

2022-10

Fracturas de barras de acero para hormigón armado debidas a la deformación crítica por pandeo y a la fatiga de bajo ciclaje

Rojas Rejas, Sebastian Alberto

<https://hdl.handle.net/11673/54642>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAISO – CHILE



FRACTURAS DE BARRAS DE ACERO PARA HORMIGON ARMADO
DEBIDAS A LA DEFORMACION CRITICA POR PANDEO Y A LA
FATIGA DE BAJO CICLAJE

Memoria de título presentada por
SEBASTIAN ALBERTO ROJAS REJAS

Como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
René Tobar Ramos

OCTUBRE 2022

RESUMEN

En esta memoria se presenta un programa experimental para investigar la resistencia a la fatiga de bajo ciclaje de barras de acero para hormigón armado de varias procedencias. Las barras fueron sometidas ciclos de carga compresión-tracción sin restricción al pandeo. Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Sismorresistente del Departamento de Obras Civiles de la UTFSM.

El principal propósito del estudio fue obtener datos para aclarar la razón por la cual, en ensayos a carga cíclica equivalentes a la sollicitación sísmica efectuados sobre elementos de hormigón armado, se observó falla catastrófica con fractura de las barras longitudinales de refuerzo de la viga. Estos elementos representaban un segmento de viga adyacente a una columna exterior de un marco dúctil, y tenían diversos tipos de armadura transversal. Las fracturas ocurrieron cuando la armadura transversal de la viga consistió en estribos inclinados, pero no en los casos con armadura transversal tradicional.

Las fracturas aparecieron en la parte de la viga próxima a la columna y después de la pérdida del recubrimiento y pandeo de las barras. La curvatura asociada a este fenómeno podría haber sobrepasado la deformación unitaria crítica por flexión, definida en una publicación reciente de Barcley y Kowalsky (2019), como la que causaría la fractura de la barra en el medio ciclo siguiente de tracción.

Se obtuvieron las resistencias a la fatiga de barras de acero AZA, CAP y ACMA sin restricción al pandeo, cuyos resultados se compararon con los de otra memoria desarrollada en paralelo (Rojas H., 2022) en que el pandeo fue restringido.

Basándose en filmaciones de los ensayos de una probeta viga-columna, se logró estimar la deformación unitaria máxima por flexión en una barra longitudinal medio ciclo antes de su fractura, resultando lo suficientemente próxima a la deformación unitaria crítica por flexión como para atribuir la fractura a esta causa.

ABSTRACT

This thesis presents an experimental program was carried out to investigate the low cycle fatigue strength of reinforcing steel bars from various sources. The bars were subjected to compression-tension loading cycles without buckling restraint. The tests were carried out at the Earthquake Engineering Laboratory of the Department of Civil Engineering of the UTFSM.

The main purpose of the study was to obtain data to clarify the reason why, in cyclic load tests equivalent to the seismic stress carried out on reinforced concrete elements, catastrophic failure with fracture of the longitudinal reinforcing bars of the beam was observed. These elements represented a beam segment adjacent to an exterior column of a ductile frame, and had various types of transverse reinforcement. Fractures occurred when the beam transverse reinforcement consisted of inclined stirrups, but not in cases with traditional transverse reinforcement.

Steel bar fractures appeared in the part of the beam close to the column after the concrete cover was lost and buckling of the bars was occurred. The curvature associated with this phenomenon could have exceeded the critical bending strain, defined in a recent publication by Barcley and Kowalsky (2019), as that which would cause the bar to fracture in the next half tensile cycle.

Fatigue strengths of AZA, CAP and ACMA steel bars without buckling restraint were obtained. The results were compared with those of another thesis developed simultaneously (Rojas H., 2022) in which buckling was prevented.

Based on video recordings of a beam-column specimen, it was possible to estimate the maximum bending strain in a longitudinal bar, half a cycle before its fracture, which was close enough to the critical bending strain to attribute the fracture to this cause.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1	Introducción.....	1
1.1	Objetivos.....	6
1.2	Plan de trabajo	7
1.3	Organización de la memoria.....	8
CAPITULO 2	Estado del Arte.....	9
2.1	Fatiga de bajo ciclaje en barras de refuerzo.....	9
2.2	Ensayos de fatiga de bajo ciclaje.....	11
2.3	Deformación unitaria crítica por flexión	14
2.3.1	Ensayo BBT de Barcley y Kowalsky (2019)	15
CAPITULO 3	Descripción de los Ensayos.....	18
3.1	Materiales y equipos utilizados	18
3.1.1	Aceros.....	18
3.1.2	Descripción del sistema de ensayo.....	21
3.1.3	Transductores láser de desplazamiento	22
3.2	Montaje e instrumentación	24
3.2.1	Ensayos de fatiga.....	24
3.2.2	Ensayos BBT.....	28
3.3	Procedimiento experimental.....	30
3.3.1	Ensayos de fatiga.....	30
3.3.2	Ensayos BBT.....	31
CAPITULO 4	Presentación de Resultados	35
4.1	Comportamiento cíclico.....	35
4.1.1	Ensayos de fatiga simétricos.....	35

4.1.2	Ensayos de fatiga asimétricos.....	40
4.1.3	Agrietamiento por fatiga	43
4.2	Resistencia a la fatiga	46
4.2.1	Ensayos de fatiga simétricos.....	47
4.2.2	Ensayos de fatiga asimétricos.....	51
4.3	Ensayos BBT	53
4.3.1	Resultados del Ensayo BBT con radio curvatura.....	56
4.4	Medición de deformaciones	59
4.4.1	Progresión de la deformación unitaria máxima por flexión con los ciclos de fatiga.....	59
4.5	Incidencia del pandeo.....	69
4.5.1	Deformación unitaria máxima por flexión en probetas viga-columna 71	
4.6	Comentarios de los resultados.....	77
4.6.1	Incidencia del pandeo en la fatiga de las barras de refuerzo	77
4.6.2	Ensayo BBT	78
4.7	Recomendaciones para futuros trabajos.....	79
	CONCLUSIONES	81
	REFERENCIAS.....	83
	ANEXOS.....	86
A.	Resultados ensayos de fatiga	86
B.	Resultados de los ensayos BBT	88

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de la zona de interés en un marco de hormigón armado con sollicitación lateral.	2
Figura 2. Ensayo tipo de una probeta viga-columna escala 1/3 o 1/4 (Matson, 2018).	2
Figura 3. Fracturas del refuerzo pandeado en probetas viga-columna con armadura transversal inclinada 45°. (a) Probeta MVC1 (Matson, 2018); y (b) Probeta MVC2 (Matson, 2018).	3
Figura 4. Barras longitudinales pandeadas en dirección perpendicular a la aplicación de la carga (Matson, 2018).	4
Figura 5. Esquema de las curvas S-N para aleaciones férricas y no férricas. (ITEA, 2002).	10
Figura 6. Banda de deslizamiento con extrusiones e intrusiones generadas en la superficie del acero sometido a carga cíclica.	10
Figura 7. Etapas de un ciclo de fatiga de una barra esbelta: (a) barra de largo L y diámetro D en posición no deformada; (b) barra en posición de deformación unitaria máxima en tracción; y (c) barra en posición de deformación unitaria máxima en compresión.	11
Figura 8. Patrón de carga de amplitud constante.	12
Figura 9. Patrones de carga de amplitud constante con diferentes valores de R.	13
Figura 10. (a) Modo de falla dúctil; y (b) Modo de falla frágil. (Barcley y Kowalsky, 2019).	16
Figura 11. Resultados del ensayo BBT para barras de refuerzo Grado 60 (420 MPa) y Grado 80 (550 MPa). (Barcley y Kowalsky, 2019)	16
Figura 12. Curvas esfuerzo vs deformación para una longitud de barra de 11.5 cm de los aceros considerados en este estudio.	19
Figura 13. Largos de las barras ensayadas y longitudes de agarre en la MTS 810.	20
Figura 14. Máquina MTS 810.	21
Figura 15. Controlador MTS 407.	22

Figura 16. (a) Sensor Láser CMOS Analógico IA-030; y (b) Amplificador IA-1000.	23
Figura 17. Montaje e instrumentación utilizada en los ensayos de fatiga de las barras largas ($L/D = 14$).	25
Figura 18. Montaje e instrumentación utilizada en los ensayos de fatiga de las barras medianas ($L/D = 9$).	25
Figura 19. Montaje e instrumentación utilizada en los ensayos de fatiga de las barras cortas ($L/D = 4$).	26
Figura 20. Diagrama unilineal del sistema de ensayo.	27
Figura 21. Esquema del montaje de un ensayo BBT: (a) Posicionamiento de la cámara fotográfica; y (b) Visor de la cámara fotográfica.	28
Figura 22. Esquema en perspectiva del ensayo BBT.	29
Figura 23. (a) Esquema del transportador; y (b) Posicionamiento de la cámara fotográfica.	31
Figura 24. Barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 19.4\%$ de compresión.	32
Figura 25. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 19.4\%$ de compresión (unidades en mm).	33
Figura 26. Superficies de falla obtenidas en un ensayo BBT. (a) Falla dúctil; y (b) Falla frágil.	34
Figura 27. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cuatro barras AZA con razón de esbeltez (L/D) 14 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3% y 4%.	35
Figura 28. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cuatro barras AZA con razón de esbeltez (L/D) 9 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3% y 4%.	36
Figura 29. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cinco barras AZA con razón de esbeltez (L/D) 4 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3%, 4% y 5%.	36

Figura 30. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cuatro barras CAP con razón de esbeltez (L/D) 14 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3% y 4%.	37
Figura 31. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cuatro barras CAP con razón de esbeltez (L/D) 9 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3% y 4%.	37
Figura 32. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cinco barras CAP con razón de esbeltez (L/D) 4 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3%, 4% y 5%.	38
Figura 33. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cuatro barras ACMA con razón de esbeltez (L/D) 14 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3% y 4%.	38
Figura 34. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cuatro barras ACMA con razón de esbeltez (L/D) 9 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3% y 4%.	39
Figura 35. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cinco barras ACMA con razón de esbeltez (L/D) 4 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3%, 4% y 5%.	39
Figura 36. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga asimétricos de las cinco barras AZA con razón de esbeltez (L/D) 14 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3%, y 4%.	40
Figura 37. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga asimétricos de las cinco barras AZA con razón de esbeltez (L/D) 9 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3%, y 4%.	41
Figura 38. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga asimétricos de las cinco barras CAP con razón de esbeltez (L/D) 14 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3%, y 4%.	41
Figura 39. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga asimétricos de las cinco barras CAP con razón de esbeltez (L/D) 9 y deformaciones unitarias (β) de 2%, 3%, y 4%.	42

Figura 40. Proceso de agrietamiento de la barra ACMA ($L/D = 4$) durante las reversiones de tracción del ensayo de fatiga simétrico con deformación unitaria $\beta = 4\%$.	44
Figura 41. Proceso de agrietamiento de la barra ACMA ($L/D = 4$) durante las reversiones de tracción del ensayo de fatiga simétrico con deformación unitaria $\beta = 4\%$.	45
Figura 42. Proceso de agrietamiento de la barra ACMA ($L/D = 4$) durante las reversiones de tracción del ensayo de fatiga simétrico con deformación unitaria $\beta = 4\%$.	46
Figura 43. Vida a la fatiga del acero AZA producto de aplicar carga simétrica.	47
Figura 44. Vida a la fatiga del acero CAP producto de aplicar carga simétrica.	47
Figura 45. Vida a la fatiga del acero ACMA producto de aplicar carga simétrica.	48
Figura 46. Vida a la fatiga de las barras de refuerzo con $L/D = 14$ producto de aplicar carga simétrica.	49
Figura 47. Vida a la fatiga de las barras de refuerzo con $L/D = 9$ producto de aplicar carga simétrica.	49
Figura 48. Vida a la fatiga de las barras de refuerzo con $L/D = 4$ producto de aplicar carga simétrica.	50
Figura 49. Vida a la fatiga de las barras largas ($L/D = 14$) de acero AZA producto de aplicar carga simétrica y asimétrica.	51
Figura 50. Vida a la fatiga de las barras medianas ($L/D = 9$) de acero AZA producto de aplicar carga simétrica y asimétrica.	51
Figura 51. Vida a la fatiga de las barras largas ($L/D = 14$) de acero CAP producto de aplicar carga simétrica y asimétrica.	52
Figura 52. Vida a la fatiga de las barras medianas ($L/D = 9$) de acero CAP producto de aplicar carga simétrica y asimétrica.	52
Figura 53. Deformación unitaria crítica de las barras de acero AZA de refuerzo según el ensayo BBT.	53
Figura 54. Deformación unitaria crítica de las barras de acero CAP de refuerzo según el ensayo BBT.	54
Figura 55. Deformaciones unitarias críticas de las barras de acero AZA y CAP según el ensayo BBT.	54

Figura 56. Análisis de los resultados del ensayo BBT aplicado sobre los aceros AZA y CAP.....	56
Figura 57. Estimación del radio curvatura con AutoCAD de la barra de refuerzo pandeada CAP durante el ensayo BBT con $\beta = 18.8\%$ de compresión (unidades en mm).....	57
Figura 58. Resultado del ensayo BBT aplicado al acero AZA utilizando el radio curvatura.....	58
Figura 59. Resultado del ensayo BBT aplicado al acero CAP utilizando el radio curvatura.....	58
Figura 60. Evolución de la posición de la barra AZA ($L/D = 14$) durante el ensayo de fatiga simétrico ($\beta = 3\%$). (a) Posición inicial (no deformada); (b) Posición durante la compresión máxima del 1º ciclo; y (c) Posición durante la compresión máxima del último ciclo.	60
Figura 61. Posiciones extremas de la barra AZA ($L/D = 14$) entre el 1er. y 2do. ciclo del ensayo de fatiga ($\beta = 3\%$).....	61
Figura 62. Posiciones extremas de la barra AZA ($L/D = 14$) entre el 2do. ciclo y el 11vo. ciclo del ensayo de fatiga ($\beta = 3\%$).....	62
Figura 63. Posiciones extremas de la barra AZA ($L/D = 14$) entre el 11vo. ciclo y el 22vo. ciclo del ensayo de fatiga ($\beta = 3\%$).....	63
Figura 64. Curvas de histéresis en las posiciones extremas de la barra AZA ($L/D = 14$) entre el 1er. ciclo y el 2do. ciclo del ensayo de fatiga ($\beta = 3\%$).	64
Figura 65. Curvas de histéresis en las posiciones extremas de la barra AZA ($L/D = 14$) entre el 2do. ciclo y el 11vo. ciclo del ensayo de fatiga ($\beta = 3\%$).....	65
Figura 66. Curvas de histéresis en las posiciones extremas de la barra AZA ($L/D = 14$) entre el 11vo. ciclo y el 22vo. ciclo del ensayo de fatiga ($\beta = 3\%$).	66
Figura 67. Fuerza vs Deformación unitaria máxima por flexión de una barra AZA ($L/D = 14$) medidos en la reversión de la carga durante los ciclos del ensayo de fatiga con carga simétrica con $\beta = 3\%$	67
Figura 68. Evolución de la deformación unitaria máxima por flexión con respecto al número de ciclos ($2N_f$) del ensayo de fatiga con carga simétrica ($\beta = 3\%$) de una barra AZA ($L/D = 14$).	68

Figura 69. Diagramas de histéresis de los ensayos de fatiga simétricos ($\beta = 3\%$) de una barra AZA larga ($L/D = 14$) con y sin pandeo restringido.	69
Figura 70. Vida a la fatiga con carga simétrica de las barras largas ($L/D = 14$) de acero AZA con y sin pandeo restringido.	70
Figura 71. Medición del desplazamiento transversal de la barra de refuerzo superior de la probeta CP4, en el instante de máxima curvatura durante el primer ciclo de 33 mm.	72
Figura 72. Medición del desplazamiento transversal de la barra de refuerzo superior de la probeta CP4, en el instante de máxima curvatura durante el segundo ciclo a 33 mm.	73
Figura 73. Medición del desplazamiento transversal de la barra de refuerzo superior de la probeta BS4, en el instante de máxima curvatura durante el tercer ciclo a 30 mm.	75
Figura 74. Medición del desplazamiento transversal de la barra de refuerzo superior de la probeta BS4, en el instante de máxima curvatura durante el cuarto ciclo a 30 mm.	76
Figura B1. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 5.0\%$ de compresión (unidades en mm).	89
Figura B2. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 10.0\%$ de compresión (unidades en mm).	89
Figura B3. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 15.0\%$ de compresión (unidades en mm).	90
Figura B4. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 16.3\%$ de compresión (unidades en mm).	90
Figura B5. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 17.5\%$ de compresión (unidades en mm).	91

Figura B6. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 18.8\%$ de compresión (unidades en mm).	91
Figura B7. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 20.0\%$ de compresión (unidades en mm).	92
Figura B8. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 22.5\%$ de compresión (unidades en mm).	92
Figura B9. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 25.0\%$ de compresión (unidades en mm).	93
Figura B10. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 5.0\%$ de compresión (unidades en mm).	95
Figura B11. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 10.0\%$ de compresión (unidades en mm).	95
Figura B12. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 15.0\%$ de compresión (unidades en mm).	96
Figura B13. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 16.3\%$ de compresión (unidades en mm).	96
Figura B14. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 17.5\%$ de compresión (unidades en mm).	97
Figura B15. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 18.8\%$ de compresión (unidades en mm).	97

Figura B16. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 20.0\%$ de compresión (unidades en mm).	98
Figura B17. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 21.3\%$ de compresión (unidades en mm).	98
Figura B18. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 22.5\%$ de compresión (unidades en mm).	99
Figura B19. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 25.0\%$ de compresión (unidades en mm).	99

CAPITULO 1

Introducción

Durante los últimos años, en el Laboratorio de Ingeniería Sismorresistente de la Universidad Técnica Federico Santa María, se ha construido y ensayado una serie de elementos que representan una sección de una viga de un marco dúctil de hormigón armado anclado a un segmento de columna exterior (Figs. 1 y 2), y que se pueden considerar a escala $1/3$ o $1/4$ del tamaño real. Estos elementos se sometieron a una carga cíclica alternada en el extremo libre de la viga, simulando la sollicitación sísmica. Al final de los ensayos, las vigas mostraron una considerable acumulación de daño en la parte adyacente a la columna. Con el fin de mejorar su desempeño, se usó armadura transversal inclinada a 45 grados, verificándose que con esta nueva configuración disminuyó el deterioro del hormigón, retardándose el colapso usualmente iniciado por la falla por compresión diagonal (Silva, 2014; Pino, 2016; Matson, 2018; Basualdo, 2019), aumentando considerablemente la ductilidad del elemento. No obstante, las probetas ensayadas desarrollaron pandeo inelástico de sus barras longitudinales, lo cual se generó después de que el recubrimiento en la zona crítica de la viga se desprendiera. Luego, en la mayoría de las probetas, ocurrió falla frágil debido a la fractura de esas barras en los ciclos siguientes (Fig. 3).

Ejemplo de lo anterior se observó en los ensayos de B. Silva (2014) quien determinó que, para estos elementos, en los ciclos con desplazamientos superiores a los 30 mm, los fragmentos de hormigón generados por la compresión diagonal que se encontraban en el borde de la viga se desprendieron, y las barras de refuerzo, ahora sin contención lateral, comenzaron a flexionarse y pandearse, para luego fracturarse.

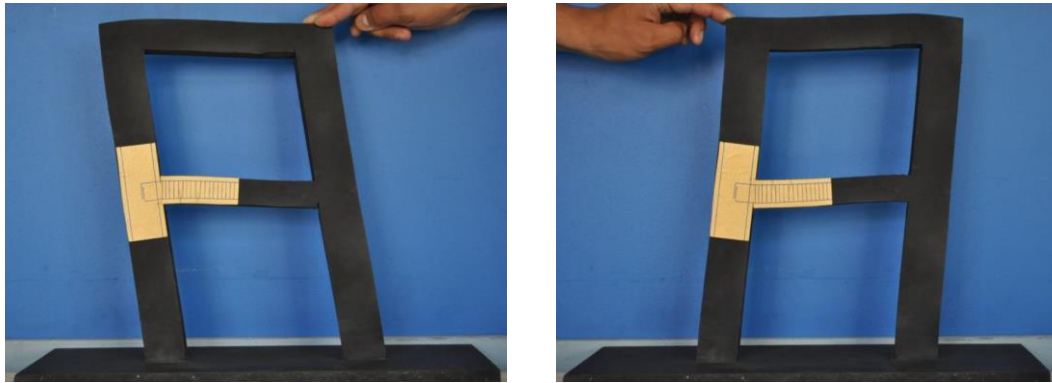


Figura 1. Representación de la zona de interés en un marco de hormigón armado con sollicitación lateral.

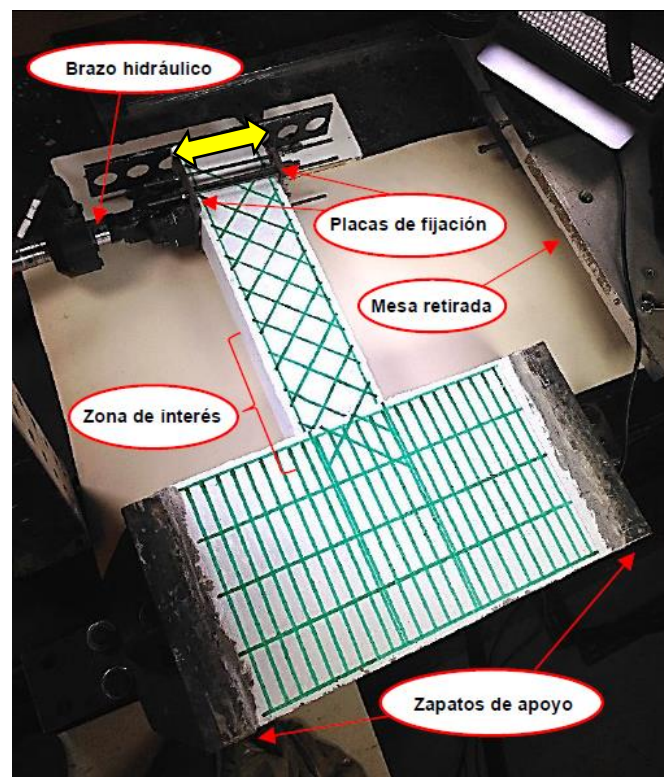


Figura 2. Ensayo tipo de una probeta viga-columna escala 1/3 o 1/4 (Matson, 2018).

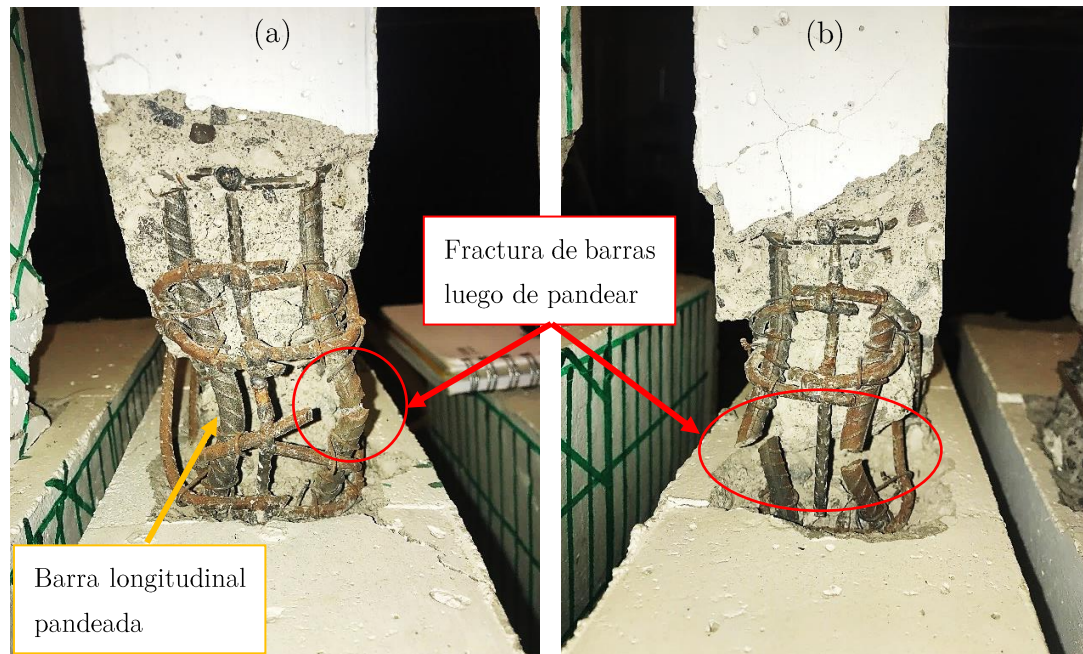


Figura 3. Fracturas del refuerzo pandeado en probetas viga-columna con armadura transversal inclinada 45°. (a) Probeta MVC1 (Matson, 2018); y (b) Probeta MVC2 (Matson, 2018).

C. Pino (2016) ensayó probetas con estribos inclinados en 45. En algunas de estas probetas los estribos estaban separados 5 cm, y en otras separados 10 cm. Las barras longitudinales de las probetas con espaciamiento de 5 cm pandearon y se cortaron al alcanzar ciclos con amplitud de desplazamiento cercano a los 33 mm, mientras que las probetas con estribos inclinados separados 10 cm perdieron su recubrimiento con apenas sobrepasar los 8 mm, favoreciendo el pandeo prematuro de las barras de la armadura longitudinal, las cuales terminaron fracturándose cuando se alcanzaron los 33 mm de desplazamiento.

Para controlar la ocurrencia del pandeo, C. Matson (2018) redujo la separación de estribos a 2.5 cm en la zona crítica. Sin embargo, se vio que el refuerzo longitudinal encontró otras direcciones para deformarse (Fig. 4), y la fatiga de bajo ciclaje igualmente terminó con la fractura de las barras. Además, se pudo comprobar que la separación recomendada de estribos igual a cuatro veces el diámetro de la barra longitudinal no garantizó la no ocurrencia del pandeo.



Figura 4. Barras longitudinales pandeadas en dirección perpendicular a la aplicación de la carga (Matson, 2018).

Por lo tanto, para empezar a investigar el problema, se partió desarrollando dos estudios experimentales: uno en que se realizaron ensayos de fatiga de bajo ciclaje a barras con pandeo restringido (Rojas H., 2022) y otro, correspondiente a esta memoria, donde se realizaron ensayos, pero sin restricción al pandeo. De esta manera, se sometieron a carga axial cíclica con amplitud de desplazamiento constante, diversas barras de refuerzo de 8 mm de diámetro, como las empleadas en los ensayos descritos anteriormente, determinándose la vida a la fatiga dada por el número de ciclos alcanzados antes de que se produjera la rotura. Esto se hizo para distintos niveles de deformación de las barras y para ensayos con desplazamientos de extremo positivos y negativos del mismo valor (ensayos simétricos) y para ensayos con desplazamientos de extremo únicamente positivos con respecto a la longitud inicial (ensayos asimétricos).

Adicionalmente, la revisión de la bibliografía llevó a una investigación reciente de Barcley y Kowalsky (2019) quienes desarrollaron la idea de Restrepo-Posada et al. (1992) y sugieren la existencia de un “pandeo crítico” donde las demandas de deformación por compresión excederían la capacidad del material, causando una falla frágil de las barras para cualquier carga de tracción que se aplique después, a no ser que ésta sea muy pequeña. En elementos de hormigón armado sujetos a grandes reversiones de carga, como en un evento sísmico, este efecto podría ocurrir antes de que se produzca la llamada falla por fatiga de bajo ciclaje. Por este motivo, los autores propusieron un ensayo monotónico de material, denominado Buckled Bar Tension (BBT) Test, que compara la deformación por flexión inducida por el pandeo de la barra con el modo de fractura posterior, mediante el cual se busca identificar la deformación unitaria crítica por pandeo del acero de refuerzo.

Debido a lo anterior, se consideró conveniente aplicar una adaptación del ensayo BBT sobre barras de refuerzo como las empleadas en la fabricación de los elementos ensayados en los trabajos citados, junto con replicar parte del procedimiento para estimar la deformación por flexión en los especímenes durante los ensayos de fatiga y estudiar su comportamiento con respecto al número de ciclos.

1.1 Objetivos

El objetivo principal es estudiar experimentalmente las propiedades resistentes, incluyendo fatiga de bajo ciclaje y deformación unitaria crítica, de barras de refuerzo. Esto con el fin de obtener datos que permitan, en estudios posteriores, mejorar los diseños, y evitar la rotura de las barras longitudinales comúnmente observada en especímenes viga-columna con armadura transversal inclinada en 45° .

Los objetivos específicos del trabajo son los siguientes:

- i. Determinar experimentalmente la vida a la fatiga de bajo ciclaje sin restricción al pandeo de barras de refuerzo disponibles en el mercado.
- ii. Reproducir los ensayos realizados por Barcley y Kowalsky (2019) para estimar la deformación unitaria crítica desarrollada debido al pandeo de las barras.
- iii. Comparar los resultados entre los ensayos con deformación reversible (simétricos) con deformaciones positivas y negativas de igual magnitud y los ensayos con deformación estrictamente positiva (asimétricos).
- iv. Proponer una causa probable de la rotura de las barras de refuerzo longitudinal registrada en las probetas viga-columna.

1.2 Plan de trabajo

El plan de trabajo fue el siguiente:

- i. Recopilar antecedentes bibliográficos con enfoque experimental acerca de la fatiga de bajo número de ciclos de barras de refuerzo susceptibles al pandeo, y de su respuesta monotónica a la compresión.
- ii. Revisar la experimentación previa con probetas viga-columna de refuerzo transversal en 45° , para la definición de parámetros y características de los ensayos.
- iii. Probar un sistema de medición de deformaciones axiales basado en transductores láser de desplazamiento con capacidad de funcionar independientemente de la dirección del pandeo de la barra.
- iv. Con base en los puntos anteriores definir y llevar a cabo un programa de ensayos para estudiar la resistencia a la fatiga de las barras y un programa de ensayos para estudiar la deformación unitaria crítica.
- v. Realizar el análisis de resultados y obtener las conclusiones del trabajo.

1.3 Organización de la memoria

En esta sección se describe brevemente el desarrollo de cada capítulo:

- Capítulo 1: el presente capítulo, contiene la introducción al tema y descripción del problema, objetivos generales y específicos, el plan de trabajo y la organización de la memoria.
- Capítulo 2: describe los antecedentes más relevantes para el desarrollo del presente trabajo, que guardan relación con la fatiga de bajo ciclaje de barras de refuerzo susceptibles al pandeo y con la deformación por flexión crítica (Barcley y Kowalsky, 2019).
- Capítulo 3: describe las características y propiedades más importantes de los materiales, equipos e instrumentos utilizados, junto con el detalle de los procedimientos seguidos para la realización de los ensayos y la adquisición de datos.
- Capítulo 4: entrega los resultados de los ensayos y se hacen los comentarios correspondientes para cada caso sobre los fenómenos observados.
- Capítulo 5: presenta las conclusiones obtenidas, recomendaciones y limitaciones del trabajo realizado.

CAPITULO 2

Estado del Arte

No es raro que estructuras de hormigón armado diseñadas para responder predominantemente en flexión durante un evento sísmico, al contrario de lo esperado, fallen en forma frágil por fractura de sus barras de refuerzo debido al daño por fatiga de bajo ciclaje ocasionado por el pandeo de éstas, motivado por la pérdida del recubrimiento y un refuerzo transversal insuficiente que proporciona una inadecuada restricción lateral.

2.1 Fatiga de bajo ciclaje en barras de refuerzo

La expresión se refiere a la falla prematura de las barras de los elementos de hormigón armado sometidos a sollicitaciones cíclicas importantes, como suele suceder durante un sismo, en que el acero de refuerzo es sometido a grandes reversiones de tracción-compresión.

La norma ASTM E606 define como rotura por fatiga de bajo ciclaje los casos en que el número de ciclos para la rotura es inferior a 5000.

La Figura 5 esquematiza las curvas de resistencia a la fatiga (S-N) típicas de aleaciones férricas y no férricas. Como se puede apreciar, a medida que la tensión disminuye la vida a la fatiga aumenta. Sin embargo, las curvas S-N de las aleaciones férricas, a diferencia de las aleaciones no férricas, presentan un “límite de fatiga” bajo el cual no se produce el agotamiento.

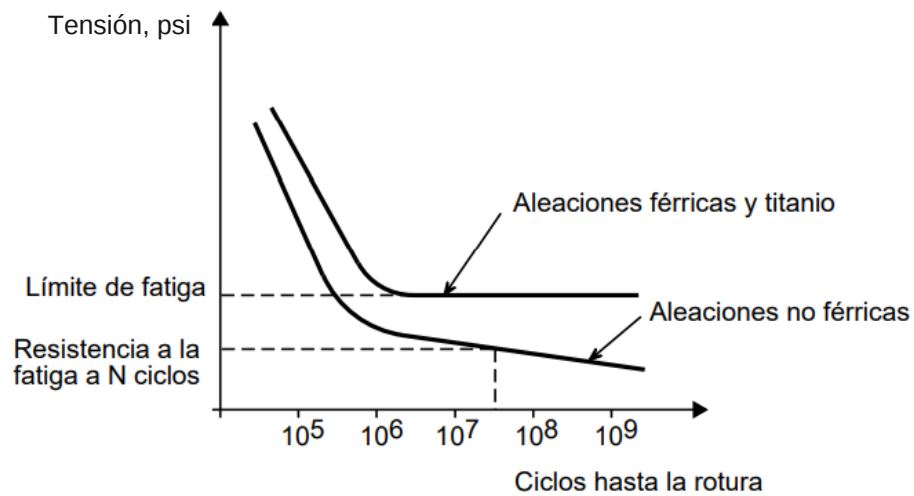


Figura 5. Esquema de las curvas S-N para aleaciones férricas y no férricas. (ITEA, 2002)

La falla por fatiga del acero comienza como un deslizamiento de la estructura cristalina, formando planos extrusivos e intrusivos (Fig. 6). Este daño generalmente se manifiesta como discontinuidades superficiales microscópicas en la superficie del material, seguida por el inicio de la grieta en la intrusión que luego crece de forma progresiva hasta que el elemento no tiene capacidad de soportar el esfuerzo aplicado, rompiéndose en forma instantánea (R. Estrada, 2003).

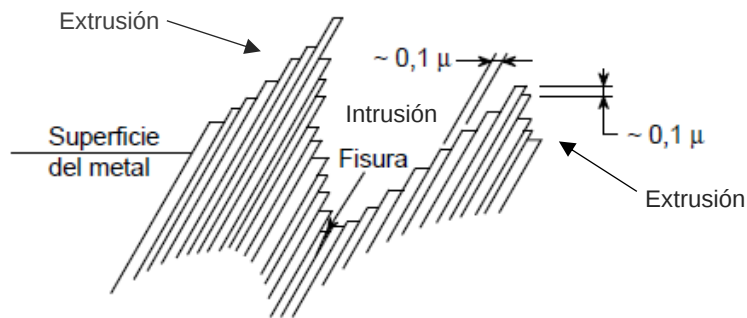


Figura 6. Banda de deslizamiento con extrusiones e intrusiones generadas en la superficie del acero sometido a carga cíclica.

2.2 Ensayos de fatiga de bajo ciclaje

En la Figura 7 se representa una caracterización de la secuencia de un ciclo tracción-compresión de un ensayo de fatiga de una barra esbelta.

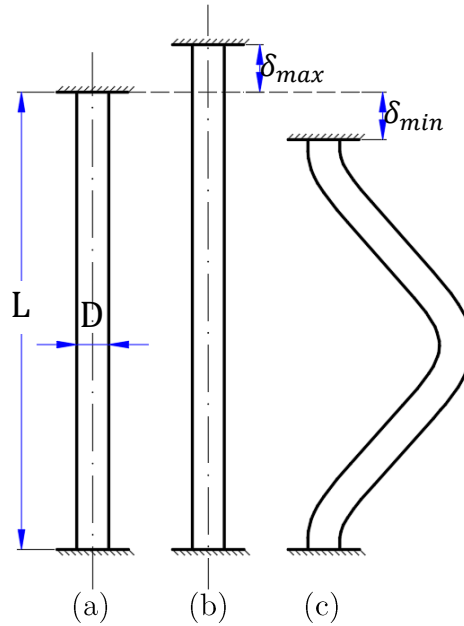


Figura 7. Etapas de un ciclo de fatiga de una barra esbelta: (a) barra de largo L y diámetro D en posición no deformada; (b) barra en posición de deformación unitaria máxima en tracción; y (c) barra en posición de deformación unitaria máxima en compresión.

Donde:

- L = largo original de la barra medido entre mordazas
- D = diámetro nominal de la barra
- δ_{max} = deformación máxima en tracción > 0
- δ_{min} = deformación máxima en compresión < 0

La carga aplicada en los ensayos realizados en el presente trabajo corresponde a una historia deformación-tiempo sinusoidal con deformación media constante, tal como se ilustra en la Figura 8.

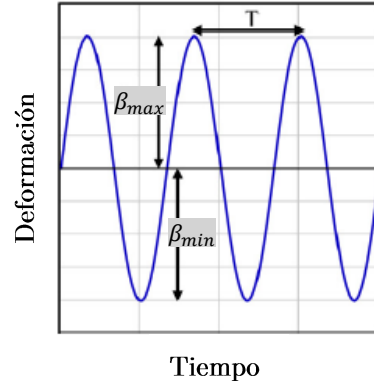


Figura 8. Patrón de carga de amplitud constante.

Para definir el patrón de carga de amplitud constante se emplean los siguientes parámetros:

- β_{max} = deformación unitaria máxima = δ_{max}/L
- β_{min} = deformación unitaria mínima = δ_{min}/L
- β_m = deformación unitaria media = $(\beta_{max} + \beta_{min})/2$
- β_a = amplitud de la deformación unitaria = $(\beta_{max} - \beta_{min})/2$
- R = razón de deformación = β_{min}/β_{max}
- F = frecuencia = $1/T$
- T = periodo

En la Figura 9 se muestran distintos patrones de la razón de deformación, R , concepto que se utilizará para caracterizar la sollicitación.

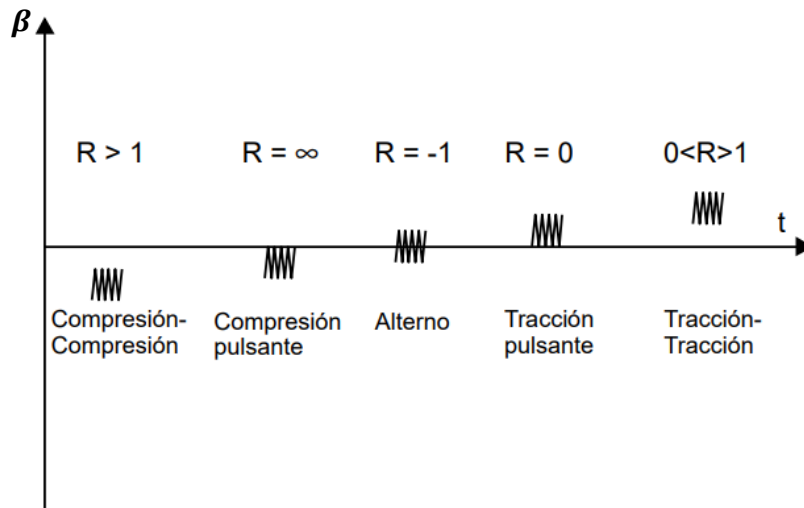


Figura 9. Patrones de carga de amplitud constante con diferentes valores de R .

En una columna de hormigón armado sometida a flexión cíclica, la posición del eje neutro se encuentra comúnmente alrededor de la mitad de la sección de la columna, tal que niveles crecientes de desplazamientos laterales inducen esfuerzos crecientes en las regiones de compresión y tracción del elemento y el patrón de carga es más bien simétrico ($R = -1$). En una viga de hormigón armado sometida a flexión cíclica, el eje neutro se ubica típicamente próximo a la fibra extrema comprimida, con pequeñas deformaciones en el acero de la región en compresión, es decir, el patrón de carga es asimétrico ($R \leq 0$).

Con respecto a la fatiga de materiales metálicos, la frecuencia con que se aplica la carga no es un parámetro importante, excepto a altas temperaturas, cuando la fluencia interactúa con la fatiga, o cuando la corrosión influye sobre la vida a la fatiga. En ambos casos, una mayor frecuencia resulta en una menor vida a la fatiga. (ITEA, 2002)

2.3 Deformación unitaria crítica por flexión

La fractura del acero de refuerzo longitudinal debido a la fatiga de bajo ciclaje es uno de los modos de falla prominentes para los elementos de flexión. Este comportamiento es típico de las vigas y columnas en los marcos de los edificios, donde se pueden esperar grandes amplitudes de deformación cíclica de hasta 6% en zonas de riesgo sísmico medio a alto (Mander et al., 1994).

Brown y Kunnath (2004) llevaron a cabo una serie de experimentos en barras de refuerzo de diversos diámetros, con el objetivo de comprender la falla por fatiga de bajo ciclaje de las barras en regiones de rótula plástica, llegando a la conclusión que el pandeo da como resultado una importante reducción de la vida de fatiga debido al debilitamiento del material en la zona crítica. Años más tarde, Ghannoum y Slavin (2016) también observaron una reducción en la capacidad de fatiga de bajo ciclaje para el refuerzo más propenso a pandearse.

En general, pareciera existir un consenso entre los investigadores en cuanto a que, en presencia de pandeo, las grietas por fatiga se forman en la superficie del refuerzo en el lado cóncavo de la región pandeada (Restrepo-Posada et al., 1992; Kashani et al., 2015; Tripathi et al., 2018; Ghannoum et al., 2019). También se ha podido observar que el agrietamiento incipiente se inicia en la raíz de los resaltos de las barras nervadas (Erasmus, 1981; Restrepo-Posada et al., 1992; Ghannoum et al., 2019).

A través de un modelo de elementos finitos, Zheng y Abel (1998) observaron que los esfuerzos en la base del resalte podrían llegar a ser el doble del esfuerzo global en la barra bajo cargas cíclicas. Restrepo-Posada et al. (1992) sugirieron que existe un “pandeo crítico” donde las demandas de deformación por compresión, en el caso de carga alternada, excederían la capacidad del material causando una falla frágil bajo carga de tracción en el ciclo siguiente. Esta hipótesis indica que, si una barra de refuerzo pandeada excede cierta “deformación unitaria crítica de pandeo por flexión”, la barra experimentará una fractura frágil al cargarse después en tracción. Esto

significaría que la deformación unitaria crítica de pandeo por flexión, no la fatiga de bajo ciclaje, debería ser la medida principal del desempeño cíclico de acero de refuerzo.

2.3.1 Ensayo BBT de Barcley y Kowalsky (2019)

Los autores desarrollaron un ensayo monotónico denominado ensayo de tracción de barra pandeada o ensayo BBT (Buckled Bar Tension), a través del cual comprobaron que la rotura del refuerzo longitudinal está influenciada por el pandeo experimentado por el acero de refuerzo. En dicha prueba cada espécimen fue sometido a una demanda de curvatura diferente, para luego ser traccionado hasta la rotura. Estimaron la deformación unitaria máxima de pandeo por flexión desarrollada en cada barra y midieron su elongación a la falla (EAF), es decir, el cambio en la razón entre el largo en el momento de la fractura y la longitud inicial del espécimen.

Dos modos de falla fueron observados en un ensayo BBT. El primero fue un modo de falla “dúctil” en el cual el espécimen experimentó EAF similar a un ensayo de tracción uniaxial y exhibió angostamiento antes de la fractura. (Fig. 10(a)). La falla frágil ocurrió cuando la EAF fue menor que los resultados típicos de un ensayo de tracción uniaxial y la superficie de falla fue plana (Fig. 10(b)).

Luego de un número razonable de pruebas determinaron la deformación por flexión crítica debida al pandeo, la cual equivale a la deformación unitaria máxima por flexión que representa la transición de una falla dúctil a frágil.

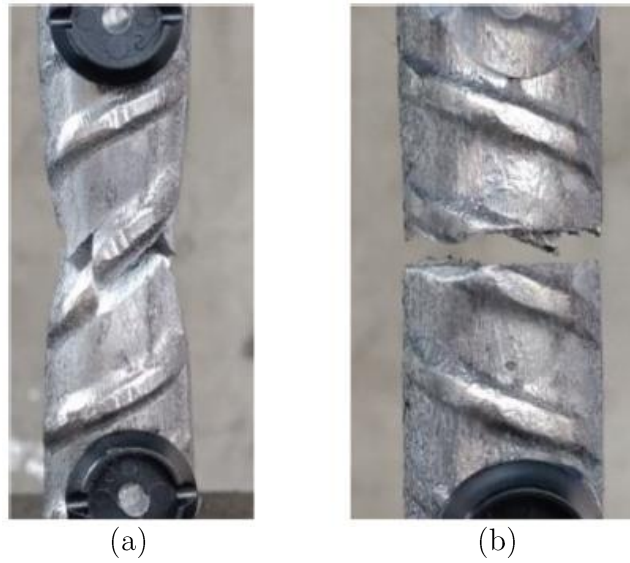


Figura 10. (a) Modo de falla dúctil; y (b) Modo de falla frágil. (Barcley y Kowalsky, 2019)

En la Figura 11 se presentan los resultados del ensayo BBT realizado sobre barras de refuerzo No. 6 (19 mm) A706 Grado 60 (420 MPa) y A706 Grado 80 (550 MPa). Se pudo reconocer que la falla dúctil se presentó cuando la EAF fue mayor que 0.10, y la falla frágil se dio si la EAF estuvo por debajo de 0.08. Las barras que tuvieron una EAF entre estos límites presentaron en algunos casos superficies de falla plana y en otros “con cuello”, franja que denominaron zona de transición.

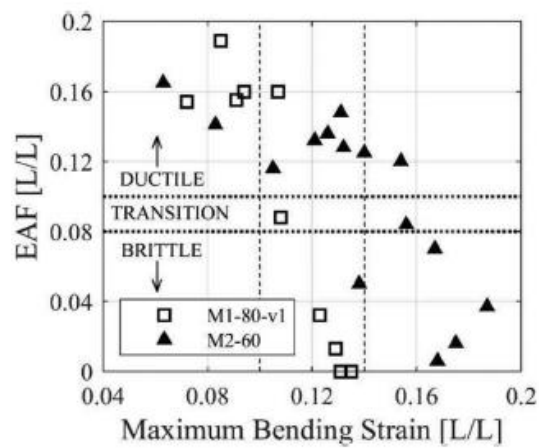


Figura 11. Resultados del ensayo BBT para barras de refuerzo Grado 60 (420 MPa) y Grado 80 (550 MPa). (Barcley y Kowalsky, 2019)

Los especímenes de barra de refuerzo Grado 80 (550 MPa) tuvieron una deformación por flexión crítica más baja (aproximadamente 0.10) que las barras Grado 60 (420 MPa) (aproximadamente 0.14).

CAPITULO 3

Descripción de los Ensayos

3.1 Materiales y equipos utilizados

3.1.1 Aceros

Se trabajó con barras de acero de refuerzo grado A630-420H de la norma NCh204 y AT56-50H de la norma NCh1173, cuyas respectivas propiedades mecánicas nominales se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas nominales de los aceros empleados en este estudio.

Fabricante	AZA	CAP	ACMA
Denominación	A630-420H	A630-420H	AT56-50H
Diámetro nominal	8 mm	8 mm	8 mm
Esfuerzo de fluencia nominal (f_y)	420 MPa	420 MPa	500 MPa
Esfuerzo de rotura nominal (f_u)	630 MPa	630 MPa	560 MPa

Las barras de refuerzo AZA y CAP empleadas en este estudio satisfacen las exigencias de ductilidad en obras proyectadas para zonas de alto nivel sísmico. Las barras de refuerzo ACMA, en cambio, son barras de alta resistencia y baja ductilidad cuya aplicación se limita al hormigón armado en estructuras solicitadas por cargas preponderantemente estáticas.

En la Figura 12 se presentan las curvas esfuerzo (f) versus deformación unitaria (ϵ) aplicada al realizar ensayos de tracción axial simple sobre muestras de barras de los aceros considerados en este estudio.

Debido a la falta de material durante la experimentación se tuvo que adquirir una partida adicional de acero AZA la cual se compró al mismo proveedor, observándose diferencias en las propiedades respecto a la primera (Fig. 12). Las partidas AZA (1) y AZA (2) se usaron para desarrollar los ensayos de fatiga (simétricos y asimétricos) y los ensayos BBT, respectivamente.

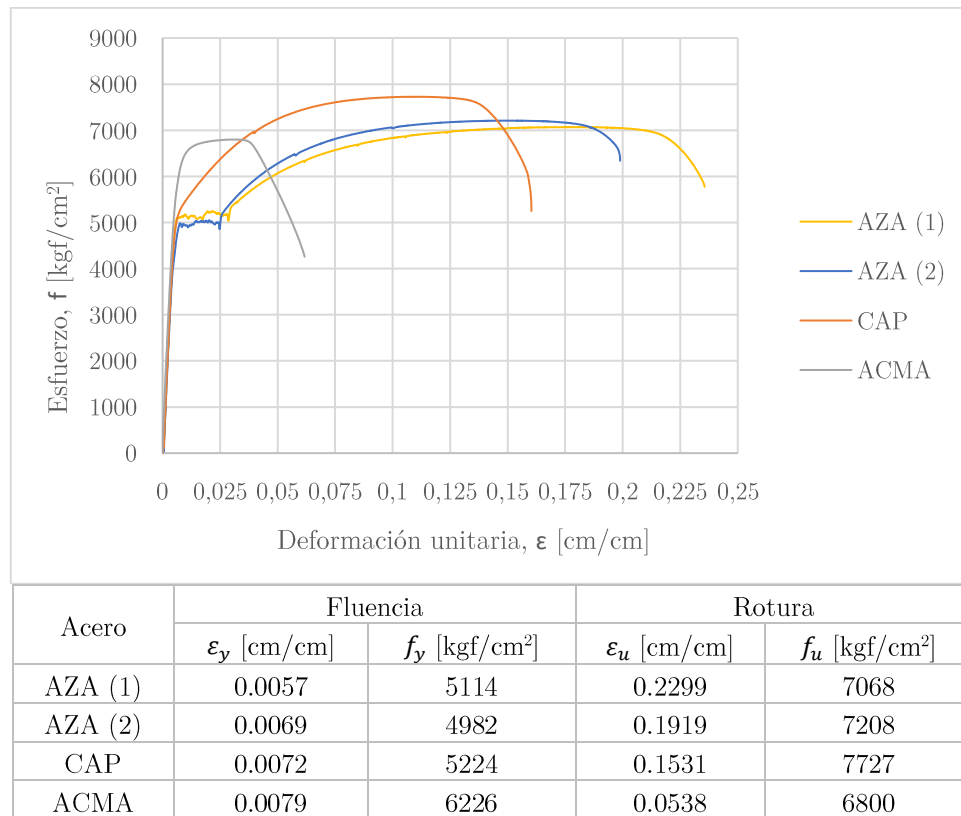


Figura 12. Curvas esfuerzo vs deformación para una longitud de barra de 11.5 cm de los aceros considerados en este estudio.

Nótese que las barras ACMA tienen una baja ductilidad y muy poco endurecimiento por deformación comparado con los aceros AZA y CAP. Observar también que las barras AZA, a diferencia de las CAP, presentan una meseta de fluencia bien definida.

En la Figura 13 se detallan los largos (L) de las barras ensayadas y sus respectivas esbelteces (L/D) aproximadas. Para las pruebas de fatiga se emplearon todos los largos especificados (L_1 , L_2 y L_3), donde la mayor longitud (L_1) se eligió para establecer comparaciones con los datos medidos en el trabajo de Rojas H. (2022), el menor largo (L_3) se seleccionó en correspondencia con la longitud de pandeo del refuerzo observada en las probetas viga-columna ensayadas en la UTFSM, y se decidió incorporar un largo intermedio (L_2) entre ambas longitudes. En tanto que, para el ensayo BBT, solo se utilizaron barras de largo L_1 por representar una esbeltez similar al de las barras ensayadas por Barclay y Kowalsky (2019).

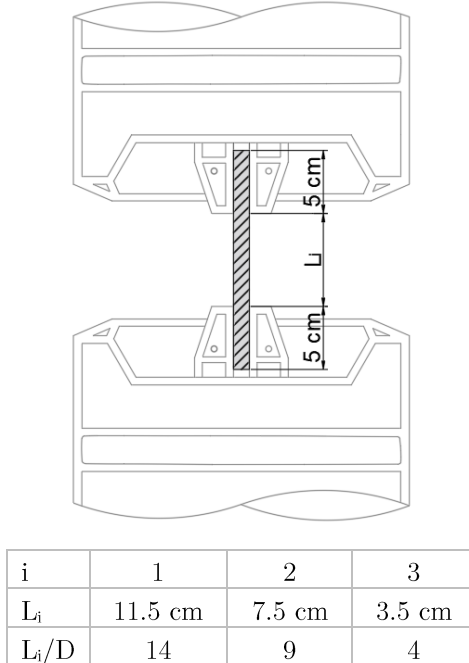


Figura 13. Largos de las barras ensayadas y longitudes de agarre en la MTS 810.

3.1.2 Descripción del sistema de ensayo

Los ensayos se realizaron utilizando la máquina MTS 810 (Fig. 14) del Laboratorio de Ingeniería Sismorresistente de la UTFSM, la cual cuenta con mordazas hidráulicas adecuadas para aplicar cargas de fatiga y proporciona un control preciso de la deformación o fuerza en las pruebas, según sea requerido.



Figura 14. Máquina MTS 810.

El controlador MTS 407 (Fig. 15) del sistema, en conjunto con el software integrado, permiten ajustar la velocidad de carga, la deformación unitaria máxima deseada y la posición inicial de las mordazas, de acuerdo con las características de cada ensayo. Complementariamente, se utilizó un sistema de adquisición de datos MCC 1608FS con el programa Tracer DAQ Pro para graficar en tiempo real las mediciones.

En los ensayos cíclicos se decidió aplicar la carga con una frecuencia de 1 Hz, similar a los ensayos cíclicos de las probetas con estribos inclinados que motivaron este programa, y los ensayos de tracción simple se ejecutaron por conveniencia a razón constante de 10 mm/min.



Figura 15. Controlador MTS 407.

3.1.3 Transductores láser de desplazamiento

Para medir las deformaciones de las barras en los ensayos de fatiga, se usaron dos transductores láser de desplazamiento Keyence IA-030 (Fig. 16(a)) con amplificador modelo IA-1000 (Fig. 16(b)). Estos transductores se clasifican como Clase 1, lo que, a diferencia de otros láseres, permite su manipulación sin la necesidad de tomar mayores precauciones de seguridad. Además, las pequeñas dimensiones del cabezal (36 mm x 48.5 mm x 22.6 mm) junto a su ligero peso (50 g), lo convirtieron en un instrumento conveniente para el montaje de las experiencias.

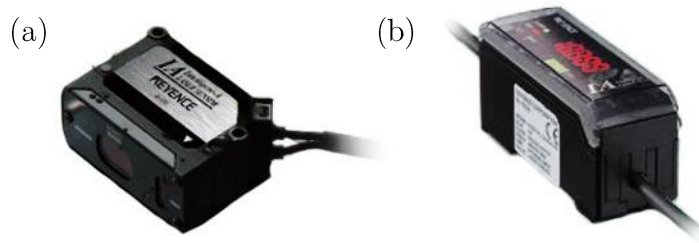


Figura 16. (a) Sensor Láser CMOS Analógico IA-030; y (b) Amplificador IA-1000.

El “transmisor láser” de estos transductores emite un haz de luz contra una *superficie de reflectancia*, la cual debe estar situada dentro del rango de medición del instrumento, es decir, entre 20 a 45 mm de distancia (de referencia 30 mm). Esto ocasiona el rebote del haz de luz pudiendo ser detectado por el “receptor láser”. Para una mayor confiabilidad en las mediciones, se dispusieron simétricamente dos transductores láser, como se detalla en el inciso 3.2.1. Las señales de voltaje entregadas por ambos se convierten a mm multiplicándolos por la constante proporcionada por el fabricante y posteriormente promediados entre sí.

Estos transductores láser se implementaron debido a la necesidad de emplear un sistema de medición más confiable que el interno de la máquina MTS cuando se aplicaron desplazamientos de mordaza (δ) igual o menores a 1 mm en los ensayos de fatiga. Esto porque la señal de desplazamiento entregada por la máquina MTS 810 proviene de un transductor interno que mide el desplazamiento del cilindro, el cual, además de la deformación de la barra que se prueba, incluye también el deslizamiento de la barra en las mordazas y la deformación de la misma máquina. Por otra parte, el rango de medición, de casi 15 cm, hace desconfiar de su resolución para este uso, y aunque está disponible un rango de mayor precisión, no se usó aquí por problemas de operación.

3.2 Montaje e instrumentación

3.2.1 Ensayos de fatiga

Después de varios intentos buscando la mejor forma de realizar este ensayo, a continuación, se describe el procedimiento del montaje e instrumentación usado y recomendado:

- i. Posicionar verticalmente la barra en las mordazas de la máquina MTS, respetando la longitud de agarre.
- ii. Fijar los transductores láser en los extremos de la viga de sostenimiento según sea el largo de la barra a ensayar (ver Figs. 13, 14 y 15).
- iii. Acoplar la viga de sostenimiento a la mordaza superior por medio de un imán posicionado en su punto medio.
- iv. Adherir el objeto de reflectancia a la mordaza inferior de acuerdo con las Figuras 17, 18 o 19, según corresponda.
- v. Conectar el sistema de medición láser (transductor y amplificador) a la fuente de poder y chequear, tanto que el rayo láser coincida con la superficie de reflectancia, como que la distancia de medición se encuentre en torno a la mitad del rango admisible de los transductores.
- vi. Conectar los transductores láser al sistema de adquisición de datos.
- vii. Ajustar la máquina MTS en alta presión y bloquear las mordazas.
- viii. Conectar el monitor situado tras el espécimen de prueba y posicionar convenientemente la cámara de video.

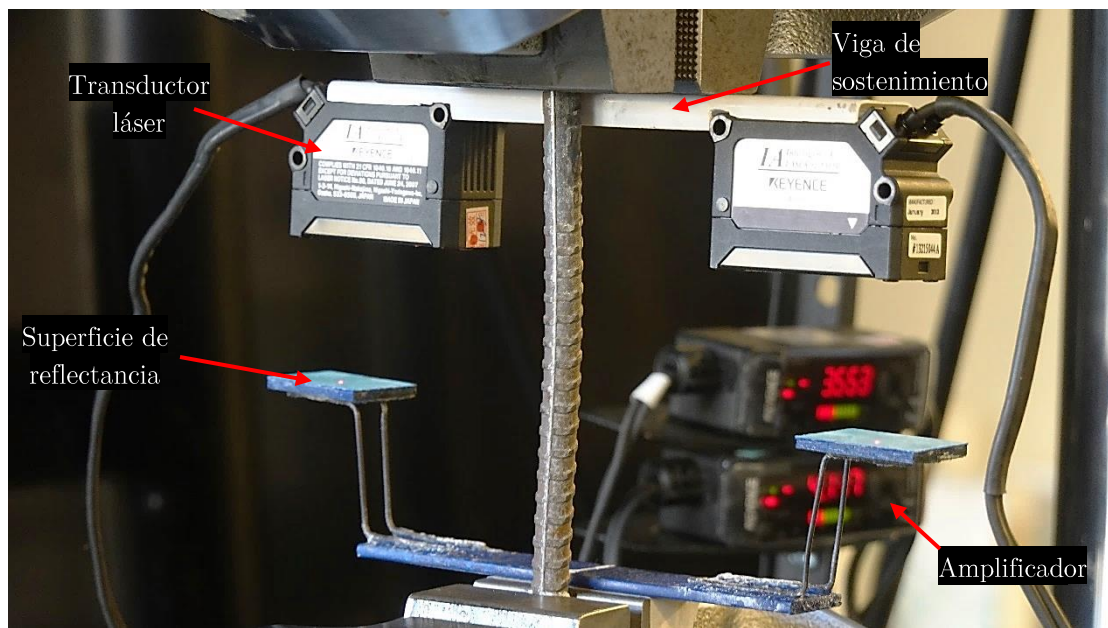


Figura 17. Montaje e instrumentación utilizada en los ensayos de fatiga de las barras largas ($L/D = 14$).

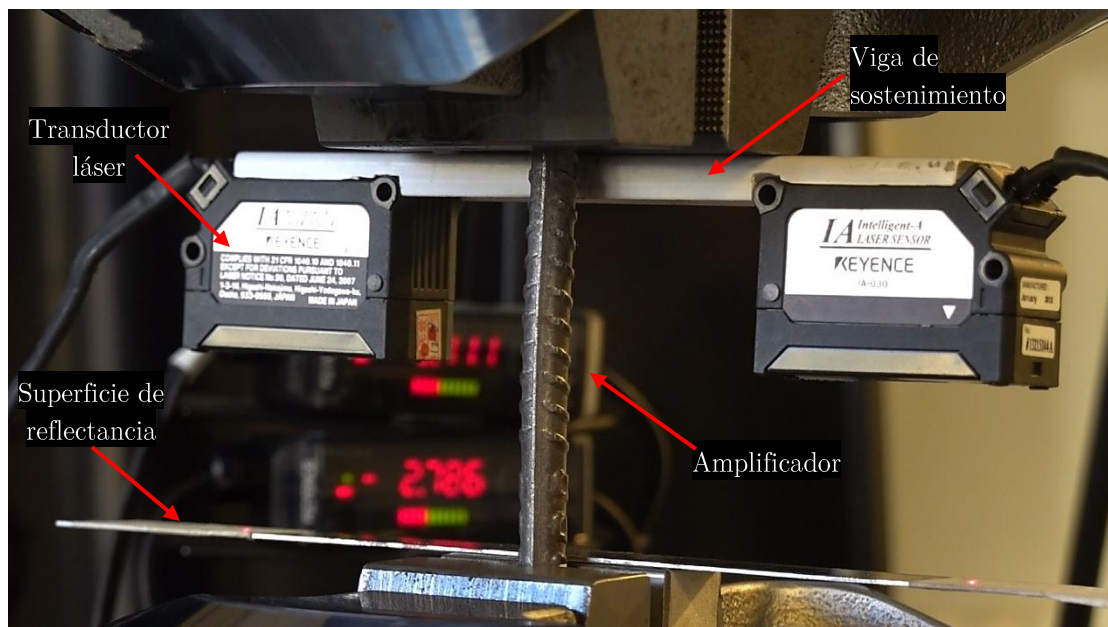


Figura 18. Montaje e instrumentación utilizada en los ensayos de fatiga de las barras medianas ($L/D = 9$).

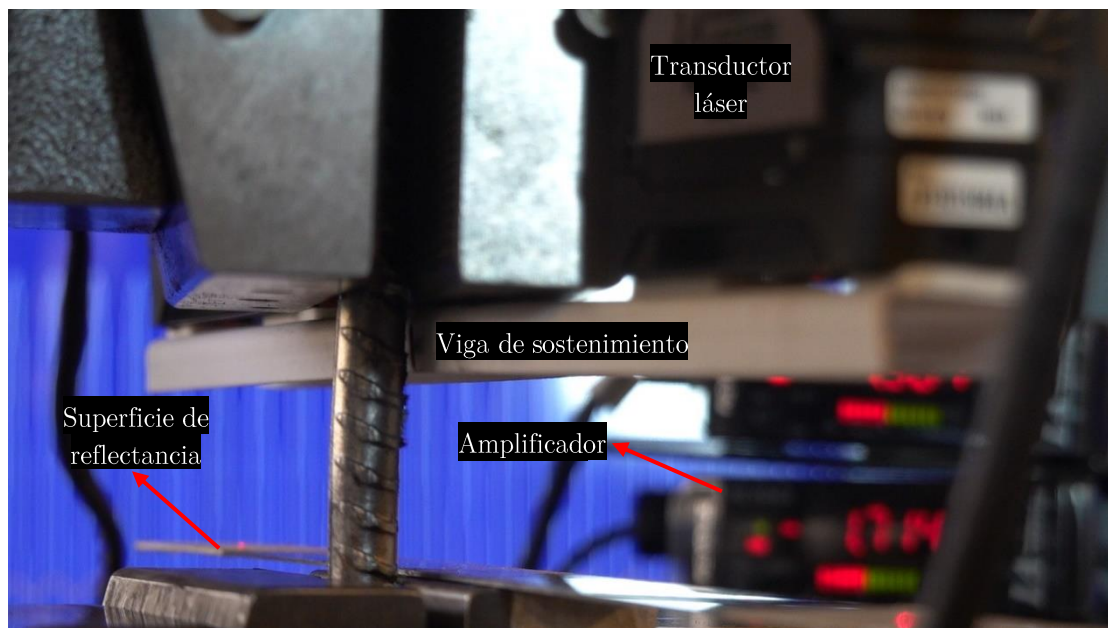


Figura 19. Montaje e instrumentación utilizada en los ensayos de fatiga de las barras cortas ($L/D = 4$).

En la Figura 20 se puede ver un diagrama del sistema de ensayo.

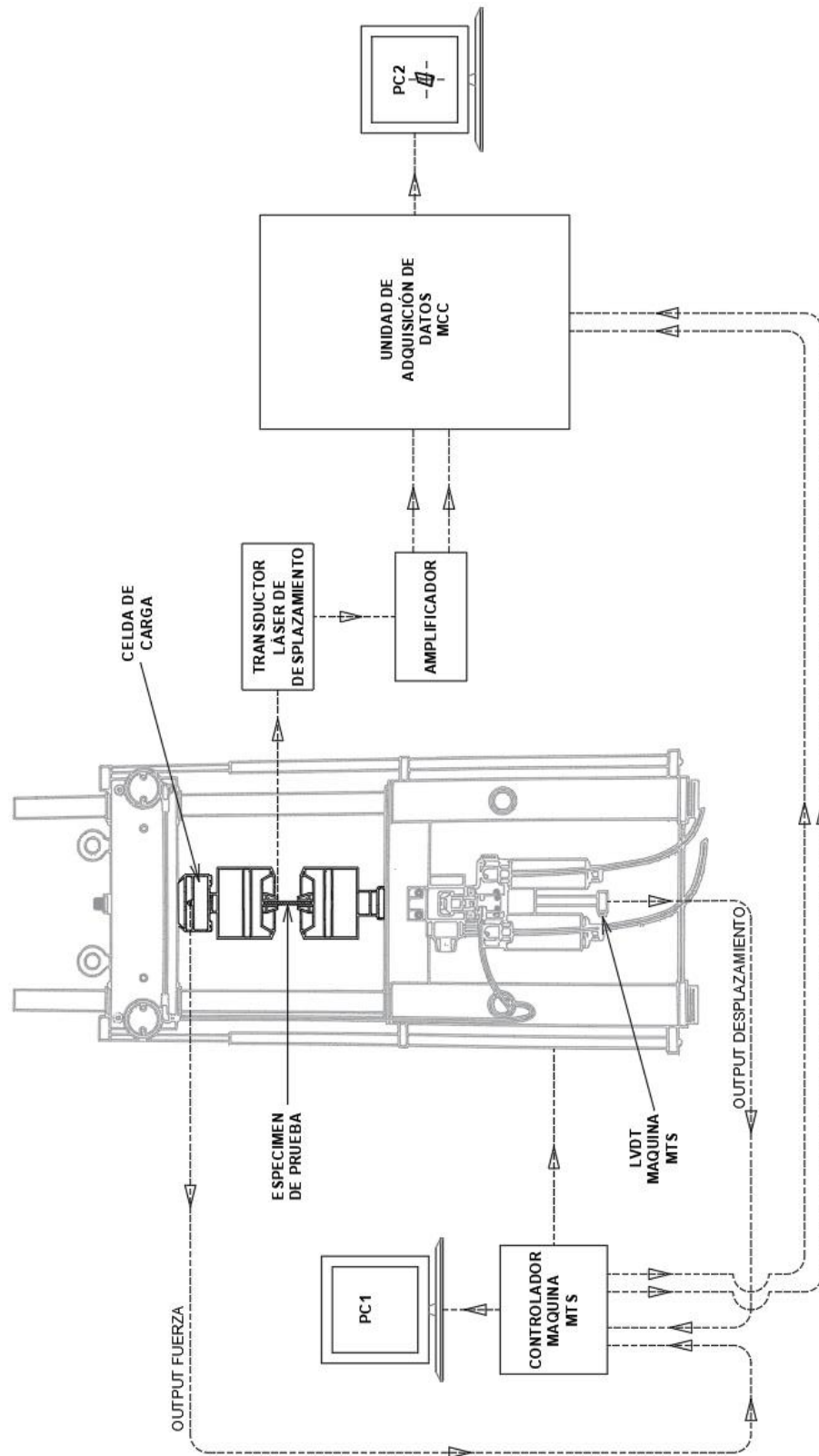


Figura 20. Diagrama unilineal del sistema de ensayo.

3.2.2 Ensayos BBT

El montaje e instrumentación de los ensayos BBT consistió en:

- i. Posicionar verticalmente la barra de prueba en la máquina de ensayo MTS, cuidando de hacer calzar las marcas en la barra que delimitan la longitud de agarre con los bordes de la cuña.
- ii. Ajustar el equipo de ensayo MTS en alta presión y bloquear las mordazas.
- iii. Posicionar la cámara fotográfica en dirección perpendicular al plano donde aproximadamente se espera que la barra pandee (Fig. 21(a)).
- iv. Abatir la cámara hacia atrás o hacia adelante hasta hacer coincidir el eje vertical de la grilla del visor de la cámara con el eje vertical de la barra (Fig. 21(b)).

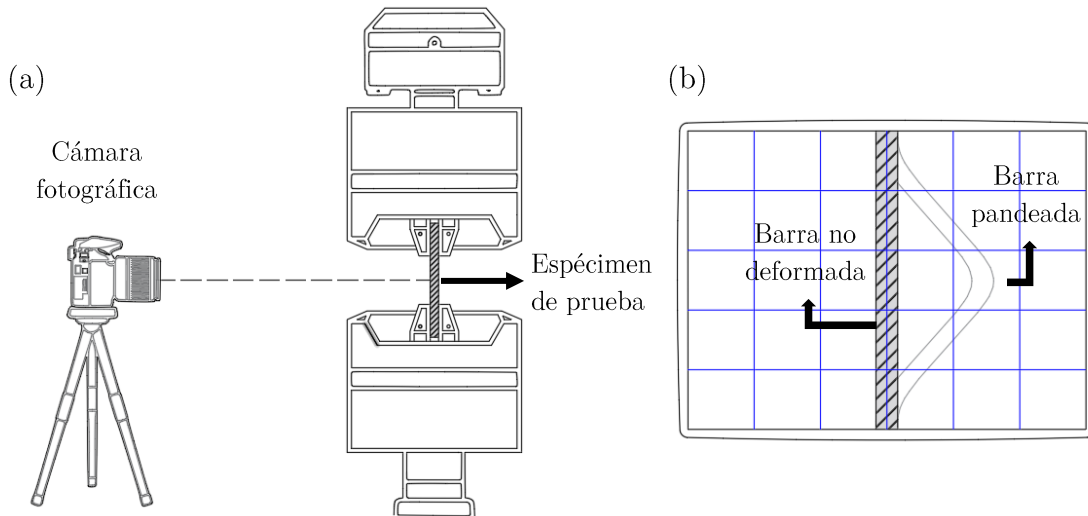


Figura 21. Esquema del montaje de un ensayo BBT: (a) Posicionamiento de la cámara fotográfica; y (b) Visor de la cámara fotográfica.

La Figura 22 representa una vista en perspectiva del ensayo BBT durante el procedimiento experimental.

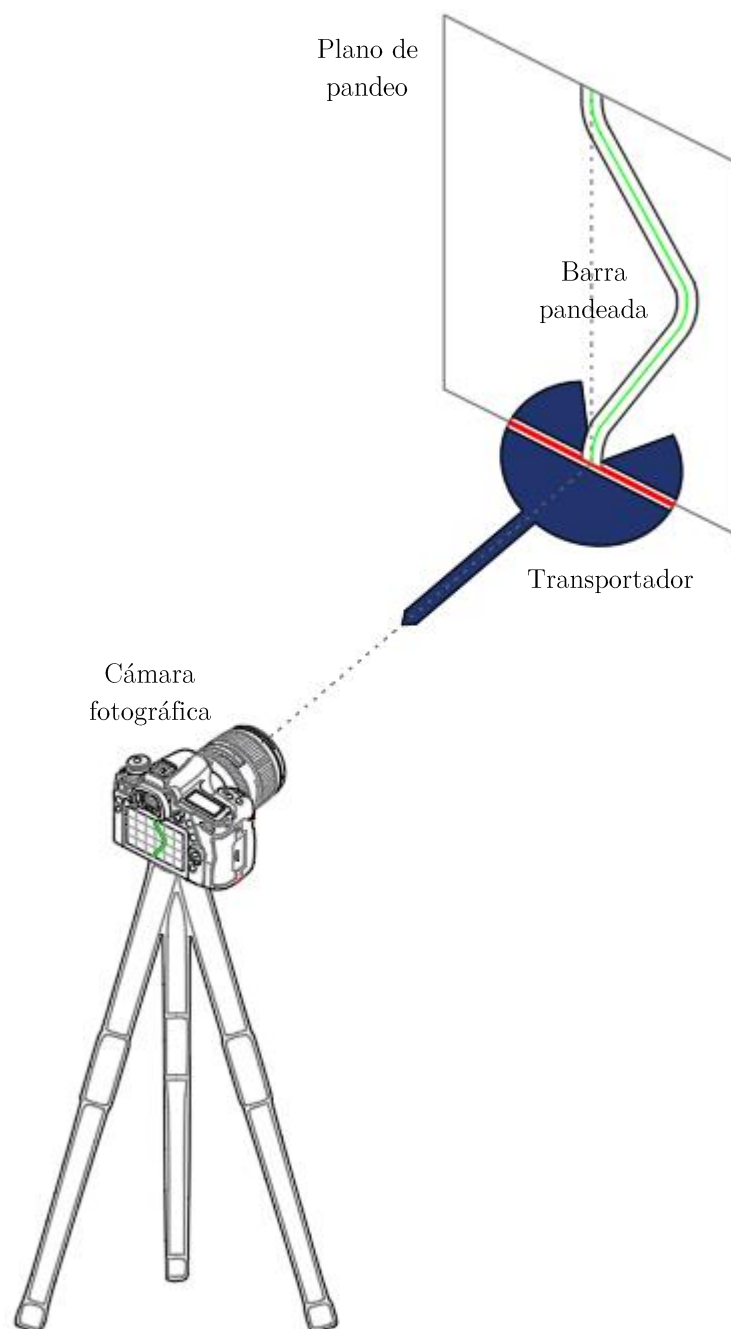


Figura 22. Esquema en perspectiva del ensayo BBT.

Nótese el uso de un transportador, instrumento desmontable utilizado de apoyo para definir el plano de pandeo de la barra. Su modo de empleo se detalla en el punto 3.3.2.

3.3 Procedimiento experimental

3.3.1 Ensayos de fatiga

A continuación, se describe el procedimiento experimental de un ensayo de fatiga con deformación unitaria del $\beta\%$.

- i. Configurar en el controlador MTS un ensayo de tracción axial simple de la barra de prueba ingresando el desplazamiento de mordazas δ ($\beta = \delta/L$) y una razón de deformación constante igual a 10 mm/min.
- ii. Ingresar al controlador MTS el nivel de deformación de las mordazas δ y la frecuencia de 1 Hz.
- iii. Iniciar la prueba. El ensayo finaliza con la rotura de la barra o al alcanzar los 2000 ciclos, lo que ocurra primero.
- iv. Registrar en la bitácora el número de ciclos ($2N_f$) hasta que la barra se rompe.
- v. Guardar los datos de fuerza y deformación medidos en el PC.
- vi. Desbloquear las mordazas y desmontar los restos de barra con la máquina MTS ajustada en baja presión.

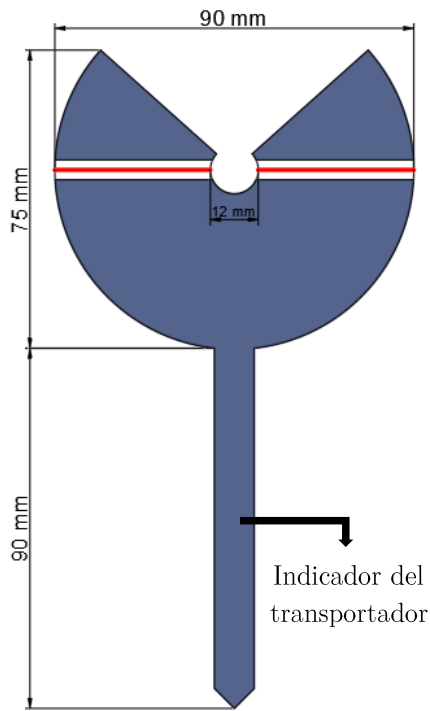
En la secuencia anterior el ensayo de fatiga asimétrico ($R = 0$) parte desde el paso i y el ensayo de fatiga simétrico ($R = -1$) parte desde el paso ii, es decir, el procedimiento de los ensayos de fatiga asimétricos se distingue de los ensayos simétricos por la aplicación de una pre-tracción, la cual se introduce para generar la asimetría deseada.

Como se indica en el punto iii, algunos ensayos se finalizaron antes de producirse la rotura de la barra, a los 2000 ciclos, ya que difícilmente en un caso real se alcanzaría dicho número durante la vida útil de la estructura.

3.3.2 Ensayos BBT

El procedimiento experimental del ensayo BBT consistió en:

- i. Compresión de la barra: ingresar en el controlador de la máquina MTS el desplazamiento de las mordazas (δ_{min}) y la razón de deformación igual a 10 mm/min. Hacer funcionar la máquina y, mientras la barra se deforma, determinar la dirección del plano de pandeo y colocar el transportador que se esquematiza en la Figura 23(a). Para ello, se deben alinear las marcas rojas con la dirección en que la barra pandeada se ve recta, tal que el indicador del transportador quede en dirección perpendicular al plano del pandeo.



(a)



(b)

Figura 23. (a) Esquema del transportador; y (b) Posicionamiento de la cámara fotográfica.

Cabe señalar que los niveles de compresión se fueron definiendo en función de los datos medidos al término de cada ensayo, con el fin de asegurar una adecuada distribución de puntos que permitiera determinar la deformación unitaria crítica buscada.

- ii. Captura de barra pandeada: mediante la instrucción *hold* de la máquina se detiene el movimiento de la mordaza un tiempo suficiente para corregir la posición de la cámara con respecto al indicador del transportador (ver Fig. 23(b)), quitar el instrumento y fotografiar el espécimen pandeado. En la Figura 24 se presenta un ejemplo de captura de barra pandeada.

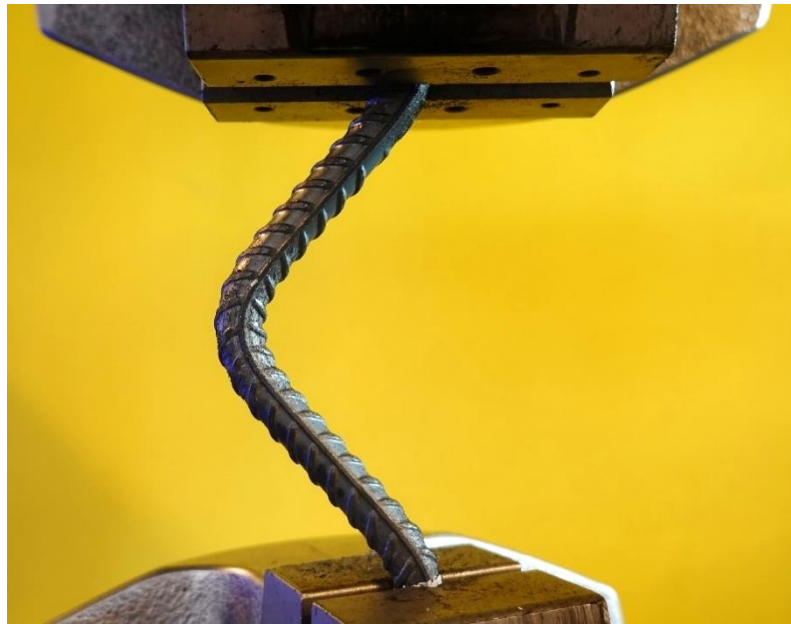


Figura 24. Barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 19.4\%$ de compresión.

- iii. Tracción de la barra: configurar la tracción de la barra de modo de llevarla hasta la rotura a una razón de deformación de 10 mm/min.

La elongación a la falla (EAF) fue medida por la máquina MTS y considerada como el estiramiento de la barra al momento de la rotura normalizada por su longitud original (no deformada).

La deformación unitaria máxima por flexión de la barra debido al pandeo fue estimada mediante la medición de los desplazamientos horizontales del espécimen utilizando AutoCAD desde las imágenes obtenidas en la etapa ii del procedimiento descrito anteriormente. Estas mediciones se realizaron en siete puntos sobre el eje neutro de la barra distribuidos simétricamente con respecto al punto de máximo desplazamiento horizontal, con una separación de 5 mm. El eje neutro se estimó a través de la mitad de los trazos diametrales dibujados perpendicularmente respecto al contorno del espécimen. En la Figura 25 se presenta un ejemplo de lo descrito.



Figura 25. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 19.4\%$ de compresión (unidades en mm).

A los puntos medidos se les aplicó un ajuste polinómico de segundo grado como representación de la posición de la barra $\omega(x)$. A partir de la cual, se aplicó la teoría de viga de Euler-Bernoulli (Ec. 1) para estimar la curvatura de la sección.

$$\varphi = \frac{\omega''(x)}{[1 + \omega'(x)^2]^{3/2}} \approx \omega''(x), \quad (1)$$

donde:

- φ = curvatura de la sección de la barra.
- $\omega(x)$ = posición de la barra.

La justificación a la aproximación es que la pendiente de la posición de la barra $\omega'(x)$ en el punto de máxima curvatura se aproxima a cero. Por lo tanto, la deformación unitaria máxima por flexión en la sección transversal se calcula como la curvatura máxima (φ) multiplicada por la mitad del diámetro de la barra ($D/2$).

Como resultado de la experimentación, se obtuvieron fallas muy similares a las obtenidas por Barclay y Kowalsky (2019), las cuales fueron descritas en el Capítulo 2. En la siguiente figura se presenta un par de ejemplos de estas.

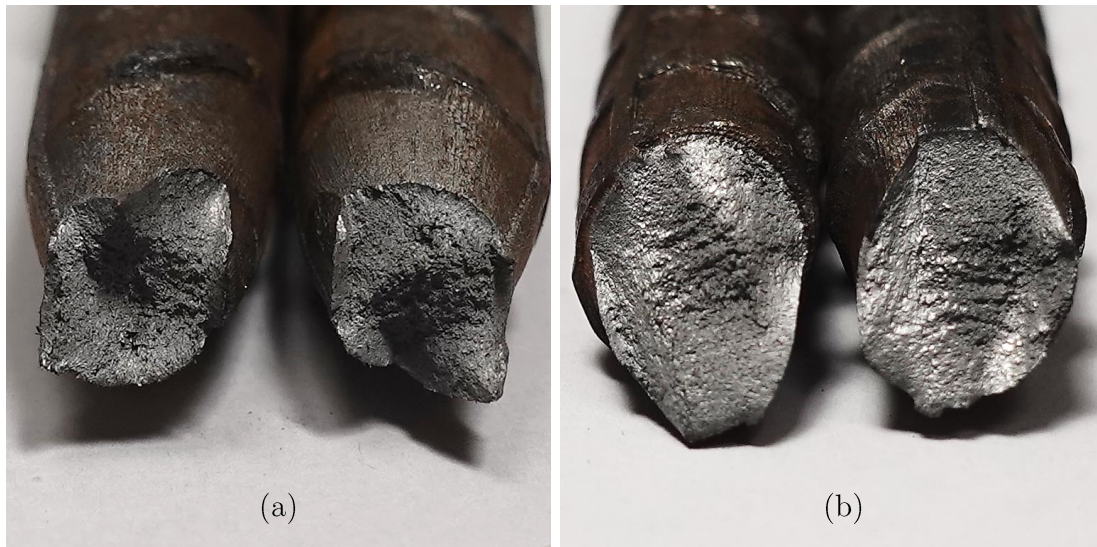


Figura 26. Superficies de falla obtenidas en un ensayo BBT. (a) Falla dúctil; y (b) Falla frágil.

CAPITULO 4

Presentación de Resultados

4.1 Comportamiento cíclico

4.1.1 Ensayos de fatiga simétricos

Las siguientes figuras representan el comportamiento de la respuesta cíclica de las barras de refuerzo ensayadas con carga simétrica ($R = -1$).

Acero AZA

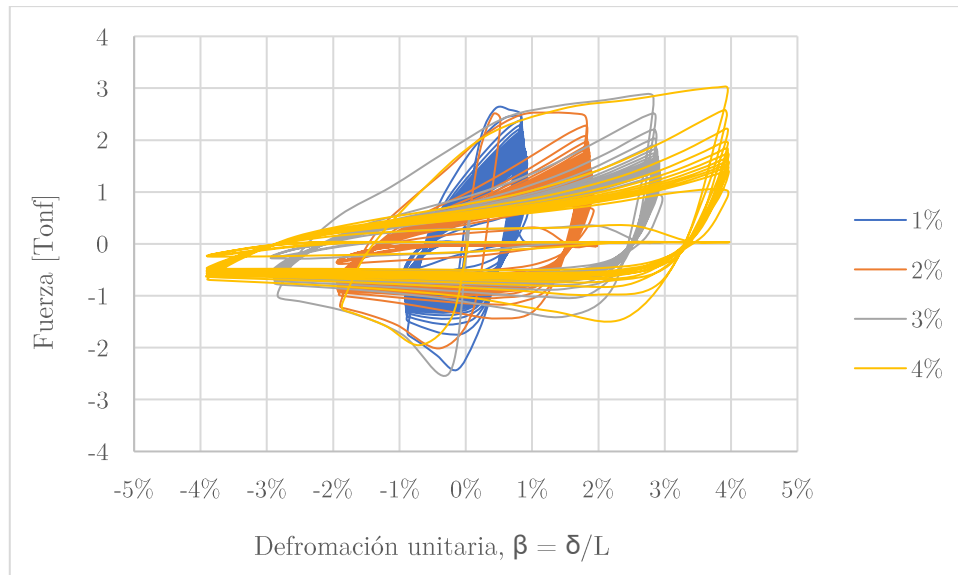


Figura 27. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cuatro barras AZA con razón de esbeltez (L/D) 14 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3% y 4%.

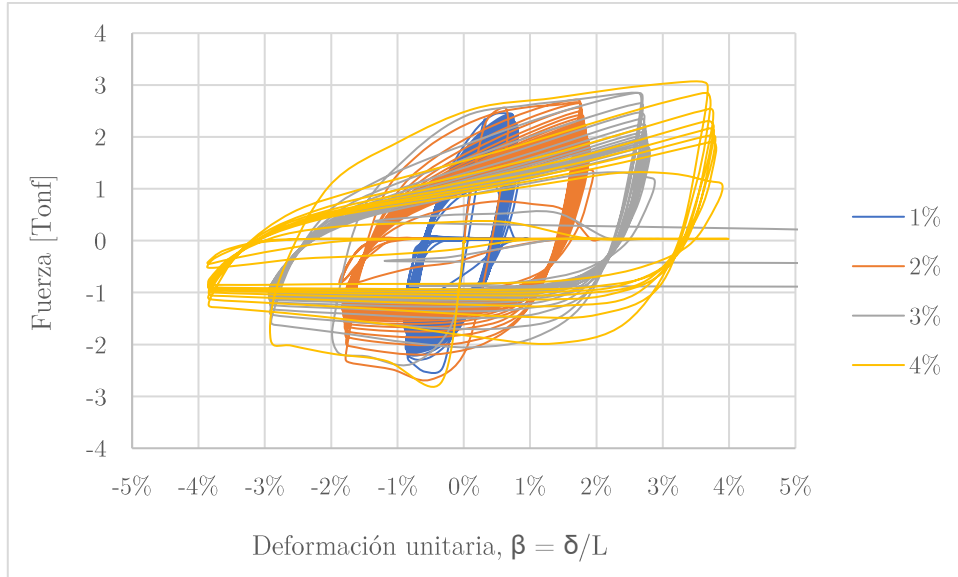


Figura 28. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cuatro barras AZA con razón de esbeltez (L/D) 9 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3% y 4%.

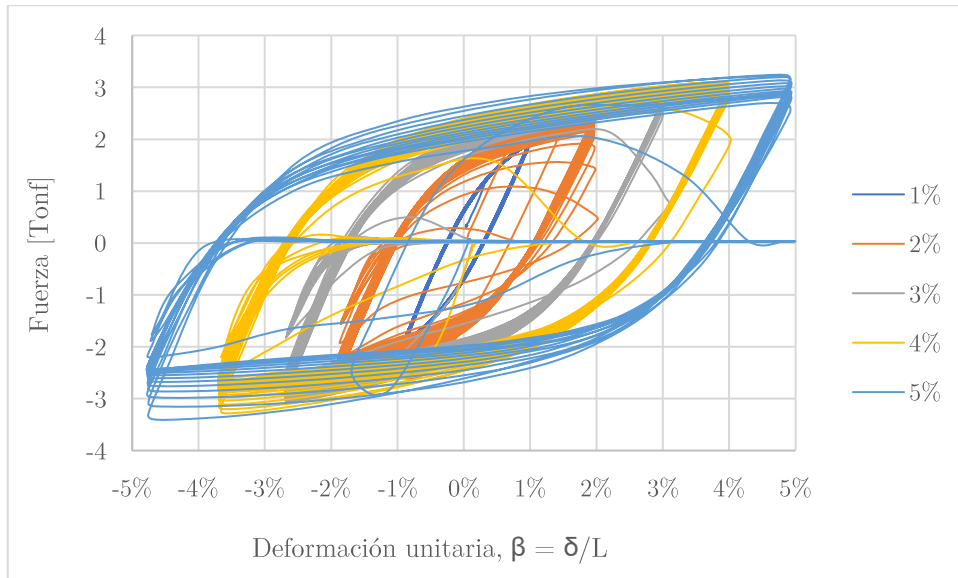


Figura 29. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cinco barras AZA con razón de esbeltez (L/D) 4 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3%, 4% y 5%.

Acero CAP

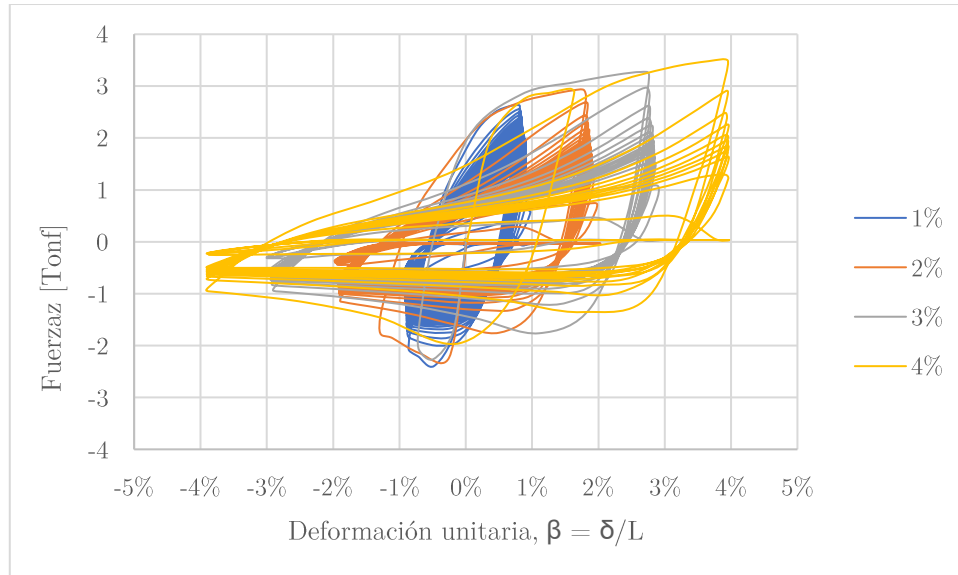


Figura 30. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cuatro barras CAP con razón de esbeltez (L/D) 14 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3% y 4%.

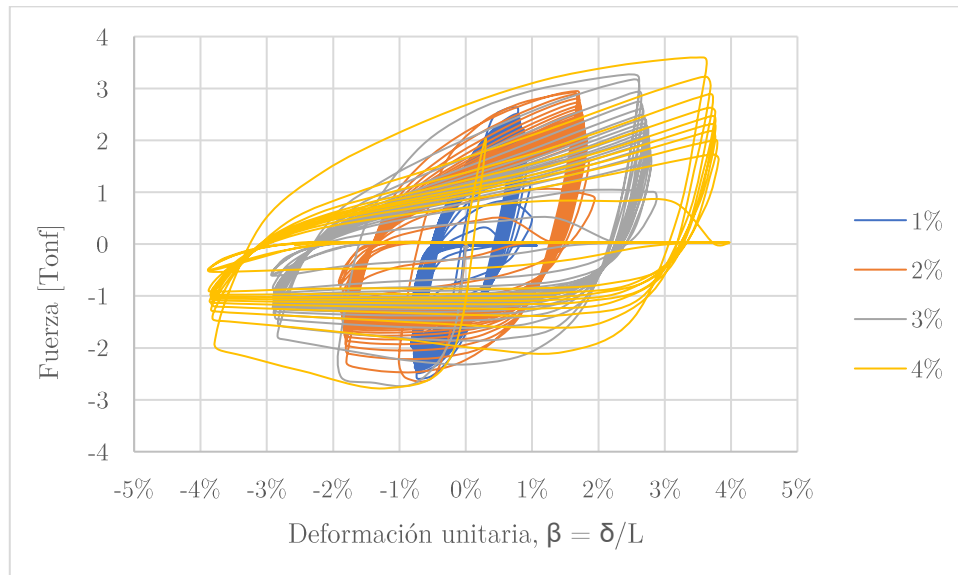


Figura 31. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cuatro barras CAP con razón de esbeltez (L/D) 9 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3% y 4%.

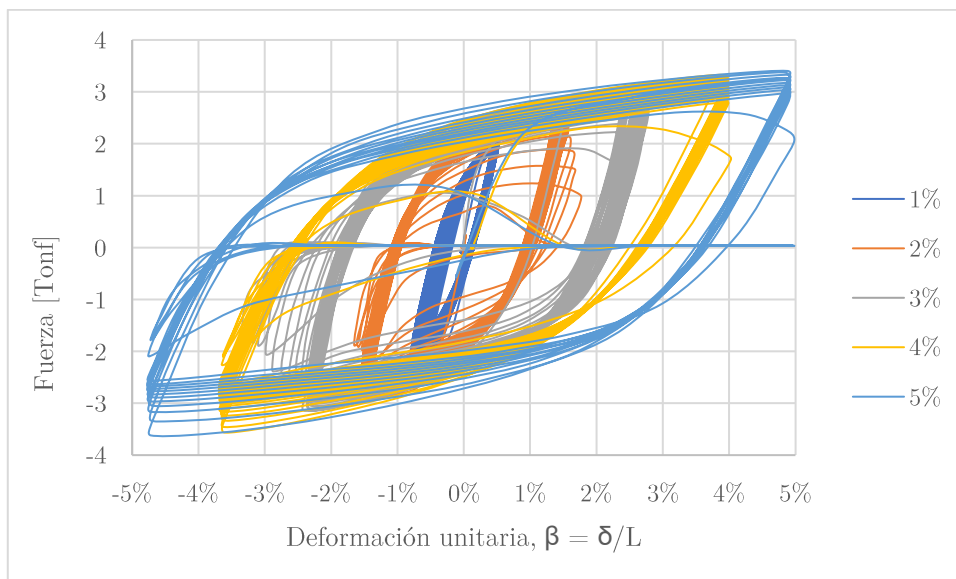


Figura 32. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cinco barras CAP con razón de esbeltez (L/D) 4 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3%, 4% y 5%.

Acero ACMA

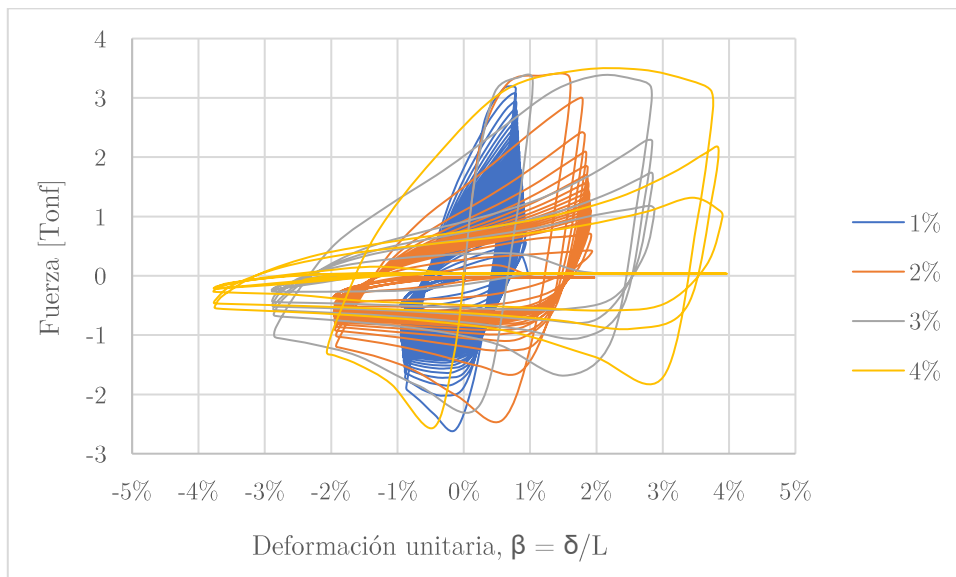


Figura 33. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cuatro barras ACMA con razón de esbeltez (L/D) 14 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3% y 4%.

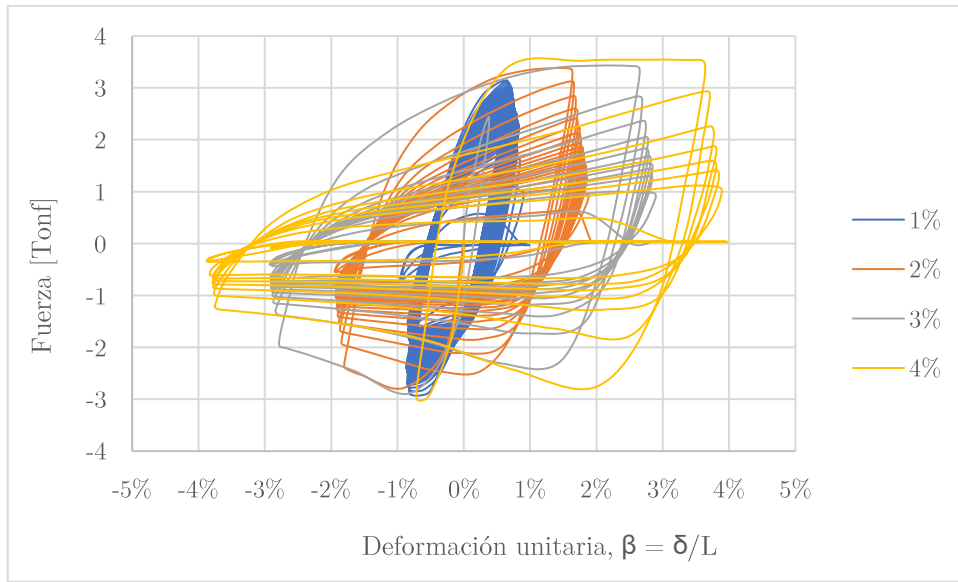


Figura 34. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cuatro barras ACMA con razón de esbeltez (L/D) 9 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3% y 4%.

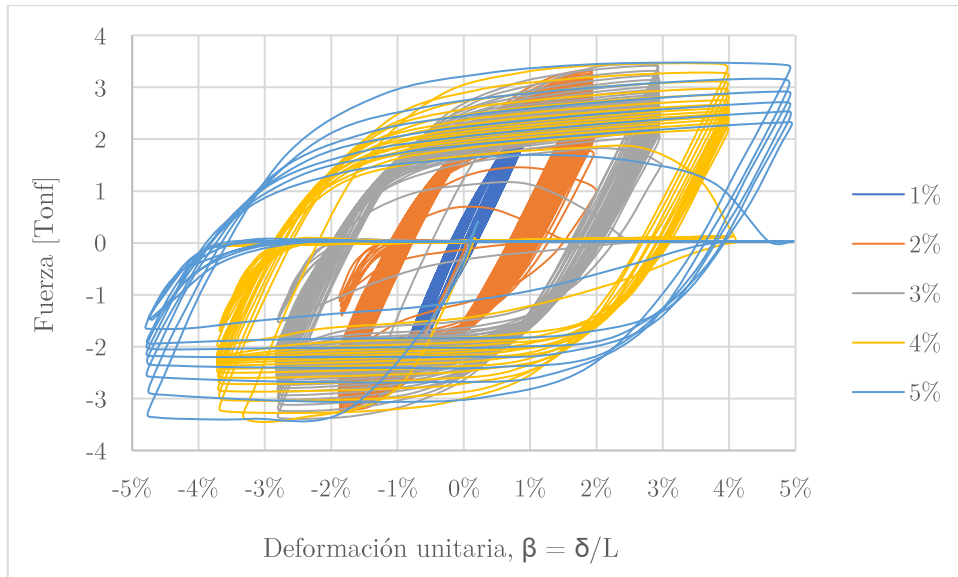


Figura 35. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga simétricos de las cinco barras ACMA con razón de esbeltez (L/D) 4 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3%, 4% y 5%.

4.1.2 Ensayos de fatiga asimétricos

Las siguientes figuras representan el comportamiento de la respuesta cíclica de las barras de refuerzo ensayadas con carga asimétrica ($R = 0$).

Acero AZA

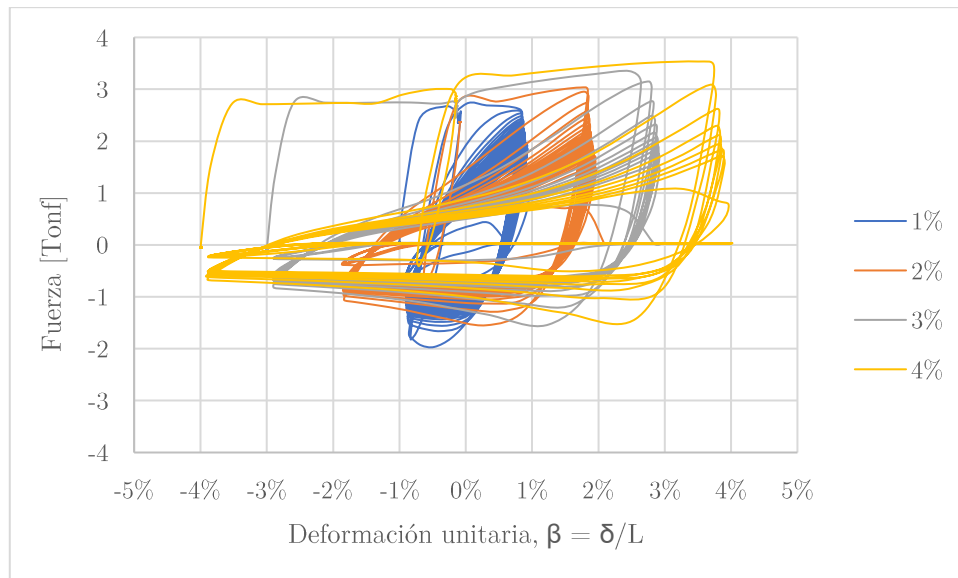


Figura 36. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga asimétricos de las cinco barras AZA con razón de esbeltez (L/D) 14 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3%, y 4%.

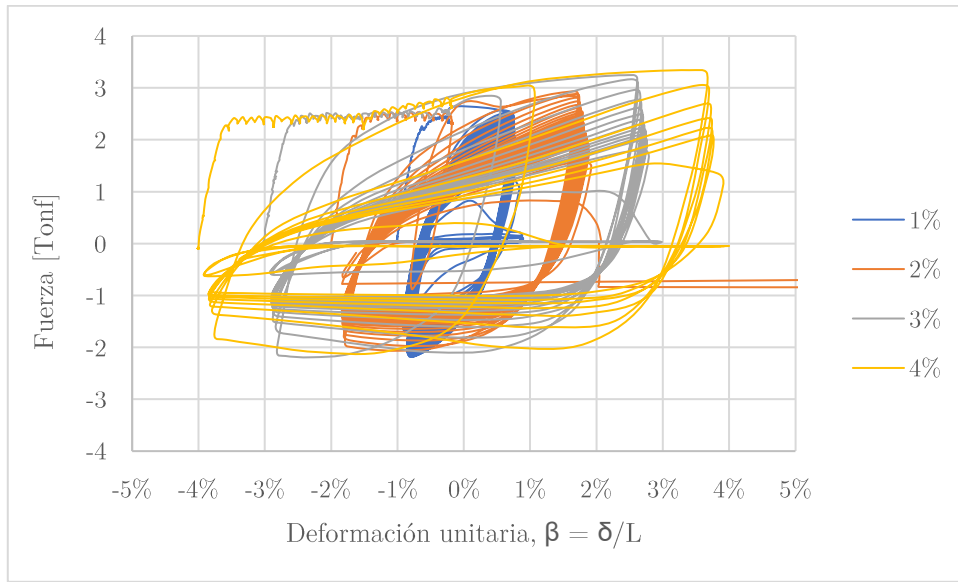


Figura 37. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga asimétricos de las cinco barras AZA con razón de esbeltez (L/D) 9 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3%, y 4%.

Acero CAP

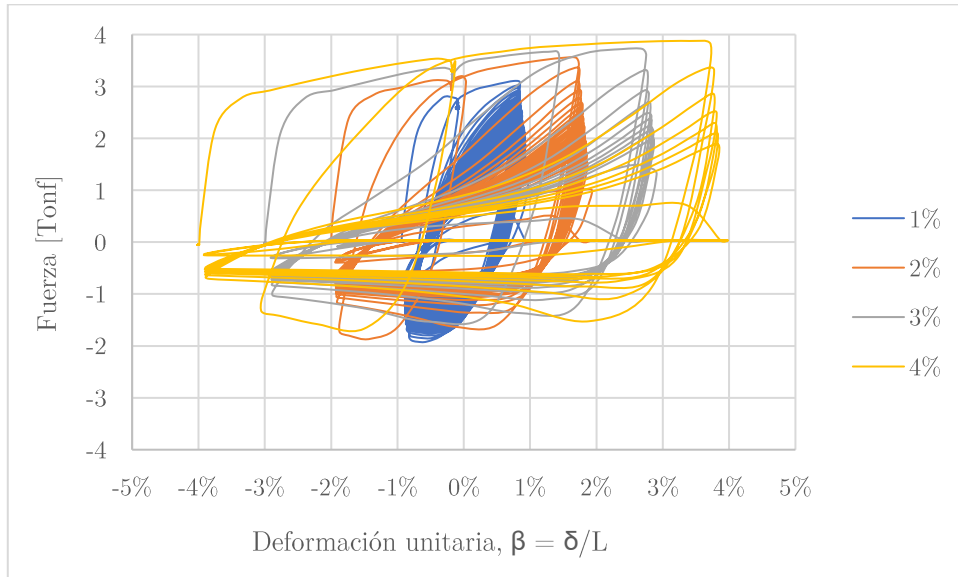


Figura 38. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga asimétricos de las cinco barras CAP con razón de esbeltez (L/D) 14 y deformaciones unitarias (β) de 1%, 2%, 3%, y 4%.

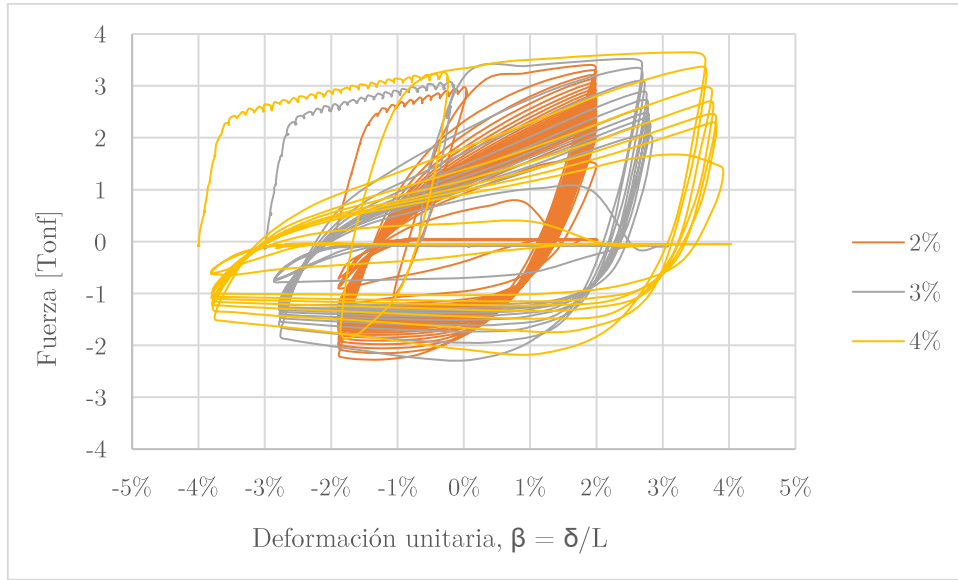


Figura 39. Diagramas de histéresis hasta la rotura de los ensayos de fatiga asimétricos de las cinco barras CAP con razón de esbeltez (L/D) 9 y deformaciones unitarias (β) de 2%, 3%, y 4%.

- En general, se puede observar un comportamiento cíclico similar entre los aceros estudiados, siendo AZA y CAP los materiales con mejor desempeño tal como era esperado.
- Para $L/D = 14$ se observa una clara contracción de las curvas de histéresis y una degradación significativa de la resistencia luego del primer ciclo (Fig. 27).
- Para $L/D = 9$ la contracción de los ciclos de histéresis se puede apreciar en las curvas con deformaciones unitarias superiores al 1% (Fig. 28) excepto para acero ACMA, en que esto ocurrió en todos los casos.
- En las curvas donde existió contracción de los ciclos de histéresis, la resistencia a la compresión disminuyó más rápidamente que la resistencia a la tracción, y, en los casos en que este efecto fue más significativo, las ramas de carga en compresión tendieron a estabilizarse con el aumento de los ciclos.

- Para $L/D = 4$ los ciclos de histéresis fueron más anchos y las curvas resultaron ser simétricas en tracción y compresión, como se muestra en la Figura 29. Se obtuvieron diagramas de histéresis estables cuando se aplicaron deformaciones unitarias (β) de hasta 2% en los aceros AZA y CAP, mientras que en ACMA esto ocurrió solo para el caso con $\beta = 1\%$. Esto significa que, para dichos casos, el efecto del pandeo no fue importante.
- En general, no se observaron mayores diferencias entre el comportamiento cíclico a la fatiga simétrico y asimétrico.

Cabe señalar que la ausencia de la curva de histéresis correspondiente al ensayo asimétrico ($R = 0$) para $\beta = 1\%$ de la barra CAP con $L/D = 9$ se debe al extravío del registro de dichos datos.

4.1.3 Agrietamiento por fatiga

A continuación, se describe el proceso de agrietamiento de las barras de refuerzo utilizando como ejemplo la secuencia registrada durante el ensayo de fatiga simétrico ($R = -1$) de una barra ACMA corta ($L/D = 4$) sometida a una deformación unitaria $\beta = 4\%$. Para ello, se fotografió al espécimen de barra desde la cara interna (lado cóncavo) durante la tracción máxima de los ciclos, como se puede ver en la infografía de la Figuras 40 a 42.

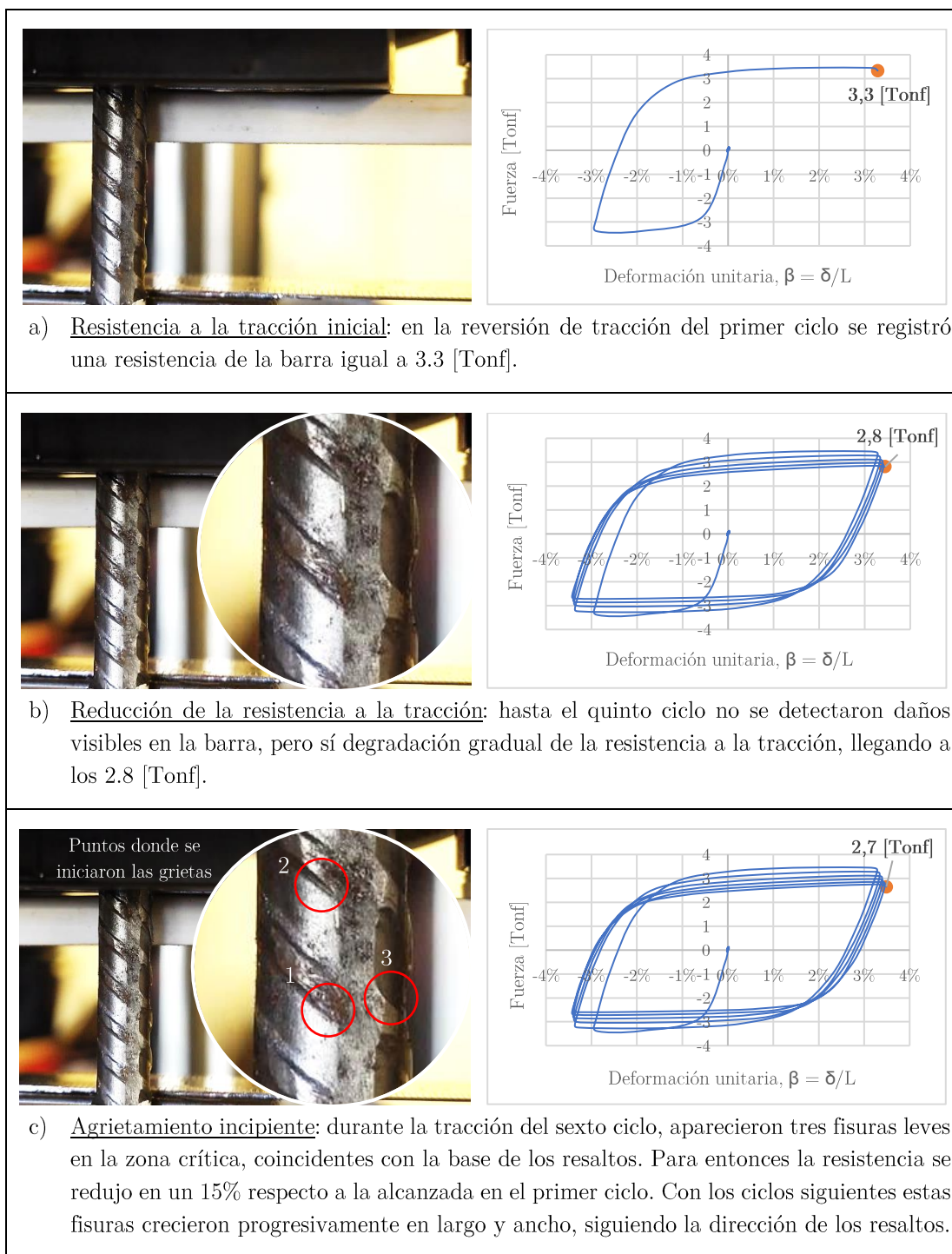


Figura 40. Proceso de agrietamiento de la barra ACMA ($L/D = 4$) durante las reversiones de tracción del ensayo de fatiga simétrico con deformación unitaria $\beta = 4\%$.

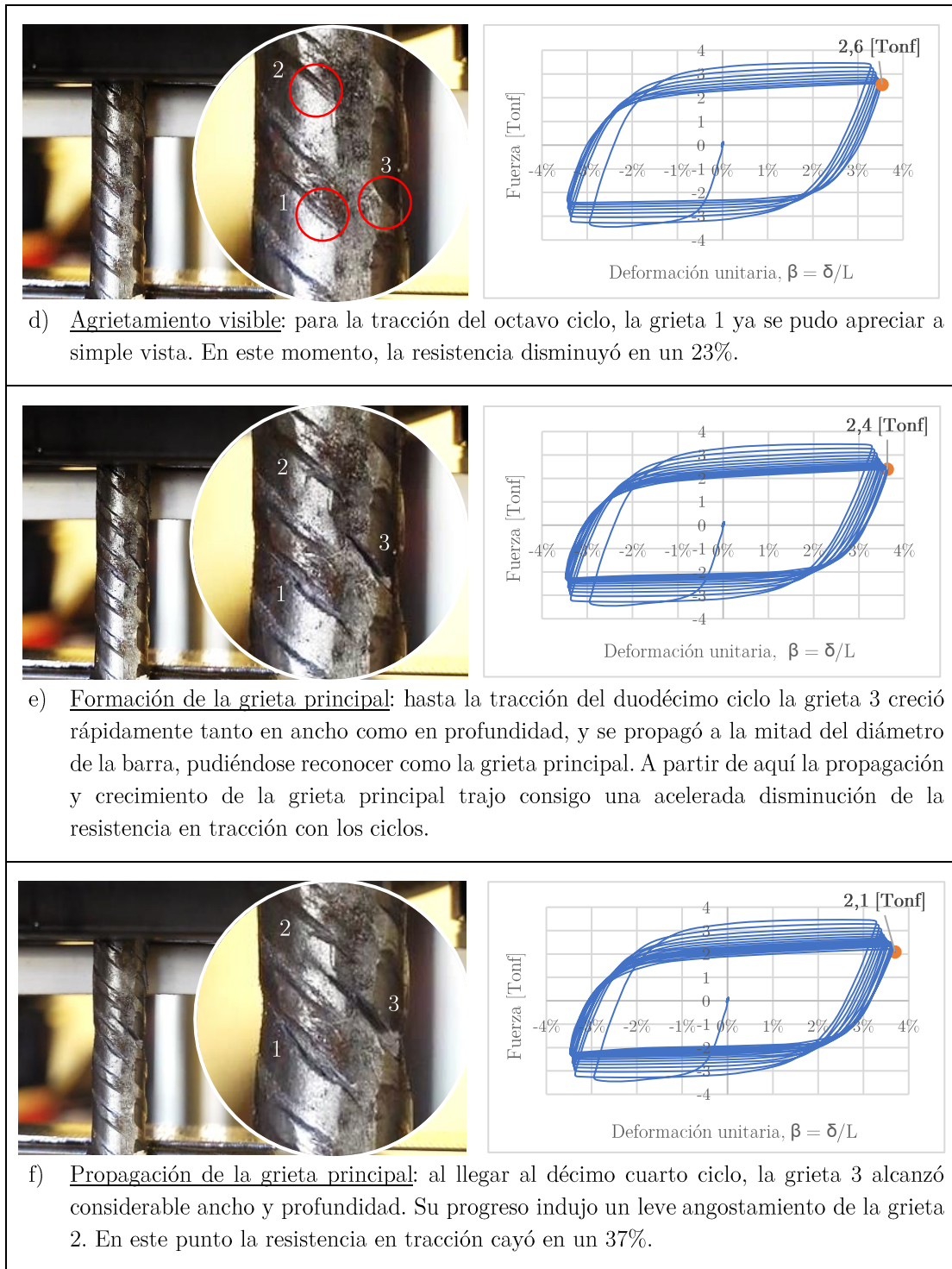


Figura 41. Proceso de agrietamiento de la barra ACMA ($L/D = 4$) durante las reversiones de tracción del ensayo de fatiga simétrico con deformación unitaria $\beta = 4\%$.

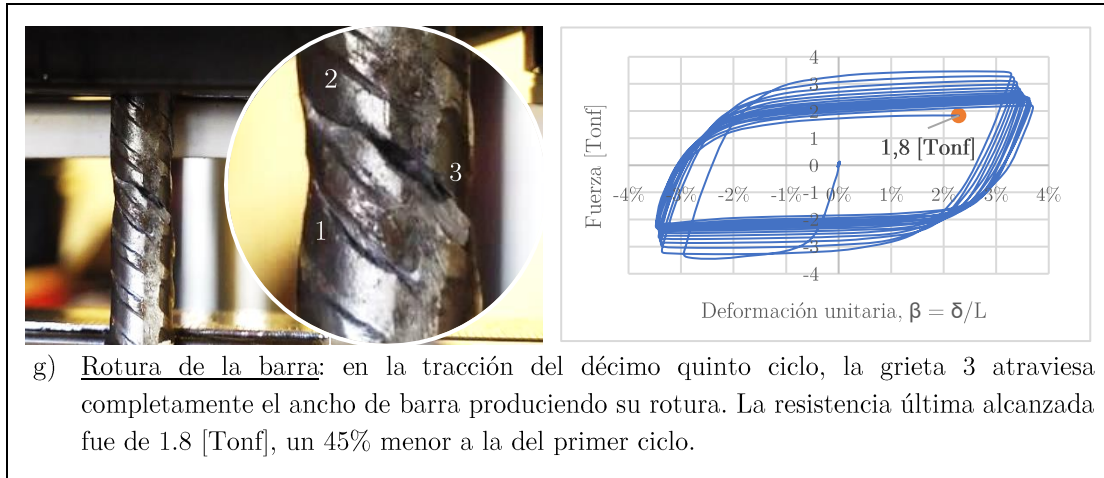


Figura 42. Proceso de agrietamiento de la barra ACMA ($L/D = 4$) durante las reversiones de tracción del ensayo de fatiga simétrico con deformación unitaria $\beta = 4\%$.

4.2 Resistencia a la fatiga

En los siguientes incisos (4.2.1 y 4.2.2) se presentan las curvas de fatiga de los aceros ensayados, como resultado de contabilizar el número de ciclos a la falla ($2N_f$) a niveles de deformación unitaria (β) que van del 1% al 5% y aplicados tanto de forma simétrica ($R = -1$) como asimétrica ($R = 0$).

Como se mencionó en el procedimiento experimental (punto 3.3.1), en algunos casos los ensayos de mayor duración se detuvieron arbitrariamente a los 2000 ciclos sin lograr la rotura de la barra. Estos puntos se denotan con un triángulo “▲” en los gráficos.

4.2.1 Ensayos de fatiga simétricos

Las figuras siguientes permiten comparar las diferencias en los resultados de vida a la fatiga según razón de esbeltez (L/D).

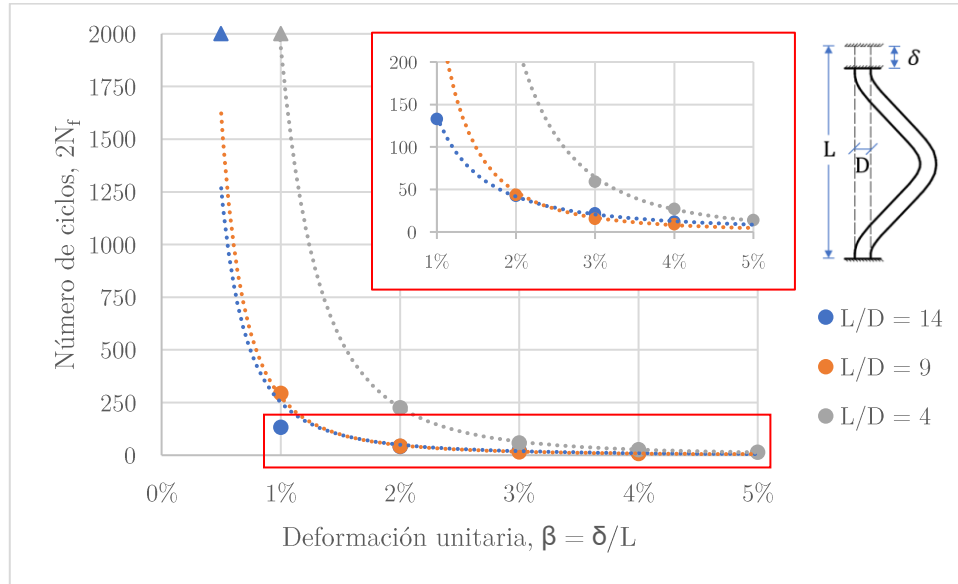


Figura 43. Vida a la fatiga del acero AZA producto de aplicar carga simétrica.

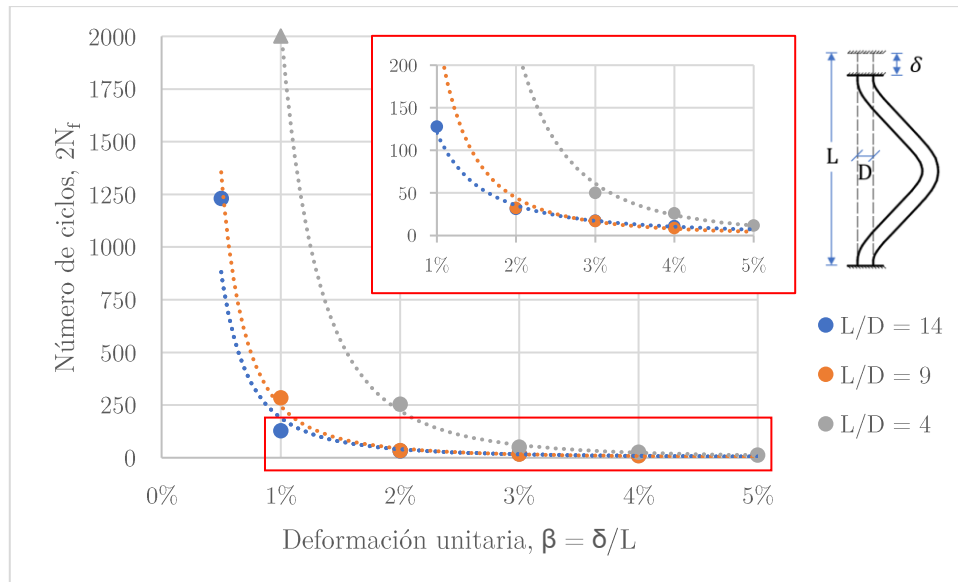


Figura 44. Vida a la fatiga del acero CAP producto de aplicar carga simétrica.

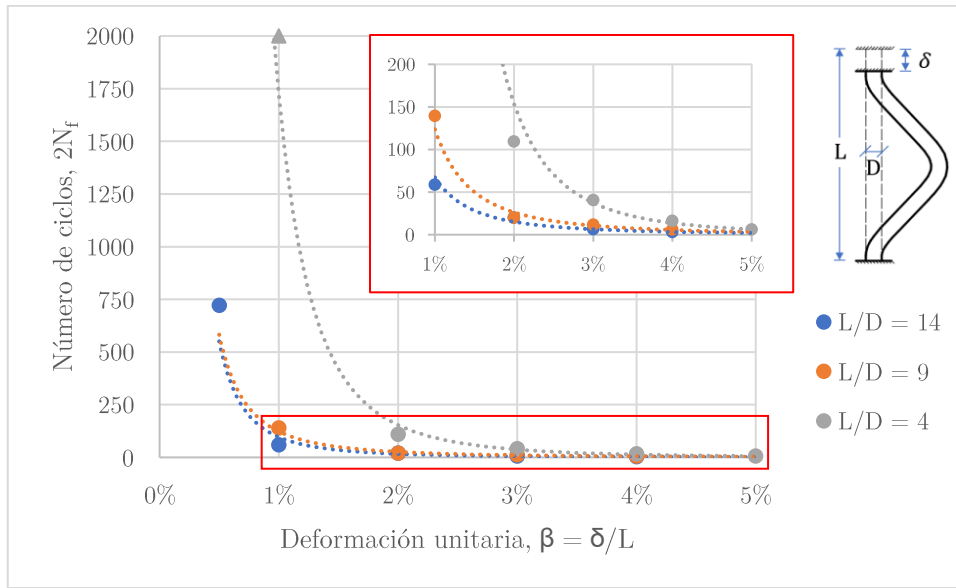


Figura 45. Vida a la fatiga del acero ACMA producto de aplicar carga simétrica.

- Como era de esperar, en general se cumple que el número de ciclos a la falla disminuye con el aumento del nivel de la deformación unitaria (β) aplicado y que, a su vez, este decrece con el aumento de la esbeltez (L/D) de la barra.
- Los aceros AZA y CAP presentan comportamientos similares; los valores de la curva de fatiga para $L/D = 4$ son notablemente superiores a sus símiles con $L/D = 9$ y $L/D = 14$, en el rango de estudio. Mientras que estas últimas dos curvas tienden a parecerse entre sí, a deformaciones unitarias superiores al 2%.
- La curva de fatiga del acero ACMA con $L/D = 4$ también presenta valores muy por sobre sus símiles con $L/D = 9$ y $L/D = 14$, tal como se esperaba.
- Extrapolando los datos, se puede inferir que la razón de esbeltez L/D deja de ser importante a deformaciones unitarias superiores al 5%, independientemente del material. Esto, porque luego de dicho umbral las curvas se aproximan entre sí, apreciándose casi nula diferencia en la vida a la fatiga.

A continuación, se presentan los mismos resultados anteriores, salvo que estas permiten comparar las diferencias entre los fabricantes.

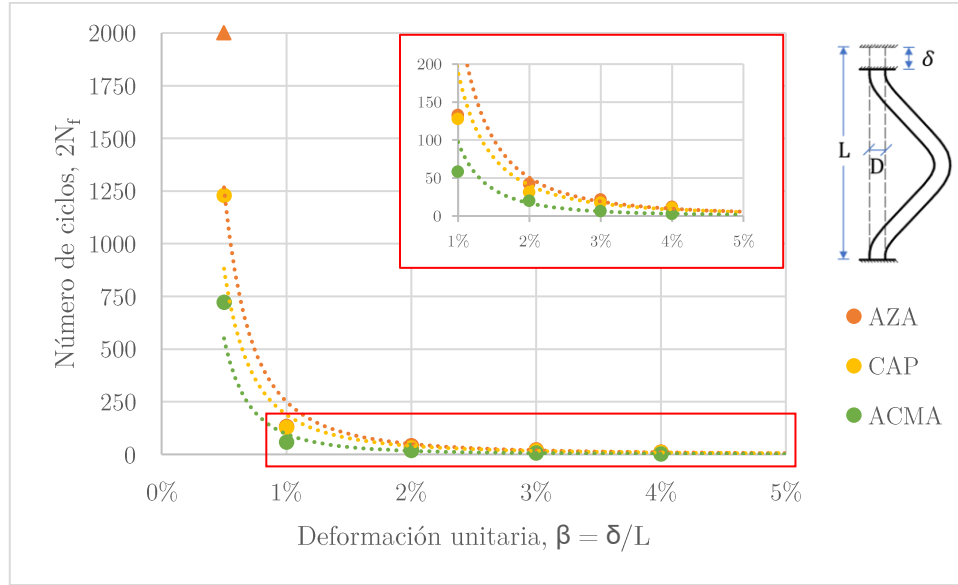


Figura 46. Vida a la fatiga de las barras de refuerzo con $L/D = 14$ producto de aplicar carga simétrica.

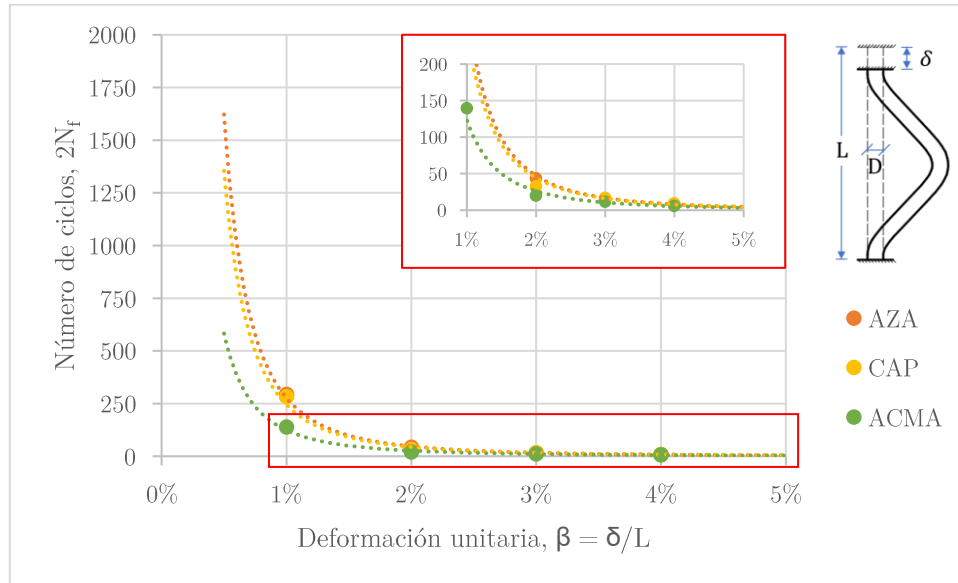


Figura 47. Vida a la fatiga de las barras de refuerzo con $L/D = 9$ producto de aplicar carga simétrica.

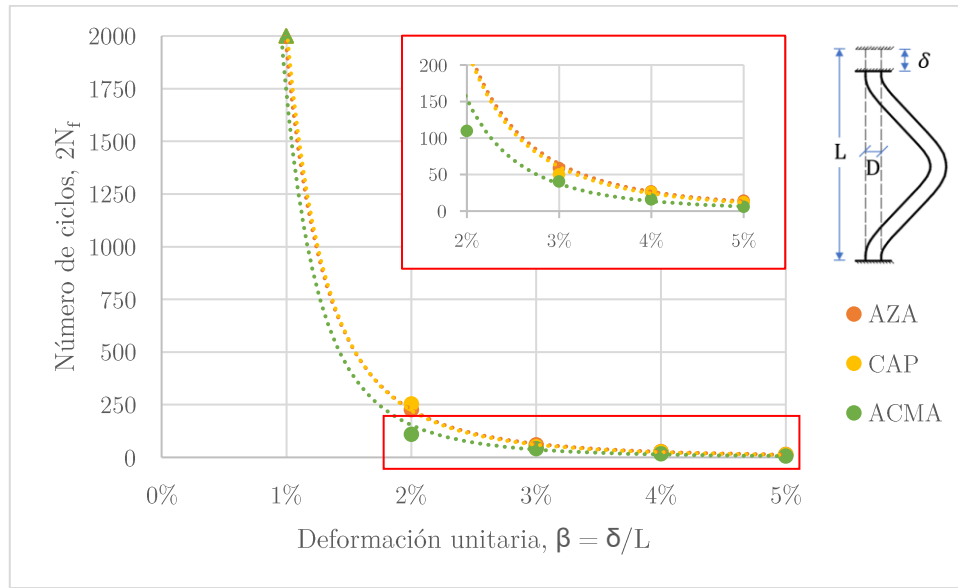


Figura 48. Vida a la fatiga de las barras de refuerzo con $L/D = 4$ producto de aplicar carga simétrica.

- En general, se tiene una vida a la fatiga mayor en las barras AZA, luego le siguen las barras CAP y, por último, las ACMA. Cabe señalar que la diferencia entre los primeros dos aceros mencionados es baja, siendo en promedio un 10% mayores los resultados de AZA con respecto a CAP.
- Las diferencias en la vida a la fatiga entre los fabricantes de acero tienden a disminuir levemente con la reducción de la esbeltez de la barra (L/D).
- Se observan muy pocas diferencias en la vida a la fatiga entre las barras AZA y CAP, siendo prácticamente nulas a esbelteces $L/D \leq 9$.

4.2.2 Ensayos de fatiga asimétricos

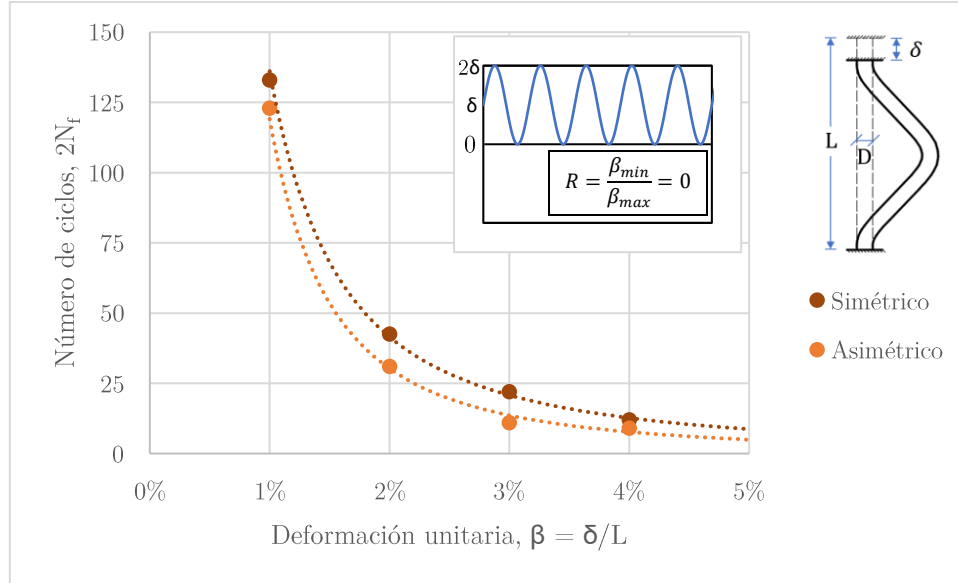


Figura 49. Vida a la fatiga de las barras largas ($L/D = 14$) de acero AZA producto de aplicar carga simétrica y asimétrica.

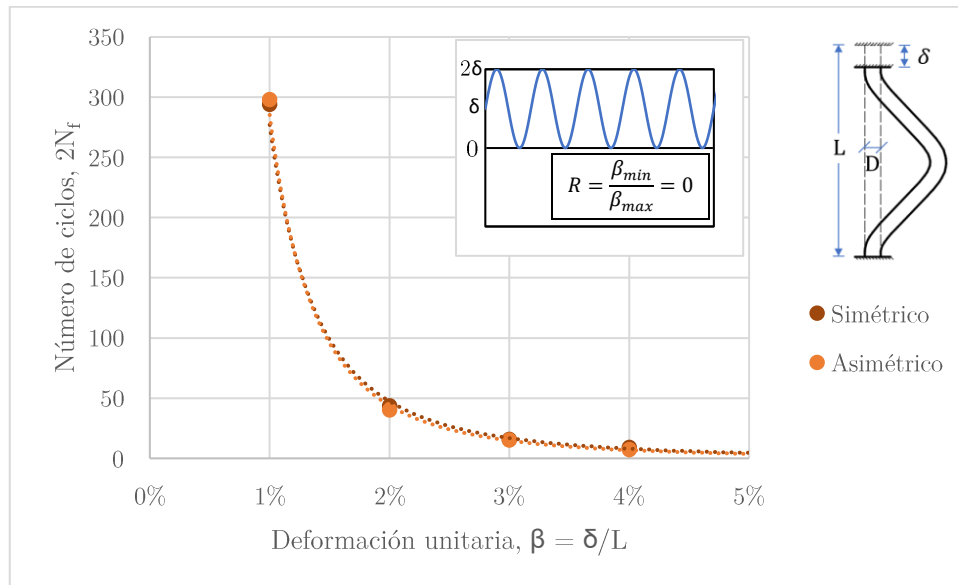


Figura 50. Vida a la fatiga de las barras medianas ($L/D = 9$) de acero AZA producto de aplicar carga simétrica y asimétrica.

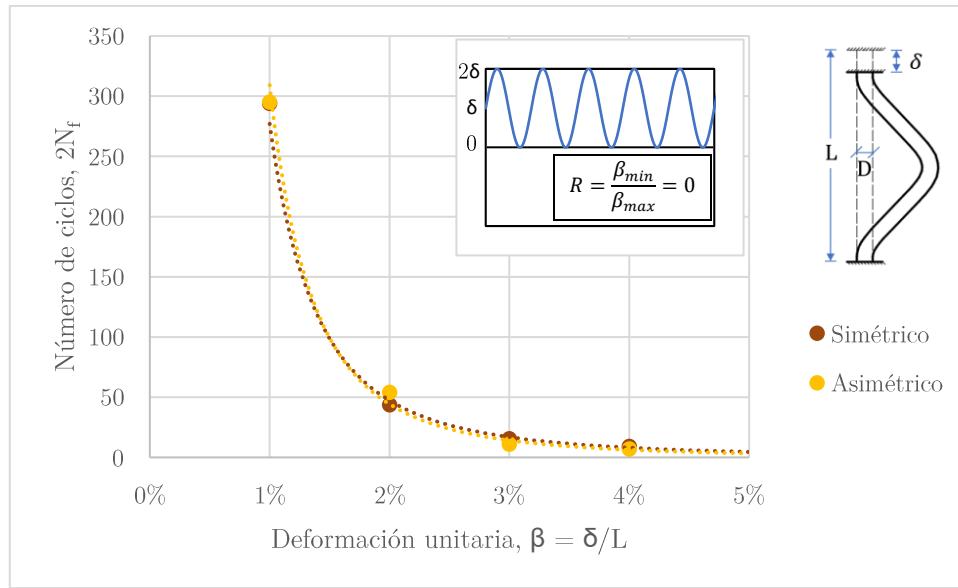


Figura 51. Vida a la fatiga de las barras largas ($L/D = 14$) de acero CAP producto de aplicar carga simétrica y asimétrica.

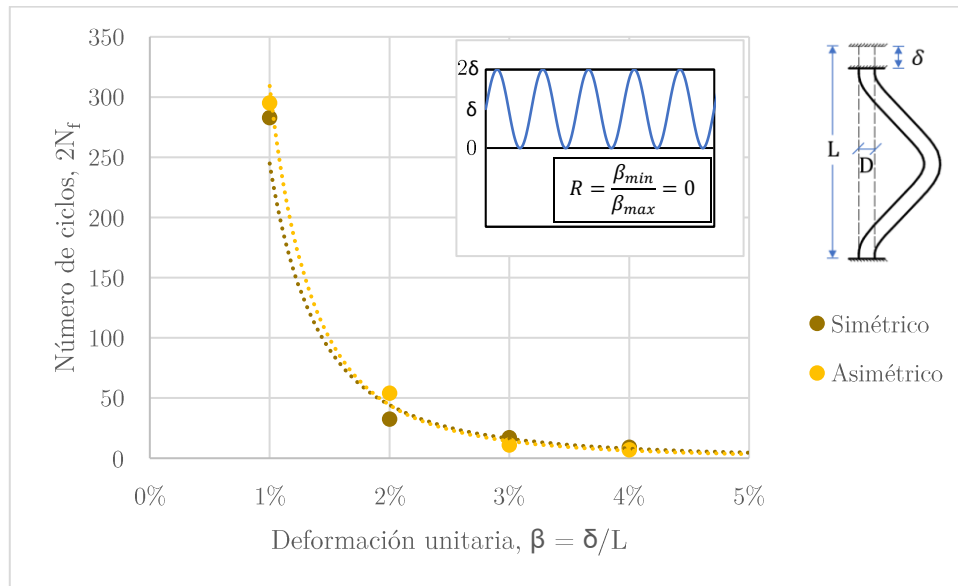


Figura 52. Vida a la fatiga de las barras medianas ($L/D = 9$) de acero CAP producto de aplicar carga simétrica y asimétrica.

- Para $L/D = 14$, se observa un efecto negativo de aplicar una carga asimétrica ($R = 0$) en el caso de las barras AZA, ya que se obtiene alrededor de un 25% menor vida a la fatiga respecto a las alcanzadas con carga simétrica. Mientras que en las barras CAP no se aprecian diferencias significativas.
- Tampoco se observan mayores diferencias entre las curvas de fatiga de bajo ciclaje con carga simétrica y asimétrica para razones de esbeltez intermedias (en torno a $L/D = 9$), independientemente del material.

4.3 Ensayos BBT

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de aplicar el ensayo BBT sobre barras de refuerzo AZA y CAP.

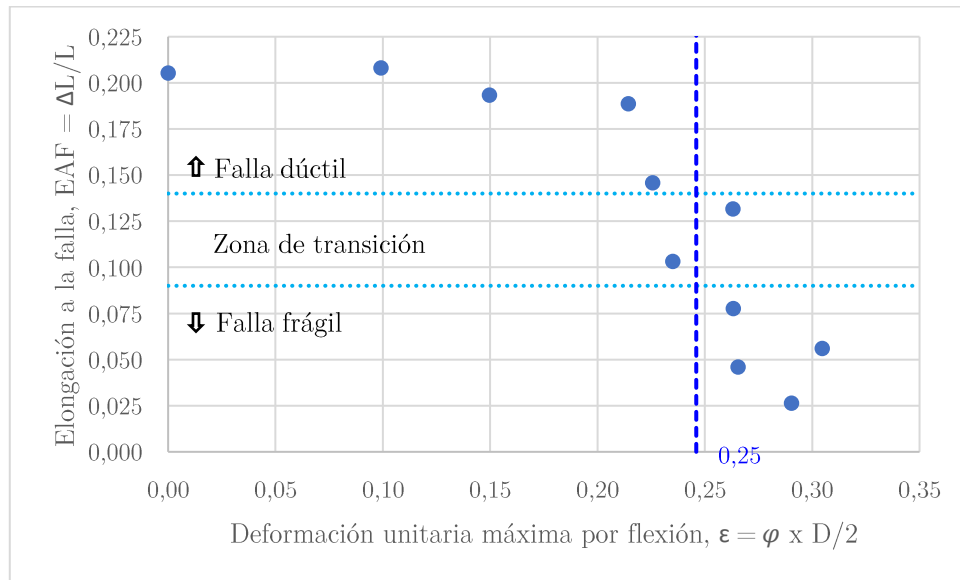


Figura 53. Deformación unitaria crítica de las barras de acero AZA de refuerzo según el ensayo BBT.

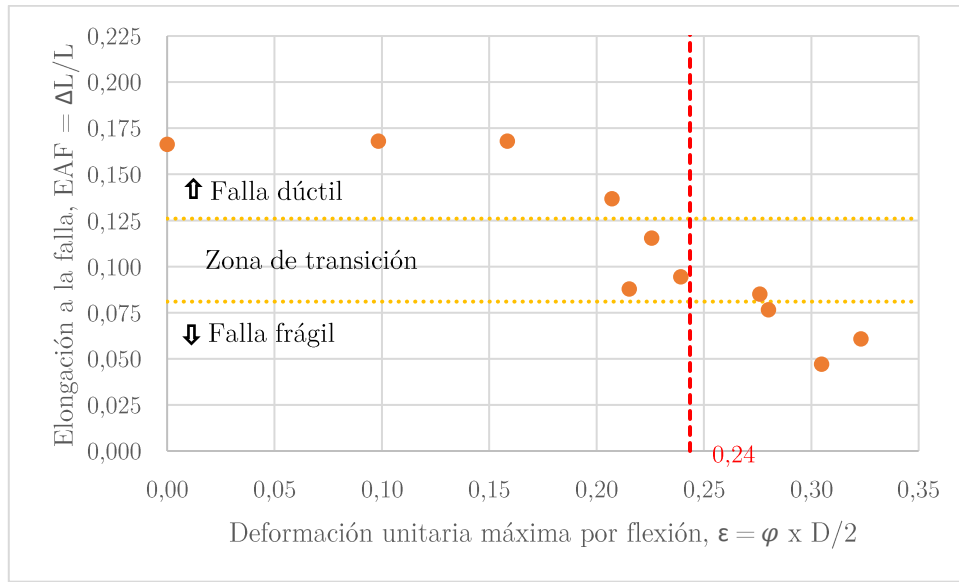


Figura 54. Deformación unitaria crítica de las barras de acero CAP de refuerzo según el ensayo BBT.

- Tanto en el acero AZA como en el acero CAP se obtuvieron regiones de transición en torno al 0.10 de elongación a la falla (EAF), similar a lo reportado por Barclay y Kowalsky (2019).

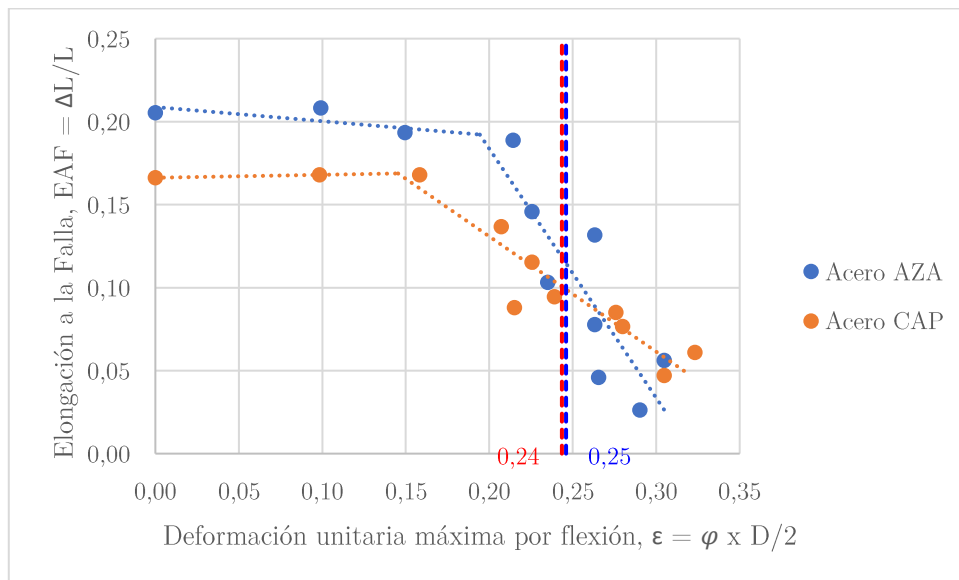
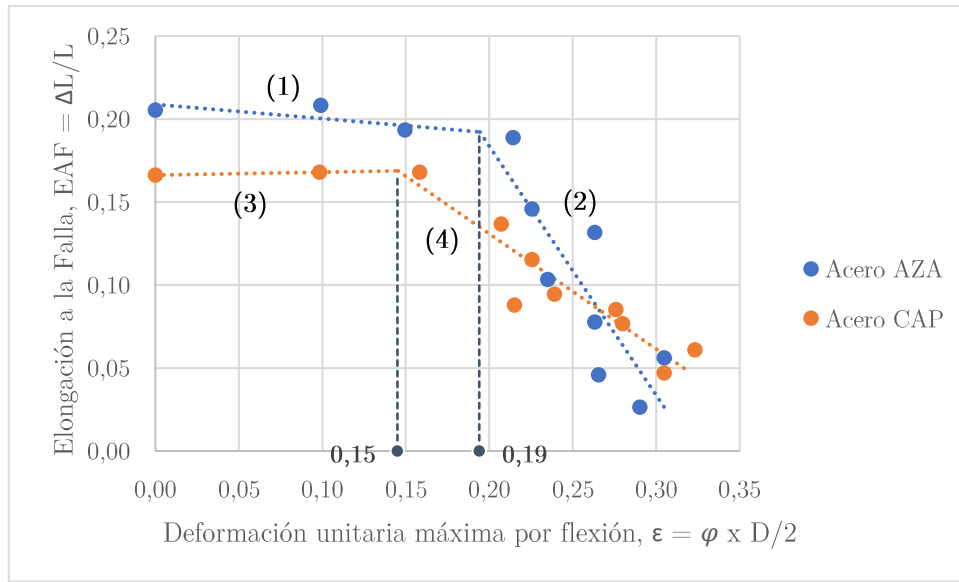


Figura 55. Deformaciones unitarias críticas de las barras de acero AZA y CAP según el ensayo BBT.

- Se observa en la Figura 55 que el valor de la deformación unitaria crítica por flexión debido al pandeo del acero AZA y CAP son muy similares entre sí, siendo 0.25 y 0.24, respectivamente.
- Considerando que los resultados anteriores se obtuvieron sobre barras de 8 mm, estos se pueden comparar debido a la similitud en la calidad de sus aceros con el obtenido para las barras nervadas No. 6 (19 mm) A706 Grado 60 (420 MPa) de Barcley y Kowalsky (2019), mediante una homologación con respecto al diámetro (suponiendo que las barras son de un material simétrico y homogéneo). Al dividir las deformaciones críticas por flexión del acero AZA y CAP por un factor igual a $19 \text{ mm} / 8 \text{ mm} = 2.375$, resulta aproximadamente 0.10 en ambos casos, valor que es alrededor de 26% menor al medido por dichos autores (0.14). Sin embargo, la diferencia podría explicarse, al menos en parte, por la diferente forma de medir la deformación unitaria máxima por flexión, como se explica más adelante.
- En general, para deformaciones unitarias máximas por flexión menores a la crítica, la ductilidad del acero AZA es mayor a la del CAP, mientras que, para deformaciones unitarias máximas por flexión mayores esta relación se invierte.



- (1) El acero AZA experimenta una EAF casi estable con un leve decrecimiento hasta una deformación unitaria máxima por flexión de aproximadamente 0.19.
- (2) Más allá de este punto, el valor de EAF comienza a sufrir una brusca caída con el aumento de la deformación unitaria máxima por flexión.
- (3) El acero CAP también tiene un primer tramo casi estable de EAF, pero con un leve crecimiento, hasta una deformación unitaria máxima por flexión de aproximadamente 0.15.
- (4) Luego, el valor de EAF comienza a disminuir de manera más suave con el aumento de la deformación unitaria máxima por flexión.

Figura 56. Análisis de los resultados del ensayo BBT aplicado sobre los aceros AZA y CAP.

4.3.1 Resultados del Ensayo BBT con radio curvatura

Una estimación alternativa de la curvatura utilizando el radio curvatura da cuenta que, en ciertos casos donde la curvatura de la barra es más pronunciada, no se obtienen tan buenos resultados al utilizar un ajuste polinómico. Esto porque los puntos más extremos quedan situados fuera de la circunferencia, como se ejemplifica en la Figura 57.

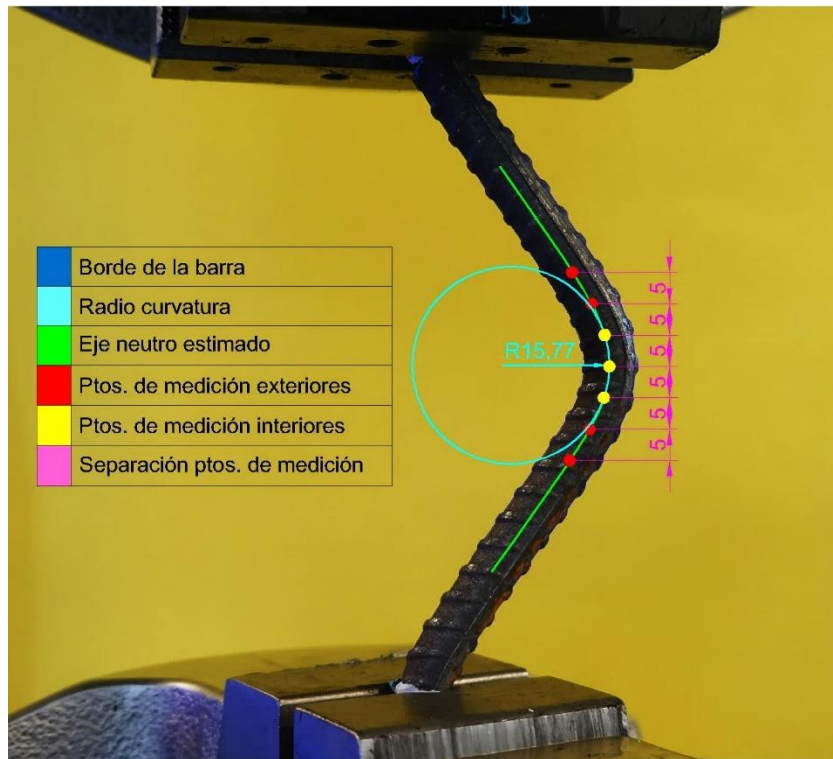


Figura 57. Estimación del radio curvatura con AutoCAD de la barra de refuerzo pandeada CAP durante el ensayo BBT con $\beta = 18.8\%$ de compresión (unidades en mm).

En las Figuras 58 y 59 se presentan los gráficos del ensayo BBT redibujados con las deformaciones unitarias máximas por flexión de las barras AZA y CAP, respectivamente, obtenidas a partir del uso del procedimiento aplicando radio curvatura.

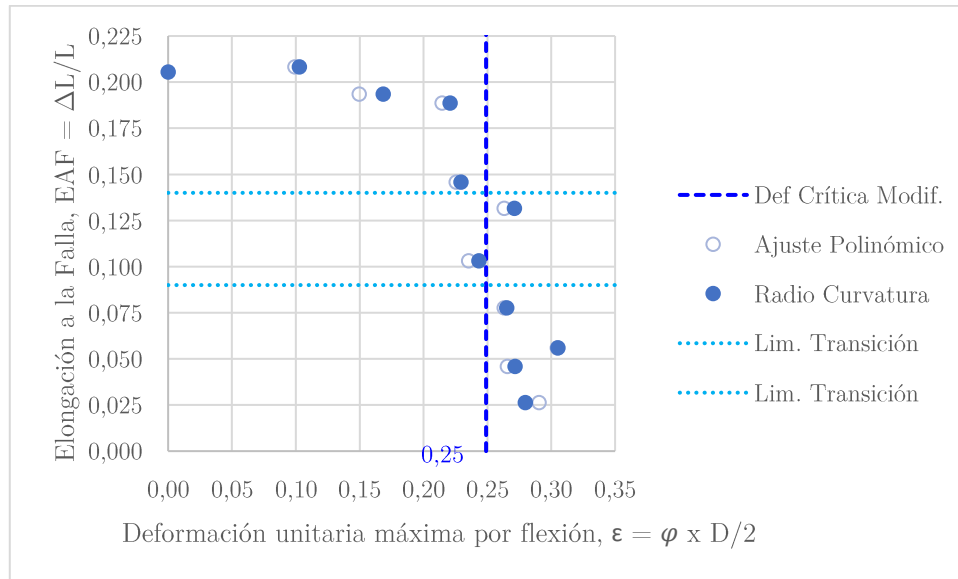


Figura 58. Resultado del ensayo BBT aplicado al acero AZA utilizando el radio curvatura.

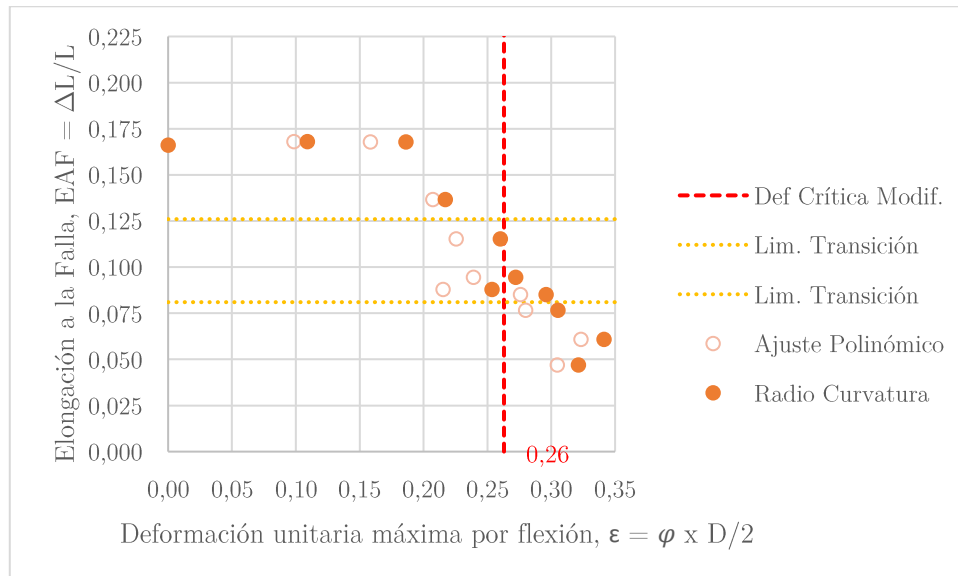


Figura 59. Resultado del ensayo BBT aplicado al acero CAP utilizando el radio curvatura.

Como se puede ver, en el caso del acero AZA no existieron diferencias significativas, incluso la deformación unitaria crítica (0.25) no varió. En contraparte, en el acero CAP sí se observaron diferencias importantes, y la deformación unitaria

crítica (0.26) fue aproximadamente un 8% mayor que la estimada con ajuste polinómico. Por lo tanto, se recomienda preferir el uso de radio curvatura o utilizar un ajuste polinómico con una menor separación de puntos en torno a la zona crítica.

4.4 Medición de deformaciones

4.4.1 Progresión de la deformación unitaria máxima por flexión con los ciclos de fatiga

Para tener más datos, se estimaron las deformaciones unitarias máximas por flexión debido al pandeo de la barra con los ciclos de fatiga con carga simétrica ($\beta = 3\%$) de una barra de refuerzo AZA ($L/D = 14$), siguiendo el procedimiento explicado para el ensayo BBT.

La Figura 60 resume el cambio de la posición de la barra durante la compresión máxima del ensayo de fatiga, mediante la superposición de tres instantes representativos: a) el estado inicial (barra no deformada), b) una posición intermedia (compresión máxima del 1er. ciclo) y c) la posición final, durante la compresión máxima del último ciclo (antes de la ruptura).

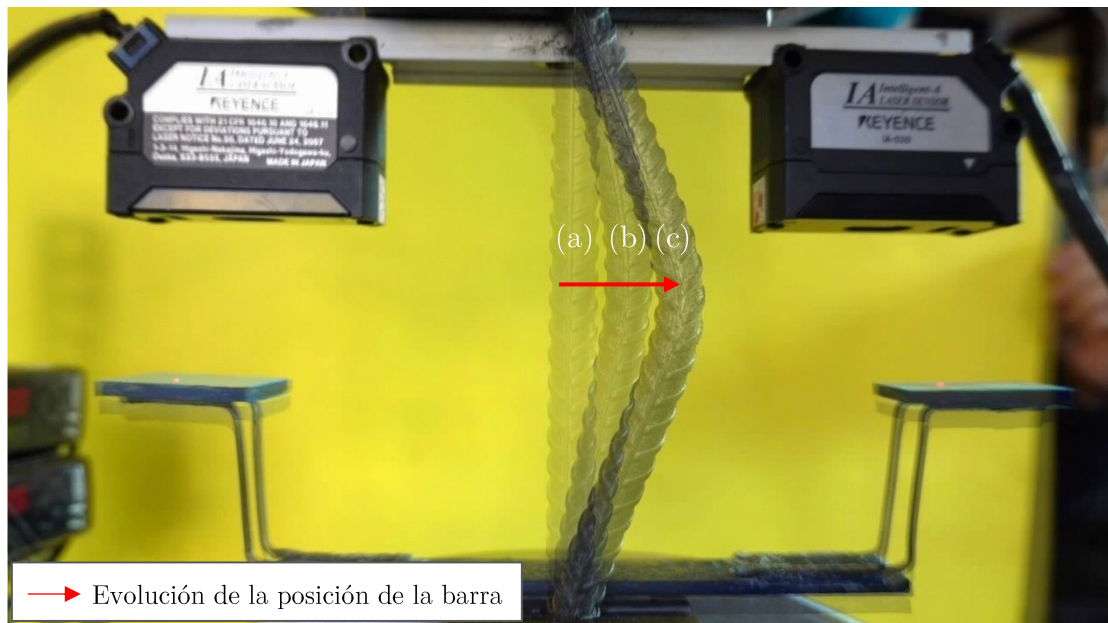


Figura 60. Evolución de la posición de la barra AZA ($L/D = 14$) durante el ensayo de fatiga simétrico ($\beta = 3\%$). (a) Posición inicial (no deformada); (b) Posición durante la compresión máxima del 1º ciclo; y (c) Posición durante la compresión máxima del último ciclo.

Nótese cómo la deflexión de la barra debido al pandeo aumenta con los ciclos, aun cuando el nivel de desplazamiento aplicado fue de amplitud constante.

En las Figuras 61 a 63 se detalla lo anterior mediante la secuencia de imágenes que representan el cambio de la posición del espécimen en los puntos de reversión de la carga, el cual se complementa posteriormente con sus respectivas curvas de histéresis presentadas en las Figuras 64 a 66.

Posición en Tracción Máxima	Posición en Compresión Máxima
 (a) <u>Posición inicial</u>: el ensayo comienza con la barra completamente vertical.	 (b) <u>Compresión máxima 1er. ciclo</u>: la barra pandea notoriamente.
 (c) <u>Tracción máxima 1er. ciclo</u>: la barra se estira recuperando su rectitud casi por completo, similar a la situación inicial (no deformada).	 (d) <u>Compresión máxima 2do. ciclo</u>: con apenas revertir la carga de tracción, la barra comienza a pandear alcanzando una mayor deflexión horizontal.

Figura 61. Posiciones extremas de la barra AZA ($L/D = 14$) entre el 1er. y 2do. ciclo del ensayo de fatiga ($\beta = 3\%$).

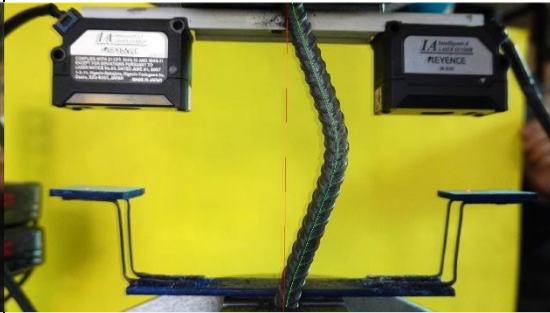
Posición en Tracción Máxima	Posición en Compresión Máxima
 (e) <u>Tracción máxima 2do. ciclo</u>: la barra no logra restituir su posición inicial y queda levemente curvada.	 (f) <u>Compresión máxima 3er. ciclo</u>: la deformación de la barra sigue aumentando, aunque cada vez menos.
 (g) <u>Tracción máxima 5to. ciclo</u>: el aumento de las deformaciones remanentes debido al pandeo por compresión comienza a ser menor.	 (h) <u>Compresión máxima 11vo. ciclo</u>: de aquí en adelante el aumento de la deflexión de la barra con los ciclos es casi imperceptible.

Figura 62. Posiciones extremas de la barra AZA ($L/D = 14$) entre el 2do. ciclo y el 11vo. ciclo del ensayo de fatiga ($\beta = 3\%$).



Figura 63. Posiciones extremas de la barra AZA ($L/D = 14$) entre el 11vo. ciclo y el 22vo. ciclo del ensayo de fatiga ($\beta = 3\%$).

- De la secuencia anterior se puede comprobar cómo la deflexión de la barra debido a la compresión axial es significativa al comienzo del ensayo de fatiga y aumenta con los ciclos, pero cada vez una proporción menor con respecto al registrado en el ciclo anterior llegando a ser casi imperceptible al término del ensayo.
- Se pudo identificar la existencia de una deformación residual en tracción proporcional a la deflexión descrita por la barra en el medio ciclo de compresión inmediatamente anterior.

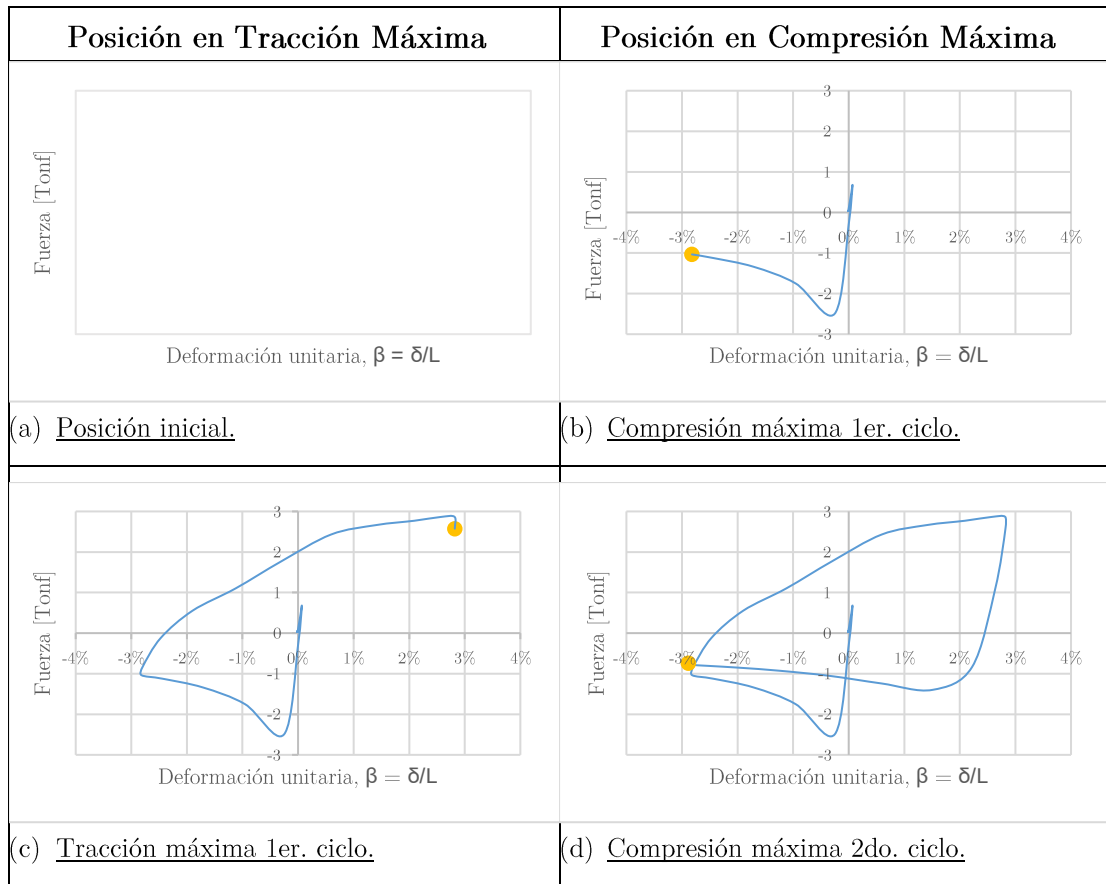


Figura 64. Curvas de histéresis en las posiciones extremas de la barra AZA ($L/D = 14$) entre el 1er. ciclo y el 2do. ciclo del ensayo de fatiga ($\beta = 3\%$).

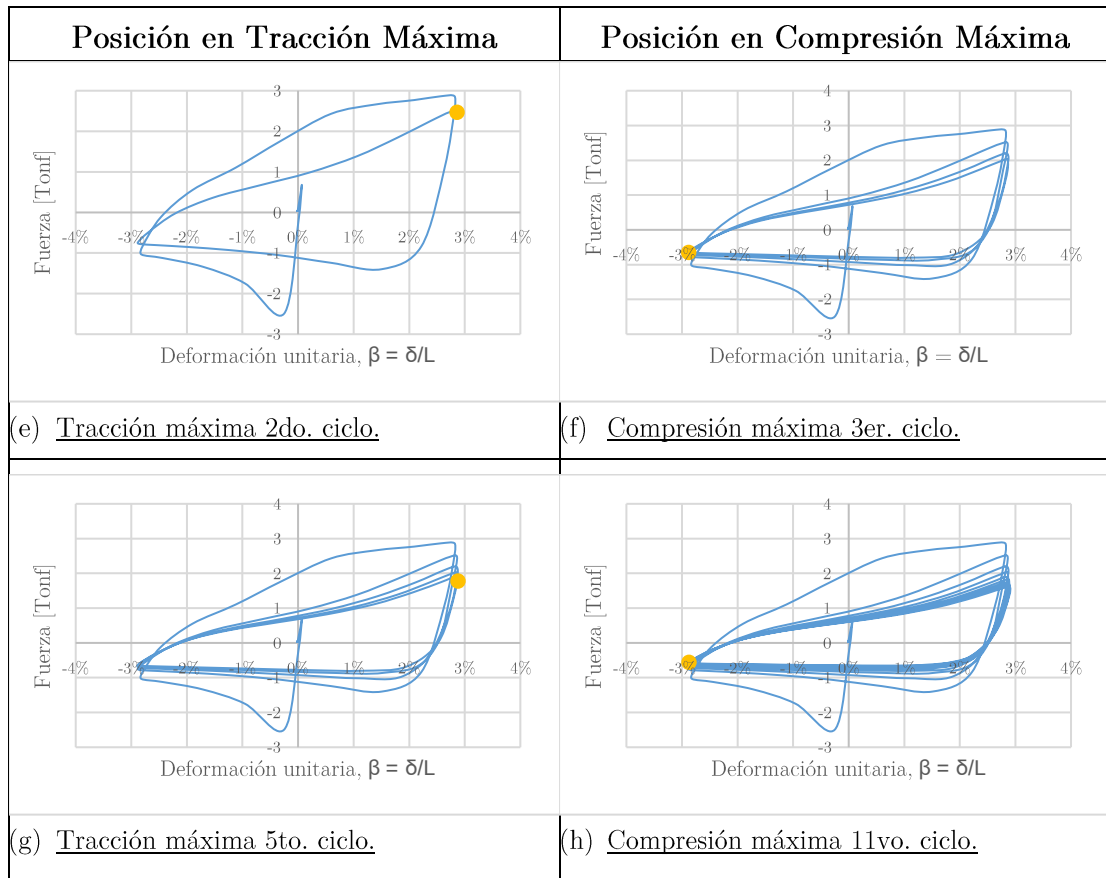


Figura 65. Curvas de histéresis en las posiciones extremas de la barra AZA ($L/D = 14$) entre el 2do. ciclo y el 11vo. ciclo del ensayo de fatiga ($\beta = 3\%$).

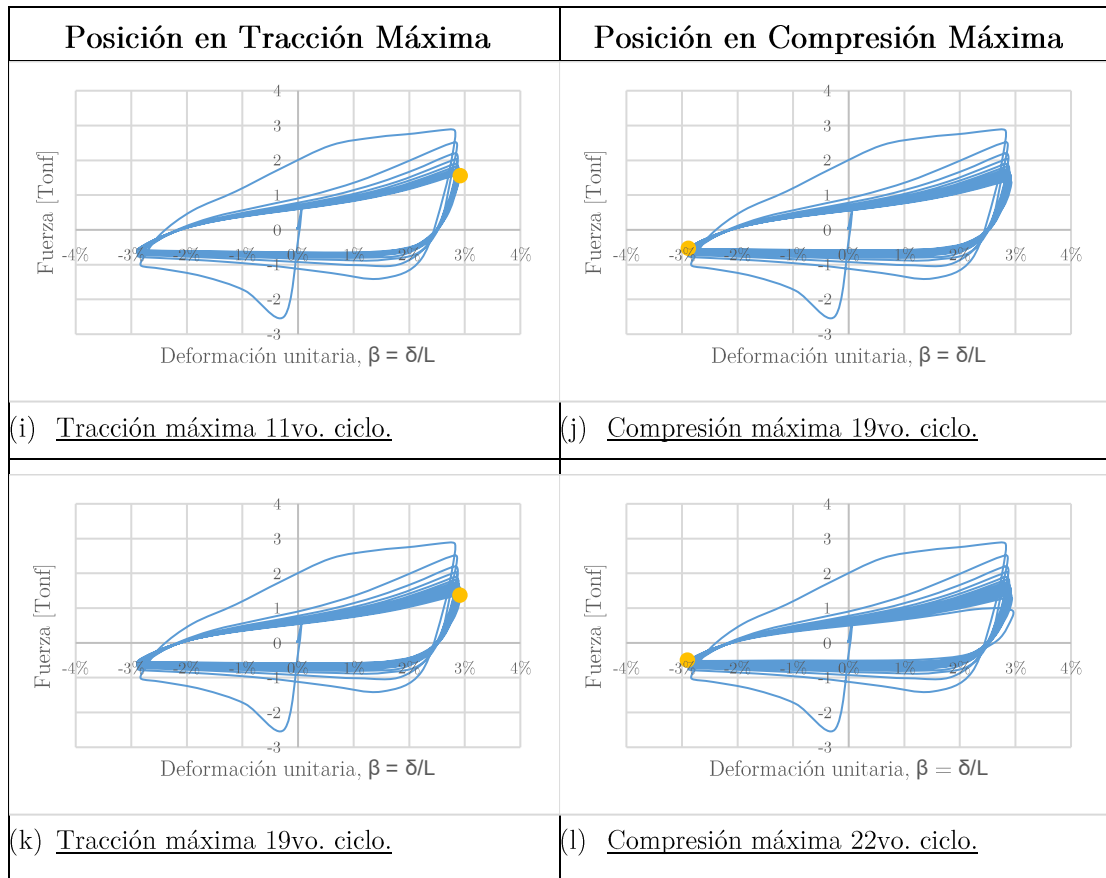


Figura 66. Curvas de histéresis en las posiciones extremas de la barra AZA ($L/D = 14$) entre el 11vo. ciclo y el 22vo. ciclo del ensayo de fatiga ($\beta = 3\%$).

- Los diagramas de histéresis presentados, correlativos a la secuencia de imágenes de las Figuras 54, 55 y 56, describen una disminución de las fuerzas máximas en compresión y tracción que se condice con el aumento de la deflexión de la barra en el instante que se revierte la carga.

La Figura 67 grafica la deformación unitaria máxima por flexión medida en las posiciones extremas (tracción y compresión) del ensayo de fatiga de la barra AZA ($L/D = 14$) versus la fuerza máxima tomada por la barra en dicho instante. El número que se puede ver junto a cada punto denota el número del ciclo en que fue realizada la medición.

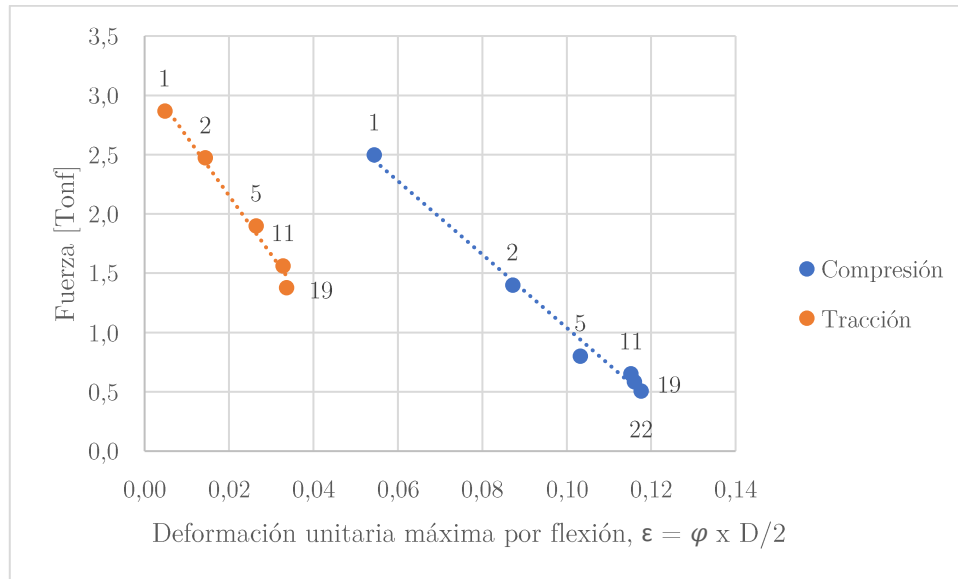


Figura 67. Fuerza vs Deformación unitaria máxima por flexión de una barra AZA ($L/D = 14$) medidos en la reversión de la carga durante los ciclos del ensayo de fatiga con carga simétrica con $\beta = 3\%$.

- Como era de esperar, cuanto mayor es la deformación unitaria máxima por flexión en la barra debido al pandeo, menor es la fuerza que esta toma, tanto en tracción como en compresión, pudiéndose notar una degradación mayor de la capacidad de carga de la barra en el medio ciclo de compresión.

La Figura 68 muestra las deformaciones unitarias máximas por flexión debido a la curvatura de la barra de refuerzo medidas en las reversiones de carga durante el ensayo de fatiga.

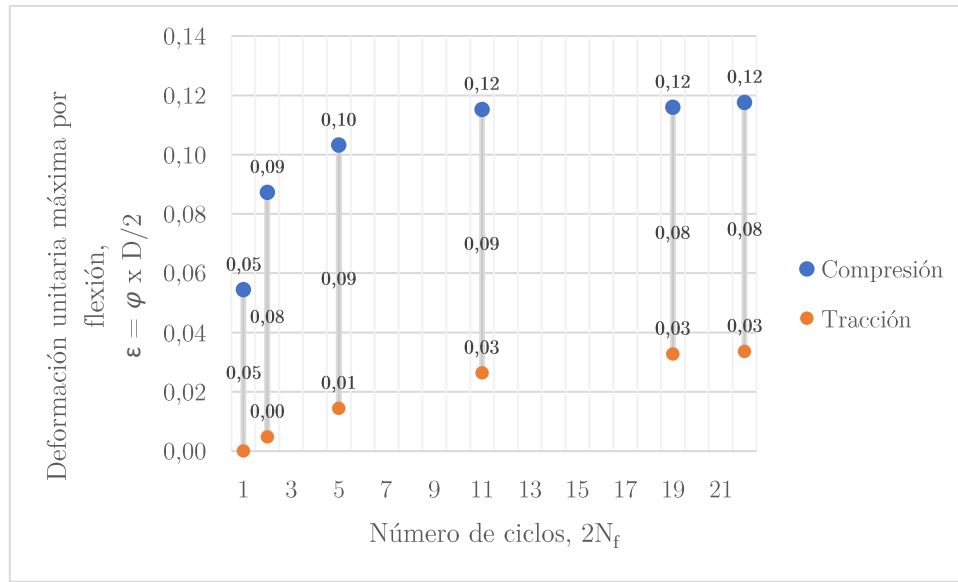


Figura 68. Evolución de la deformación unitaria máxima por flexión con respecto al número de ciclos ($2N_f$) del ensayo de fatiga con carga simétrica ($\beta = 3\%$) de una barra AZA ($L/D = 14$).

- Se puede apreciar que, durante los primeros ciclos, la deformación unitaria máxima por flexión debido al pandeo por compresión de la barra asciende rápidamente pero pronto tiende a estabilizarse respecto a un valor asintótico, que para el caso analizado es aproximadamente 0.12.
- En el primer medio ciclo de compresión se registró una deformación unitaria máxima por flexión de 0.05, mientras que en el segundo ésta fue de 0.09 (un 60% mayor).
- Se midieron deformaciones unitarias máximas remanentes desde el primer medio ciclo de tracción (luego del pandeo de la barra) que fueron desde 0.01 hasta 0.03.
- En el último medio ciclo de compresión, justo antes de la rotura, se alcanzó una deformación unitaria máxima por flexión de 0.12, es decir, más del doble que la desarrollada en el primer ciclo.

4.5 Incidencia del pandeo

A continuación, se analiza la incidencia del pandeo en la respuesta cíclica (Fig. 69) y en la vida a la fatiga (Fig. 70) de las barras de refuerzo AZA con $L/D = 14$, comparando los resultados de los ensayos de fatiga simétricos ($\beta = 3\%$) con pandeo restringido obtenidos por Rojas H. (2022), con los sin restricción al pandeo obtenidos en el presente trabajo.

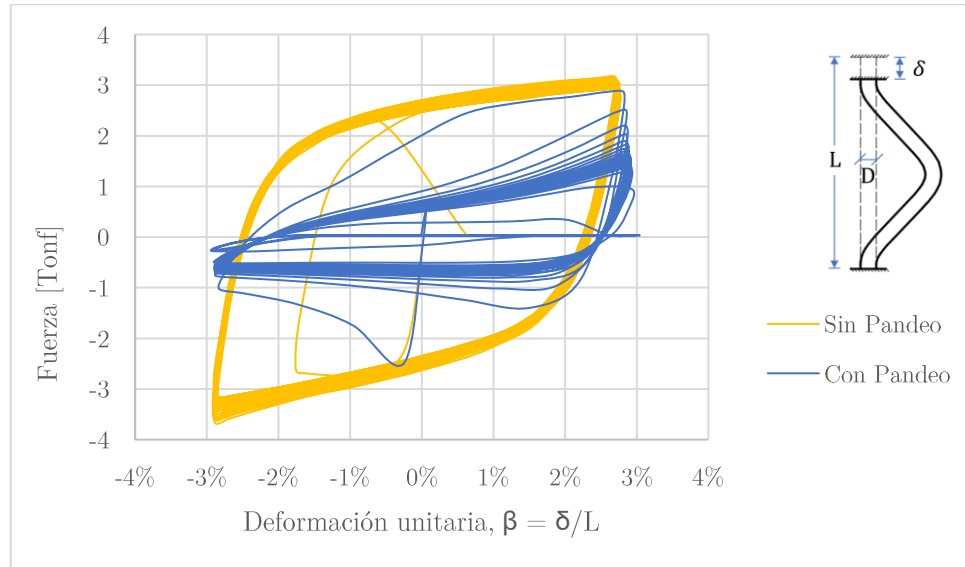


Figura 69. Diagramas de histéresis de los ensayos de fatiga simétricos ($\beta = 3\%$) de una barra AZA larga ($L/D = 14$) con y sin pandeo restringido.

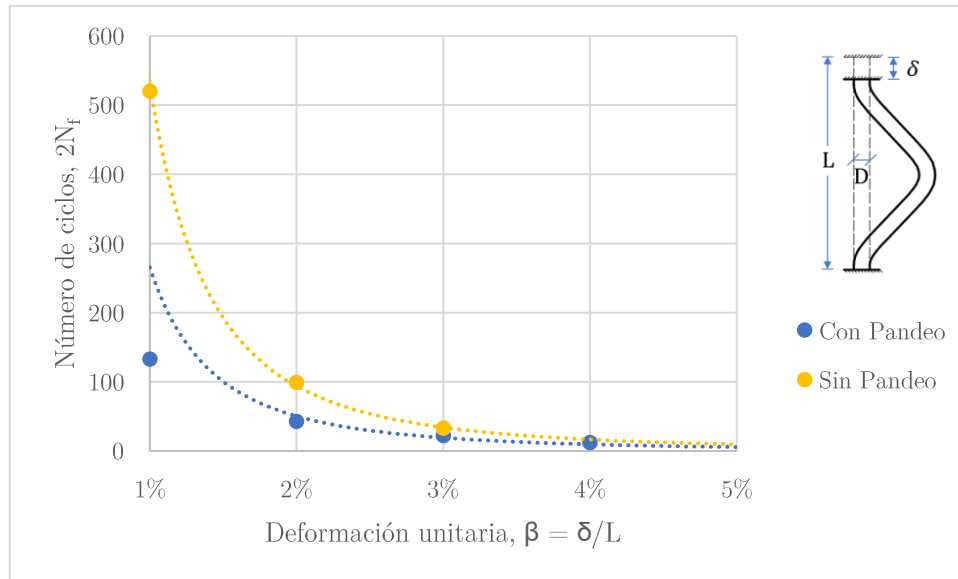


Figura 70. Vida a la fatiga con carga simétrica de las barras largas ($L/D = 14$) de acero AZA con y sin pandeo restringido.

- Respecto al comportamiento cíclico mostrado en la Figura 69 se puede decir que, tal como se esperaba, las curvas de histéresis de la barra con pandeo restringido fueron simétricas con mínima degradación de la resistencia, a diferencia de la barra que pandea donde se aprecia una clara asimetría de las curvas y una degradación importante de la resistencia a la tracción.
- Como se esperaba, la resistencia a la tracción alcanzada durante el primer ciclo por la barra que pandea se asemeja a los ciclos descritos por la barra con pandeo restringido.
- En cuanto a la vida a la fatiga para $L/D = 14$ (Fig. 70) se puede decir que, en general, para deformaciones unitarias medias-bajas ($\beta \leq 3\%$) el pandeo tiene una incidencia perjudicial importante.
- Lamentablemente, para deformaciones unitarias de $\beta > 3\%$ no se tienen datos reales de la barra con pandeo restringido (Rojas H., 2022). Sin embargo, una proyección de la curva de comportamiento hace suponer que el pandeo en este rango influye poco en la vida a la fatiga, pudiendo llegar a tener casi nula incidencia sobre el 5% de deformación unitaria.

4.5.1 Deformación unitaria máxima por flexión en probetas viga-columna

Se estimaron las deformaciones unitarias máximas por flexión de las barras de refuerzo desarrolladas en algunas probetas viga-columna durante su ensayo. Para esto se seleccionaron los registros de video del ensayo de las probetas CP4 de C. Pino (2016) y BS4 de B. Silva (2022) por presentar una mejor visibilidad del pandeo de sus barras.

Probeta CP4 (Claudio Pino, 2016)

El refuerzo longitudinal de la viga consistió en barras de 8 mm de acero A440-280H y el refuerzo transversal se conformó por estribos inclinados en 45° cada 10 cm (con trabas en el cruce) de acero AT56-50H y 4.2 mm de diámetro. La probeta fue sometida a una serie de ciclos de desplazamientos de signo alternado y crecientes por etapas con 2 Hz de frecuencia, salvo en los últimos ciclos (de mayor amplitud) que fueron aplicados más lentamente. La siguiente tabla detalla el historial aplicado.

Tabla 2. Historial de desplazamientos aplicados a la probeta CP4 de C. Pino (2016).

Desplazamiento [mm]	Número de ciclos [-]
4	5
5	5
8	5
18	5
20	5
33	2

Las Figuras 71 y 72 presentan, respectivamente, el estado de la probeta durante los últimos dos ciclos de 33 mm de desplazamiento, antes de la rotura de su refuerzo longitudinal, y la máxima deflexión experimentada por ésta cuando fue comprimida.

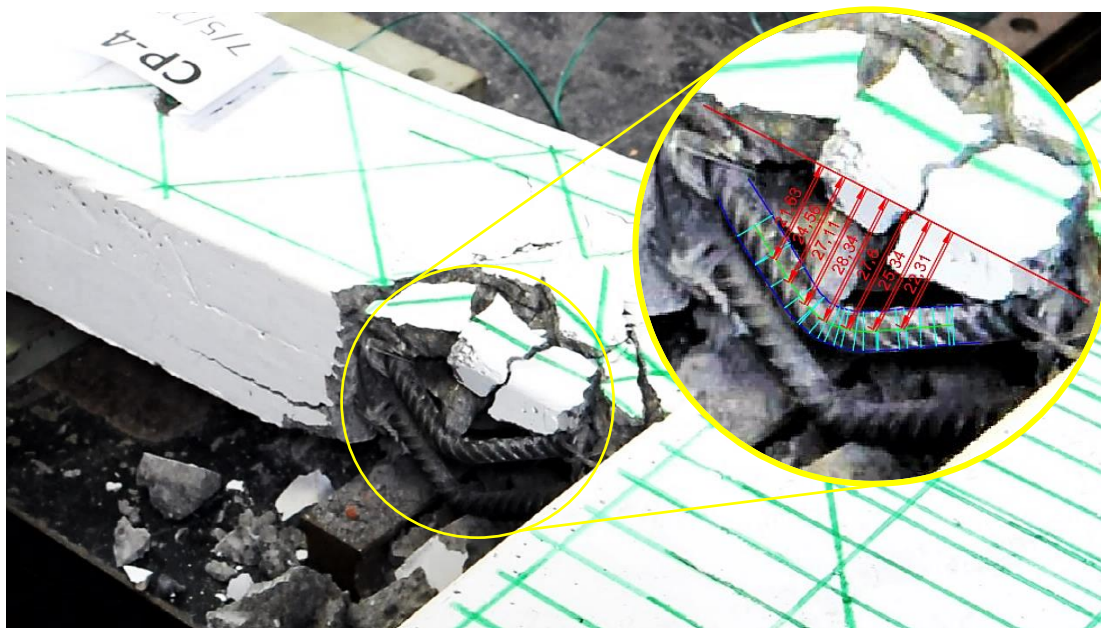


Figura 71. Medición del desplazamiento transversal de la barra de refuerzo superior de la probeta CP4, en el instante de máxima curvatura durante el primer ciclo de 33 mm.

Como se puede ver en la imagen, la toma de la filmación no coincide perfectamente con el plano de pandeo de la barra. Se estima que la medición de la deformación unitaria máxima por flexión desde esta perspectiva, aun cuando no será la real, permitirá tener la noción de un valor mínimo y próximo al realmente desarrollado en la barra momentos previos a la falla. Este fundamento aplica también en los siguientes casos analizados.

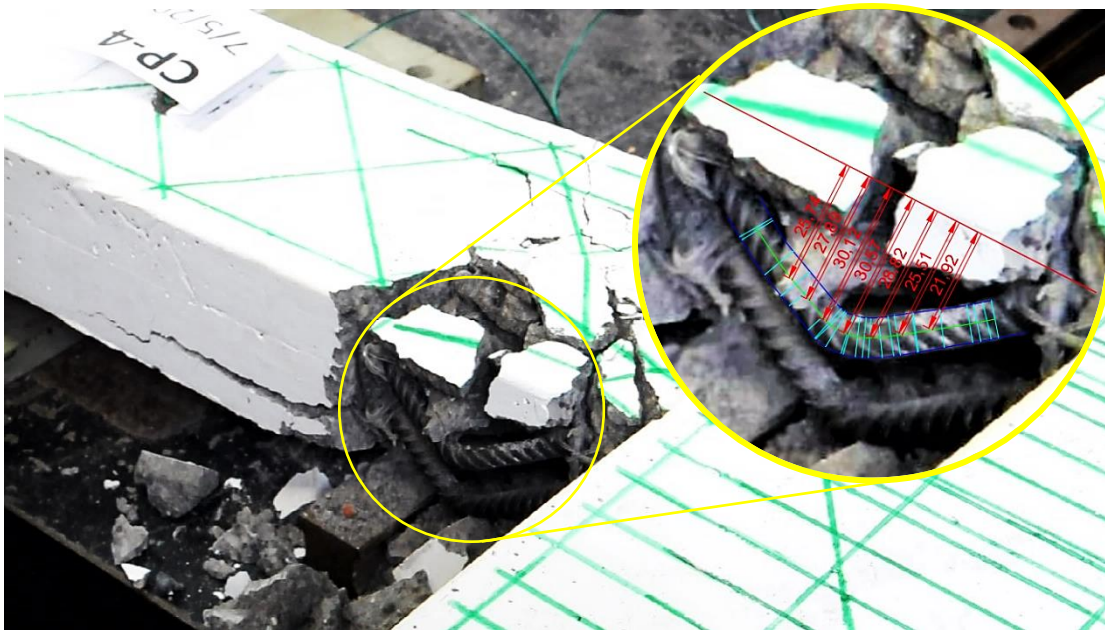


Figura 72. Medición del desplazamiento transversal de la barra de refuerzo superior de la probeta CP4, en el instante de máxima curvatura durante el segundo ciclo a 33 mm.

- La deformación unitaria máxima por flexión debida al pandeo medida en la barra longitudinal superior de la viga, durante el primer ciclo de 33 mm (Fig. 71), fue de 0.22, y en el ciclo siguiente (Fig. 72), justo antes de romperse, fue de 0.23, lo cual está suficientemente próximo a la deformación unitaria crítica estimada como para que sea posible atribuir la rotura a esta causa.

Probeta BS4 (Brayan Silva, 2022)

Se utilizó acero A630-420H de 8 mm de diámetro para la armadura longitudinal de la viga que tenía una longitud de anclaje del 70% de la indicada en el código ACI 318. El refuerzo transversal consistió en estribos de acero inoxidable de 3 mm inclinados en 45°, en forma de cerco cerrado con soldadura, ubicados cada 3 cm. Tal como en el caso anterior, la carga consistió en ciclos con desplazamiento controlado aplicados en el extremo libre de la viga. El historial de desplazamientos aplicados a esta probeta se muestra en la tabla 3 siguiente.

Tabla 3. Historial aplicado a la probeta BS4 de B. Silva (2022).

Desplazamiento [mm]	Número de ciclos [-]
5	5
10	5
15	5
20	5
25	5
30	4

Las Figuras 73 y 74 muestran, respectivamente, los instantes de mayor compresión de las barras longitudinales durante los últimos dos ciclos de 30 mm de desplazamiento, sobre las cuales se midió la deflexión máxima experimentada por éstas justo antes de la rotura.

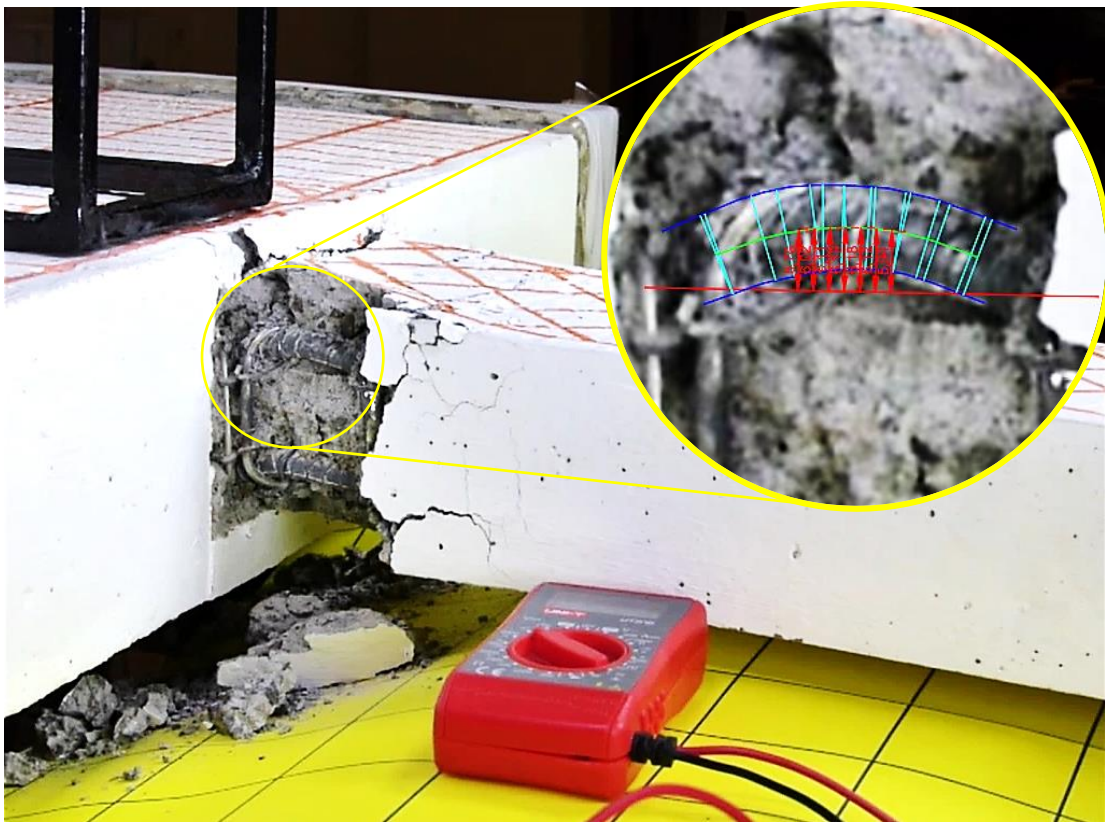


Figura 73. Medición del desplazamiento transversal de la barra de refuerzo superior de la probeta BS4, en el instante de máxima curvatura durante el tercer ciclo a 30 mm.

- En la región de compresión del tercer ciclo a 30 mm (Fig. 73), se estima que la barra longitudinal superior de la viga desarrolla una deformación unitaria máxima por flexión de al menos 0.13. Según los resultados obtenidos del ensayo BBT realizado sobre el acero AZA, esto corresponde a la región dúctil de comportamiento donde existe amplio margen de elongación en tracción, es decir, en este instante la barra estaría lejos de romperse. Sin embargo, durante el medio ciclo de tracción siguiente, se rompe la barra longitudinal inferior. A la cual no se pudo medir la curvatura, debido al ángulo de grabación.

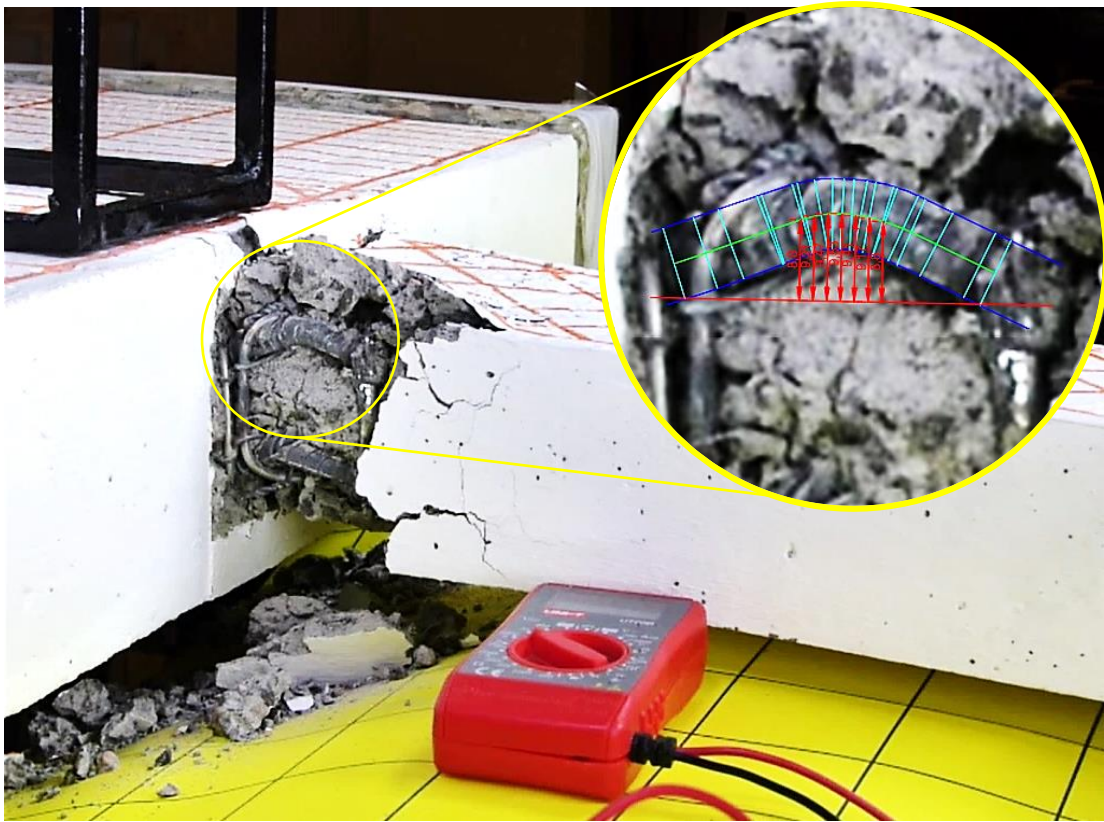


Figura 74. Medición del desplazamiento transversal de la barra de refuerzo superior de la probeta BS4, en el instante de máxima curvatura durante el cuarto ciclo a 30 mm.

- Durante el cuarto ciclo a 30 mm (Fig. 74), con la barra de refuerzo inferior rota, la deformación unitaria máxima por pandeo del refuerzo superior aumentó a más del doble, pudiéndose estimar en 0.29. Este valor indica que la barra se encontraría en la región de comportamiento frágil, siendo necesario un bajo nivel de elongación para ocasionar su rotura. La cual se produjo, precisamente, en el medio ciclo de tracción siguiente. Sin embargo, la rotura del refuerzo superior no se produjo en la región libre entre estribos, sino que lo hizo en la zona del amarre de la barra con el estribo más próximo a la columna.

4.6 Comentarios de los resultados

4.6.1 Incidencia del pandeo en la fatiga de las barras de refuerzo

La respuesta de histéresis de las barras cortas ($L/D = 4$) resultó estable, prácticamente simétrica en tracción y compresión, con mayor degradación de la capacidad a la tracción con respecto a la de compresión. Las barras medianas ($L/D = 9$) y largas ($L/D = 14$) exhibieron un comportamiento asimétrico, acompañada de un angostamiento o “pinching” de sus curvas de histéresis.

Por lo tanto, cuanto más susceptible al pandeo es la barra de refuerzo, no solo su respuesta a la compresión empeora, sino que también lo hace la de tracción, incluso en mayor medida. Esto se debe a que cuanto mayor es la flexión de la barra producto del pandeo, mayores son las deformaciones tensionales en las fibras del lado convexo y las de compresión en las fibras del lado cóncavo, dando lugar a mayores deformaciones residuales en las posteriores reversiones de tracción. Además, fluyendo cada vez mayor parte de la sección transversal, en consecuencia, la rigidez de la barra disminuye alcanzando mayores curvaturas en las sucesivas reversiones de compresión. Las deformaciones unitarias máximas por flexión residuales debido al pandeo crecen rápidamente con los primeros ciclos de fatiga y tienden a estabilizarse al final del ensayo, lo cual coincide con el ritmo de caída de su capacidad de carga, por lo menos hasta el momento en que la longitud de la grieta principal alcance la mitad del diámetro de la barra.

En todos los ensayos de fatiga, las grietas se originaron tempranamente como una fisura de la superficie del lado cóncavo de las barras de refuerzo y alrededor de la base de los resaltos, asociadas con la acción combinada de esfuerzos axiales y de flexión inducidos por el pandeo. Con el aumento de los ciclos, éstas crecieron gradualmente en largo y ancho hasta que se produjo la fractura completa de la barra a través de una de ellas. A partir del medio ciclo posterior al que la grieta principal

atravesó la mitad del diámetro de la barra, se acrecentó la degradación de la fuerza de tracción máxima.

Tal como se esperaba, la vida a la fatiga de bajo ciclaje está claramente influenciada por la deformación unitaria (β) aplicada y la relación de esbeltez (L/D) de la barra. Sin embargo, al comparar los resultados obtenidos para barras con pandeo permitido versus las barras con pandeo restringido (Rojas H., 2022), se pudo apreciar que, si bien el pandeo influye negativamente en la resistencia a la fatiga de las barras, esta incidencia tiende a tener un menor efecto cuando las deformaciones unitarias son más altas. De hecho, según los datos de esta memoria y los de Rojas H., se estima que a $\beta > 5\%$ no existirían mayores diferencias en la vida a la fatiga entre barras con y sin restricción al pandeo.

Lo anterior significa que, si se restringiera de alguna forma el pandeo del refuerzo longitudinal en elementos de hormigón armado como los ensayados, se lograría que el corte de las barras no se produjera hasta que la estructura llegara a desplazamientos muy grandes, mayores a los desplazamientos de 25 mm aplicados en dichos ensayos. Sin embargo, estos desplazamientos serían improbables de alcanzarse durante un terremoto según los resultados de Lobera R. (2016).

También se observó que la aplicación de la carga asimétrica ($R = 0$) no influyó en la vida a la fatiga de barras medianas ($L/D = 9$). Mientras que para las barras largas ($L/D = 14$) solo se obtuvo un efecto apreciable, disminuyendo ligeramente la resistencia a la fatiga, en el caso de AZA, ya que en CAP las diferencias no fueron significativas.

4.6.2 Ensayo BBT

Como resultado de realizar el ensayo BBT (tracción de barra pandeada) sobre barras de refuerzo AZA y CAP, se obtuvo que las deformaciones unitarias por flexión críticas (ϵ_{cr}) son, respectivamente, 0.25 y 0.24.

Sin embargo, la capacidad de elongación del acero se empezó a ver afectada debido al pandeo a niveles de deformación unitarias de 0.19 en el caso de AZA y 0.15 en el caso de CAP. Se observó también que, para deformaciones unitarias máximas por flexión menores a la crítica, el acero AZA presentó mayor ductilidad que el acero CAP, y a deformaciones unitarias máximas por flexión mayores, esta relación se invirtió.

Cabe señalar que las deformaciones unitarias máximas por flexión críticas obtenidas en ambos aceros, fueron considerablemente mayores a sus respectivos alargamientos de rotura al aplicar tracción simple. Esto puede ser debido a la forma en que el ensayo BBT define la deformación unitaria crítica por flexión, ya que, de acuerdo con lo expuesto en el párrafo anterior, esta medida podría estar siendo sobrestimada, o, puede que los aceros considerados en este estudio tengan la particularidad de resistir más en flexión que en tracción. No obstante, sería necesario ampliar la investigación para comprobar estas hipótesis.

4.7 Recomendaciones para futuros trabajos

A continuación, se puntualizan algunas recomendaciones para futuros trabajos sobre el tema:

- Se podría refinar la estimación de la deformación unitaria máxima por flexión debida al pandeo de las barras de refuerzo, ya que el procedimiento de Barclay y Kowalsky (2019) implica un ajuste polinómico de la curvatura y, como se pudo comprobar, es más precisa una aproximación a partir del radio de curvatura.
- El método utilizado en este trabajo para estimar las deformaciones unitarias máximas por flexión debido al pandeo en las barras sometidas a ciclos de fatiga no considera el corrimiento del eje neutro de la barra producto de la progresión de la grieta a través de su sección transversal. Sería conveniente considerar este efecto en adelante.

- Si bien se intentó medir lo mejor posible las deformaciones unitarias máximas por flexión sobre las barras longitudinales pandeadas de los especímenes viga-columna de hormigón armado, éstas se realizaron sobre probetas ya ensayadas. Por lo tanto, se recomienda considerar su medición durante los ensayos que se realicen en el futuro.
- Se consideró sólo la deformación unitaria debido a la curvatura despreciándose la que corresponde a la fuerza axial, aunque lo mismo se hizo al medir las curvaturas alcanzadas en las barras de acero de la probeta de hormigón armado con las que se comparó. Sin embargo, es conveniente aclarar este efecto.

CONCLUSIONES

El objetivo general de este trabajo fue estudiar experimentalmente las propiedades resistentes de barras de refuerzo como las usadas en investigaciones recientes desarrolladas en la UTFSM, relacionadas con el comportamiento sísmico de elementos de hormigón armado con refuerzo al corte inclinado en 45° . Esto se hizo con el fin de obtener datos que permitieran, en estudios posteriores, mejorar los diseños, y con ello evitar la fractura de barras longitudinales observada en los ensayos de los mencionados elementos de hormigón armado.

De acuerdo con los resultados del presente trabajo, la causa de la fractura de las barras de refuerzo longitudinal durante los ensayos de los elementos de hormigón armado estaría relacionada a la excedencia de la deformación unitaria crítica por flexión debido al pandeo, definida por Backley y Kowalsky (2019).

Las deformaciones unitarias críticas por flexión de barras de refuerzo AZA y CAP de 8 mm resultaron prácticamente iguales entre sí, siendo 0.25 y 0.24, respectivamente. En general, se puede decir que cuando las deformaciones unitarias máximas por flexión son menores que la crítica, el acero AZA presenta un comportamiento más dúctil que el acero CAP, pero cuando son mayores esta relación se invierte.

Los resultados indican que la razón de esbeltez (L/D) de las barras de refuerzo dejaría de ser relevante para la resistencia a la fatiga para deformaciones unitarias (β) superiores al 5%, independientemente del tipo de acero. Mientras que el efecto de la asimetría ($R = 0$) en la aplicación de la carga pareciera tener muy poca o ninguna influencia en la resistencia a la fatiga de barras medianas ($L/D = 9$), no así en el caso de las barras largas ($L/D = 14$) en que la vida a la fatiga se vio ligeramente disminuida.

Resulta interesante la similitud obtenida en el desempeño a la fatiga de bajo ciclaje de los aceros AZA y CAP, principalmente, porque este último al ser de menor ductilidad que el primero en el ensayo estándar de tracción, se esperaba que presentara inferiores resultados. Los resaltos más suaves, propios de las barras CAP, compensarían en cierta manera esta desventaja relativa, permitiéndoles ser casi tan resistentes a la fatiga como las barras AZA. Algo similar se pudo observar en el caso del acero ACMA, en que sus barras de resaltos suaves no dieron resultados tan bajos de resistencia a la fatiga, a pesar de su inferior ductilidad.

Por último, se compararon los datos recopilados en este estudio con los obtenidos por Rojas H. (2022), quien en su memoria de título ensayó barras similares restringiendo el pandeo con una camisa de acero. Los resultados indican que, si se restringiera de alguna forma el pandeo del refuerzo longitudinal en elementos de hormigón armado, como los ensayados, se lograría que el corte de las barras no se produjera hasta que la estructura llegara a desplazamientos muy grandes, improbables de alcanzarse durante un terremoto.

REFERENCIAS

- ASTM E606. (2021). ASTM E606 Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing. *ASTM Standards*.
- Barclay, L., & Kowalsky, M. (2019). Critical bending strain of reinforcing steel and the buckled bar tension test. *ACI Materials Journal*, 116(3), 53–61. <https://doi.org/10.14359/51715583>
- Basualdo, F. (2019). *Efectos de las amarras y soldadura de los estribos en el comportamiento sísmico de elementos de hormigón armado*. Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Brown, J., & Kunnath, S. K. (2004). Low-cycle fatigue failure of reinforcing steel bars. *ACI Materials Journal*, 101(6). <https://doi.org/10.14359/13484>
- Erasmus, L. A. (1981). Cold straightening of partially embedded reinforcing bars a different view. *Concrete International*, 3(6), 47–52.
- Estrada, R. (2003). *Problemas de fatiga en estructuras metálicas*. Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Ghannoum, W. M., & Slavin, C. M. (2016). Low-cycle fatigue performance of high-strength steel reinforcing bars. *ACI Materials Journal*, 113(6). <https://doi.org/10.14359/51689116>
- Ghannoum, W. M., Sokoli, D., Hogsett, G., Limantono, A. A., Suselo, A., & Al-Tarafany, D. (2019). *Acceptable Elongations and Low-Cycle Fatigue Performance for High-Strength Reinforcing Bars The University of Texas at San Antonio*.

- ITEA, I. T. de la E. en A. (2002). Diseño para fatiga. *Guía de Diseño Para Edificios Con Estructura de Acero, Tomo 14*.
- Kashani, M. M., Barmi, A. K., & Malinova, V. S. (2015). Influence of inelastic buckling on low-cycle fatigue degradation of reinforcing bars. *Construction and Building Materials*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.102>
- Lobera R. (2016). *Respuesta sísmica de marcos de hormigón armado con detalles innovadores para las vigas en las zonas próximas a los nudos*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Mander, J. B., Panthaki, F. D., & Kasalanatp, A. (1994). Low-cycle fatigue behavior of reinforcing steel. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 6(4), 453–468.
- Matson, C. (2018). *Fallas características de vigas de hormigón armado con armadura transversal inclinada sometidas a sollicitación sísmica*. Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Pino, C. (2016). *Vigas de hormigón armado con refuerzo transversal y anclajes inclinados 45° sometidas a sollicitación sísmica*. Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Restrepo-Posada, J. I., Park, R., & Buchanan, A. H. (1992). Seismic Behaviour of Connections Between Precast Concrete Elements. *Department of Civil Engineering, PhD Diss.*
- Rojas, S. (2022). *Comportamiento cíclico de barras de acero para hormigón armado sometidas a fatiga de bajo ciclaje con pandeo restringido*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.

- Silva, B. (2014). *Vigas de hormigón armado con refuerzo al corte en 45° sometidas a cargas cíclicas*. Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Silva, B. (2022). *Longitud de anclaje reducida para mitigar tendencia a la fractura de las barras de refuerzo en elementos de hormigón armado sometidos a intensa solicitación sísmica*. Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Tripathi, M., Dhakal, R. P., Dashti, F., & Massone, L. M. (2018). Low-cycle fatigue behaviour of reinforcing bars including the effect of inelastic buckling. *Construction and Building Materials*, 190, 1226–1235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.192>
- Zheng, H., & Abel, A. (1998). Stress concentration and fatigue of profiled reinforcing steels. *International Journal of Fatigue*, 20(10). [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(98\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(98)00051-6)

ANEXOS

A. Resultados ensayos de fatiga

Ensayos de Fatiga Simétricos

Tabla A1. Resumen del número de ciclos a la falla ($2N_f$) de los ensayos de fatiga simétricos.

Acero	L/D	Número de ciclos a la falla, 2N _f																		
		β	0.5%			1%			2%			3%			4%			5%		
		i	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
AZA	14	Ri	2000	-	-	137	129	-	45	40	-	22	22	-	12	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	2000			133			43			22			12			-		
	9	Ri	-	-	-	276	312	-	48	39	-	16	15	-	9	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	-			294			44			16			9			-		
	4	Ri	-	-	-	2000	-	-	208	244	-	57	61	-	27	-	-	14	-	-
		$\bar{x}$	-			2000			226			59			27			14		
CAP	14	Ri	1230	-	-	118	138	-	27	36	-	19	16	-	11	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	1230			128			32			18			11			-		
	9	Ri	-	-	-	268	298	-	32	33	-	15	19	-	9	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	-			283			33			17			9			-		
	4	Ri	-	-	-	2000	-	-	265	241	-	48	52	-	26	-	-	12	-	-
		$\bar{x}$	-			2000			253			50			26			12		
ACMA	14	Ri	722	-	-	60	54	62	20	20	-	5	8	-	3	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	722			59			20			7			3			-		
	9	Ri	-	-	-	144	135	-	20	20	-	11	12	-	6	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	-			140			20			12			6			-		
	4	Ri	-	-	-	2000	-	-	118	101	-	33	48	-	16	-	-	6	-	-
		$\bar{x}$	-			2000			110			41			16			6		

Número total de ensayos = 68

L/D = esbeltez de la barra.

β = deformación unitaria.

Ri = repetición del ensayo número i.

$\bar{x}$ = promedio del número de ciclos a la falla de las repeticiones Ri.

Ensayos de Fatiga Asimétricos

Tabla A2. Resumen del número de ciclos a la falla ($2N_f$) de los ensayos de fatiga asimétricos.

Acero	L/D	Número de ciclos, $2N_f$																		
		β	0.5%			1%			2%			3%			4%			5%		
		i	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
AZA	14	Ri	-	-	-	123	-	-	31	-	-	11	-	-	9	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	-			123			31			11			9			-		
	9	Ri	-	-	-	298	-	-	40	-	-	15	-	-	7	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	-			298			40			15			7			-		
	4	Ri	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	-			-			-			-			-			-		
CAP	14	Ri	-	-	-	124	-	-	35	-	-	12	-	-	8	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	-			124			35			12			8			-		
	9	Ri	-	-	-	295	-	-	54	-	-	11	-	-	7	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	-			295			54			11			7			-		
	4	Ri	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	-			-			-			-			-			-		
ACMA	14	Ri	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	-			-			-			-			-			-		
	9	Ri	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	-			-			-			-			-			-		
	4	Ri	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		$\bar{x}$	-			-			-			-			-			-		

Número total de ensayos = 16

L/D = esbeltez de la barra.

β = deformación unitaria.

Ri = repetición del ensayo número i.

$\bar{x}$ = promedio del número de ciclos a la falla de las repeticiones Ri.

B. Resultados de los ensayos BBT

Acero AZA

Tabla B1. Resumen de los resultados del ensayo BBT de las barras AZA.

N°	β	$\delta_{\min}$ [mm]	$\omega(x) = ax^2 + bx + c$			R^2	φ [1/mm]	ε_b	EAF
			a	b	c				
1	5.0%	5.75	-0.0124	1.4410	-26.90	0.9974	-0.0248	0.099	0.208
2	10.0%	11.50	-0.0187	2.1331	-40.09	0.9976	-0.0374	0.150	0.193
3	15.0%	17.25	-0.0268	3.1166	-61.92	0.9989	-0.0536	0.214	0.189
4	16.3%	18.69	-0.0282	3.2532	-64.60	0.9986	-0.0564	0.226	0.146
5	17.5%	20.13	-0.0294	3.4496	-73.21	0.9983	-0.0588	0.235	0.103
6	18.8%	21.56	-0.0329	3.7362	-75.69	0.9991	-0.0658	0.263	0.132
7	19.4%	22.31	-0.0329	3.7680	-77.26	0.9989	-0.0658	0.263	0.078
8	20.0%	23.00	-0.0332	3.8060	-78.91	0.9973	-0.0664	0.266	0.046
9	22.5%	25.88	-0.0363	4.2536	-91.76	0.9986	-0.0726	0.290	0.026
10	25.0%	28.75	-0.0381	4.3507	-91.25	0.9996	-0.0762	0.305	0.056

β = deformación unitaria.

$\delta_{\min}$ = deformación máxima en compresión.

$\omega(x)$ = ajuste polinómico de 2do grado de la posición del eje neutro de la barra.

R^2 = coeficiente de correlación.

φ = curvatura de la barra.

ε_b = deformación unitaria máxima por flexión debido al pandeo de la barra.

EAF = elongación a la falla.

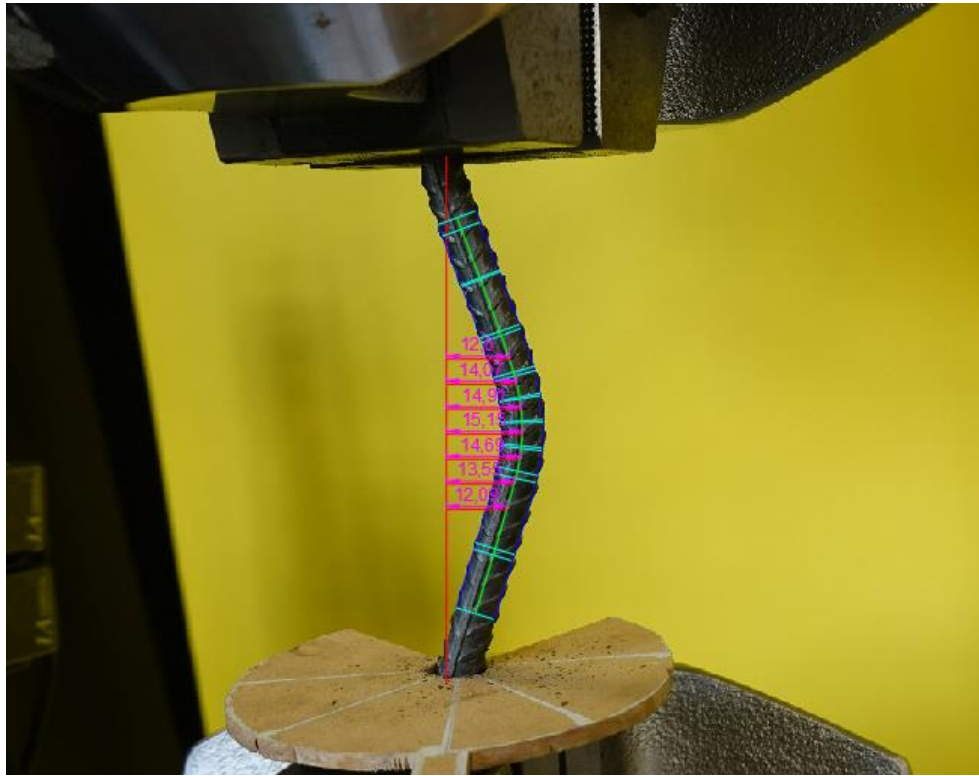


Figura B1. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 5.0\%$ de compresión (unidades en mm).

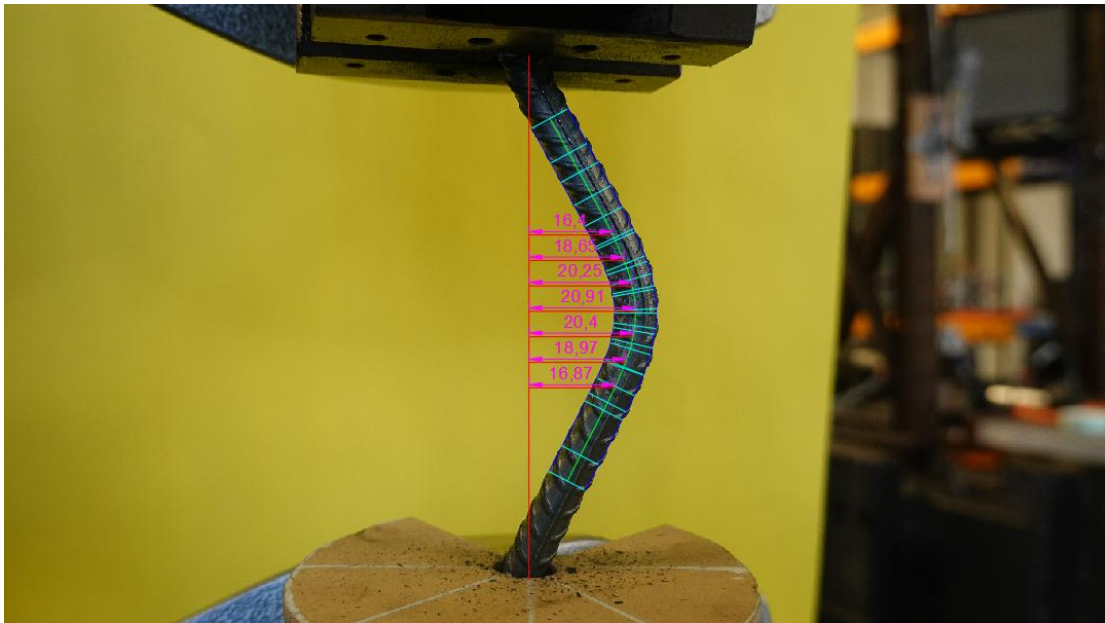


Figura B2. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 10.0\%$ de compresión (unidades en mm).

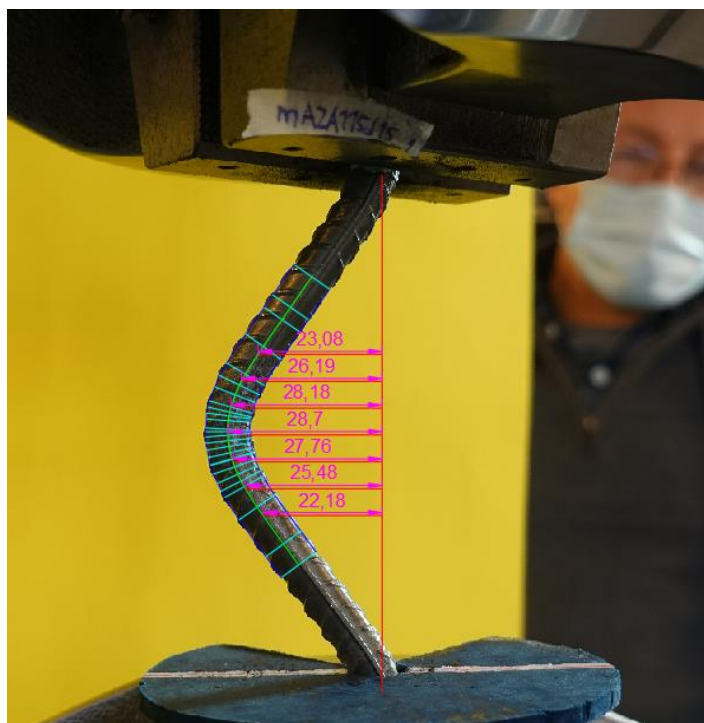


Figura B3. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 15.0\%$ de compresión (unidades en mm).

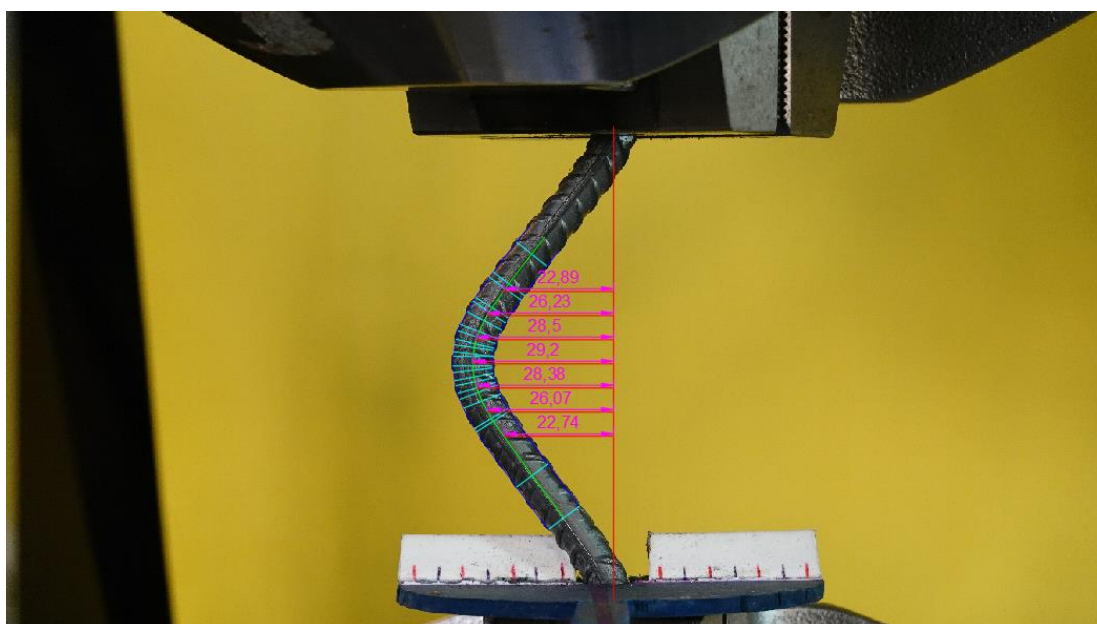


Figura B4. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 16.3\%$ de compresión (unidades en mm).

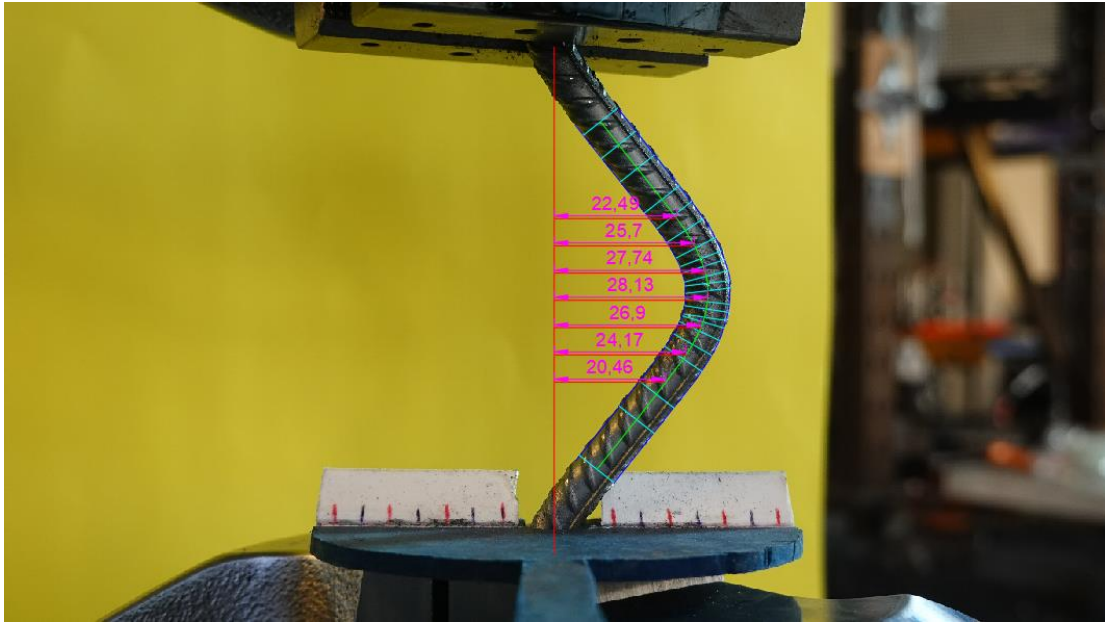


Figura B5. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 17.5\%$ de compresión (unidades en mm).

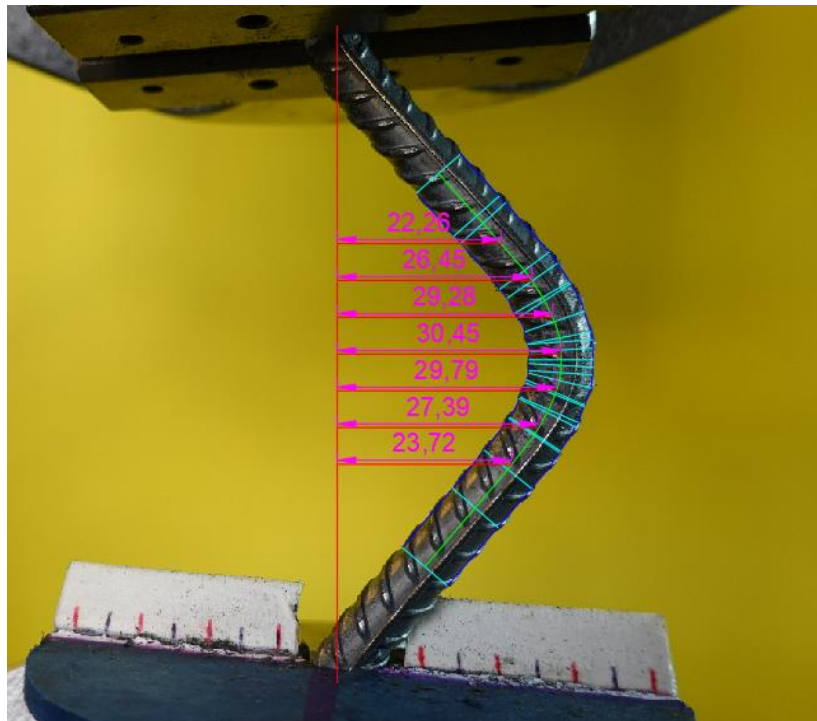


Figura B6. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 18.8\%$ de compresión (unidades en mm).

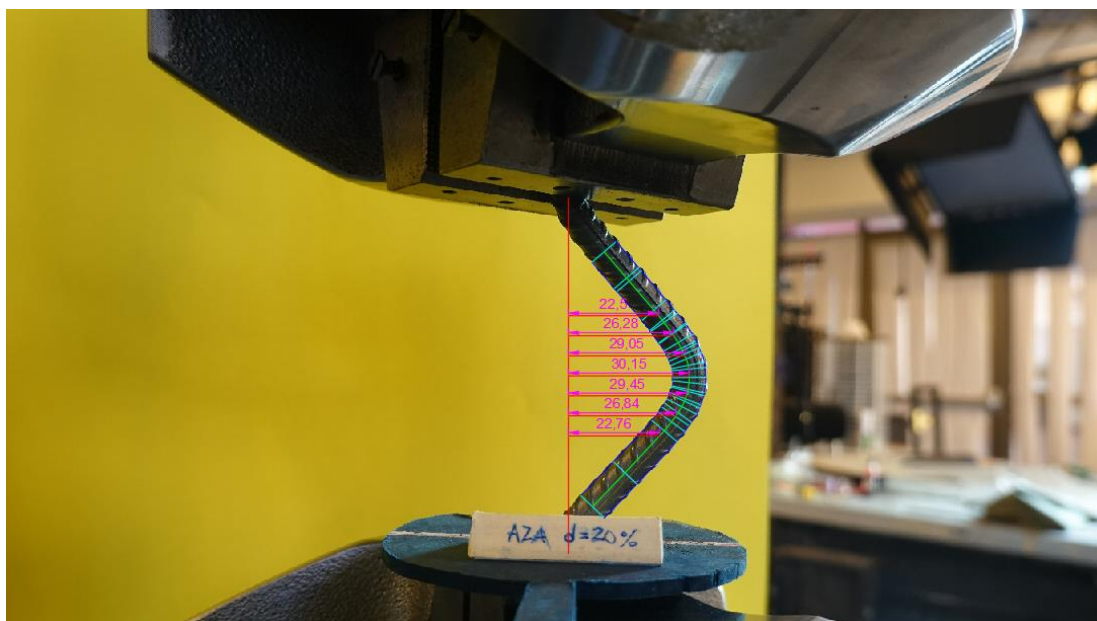


Figura B7. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 20.0\%$ de compresión (unidades en mm).

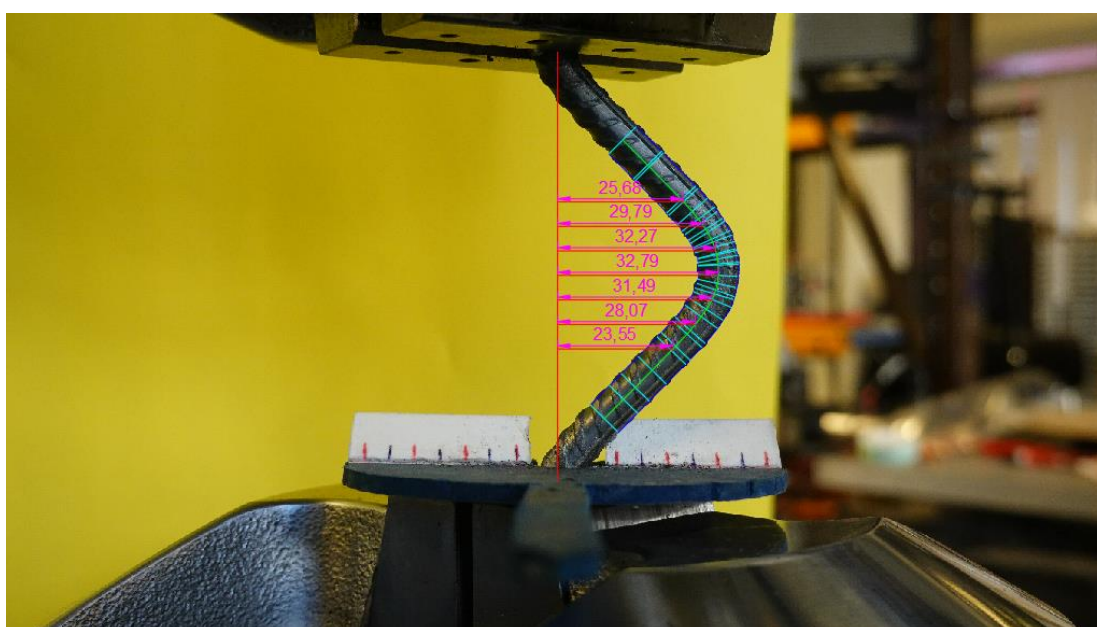


Figura B8. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 22.5\%$ de compresión (unidades en mm).

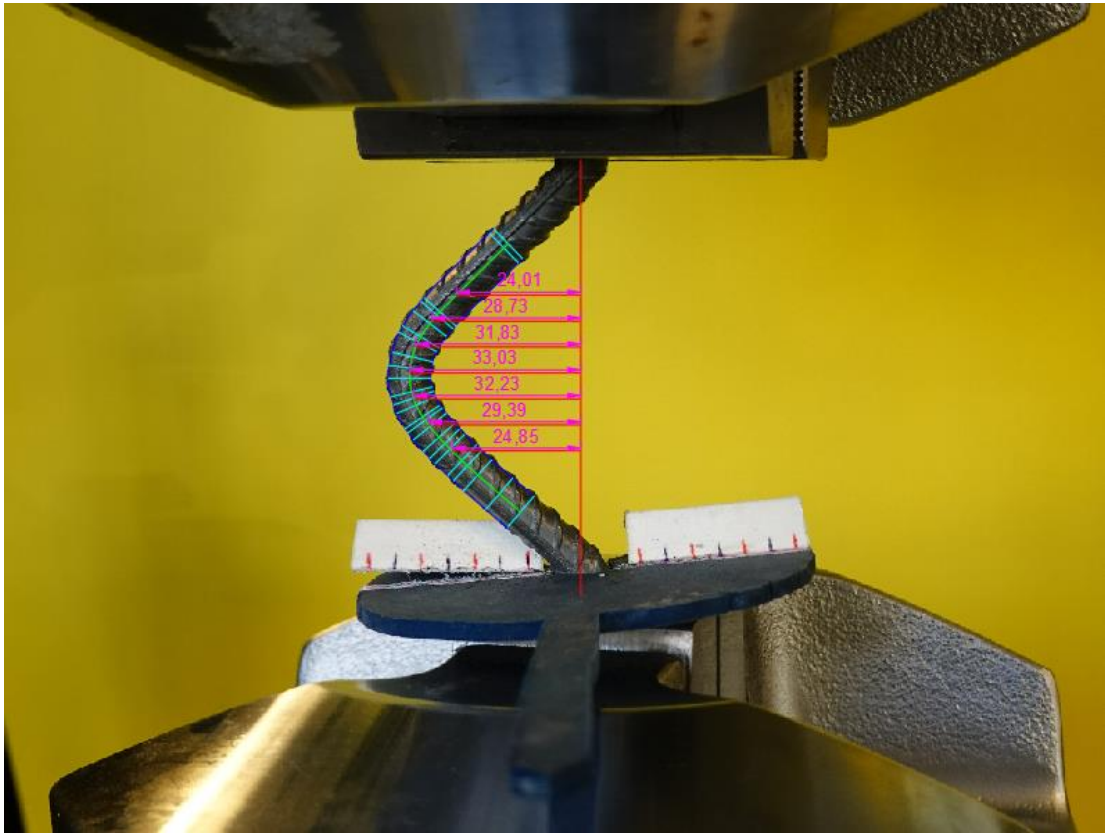


Figura B9. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra AZA pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 25.0\%$ de compresión (unidades en mm).

Acero CAP

Tabla B2. Resumen de los resultados del ensayo BBT de las barras CAP.

N°	β	$\delta_{\min}$ [mm]	$\omega(x) = ax^2 + bx + c$			R^2	φ [1/mm]	ε_b	EAF
			a	b	c				
1	5.0%	5.75	-0.0123	1.4238	-26.08	0.9948	-0.0246	0.098	0.168
2	10.0%	11.50	-0.0198	2.2350	-39.83	0.9955	-0.0396	0.158	0.168
3	15.0%	17.25	-0.0259	2.9493	-56.60	0.9972	-0.0518	0.207	0.137
4	16.3%	18.69	-0.0282	3.2154	-64.06	0.9978	-0.0564	0.226	0.115
5	17.5%	20.13	-0.0299	3.4125	-67.27	0.9961	-0.0598	0.239	0.094
6	18.8%	21.56	-0.0269	3.1040	-62.86	0.9975	-0.0538	0.215	0.088
7	20.0%	23.00	-0.0345	3.9429	-78.95	0.9971	-0.0690	0.276	0.085
8	21.3%	24.44	-0.0350	4.0348	-84.56	0.9964	-0.0700	0.280	0.077
9	22.5%	25.88	-0.0381	4.4137	-95.60	0.9976	-0.0762	0.305	0.047
10	25.0%	28.75	-0.0404	4.6259	-99.20	0.9984	-0.0808	0.323	0.061

β = deformación unitaria.

$\delta_{\min}$ = deformación unitaria máxima en compresión.

$\omega(x)$ = ajuste polinómico de 2do grado de la posición del eje neutro de la barra.

R^2 = coeficiente de correlación.

φ = curvatura de la barra.

ε_b = deformación unitaria máxima por flexión debido al pandeo de la barra.

EAF = elongación a la falla.

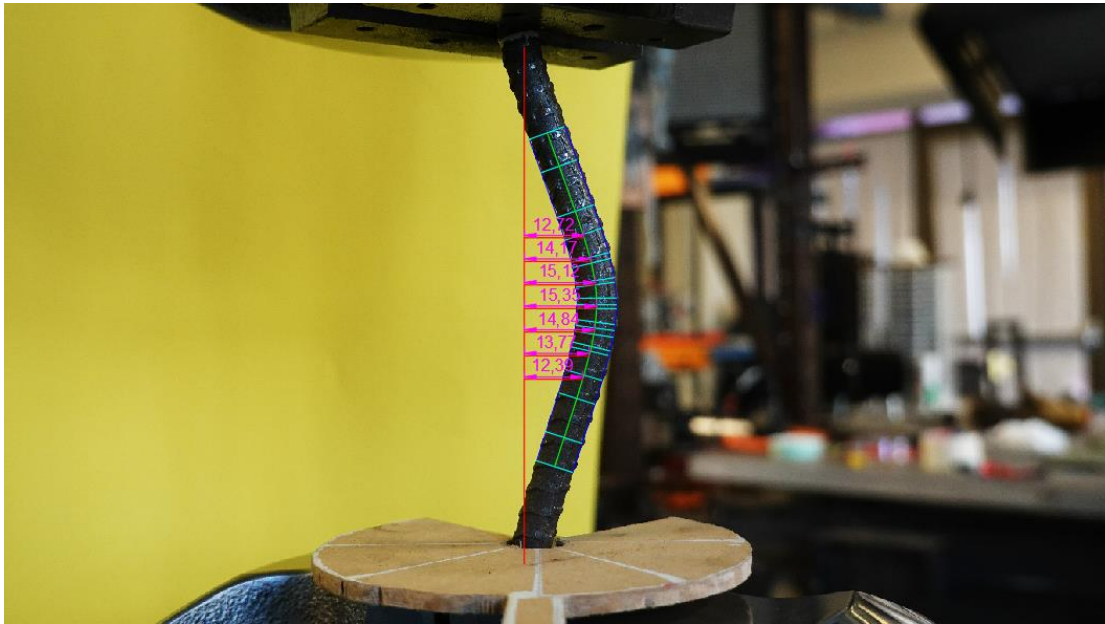


Figura B10. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 5.0\%$ de compresión (unidades en mm).

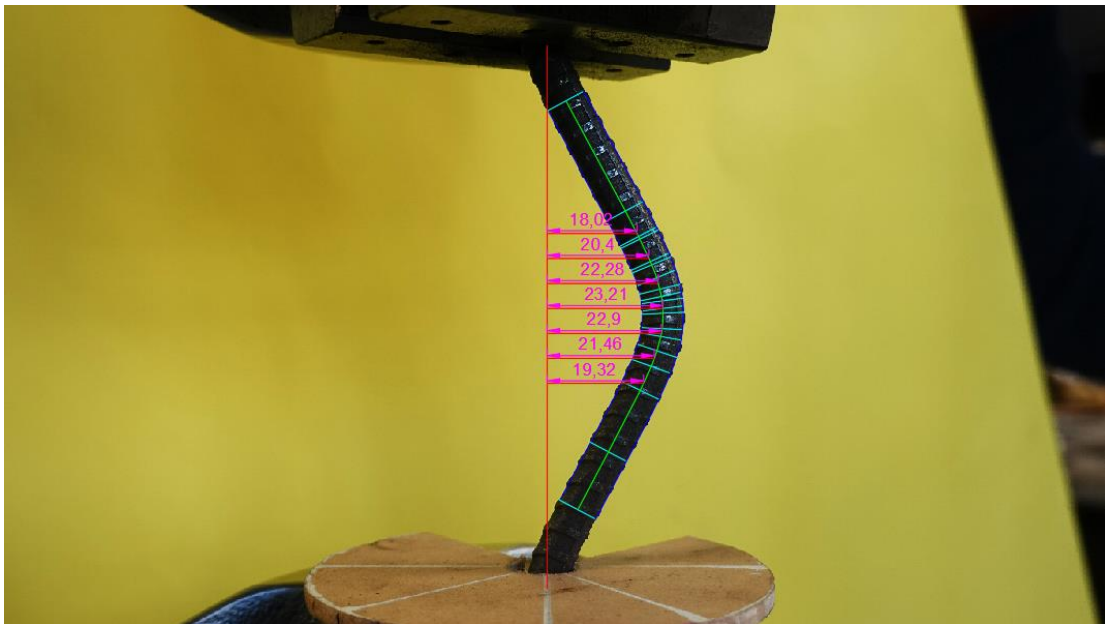


Figura B11. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 10.0\%$ de compresión (unidades en mm).

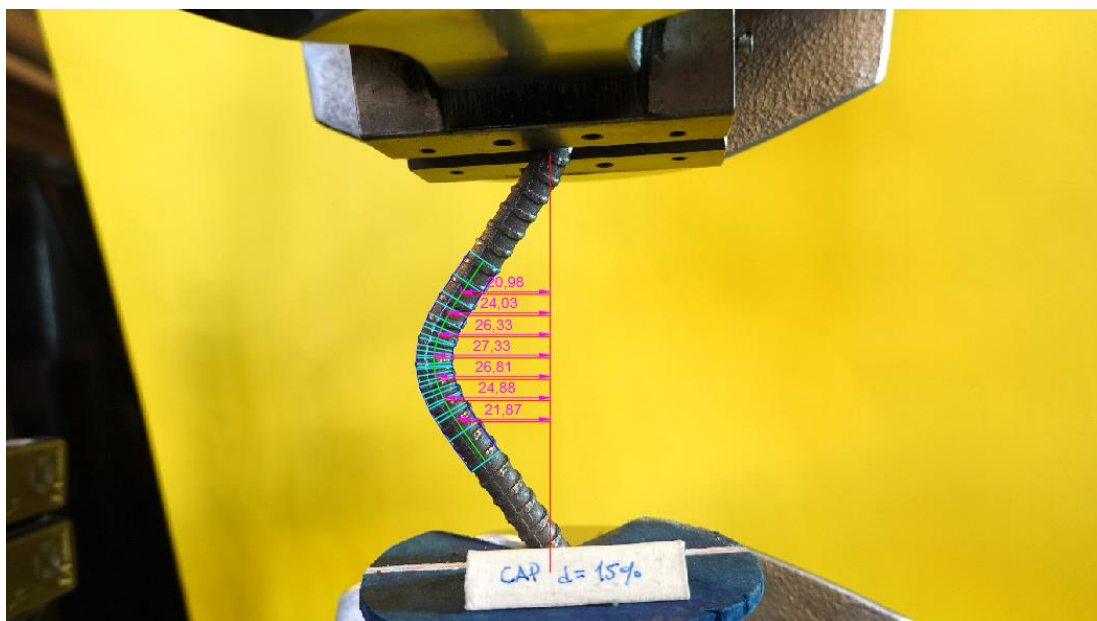


Figura B12. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 15.0\%$ de compresión (unidades en mm).

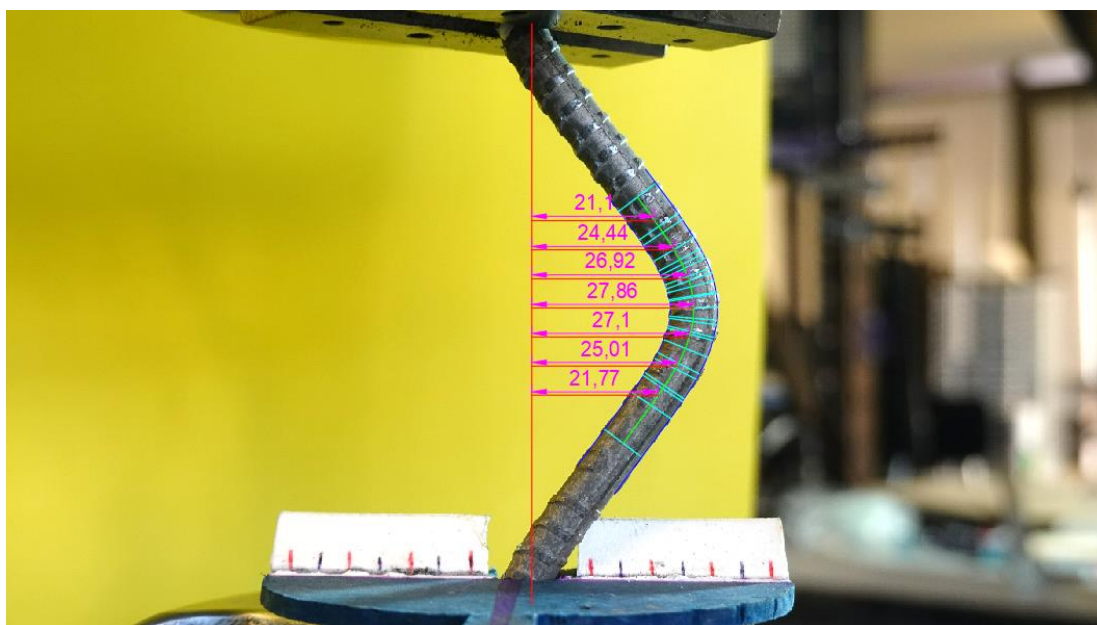


Figura B13. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 16.3\%$ de compresión (unidades en mm).

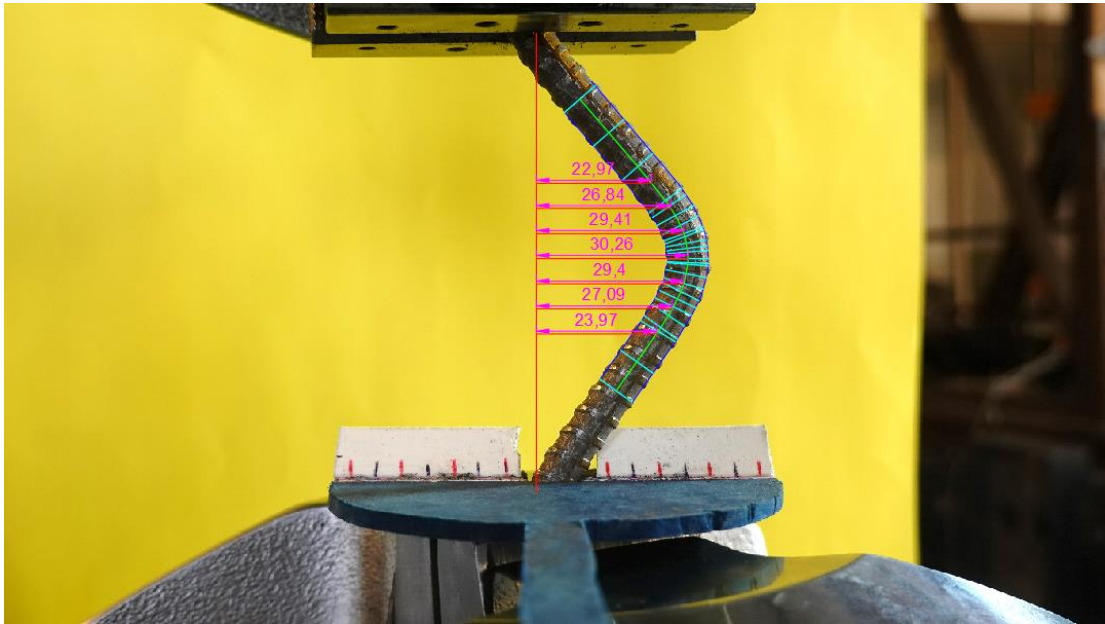


Figura B14. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 17.5\%$ de compresión (unidades en mm).

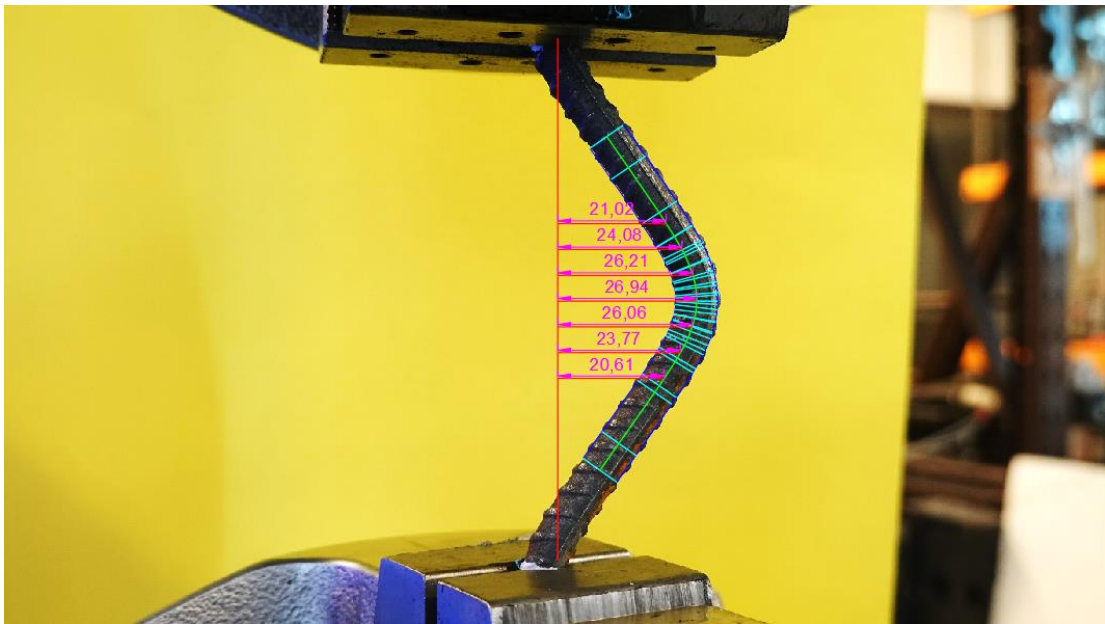


Figura B15. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 18.8\%$ de compresión (unidades en mm).

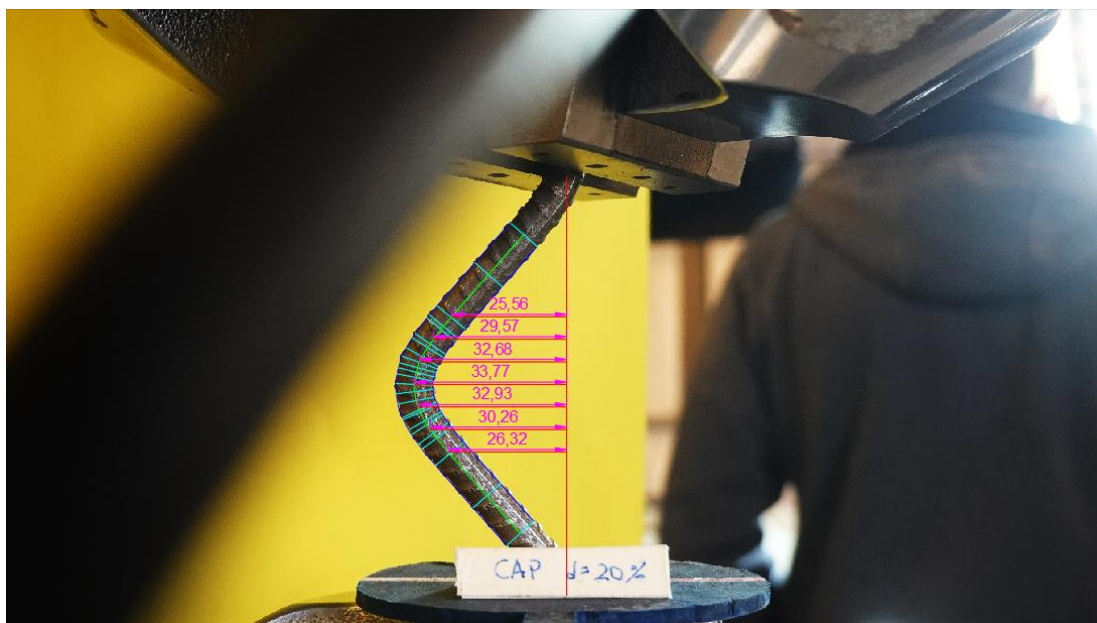


Figura B16. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 20.0\%$ de compresión (unidades en mm).

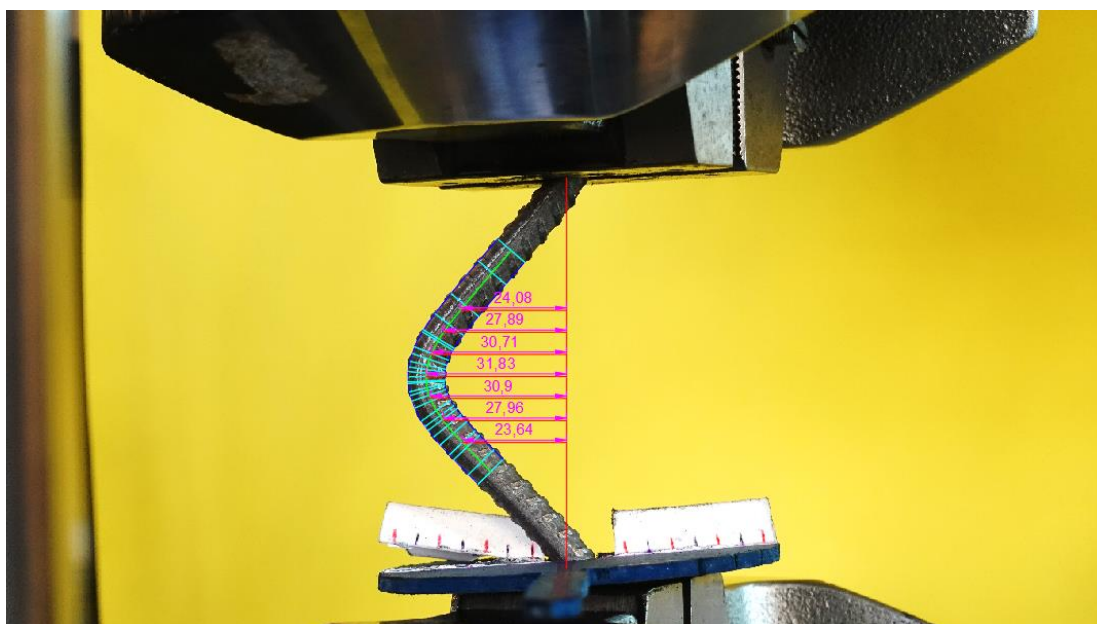


Figura B17. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 21.3\%$ de compresión (unidades en mm).

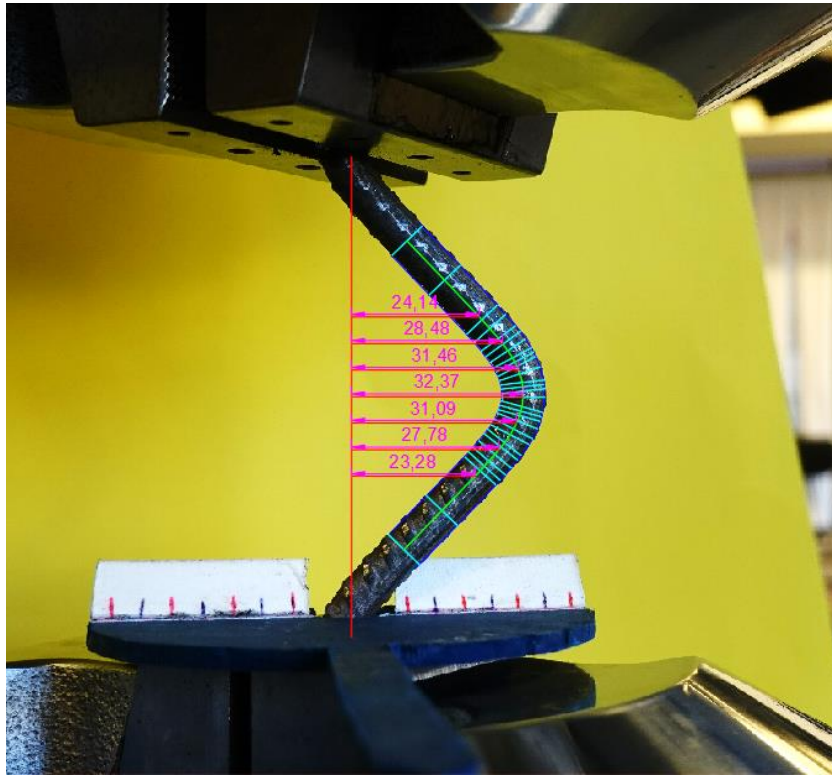


Figura B18. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 22.5\%$ de compresión (unidades en mm).

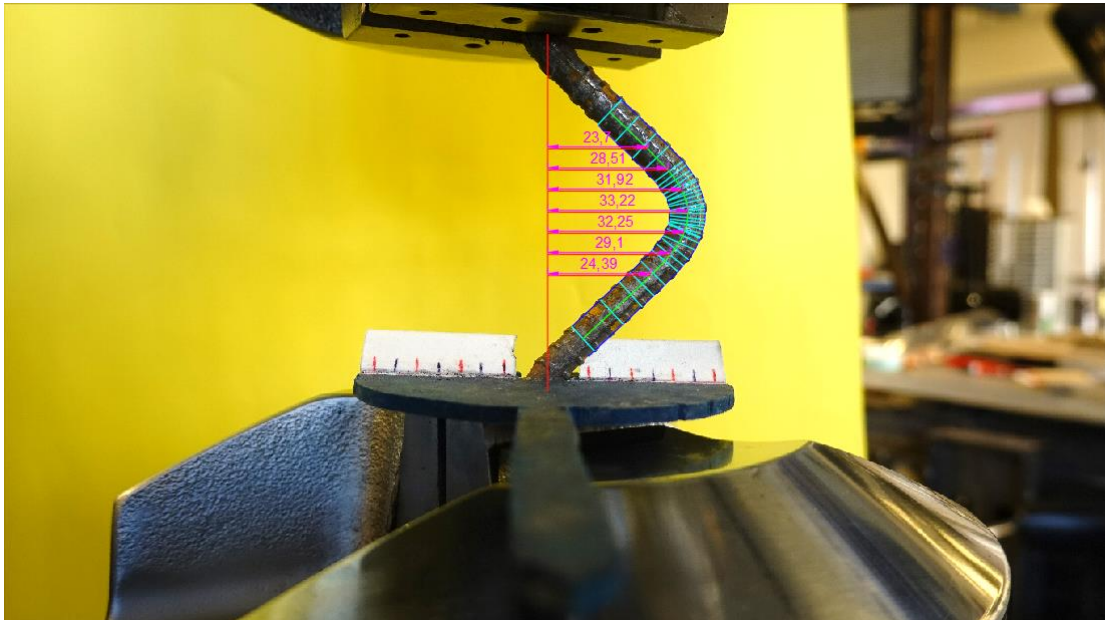


Figura B19. Mediciones de los desplazamientos horizontales realizados en AutoCAD de la barra CAP pandeada durante el ensayo BBT con $\beta = 25.0\%$ de compresión (unidades en mm).