ_y es el valor del esfuerzo y deformación asociado al inicio de la fluencia del acero, respectivamente.

2.1.2. Zona de fluencia

Esta zona es conocida también como plataforma de fluencia o zona de deformación de Lüders. En esta zona las distorsiones de la estructura cristalográfica se vuelven permanentes y el material se comporta plásticamente, es decir, no se requiere un aumento de carga, para que los cristales que forman la estructura del material se puedan mover libremente. Esto se debe básicamente a

2.1.1. Zona elástica lineal

Cuando se aplica carga a una barra de acero de refuerzo, ésta produce una distorsión no permanente en la estructura cristalográfica del acero, ya que cuando el material es descargado, esta estructura regresa a su configuración inicial, liberando así, toda la energía de deformación acumulada en el proceso de carga. Esta zona está limitada por el intervalo de deformaciones $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y$ y su principal característica es que los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones y al módulo de elasticidad o de Young, E_s . El valor del esfuerzo en esta zona, se puede obtener utilizando la siguiente expresión:

$$f_s = E_s \varepsilon_s \quad (2.1)$$

$$E_t = E_s \quad (2.2)$$

Donde f_s y ε_s es el valor de los esfuerzos y las deformaciones respectivamente en cualquier punto de la curva esfuerzo-deformación y E_t es el valor del módulo tangente en cualquier punto de la curva esfuerzo-deformación. Cuando el valor de ε_s alcanza su valor máximo dentro de esta zona (ε_y) el esfuerzo asociado a dicha deformación queda definido por :

$$f_y = E_s \varepsilon_y \quad (2.3)$$

Donde f_y y ε_y es el valor del esfuerzo y deformación asociado al inicio de la fluencia del acero, respectivamente.

2.1.2. Zona de fluencia

Esta zona es conocida también como plataforma de fluencia o zona de deformación de Lüders. En esta zona las distorsiones de la estructura cristalográfica se vuelven permanentes y el material se comporta plásticamente, es decir, no se requiere un aumento de carga, para que los cristales que forman la estructura del material se puedan mover libremente. Esto se debe básicamente a

una reacondición de los cristales distorsionados dentro de su estructura. Esta zona no es totalmente plana (Dodd y Restrepo-Posada, 1995), pero debido a sus pequeñas variaciones, la forma de esta zona se puede suponer totalmente plana, como se observa en la figura 2.1. Esta zona está limitada por el intervalo $\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}$ donde ϵ_{sh} es la deformación del acero asociada al inicio de la zona de endurecimiento por deformación. La siguiente expresión, define esta zona :

$$f_s = f_y \quad (2.4)$$

$$E_t \approx 0 \quad (2.5)$$

2.1.3. Zona de endurecimiento por deformación

Al seguir aumentando la carga que se aplica a la barra de acero y al terminar la zona de fluencia, comienza la zona llamada de endurecimiento por deformación. Los cristales que forman la estructura interna del material sufren grandes distorsiones con el aumento de carga, pero a diferencia de la zona elástica, el material no se comporta en forma lineal sino que, debido al deslizamiento de los cristales, el material va perdiendo rigidez. Esta zona está definida por el intervalo $\epsilon_{sh} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$ donde ϵ_{su} es el valor de deformación asociado al esfuerzo máximo, f_{su} . Es importante aclarar, que aun cuando a partir de f_{su} hay una zona descendente en la curva esfuerzo-deformación, en el modelo empleado se considera que esta zona no es de importancia, ya que se pretende evaluar la capacidad máxima de cualquier elemento estructural y es claro que dicha capacidad sólo podrá estar asociada al esfuerzo máximo del acero, f_{su} , siempre y cuando el modo de falla se presente por este efecto (Andriono y Park, 1986).

Se presenta a continuación las expresiones que definen el modelo de Park y Paulay (1978) y el de Mander et al. (1984).

2.1.3.1. Modelo propuesto por Park y Paulay (1978) para evaluar la curva esfuerzo-deformación en barras de acero sometidas a carga monotónica en tensión

En la zona de endurecimiento por deformación el esfuerzo se define como :

$$f_s = f_y \left[\frac{m u + 2}{60 u + 2} + \frac{(60 - m) u}{2 (30 r + 1)^2} \right] \quad (2.6)$$

Donde :

$$m = \frac{\left(\frac{f_{su}}{f_y} \right) (30 r + 1)^2 - 60 r - 1}{15 r^2} \quad (2.7)$$

Los parámetros r y u quedan definidos así :

$$r = \epsilon_{su} - \epsilon_{sh} \quad (2.8)$$

$$u = \epsilon_s - \epsilon_{sh} \quad (2.9)$$

2.1.3.2. Modelo propuesto por Mander et al. (1984) para evaluar la curva esfuerzo-deformación en barras de acero sometidas a carga monotónica en tensión

De acuerdo al modelo propuesto por Mander et al. (1984), el esfuerzo en la zona de endurecimiento por deformación, f_s , asociado a la deformación, ϵ_s , se puede evaluar con la siguiente expresión :

$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su}) \left(\frac{\epsilon_{su} - \epsilon_s}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right)^p \quad (2.10)$$

$$E_t = \frac{df_s}{d\epsilon_s} = \frac{P}{r^p} (f_{su} - f_y) (r - u)^{p-1} \quad (2.11)$$

P es un parámetro que permite definir la forma de la curva esfuerzo-deformación de los aceros de refuerzo en esta zona (Rodríguez y Botero, 1994).

Para definir el valor de P con la expresión 2.10, podemos emplear procedimientos matemáticos utilizando la definición de logaritmo natural y haciendo $f_s = f_{s1}$ y $\epsilon_s = \epsilon_{s1}$, donde (ϵ_{s1}, f_{s1}) es un punto experimental arbitrario perteneciente a la zona de endurecimiento por deformación. La ordenada f_{s1} se obtuvo como el promedio de f_y y f_{su} . Luego de realizar este procedimiento, el valor de P queda definido por :

$$P = \frac{\text{Ln} \left(\frac{f_{su} - f_{s1}}{f_{su} - f_y} \right)}{\text{Ln} \left(\frac{\epsilon_{su} - \epsilon_{s1}}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right)} \quad (2.12)$$

Con la inspección de las expresiones que definen a la curva esfuerzo-deformación en todos sus intervalos, podemos ver que los parámetros básicos para definir a f_s en cualquier punto de la curva son : f_y , f_{su} , ϵ_{sh} , ϵ_{su} , E_s y P (Rodríguez y Botero, 1995).

P se puede evaluar derivando la expresión 2.10 respecto a ϵ_s y haciendo $\epsilon_s = \epsilon_{sh}$, con lo que se obtiene :

$$E_{sh} = \frac{d f_s}{d \epsilon_s} \quad (2.13)$$

A partir de las expresiones 2.10 y 2.13 se obtiene :

$$P = E_{sh} \frac{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}}{f_{su} - f_y} \quad (2.14)$$

La expresión 2.14 indica que el valor de E_{sh} y P están relacionados, por lo que algunos investigadores emplean E_{sh} en lugar de P.

Se ha encontrado que la expresión 2.14 para evaluar el valor de P, lleva a una buena correlación de resultados experimentales y analíticos (Mander et al., 1984). Un inconveniente del empleo de E_{sh} como parámetro de referencia es que variaciones pequeñas de los valores experimentales que se obtengan pueden conducir a cambios significativos en los valores de P. En el presente trabajo se utilizó el valor de P calculado con la expresión 2.12.

2.1.4. Evaluación de la curva esfuerzo-deformación en barras de acero cortas sometidas a carga monotónica de compresión.

Los modelos anteriores definen el comportamiento del acero sometido a cargas de tensión y no a compresión; sin embargo, mediante un procedimiento analítico es posible obtener la curva esfuerzo-deformación de una barra corta de acero sometido a carga de compresión a partir de la del acero sometido a carga de tensión. Este procedimiento (Dodd y Restrepo-Posada, 1995) pretende establecer una equivalencia entre los esfuerzos y las deformaciones de barras de aceros sometidas a carga de tensión y de compresión, mediante la hipótesis de que no hay pérdida de volumen de la barra de acero ensayada, lo que implica que las dimensiones longitudinales y transversales de dicha barra sólo varían según el efecto de Poisson. Este procedimiento no incluye el efecto de pandeo del acero sometido a compresión, ya que supone que la barra presenta una relación de esbeltez suficientemente pequeña para que no se presente dicho efecto.

Las expresiones que permiten obtener la curva de esfuerzo en compresión, f_{sc} , y la deformación en compresión, ϵ_{sc} , (el subíndice "c" indica que los esfuerzos y deformaciones respectivas son de compresión) de una barra corta de acero a partir de la curva monotónica de tensión (Dodd y Restrepo-Posada, 1995), son las siguientes :

$$f_{sc} = -f_s (1 + \epsilon_s)^2 \quad (2.15)$$

$$\epsilon_{sc} = \frac{-\epsilon_s}{1 + \epsilon_s} \quad (2.16)$$

Combinando las expresiones 2.12, 2.15 y 2.16, se obtiene :

$$P_c = \frac{\text{Ln} \left(\frac{f_{suc} - f_{slc}}{f_{suc} - f_{yc}} \right)}{\text{Ln} \left(\frac{\epsilon_{suc} - \epsilon_{slc}}{\epsilon_{suc} - \epsilon_{shc}} \right)} \quad (2.17)$$

Luego de haber revisado los anteriores modelos, se seleccionó el propuesto por Mander et al. (1984). Esto obedece a que el modelo de Park y Paulay se basa en emplear una función cuadrática para representar la zona de endurecimiento por deformación, mientras que el modelo seleccionado permite definir dicha zona mediante el parámetro P asociado a la forma de la curva no-lineal, lo que implica que se pueden obtener diversas curvas asociadas a la variación de este parámetro. Además, se encontró que el modelo de Mander presenta una mejor aproximación a los resultados experimentales, como se muestra en el capítulo cinco del presente trabajo.

2.2. COMPORTAMIENTO DE BARRAS DE REFUERZO CORTAS SOMETIDAS A CARGAS CÍCLICAS REVERSIBLES

Una revisión de la literatura, indica la existencia de varios modelos para definir la curva esfuerzo-deformación de una barra de acero de refuerzo sometida a cargas cíclicas. Estos modelos siguen principalmente dos criterios. El primero corresponde a la adaptación de la expresión propuesta por Ramberg-Osgood (1943). Aunque este modelo lleva a una buena correlación entre los datos teóricos y los experimentales, presenta el problema que sólo es válido cuando la primera descarga ocurre en la zona de fluencia (Mander et al., 1984). Mientras más cercana esté la descarga al punto donde termina la zona elástica, los resultados serán más aproximados al comportamiento real de la curva esfuerzo-deformación; esto se debe a que el modelo de Ramberg-Osgood, fue propuesto para cualquier tipo de metales que no presenten plataforma de fluencia. Como es bien sabido, el acero es un metal que generalmente presenta una plataforma de fluencia definida.

Trabajos que siguen este criterio son, por ejemplo, los descritos por Kent y Park (1973) y por Thompson y Park (1978).

El segundo criterio se basa en modelos matemáticos desarrollados a partir de resultados experimentales. A este criterio pertenecen trabajos propuestos por Kato (1979), Peterson y Popov (1977), Stanton y McNiven (1979) y Aktan et al. (1973).

Sin embargo, existe otro modelo que define completamente la curva esfuerzo-deformación de una barra corta de refuerzo sometida a carga cíclica, sin importar la zona en donde se encuentre localizada la deformación cuando se realiza la primera descarga (Mander et al., 1984). Además, este modelo es de carácter analítico y puede ser utilizado para cualquier tipo de acero que se desee analizar, ya que está basado en la definición de las curvas monotónicas del acero. Se presenta a continuación la descripción del mencionado modelo, el cual fue seleccionado para este trabajo. En el Apéndice 1 se presenta un programa para computadora, con el objeto de calcular la curva esfuerzo-deformación del tipo cíclico reversible utilizando dicho modelo. Es importante aclarar, que prácticamente todos los modelos para el estudio de la respuesta cíclica encontrados en la literatura presentan como criterio de terminación de la curva, la deformación última (ϵ_{su}) asociada al esfuerzo máximo (f_{su}).

2.2.1. Modelo propuesto por Mander et al. (1984) para evaluar la curva esfuerzo-deformación en barras de acero sometidas a cargas cíclicas reversibles

Para la aplicación de este modelo, es necesario conocer las características monotónicas que definen las curvas esfuerzo-deformación a tensión y a compresión de la barra de acero que se desea analizar, así como la historia de deformaciones. Con estos valores, se pretende encontrar la historia de esfuerzos a los que está sometida la barra de acero.

Para definir el comportamiento de una barra de acero sometida a cargas cíclicas reversibles, es importante definir varias zonas (Ver figuras 2.2 y 2.3).

Para el presente trabajo se definen los esfuerzos de tensión como positivos y los de compresión como negativos. Como criterio convencional, se definen dos zonas de aplicación de carga asociadas a los subíndices M, K. El subíndice M representa el efecto de carga actual; el valor de 1 para M es para el caso en que la diferencia entre f_i y f_{i-1} es negativa y el valor de 2 para M indica que la diferencia entre f_i y f_{i-1} es positiva. El subíndice K indica el efecto de carga anterior; esto implica que si M es igual a 1 entonces K es igual a 2 y si M es igual a 2 entonces K es igual a 1.

Cuando a una barra se le somete a determinado tipo de carga, bien sea de tensión o compresión, ésta presentará inicialmente un comportamiento de carácter monótonico hasta cuando se realice la primera descarga, pero ahora se debe tener en cuenta la dirección de la carga aplicada. Por tal motivo se redefinen las zonas típicas descritas en detalle en el inciso 2.1 del presente trabajo.

2.2.1.1. Zona elástica lineal

$$f_s = E_{sM} (\varepsilon_s - \varepsilon_{moM}) \quad (2.18)$$

$$E_t = E_{sM} \quad (2.19)$$

Donde ε_{mo} es la deformación que define el origen de la curva monótonica.

2.2.1.2. Zona de fluencia

$$f_s = f_{yM} \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_{ssM} = \varepsilon_s - \varepsilon_{moM} \quad (2.21)$$

$$E_t = 0 \quad (2.22)$$

Donde ε_{ssM} indica la deformación total alcanzada en la curva monótonica en el ciclo anterior.

2.2.1.3. Zona de endurecimiento por deformación

$$f_s = f_{suM} + (f_{yM} - f_{suM}) \left(\frac{\epsilon_{suM} + \epsilon_{moM} - \epsilon_s}{\epsilon_{suM} - \epsilon_{shM}} \right)^{p_M} \quad (2.23)$$

$$\epsilon_{ssM} = \epsilon_s - \epsilon_{moM} \quad (2.24)$$

$$E_t = E_{shM} \left(\frac{f_{suM} - f_s}{f_{suM} - f_{yM}} \right)^{1 - \frac{1}{p_M}} \quad (2.25)$$

Hasta este momento se ha descrito el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación de la barra sometida a carga monótonica. En la primera descarga comienza la primera zona del modelo cíclico reversible de la curva esfuerzo-deformación. El valor de ϵ_{moM} se define a continuación.

2.2.1.4. Zona de descarga lineal partiendo de la curva monótonica

Cuando cambia la dirección de la carga, la curva esfuerzo-deformación describe un comportamiento lineal hasta alcanzar la coordenada $(\epsilon_{moM}, 0)$, que define la nueva localización del origen de coordenadas de la curva monótonica, ubicada siempre sobre el eje horizontal ($f_s=0$). El valor de ϵ_{moM} se calcula utilizando la siguiente expresión :

$$\epsilon_{moM} = \epsilon_{oM} - \frac{f_{oM}}{E_{sK}} + \epsilon_d \quad (2.26)$$

Las coordenadas (ϵ_{oM}, f_{oM}) definen el valor de la deformación y esfuerzo últimos, respectivamente, y la deformación última en el momento en el cual se realiza el cambio de dirección de la aplicación de la carga.

Existe evidencia experimental que muestra un desplazamiento sobre el eje horizontal del nuevo origen de la curva monótonica ϵ_d (Mander et al., 1984) el cual se define así :

Cuando la descarga ocurre en la zona de fluencia :

$$\epsilon_d = 0 \quad (2.27)$$

Cuando la descarga ocurre en la zona de endurecimiento por deformación :

$$\epsilon_d = \frac{\epsilon_{ssk}^2}{\epsilon_{su2}} + 2 \frac{f_{yM}}{E_{sM}} S \quad (2.28)$$

Donde "s" es una variable que toma el valor de "1" cuando se aplica una carga de tensión y de "-1" cuando se aplica una carga de compresión.

El esfuerzo y el módulo tangente en esta zona quedan definidos respectivamente por :

$$f_s = E_{sM} (\epsilon_s - \epsilon_{o0M}) + f_{o0M} \quad (2.29)$$

$$E_t = E_{sM} \quad (2.30)$$

Cuando se obtiene los nuevos valores de las coordenadas (ϵ_{oM}, f_{oM}) , los valores anteriores de éstas se asocian a las coordenadas $(\epsilon_{o0M}, f_{o0M})$.

Una vez que la curva en estudio ha alcanzado el valor de $(\epsilon_{m0M}, 0)$, ya no continúa su trayecto en forma lineal, sino que adquiere un comportamiento no lineal debido al efecto de Bauschinger, con lo que define una nueva zona que se describe a continuación.

2.2.1.5. Zona suavizada debido al efecto de Bauschinger

En 1886, Johann Bauschinger puso en evidencia que cuando se realiza la primera descarga en cualquier punto luego de sobrepasar la zona elástica, ocurre una disminución del módulo de elasticidad. Esta disminución es conocida como el efecto de Bauschinger. Investigaciones previas (Restrepo-Posada et al., 1994) han mostrado que el efecto de Bauschinger está relacionado con la composición química del acero, del nivel de presfuerzo, de la temperatura y del punto donde se realice la descarga, entre otros. Sin embargo, el presente modelo no incluye estas variables.

Para el estudio del efecto de Bauschinger, se emplean expresiones propuestas por Menegotto y Pinto (Mander et al., 1984), que permiten calcular el módulo secante E_{sec} , el esfuerzo f_s y el módulo tangente E_t . Estas expresiones se describen a continuación:

$$E_{sec} = E_{mM} \left[Q_M + \frac{1 - Q_M}{\left[1 + \left(\frac{E_{mM} (\epsilon_s - \epsilon_{oM})}{f_{chM} - f_{oM}} \right)^{R_M} \right]^{1/R_M}} \right] \quad (2.31)$$

$$f_s = f_{oM} + (\epsilon_s - \epsilon_{oM}) E_{sec} \quad (2.32)$$

$$E_t = E_{sec} - \frac{E_{sec} - Q_M E_{mM}}{1 + \left(\frac{E_{mM} (\epsilon_s - \epsilon_{oM})}{f_{chM} - f_{oM}} \right)^{R_M}} \quad (2.33)$$

Donde: E_{mM} es el módulo de elasticidad modificado para la descarga. ($E_{mM} < 1.5 E_{sM}$).

f_{chM} es un esfuerzo característico el cual toma valores entre f_y y f_b .

Q_M es la relación entre la pendiente de la línea tangente del punto final respecto al punto inicial.

R_M es un parámetro de curvatura.

En las figuras 2.4, 2.5 y 2.6 , se ilustra la representación de estos valores (Menegotto y Pinto, 1973).

Antes de explicar la forma cómo se obtienen los parámetros E_{mM} , Q_M y R_M , es necesario definir el punto donde la curva monotónica se intersecta con la curva suavizada por el efecto de Bauschinger, definido por (ϵ_{bM}, f_{bM}) .

Si la descarga ocurre en la zona de fluencia, tenemos :

$$\epsilon_{bM} = \epsilon_{moM} - \epsilon_{ssK} \quad (2.34)$$

$$f_{bM} = f_{yM} \quad (2.35)$$

Si la descarga ocurre en la zona de endurecimiento por deformación, se tiene :

$$\epsilon_{bM} = \epsilon_{moM} - \epsilon_{ssK} \quad (2.36)$$

$$f_{bM} = f_{suM} + (f_{yM} - f_{suM}) \left(\frac{\epsilon_{suM} + \epsilon_{ssK}}{\epsilon_{suM} - \epsilon_{shM}} \right)^{P_M} \quad (2.37)$$

Para definir la zona en estudio es necesario determinar mediante un proceso iterativo los valores de E_{mM} , Q_M y R_M , como se describe a continuación.

PASO 1 : Determinación del módulo tangente E_t^* .

El módulo tangente E_t^* se obtiene como la pendiente de la línea tangente a la curva en el punto (ϵ_{bM}, f_{bM}) . Por lo tanto si la descarga ocurre en la zona de fluencia se tiene que definir las coordenadas del punto (ϵ_j, f_j) . Este punto indica la intersección de la línea descendente cuya pendiente es E_{shM} con la línea que define la zona elástica, tal como se puede apreciar en la figura 2.2. Con la definición anterior se tiene :

$$\varepsilon_j = \frac{f_{yM} - E_{shM} \varepsilon_{shM}}{E_{sM} - E_{shM}} \quad (2.38)$$

$$f_j = E_{sM} \varepsilon_j \quad (2.39)$$

$$E'_{tj} = \frac{f_{bM} - \varepsilon_j E_{sM}}{\varepsilon_{bM} - \varepsilon_{oM} - \varepsilon_j} \quad (2.40)$$

Si la descarga ocurre en la zona de endurecimiento por deformación, se define :

$$E'_{tj} = E_{shM} \left(\frac{f_{suM} - f_{bM}}{f_{suM} - f_{yM}} \right)^{1 + \frac{1}{n_{pM}}} \quad (2.41)$$

PASO 2 : Valuación del esfuerzo característico f_{chM} .

$$f_{chM} = f_{bM} - 0.5 E_{tj} \frac{E_{sK} (\varepsilon_{bM} - \varepsilon_{oM}) - (f_{bM} - f_{oM})}{E_{sK} - E_{tj}} \quad (2.42)$$

PASO 3 : Estimación de Q_M y E_{mM} .

$$Q_M = 0.5 \frac{E_{tj}}{E_{sK}} \quad (2.43)$$

$$E_{mM} = E_{sK} \quad (2.44)$$

PASO 4 : Valuación de R_M

$$R_M = \frac{\text{Ln} \left(\frac{E_{sec} - E_{tj}}{E_{tj} - Q_M E_{mM}} \right)}{\text{Ln} \left(\frac{E_{mM} \frac{\varepsilon_{bM} - \varepsilon_{oM}}{f_{ch} - f_{oM}}}{E_{tj} - Q_M E_{mM}} \right)} \quad (2.45)$$

Donde :

$$E_{sec} = \frac{f_{bM} - f_{oM}}{\varepsilon_{bM} - \varepsilon_{oM}} \quad (2.46)$$

PASO 5 : Revaluación de Q_M como Q'_M .

$$Q'_M = \frac{1}{2(X-1)} \frac{X}{\left(E_{mM} \frac{\varepsilon_{bM} - \varepsilon_{oM}}{f_{chM} - f_{oM}} \right) - 1} + \frac{Q_M}{2} \quad (2.47)$$

$$X = \left(1 + \left(E_{mM} \frac{\varepsilon_{bM} - \varepsilon_{oM}}{f_{chM} - f_{oM}} \right)^{R_M} \right)^{1/R_M} \quad (2.48)$$

PASO 6 : Revaluación de E_{mM} como E'_{mM} .

$$E'_{mM} = \frac{E_{sK}}{Q_M + \frac{1 - Q_M}{\left[1 + \left(E_{mM} \frac{\varepsilon_{s} - \varepsilon_{oM}}{f_{chM} - f_{oM}} \right)^{R_M} \right]^{1/R_M}}} \quad (2.49)$$

PASO 7 : Verificación del error admisible.

En los pasos 5 y 6 se calcularon los valores de $Q_M = Q'_M$ y de $E_{mM} = E'_{mM}$, los cuales se deben utilizar en la expresión 2.33 para calcular el valor de E_t . El porcentaje de error se puede calcular como :

$$\text{ERROR} = \left| \frac{E'_t - E_t}{E'_t} \right| \quad (2.50)$$

Si el ERROR es menor que 0.5 %, los valores de E_{mM} , Q_M y R_M se consideran válidos, de lo contrario se debe regresar al PASO 4 para reevaluar los parámetros.

Cuando la curva esfuerzo-deformación ha pasado la zona de suavización debida al efecto de Bauschinger y la dirección de la carga se invierte, comienza otra zona que se describe a continuación.

2.2.1.6. Zona de descarga lineal partiendo de la curva suavizada debido al efecto de Bauschinger

Se presentan a continuación las expresiones que permiten calcular el punto de intersección entre la curva monotónica y la curva suavizada debido al efecto de Bauschinger.

$$\epsilon_{bM} = \epsilon_{maxM} + \epsilon_d \quad (2.51)$$

$$f_{bM} = f_{maxM} \quad (2.52)$$

Si la descarga ocurre en la zona de fluencia, tenemos :

$$\epsilon_d = \epsilon_{su2} (\epsilon_{oM} - \epsilon_{bK}) \quad (2.53)$$

Si la descarga ocurre en la zona de endurecimiento por deformación :

$$\epsilon_d = \epsilon_{su2} (\epsilon_{oM} - \epsilon_{bK}) - 0.5 f_{yM} / E_{sM} \quad (2.54)$$

Con la expresión 2.54, queda definido completamente el modelo matemático que define la curva de esfuerzo deformación de una barra de refuerzo sometida a carga cíclica reversible, ya que las zonas descritas anteriormente (a excepción de las zonas presentadas antes de que ocurra la primera descarga) son repetitivas dependiendo del número de ciclos y del número de niveles de deformación utilizadas en la historia de deformaciones.

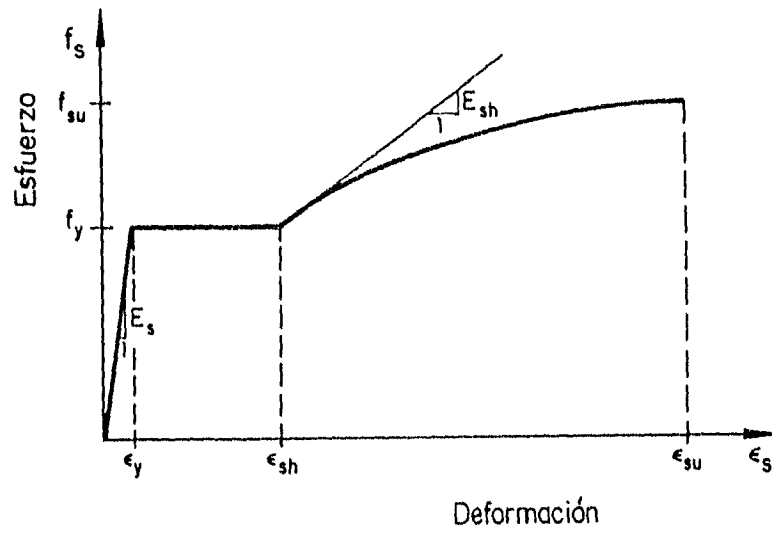


Figura 2.1. Curva esfuerzo-deformación típica de barras de acero de refuerzo sometidas a cargas monotónicas.

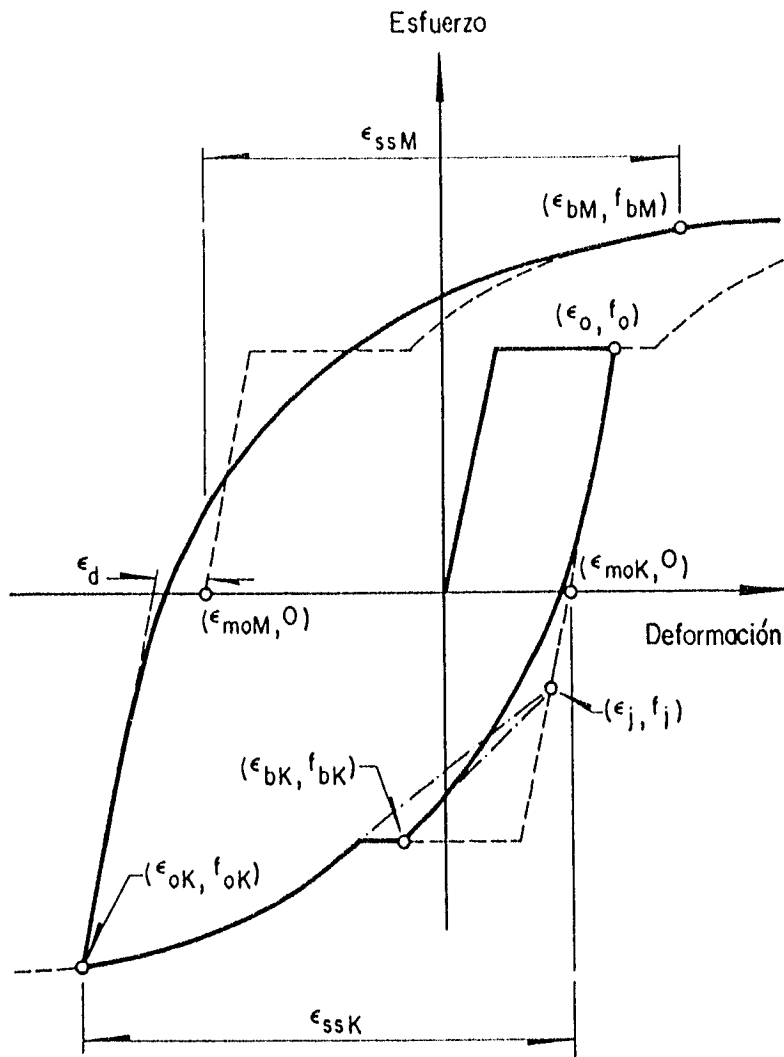


Figura 2.2. Curva esfuerzo-deformación típica de un ciclo reversible con descarga en la zona de fluencia (Mander et al, 1984).

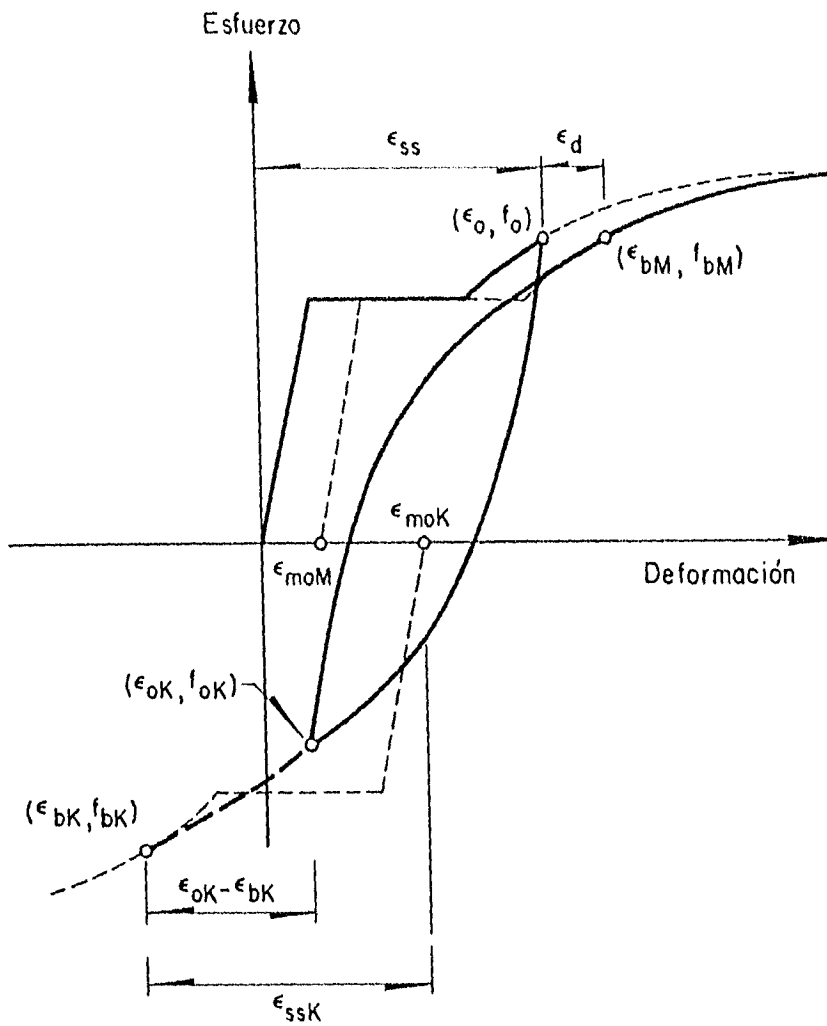


Figura 2.3. Curva esfuerzo-deformación típica de un ciclo reversible con descarga en la zona de endurecimiento por deformación (Mander et al, 1984).

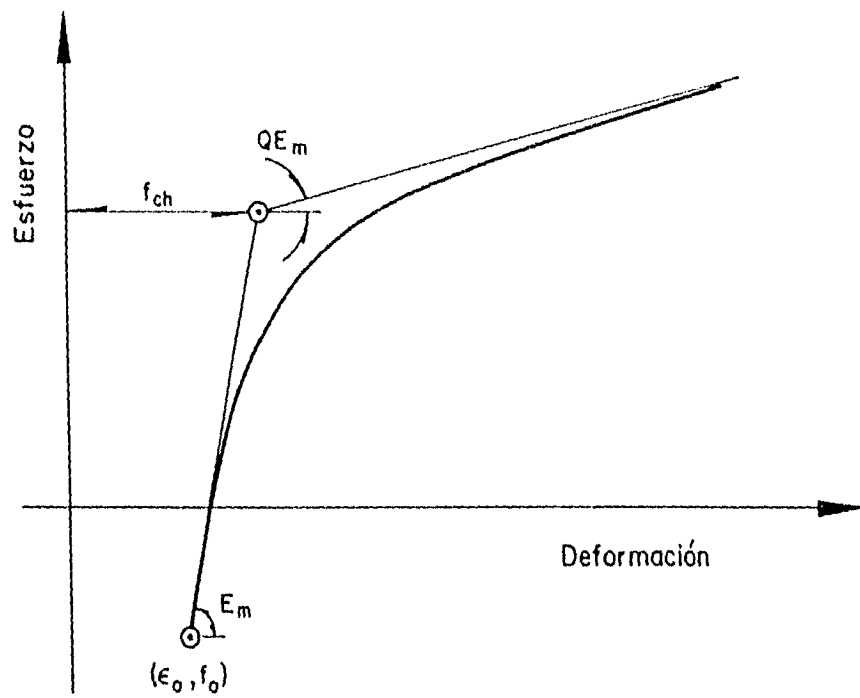


Figura 2.4. Curva que ilustra los parámetros E_m , f_{ch} y $Q E_m$ para la zona suavizada debido al efecto de Bauschinger (Menegotto y Pinto, 1973).

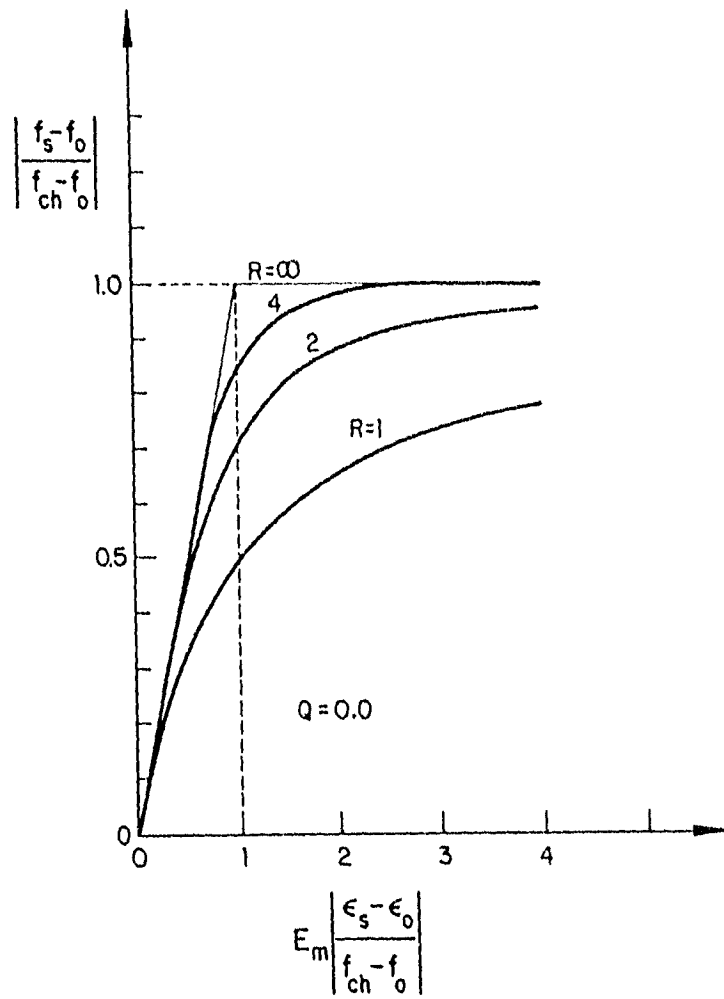


Figura 2.5. Curva que ilustra la variación del parámetro R para la zona suavizada debido al efecto de Bauschinger, cuando Q es igual a cero (Mander et al., 1984).

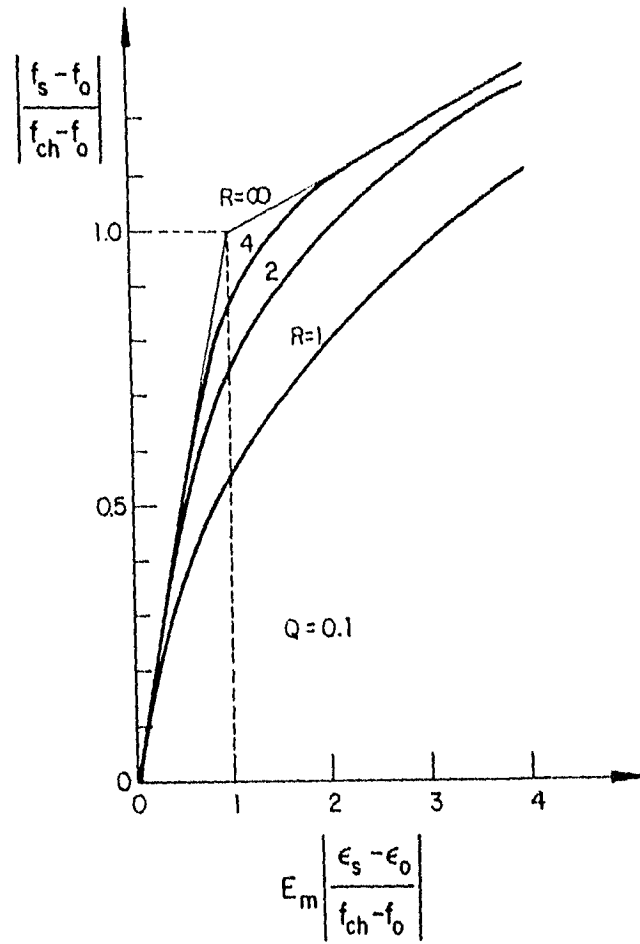


Figura 2.6. Curva que ilustra la variación del parámetro R para la zona suavizada debido al efecto de Bauschinger, cuando Q es igual a 0.1 (Mander et al., 1984).

3. PANDEO EN BARRAS DE REFUERZO

3.1. INTRODUCCIÓN

En 1678, Robert Hooke presentó los primeros estudios referentes al pandeo elástico. Más tarde, Leonhard Euler (1707-1783) presentó un estudio donde propuso un procedimiento para calcular la carga crítica de pandeo de una columna sometida a carga axial, mediante una expresión que lleva su nombre. La expresión propuesta por Euler es la siguiente :

$$P_e = \frac{\pi^2 E k^2}{L^2} \quad (3.1)$$

Euler definió a E como una propiedad de la fuerza aplicada y a k^2 como una propiedad de la columna. Es de observar que valor de $E k^2$ corresponde a lo que hoy en día se conoce como EI ya que cuando Euler propuso esta expresión, aun no se conocía el concepto de momento de inercia.

Durante mucho tiempo, la expresión de Euler fue considerada como incorrecta ya que los resultados experimentales no concordaban con los calculados. Esto se debió a que las columnas ensayadas en esa época presentaban una esbeltez tal que su modo de falla por pandeo ocurría en el intervalo inelástico. Por tal motivo, los diseños de las columnas de ese tiempo fueron realizados con base en expresiones empíricas producto de estudios de laboratorio, hasta que Lamarle en 1845 se dió cuenta que el error no era de la expresión de Euler, sino que su aplicación era sólo válida para elementos que pandearan en el rango elástico.

Engesser y Considère fueron los primero en advertir la posibilidad de modificar la expresión de Euler. En 1889, Engesser propuso una teoría para el pandeo inelástico que

está basada en la suposición de que cuando una columna presenta una relación de esbeltez tal que el esfuerzo crítico de pandeo es mayor que el límite elástico, es posible obtener una configuración deformada en equilibrio indiferente para la cual la deformación es controlada por el módulo tangente E_t , que es igual a la pendiente de la curva esfuerzo-deformación del material de la columna en el punto que corresponde al esfuerzo crítico. Este esfuerzo crítico puede obtenerse simplemente al sustituir el módulo elástico E_s de la expresión de Euler, por un módulo tangente E_t . Este procedimiento es conocido como la teoría del módulo tangente.

En el mismo año, en un congreso internacional celebrado en París, Considère hizo notar que cuando una columna está sometida a carga de compresión, la cual ha sobrepasado el límite elástico, ésta presenta solamente esfuerzos normales y que al aumentar la carga de compresión hasta alcanzar una configuración deformada en equilibrio indiferente, ocurre un aumento en el esfuerzo de compresión en el lado cóncavo y una disminución en el convexo, debido a la flexión. Esto se debe a que al comenzar la flexión, los esfuerzos en el lado cóncavo se incrementan de acuerdo con la ley que corresponda según la curva esfuerzo-deformación asociado al módulo tangente E_t , pero los del lado convexo disminuyen asociados al módulo elástico E_s , ya que la pendiente de la descarga en la curva esfuerzo-deformación es aproximadamente igual al módulo elástico E_s . Por tal motivo, la resistencia máxima de la columna no es función ni del módulo de elasticidad E_s ni del tangente E_t , sino de un módulo reducido E_r comprendido entre los dos, pero Considère no propuso ningún procedimiento para calcularlo.

En 1895, Engesser reconoció el error que existía en la teoría del módulo tangente y presentó una nueva solución del problema, conocida como la “teoría del doble módulo reducido” y está basada en los comentarios realizados por Considère en 1889.

A partir de ese momento, se consideró la teoría del doble módulo reducido como la solución correcta del pandeo inelástico de columnas. Desde el punto de vista del concepto clásico de inestabilidad es efectivamente correcta, puesto que indica la carga

que es posible aplicar en una columna perfectamente recta y cargada axialmente. Sin embargo, más adelante aparecieron dudas sobre ella, pues los resultados experimentales cuidadosamente obtenidos con especímenes de secciones transversales de diversas formas indican que las cargas de pandeo se encuentran entre las predichas por las dos teorías. Estas dudas fueron finalmente aclaradas por Shanley, en 1946 (Johnston, 1983).

Shanley demostró que cuando una columna inicialmente recta es sometida a compresión hasta alcanzar una configuración deformada en equilibrio, los esfuerzos del lado cóncavo de la sección aumentan asociados al módulo tangente E_t , pero al aumentar un diferencial de carga, no se presenta una disminución inmediata de los esfuerzos del lado convexo, ya que son compensados por los esfuerzos de compresión directa. Esto hace que en el instante en que ocurre el pandeo, el valor del doble módulo reducido disminuya y por tal motivo el esfuerzo de pandeo de la columna ocurrirá entre los predichos por la teoría del módulo tangente y la del doble módulo reducido. Esto indica que el esfuerzo de pandeo predicho por la teoría del módulo tangente se puede considerar como un límite inferior y la del doble módulo reducido como un límite superior (Salmon y Johnson, 1990).

De la revisión de la literatura anterior se infiere que la solución el pandeo inelástico de elementos sometidos a cargas axiales monotónicas en compresión, se puede resolver empleando alguno de los dos siguientes enfoques: la teoría del módulo tangente y la teoría del doble módulo reducido (Salmon y Johnson, 1990).

En este estudio se emplea la teoría del doble módulo reducido como procedimiento inicial para evaluar el efecto de pandeo en barras de refuerzo aisladas sometidas a cargas en compresión monotónicas. La preferencia de esta teoría respecto a la del módulo tangente se debe principalmente a que la primera toma en cuenta la reducción en el lado convexo y el aumento en el lado cóncavo de esfuerzos debido a la flexión. Además, la teoría del módulo tangente tiene la limitación de que es una extensión de conceptos elásticos al intervalo inelástico, ya que en el intervalo elástico, las relaciones de esfuerzo-deformación se rigen por el módulo de elasticidad E_s , tanto al aumentar como al

disminuir los esfuerzos y sigue siendo aplicable en toda la sección después de iniciar el pandeo, mientras que en el intervalo inelástico el módulo tangente E_t es aplicable únicamente a la parte de la sección en la que crecen los esfuerzos de compresión, o sea en el lado cóncavo. Además, se ha demostrado mediante evidencia experimental (Mander et al., 1984) que la teoría del doble módulo reducido presenta una mejor aproximación que la teoría del módulo tangente.

Se debe mencionar que tanto la teoría del módulo tangente, como la teoría del doble módulo reducido, son aplicables sólo cuando el elemento en estudio presenta una relación de esbeltez tal que el pandeo ocurra en el rango inelástico, ya que el pandeo en la zona elástica se debe analizar mediante la expresión de Euler (Salmon y Johnson, 1990). El pandeo en la plataforma de fluencia no ha sido claramente definido, ya que su módulo tangente E_t , es igual a cero, lo cual genera una incongruencia del método, debido a que el esfuerzo de pandeo en esta zona debe ser igual a f_y y no a cero, como lo predice el método.

3.2. EVALUACIÓN DEL PANDEO BAJO CARGAS MONOTÓNICAS EMPLEANDO LA TEORÍA DEL DOBLE MÓDULO REDUCIDO

Las hipótesis bajo las cuales es válida la teoría del doble módulo reducido para el análisis del pandeo inelástico, son las siguientes :

- Los desplazamientos laterales del eje de la columna son pequeños en comparación de las dimensiones de su sección transversal.
- Las secciones transversales planas permanecen planas y normales al eje deformado, después de la flexión.
- La curva esfuerzo-deformación del material de la columna describe la relación entre esfuerzo y deformación en cualquiera de sus fibras longitudinales.
- El plano de flexión es un plano de simetría de todas las secciones transversales.

Con base en las anteriores hipótesis, se presenta a continuación la descripción matemática de la teoría del doble módulo reducido, lo que permite evaluar el esfuerzo de pandeo de una barra de refuerzo de sección circular sometida a carga monotónica de compresión (Bernal, 1982).

En la figura 3.1 se muestra que el lado convexo de la sección presenta un módulo de elasticidad E_s y el lado cóncavo presenta un módulo tangente E_t , por lo que es necesario encontrar un módulo equivalente, que sería el doble módulo reducido E_r . Con objeto de encontrar el doble módulo reducido E_r , se hace un promedio de pesos de las áreas 1 y 2 (Salmon y Johnson, 1990), por lo que se tiene :

$$E_r I = E_t I_{1x} + E_s I_{2x} \quad (3.2)$$

Donde : E_r es el módulo reducido equivalente.

E_t es el módulo tangente.

E_s es el módulo elástico.

I es el momento de inercia de la sección circular.

I_{1x} es el momento de inercia del sector circular 1 respecto al eje X.

I_{2x} es el momento de inercia del sector circular 2 respecto al eje X.

Despejando de la expresión 3.2 el valor de E_r , se obtiene :

$$E_r = \frac{E_t I_{1x}}{I} + \frac{E_s I_{2x}}{I} \quad (3.3)$$

El momento de inercia I de una sección circular es :

$$I = \frac{\pi R^4}{4} \quad (3.4)$$

Remplazando la expresión 3.4 en la expresión 3.3 se tiene :

$$E_r = \frac{4}{\pi R^4} [E_t I_{1x} + E_s I_{2x}] \quad (3.5)$$

Por definición de momento de inercia :

$$I_{1x} = \int_0^{d1} Z_1^2 dA_1 \quad (3.6)$$

$$I_{2x} = \int_0^{d2} Z_2^2 dA_2 \quad (3.7)$$

Sustituyendo las expresiones 3.6 y 3.7 en la expresión 3.5 se obtiene :

$$E_r = \frac{4}{\pi R^4} [E_t \int_0^{d1} Z_1^2 dA_1 + E_s \int_0^{d2} Z_2^2 dA_2] \quad (3.8)$$

Con el objeto de simplificar, se hacen los siguientes cambios de variables :

$$X = \frac{1}{R^4} \int_0^{d1} Z_1^2 dA_1 \quad (3.9)$$

$$Y = \frac{1}{R^4} \int_0^{d2} Z_2^2 dA_2 \quad (3.10)$$

Al sustituir las expresiones 3.9 y 3.10 en la expresión 3.8 se obtiene :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{4}{\pi} \left[X \frac{E_t}{E_s} + Y \right] \quad (3.11)$$

La expresión 3.11 indica que el módulo reducido depende de las condiciones geométricas de la sección y de los módulos elástico E_s y tangente E'_t , por lo que es necesario obtener una expresión que permita calcular el módulo tangente E'_t .

Para el cálculo del módulo tangente E'_t se obtiene el primer momento de área respecto al eje neutro X (figura 3.1) :

$$A_1 Y_1 E'_t = A_2 Y_2 E_s \quad (3.12)$$

Donde : A_1 y A_2 son las áreas del sector circular 1 y 2, respectivamente .

Y_1 y Y_2 son los centroides del sector circular 1 y 2, respectivamente.

Se define a continuación los valores de A_1 , A_2 , Y_1 , Y_2 :

$$A_1 = R^2 \left[\alpha - \frac{\text{Sen } 2\alpha}{2} \right] \quad (3.13)$$

$$A_2 = R^2 \left[(\pi - \alpha) + \frac{\text{Sen } 2\alpha}{2} \right] \quad (3.14)$$

$$Y_1 = R \left[\frac{2 \text{ Sen}^3 \alpha}{3 \left(\alpha - \frac{\text{Sen } 2\alpha}{2} \right)} - \text{Cos } \alpha \right] \quad (3.15)$$

$$Y_2 = R \left[\frac{2 \text{ Sen}^3 \alpha}{3 \left((\pi - \alpha) + \frac{\text{Sen } 2\alpha}{2} \right)} + \text{Cos } \alpha \right] \quad (3.16)$$

Sustituyendo las expresiones 3.13 a la 3.16 en la expresión 3.12 y despejando la relación E_s / E'_t , se obtiene :

$$\frac{E_s}{E'_t} = \frac{\left[\alpha - \frac{\text{Sen } 2\alpha}{2} \right] \left[3 \left(\alpha - \frac{\text{Sen } 2\alpha}{2} \right) - \text{Cos } \alpha \right]}{\left[(\pi - \alpha) + \frac{\text{Sen } 2\alpha}{2} \right] \left[3 \left((\pi - \alpha) + \frac{\text{Sen } 2\alpha}{2} \right) + \text{Cos } \alpha \right]} \quad (3.17)$$

La expresión 3.17 permite obtener el módulo tangente E'_t , necesario para evaluar el módulo reducido equivalente E_r .

Para el cálculo del esfuerzo de pandeo, se emplea la expresión de Euler (Salmon y Johnson, 1990), utilizando el módulo reducido equivalente :

$$f_p = \frac{\pi^2 E_r}{\left(\frac{K S_h}{r_o} \right)^2} \quad (3.18)$$

Donde : f_p es el esfuerzo de pandeo del elemento.

K es un coeficiente de longitud efectiva que depende de las condiciones de apoyo del elemento y ha sido ampliamente definido en la literatura.

S_h es la longitud libre entre apoyos del elemento.

r_o es el radio de giro de la sección transversal.

La expresión 3.18 es válida bajo la hipótesis de que la relación de esbeltez, S_h/D , siempre es constante e independiente del estado de esfuerzos. Se admite que las variaciones de esta relación debidas al efecto de Poisson son muy pequeñas.

Para una sección circular se puede definir :

$$r_o^2 = \frac{I}{A} \quad (3.19)$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.20)$$

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \quad (3.21)$$

Al sustituir las expresiones 3.19, 3.20 y 3.21 en la expresión 3.18 se obtiene :

$$f_p = \left(\frac{\pi^2 E_s}{16} \right) \left(\frac{E_r}{E_s} \right) \left(\frac{1}{\left(K S_h / D \right)^2} \right) \quad (3.22)$$

Despejando el valor de u de la expresión 2.11 presentada en el capítulo anterior, se obtiene :

$$u = r \cdot \left(\frac{E_r r^p}{P (f_{su} - f_y)} \right)^{1/(p-1)} \quad (3.23)$$

A continuación se presenta el procedimiento utilizado para obtener las curvas de f_p vs S_h / D y ϵ_p vs S_h / D , utilizando las expresiones anteriormente descritas :

1. Entrada de datos del acero que permita definir la curva esfuerzo-deformación y el coeficiente de longitud efectiva, K. Los parámetros básicos son E_s , ϵ_y , ϵ_{sh} , ϵ_{su} , f_y , f_{su} y P.

2. Se selecciona una relación de esbeltez, S_h / D , y para cada relación se hace lo siguiente :

2.1. Se supone un valor de α .

2.2. Se calcula el valor de la relación E_s / E'_1 utilizando la expresión 3.17.

2.3. Se calculan los valores de X y Y utilizando las expresiones 3.9 y 3.10, respectivamente.

2.4. Se calcula el valor de la relación E_r / E_s utilizando la expresión 3.11.

2.5. Se calcula el valor de f_{p1} utilizando la expresión 3.22.

2.6. Se calcula el valor de u utilizando la expresión 3.23.

2.7. Se hace $E_1 = E'_1$.

2.8. Se calcula el valor de ϵ_s utilizando la expresión 2.9 presentada en el capítulo anterior.

2.9. Se calcula el valor de f_{p2} utilizando las expresiones que definen la curva esfuerzo-deformación del acero.

2.10. Si $f_{p1} \approx f_{p2}$ entonces éste es el esfuerzo de pandeo buscado y se regresa al inciso 2. Si $f_{p1} \neq f_{p2}$ se regresa al inciso 2.1.

3.3. PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL PANDEO CON EMPLEO DE GRÁFICAS, APLICANDO LA TEORÍA DEL DOBLE MÓDULO REDUCIDO

En el Apéndice 2 se presenta un programa para computadora que permite obtener las curvas de f_p vs S_h / D y ϵ_p vs S_h / D utilizando el procedimiento anterior.

A continuación se presenta un procedimiento iterativo sencillo con ayuda de gráficas con el objeto de poder calcular el esfuerzo de pandeo bajo carga monotónica de compresión

de una barra de acero de refuerzo de sección circular. Para emplear dicho procedimiento es necesario obtener inicialmente la relación entre el módulo tangente E'_t y el doble módulo reducido E_r . Esta relación se puede obtener de las expresiones 3.11 y 3.17, para lo cual se elaboró un programa en computador, que se presenta en el Apéndice 3 de este trabajo. Se puede ver que la relación entre E'_t y E_r depende solo de las características geométricas de la sección transversal de la barra de acero. Los resultados para esta relación obtenidos por el programa del Apéndice 3, se muestran en la figura 3.2.

El procedimiento para calcular el esfuerzo de pandeo de un barra de refuerzo de sección circular con ayuda de gráficas es el siguiente :

1. Seleccionar la curva esfuerzo-deformación del acero a utilizar.
2. Seleccionar la relación de esbeltez, S_h/D , de la barra a analizar y el coeficiente que define la longitud efectiva, K , en los extremos de la barra.
3. Se supone inicialmente un valor del esfuerzo de pandeo, f_{p2} .
4. De la curva esfuerzo-deformación seleccionada en el inciso 1, se obtiene la deformación de pandeo ϵ_{p2} asociada al esfuerzo de pandeo f_{p2} supuesto en el inciso 3.
5. Sustituyendo las expresiones 2.8 y 2.9 en la expresión 2.11, se puede obtener el valor de E_t y por tanto el valor de E_t/E_s , que depende solamente de la curva esfuerzo-deformación seleccionada en el inciso 1.
6. Se iguala el valor de E_t/E_s con E'_t/E_s .
7. Definido el valor de E'_t/E_s , se puede obtener el valor de E_r/E_s utilizando la figura 3.2. Los valores de esta figura fueron graficados utilizando el programa definido en el Apéndice 3.
8. A continuación se calcula el esfuerzo de pandeo f_{p1} mediante la expresión 3.22.
9. Si $f_{p2} \approx f_{p1}$ entonces éste será el esfuerzo de pandeo de la barra analizada. Pero si $f_{p2} \neq f_{p1}$ se debe regresar al inciso 3 y seleccionar otro f_{p2} .

3.4. EJEMPLO DE APLICACIÓN.

Se presenta a continuación un ejemplo que ilustra el empleo del procedimiento descrito en sección anterior. El problema a resolver consiste en que se desea calcular el esfuerzo de pandeo de una barra de refuerzo que presenta una relación de esbeltez, S_h / D , igual a 6 y un coeficiente que define la longitud efectiva de la barra, K , igual a 0.5. Las características de la curva esfuerzo-deformación del acero sometido a carga de compresión corresponden a la curva analítica definida en la figura 5.19, la que se comentará posteriormente en este trabajo. Los valores característicos que definen a dicho acero son los siguientes, teniendo en cuenta que por facilidad los valores de compresión se consideran positivos :

- $f_{yc} = 4658 \text{ kg/cm}^2$
- $f_{suc} = 9348 \text{ kg/cm}^2$
- $\epsilon_{shc} = 0.0087$
- $\epsilon_{suc} = 0.1048$
- $P_c = 2.092$
- $E_s = 2000000 \text{ kg/cm}^2$

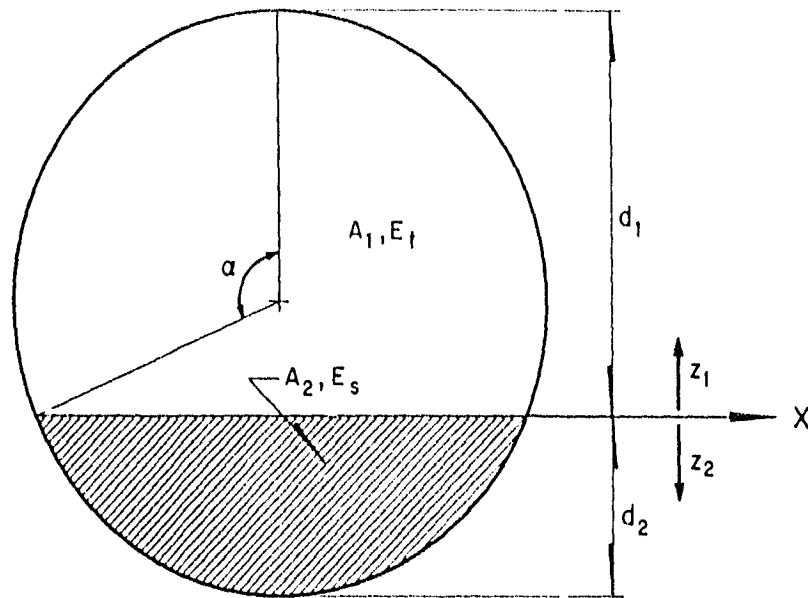
El procedimiento de solución es el siguiente :

1. Suponemos inicialmente un valor del esfuerzo de pandeo, $f_{p2} = 8500 \text{ kg/cm}^2$.
2. De la figura 5.19, empleando las características del acero en estudio se obtiene la deformación de pandeo $\epsilon_{p2} = 0.062$, asociada al esfuerzo de pandeo f_{p2} supuesto en el inciso anterior.
3. Utilizando la expresión 2.11 se obtiene el valor $E_t = 41780 \text{ kg/cm}^2$ y por tanto el valor $E_t / E_s = 0.0209$.
4. Se iguala el valor de E_t / E_s con E'_t / E_s , por lo que $E'_t / E_s = 0.0209$.
5. Con el valor de E'_t / E_s y empleando la figura 3.2, se obtiene que $E_r / E_s = 0.07$.

6. Con la expresión 3.22, se obtiene que el esfuerzo de pandeo $f_{p1} = 9595 \text{ kg/cm}^2$.
7. Como $f_{p2} \neq f_{p1}$ se debe regresar al inciso 1 y se selecciona otro valor de f_{p2} .

Regresando al inciso 1, se tiene :

1. Suponemos otro valor del esfuerzo de pandeo, $f_{p2} = 8650 \text{ kg/cm}^2$.
2. Empleando la figura 5.19 para el acero en estudio se obtiene la deformación de pandeo $\epsilon_{p2} = 0.066$, asociada al esfuerzo de pandeo f_{p2} supuesto en el inciso 3.
3. Utilizando la expresión 2.11 se obtiene el valor de $E_t = 37710 \text{ kg/cm}^2$ y por tanto el valor de $E_t / E_s = 0.0189$.
4. Se iguala el valor de E_t / E_s con E'_t / E_s , por lo que $E'_t / E_s = 0.0189$.
5. Con el valor de E'_t / E_s y utilizando la figura 3.2, se obtiene que $E_t / E_s = 0.063$.
6. Con la expresión 3.22, se obtiene que el esfuerzo de pandeo $f_{p1} = 8636 \text{ kg/cm}^2$.
7. Como $f_{p2} \approx f_{p1}$, se puede concluir que el esfuerzo de pandeo es de 8650 kg/cm^2 .





-  Disminución de deformación debido a la flexión
-  Aumento de deformación debido a la flexión

Figura 3.1. Sección transversal de una probeta de acero luego de que comienza el efecto de pandeo.

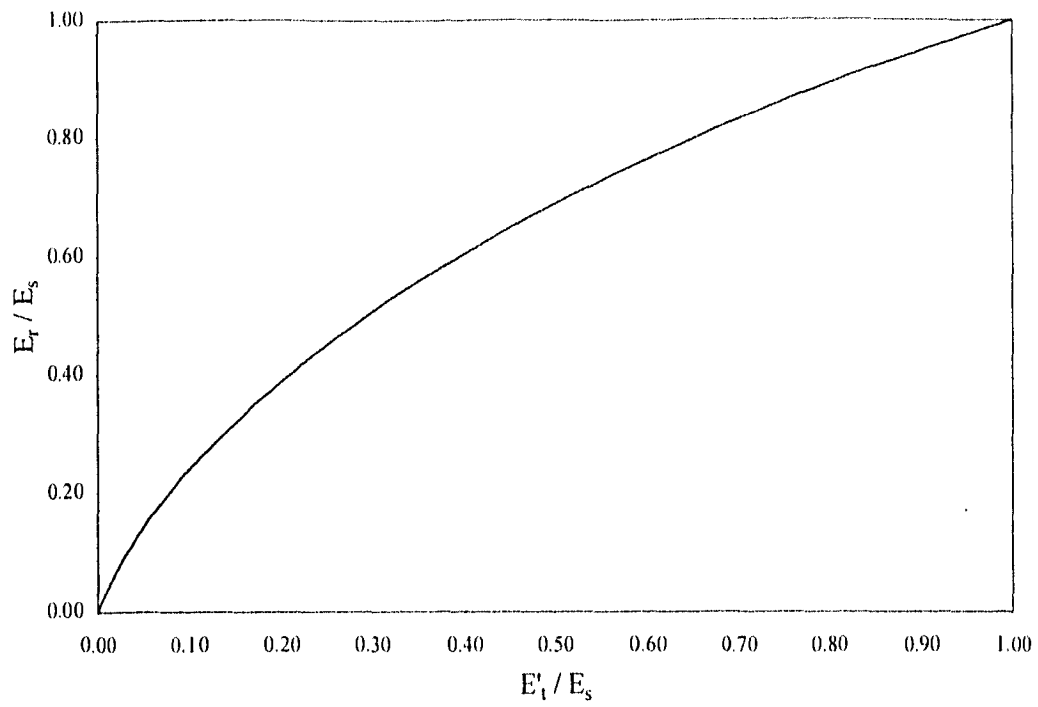


Figura 3.2. Curva que relaciona los valores de E'_1/E_s y E_r/E_s de una probeta de acero de sección circular.

4. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe la forma como se realizó el programa experimental efectuado en esta investigación, tanto en la parte de ensayos monotónicos como en la de ensayos cíclicos reversibles.

4.1. ENSAYES MONOTÓNICOS A TENSIÓN

4.1.1. Descripción de especímenes

Tanto para los ensayos monotónicos como cíclicos reversibles, se adquirieron en el año de 1993 en el mercado nacional, tres grupos de barras de refuerzo, procedentes de lugares diferentes de la ciudad de México. Las barras de refuerzo que se estudiaron provienen de dos siderúrgicas importantes de México y se identifican como muestras tipo H y S. El primer grupo de barras de refuerzo corresponde a barras del tipo H y el segundo y tercer grupo corresponden a barras del tipo S (Rodríguez y Botero, 1995).

Con el objeto de estudiar el comportamiento del acero de refuerzo sometido a cargas monotónicas en tensión, se ensayaron 100 probetas, de las cuales 49 corresponden a la muestra del tipo H y 51 corresponden a la muestra tipo S. Las probetas que se analizaron fueron de 5/16 plg, 3/8 plg, 1/2 plg, 5/8 plg, 3/4 plg, 1 plg y 1-1/4 plg de diámetro.

Las probetas que se ensayaron tenían una longitud de 60 cm, la cual fue seleccionada de manera que se pudiera obtener el mejor agarre posible entre las probetas y las mordazas y que presentara un espacio suficiente para la colocación de los aparatos de medición. Por tal motivo, la longitud de la probeta presenta tres zonas, donde dos de ellas son de 26 cm destinadas al agarre de las mordazas y la tercera zona es de 8 cm, que es la longitud libre entre mordazas que garantiza la ubicación de los aparatos de medición.

4.1.2. Descripción del marco de carga

Para la realización de estos ensayos se utilizó la máquina universal del Instituto de Ingeniería, marca SATEC, con capacidad de 250 t. Esta máquina universal se utilizó para aplicar carga en tensión a las probetas estudiadas en los ensayos del tipo monotónico. Para este tipo de ensayos, se colocan cuatro mordazas trapezoidales, dos en la parte superior y dos en la parte inferior de las probetas. Estas mordazas presentan corrugaciones en la parte de contacto para impedir que las barras deslicen y puedan causar errores importantes en la medición tanto en el valor de la carga, como de las deformaciones axiales. La celda de carga de esta máquina, transmite valores de la fuerza axial aplicada a un dispositivo especial que como se verá más adelante, permite almacenar estos valores en una computadora.

4.1.3. Instrumentación y adquisición de datos

Tanto para los ensayos monotónicos como para los cíclicos reversibles, se utilizó un aparato especial fabricado en el Instituto de Ingeniería, el cual permite medir las deformaciones axiales en las barras. El diseño de este aparato se hizo empleando las características de uno semejante desarrollado en la Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda (Restrepo-Posada, 1993). Este aparato se muestra en la figura 4.1 y consta de cuatro piezas principales que abrazan la barra a ensayar por medio de cuatro resortes. Estas cuatro piezas están unidas entre sí por medio de dos láminas de acero ubicadas en los extremos exteriores del aparato. Estas dos láminas fueron instrumentadas con deformímetros eléctricos, obteniendo así dos registros de deformación de la barra. Cuando la barra se comienza a deformar axialmente, las cuatro piezas del aparato se mueven en forma simultánea con la barra, generando deformación por flexión en la lámina de acero, la que es registrada por los deformímetros produciendo un cambio de voltaje que se registra en el sistema de adquisición de datos.

La lámina de acero anteriormente mencionada mide 30 mm x 12.7 mm x 0.15 mm, lo que permite deformaciones considerables por flexión asociados a una buena sensibilidad del sistema de

medición de datos. Debido a las características de la mencionada lámina, el esfuerzo máximo probable de trabajo al cual ésta se encuentra sometida es de 650 kg/cm^2 ; si se considera que en el tipo de acero empleado, el esfuerzo de fluencia es de 2530 kg/cm^2 , es posible garantizar que su comportamiento va a ser lineal y que no se generan errores debidos a la posible fluencia del material. Este sistema fue previamente calibrado para medir deformaciones unitarias hasta de 0.30. Esta calibración se efectuó de manera que se pudiera encontrar una equivalencia entre el voltaje registrado y la deformación de la barra de prueba. El error de medición con este aparato fue alrededor de 0.0005, lo que se considera aceptable para definir la curva completa esfuerzo-deformación del acero de refuerzo; sin embargo, esta precisión no es suficiente para evaluar la deformación de fluencia de manera confiable, ya que ésta es del orden de 0.002.

Para el estudio de aceros sometidos a cargas monotónicas se utilizó el aparato de adquisición de datos denominado TDS-302 del Instituto de Ingeniería, con capacidad de diez canales. Para estos ensayos, se utilizaron tres canales, uno para el registro de la carga proveniente de la máquina universal y los otros dos provenientes de los deformímetros eléctricos descritos anteriormente. El aparato TDS-302 recibe la información de los tres canales utilizados y la transmite a una computadora personal utilizando un programa elaborado en el Instituto de Ingeniería, lo que permite capturar y almacenar los datos para su posterior análisis. Para cada barra ensayada, se creó un archivo en el cual se almacenaron los registros de carga aplicada y de deformación. La deformación utilizada para análisis posteriores es la obtenida del promedio de los dos registros entregados por los deformímetros eléctricos.

El sistema de adquisición de datos permite obtener un registro completo de carga y de deformaciones cada dos segundos. Además, se programaron los ensayos para que se aplicara carga axial en tensión con una velocidad constante, de manera que cualquier barra ensayada pudiera alcanzar el valor de f_{su} en un tiempo aproximado de tres minutos. Este tiempo es suficiente para obtener alrededor de cien puntos de la curva esfuerzo-deformación, lo que permite una buena definición de esta curva. La velocidad del ensayo fue de 0.00067 /s , que no excede la propuesta en la NMX-B-6-1987 (Norma Mexicana, 1987) que es de 0.02125 /s . Esto sugiere que

los ensayos fueron realizados con una velocidad de aplicación de carga relativamente baja, del tipo quasi-estático.

En la figura 4.2, se muestra de manera esquemática el equipo utilizado para la ejecución de los ensayos monotónicos.

4.2. ENSAYES MONOTÓNICOS A COMPRESIÓN Y CÍCLICOS REVERSIBLES

4.2.1. Descripción de especímenes.

Para este tipo de pruebas se utilizaron probetas con características geométricas diferentes a las utilizadas en los ensayos monotónicos a tensión; sin embargo, como se mencionó anteriormente, las barras de acero de donde se obtuvieron estas probetas, corresponden al mismo lote utilizado para la fabricación de las probetas de los ensayos monotónico a tensión.

Para la fabricación de las probetas se utilizaron barras de refuerzo de 1-1/4 plg de diámetro, las cuales fueron torneadas. Por tal motivo, el diámetro efectivo de una probeta típica fue de 16 mm (ASTM, 1993).

En la figura 4.3, se aprecia que las probetas diseñadas constan de tres partes fundamentales. La primera es una zona roscada con diámetro $1.6D$ y longitud $2.2D$. La segunda zona es de transición entre la zona roscada y una tercera zona con longitud variable y diámetro D . En esta zona se realizan las mediciones de deformaciones de la probeta.

Se consideró que el efecto de pandeo depende principalmente de la relación entre la longitud efectiva de la probeta, S_h , y el diámetro efectivo, D , por lo que se seleccionaron relaciones de esbeltez, S_h / D , de tal forma que el pandeo ocurriera en el rango inelástico. Para la selección de las diferentes relaciones de esbeltez, se emplearon algunos resultados que se presentan en el siguiente capítulo, los cuales relacionan el esfuerzo de pandeo f_p y la relación de esbeltez S_h / D . Se seleccionaron relaciones de esbeltez de 2.5, 4, 6 y 8, con lo que se consideró que dichos

valores pudieran ser representativos de una población amplia de barras de refuerzo. Con las relaciones de esbeltez S_p/D seleccionadas se definieron las características geométricas de las probetas a ensayar, tal como se muestra en la figura 4.3.

Para los ensayos monotónicos a compresión se probaron diez probetas y para los cíclicos reversibles se probaron diecisiete probetas .

4.2.2. Descripción del marco de carga

Para la realización de los ensayos denominados del tipo monotónico a compresión y cíclico reversible se utilizó una máquina universal MTS, con marco de carga MTS-810 y un controlador MTS-442. Con el objeto de asegurar la probeta en la máquina, se diseñó un dispositivo especial utilizando acero de alta resistencia. Debido a un pequeño movimiento de cuerpo libre existente entre las probetas y dicho dispositivo, no fue posible obtener un empotramiento perfecto en los extremos de la probeta; sin embargo, esto no afectó la interpretación de los resultados obtenidos como se comentará posteriormente.

4.2.3. Instrumentación y adquisición de datos

Para este tipo de ensayos se utilizó el mismo aparato para medir las deformaciones axiales de la probeta en estudio descrito en detalle en el inciso 4.1.3. Como se aprecia en la figura 4.4, además de este aparato se utilizó un medidor de desplazamientos de marca TML con una carrera de 25 mm. Este medidor permitió registrar los desplazamientos ocurridos entre los dispositivos que sujetan a la probeta en estudio (figura 4.4).

Este sistema de adquisición de datos para este tipo de ensayos consistió en un aparato del tipo VISHAY-2210, con capacidad de diez canales para la adquisición de datos. El objetivo del empleo de este aparato fue regular la señal de voltaje entregada por los dispositivos de medición de deformaciones. Para estas mediciones, se utilizaron tres canales, uno para el registro de los

desplazamientos entre las cabezas de la máquina universal y los otros dos para el registro de las deformaciones de las barras provenientes de los deformímetros eléctricos descritos anteriormente. El aparato VISHAY-2210 toma la información de los tres canales utilizados y la transmite a una computadora personal mediante un programa que permite capturar y almacenar los datos para su posterior análisis. En forma simultánea el MTS-810 transmite a la computadora el registro de la carga y del desplazamiento en el actuador.

Los ensayos del tipo monotónico a compresión, se efectuaron a una velocidad lenta, con lo que las pruebas generalmente tuvieron una duración de tres minutos aproximadamente.

Para los ensayos del tipo cíclico reversible, se empleó una excitación del tipo senoidal para la generación de los ciclos de histéresis, ya que este tipo de ensaye ha sido ampliamente utilizado en la literatura, lo que facilita la comparación de los resultados de este estudio y otros existentes. La frecuencia utilizada fue de 0.005 Hz, lo que lleva a una duración por ciclo de tres minutos aproximadamente. La amplitud de la onda senoidal se controló por desplazamiento, de manera que se pudiera desarrollar aproximadamente cuatro niveles de deformación con dos ciclos histeréticos por nivel. Como se mencionó anteriormente, para este tipo de ensayos se utilizaron diecisiete probetas, de las cuales ocho fueron sometidas a ciclos simétricos, ocho a ciclos asimétricos, donde las deformaciones de tensión fueron mayores a las de compresión y una probeta fue utilizada como “Caso especial” que se describe con detalle en el capítulo siguiente.

Para generar la onda senoidal con las características presentadas anteriormente se utilizó un generador de señales, marca WAVETEC-175. El empleo de este aparato, obedece a que el controlador existente MTS-810 sólo permite realizar ensayos con frecuencias mayores a 0.01 Hz y a que este último aparato genera ciclos iniciales con amplitudes crecientes antes de alcanzar los niveles de amplitudes prefijados.

En la figura 4.4, se presenta un dibujo esquemático del equipo utilizado para la ejecución de los ensayos cíclicos reversibles.

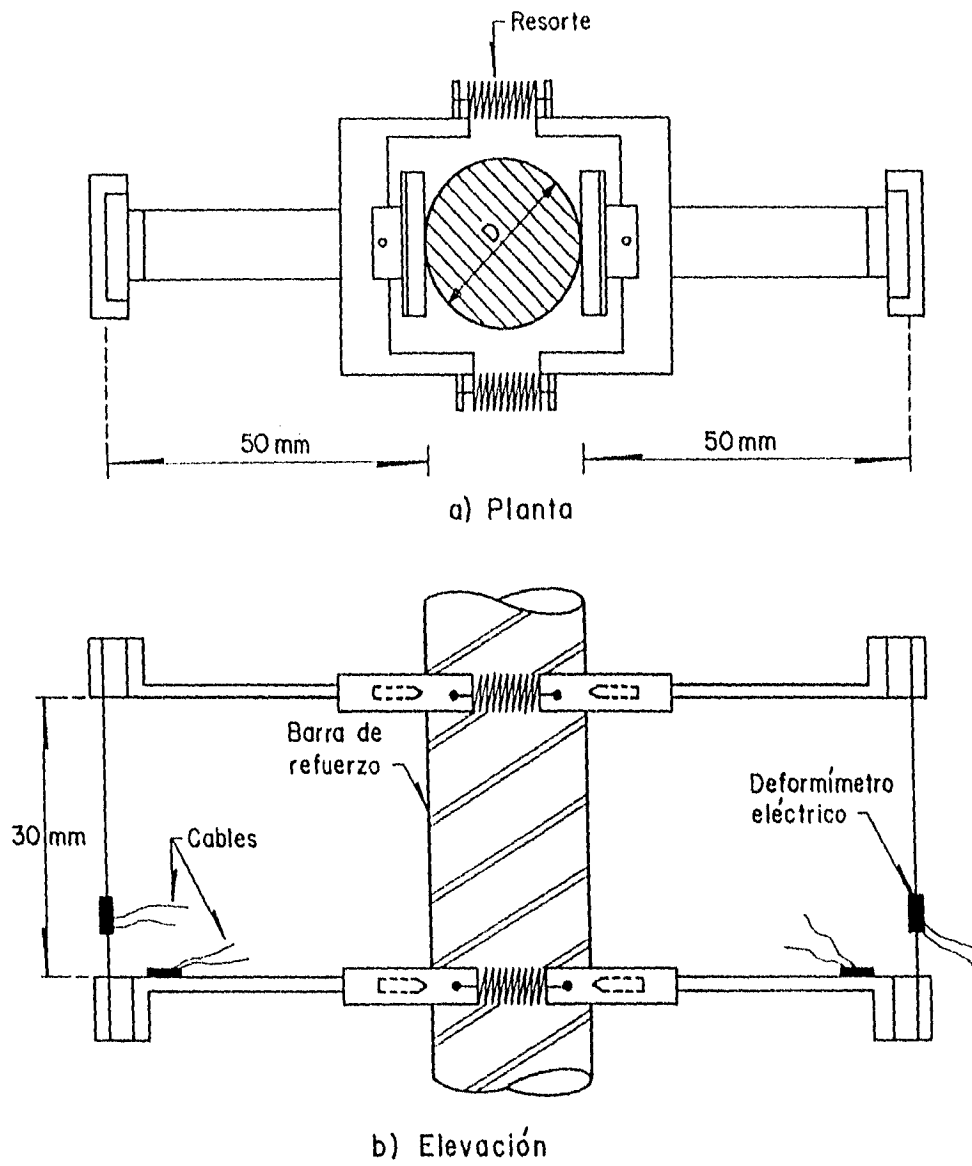


Figura 4.1. Aparato para medir deformaciones en ensayos de barras de refuerzo.

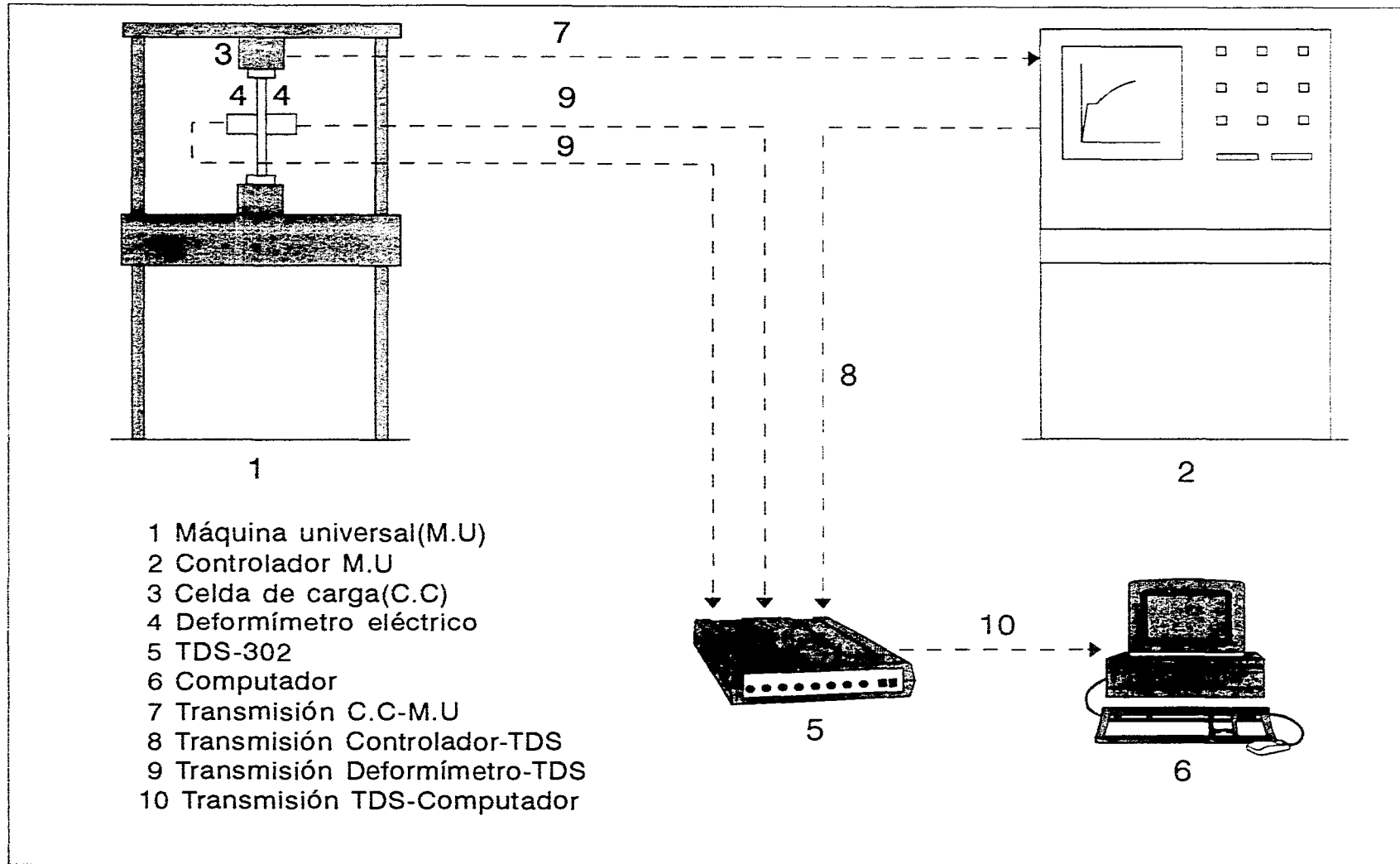
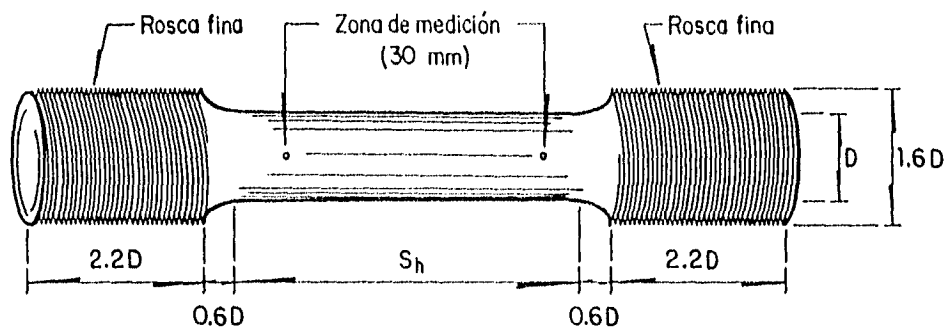


Figura 4.2. Esquema del equipo utilizado para los ensayos del tipo monotónico a tensión.



$D = 1.6 \text{ cm}$

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

Figura 4.3. Características de las probetas utilizadas para los ensayos del tipo monótonico a compresión y cíclicos reversibles.

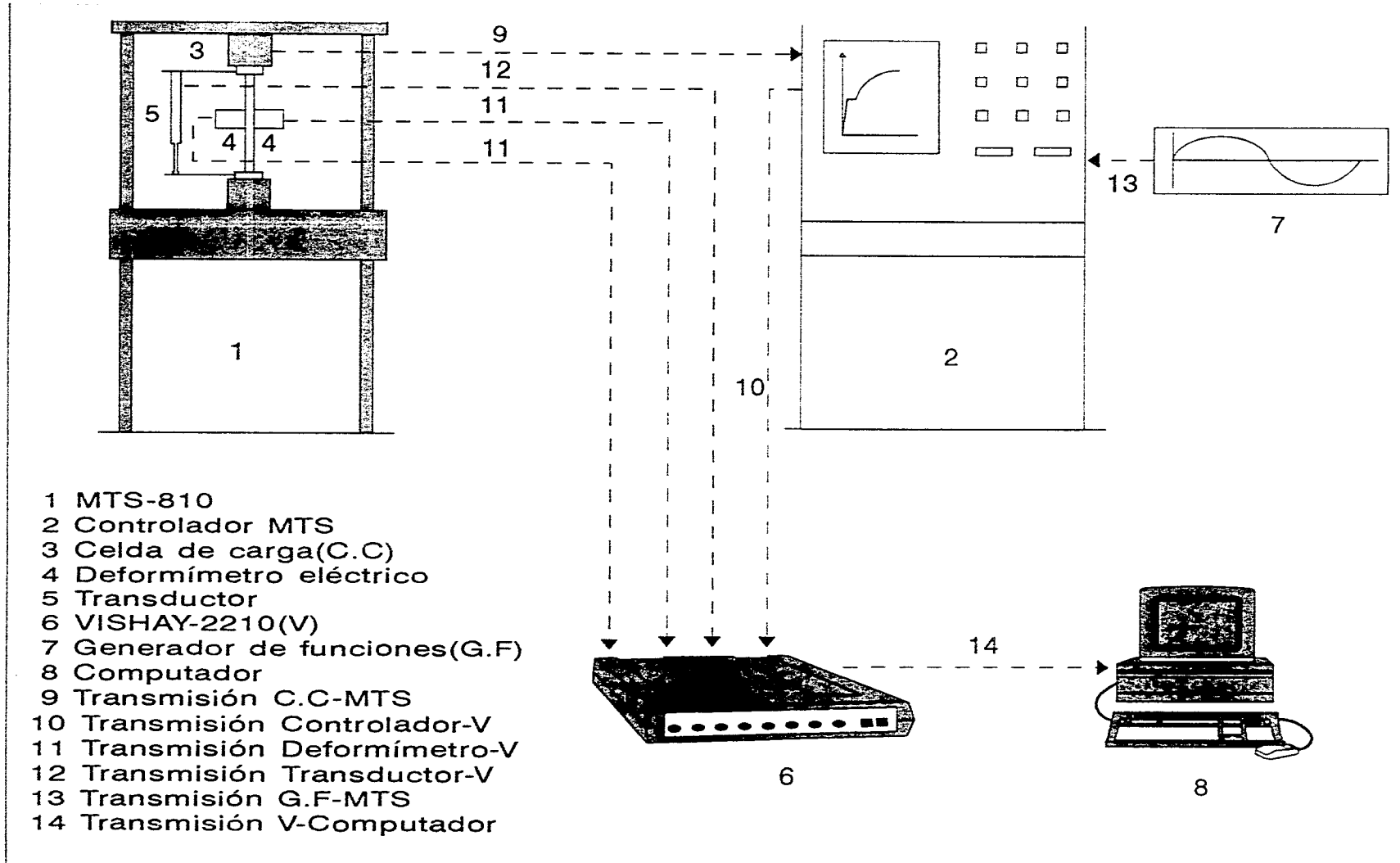


Figura 4.4. Esquema del equipo utilizado para los ensayos del tipo monotónico a compresión y cíclico reversible.

5. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. ENSAYES MONOTÓNICOS A TENSIÓN

A partir de los resultados experimentales obtenidos, se estudió la variación de los parámetros básicos que describen la curva esfuerzo-deformación de barras de refuerzo producidas en México y que fueron sometidas a carga monotónica.

Las barras ensayadas se agruparon según su diámetro en dos tipos :

- Barras de diámetro grande : Probetas de diámetro 5/8 plg, 3/4 plg, 1 plg y 1-1/4 plg.
- Barras de diámetro pequeño : Probetas de diámetro 5/16 plg, 3/8 plg y 1/2 plg.

Esta clasificación de diámetros se debe a que en las barras de diámetro pequeño se encontraron, en un número importante de casos, ausencia de la zona de fluencia, así como una mayor variabilidad en las estadísticas correspondientes (Rodríguez y Botero, 1995). Además, en estructuras de concreto reforzado como edificaciones, puentes, etc, normalmente las barras de diámetro grande se utilizan como refuerzo longitudinal y las de diámetro pequeño como refuerzo transversal.

En las figuras 5.1 a 5.4 se presentan curvas esfuerzo-deformación, donde se puede observar los resultados al aplicar los modelos de Park y Paulay (1978) y Mander et al. (1984). Estos resultados se comparan con los experimentales correspondientes a una barra de refuerzo de diámetro grande. Los parámetros utilizados en los modelos analíticos son los correspondientes a los experimentales de la barra estudiada. Se pudo observar que en la mayoría de las probetas ensayadas, los resultados experimentales presentaron una mejor correlación con el modelo propuesto por Mander et al. (1984) que

con el modelo propuesto por Park y Paulay (1978); por este motivo, en este estudio se empleó el primer modelo.

En las tablas 5.1 y 5.2 se presentan los resultados estadísticos para la población de diámetros grandes y pequeños respectivamente.

TABLA 5.1 ESTADÍSTICAS DE BARRAS DE DIÁMETRO GRANDE.					
	f_y (kg/cm ²)	ϵ_{sh}	f_{su} (kg/cm ²)	ϵ_{su}	P
X	4577	0.0088	7491	0.1171	3.474
S	169	0.0022	199	0.0120	0.2646
V	0.0370	0.2490	0.0270	0.1020	0.0760
Percentil 5%	4254	0.0046	7109	0.0941	2.966
Percentil 95%	4900	0.0130	7873	0.1401	3.982

TABLA 5.2 ESTADÍSTICAS DE BARRAS DE DIÁMETRO PEQUEÑO.					
	f_y (kg/cm ²)	ϵ_{sh}	f_{su} (kg/cm ²)	ϵ_{su}	P
X	4609	0.0060	7436	0.1420	3.362
S	376	0.0069	297	0.0252	0.4496
V	0.0820	1.1370	0.0400	0.1770	0.1340
Percentil 5%	3880	0.0000	6860	0.0931	2.491
Percentil 95%	5338	0.0193	8012	0.1909	4.233

En estas tablas, X es la media de la muestra, S es la desviación estandar y V es el coeficiente de variación. Las dos últimas líneas corresponden a los percentiles 5% y 95% , respectivamente. El número de muestras para la población de diámetros grandes fue de 50 y para la de diámetros pequeños fue de 45.

- Variabilidad del esfuerzo de fluencia f_y :

Como se mencionó anteriormente, una diferencia importante entre las barras de diámetros grandes y pequeños, es la ausencia en un número importante de casos, de la zona de fluencia en la población de diámetros pequeños. En estos casos la definición de esfuerzo de fluencia, f_y , se hizo empleando el procedimiento de trazar una recta a partir de la abscisa 0.002 en la curva esfuerzo-deformación, con una pendiente igual a la de la tangente inicial de la curva. La intersección de esta recta y la curva esfuerzo-deformación define el valor de f_y correspondiente. Esta característica influye de manera importante en mayores coeficientes de variación, V , de los parámetros correspondientes a diámetros pequeños respecto a los de diámetros grandes (tablas 5.1 y 5.2).

En las figuras 5.5 y 5.6 se muestran la frecuencia acumulada de f_y para las muestras de diámetros grandes y pequeños, respectivamente. Estos resultados se comparan con los que se obtendrían considerando que las muestras tienen distribución de probabilidad normal. El ajuste de esta distribución de probabilidad y los resultados experimentales es aceptable.

La norma NMX B-6-1987 (Norma Mexicana, 1987) especifica para f_y un esfuerzo mínimo de 4200 kg/cm^2 . Si se emplea la distribución normal para las muestras de diámetros grandes y pequeños, la probabilidad de que una barra de grado 42 producida en México no alcance el valor mínimo del esfuerzo de fluencia, f_y , es 0.013 para la muestra de diámetros grandes y 0.138 para diámetros pequeños, lo que indica una diferencia significativa entre estas muestras (Rodríguez y Botero, 1995). Resultados de análisis estadísticos efectuados en 1980 (Villanueva y Meli, 1984) muestran que la fracción de resultados que no alcanzaron el valor especificado de 4200 kg/cm^2 para f_y fue de 0.12.

- Variabilidad del esfuerzo máximo f_{su} :

En las figuras 5.7 y 5.8 se muestran la frecuencia acumulada de f_{su} para las muestras de diámetros grandes y pequeños, respectivamente. Estos resultados se comparan con los que se obtendrían considerando que las muestras tienen distribución de probabilidad normal. El ajuste de esta distribución de probabilidad y los resultados experimentales es menos aceptable que en el caso de f_y ; sin embargo, el ajuste es más favorable para el caso de diámetros grandes que para el caso de diámetros pequeños.

La norma NMX B-6-1987 (Norma Mexicana, 1987) especifica para f_{su} un esfuerzo mínimo de 6300 kg/cm^2 , el cual es superado ampliamente por los valores encontrados en este estudio. Esta característica puede ser desfavorable, ya que es posible que ocurran modos de falla, como el de cortante, no considerados en el proceso de diseño. Además, esta característica es fuente de sobrerresistencias en la estructura, lo que generalmente no es considerado en el proceso de diseño y lleva a incrementos innecesarios en el costo inicial de la estructura. También, las sobrerresistencias pueden llevar a incrementos de demandas de ductilidad en estructuras con distribución irregular de resistencias (Rodríguez y Botero, 1995).

- Variabilidad de ϵ_{sh} :

Como se puede observar en las tablas 5.1 y 5.2, existen diferencias importantes entre los coeficientes de variación para diámetro grandes y pequeños. Estas diferencias se deben a que un número importante de barras de refuerzo de diámetro pequeño no presentaron zona de fluencia definida y en estos casos se consideró que el valor de ϵ_{sh} era igual a ϵ_y . El ajuste de este parámetro a una distribución normal, es bastante pobre (Rodríguez y Botero, 1994). Las figuras 5.9 y 5.10 muestran curvas de esfuerzo-deformación típicas encontradas experimentalmente para diámetros grandes y pequeños, respectivamente, en las que se aprecian las diferencias comentadas.

- Variabilidad de ϵ_{su} :

Como en el caso anterior, la variabilidad de ϵ_{su} es mayor para diámetros pequeños que para los grandes, como se puede observar en las tablas 5.1 y 5.2. Los resultados indican un ajuste pobre a la distribución normal (Rodríguez y Botero, 1994).

- Variabilidad de P :

Nuevamente la variabilidad es mayor en la muestra de diámetros pequeños. Los resultados indican un ajuste pobre a la distribución normal (Rodríguez y Botero, 1994).

5.2. ENSAYES MONOTÓNICOS A COMPRESIÓN.

El pandeo de barras de refuerzo está asociado al modo de falla típico de elementos de concreto reforzado sometidos a carga monotónica de compresión. Se define como el punto de la curva esfuerzo-deformación donde la flexión empieza a tener importancia, ocasionando que el elemento pase de una configuración inicial no deformada en equilibrio a otra adyacente deformada pero también en equilibrio. Las deformaciones del elemento en el estado inicial del pandeo aumentan en el lado cóncavo y disminuyen en el lado convexo, debido al inicio de la flexión.

Los valores del esfuerzo y de la deformación de pandeo, se pueden evaluar de los registros obtenidos en los ensayos experimentales realizados, ya que el aparato utilizado para medir deformaciones se ubica en ambas caras de la probeta, como se ilustró en la figura 4.1 del capítulo anterior, por lo que es posible obtener las deformaciones de las caras opuestas de las probetas ensayadas así como sus respectivos esfuerzos. En adelante se denominará “lado cóncavo” y “lado convexo” a las caras de la probeta más cercanas al plano de flexión donde las deformaciones disminuyen y aumentan, respectivamente. Debido a la ausencia de confinamiento lateral en la longitud libre de las probetas que hubiera permitido generar un plano de flexión en una dirección específica, no fue posible

colocar en general, los aparatos de medición perfectamente perpendiculares al plano de flexión. Sin embargo, se consideró aceptables aquellos ensayos en los que la configuración deformada de la barra se situó en un plano con un ángulo menor de 45° respecto al plano ideal de flexión. En ningún caso se rechazó alguna probeta ensayada, por no cumplir la condición anterior.

Con base en lo anterior, se presenta a continuación el criterio utilizado en este trabajo que permite definir el inicio del pandeo. Aprovechando que los deformímetros eléctricos del aparato de medición empleado permiten evaluar las deformaciones en caras opuestas, se consideró que el inicio del pandeo está asociado al estado de deformaciones de los deformímetros mencionados, para el cual la diferencia entre estas deformaciones era igual o mayor al 20 % de la deformación medida. Se consideró que el valor del 20 % era razonable para evaluar el inicio del pandeo, ya que a partir de éste valor la diferencia entre las deformaciones aumentaban notoriamente; para valores menores al 20 % se encontró que las diferencias entre las deformaciones obtenidas presentaban una variación aleatoria sin una clara tendencia de aumento, lo que impedía evaluar claramente el inicio del pandeo. Con el criterio anterior se puede obtener la deformación de pandeo, la cual tiene asociada un esfuerzo de pandeo.

Para este tipo de pruebas se utilizaron diez probetas de acero, con diferentes relaciones de esbeltez, S_h/D . El criterio utilizado para la terminación de cada ensayo fue cuando se alcanzó una configuración visible de pandeo, a excepción de las probetas con relación de esbeltez de 2.5 las cuales no pandearon. En investigaciones previas (Monti y Nuti, 1992) se encontró que el pandeo inelástico de barras de acero de grado 440 MPa, ocurrió para relaciones de esbeltez, S_h/D , mayores a 5. En esta investigación, el pandeo inelástico monotónico ocurrió para relaciones de esbeltez, S_h/D , mayores o iguales a 4.

En las figuras 5.11 y 5.12 se muestran curvas esfuerzo-deformación obtenidas de una probeta sometida a carga monotónica de compresión con relación de esbeltez, S_h/D , de 2.5. De igual forma, en las figuras 5.13 y 5.14 se presentan resultados para una probeta

con relación de esbeltez, S_h/D , de 4; las figuras 5.15 y 5.16 muestran resultados para una probeta con relación de esbeltez, S_h/D , de 6 y la figuras 5.17 y 5.18 presentan resultados para una probeta con relación de esbeltez, S_h/D , de 8.

Las figuras 5.13, 5.15 y 5.17 presentan curvas esfuerzo-deformación del lado cóncavo de la probeta donde las deformaciones aumentan en forma ascendente, mientras que las figuras 5.14, 5.16 y 5.18 corresponden al lado convexo y sus deformaciones descienden a partir de cierto punto. Esto se debe a que en el lado cóncavo, la flexión genera deformaciones de compresión que se suman a las deformaciones ocasionadas por la carga de compresión simple, mientras que en el lado convexo, la flexión genera deformaciones de tensión que se restan a las ocasionadas por la carga de compresión simple. En las figuras que presentan las curvas esfuerzo-deformación del lado convexo, se puede asociar el inicio del pandeo con el punto de la curva donde las deformaciones dejan de ser crecientes. En este punto y para varios estados diferentes de carga, las deformaciones permanecen casi constantes. Este efecto fue definido por Shanley en 1946 y fue comentado en el capítulo tres.

Las figuras 5.11 y 5.12 presentan curvas esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez de 2.5, del lado cóncavo y convexo, respectivamente, pero a diferencia de las anteriores, la curva del lado convexo no presenta descenso de deformaciones; esto se debe a que las probetas con relación de esbeltez de 2.5, no presentaron evidencia visual de pandeo, ni tampoco las deformaciones medidas alcanzaron las diferencias anteriormente comentadas para definir el pandeo.

En la tabla 5.3 se presentan los resultados de las probetas ensayadas que fueron sometidas a carga monotónica de compresión. Se presentan los valores de la relación de esbeltez, S_h/D , del esfuerzo de fluencia, f_{yc} , del esfuerzo máximo alcanzado por las probetas ensayadas, f_{suc} y del esfuerzo y deformación de pandeo, f_p y ϵ_p , respectivamente, evaluados con el criterio presentado anteriormente.

TABLA 5.3.
RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS PROBETAS SOMETIDAS
A CARGAS MONOTÓNICAS A COMPRESIÓN.

(S _h /D)	f _{yc} (kg/cm ²)	f _{suc} (kg/cm ²)	f _p (kg/cm ²)	ε _p
2.5	-4667	-11333	Sin Pandeo	Sin Pandeo
2.5	-4533	-11333	Sin Pandeo	Sin Pandeo
2.5	-4615	-11385	Sin Pandeo	Sin Pandeo
4.0	-4769	-9538	-8971	-0.0690
4.0	-4750	-9500	-8598	-0.0638
6.0	-4700	-7600	-7054	-0.0362
6.0	-4650	-7400	-6586	-0.0286
8.0	-4552	-6000	-4723	-0.0033
8.0	-4415	-5885	-4553	-0.0028
8.0	-4864	-6136	-5299	-0.0125

Como se puede apreciar en la tabla anterior, los valores del esfuerzo de fluencia, f_{yc} , son similares al valor de la media de la población de las barras sometidas a cargas monotónicas en tensión, f_y , el cual es de 4577 kg/cm^2 (Tabla 5.1).

Una diferencia importante de los ensayos sometidos a carga monotónica de compresión, respecto a los ensayos de tensión ocurre con los valores del esfuerzo máximo, f_{suc} . Como se puede apreciar en la tabla 5.3, los valores de f_{suc} disminuyen a medida que aumenta la relación de esbeltez. Esto se debe a que cuando comienza el pandeo, la flexión comienza a ser importante respecto a la compresión simple, generando una configuración adyacente en la probeta que impide que la carga axial sea aplicada sobre su eje vertical y no permite que se desarrolle su resistencia máxima. Resultados similares a estos, han sido encontrados por Mander et al. (1984); Monti y Nuti (1992) y Mau (1989).

En el capítulo dos se presentó un procedimiento para obtener los parámetros que permiten definir la curva esfuerzo-deformación analítica de una barra corta de acero sometida a carga monotónica de compresión a partir de los valores de tensión (Expresiones 2.15 a la 2.17). Esto se hizo debido a que los valores de los parámetros característicos que definen

la curva esfuerzo-deformación en tensión (Rodríguez y Botero, 1994) de las barras de refuerzo utilizadas en esta serie de ensayos, son similares a los de la media de la población de las barras de diámetro grande sometidas a tensión (tabla 5.1). Utilizando este procedimiento se definió la curva esfuerzo-deformación analítica para una barra corta sometida a carga de compresión, a partir de los valores de la media de la población de tensión. Los valores de los parámetros obtenidos son los siguientes :

- $f_{yc} = -4658 \text{ kg/cm}^2$
- $f_{suc} = -9348 \text{ kg/cm}^2$
- $\epsilon_{shc} = -0.0087$
- $\epsilon_{suc} = -0.1048$
- $P_c = 2.092$

En la figura 5.19 se presenta la curva esfuerzo-deformación analítica de una barra corta sometida a carga monotónica en compresión utilizando los parámetros anteriores. Para efectos de comparación, se presenta además la curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez de 2.5, la cual no presentó evidencia de pandeo. Es importante aclarar que la curva esfuerzo-deformación analítica alcanza una deformación última, ϵ_{suc} , menor que la presentada en la curva experimental, debido a que el modelo analítico utilizado (Restrepo-Posada, 1993) no toma en cuenta la deformación máxima asociada al esfuerzo de ruptura, sino que toma en cuenta la deformación última asociada al esfuerzo máximo de la barra de acero; esta última deformación es notablemente menor a la asociada al esfuerzo de ruptura. La comparación de resultados experimentales y analíticos de las curvas en compresión de la figura 5.19, considerando el valor de ϵ_{suc} anteriormente mencionado, muestra una correlación aceptable. En la figura 5.19 se muestra también, la curva analítica en tensión asociada a la población de la media de barras de diámetro grande, a partir de la cual se generó la de compresión. La comparación de las tres curvas presentadas muestra diferencias significativas, ya que los esfuerzos de la curva analítica de tensión y la experimental de compresión, fueron obtenidas sin considerar la

variación del área de la sección transversal debido al efecto de Poisson, mientras que la curva analítica de compresión sí considera dicho efecto. Lo anterior indica que para barras de acero sometidas a compresión, se debe emplear las características correspondientes de la curva esfuerzo-deformación de una barra corta en compresión.

En la figura 5.20 se presenta las curvas que relacionan el esfuerzo de pandeo, f_p , con la relación de esbeltez, S_y/D , para diferentes condiciones de apoyo definidas por el factor de longitud efectiva, K ; para este parámetro se emplearon los valores 0.5, 0.75 y 1. Para definir estas curvas se empleó la teoría del doble módulo reducido descrito en el capítulo 3, así como la curva esfuerzo-deformación de una barra de acero sometida a carga monótonica de compresión obtenida analíticamente y anteriormente comentada. De igual manera, la figura 5.21 presenta la relación entre la deformación de pandeo, ϵ_p , y la relación de esbeltez, S_y/D . El empleo de estas figuras solamente es aplicable para aceros que presentan una curva esfuerzo-deformación similar a la curva anteriormente comentada, obtenida a partir del modelo analítico de Dodd y Restrepo-Posada (1995). En el caso de barras de acero que presentan curvas esfuerzo-deformación diferentes a la curva analítica utilizada en el presente trabajo, se deben obtener las curvas de f_p vs S_y/D y ϵ_p vs S_y/D utilizando el procedimiento presentado en el capítulo tres, ya que con este procedimiento es posible obtener dichas curvas asociadas a una barra de acero de sección circular utilizando cualquier curva de esfuerzo-deformación del acero.

El factor de longitud efectiva, K , de 0.75, es el que presenta una mejor aproximación a los resultados experimentales; este valor fue obtenido utilizando el principio de mínimos cuadrados. El mencionado valor de K se puede justificar considerando que, como se mencionó en la sección 4.2.2, no fue posible obtener un empotramiento perfecto debido a la existencia de un pequeño movimiento de cuerpo libre entre el dispositivo de agarre y las probetas, lo que permitió un giro en los extremos de las probetas. Esto explica el aumento del factor de longitud efectiva, K , respecto al valor que representa la condición de empotramiento (K igual a 0.5). Los valores de K de 0.5 y 1, son representativos de

estados límites asociados a una condición de apoyo empotrada y articulada, respectivamente.

Los resultados de las figuras 5.20 y 5.21 correspondientes a mediciones de esfuerzos y deformaciones de pandeo, respectivamente, de las probetas ensayadas para diferentes relaciones de esbeltez, sugieren que existe una correlación aceptable entre dichos resultados y los obtenidos analíticamente.

5.3. ENSAYES CÍCLICOS REVERSIBLES

5.3.1. Evaluación del pandeo en barras de refuerzo

Para definir el esfuerzo y la deformación de pandeo, ϵ_p y f_p , respectivamente, para este tipo de ensayos, se utilizó el mismo criterio definido para el caso de compresión monotónica. Con este criterio, cuando la diferencia entre los dos registros de deformación obtenidos de los ensayos, es mayor que $0.2 (\epsilon_m^+ - \epsilon_m^-)$ para cada nivel de deformación, se define como inicio del pandeo. La figura 5.22 presenta el significado de los parámetros ϵ_m^+ y ϵ_m^- . El parámetro ϵ_m^+ es la deformación correspondiente al inicio de la descarga en tensión y el parámetro ϵ_m^- es la deformación correspondiente al inicio de la descarga en compresión. Lo anterior lleva a que los valores de comparación anteriormente mencionados son variables en cada nivel de deformación. Este criterio tiene la ventaja de que coincide con el utilizado en el caso de los ensayos de compresión monotónica. Esto se debe a que en este caso, se puede considerar que el punto donde comienza la aplicación carga de compresión es el origen de coordenadas cartesianas y cada punto de la curva esfuerzo-deformación es un punto potencial de descarga. Además, como se comentará más adelante, este criterio está asociado al procedimiento de evaluación de la deformación de pandeo que se propone en este trabajo.

Los valores del esfuerzo y deformación de pandeo, f_p y ϵ_p , respectivamente, se ilustran en la figura 5.22. Estos valores se pueden evaluar a partir de los registros obtenidos en los ensayos experimentales realizados, ya que el aparato utilizado para medir deformaciones se ubica en ambas caras de la probeta, como se ilustró en la figura 4.1 del capítulo anterior. Al igual que en el caso de los ensayos monotónicos de compresión, en este tipo de pruebas tampoco fue posible colocar los aparatos de medición perfectamente perpendiculares al plano de flexión. Por tal motivo, los resultados obtenidos corresponden sólo a ensayos de probetas en los que la configuración deformada de la barra se situó en un plano con un ángulo menor de 45° respecto al plano ideal de flexión. Sólo una probeta ensayada no cumplió con esta condición.

Para este tipo de ensayos se utilizaron 16 probetas de acero, con las características definidas en la sección 4.2.1. Las muestras utilizadas se probaron realizando aproximadamente cuatro niveles de desplazamiento y dos ciclos por cada nivel. Se ensayaron ocho probetas utilizando ciclos simétricos y las otras ocho utilizando ciclos asimétricos donde las deformaciones de tensión fueron mayores que las de compresión, con características que se describen más adelante.

El objetivo de realizar este tipo de pruebas, considerando ciclos simétricos y asimétricos, es el de poder evaluar si el pandeo está influenciado por la tensión previa a la que puede estar sometida una barra de acero, como es el caso en barras de refuerzo en elementos de concreto reforzado sometidas a excitaciones sísmicas.

Los niveles de deformación para ejecutar los ensayos con ciclos simétricos fueron definidos a partir de los ensayos del tipo monotónico de compresión, tomando como referencia la deformación a la cual se presentó el pandeo en dichas pruebas. La definición de los niveles de deformación para los casos con ciclos asimétricos fueron realizados considerando que las deformaciones máximas en compresión fueran iguales a $0.3 (\epsilon_m^+ - \epsilon_m^-)$.

Los valores del esfuerzo y deformación de pandeo, f_p y ϵ_p , respectivamente, se ilustran en la figura 5.22. Estos valores se pueden evaluar a partir de los registros obtenidos en los ensayos experimentales realizados, ya que el aparato utilizado para medir deformaciones se ubica en ambas caras de la probeta, como se ilustró en la figura 4.1 del capítulo anterior. Al igual que en el caso de los ensayos monotónicos de compresión, en este tipo de pruebas tampoco fue posible colocar los aparatos de medición perfectamente perpendiculares al plano de flexión. Por tal motivo, los resultados obtenidos corresponden sólo a ensayos de probetas en los que la configuración deformada de la barra se situó en un plano con un ángulo menor de 45° respecto al plano ideal de flexión. Sólo una probeta ensayada no cumplió con esta condición.

Para este tipo de ensayos se utilizaron 16 probetas de acero, con las características definidas en la sección 4.2.1. Las muestras utilizadas se probaron realizando aproximadamente cuatro niveles de desplazamiento y dos ciclos por cada nivel. Se ensayaron ocho probetas utilizando ciclos simétricos y las otras ocho utilizando ciclos asimétricos donde las deformaciones de tensión fueron mayores que las de compresión, con características que se describen más adelante.

El objetivo de realizar este tipo de pruebas, considerando ciclos simétricos y asimétricos, es el de poder evaluar si el pandeo está influenciado por la tensión previa a la que puede estar sometida una barra de acero, como es el caso en barras de refuerzo en elementos de concreto reforzado sometidas a excitaciones sísmicas.

Los niveles de deformación para ejecutar los ensayos con ciclos simétricos fueron definidos a partir de los ensayos del tipo monotónico de compresión, tomando como referencia la deformación a la cual se presentó el pandeo en dichas pruebas. La definición de los niveles de deformación para los casos con ciclos asimétricos fueron realizados considerando que las deformaciones máximas en compresión fueran iguales a $0.3 (\epsilon_m^+ - \epsilon_m^-)$.

En las figuras 5.23 a la 5.30 y 5.31 a la 5.38 se presentan curvas esfuerzo-deformación para los casos de ciclos simétricos y asimétricos, respectivamente.

Las figuras 5.23 y 5.24 (para el caso de ciclos simétricos) y las figuras 5.31 y 5.32 (para el caso de ciclos asimétricos) muestran curvas esfuerzo-deformación obtenidas de una probeta con relación de esbeltez, S_h / D , de 2.5. De igual forma, las figuras 5.25 y 5.26 y las figuras 5.33 y 5.34, presentan resultados para una probeta con relación de esbeltez, S_h / D , de 4; las figuras 5.27 y 5.28 y las figuras 5.35 y 5.36, muestran resultados para una probeta con relación de esbeltez, S_h / D , de 6 y por último las figuras 5.29 y 5.30 y las figuras 5.37 y 5.38, presentan resultados para una probeta con relación de esbeltez, S_h / D , de 8.

Las figuras 5.25, 5.27 y 5.29 (para el caso de ciclos simétricos) y las figuras 5.33, 5.35 y 5.37 (para el caso de ciclos asimétricos) presentan curvas esfuerzo-deformación del lado cóncavo de la probeta donde las deformaciones aumentan en forma ascendente tanto en tensión como en compresión; las figuras 5.26, 5.28 y 5.30 (para el caso de ciclos simétricos) y las figuras 5.34, 5.36 y 5.38 (para el caso de ciclos asimétricos) corresponden al lado convexo y sus deformaciones de compresión descienden a partir de cierto punto. Este efecto es el mismo que se observó en el caso de los ensayos monotónicos a compresión y se le puede asociar al fenómeno del pandeo.

Las figuras 5.23 y 5.24 (para el caso de ciclos simétricos) y las figuras 5.31 y 5.32 (para el caso de ciclos asimétricos), presentan curvas esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez de 2.5, del lado cóncavo y convexo, respectivamente, pero a diferencia de las anteriores, la curva del lado cóncavo es similar a la del lado convexo. Esto indica, como en el caso de ensayos monotónicos, que en estas probetas no ocurrió el fenómeno de pandeo.

En las tablas 5.4 y 5.5 se presentan los resultados de ensayos de las probetas sometidas a carga cíclica reversible, para los casos de ciclos simétricos y asimétricos, respectivamente. Se presentan los valores de la relación de esbeltez, S_h/D , del esfuerzo y deformación de pandeo, f_p y ϵ_p , respectivamente. Estos últimos parámetros se definieron con los criterios anteriormente comentados. Las tablas además, muestran los valores del nivel y el ciclo de deformaciones donde ocurrió el pandeo definido con los criterios mencionados.

TABLA 5.4.
RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS PROBETAS SOMETIDAS A CARGAS CÍCLICAS REVERSIBLES CON CICLOS SIMÉTRICOS.

(S_h/D)	f_p (kg/cm ²)	ϵ_p	Nivel y ciclo donde ocurre el pandeo
2.5	Sin Pandeo	Sin Pandeo	Sin Pandeo
4.0	-7975	-0.0229	Nivel 2 - Ciclo 2
4.0	-7880	-0.0241	Nivel 2 - Ciclo 2
6.0	-6932	-0.0311	Nivel 3 - Ciclo 1
6.0	-6681	-0.0182	Nivel 3 - Ciclo 2
6.0	-6484	-0.0174	Nivel 2 - Ciclo 2
8.0	-5204	-0.0067	Nivel 2 - Ciclo 1
8.0	-4750	-0.0057	Nivel 2 - Ciclo 1

TABLA 5.5.
RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS PROBETAS SOMETIDAS A CARGAS CÍCLICAS REVERSIBLES CON CICLOS ASIMÉTRICOS.

(S_h/D)	f_p (kg/cm ²)	ϵ_p	Nivel y ciclo donde ocurre el pandeo
2.5	Sin Pandeo	Sin Pandeo	Sin Pandeo
2.5	Sin Pandeo	Sin Pandeo	Sin Pandeo
4.0	-6911	-0.0137	Nivel 3 - Ciclo 1
4.0	-6945	-0.0151	Nivel 3 - Ciclo 1
6.0	-6030	-0.0122	Nivel 2 - Ciclo 2
6.0	-5956	-0.0119	Nivel 2 - Ciclo 2
8.0	-5136	-0.0096	Nivel 2 - Ciclo 1
8.0	-5028	-0.0040	Nivel 2 - Ciclo 1

Las figuras 5.25 a la 5.30 (para el caso de ciclos simétricos) y las figuras 5.33 a la 5.38 (para el caso de ciclos asimétricos), muestran que después del inicio del pandeo, la degradación de rigidez empieza a ser importante, disminuyendo muy poco su resistencia. Esto se debe a que cuando se inicia el pandeo, éste genera un debilitamiento importante del elemento, producto del abandono de la configuración inicial de la probeta a una configuración adyacente. En el caso de probetas cuya relación de esbeltez, S_h/D , fue de 2.5 se puede ver que la degradación de rigidez es muy pequeña; esto es entendible, ya que en éstas no ocurrió el pandeo.

El punto donde se presenta el cambio de aplicación de carga de tensión a compresión del ciclo donde se presenta el pandeo, tiene asociado un valor de deformación, ϵ_o^+ (figura 5.22). Se define el parámetro ϵ_p^* como la diferencia entre la deformación ϵ_o^+ y el valor de la deformación de pandeo, ϵ_p , esto es:

$$\epsilon_p^* = \epsilon_o^+ - \epsilon_p \quad (5.1)$$

En la tabla 5.6 y 5.7 se presentan los resultados del esfuerzo y la deformación de pandeo f_p y ϵ_p , respectivamente, de la deformación ϵ_o^+ y del parámetro ϵ_p^* , para los ensayos de las probetas sometidas a ciclos simétricos y asimétricos respectivamente.

(S_h/D)	f_p (kg/cm ²)	ϵ_o^+	ϵ_p	ϵ_p^*
2.5	Sin Pandeo	Sin Pandeo	Sin Pandeo	Sin Pandeo
4.0	-7975	0.0460	-0.0229	0.0689
4.0	-7880	0.0460	-0.0241	0.0701
6.0	-6932	0.0135	-0.0311	0.0446
6.0	-6681	0.0182	-0.0182	0.0364
6.0	-6484	0.0037	-0.0174	0.0211
8.0	-5204	0.0035	-0.0067	0.0102
8.0	-4750	0.0020	-0.0057	0.0077

TABLA 5.7.

VALORES DEL ESFUERZO DE PANDEO Y DEL PARÁMETRO ϵ_p^* OBTENIDOS DE LOS ENSAYES CÍCLICOS REVERSIBLES, CON CICLOS ASIMÉTRICOS.

(S_h/D)	f_p (kg/cm ²)	ϵ_o	ϵ_p	ϵ_p^*
2.5	Sin Pandeo	Sin Pandeo	Sin Pandeo	Sin Pandeo
2.5	Sin Pandeo	Sin Pandeo	Sin Pandeo	Sin Pandeo
4.0	-6911	0.0750	-0.0137	0.0887
4.0	-6945	0.0740	-0.0151	0.0891
6.0	-6030	0.0350	-0.0122	0.0472
6.0	-5956	0.0340	-0.0119	0.0459
8.0	-5136	0.0140	-0.0096	0.0236
8.0	-5028	0.0150	-0.0040	0.0190

En las figuras 5.39 y 5.40 se muestran gráficamente un resumen de los resultados presentados en las tablas 5.6 y 5.7. En la figura 5.39 se presentan las curvas que relacionan el esfuerzo de pandeo, f_p , con la relación de esbeltez, S_h/D . También se presentan en la misma figura, los resultados de las probetas ensayadas sometidas a ciclos simétricos y asimétricos y el “Caso especial” que se comentará más adelante. En dicha figura se observa que los resultados experimentales presentan una correlación aceptable respecto a la curva analítica asociada al factor de longitud efectiva, K , de 0.75. Sin embargo, los casos de ciclos asimétricos tienden a ser evaluados del lado de la inseguridad (figura 5.39), lo que se comentará más adelante.

De igual manera, en la figura 5.40 se presenta la relación entre el parámetro ϵ_p^* y la relación de esbeltez, S_h/D , donde también se presenta la curva analítica y los resultados obtenidos experimentalmente, para los casos de ciclos simétricos, asimétricos y el “Caso especial”. En dicha figura, también se observa que los resultados experimentales presentan una correlación aceptable respecto a la curva analítica asociada al factor de longitud efectiva, K , de 0.75. De manera opuesta al caso de evaluación del esfuerzo de pandeo (figura 5.39), la evaluación de deformaciones de pandeo de acuerdo al criterio del módulo reducido, tiende a ser conservadora (figura 5.40).

Si se compara la figura 5.20 con la 5.39, se puede observar que no se presentan diferencias importantes entre los esfuerzos de pandeo, f_p , obtenidos de los ensayos monotónicos de compresión y los cíclicos reversibles (simétricos y asimétricos). De igual manera, si se comparan las figuras 5.21 con la 5.40, se puede observar que tampoco existen diferencias importantes entre las deformaciones de pandeo, ϵ_p , obtenidas de los ensayos monotónicos de compresión y los valores del parámetro ϵ_p^* obtenidos para el caso de los ensayos cíclicos reversibles. Esto implica que la envolvente de la curva esfuerzo-deformación del ciclo donde se produce el pandeo es similar a la curva esfuerzo-deformación monotónica de aceros sometidos a compresión. Con lo anterior, se puede ver la importancia de la definición de ϵ_p^* , ya que con este parámetro es posible evaluar el efecto de pandeo debido a acciones cíclicas a partir de los resultados de pandeo monotónico.

Los resultados experimentales muestran que la similitud entre el parámetro ϵ_p^* y la deformación de pandeo de las probetas sometidas a cargas monotónicas de compresión, es válida tanto para los ensayos sometidos a ciclos simétricos como para los asimétricos. Con base en lo anterior, se puede concluir 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.

Como verificación de este fenómeno, se realizó adicionalmente un ensaye de una probeta de acero denominada "Caso especial", con una relación de esbeltez, S_b/D , de 4 y a la cual se le aplicó una carga de tensión cercana a la máxima y luego se descargó y se le aplicó carga de compresión hasta que alcanzara el pandeo visual. Los resultados de este ensaye, se pueden observar en las figuras 5.41 y 5.42, correspondientes al lado cóncavo y convexo, respectivamente.

Al utilizar el mismo criterio definido para los casos monotónicos y cíclicos reversibles, se encontró que el esfuerzo de pandeo, f_p , fue de 8470 kg/cm², la deformación de pandeo,

ϵ_p , fue de +0.0598 y la deformación ϵ_0^+ , fue de 0.1324. Es importante aclarar que el inicio del pandeo de esta probeta, ocurrió en el lado positivo de las deformaciones de la curva esfuerzo-deformación y no en el negativo como ocurrió en todos los casos de las probetas ensayadas anteriormente. Se evaluó el parámetro ϵ_p^* definido para los ensayos cíclicos utilizando la expresión 5.1 y se obtuvo un valor de 0.0726.

El valor del esfuerzo de pandeo y del parámetro ϵ_p^* de esta probeta es similar a los valores obtenidos en los ensayos monotónicos para la misma relación de esbeltez. Este resultado confirma los anteriores de que los valores de las deformaciones de pandeo en ensayos cíclicos dependen significativamente de la deformación máxima a tensión alcanzada en el ciclo donde se produce el pandeo.

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 cargas monotónicas, como a cíclicas reversibles, siempre y cuando en este último caso se emplee el parámetro propuesto ϵ_p^* .

5.3.2. Evaluación de curvas cíclicas reversibles esfuerzo-deformación en barras de refuerzo antes de que ocurra el pandeo

En el capítulo 2 del presente trabajo se presentó el procedimiento analítico que permite obtener las curvas esfuerzo-deformación de barras de acero sometidas a cargas cíclicas reversibles, para lo cual se empleó el programa para computadora presentado en el Apéndice 1. Como datos de entrada se emplearon las historias de deformaciones antes de que iniciara el pandeo y los valores característicos que definen la curva esfuerzo-deformación de tensión y compresión, correspondientes a cada una de las probetas ensayadas en esta investigación en la condición de carga cíclica reversible.

Las figuras 5.43 a la 5.46, presentan las curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales, de probetas de acero sometidas a carga cíclica reversible con ciclos simétricos, asociadas a las relaciones de esbeltez, S_{II}/D , de 2.5, 4, 6 y 8 respectivamente. Como se puede observar, el modelo propuesto por Mander et al. (1984), presenta un comportamiento similar al presentado en los ensayos experimentales antes de que se presentara el pandeo. De igual manera, las figuras 5.47 a la 5.50, presentan las curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales, de probetas de acero sometidas a carga cíclica reversible con ciclos asimétricos, asociadas a las relaciones de esbeltez, S_{II}/D , de 2.5, 4, 6 y 8 respectivamente. En estas figuras, también se puede observar que el modelo propuesto por Mander, presenta un comportamiento similar al presentado en los ensayos experimentales antes de que se presentara el pandeo. Esto permite concluir que el modelo propuesto por Mander, es aplicable a barras de acero sometidas a ciclos simétricos y asimétricos.

5.3.3. Comentarios finales.

En conclusión, en el presente trabajo queda demostrado que es posible definir la curva esfuerzo-deformación de barras de acero sometidas a carga monotónica de compresión a partir de la de tensión. Con esta curva de compresión, es posible obtener el punto donde inicia el pandeo, utilizando la teoría del doble módulo reducido. Con esta curva de compresión y el punto de inicio del pandeo monotónico, es posible obtener el parámetro ϵ_p^* que define el inicio del pandeo de barras sometidas a cargas cíclicas reversibles. Si además se propone una historia de deformaciones, es posible definir el valor de la deformación ϵ_0^+ y con este valor se obtiene el valor de ϵ_p , utilizando la expresión 5.1. Por último, utilizando los valores anteriores y el modelo propuesto por Mander, es posible obtener la curva esfuerzo-deformación de una barra de acero sometida a carga cíclica reversible hasta el nivel de deformaciones asociado al inicio del pandeo.

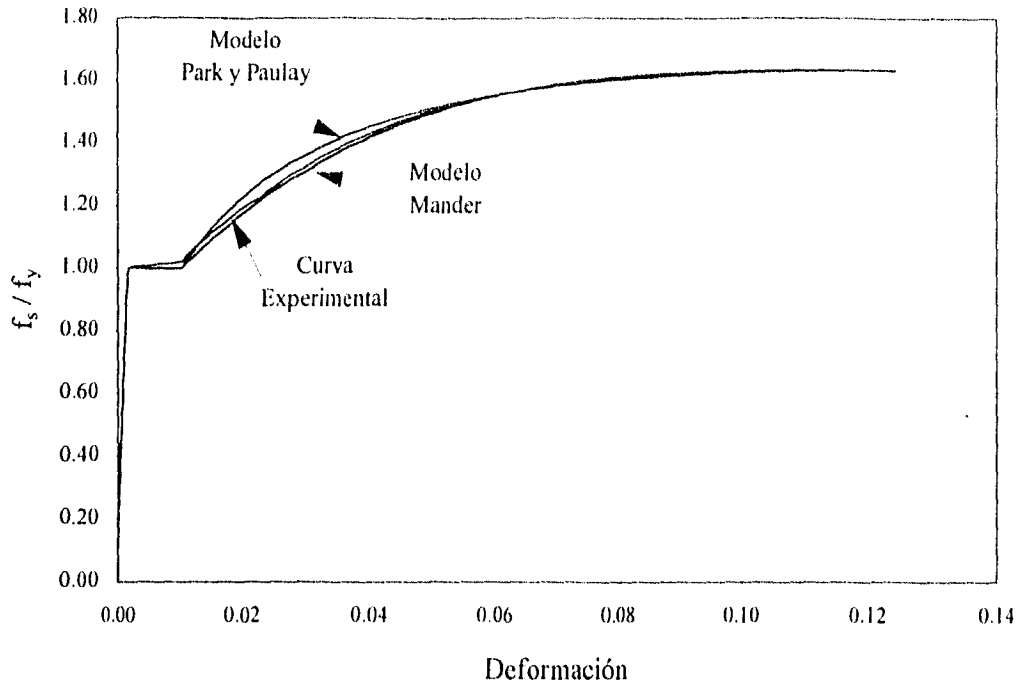


Figura 5.1. Curva esfuerzo-deformación comparativa entre los modelos analíticos y los resultados experimentales de una barra de acero de refuerzo con diámetro igual a 1-1/4 plg.

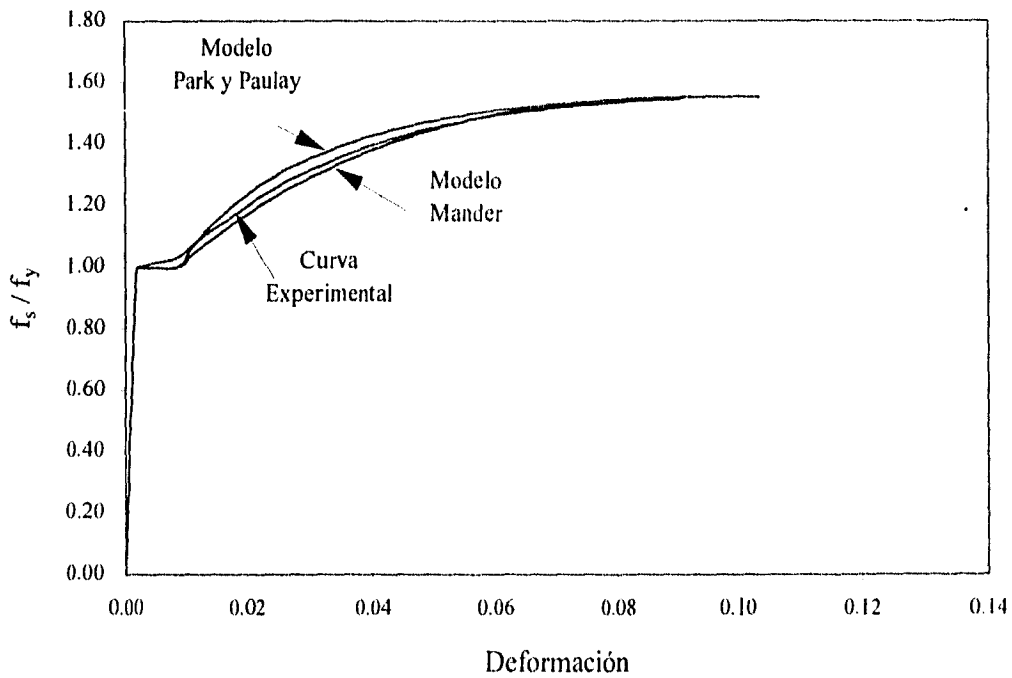


Figura 5.2. Curva esfuerzo-deformación comparativa entre los modelos analíticos y los resultados experimentales de una barra de acero de refuerzo con diámetro igual a 1 plg.

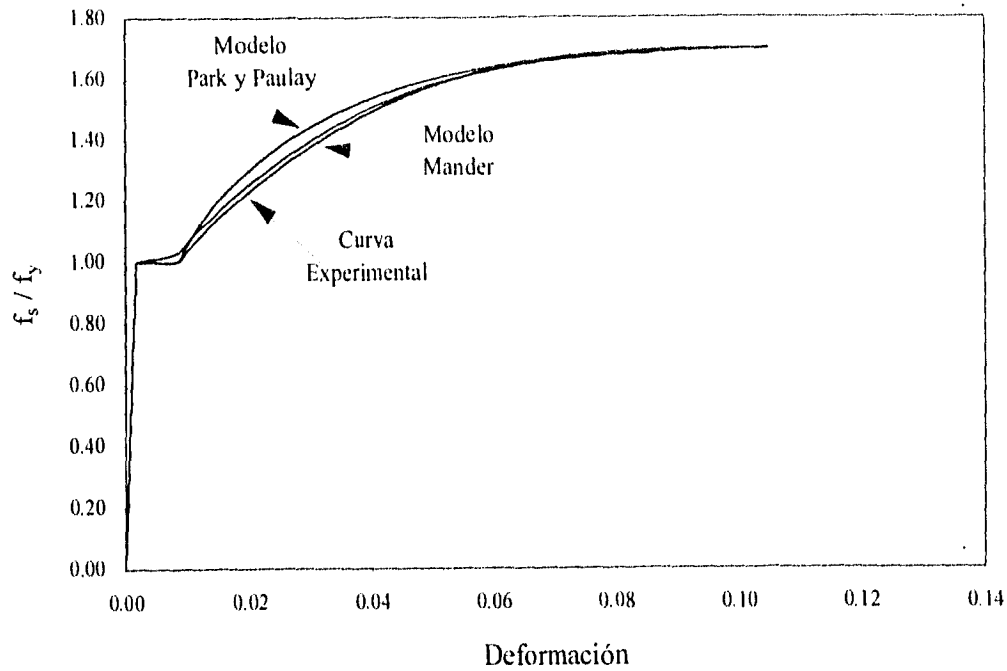


Figura 5.3. Curva esfuerzo-deformación comparativa entre los modelos analíticos y los resultados experimentales de una barra de acero de refuerzo con diámetro igual a 3/4 plg.

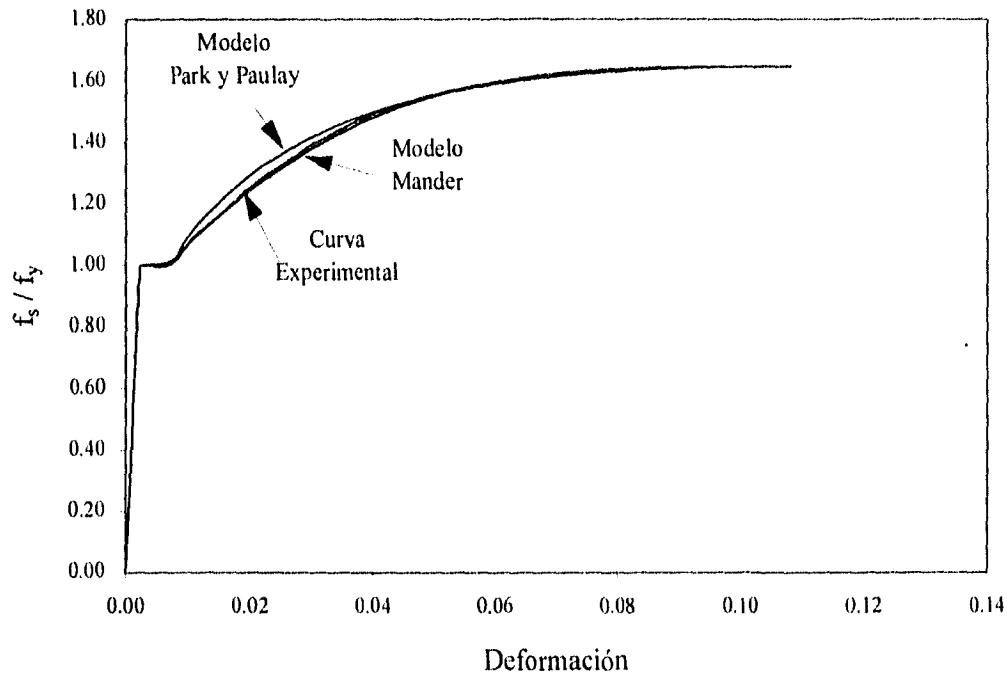


Figura 5.4. Curva esfuerzo-deformación comparativa entre los modelos analíticos y los resultados experimentales de una barra de acero de refuerzo con diámetro igual a 5/8 plg.

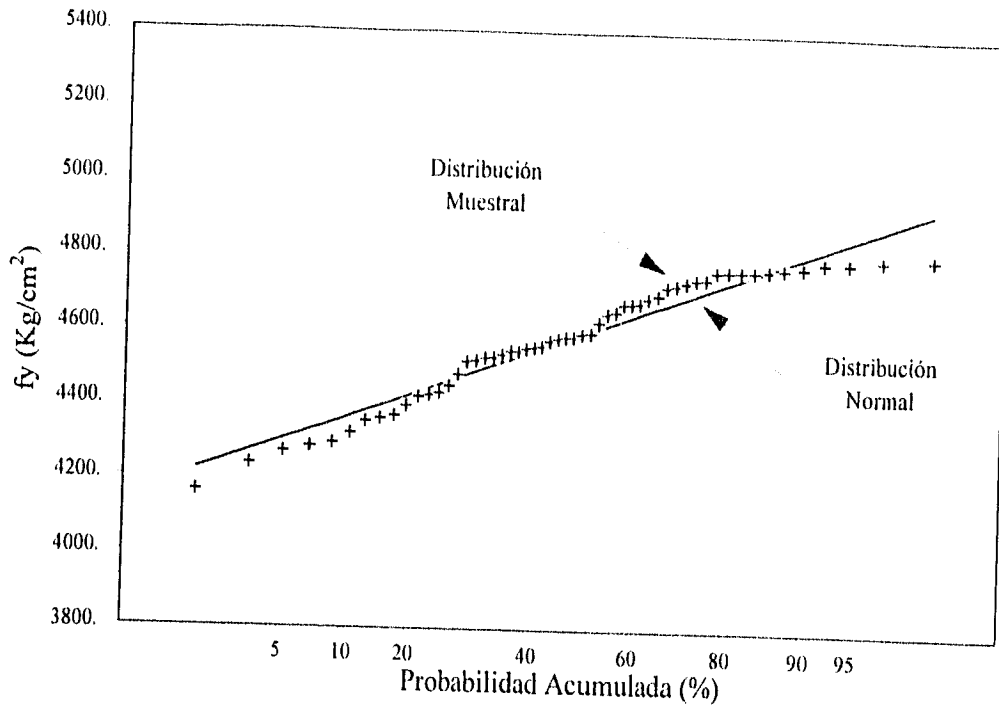


Figura 5.5. Ajuste de distribución de probabilidad normal a la muestra de diámetros grandes. Esfuerzo de fluencia.

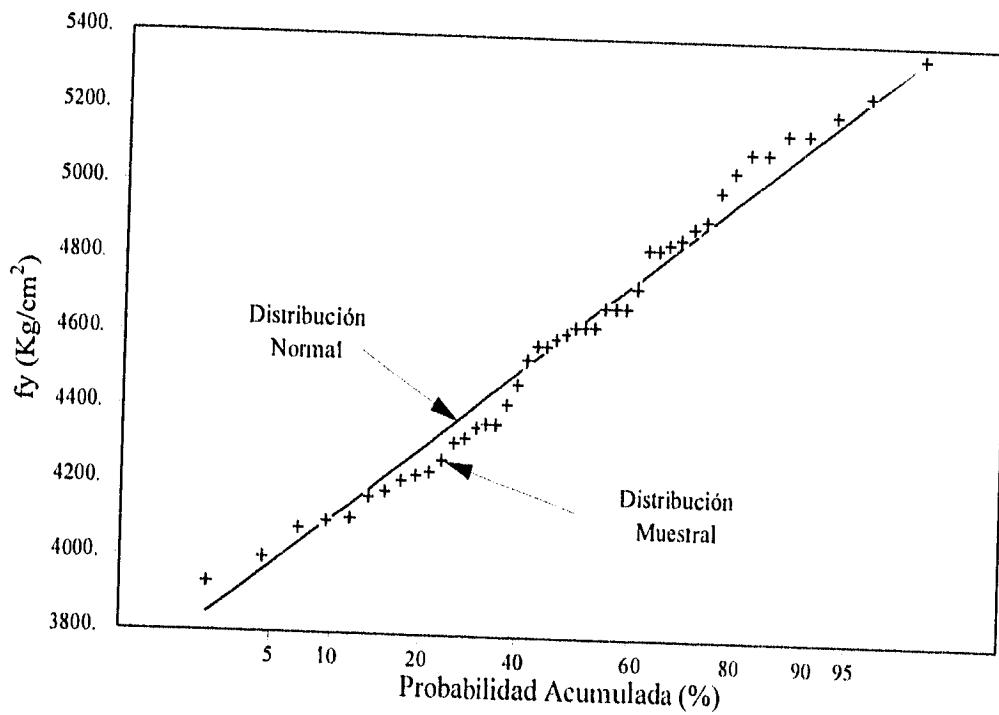


Figura 5.6. Ajuste de distribución de probabilidad normal a la muestra de diámetros pequeños. Esfuerzo de fluencia.

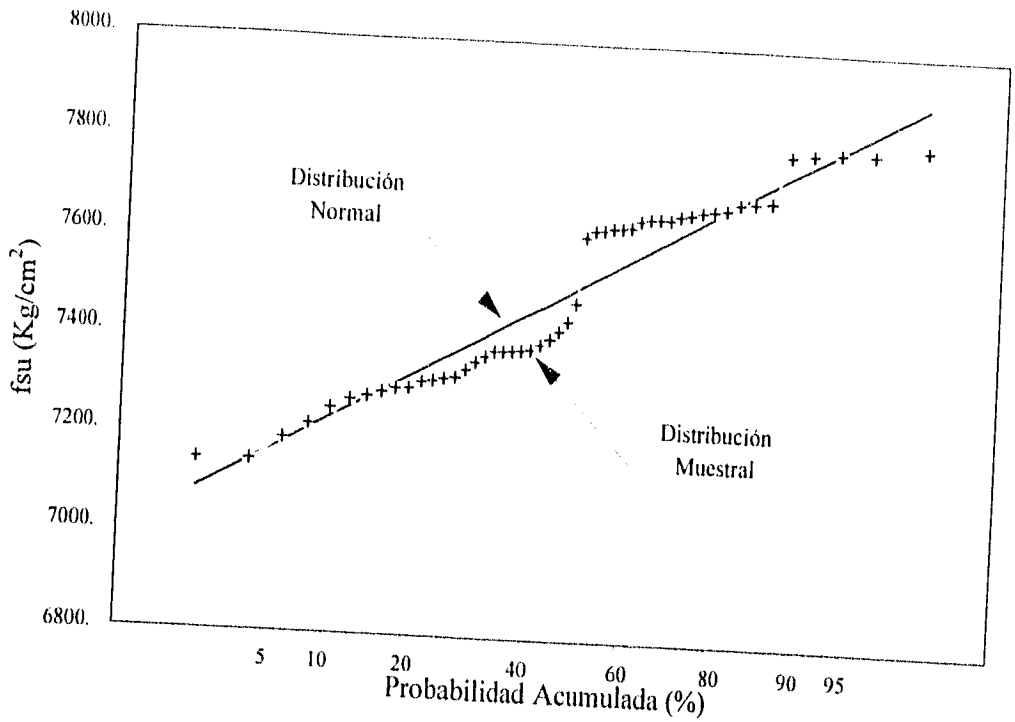


Figura 5.7. Ajuste de distribución de probabilidad normal a la muestra de diámetros grandes. Esfuerzo máximo.

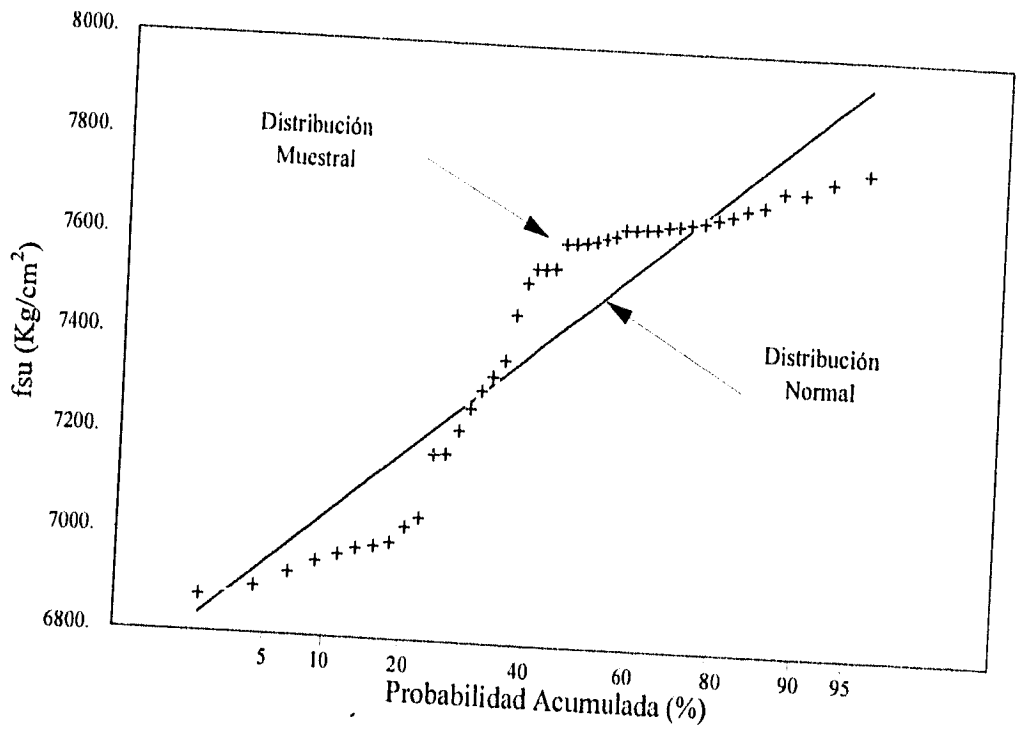


Figura 5.8. Ajuste de distribución de probabilidad normal a la muestra de diámetros pequeños. Esfuerzo máximo.

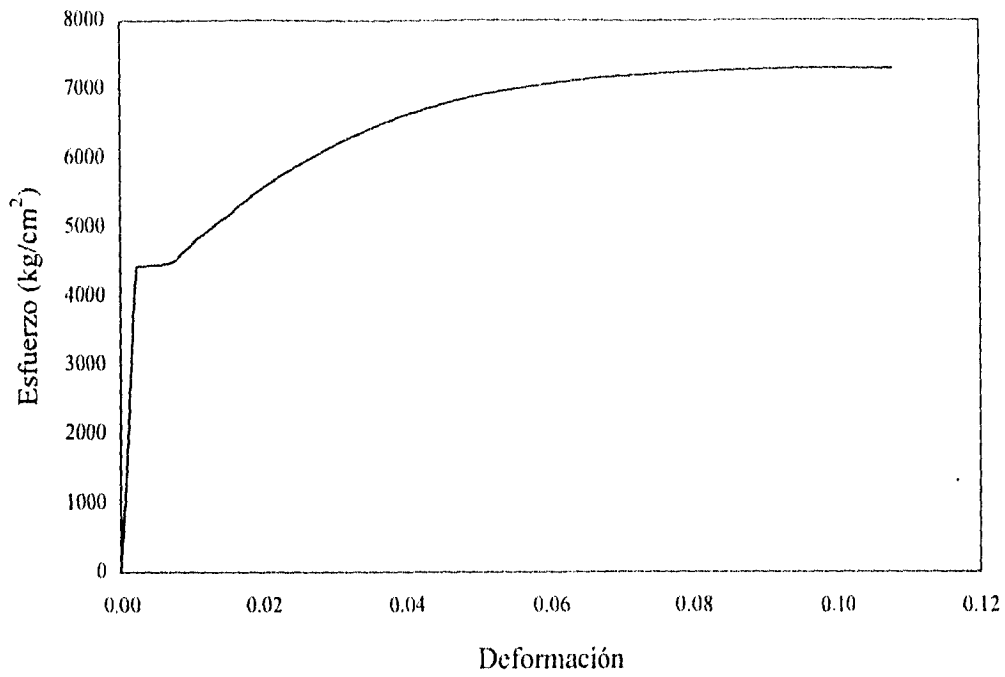


Figura 5.9. Curva esfuerzo-deformación representativa de la población de diámetros grandes.

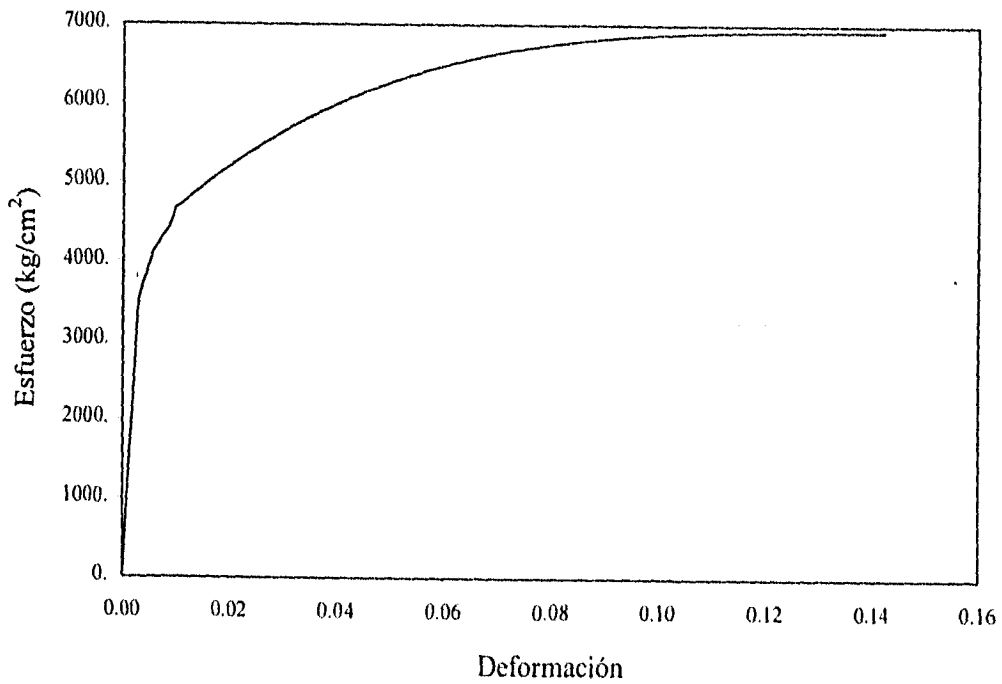


Figura 5.10. Curva esfuerzo-deformación representativa de la población de diámetros pequeños.

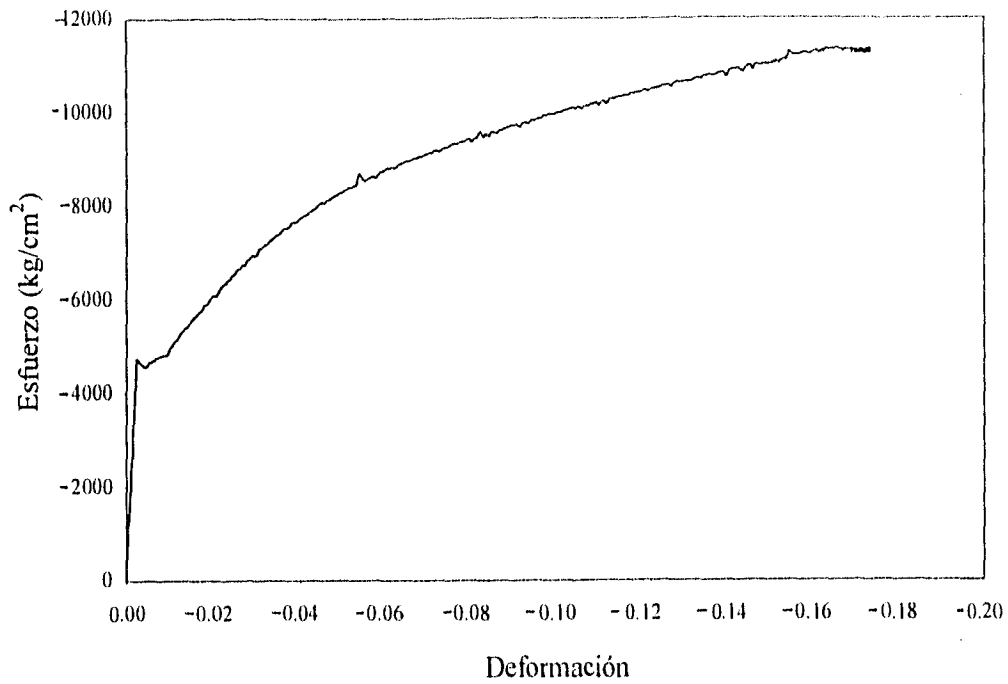


Figura 5.11. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 2.5 sometida a carga monotónica de compresión. Lado cóncavo.

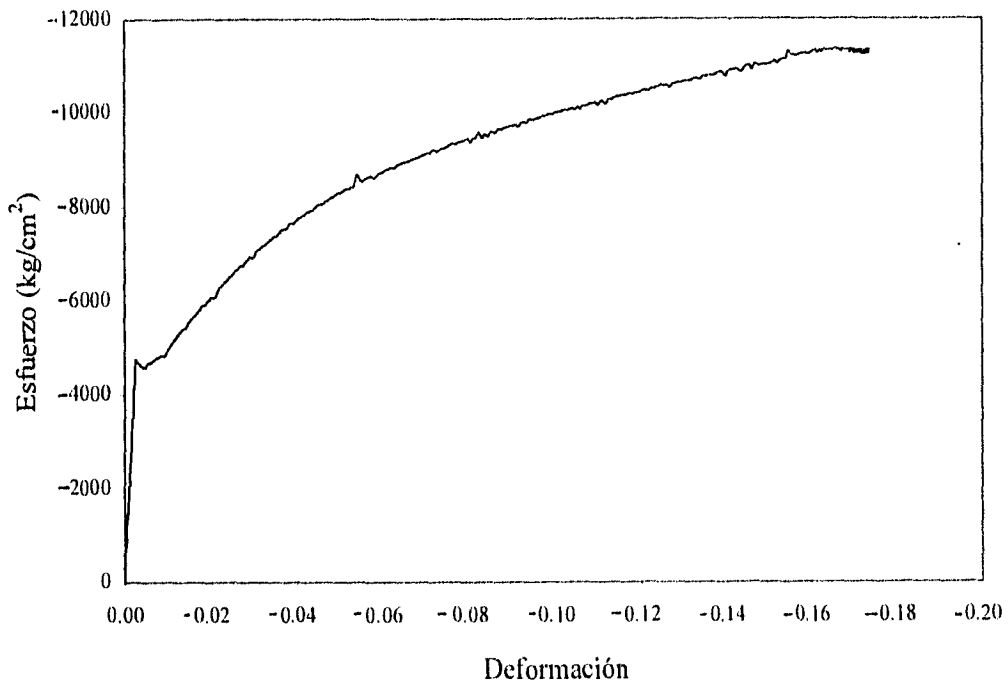


Figura 5.12. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 2.5 sometida a carga monotónica de compresión. Lado convexo.

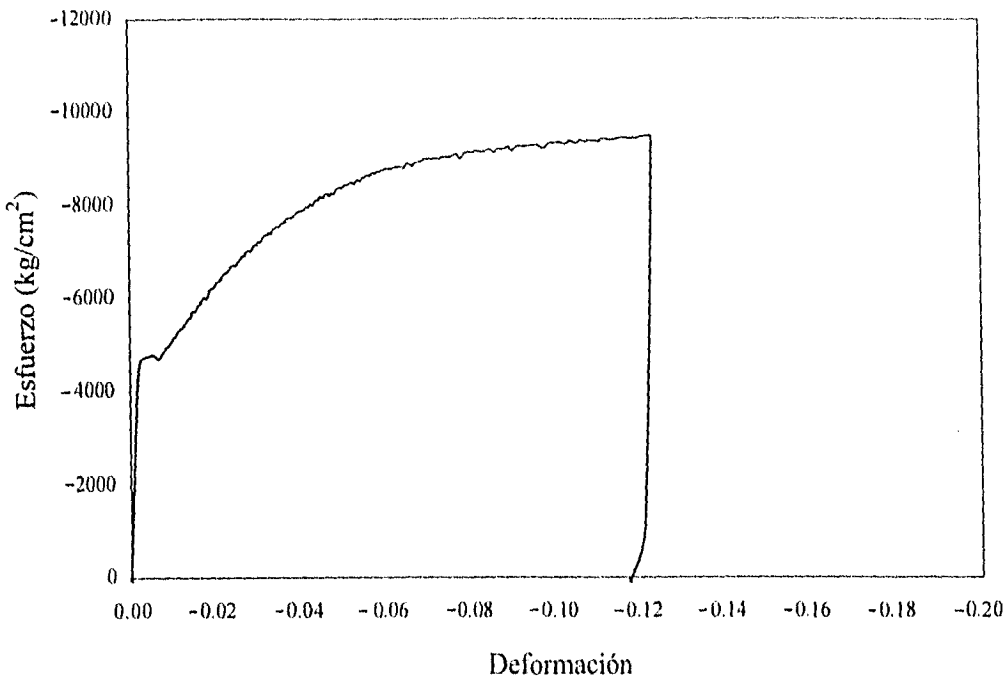


Figura 5.13. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga monótonica de compresión. Lado cóncavo.

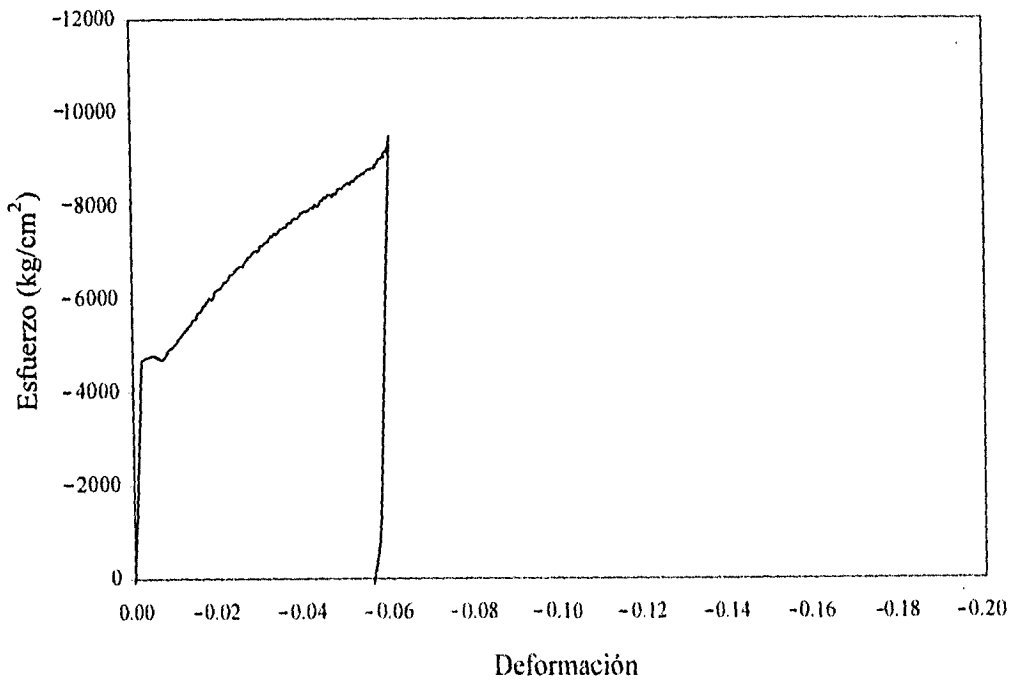


Figura 5.14. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga monótonica de compresión. Lado convexo.

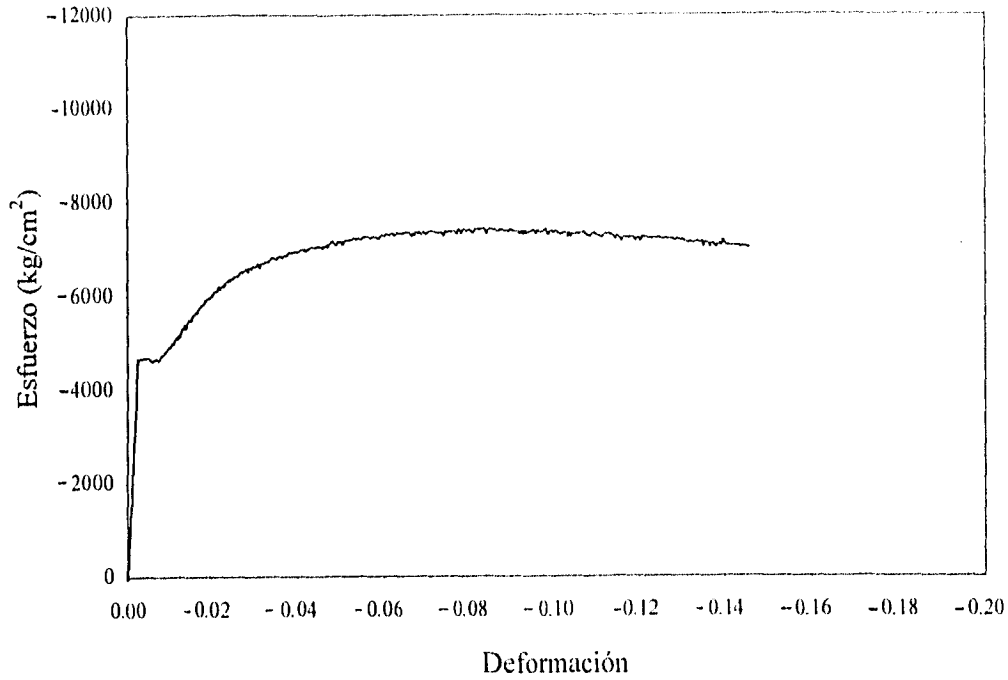


Figura 5.15. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 6.0 sometida a carga monotónica de compresión. Lado cóncavo.

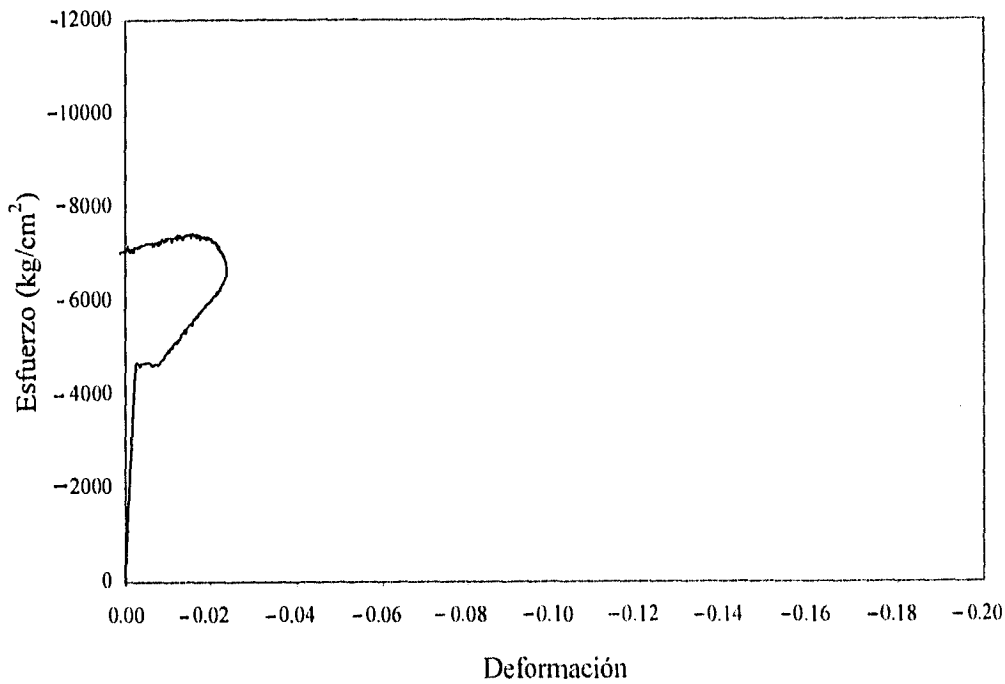


Figura 5.16. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 6.0 sometida a carga monotónica de compresión. Lado convexo.

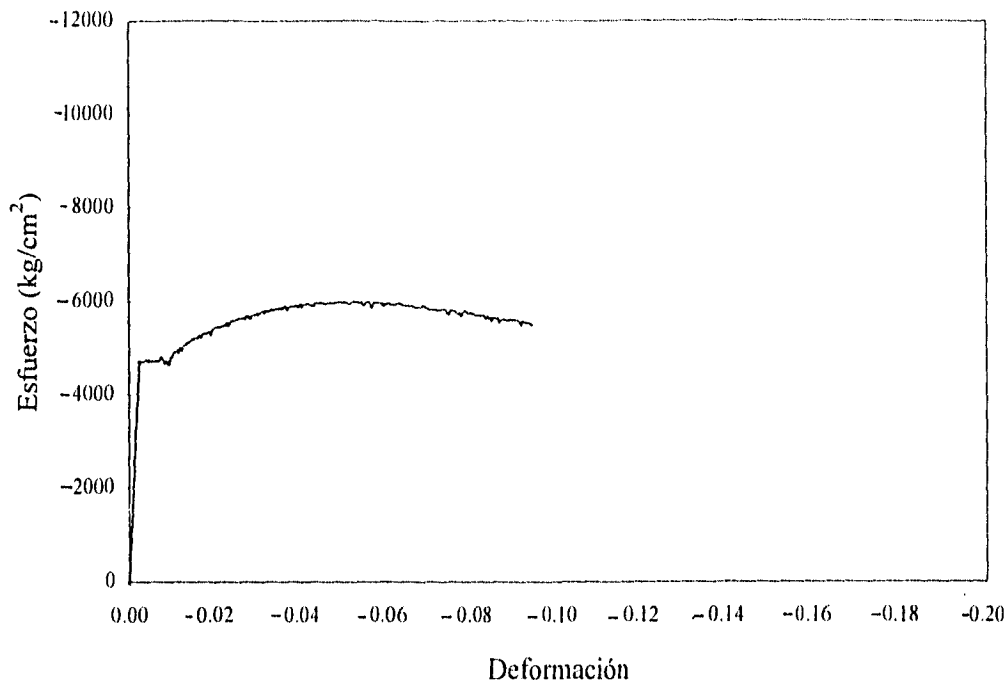


Figura 5.17. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 8.0 sometida a carga monotónica de compresión. Lado cóncavo.

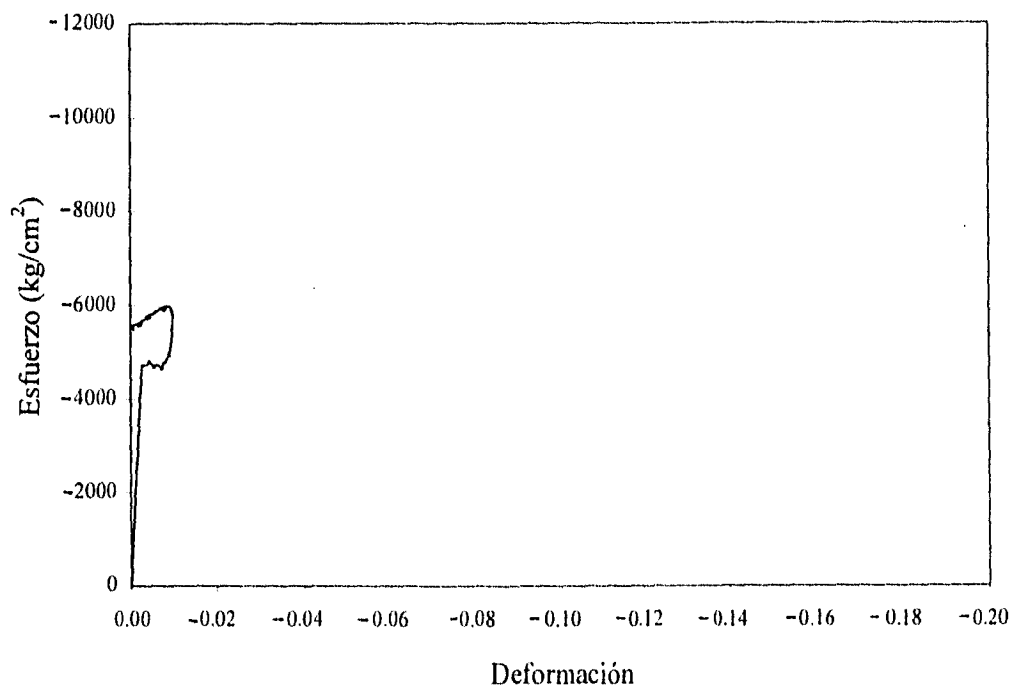


Figura 5.18. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 8.0 sometida a carga monotónica de compresión. Lado convexo.

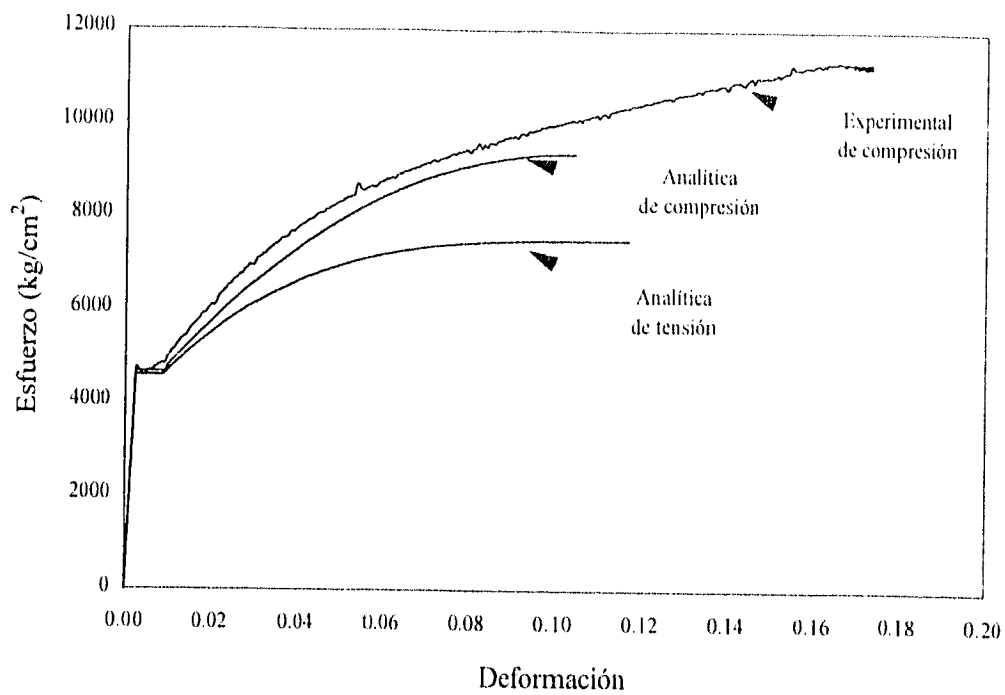


Figura 5.19. Curva esfuerzo-deformación experimental y analítica de barras de acero sometidas a carga monótonica de compresión. Comparación de curvas analíticas de tensión y compresión.

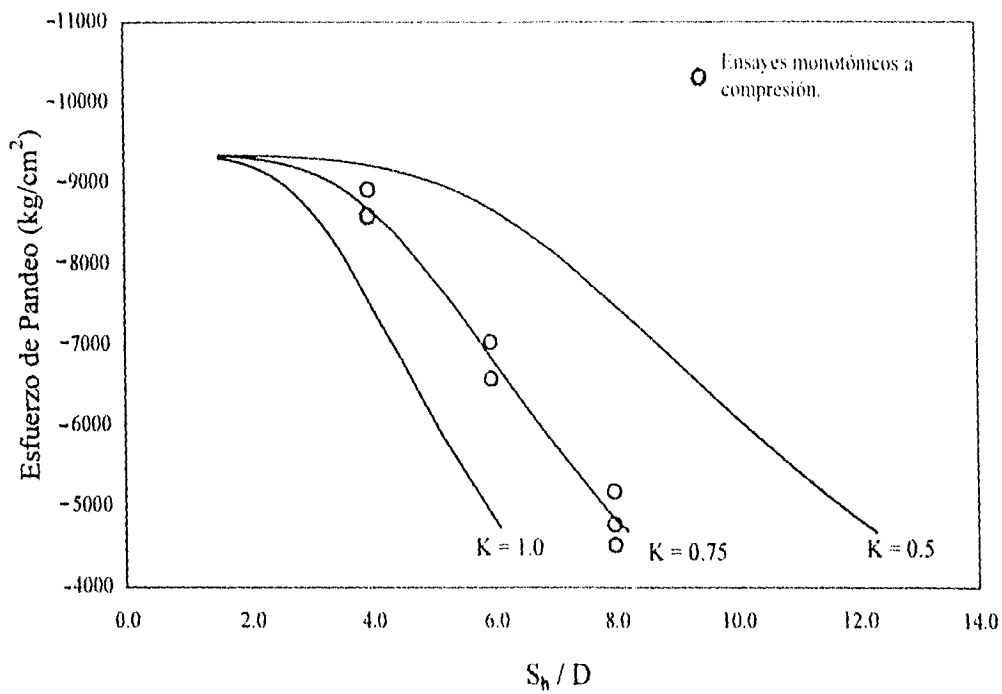


Figura 5.20. Curvas que relacionan el esfuerzo de pandeo y la relación de esbeltez.
Comparación con resultados monotónicos experimentales.

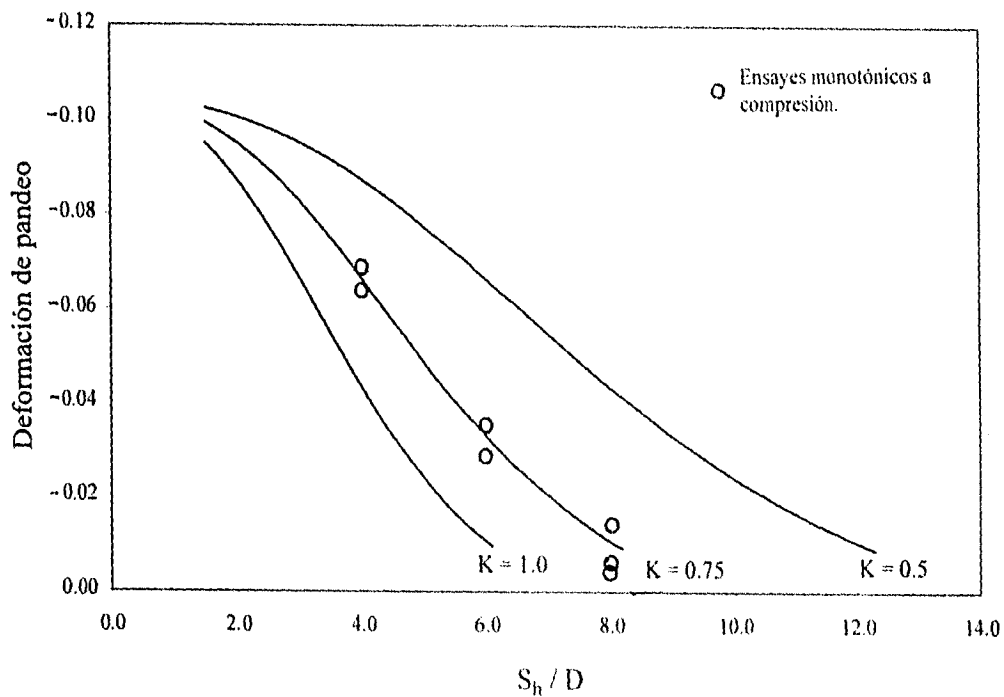


Figura 5.21. Curvas que relacionan la deformación de pandeo y la relación de esbeltez.
Comparación con resultados monotónicos experimentales.

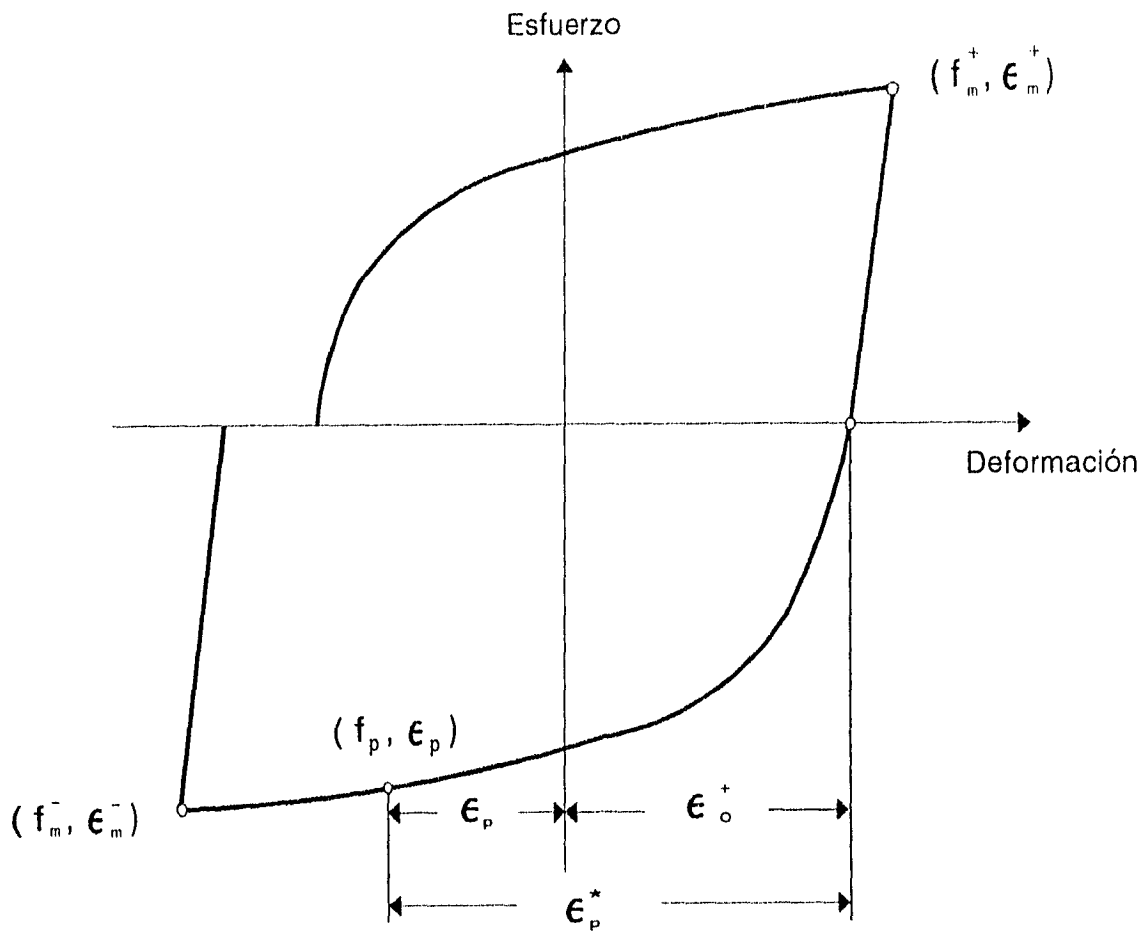


Figura 5.22. Curva esfuerzo-deformación esquemática que ilustra los parámetros que definen el pandeo de una barra de acero sometida a carga cíclica reversible.

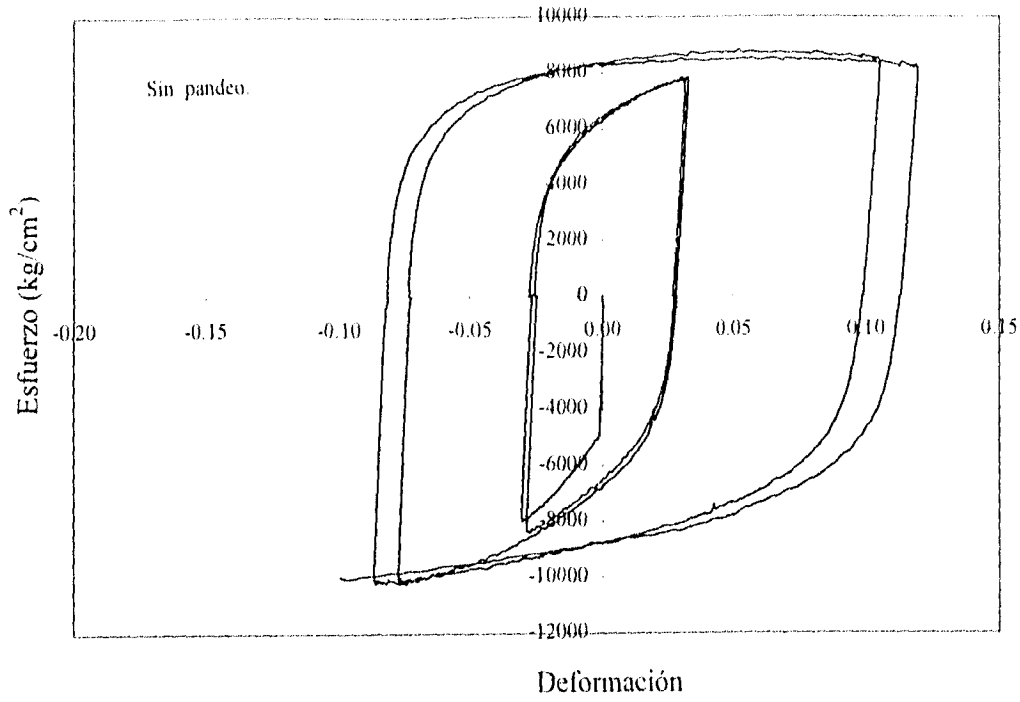


Figura 5.23. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 2.5 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado cóncavo.

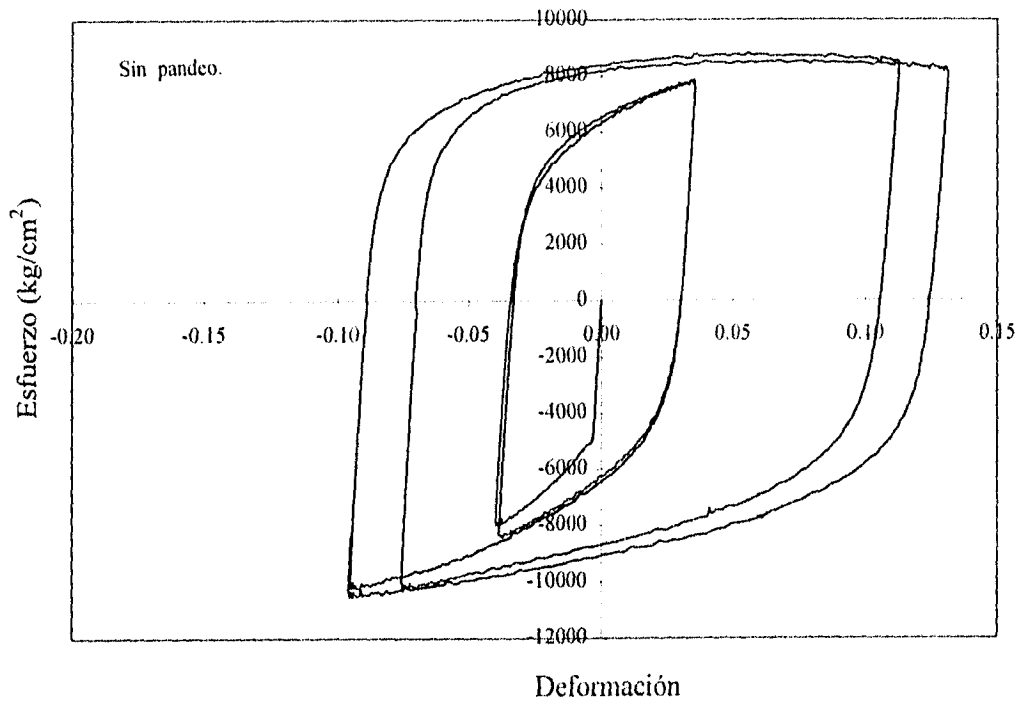


Figura 5.24. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 2.5 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado convexo.

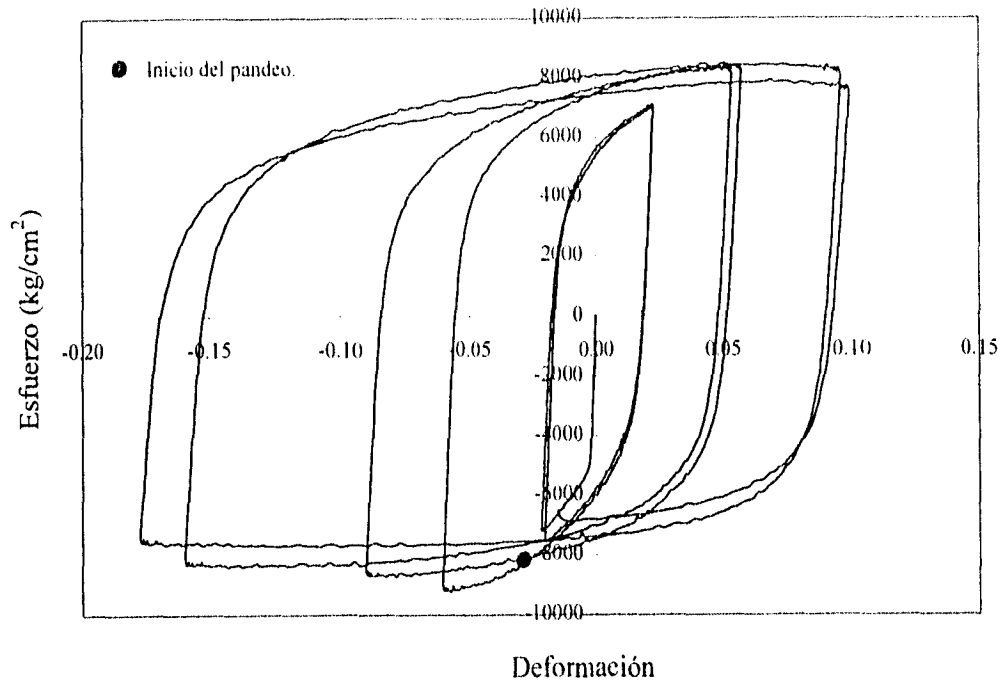


Figura 5.25. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado cóncavo.

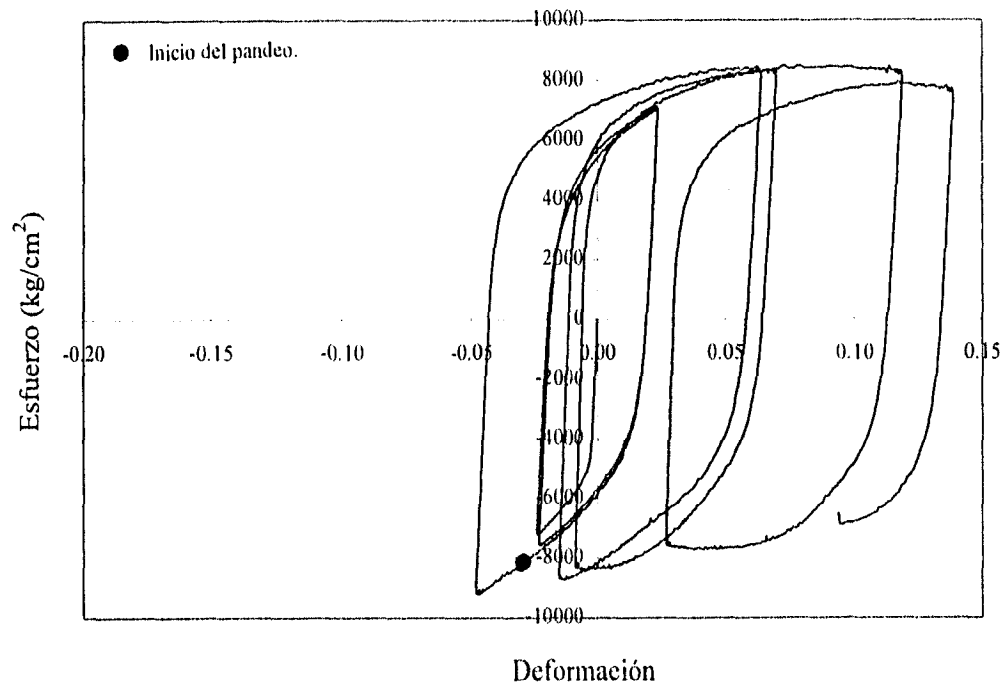


Figura 5.26. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado convexo.

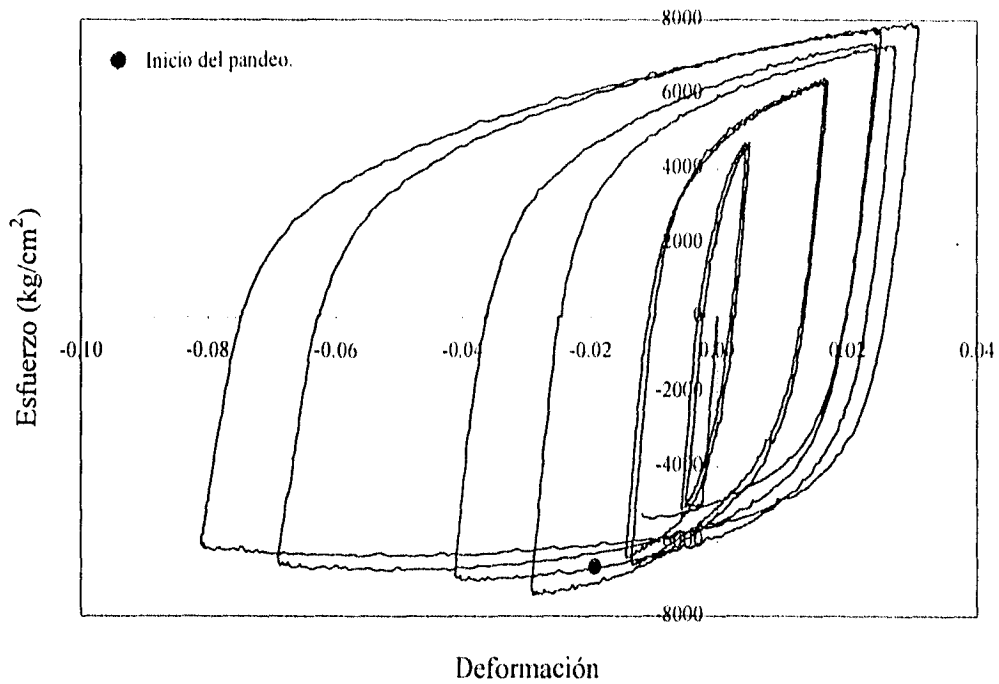


Figura 5.27. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 6.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado cóncavo.

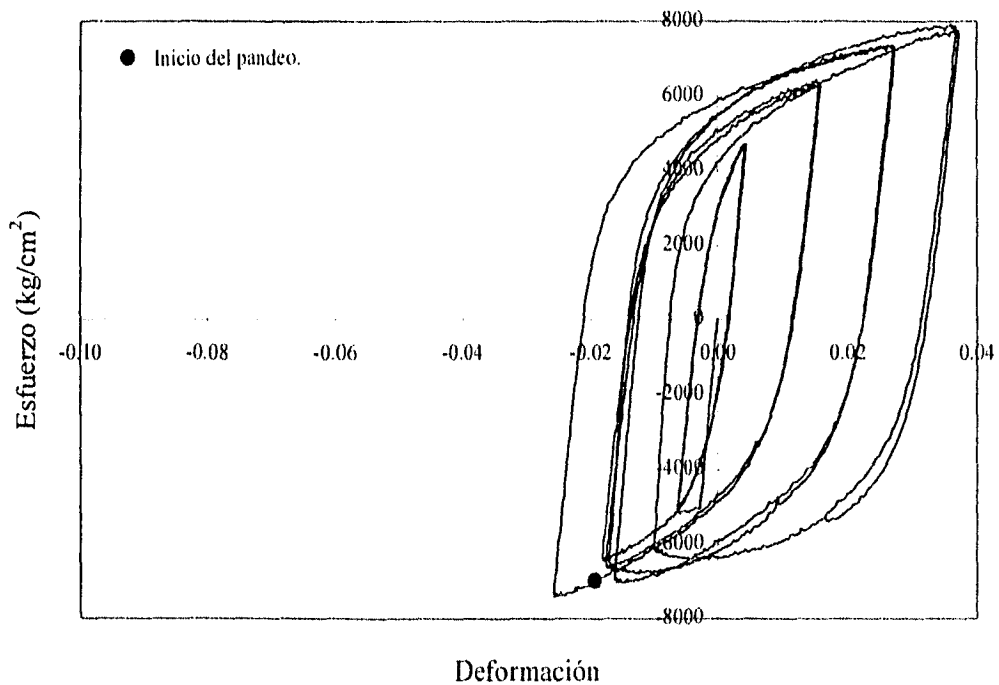


Figura 5.28. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 6.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado convexo.

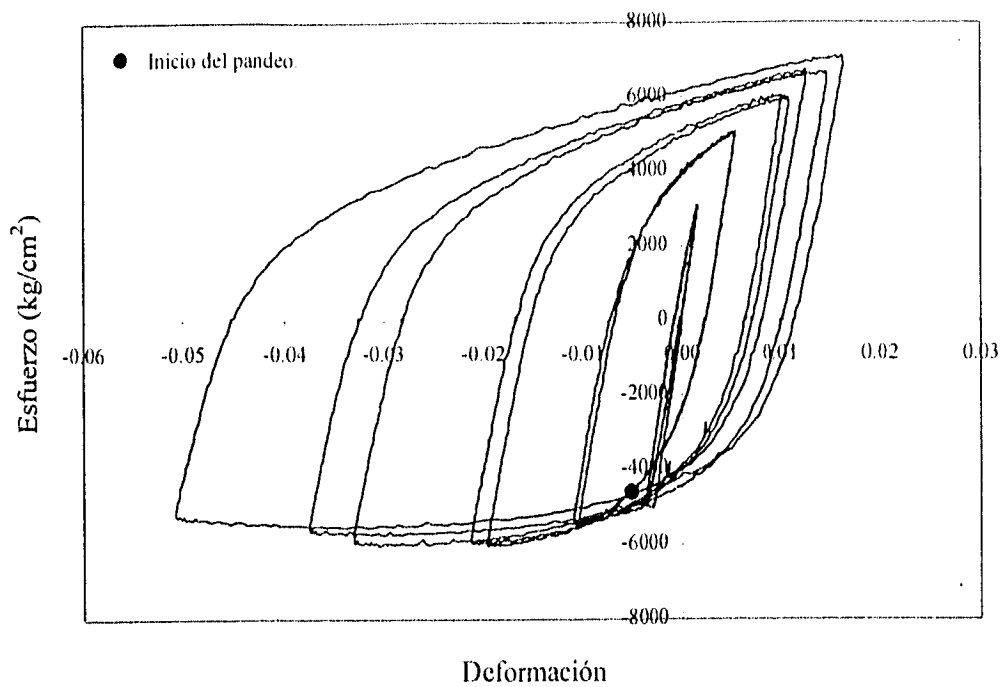


Figura 5.29. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 8.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado cóncavo.

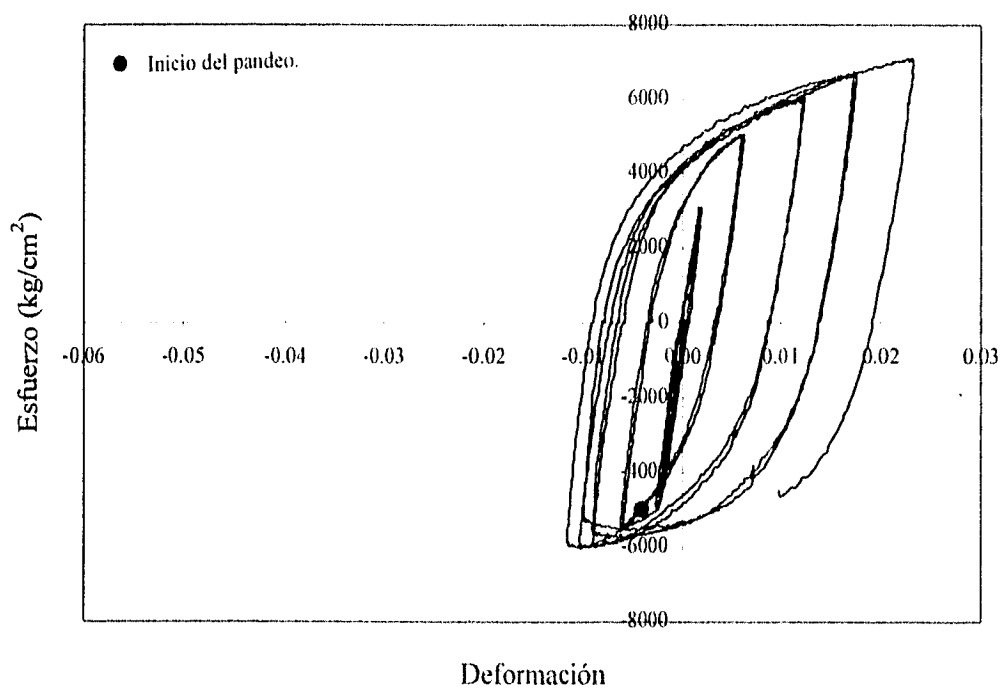


Figura 5.30. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 8.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos simétricos. Lado convexo.

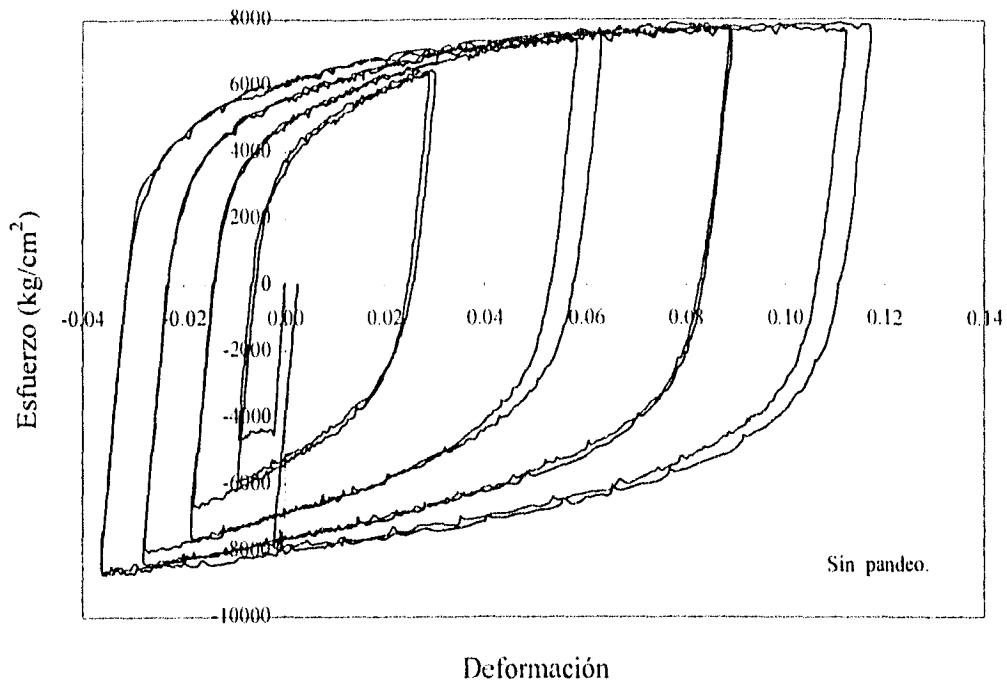


Figura 5.31. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 2.5 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado cóncavo.

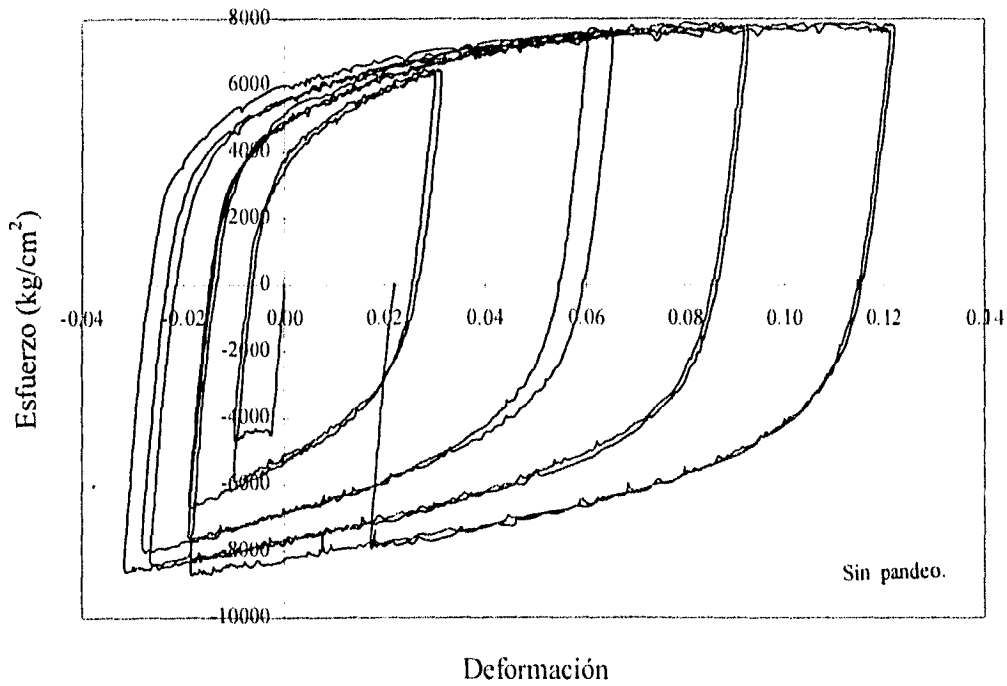


Figura 5.32. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 2.5 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado convexo.

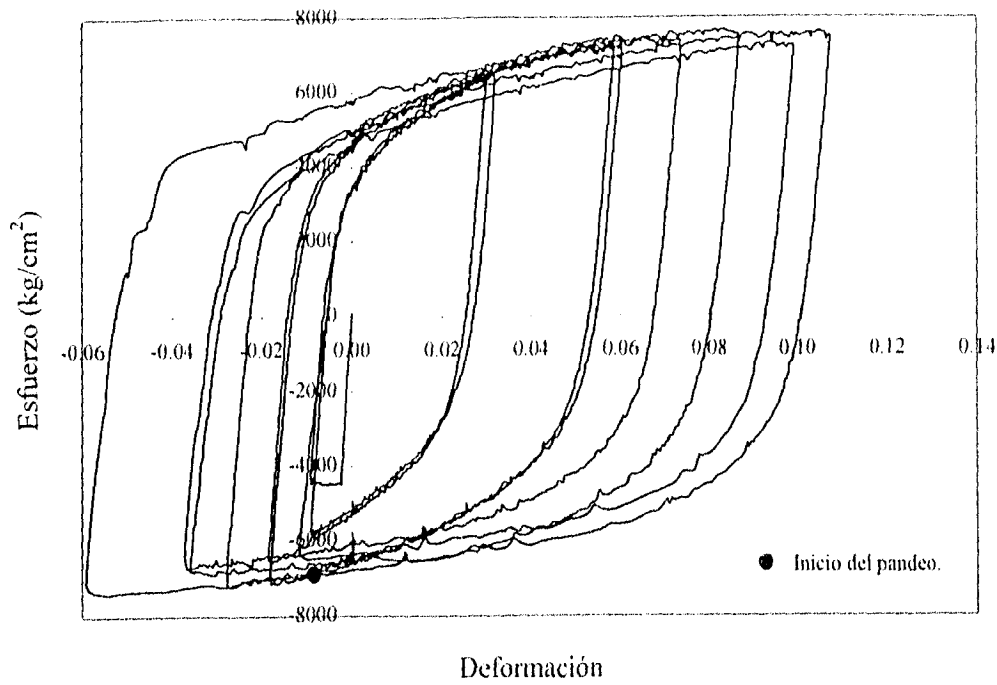


Figura 5.33. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado cóncavo.

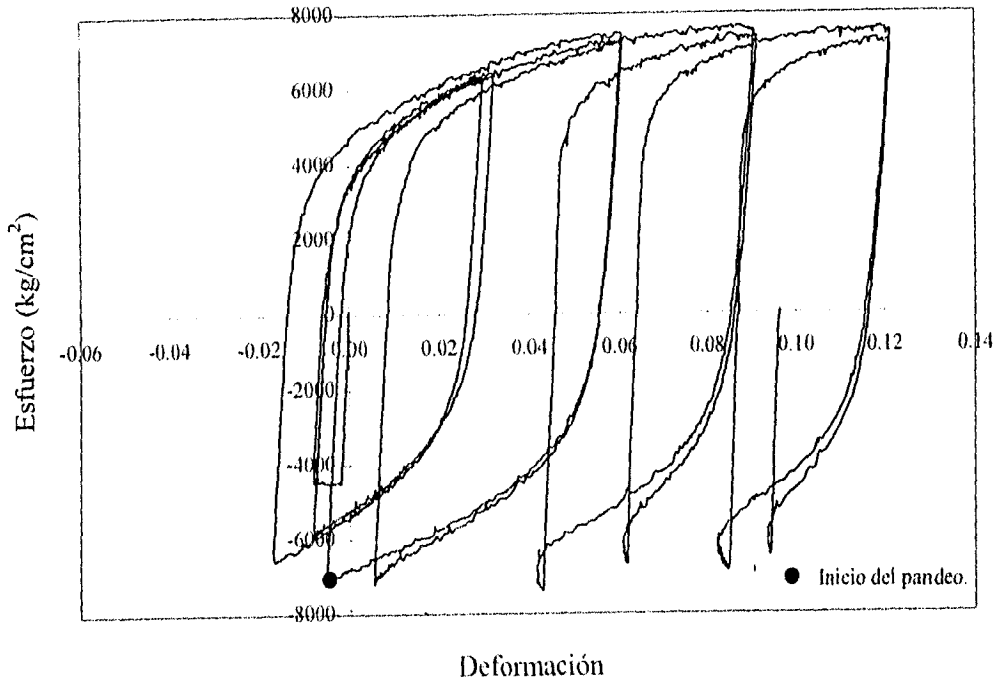


Figura 5.34. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado convexo.

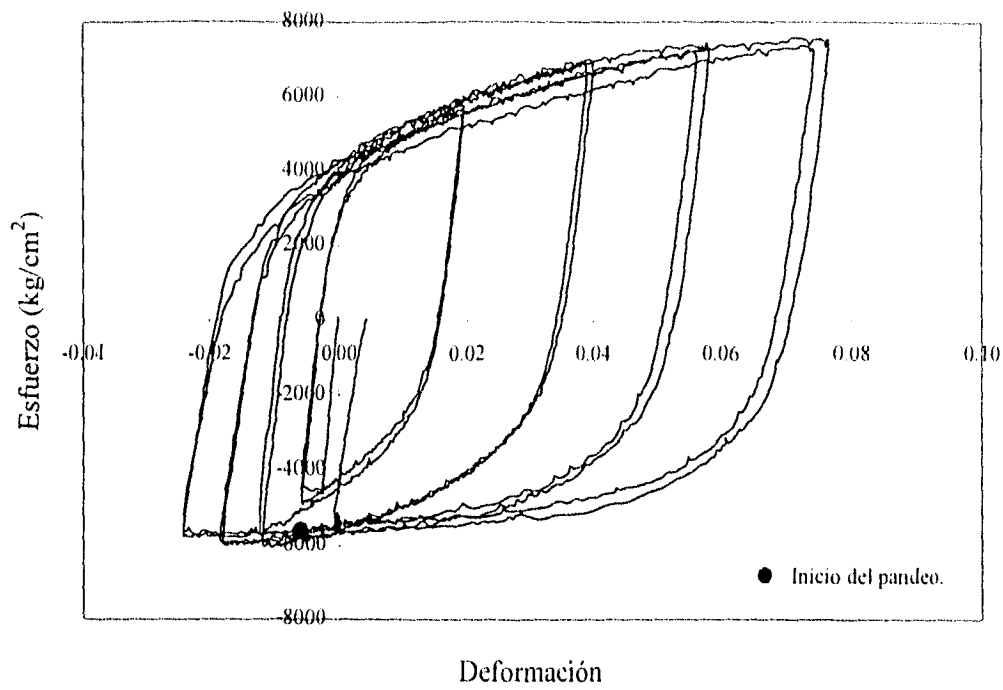


Figura 5.35. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 6.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado cóncavo.

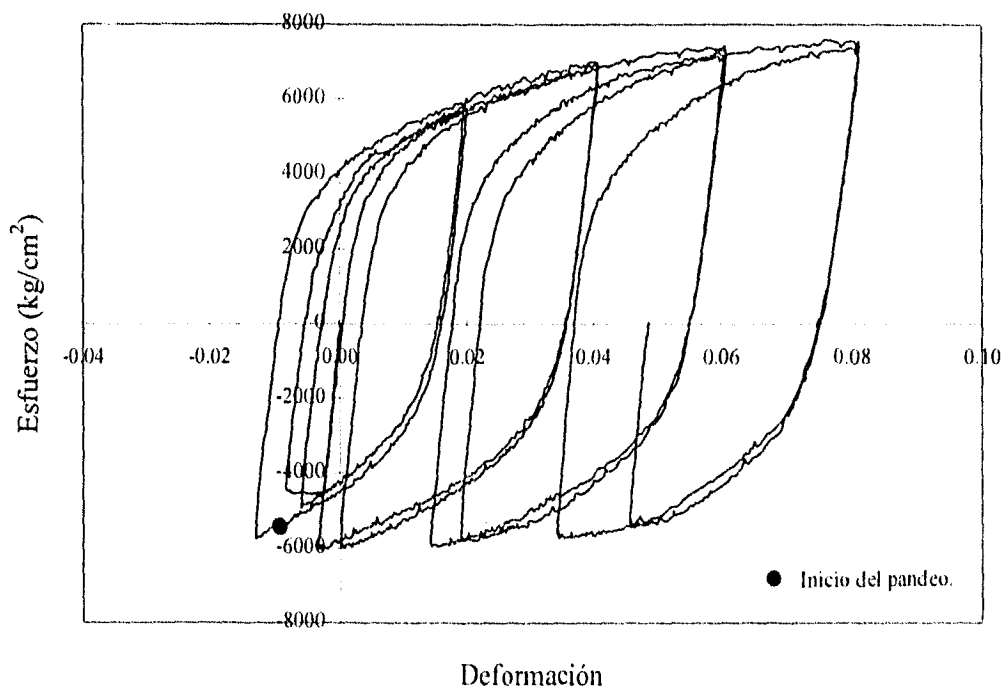


Figura 5.36. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 6.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado convexo.

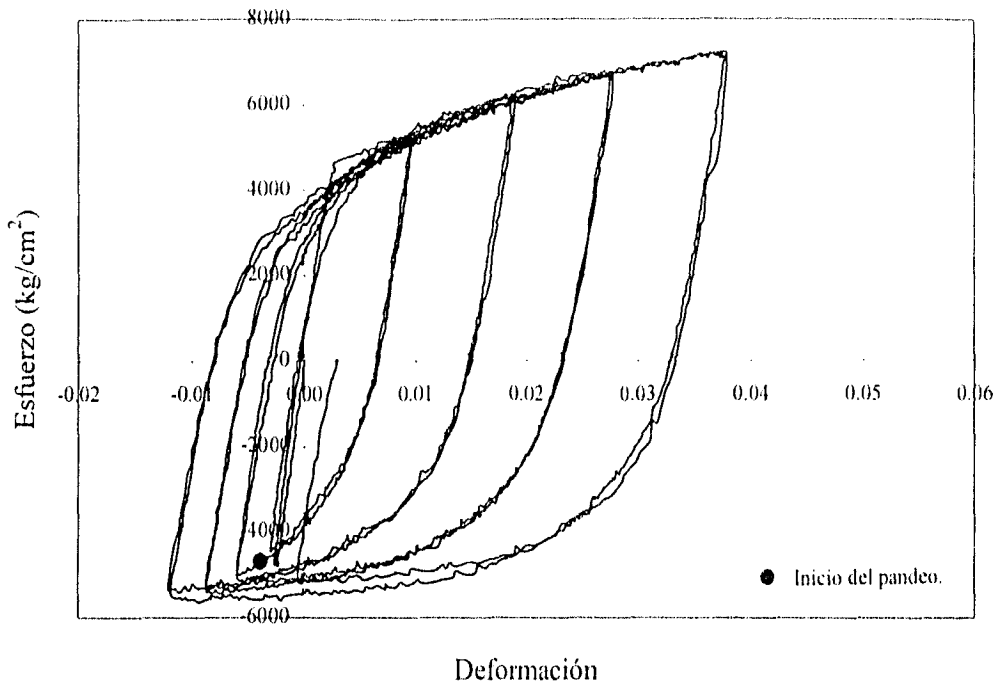


Figura 5.37. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 8.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado cóncavo.

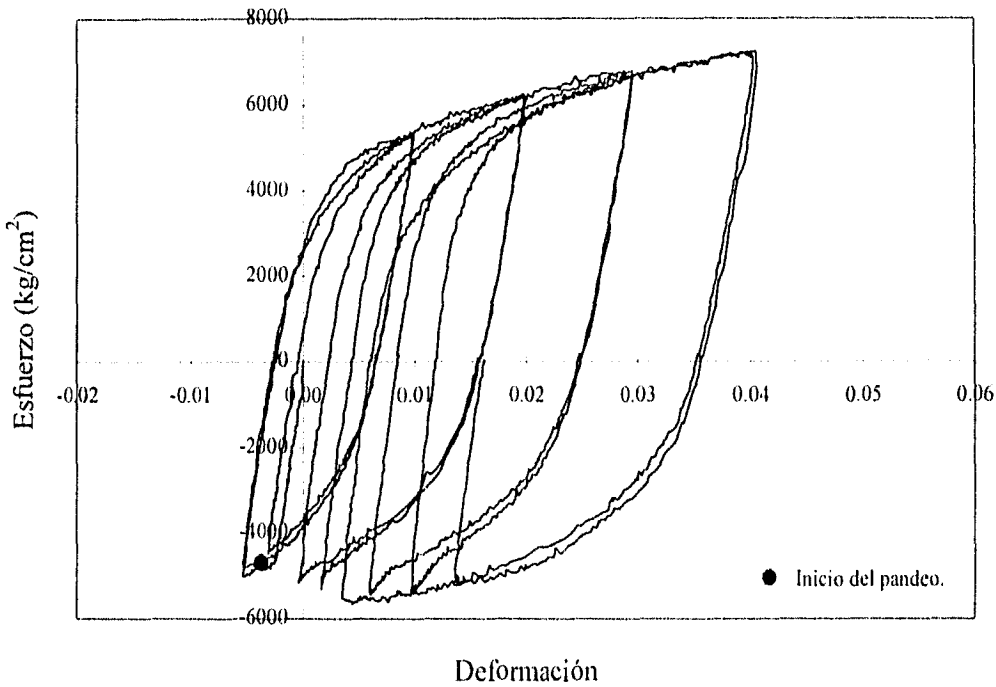


Figura 5.38. Curva esfuerzo-deformación de una probeta con relación de esbeltez igual a 8.0 sometida a carga cíclica reversible, con ciclos asimétricos. Lado convexo.

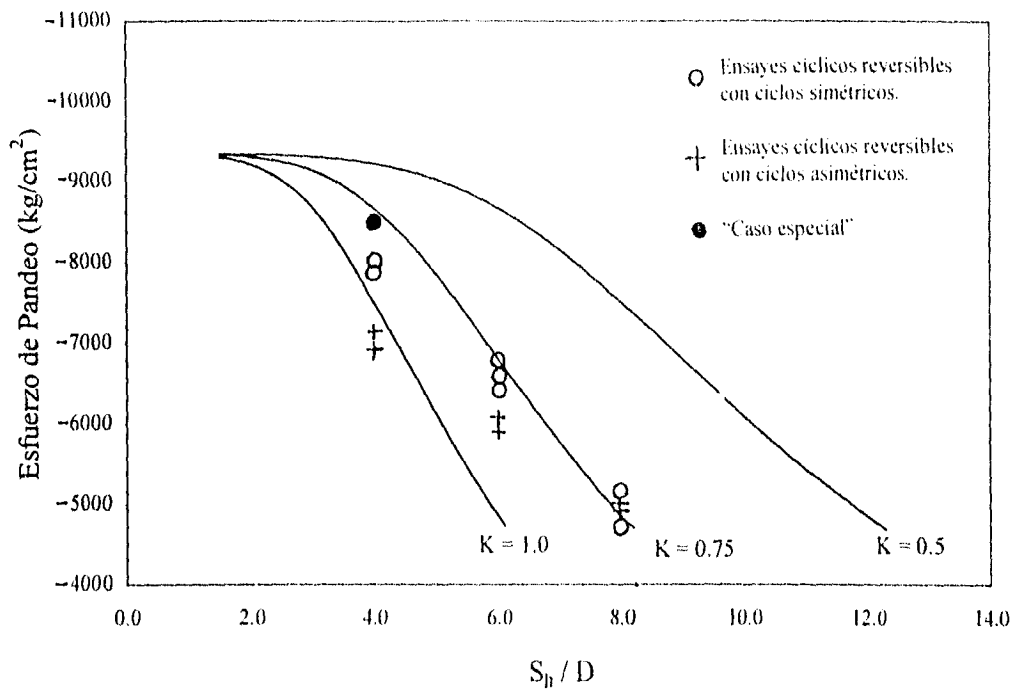


Figura 5.39. Curvas que relacionan el esfuerzo de pandeo y la relación de esbeltez.

Comparación con resultados cíclicos reversibles experimentales, de barras sometidas a ciclos simétricos y asimétricos. Incluye el "Caso especial".

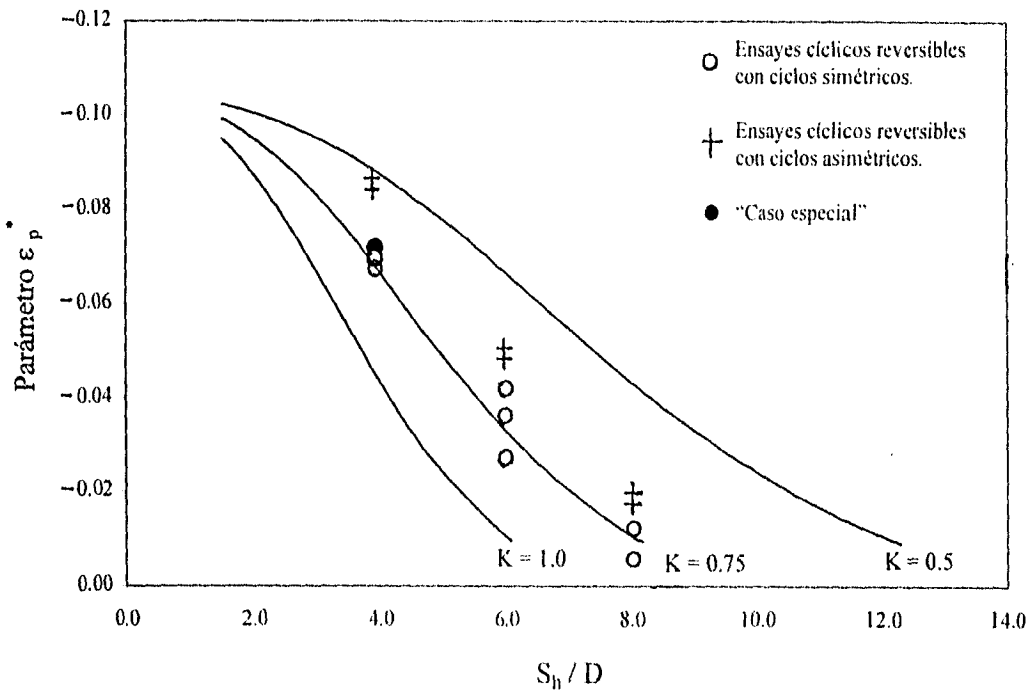


Figura 5.40. Curvas que relacionan el parámetro ϵ_p^* y la relación de esbeltez.

Comparación con resultados cíclicos reversibles experimentales, de barras sometidas a ciclos simétricos y asimétricos. Incluye el "Caso especial".

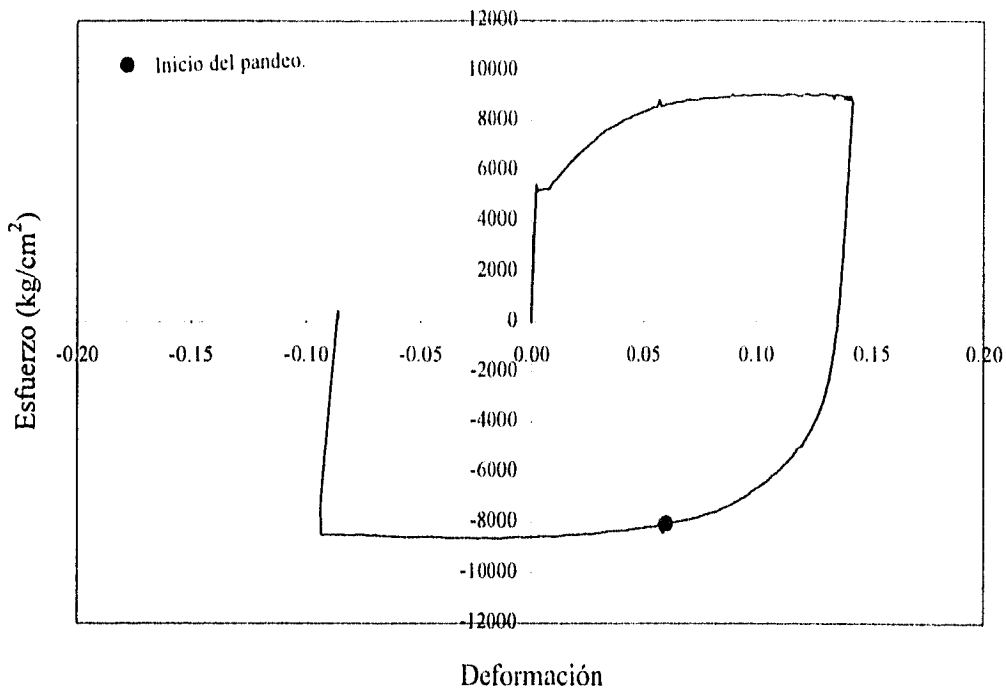


Figura 5.41. Curva esfuerzo-deformación de la probeta "Caso especial" con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga de tensión y compresión. Lado cóncavo.

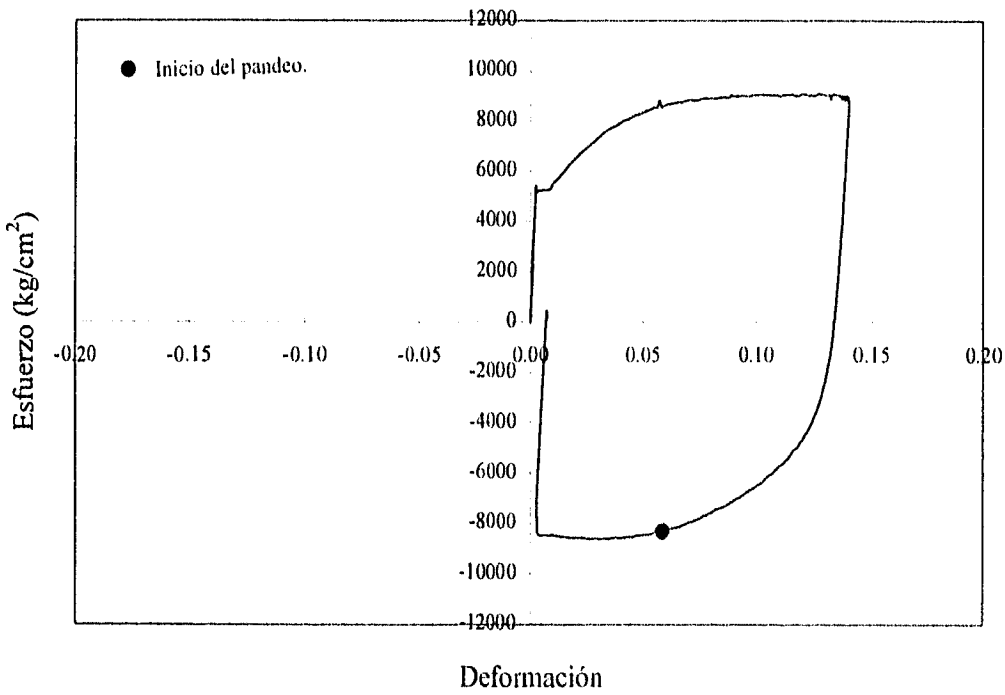


Figura 5.42. Curva esfuerzo-deformación de la probeta "Caso especial" con relación de esbeltez igual a 4.0 sometida a carga de tensión y compresión. Lado convexo.

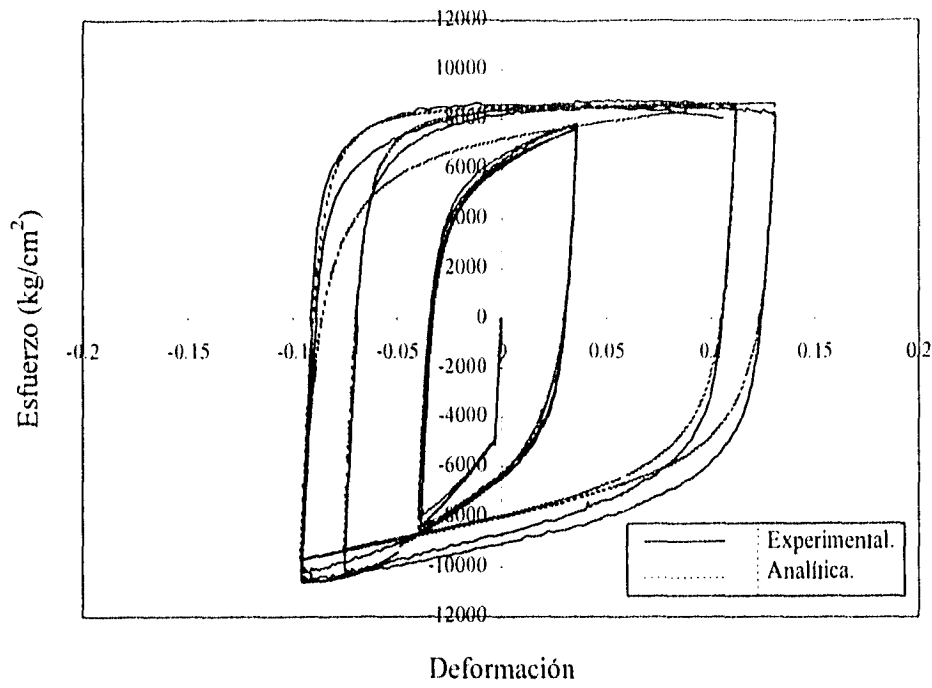


Figura 5.43. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos simétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 2.5.

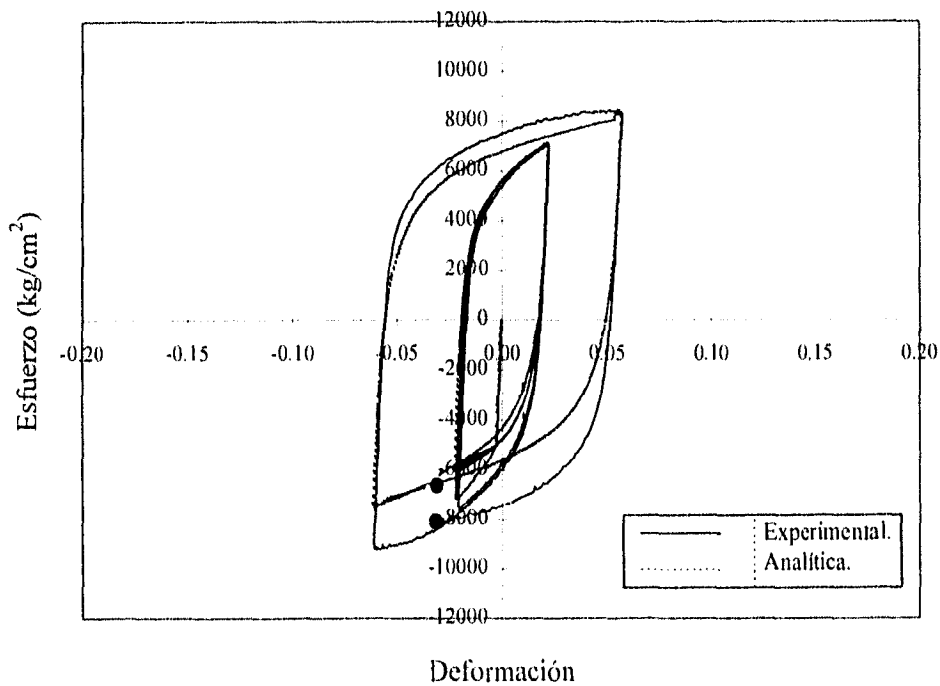


Figura 5.44. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos simétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 4.0.

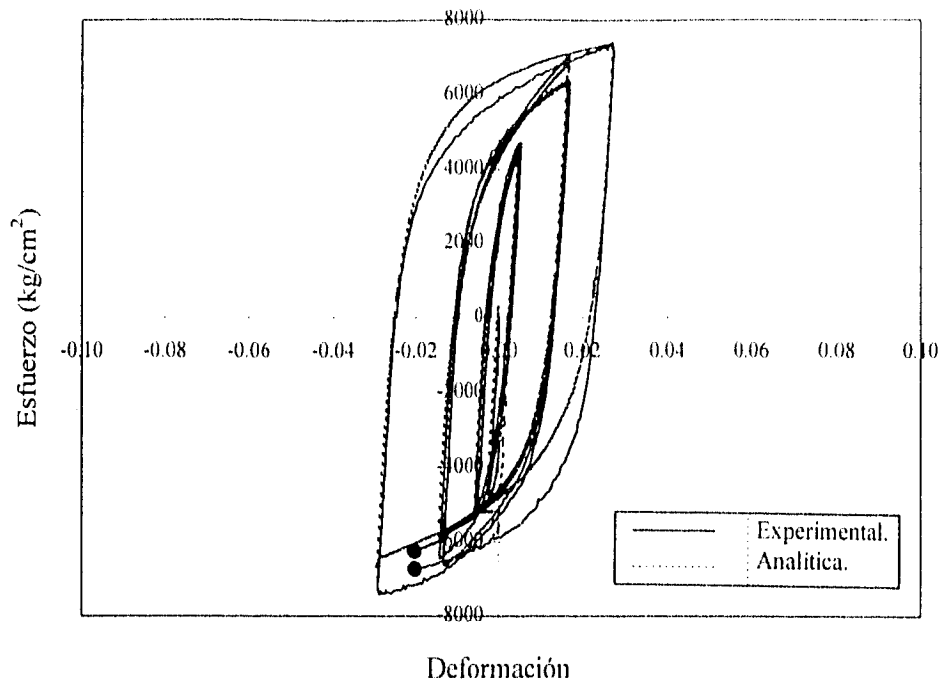


Figura 5.45. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos simétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 6.0.

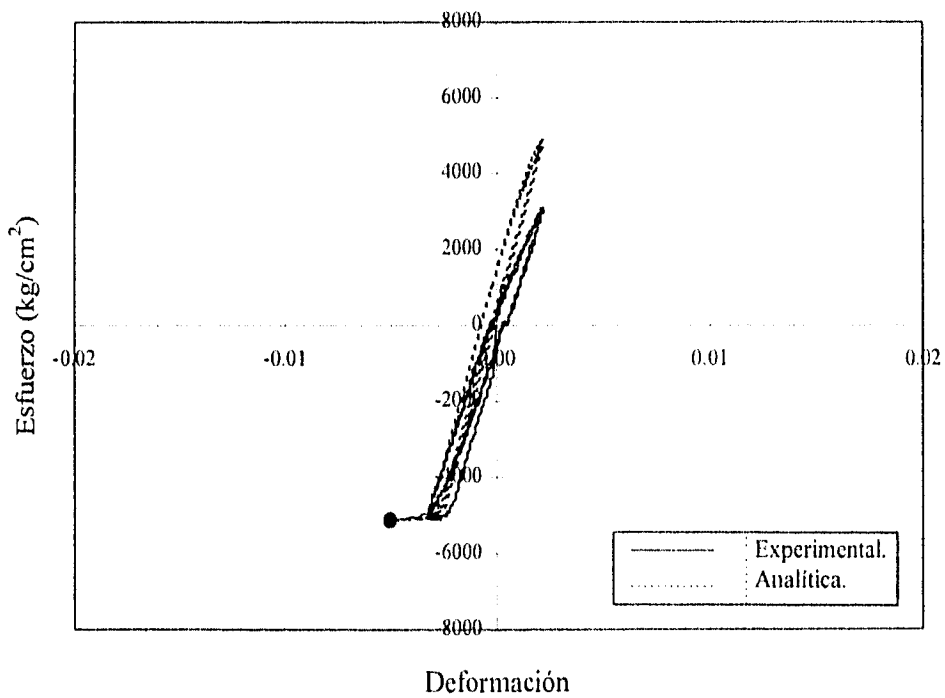


Figura 5.46. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos simétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 8.0.

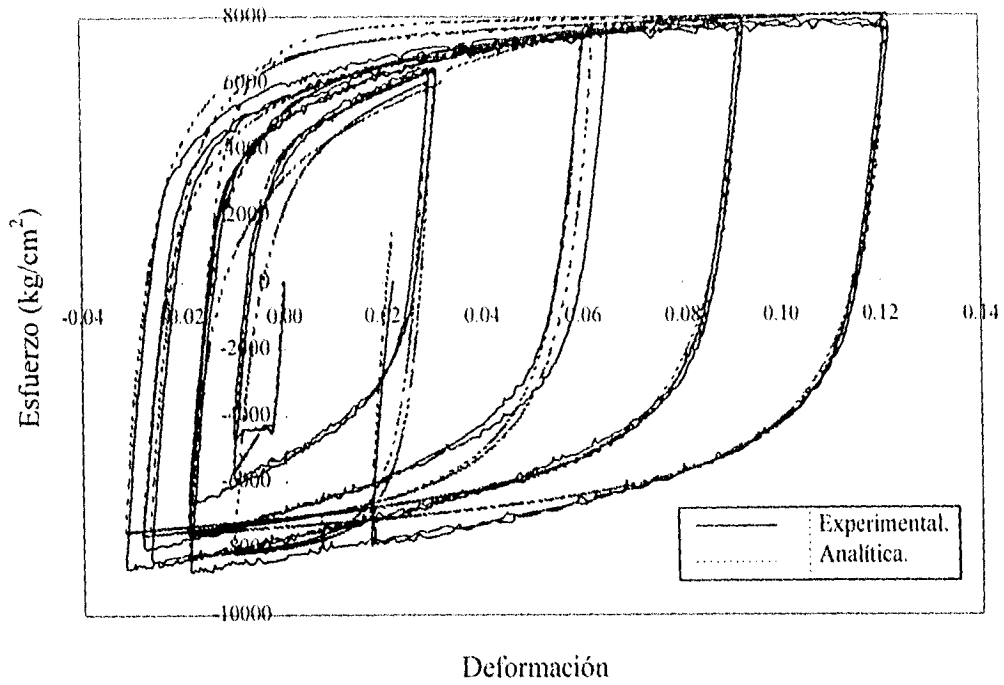


Figura 5.47. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos asimétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 2.5.

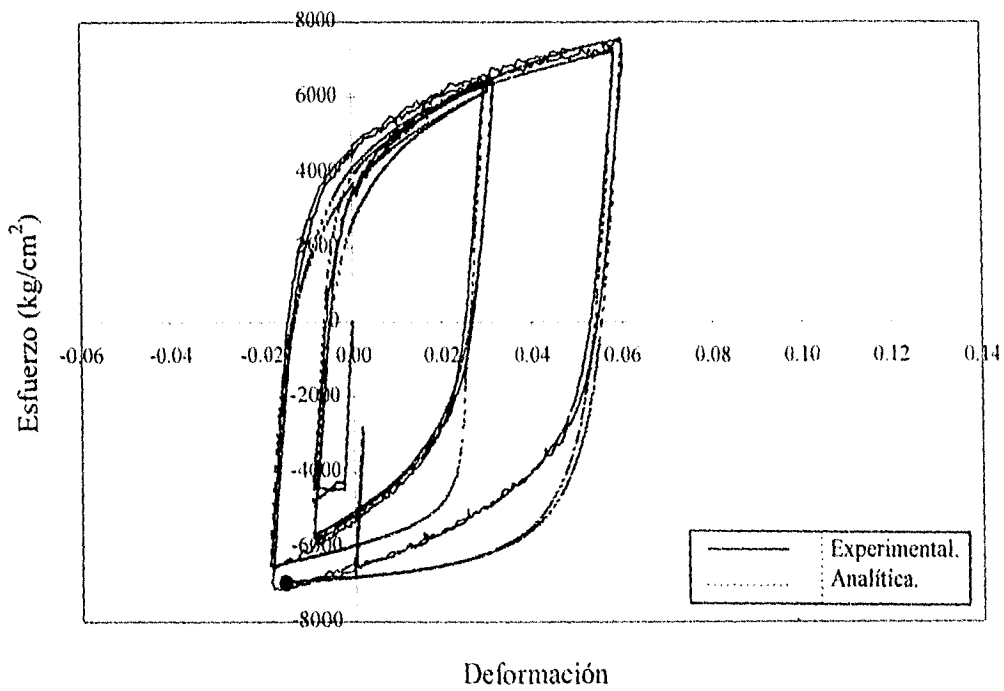


Figura 5.48. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos asimétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 4.0.

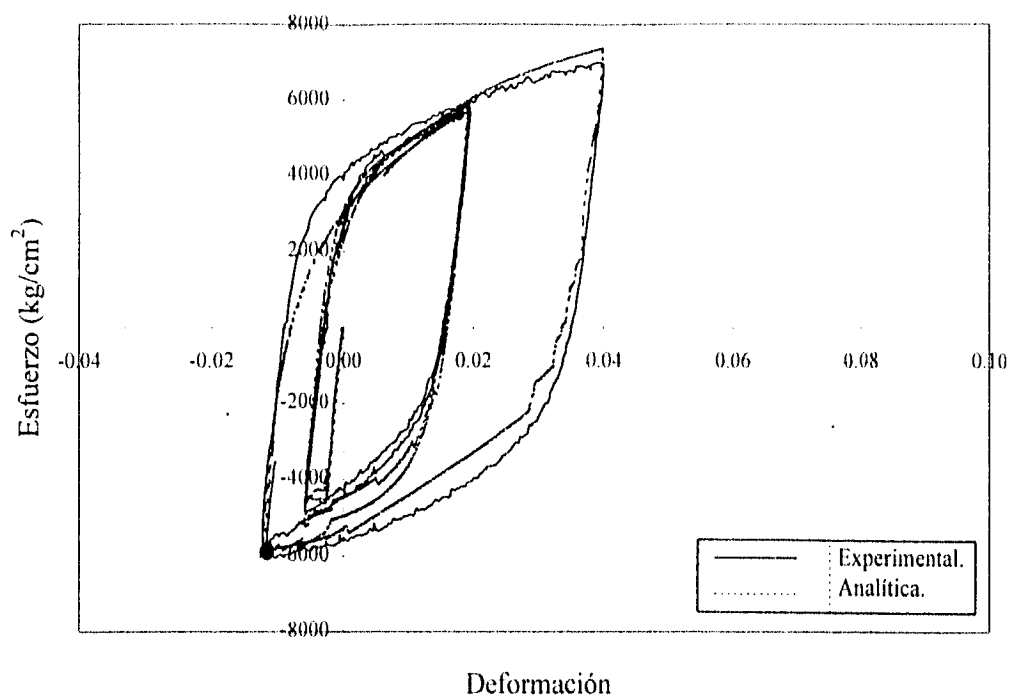


Figura 5.49. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos asimétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 6.0.

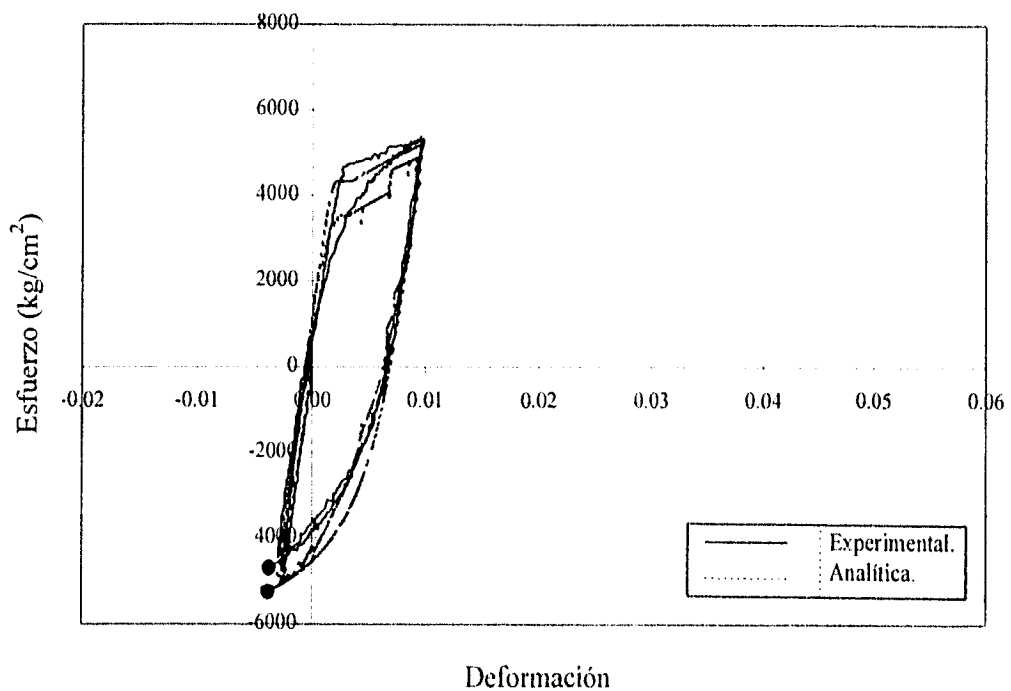


Figura 5.50. Curvas esfuerzo-deformación analíticas y experimentales con ciclos asimétricos antes de iniciar el pandeo. Relación de esbeltez de 8.0.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se efectuaron estudios analíticos y experimentales con el objeto de definir el comportamiento de barras de acero de refuerzo producidos en México, cuando se someten a diferentes estados de carga, como monotónico a tensión, monotónico a compresión y cíclico reversible. Se definieron analíticamente los parámetros necesarios para describir las curvas esfuerzo-deformación para los tres tipos de carga analizados y se obtuvieron experimentalmente dichos parámetros; además, se definieron y se evaluaron los diferentes modos de falla asociados a cada tipo de carga aplicada. Los valores encontrados en esta investigación son representativos para barras de acero producidas en México, sin embargo, los modelos presentados pueden ser utilizados para cualquier tipo de acero de refuerzo.

En las barras de acero sometidas a carga monotónica a tensión, se definió un estado límite asociado al esfuerzo y deformación máxima en tensión; para este caso se obtuvieron los parámetros básicos que definen la curva esfuerzo-deformación de aceros de refuerzo producidos actualmente en México. Con los resultados estadísticos encontrados se puede obtener dicha curva, con la cual es posible definir propiedades mecánicas típicas de aceros de refuerzo nacionales. Se encontró que el modelo analítico que define la curva esfuerzo-deformación de tensión propuesto por Mander et al. (1984) para este tipo de cargas, presentó una buena correlación respecto a las curvas obtenidas experimentalmente.

Las barras de acero sometidas a carga monotónica a compresión presentan en la mayoría de los casos, un modo de falla asociado al efecto de pandeo. En esta investigación, se pudo observar que el pandeo inelástico ocurrió en barras de acero con relaciones de esbeltez mayores o iguales a 4.0.

Para el estudio del pandeo monotónico se utilizó la teoría del doble módulo reducido. Se encontró que los resultados obtenidos experimentalmente, para este tipo de condición de carga, presentaron una buena correlación con los analíticos.

Con objeto de obtener la curva esfuerzo-deformación de barras cortas de acero sometidas a carga de compresión a partir de la curva de tensión, se utilizó un modelo propuesto por Dodd y Restrepo-Posada (1995). Este modelo presenta una correlación aceptable con los obtenidos experimentalmente. Se debe comentar que las características de las curvas mencionadas en compresión 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.

Las barras de acero sometidas a carga cíclica reversible, pueden presentar modos de falla asociados tanto a la ruptura por tensión, como al pandeo, dependiendo de los niveles de deformación a los que se sometan dichas barras, especialmente del estado previo de deformaciones en tensión. Al igual que el caso de carga monotónica a compresión, en este tipo de ensayos se encontró que el pandeo inelástico ocurrió para relaciones de esbeltez mayores o iguales a 4. En este tipo de ensayos, se utilizaron probetas que fueron sometidas a ciclos de histéresis del tipo simétricos y asimétricos, controlados por deformaciones. Los valores obtenidos del esfuerzo de pandeo, f_p , en los ensayos sometidos a cargas cíclicas reversibles tanto en los ciclos simétricos, como en los asimétricos, son comparables a los obtenidos en los ensayos monotónicos de compresión. En cuanto a las deformaciones de pandeo para este caso de carga, en la literatura revisada no se encontró un procedimiento que permitiera definir y evaluar el inicio del pandeo de barras de acero sometidas a cargas cíclicas reversibles. En el presente trabajo se definió el parámetro ϵ_p^* , el cual permite definir el inicio del pandeo en la condición de cargas cíclicas reversibles, así como la evaluación de éste. Este parámetro toma en cuenta el nivel de deformaciones en tensión a la que se ha sometido la barra antes del inicio del pandeo. Al evaluar en los ensayos realizados los valores de este parámetro, se pudo observar que estos valores son similares a los de deformación de pandeo que se presentó

en los ensayos monotónicos a compresión. Esto muestra las bondades e importancia del parámetro ϵ_p^* , ya que permite evaluar el efecto de pandeo de barras de acero sometidas a acciones cíclicas, a partir de los resultados de pandeo monotónico. Se encontró además que la similitud entre ϵ_p^* y la deformación de pandeo de las probetas sometidas a cargas monotónicas de compresión, 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 a tensión alcanzada en el ciclo donde se produce el pandeo. Esto permite afirmar además que la envolvente de la curva esfuerzo-deformación del ciclo donde se produce el pandeo es similar a la curva esfuerzo-deformación monotónica de aceros sometidos a compresión.

Con base en los resultados presentados en el presente trabajo, también se puede concluir que la teoría del doble módulo reducido se puede emplear para definir el estado de deformaciones correspondientes al inicio del pandeo de barras sometidas a cargas monotónicas y cíclicas reversibles; para este último caso es necesario el empleo del parámetro ϵ_p^* propuesto en este trabajo.

En esta investigación se encontró que el modelo utilizado para obtener la curva esfuerzo-deformación propuesto por Mander et al. (1984), para barras sometidas a cargas cíclicas reversibles, llevaron a resultados que presentaron una correlación aceptable con los obtenidos experimentalmente, tanto para los casos de ciclos simétricos como asimétricos. Esto es válido, siempre y cuando dicho análisis se realice utilizando la historia de deformaciones antes de que ocurra el pandeo.

En el presente trabajo quedó demostrado, que es posible definir la curva esfuerzo-deformación de barras de acero sometidas a carga monotónica de compresión a partir de las de tensión. Con esta curva de compresión, es posible obtener el punto donde inicia el

pandeo, utilizando la teoría del doble módulo reducido. Utilizando la curva de compresión obtenida y el punto de inicio del pandeo monotónico, es posible encontrar el parámetro ϵ_p^* . Siguiendo el procedimiento propuesto en este trabajo, es posible evaluar la deformación de pandeo de la barra sometida a cargas cíclicas reversibles, para lo cual se emplea el parámetro ϵ_p^* . Si además se propone una historia de deformaciones, como es típico en análisis del tipo momento-curvatura, es posible obtener la curva esfuerzo-deformación de una barra de acero sometida a carga cíclica reversible hasta el punto donde se inicia el pandeo. Para este análisis se sugiere emplear el modelo propuesto por Mander et al (1984) para representar el comportamiento cíclico reversible de barras de refuerzo. Con estos resultados es factible evaluar de manera aproximada el comportamiento sísmico de elementos de concreto reforzado, tomando en cuenta diversos modos de falla de las secciones críticas, incluyendo el pandeo del refuerzo longitudinal.

Se debe mencionar que las condiciones de ensaye de las barras estudiadas en esta investigación, no representan totalmente a las existentes en elementos de concreto reforzado. Este trabajo se puede considerar como punto de partida para el desarrollo de futuras investigaciones, que permitan evaluar el efecto de pandeo en barras de refuerzo longitudinal en elementos de concreto reforzado, con el objeto de dar recomendaciones aplicables para la evaluación de dicho efecto en estructuras sometidas a acciones sísmicas.

7. REFERENCIAS

ACI 318R-89 (1989), "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", ACI Committee 318 (ACI 318-89), American Concrete Institute, Detroit, U.S.A., 1989.

Aktan, A. E., Karlsson, B. I. and Sozen, M. A. (1973), "Stress-Strain Relationships of Reinforced Concrete Bars Subjected to Large Strain Reversals", Civil Engineering Studies, Structural Research Series, N° 397, University of Illinois, 1973.

Andriono, T. and Park, R. (1986), "Seismic Design Considerations of the Propeties of New Zealand Manufactured Steel Reinforcing Bars", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 19, N°, 213-246, 1986.

ASTM (1993), "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", American Society for Testing and Materials. ASTM E 8M - 93. U.S.A., 1993.

Bernal, D. (1982), "Ductilidad y rotaciones plásticas en secciones críticas de marcos de concreto reforzado", Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, Proyecto 1727, 1982.

CCCSR-84 (1984), "Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes", Colombia, Junio, 1984.

Dodd, L.L. and Restrepo-Posada, J.I. (1995), "Model for Predicting Cyclic Behavior of Reinforcing Steel", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121, N°3, March, 1995.

Johnston, B. G. (1983), "Column Buckling Theory : Historic Highlights", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, N° 9, September, 1983.

Kato, B. (1979), "Mechanic Properties of Steel Under Load Cycles Idealizing Seismic Actions", Bulletin D' Information 131, Comité Euro-International du Béton, Paris, France, 7-27, 1979.

Kent, D. C. and Park, R. (1973), "Cyclic Load Behaviour of Reinforcing Steel", Strain, Vol. 9, N°3, July, 1973.

Mander, J.B., Priestley, M. J. N. and Park, R. (1984), "Seismic Design of Bridge Piers", Report 84-2, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1984.

Mau, S. T. (1989), "Inelastic Buckling of Reinforcing Bars", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, N°1, January, 1989.

Menegotto, M. and Pinto, P. E. (1973), "Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-elastic Behaviour of Elements Under Combined Normal Force and Bending", IABSE Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads, Lisbon, 1973.

Monti, G. and Nuti, C. (1992), "Nonlinear Cyclic Behavior of Reinforcing Bars Including Buckling", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, N°12, December, 1992.

NMX B-6-1987 (1987), "Varillas corrugadas y lisas de acero, procedentes de linfotes o palanquilla, para refuerzo de concreto", Norma Mexicana NMX B-6-1987. Dirección General de Normas. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México, 1987.

NZS 3109:1987 (1987), "Specification for Concrete Construction", NZS 3109:1987, Standards Association of New Zealand, Wellington, New Zealand, 1987.

Park, R. and Paulay, T. (1978), "Estructuras de concreto reforzado", Ed. Limusa, México, 1978.

Peterson, H. and Popov, E. P. (1977), "Constitutive Relations for Generalized Loadings", Journal Engineering Mechanics Division, ASCE, August, 1977.

Ramberg, W. and Osgood, W. R. (1943), "Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters", Technical Note 902, National Advisory Committee for Aeronautics, July, 1943.

RDF-93 (1993), "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal", Gaceta Oficial del departamento del Distrito Federal, México, Junio, 1993.

Restrepo-Posada, J. I. (1993), "Seismic Behaviour of Connections Between Precast Concrete Elements", Report 93-3, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1993.

Restrepo-Posada, J. I., Dodd, L. L. y Park, R. (1994), "Variables Affecting Cyclic Behavior of Reinforcing Steel", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, N°11, November, 1994.

Rodríguez, M. y Botero, J.C. (1994), "Criterios de diseño sísmico de estructuras de concreto reforzado considerando las propiedades mecánicas de aceros de refuerzo producidos en México", Informe interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, Proyecto 3507, Abril-1994.

Rodríguez, M. y Botero, J.C. (1995), "Comportamiento sísmico de estructuras considerando las propiedades de aceros de refuerzo mexicanos", Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, N° 49, Enero-Abril, 1995.

Salmon, C. G. and Johnson, J. E. (1990), "Steel Structures : Design and Behavior", Harper Collins Publishers, Third Edition, U.S.A., 1990.

Stanton, J. F. and McNiven, H. D. (1979), "The Development of a Mathematical Model to Predict the Flexural Response of Reinforced Concrete Beams to Cyclic Loads, Using System Identification", University of California at Berkeley, EERC, Report N° 79/02, January, 1979.

Thompson, K. J. and Park, R. (1978), "Stress-Strain Model for Grade 275 Reinforcing Steel with Cyclic Loading", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 11, N° 2, June, 1978.

Villanueva, J. y Meli, R. (1984), "Estudio estadístico de las propiedades de materiales y estructuras en el Distrito Federal", (II Análisis estadístico de propiedades mecánicas de los aceros de refuerzo producidos en México), Informe Interno elaborado para la Dirección General de Administración del Uso del Suelo, Departamento del Distrito Federal, Instituto de Ingeniería, UNAM, Diciembre-1984.

APÉNDICE 1

En este Apéndice se presenta el listado de la subrutina REDBAR.FOR del programa COLUMN.FOR para computadora realizado por John B. Mander en 1983 y adaptado por el autor del presente trabajo. Originalmente el programa fue escrito en lenguaje FORTRAN y una de las adaptaciones realizadas a la subrutina del programa original, fue la conversión del mismo a lenguaje BASIC. Este programa calcula los esfuerzos en una barra de acero sometida a una carga cíclica, empleando los parámetros que definen la curva esfuerzo-deformación de una barra de acero sometida a carga monotónica, información que obtiene por pantalla y de la historia de deformaciones, la cual se obtiene con un archivo previamente preparado. El archivo de datos de entrada de la historia de deformaciones se prepara utilizando una columna. Cuando se acaba el archivo de datos, se debe escribir como último registro una deformación igual a "9999". Este programa utiliza el modelo cíclico del acero descrito en el capítulo dos del presente trabajo.

'PROGRAMA PARA MODELAR LA CURVA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE BARRAS
'DE ACERO DE REFUERZO SOMETIDAS A CARGAS CÍCLICAS REVERSIBLES.

'Por : John B. Mander.
'Fecha : 1983.
'Adaptación : Juan Carlos Botero P.
'Fecha : Septiembre-1995.

CLS: CLEAR

'DIMENSIONAMIENTO DE LOS VECTORES A UTILIZAR.
DIM FY(2),FSU(2),ESH(2),ESU(2),YOUNGS(2),YTAN(2),P(2)
DIM ES(2),EO(2),FO(2),EB(2),FB(2)
DIM EOO(2),FOO(2),EMAX(2),FMAX(2),EMO(2)
DIM YOUNGQ(2),FC(2),R(2),Q(2)

'APERTURA DE LOS ARCHIVOS DE DATOS Y RESULTADOS.
INPUT "ARCHIVO DE DATOS" = "A1\$"
INPUT "ARCHIVO DE RESULTADOS" = "A2\$"
OPEN A1\$ FOR INPUT AS #1
OPEN A2\$ FOR OUTPUT AS #2
PRINT #2," RESULTADOS DEL PROGRAMA PARA MODELAR LA CURVA CÍCLICA DE"
PRINT #2," ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE BARRAS DE ACERO DE REFUERZO."
PRINT #2,

'LECTURA E IMPRESIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ACERO DE REFUERZO.

```
CLS
PRINT "CARACTERÍSTICAS DEL ACERO DE REFUERZO A TENSIÓN"
PRINT "ESFUERZOS Y DEFORMACIONES CON SIGNO (+)"
PRINT "UNIDADES EN : kg - cm"
INPUT "1. fy = ",FY(2)
INPUT "2. εsh = ",ESH(2)
INPUT "3. fsu = ",FSU(2)
INPUT "4. εsu = ",ESU(2)
INPUT "5. Es = ",YOUNGS(2)
INPUT "6. P = ",P(2)
IF P(2)=0 THEN INPUT "7. Esh = ",YTAN(2)
CLS
PRINT "CARACTERÍSTICAS DEL ACERO DE REFUERZO A COMPRESIÓN"
PRINT "ESFUERZOS Y DEFORMACIONES CON SIGNO (-)"
PRINT "UNIDADES EN : kg - cm"
INPUT "1. fy = ",FY(1)
INPUT "2. εsh = ",ESH(1)
INPUT "3. fsu = ",FSU(1)
INPUT "4. εsu = ",ESU(1)
INPUT "5. Es = ",YOUNGS(1)
INPUT "6. P = ",P(1)
IF P(1)=0 THEN INPUT "7. Esh = ",YTAN(1)
IF P(1)<>0 THEN YTAN(1)=P(1)*(FSU(1)-FY(1))/(ESU(1)-ESH(1))
IF P(1)=0 THEN P(1)=YTAN(1)*(ESU(1)-ESH(1))/(FSU(1)-FY(1))
IF P(2)<>0 THEN YTAN(2)=P(2)*(FSU(2)-FY(2))/(ESU(2)-ESH(2))
IF P(2)=0 THEN P(2)=YTAN(2)*(ESU(2)-ESH(2))/(FSU(2)-FY(2))
PRINT #2," TENSIÓN COMPRESIÓN"
PRINT #2,
PRINT #2,"fy ";USING"#####";FY(2);USING"#####";FY(1)
PRINT #2,"fsu ";USING"#####";FSU(2);USING"#####";FSU(1)
PRINT #2," εsh ";USING"###.####";ESH(2);USING"#####.####";ESH(1)
PRINT #2," εsu ";USING"###.####";ESU(2);USING"#####.####";ESU(1)
PRINT #2,"E s ";USING"#####";YOUNGS(2);USING"#####";YOUNGS(1)
PRINT #2,"Esh ";USING"#####";YTAN(2);USING"#####";YTAN(1)
PRINT #2,"P ";USING"###.####";P(2);USING"#####.####";P(1)
PRINT #2,
FB(1)=FY(1)
FB(2)=FY(2)
FMAX(1)=FY(1)
FMAX(2)=FY(2)
PRINT #2,"VALORES QUE DEFINEN LA CURVA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN"
PRINT #2,
PRINT #2," ESFUERZO ESFUERZO DEFORMACIÓN"
PRINT #2," CALCULADO TEÓRICO TEÓRICA"
PRINT #2,

'LLAMADO DE LA SUBROUTINA PARA CALCULAR LA CURVA DE
'ESFUERZO-DEFORMACIÓN.
CALL ACERO
END
```

'SUBROUTINA PARA CALCULAR LA CURVA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN.

```
SUB ACERO
  SHARED FY(),FSU(),ESH(),ESU(),YOUNGS(),YTAN(),P()
  SHARED FB(),FMAX()
  E=0
  WHILE E<>9999
  INPUT #1,E
  IF E=9999 THEN GOTO 700
```

'VERIFICACIÓN DE LA DIRECCION DE LA DEFORMACIÓN.

```
'CARGA : (M,K,S)=(2,1,1) O DESCARGA : (M,K,S)=(1,2,-1)
  DELTA=E-ELAST
  M=2
  K=1
  S=1
  IF DELTA<0 THEN M=1
  IF DELTA<0 THEN K=2
  IF DELTA<0 THEN S=-1
  IF DELTA=0 THEN GOTO 600
  IF (ES(1)=0 AND ES(2)=0) THEN GOTO 110
  IF (((ELAST-EOLD)*DELTA)<0) THEN GOTO 200
```

'UBICACIÓN DE LA DEFORMACIÓN EN LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN.

```
20 IF (((E-EOO(M))*S)>0 AND ((E-EO(K))*S)<0) THEN GOTO 135
  IF (((E-EB(M))*S)<0) THEN GOTO 130
110 RATIO=(ESU(M)+EMO(M)-E)/(ESU(M)-ESH(M))
  IF (RATIO<1) THEN GOTO 114
  IF (((E-EMO(M)-FY(M)/YOUNGS(K))*S)>0) THEN GOTO 112
```

'ZONA ELÁSTICA.

```
FS=(E-EMO(M))*YOUNGS(M)
YSTEEL=YOUNGS(M)
GOTO 444
```

'ZONA DE FLUENCIA.

```
112 ES(M)=E-EMO(M)
FS=FY(M)
YSTEEL=0
GOTO 444
```

'ZONA DE ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN.

```
114 SIGN=1
  IF (RATIO<0) THEN SIGN=-1
  ES(M)=E-EMO(M)
  PP=1-1/P(M)
  FS=FSU(M)-(FSU(M)-FY(M))*(ABS(RATIO))^P(M)
  YSTEEL=YTAN(M)*SIGN*(((FSU(M)-FS)/(FSU(M)-FY(M)))^PP)
  GOTO 444
```

'ZONA SUAVIZADA DEBIDO AL EFECTO DE BAUSCHINGER.

```
130 CANT=((E-EO(M))*YOUNGQ(M)/(FC(M)-FO(M)))^R(M)
  RR=1/R(M)
  SECANT=YOUNGQ(M)*(Q(M)+(1-Q(M))/(1+CANT)^RR)
  FS=SECANT*(E-EO(M))+FO(M)
  YSTEEL=SECANT-(SECANT-Q(M)*YOUNGQ(M))*CANT/(1+CANT)
  GOTO 444
```

'DESCARGA LINEAL PARA DEFORMACIONES MENORES QUE LA DEFORMACIÓN DE FLUENCIA.

```
135 FS=YOUNGS(M)*(E-EOO(M))+FOO(M)
  YSTEEL=YOUNGS(M)
  GOTO 444
```

'CAMBIO DE DIRECCIÓN DE DEFORMACIONES QUE REGRESAN DE LAS COORDENADAS (EO,FO) Y EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE REGRESO EB,FB,Q,R,YOUNGQ

```
200 YIELD=FY(2)
  IF (((FO(K)+FLAST)/2)<0) THEN YIELD=FY(1)
  DELF=ABS((FO(K)-FLAST)/YIELD)
  IF (DELF<1) THEN FOO(M)=FLAST
  IF (DELF<1) THEN EOO(M)=ELAST
  IF (DELF<1) THEN GOTO 135
  EOO(M)=EO(K)
  FOO(M)=FLAST
  EOO(M)=ELAST
  IF ((FO(M)/FMAX(K))>=0.99999) THEN EMAX(K)=EO(M)
  IF ((FO(M)/FMAX(K))>=0.99999) THEN FMAX(K)=FO(M)
  FB(M)=FMAX(M)
  FRATIO=ABS((FSU(K)-FMAX(K))/(FSU(K)-FY(K)))
  IF (FRATIO<1) THEN PINV=(FSU(K)-FY(K))/(ESU(K)-ESH(K))/YTAN(K)
  IF (FRATIO<1) THEN ES(K)=ESU(K)-(ESU(K)-ESH(K))*FRATIO^PINV
  IF (((FO(M)-FB(K))*S)>(FY(2)/10000)) THEN GOTO 230
```

'DESCARGA LINEAL DE LA CURVA MONOTÓNICA Y DEFINICIÓN DE LAS COORDENADAS (EB,FB).

```
  ERATIO=ABS((ESU(M)+ES(K))/(ESU(M)-ESH(M)))
  IF (ERATIO<1) THEN FB(M)=FSU(M)-(FSU(M)-FY(M))*ERATIO^P(M)
  FRATIO=(FSU(M)-FB(M))/(FSU(M)-FY(M))
  ESHIFT=(ES(K)^2/ESU(2)+2.0*(ABS(FY(M)/YOUNGS(M))))*S
  IF (ERATIO>1 AND (ABS(FO(M)/FY(K)))<1.001) THEN ESHIFT=0
  EMO(M)=EO(M)-FO(M)/YOUNGS(K)+ESHIFT
  EB(M)=EMO(M)-ES(K)
  GOTO 250
```

'DESCARGA LINEAL DE LA CURVA SUAVIZADA Y DEFINICIÓN DE LAS COORDENADAS (EB,FB).

```
230 EXTRA=ESU(2)*(EO(M)-EB(K))-0.5*FY(M)/YOUNGS(M)
  IF ((EMAX(M)/ESH(M))<1) THEN EXTRA=ESU(2)*(EO(M)-EB(K))
  IF (DELF>1.1) THEN EB(M)=EMAX(M)+EXTRA
  IF (((EB(M)-EO(M)-(FB(M)-FO(M))/YOUNGS(K))*S)<=0) THEN
    EB(M)=EMAX(M)+FY(M)/YOUNGS(K)/2
  END IF
  FRATIO=(FSU(M)-FB(M))/(FSU(M)-FY(M))
```

```

IF (FRATIO<1) THEN EMO(M)=EB(M)-ESU(M)+(ESU(M)-ESH(M))*FRATIO^(1/P(M))
EMAX(K)=EB(K)
FMAX(K)=FB(K)

'DETERMINACIÓN POR ITERACIÓN DE LOS VALORES DE Q,R Y YOUNGQ.
250 EJOIN=(FY(M)-YTAN(M)*ESH(M))/(YOUNGS(M)-YTAN(M))
YTANG=(FB(M)-EJOIN*YOUNGS(M))/(EB(M)-EMO(M)-EJOIN)
IF (FRATIO<1) THEN YTANG=YTAN(M)*FRATIO^(1-1/P(M))
YSEC=(FB(M)-FO(M))/(EB(M)-EO(M))
YOUNGQ(M)=YOUNGS(K)
QSLOPE=YTANG/2
FC(M)=FB(M)-QSLOPE*(YOUNGS(K)*(EB(M)-EO(M))-FB(M)+FO(M))/(YOUNGS(K)-YTANG)
EDF=ABS(YOUNGQ(M)*(EB(M)-EO(M))/(FC(M)-FO(M)))
260 IF (EDF=0) THEN EDF=0.000001
IF (EDF=1) THEN EDF=0.999999
XARG=ABS((YSEC-YTANG)/(YTANG-QSLOPE))
IF (XARG=0) THEN XARG=0.000001
R(M)=LOG(XARG)/LOG(EDF)
IF (R(M)<1) THEN R(M)=1
IF (R(M)>20) THEN R(M)=20
FACTOR=(1+EDF^R(M))^(1/R(M))
QSLOPE=(QSLOPE+(FACTOR*YSEC-YOUNGQ(M))/(FACTOR-1))/2
AUX1=QSLOPE/YOUNGQ(M)
AUX2=(1-QSLOPE/YOUNGQ(M))
AUX3=(FY(M)*YOUNGQ(M)/YOUNGS(K))
YOUNGQ(M)=YOUNGS(K)/(AUX1+AUX2/(1+(AUX3/(FC(M)-FO(M)))^R(M))^(1/R(M)))
IF ((YOUNGQ(M)/YOUNGS(K))>1.5) THEN YOUNGQ(M)=YOUNGS(K)*1.5
Q(M)=QSLOPE/YOUNGQ(M)
IF (R(M)>19) THEN GOTO 130
EDF=YOUNGQ(M)*(EB(M)-EO(M))/(FC(M)-FO(M))
EDF=ABS(EDF)
IF (R(M)=1 AND KOUNT>3) THEN GOTO 130
YTEST=YSEC-(YSEC-QSLOPE)/(1+1/(EDF^R(M)))
ERROR1=ABS(YTANG-YTEST)/YTANG
KOUNT=KOUNT+1
IF (ERROR1>0.005 AND KOUNT<10) THEN GOTO 260
GOTO 130
444 IF (YSTEEL<=0) THEN YSTEEL=20
IF (FS<FSU(1)) THEN YSTEEL=1
IF (FS>FSU(2)) THEN YSTEEL=2
IF (FS<FSU(1)) THEN FS=FMAX(1)
IF (FS>FSU(2)) THEN FS=FMAX(2)
EOLD=ELAST
ELAST=E
FLAST=FS

'IMPRESIÓN DE RESULTADOS DE LA CURVA CALCULADA.
600 PRINT #2, USING "#####.#####";FS,E
700 WEND
CLOSE
END SUB

```

APÉNDICE 2

Con el objeto de obtener las curvas f_p vs S_h/D y ϵ_p vs S_h/D , utilizando la teoría del doble modulo reducido, se elaboró un programa para computadora utilizando lenguaje BASIC y usando el algoritmo descrito en el capítulo 3 del presente trabajo. A continuación se comentan algunos aspectos del funcionamiento del mismo.

La entrada de datos al programa para su proceso se realizan por pantalla. Cuando se inicia la ejecución del programa, éste solicita el nombre del archivo donde el usuario desea almacenar los resultados, al cual automáticamente se le asigna la extensión .RES.

La teoría del doble módulo reducido empleado en este Apéndice es válido solo cuando el pandeo del elemento ocurre en el rango inelástico. Por este motivo el programa termina el proceso cuando encuentra una relación S_h / D para la cual el esfuerzo de pandeo es menor que el esfuerzo de fluencia correspondiente.

A continuación, se presenta el listado del programa antes mencionado.

```
'PROGRAMA PARA CALCULAR EL PANDEO EN BARRAS DE REFUERZO  
'UTILIZANDO LA TEORÍA DEL DOBLE MÓDULO REDUCIDO.
```

```
'Por : Juan Carlos Botero P.
```

```
'Fecha : Agosto-1994.
```

```
CLS  
CLEAR
```

```
'APERTURA DEL ARCHIVO DE RESULTADOS.
```

```
INPUT "Archivo de resultados = ",A1$
```

```
C$=A1$+"."+ "RES"
```

```
OPEN C$ FOR OUTPUT AS #1
```

```
PRINT #1, " Resultados del programa para calcular el pandeo de barras de"
```

```
PRINT #1, " refuerzo utilizando la teoría del doble módulo reducido"
```

```
PRINT #1,
```

'SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES DE APOYO.

```
CLS
INPUT "Condición de apoyo K = ",K
```

' LECTURA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ACERO DE REFUERZO.

```
CLS
PRINT "Características del acero de refuerzo longitudinal"
PRINT "Unidades en : kg - cm"
INPUT "1. fy = ",FY
INPUT "2. εy = ",EY
INPUT "3. εsh = ",ESH
INPUT "4. fsu = ",FSU
INPUT "5. εsu = ",ESU
INPUT "6. P = ",P
E=FY/EY
PRINT #1,"fy = ";USING"#####";FY
PRINT #1,"fsu = ";USING"#####";FSU
PRINT #1,"εy = ";USING"#####";EY
PRINT #1,"εsh = ";USING"#####";ESH
PRINT #1,"εsu = ";USING"#####";ESU
PRINT #1,"Es = ";USING"#####";E
PRINT #1,"P = ";USING"#####";P
PRINT #1,
```

' CÁLCULOS PARA DETERMINAR EL ESFUERZO DE PANDEO.

```
PRINT #1,"No ALFA Sh/D fp εs-εsh εp Es/E't Er/Es X Y"
PRINT #1,
SHD=1
PI=3.141592654
AUX=0
CONT=1
WHILE AUX<>9999
ALFA1=0
ALFA3=180
ALFA2=(ALFA1+ALFA3)/2
FP1=FSU
WHILE ABS(FP1-FP2)>1
ALFA4=ALFA2*PI/180
ALFA5=PI-ALFA4
FUNC1=SIN(ALFA4)
FUNC2=COS(ALFA4)
FUNC3=(SIN(2*ALFA4))/2
FUNC4=ALFA4-FUNC3
FUNC5=ALFA5+FUNC3
FUNC6=((2*FUNC1^3)/(3*FUNC4))-FUNC2
FUNC7=((2*FUNC1^3)/(3*FUNC5))+FUNC2
FUNC8=2*FUNC1^2*FUNC3
FUNC9=(16*FUNC1^6)/(9*FUNC4)
FUNC10=(16*FUNC1^6)/(9*FUNC5)
FUNC11=FSU-FY
FUNC12=ESU-ESH
FUNC13=1/(P-1)
```

```

EET=(FUNC4*FUNC6)/(FUNC5*FUNC7)
X=(0.25*(FUNC4+FUNC8-FUNC9))+(FUNC4*FUNC6^2)
Y=(0.25*(FUNC5-FUNC8-FUNC10))+(FUNC5*FUNC7^2)
ERE=4*((X/EET)+Y)/PI
FP1=(PI^2*E/16)*ERE/(K*SHD)^2
U=FUNC12-((E*FUNC12^P/EET)/(FUNC11*P))^FUNC13
FP2=FSU-(FUNC11*((FUNC12-U)/FUNC12)^P)
EP=ESH+U
IF FP2<0 THEN
  ALFA1=ALFA2
  GOTO 10
END IF
IF (FP1-FP2)>0 THEN
  ALFA1=ALFA2
ELSE
  ALFA3=ALFA2
END IF
10 ALFA2=(ALFA1+ALFA3)/2
WEND
IF ABS(FP1)<FY THEN
  AUX=9999
  GOTO 20
END IF
PRINT #1,USING"###";CONT,
PRINT #1,USING"#####.##";ALFA2,
PRINT #1,USING"###.##";SHD,
PRINT #1,USING"#####";FP1,
PRINT #1,USING"###.#####";U,
PRINT #1,USING"###.#####";EP,
PRINT #1,USING"#####.###";EET,
PRINT #1,USING"#####.###";ERE,
PRINT #1,USING"#####.###";X,
PRINT #1,USING"#####.###";Y
CONT=CONT+1
SHD=SHD+0.1
20 WEND
END

```


APÉNDICE 3

Con el objeto de obtener la curva E'_t / E_s vs E_r / E_s para una sección circular utilizando la teoría del doble módulo reducido, se elaboró un programa para computador en BASIC. Como se comentó en el capítulo 3, tanto los valores de E'_t / E_s como los de E_r / E_s sólo dependen de las características geométricas de la sección circular, por lo tanto para la ejecución de dicho programa solo es necesario introducir por pantalla el nombre del archivo donde el usuario desea almacenar los resultados y este automáticamente le asigna una extensión .RES.

El programa selecciona en forma automática el valor de α (figura 3.1) cuyo intervalo está entre 90° y 155° y calcula las relaciones E'_t / E_s y E_r / E_s . Esto se debe a que para valores de α menores a 90° las relaciones E'_t / E_s y E_r / E_s son muy pequeñas y para valores de α mayores a 155° las relaciones E'_t / E_s y E_r / E_s son muy grandes.

Se presenta a continuación el listado del programa antes mencionado.

```
'PROGRAMA PARA CALCULAR LA RELACIÓN  $E_s/E'_t$  Y  $E_r/E_s$  DE UNA SECCIÓN CIRCULAR
'UTILIZANDO LA TEORÍA DEL DOBLE MÓDULO REDUCIDO.
'Por : Juan Carlos Botero P.
'Fecha : Octubre-1995
CLS
CLEAR
'APERTURA DEL ARCHIVO DE RESULTADOS.
INPUT "ARCHIVO DE RESULTADOS = ",A1$
C$=A1$+"."+ "RES"
OPEN C$ FOR OUTPUT AS #1
PRINT #1," Resultados del programa para calcular la relación  $E_s/E'_t$  y  $E_r/E_s$  de"
PRINT #1," una sección circular utilizando la teoría del doble módulo reducido."
PRINT #1,
' CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA RELACIÓN  $E_s/E'_t$  Y  $E_r/E_s$ .
PRINT #1," No ALFA  $E_s/E'_t$   $E_r/E_s$ ,"
PRINT #1,
PI=3.141592654
CONT=1
```

```

FOR ALFA2=90 TO 135 STEP 0.5
  ALFA4=ALFA2*PI/180
  ALFA5=PI-ALFA4
  FUNC1=SIN(ALFA4)
  FUNC2=COS(ALFA4)
  FUNC3=(SIN(2*ALFA4))/2
  FUNC4=ALFA4-FUNC3
  FUNC5=ALFA5+FUNC3
  FUNC6=((2*FUNC1^3)/(3*FUNC4))-FUNC2
  FUNC7=((2*FUNC1^3)/(3*FUNC5))+FUNC2
  FUNC8=2*FUNC1^2*FUNC3
  FUNC9=(16*FUNC1^6)/(9*FUNC4)
  FUNC10=(16*FUNC1^6)/(9*FUNC5)
  EET=(FUNC4*FUNC6)/(FUNC5*FUNC7)
  X=(0.25*(FUNC4+FUNC8-FUNC9))+(FUNC4*FUNC6^2)
  Y=(0.25*(FUNC5-FUNC8-FUNC10))+(FUNC5*FUNC7^2)
  ERE=4*((X/EET)+Y)/PI
  PRINT #1,USING"###";CONT,
  PRINT #1,USING"#####.###";ALFA2,
  PRINT #1,USING"#####.###";EET,
  PRINT #1,USING"###.###";ERE
  CONT=CONT+1
NEXT ALFA2
END

```