UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE

COMPORTAMIENTO CICLICO DE BARRAS DE ACERO PARA HORMIGON ARMADO SOMETIDAS A FATIGA DE BAJO CICLAJE CON PANDEO RESTRINGIDO

Memoria de titulación presentada por

SERGIO SEBASTIÁN ROJAS HERNÁNDEZ

Como requisito para optar al título de

Ingeniero Civil

Profesor Guía

René Tobar Ramos

Octubre de 2022

Resumen Ejecutivo

Se implementó un programa experimental con el objetivo de determinar la resistencia a la fatiga de bajo ciclaje de barras de acero de refuerzo para hormigón armado y recopilar datos sobre el comportamiento frente a este tipo de solicitación de las barras disponibles en el mercado local, tanto en su forma original como sometidas a la soldadura de armaduras transversales. Este tipo de ensayo no está normalizado, y fue desarrollado como parte del trabajo realizado para esta memoria, sobre muestras representativas de barras de refuerzo sometidos a ciclos de tracción-compresión dentro de una camisa de acero que restringió su pandeo.

El interés del estudio provino de las fracturas inesperadas observadas en las barras de refuerzo longitudinal de elementos de hormigón armado que representaban un segmento de viga adyacente a una columna exterior de un marco dúctil, y que fueron sometidos a cargas cíclicas simulando solicitación sísmica en laboratorios de la UTFSM. Las fracturas provocaban el colapso catastrófico del elemento y aparecían sólo cuando la armadura transversal de la viga consistía en estribos inclinados, pero no cuando lo estribos se disponían de manera tradicional a 90 grados, contrarrestando las ventajas que tienen los estribos inclinados para el comportamiento sísmico de los elementos de hormigón armado.

Con el objetivo de evitar estas fracturas en futuros diseños y debido a la falta de datos experimentales sobre la resistencia a fatiga de bajo ciclaje de este tipo de barras, se decidió emprender un programa de ensayos desarrollado para esta memoria en donde la fatiga de bajo ciclaje se estudia para el caso en que el pandeo de la barra está restringido, recreando la situación en que una barra trabaja cuando se encuentra en condiciones ideales, perfectamente confinada, y no sujeta a pandeo. Una memoria desarrollada en forma paralela, (S. A. Rojas, 2022) estudió el caso en que la barra está libre de pandear.

En el programa experimental se consideraron barras de tres distintos fabricantes, ACMA, AZA y CAP. El estudio se limitó a barras con un diámetro de 8 mm, como las usadas en la fabricación de los elementos de hormigón armado en que se observaron las fracturas. Se aprovechó el uso de la camisa de acero para explorar también otros casos interesantes, como el efecto de la soldadura de elementos transversales en barras de aceros soldables, ejecutada con y sin precalentamiento.

La camisa de acero que impidió el pandeo fue diseñada para sujetarse en la mordaza superior de la máquina de ensayos a través de tarugos. El diseño inicial de la camisa de acero mostró fallas en deformaciones superiores a 2% y fue necesario un rediseño, con el que se obtuvieron resultados satisfactorios.

A partir de los resultados experimentales, se obtuvieron las constantes de los aceros nacionales según el modelo de Coffin-Manson y se compararon con los resultados presentes en la literatura. Se confirmó que las barras ensayadas de los fabricantes AZA y CAP responden a la fatiga igual o mejor que lo usual en otros países, mientras que las barras ACMA tienen una resistencia menor.

Los ensayos de fatiga se vieron afectados por la aplicación de soldadura con precalentamiento y en mayor medida por la aplicación de soldadura sin precalentamiento.

Abstract

An experimental program was implemented with the objective of determining the low cycle fatigue life of reinforcing steel bars for reinforced concrete and to collect data on the behavior of the bars available in the local market, both in their original form and subjected to welding of transverse reinforcement, under this type of stress. This type of test is not standardized, and was developed as part of the work carried out for this report, on representative samples of reinforcing bars subjected to tension-compression cycles inside a steel jacket that restricted their buckling.

The interest of the study came from the unexpected fractures observed in the longitudinal reinforcing bars of reinforced concrete elements representing a beam segment adjacent to an external column of a ductile frame, which were subjected to cyclic loading simulating seismic stress in UTFSM laboratories. The fractures caused the catastrophic collapse of the element and appeared only when the transverse reinforcement of the beam consisted of inclined stirrups, but not when the stirrups were arranged in the traditional 90-degree manner, counteracting the advantages of inclined stirrups for the seismic behavior of reinforced concrete elements.

In order to avoid these fractures in future designs and due to the lack of experimental data on the low cycle fatigue life of this type of bars, it was decided to undertake a test program developed for this report where the low cycle fatigue is studied for the case in which the buckling of the bar is restricted, recreating the situation in which a bar works when it is in ideal conditions, perfectly confined, and not subject to buckling. A memory developed in parallel, (S. A. Rojas, 2022) studied the case in which the bar is free to buckle.

In the experimental program, bars from three different manufacturers, ACMA, AZA and CAP, were considered. The study was limited to bars with a diameter of 8 mm, such as those used in the manufacture of the reinforced concrete elements in which the fractures were observed. The use of the steel jacket was used to explore also other interesting cases, such as the effect of welding of transverse elements in weldable steel bars, executed with and without preheating.

The steel jacket that prevented buckling was designed to be clamped in the upper jaw of the testing machine through dowels. The initial design of the steel jacket showed failures at deformations higher than 2% and a redesign was necessary, with which satisfactory results were obtained.

From the experimental results, the constants of the national steels were obtained according to the Coffin-Manson model and compared with the results present in the literature. It was confirmed that the tested bars from AZA and CAP manufacturers respond to fatigue as well or better than usual in other countries, while ACMA bars have a lower resistance.

The fatigue tests were affected by the application of welding with preheating and to a greater extent by the application of welding without preheating.

Índice de Contenido

Índice de figuras V
Índice de tablas VII
Capítulo 1 1
1.1 Introducción 1
1.2 Objetivos 2
1.3 Organización de la memoria 3
Capítulo 2 4
Revisión bibliográfica 4
2.1 Fatiga de bajo ciclaje 4
2.1.1 Fatiga 4
2.1.2 Tipos de fallas por fatiga 4
2.1.3 Cargas y esfuerzos cíclicos 4
2.1.4 Curvas S-N 6
2.1.5 Fatiga de bajo ciclaje en barras de acero de refuerzo 6
2.1.6 Uso de una camisa de acero para impedir el pandeo de barras de acero en ensayos cíclicos 8
2.2 Uso de estribos soldados en barras longitudinales 11
Capítulo 3 15
Programa de ensayos 15
3.1 Barras presentes en el mercado nacional 15
3.2 Barras soldables CAPSOL 17
3.3 Equipo 21
Capítulo 4 23
Diseño de un dispositivo que impida el pandeo 23
4.1 Primer dispositivo 23
4.1.1 Diseño y construcción del dispositivo 23
4.1.2 Montaje 25
4.1.3 Comentarios 27
4.2 Modificación al diseño original y nuevo dispositivo 28
4.2.1 Diseño y construcción del dispositivo definitivo 28
4.2.2 Montaje 31
Capítulo 5 35

Resultados 35
5.1 Resultados del dispositivo definitivo con barras de acero del mercado nacional 35
5.1.1 Acero ACMA 36
5.1.1.1 Deformación 1% 36
5.1.1.2 Deformación 2% 37
5.1.1.3 Deformación 3% 38
5.21.2 Acero AZA 38
5.1.2.1 Deformación 1% 39
5.1.2.2 Deformación 2% 40
5.1.2.3 Deformación 3% 41
5.1.3 Acero CAP 42
5.1.3.1 Deformación 1% 42
5.1.3.2 Deformación 2% 43
5.1.3.3 Deformación 3% 44
5.1.4 Comentarios 45
5.1.4.1 Números de ciclos hasta la falla 45
5.1.4.2 Comparación ensayos con pandeo y sin pandeo 46
5.1.4.3 Modelo de Coffin-Manson 48
5.2 Resultados del dispositivo definitivo con barras de acero soldables CAPSOL sometidas a distinta metodología de soldadura 50
5.2.1 CAPSOL control 50
5.2.2 Probeta GF1 53
5.2.3 Probeta P4 55
5.2.4 Comentarios 57
Conclusiones 58
Referencias 59
ANEXO A 61
Soldabilidad de barras de refuerzo para hormigón armado 61

Índice de figuras

Figura 1.1 Zona representada por las probetas de hormigón armado, F. Basualdo (2019).....1

Figura 1.2 Probeta sometida a ensayo de carga cíclica, F. Basualdo (2019).....2

Figura 2.1 Distintos patrones de cargas cíclicas, A. Collins (1993).....5

Figura 2.2 Ejemplo de curva S-N, A. Collins (1993).....6

Figura 2.3 Ensayo cíclico con camisa de acero, como fue realizado por R. Hawileh et al. (2010).....9

Figura 2.4 Montaje del experimento para relacionar el desplazamiento del LVDT con el MSG, como fue realizado por R. Hawileh et al. (2010).....9

Figura 2.5 Curva de histéresis sin pandeo, R. Hawileh et al. (2010).....10

Figura 2.6 Barra ensayada sin pandeo, R. Hawileh et al. (2010).....10

Figura 2.7 Montaje de las probetas, F. Basualdo (2019).....11

Figura 2.8 Detalle de la armadura en la probeta GF1, F. Basualdo (2019).....12

Figura 2.9 Curva de fuerza desplazamiento para GF1, F. Basualdo (2019).....13

Figura 2.10 Estado de la probeta GF1 durante el segundo ciclo de 25 mm, F. Basualdo (2019).....13

Figura 2.11 Detalle de la armadura en la probeta P4, G. Figueroa (2019).....14

Figura 2.12 Curva de fuerza desplazamiento para P4, G. Figueroa (2019).....14

Figura 3.1 Uso de barras seleccionadas en construcción nacional. A la izquierda el uso de barras CAP en una columna, a la derecha el uso de mallas ACMA en una losa, obtenidas de www.capacero.cl y www.acma.cl.....16

Figura 3.2 Barras seleccionadas ACMA, CAP y AZA, ordenadas respectivamente de arriba abajo.....16

Figura 3.3 Gráficos esfuerzo deformación para las barras presentes en el mercado nacional.....17

Figura 3.4 Probeta P4 después de ser ensayada (foto a la izquierda) y después de ser retirado el hormigón del extremo dejando a la vista el refuerzo (foto a la derecha).....18

Figura 3.5 Barras obtenidas de la probeta GF1.....18

Figura 3.6 Barras obtenidas de la probeta P4.....19

Figura 3.7 Barras listas para ensayar de la probeta GF1.....19

Figura 3.8 Barras listas para ensayar de la probeta P4.....20

Figura 3.9 Barra de control CAPSOL.....20

Figura 3.10 Gráficos esfuerzo deformación para las barras CAPSOL.....21

Figura 3.11 Disposición del equipo utilizado y de la obtención de datos, S. A. Rojas (2022).....22

Figura 4.1 Planos de diseño de los discos que componen la camisa.....24

Figura 4.2 Camisa armada con el disco base en la parte superior y los discos tipo 1 y tipo 2 puestos de forma alternada.....24

Figura 4.3 Conformación y medidas de la camisa para barras de 11.5 cm de longitud entre mordazas.....25

Figura 4.4 (a) Paso 1: Colocación de la barra y tarugos en la camisa; (b) Paso 2: Colocación de la barra en la mordaza inferior; (c) Paso 3: Descenso y cierre de la mordaza superior.....26

Figura 4.5 Montaje final con el sistema láser de medición instalado.....26

Figura 4.6 Comparación entre barra ensayada a) con pandeo y b) sin pandeo.....27

Figura 4.7 Pandeo en la zona de la mordaza inferior en un ensayo con amplitud de deformación del 2% utilizando la camisa de acero.....27

Figura 4.8 Planos de diseño de la camisa y los anillos, con medidas en mm.....29

Figura 4.9 Camisa y anillos del nuevo sistema.....30

Figura 4.10 Camisa perforada con los tarugos instalados.....30

Figura 4.11 Anillo modificado que va sobre la mordaza inferior.....31

Figura 4.12 Tarugos puestos en el anillo.....31

Figura 4.13 (a) Paso 1: Colocación de la barra en la mordaza inferior; (b) Paso 2: Colocación del primer anillo; (c) Paso 3: Colocación de los anillos restantes y las esponjas; (d) Paso 4: Colocación de la camisa.....32

Figura 4.14 Paso 5: Descenso y cierre de la mordaza superior.....33

Figura 4.15 Montaje final con el sistema láser de medición instalado.....33

Figura 4.16 Montaje final con el sistema láser instalado para barras CAPSOL.....34

Figura 5.1 Gráfico acero ACMA con deformación 1%.....36

Figura 5.2 Barra ACMA 1%.....36

Figura 5.3 Gráfico acero ACMA con deformación 2%.....37

Figura 5.4 Barra ACMA 2%.....37

Figura 5.5 Gráfico acero ACMA con deformación 3%.....38

Figura 5.6 Barra ACMA 3%.....38

Figura 5.7 Gráfico acero AZA con deformación 1%.....39

Figura 5.8 Barra AZA 1%.....39

Figura 5.9 Gráfico acero AZA con deformación 2%.....40

Figura 5.10 Barra AZA 2%.....40

Figura 5.11 Gráfico acero AZA con deformación 3%.....41

Figura 5.12 Barra AZA 3%.....41

Figura 5.13 Gráfico acero CAP con deformación 1%.....42

Figura 5.14 Barra CAP 1%.....42

Figura 5.15 Gráfico acero CAP con deformación 2%.....43

Figura 5.16 Barra CAP 2%.....43

Figura 5.17 Gráfico acero CAP con deformación 3%.....44

Figura 5.18 Barra CAP 3%.....44

Figura 5.19 Gráfico Nf vs Deformación de los distintos fabricantes de acero.....46

Figura 5.20 Gráfico de barras resumen de los ensayos con y sin pandeo.....47

Figura 5.21 Gráfico Nf vs Deformación de los distintos fabricantes de acero, comparando ensayos con pandeo y sin pandeo.....48

Figura 5.22 Gráfico 2Nf vs Deformación de los distintos fabricantes de acero.....49

Figura 5.23 Comparación de resultados obtenidos con modelos de la literatura.....50

Figura 5.24 Gráfico CAPSOL de control 1. Deformación unitaria 2 %.....51

Figura 5.25 Barra CAPSOL control 1.....51

Figura 5.26 Gráfico CAPSOL de control 2. Deformación unitaria 2 %.....52

Figura 5.27 Barra CAPSOL control 2.....52

Figura 5.28 Gráfico CAPSOL de probeta GF1 1. Deformación unitaria 2 %.....53

Figura 5.29 Barra GF1 1.....53

Figura 5.30 Gráfico CAPSOL de probeta GF1 2. Deformación unitaria 2 %.....54

Figura 5.31 Barra GF1 2.....54

Figura 5.32 Gráfico CAPSOL de probeta P4 1. Deformación unitaria 2 %.....55

Figura 5.33 Barra P4 1.....55

Figura 5.34 Gráfico CAPSOL de probeta P4 2. Deformación unitaria 2 %.....56

Figura 5.35 Barra P4 2.....56

Índice de tablas

Tabla 2.1 Número de ciclos hasta la falla de barras A706, R. Hawileh et al. (2010).....10

Tabla 2.2 Número de ciclos hasta la falla de barras A615, R. Hawileh et al. (2010).....10

Tabla 2.3 Programa de carga.....11

Tabla 3.1 Valores de fluencia y resistencia última de las barras presentes en el mercado nacional...17

Tabla 3.2 Valores de fluencia y estado último de las barras CAPSOL.....21

Tabla 4.1 Número de ciclos hasta la falla de cada barra con amplitud de deformación del 1%.....28

Tabla 5.1 Resultados de ensayo de barra ACMA con deformación 1%.....36

Tabla 5.2 Resultados de ensayo de barra ACMA con deformación 2%.....37

Tabla 5.3 Resultados de ensayo de barra ACMA con deformación 3%.....38

Tabla 5.4 Resultados de ensayo de barra AZA con deformación 1%.....39

Tabla 5.5 Resultados de ensayo de barra AZA con deformación 2%.....40

Tabla 5.6 Resultados de ensayo de barra AZA con deformación 3%.....41

Tabla 5.7 Resultados de ensayo de barra CAP con deformación 1%.....42

Tabla 5.8 Resultados de ensayo de barra CAP con deformación 2%.....43

Tabla 5.9 Resultados de ensayo de barra CAP con deformación 3%.....44

Tabla 5.10 Número de ciclos hasta la falla de cada barra con todas las deformaciones.....45

Tabla 5.11 Número de ciclos hasta la falla incluyendo pandeo de cada barra con todas las deformaciones, S. A. Rojas (2022).....46

Tabla 5.12 Reducción de Nf al considerar el pandeo, sp: Nf sin pandeo, cp: Nf con pandeo.....47

Tabla 5.13 Valores de M y m para los distintos tipos de acero.....49

Tabla 5.14 Resultados de ensayo de barra CAPSOL control 1.....51

Tabla 5.15 Resultados de ensayo de barra CAPSOL control 2.....52

Tabla 5.16 Resultados de ensayo de barra CAPSOL GF1 1.....53

Tabla 5.17 Resultados de ensayo de barra CAPSOL GF1 2.....54

Tabla 5.18 Resultados de ensayo de barra CAPSOL P4 1.....55

Tabla 5.19 Resultados de ensayo de barra CAPSOL P4 2.....56

Tabla 5.20 Número de ciclos hasta la falla con deformación 2% CAPSOL.....57

Capítulo 1

1.1 Introducción

En el laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María se han realizado ensayos en elementos de hormigón armado, que representan el segmento de viga adyacente a la columna exterior de un marco dúctil, figura 1.1, anclados a un trozo de columna. Estos elementos pueden considerarse construidos a escala 1/3 del tamaño real. Los ensayos consistieron en aplicar una carga cíclica en el extremo de la viga simulando solicitación sísmica, figura 1.2.

En estas probetas se han probado diferentes configuraciones de refuerzo, una de las cuales consistió en utilizar estribos inclinados en ángulos de 45° y soldados a las barras longitudinales. Esta configuración ha mostrado una ventaja considerable sobre la disposición de los estribos en la forma ortogonal tradicional, proporcionando una mayor resistencia y ductilidad al momento de realizar los ensayos. Sin embargo, en la mayoría de los casos se ha visto que ocurre fractura de la armadura longitudinal en la viga de la probeta y el consiguiente colapso catastrófico de esta última. Se requiere entonces conocer los detalles sobre cómo llega a desarrollarse este tipo de falla, y cómo se deben rediseñar las probetas para que esta no ocurra.

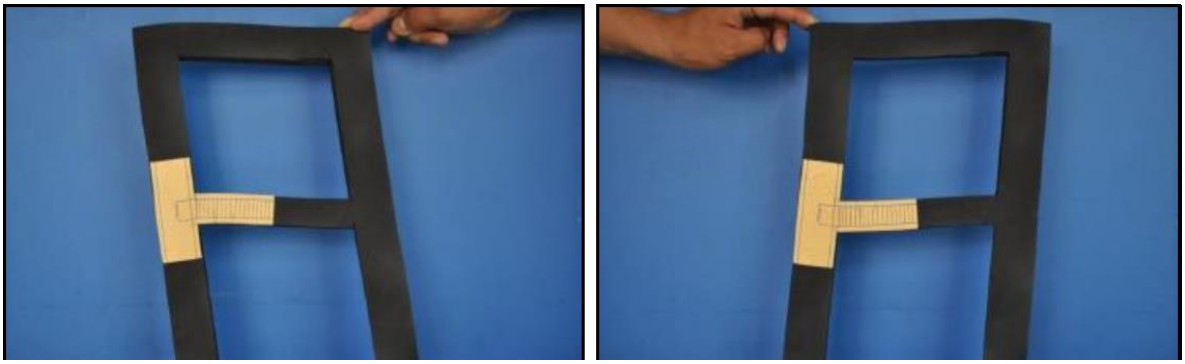

Figura 1.1 Zona representada por las probetas de hormigón armado, F. Basualdo (2019)

Figura 1.2 Probeta sometida a ensayo de carga cíclica, F. Basualdo (2019)

Específicamente, se necesitaba saber si dicho problema se solucionaría evitando por algún medio el pandeo de la barra longitudinal en la viga, observado siempre en los medios ciclos de compresión previos a la fractura, o si, de todas maneras, aun restringiendo la deflexión transversal y eliminando el pandeo, las barras se cortarían debido a la fatiga de bajo ciclaje.

Se encontró muy poca información sobre la resistencia a la fatiga de las barras de refuerzo utilizadas, y se diseñaron dos campañas de experimentos para reunir datos. Uno en el que se ensayan las barras sometiéndolas a cargas cíclicas de tracción-compresión permitiéndoles el pandeo libre como si se encontraran aisladas [1], y el otro restringiéndolo.

En esta memoria se implementó un ensayo capaz de aislar únicamente la resistencia a la fatiga de bajo ciclaje del material, impidiendo el pandeo de las barras mediante una camisa de acero, recreando así la situación en que una barra trabaja cuando se encuentra en condiciones ideales y perfectamente confinada. Este tipo de ensayos no está normalizado y se realizó sobre muestras representativas de barras de refuerzo. El dispositivo se ensayó con distintos niveles de deformación en las barras, verificando su funcionalidad, estabilidad, sencillez de montaje y efectividad en la prevención del pandeo.

1.2 Objetivos

El objetivo principal fue diseñar y construir un dispositivo capaz de restringir el pandeo de las barras de refuerzo longitudinal utilizadas en elementos de hormigón armado sometidas a cargas cíclicas en la máquina de tracción-compresión MTS 810 del laboratorio LEMCO.

Como objetivo secundario, se realizaron ensayos cíclicos con pandeo restringido a barras para hormigón armado de 8 mm de diámetro, provenientes de distintos fabricantes presentes en el mercado nacional, para así comparar la resistencia a la fatiga de bajo ciclaje entre ellas.

Como objetivo adicional, se estudió el efecto de la soldadura de elementos transversales sobre la resistencia a la fatiga de bajo ciclaje de las barras de acero de refuerzo.

1.3 Organización de la memoria

En el capítulo 2 se presenta la revisión bibliográfica, en donde se da una explicación teórica de la fatiga de bajo ciclaje y se muestra un resumen de distintas memorias y artículos sobre el tema.

En el capítulo 3 se trata la selección de los grupos de barras a ensayar y sus dimensiones, junto con sus respectivos programas de ensayos.

En el capítulo 4 se presentan los modelos de camisa construidos, sus planos, una explicación de cómo funcionan y se detallan los montajes paso a paso. Se dan las razones del porqué el primer dispositivo no dio resultados satisfactorios y fue necesaria la construcción de uno nuevo, y se menciona el equipamiento que fue utilizado para la realización de los ensayos.

En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos correspondientes a los números de ciclos hasta la falla y a los gráficos de histéresis de todas las barras. Para el caso de las barras presentes en el mercado nacional se obtienen, además, las ecuaciones que relacionan la deformación total aplicada con el número de ciclos; los resultados obtenidos se comparan con los ensayos realizados por S. A. Rojas [1] en barras afectadas por el pandeo, y las ecuaciones obtenidas se comparan con las encontradas en la literatura.

Capítulo 2

Revisión bibliográfica

2.1 Fatiga de bajo ciclaje

2.1.1 Fatiga

La resistencia a la fatiga de un material se define como el número de ciclos a una amplitud específica en la cual se produce la falla, la que, generalmente, se presenta en forma frágil y ocurre sin previo aviso, incluso en materiales dúctiles como el acero. Periodos de descanso, en donde el esfuerzo es removido, no generan ninguna recuperación significativa de los efectos producto del esfuerzo cíclico [2]. El daño hecho por el proceso de fatiga es acumulativo.

2.1.2 Tipos de fallas por fatiga

La falla debido a la fatiga puede dividirse en dos categorías, la fatiga de alto número de ciclos o de alto ciclaje, y la fatiga por bajo número de ciclos o de bajo ciclaje.

La fatiga de alto ciclaje se define como aquella en la cual la amplitud de cada ciclo provoca pequeñas deformaciones dentro del rango elástico [3].

Por su parte, la fatiga de bajo ciclaje se define como aquella que requiere de un número de ciclos típicamente menor que 1000, en la cual la amplitud de cada ciclo provoca grandes deformaciones, excediendo el límite elástico [4].

2.1.3 Cargas y esfuerzos cíclicos

En la figura 2.1 se observan distintos patrones de cargas cíclicas a las que puede estar sometida una estructura. De los gráficos se definen los siguientes términos:

$$\sigma_{max} = Esfuerzo\ máximo\ de\ tracción\ en\ el\ ciclo,$$

$$\sigma_{min} = Esfuerzo\ máximo\ de\ compresión\ en\ el\ ciclo,$$

$$\sigma_m = Esfuerzo\ medio = \frac{\sigma_{max}+\sigma_{min}}{2}, \tag{1}$$

$$\sigma_a = Amplitud\ de\ esfuerzo = \frac{\sigma_{max}-\sigma_{min}}{2}, \tag{2}$$

$$\Delta\sigma = Rango\ de\ esfuerzo = \sigma_{max} - \sigma_{min}, \tag{3}$$

$$R = Relación\ de\ esfuerzo = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \tag{4}$$

$$A = Relación\ de\ amplitud = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}. \tag{5}$$

Estas relaciones pueden escribirse en términos de la deformación. Por ejemplo, en el caso de R:

$$R = \frac{\varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max}} \quad si\ |\varepsilon_{max}| \geq |\varepsilon_{min}|, \tag{6}$$

$$R = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_{min}} \quad si\ |\varepsilon_{max}| \leq |\varepsilon_{min}|, \tag{7}$$

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_{max}-\varepsilon_{min}}{2}. \tag{8}$$

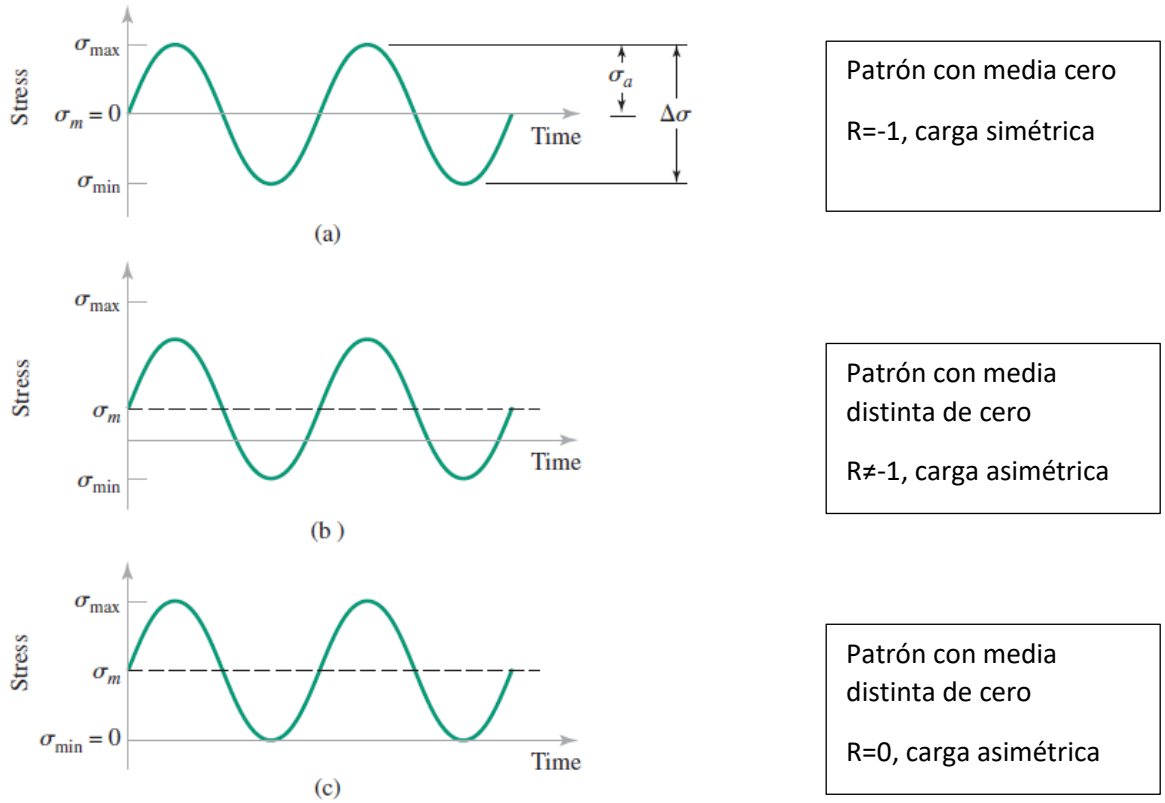

Figura 2.1 Distintos patrones de cargas cíclicas,

A. Collins (1993)

2.1.4 Curvas S-N

Las curvas de esfuerzo (o deformación) vs número de ciclos, o curvas S-N, se elaboran al experimentar con distintos niveles de esfuerzo (o deformación), obteniendo los números de ciclos soportados en cada uno. En la figura 2.2 se puede ver un ejemplo de curva S-N.

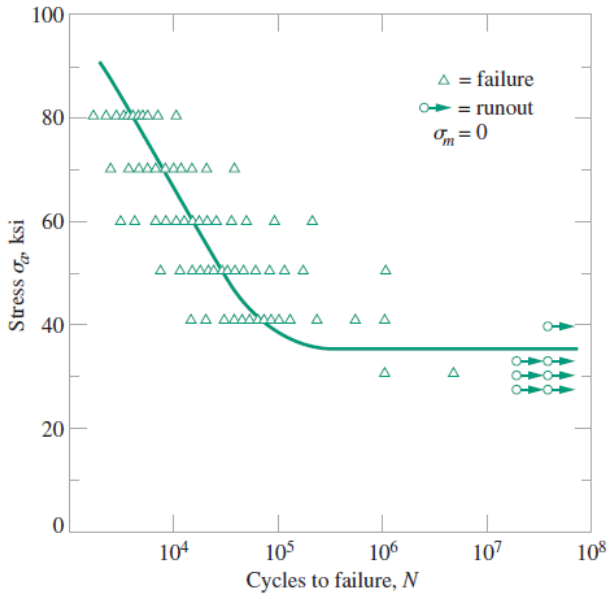

Figura 2.2 Ejemplo de curva S-N,

A. Collins (1993)

2.1.5 Fatiga de bajo ciclaje en barras de acero de refuerzo

En estructuras de hormigón armado sometidas a eventos sísmicos, es común observar que las barras de refuerzo son sometidas a grandes deformaciones de tracción y compresión, lo que conlleva a la falla por fatiga de bajo ciclaje. Es importante conocer las características relacionadas con la fatiga del acero de refuerzo para aplicaciones sísmicas. A continuación, se muestran algunos estudios que se han realizado para entender de mejor manera este comportamiento.

Para estimar la resistencia a la fatiga de un material, Manson [5] y Coffin [6] propusieron la siguiente expresión empírica:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b + \varepsilon'_f(2N_f)^c, \tag{9}$$

donde $\Delta\varepsilon$=Rango total de deformación, σ'_f=Coeficiente de resistencia a la fatiga, N_f =Número de ciclos para la falla, E =Módulo de elasticidad, b =Exponente de resistencia a la fatiga, ε'_f=Coeficiente de ductilidad de fatiga, c =Exponente de ductilidad de fatiga.

El primer término de la ecuación (9) representa la componente elástica de la deformación (Fatiga de alto ciclaje), y el segundo término representa la componente plástica de la deformación (Fatiga de bajo ciclaje).

Además, los autores propusieron otro modelo el cual permite relacionar la amplitud plástica de deformación con la resistencia a la fatiga:

$$\varepsilon_{ap} = \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c, \tag{10}$$

donde ε_{ap}=Amplitud plástica de la deformación, $\Delta\varepsilon_p$=Rango de deformación plástica.

En vez de usar la amplitud plástica de la deformación, Koh y Stephens [7] propusieron utilizar en su lugar la amplitud total de deformación (ε_a), obteniendo la siguiente expresión:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = M(2N_f)^m, \tag{11}$$

donde M y m son constantes del material.

Además, Koh y Stephens propusieron una ecuación empírica para todos los tipos de acero:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = 0.08(2N_f)^{-0.333}. \tag{12}$$

Mander y Panthaki [8] evaluaron experimentalmente la fatiga de bajo ciclaje de barras de acero grado 40 (fy=276 Mpa). Para esto, realizaron ensayos cíclicos variando la deformación desde la fluencia hasta 6 %. Los resultados obtenidos fueron comparados con los modelos de Coffin-Manson y Koh-Stephens.

A continuación, se presentan las relaciones para la resistencia de bajo ciclaje obtenidas:

Coffin-Manson: $\varepsilon_{ap} = \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = 0.0777\left(2N_f\right)^{-0.486}$. *(13)*

Koh-Stephens: $\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = 0.0795(2N_f)^{-0.448}$. *(14)*

Más recientemente, Brown y Kunnath [4] realizaron ensayos para entender de mejor manera la fatiga de bajo ciclaje de las barras de refuerzo ASTM A615 (fy=420 Mpa), utilizando para ello barras de diámetros números 6 a 9 (19.1 mm a 28.7 mm).

Al igual que Mander y Panthaki, Brown y Kunnath compararon sus resultados prácticos basándose en los modelos de Coffin-Manson y Koh-Stephens, obteniendo las siguientes relaciones para la resistencia a la fatiga de bajo ciclaje:

Coffin-Manson:

Barra número 6 (Diámetro 19.1 mm): $\varepsilon_{ap} = \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = 0.16\left(2N_f\right)^{-0.57}$. *(15)*

Barra número 7 (Diámetro 22.2 mm): $\varepsilon_{ap} = \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = 0.13\left(2N_f\right)^{-0.51}$. *(16)*

Barra número 8 (Diámetro 25.4 mm): $\varepsilon_{ap} = \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = 0.09\left(2N_f\right)^{-0.42}$. *(17)*

Barra número 9 (Diámetro 28.7 mm): $\varepsilon_{ap} = \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = 0.07\left(2N_f\right)^{-0.37}$. *(18)*

Koh-Stephens:

Barra número 6 (Diámetro 19.1 mm): $\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = 0.12(2N_f)^{-0.47}$ (Lote A). *(19)*

Barra número 6 (Diámetro 19.1 mm): $\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = 0.09(2N_f)^{-0.45}$ (Lote B). *(20)*

Barra número 7 (Diámetro 22.2 mm): $\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = 0.11(2N_f)^{-0.44}$. *(21)*

Barra número 8 (Diámetro 25.4 mm): $\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = 0.08(2N_f)^{-0.36}$. *(22)*

Barra número 9 (Diámetro 28.7 mm): $\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = 0.07(2N_f)^{-0.31}$. *(23)*

De acuerdo a los resultados obtenidos por Brown y Kunnath, se observa que las barras con diámetros mayores presentan una resistencia a la fatiga mayor para deformaciones pequeñas. Al incrementar las deformaciones, ocurre todo lo contrario, mostrando que las barras con diámetros menores presentan una resistencia a la fatiga mayor. Se observa también que el deterioro en la resistencia a la fatiga con el aumento de las deformaciones es mayor en las barras con diámetros mayores.

2.1.6 Uso de una camisa de acero para impedir el pandeo de barras de acero en ensayos cíclicos

Como forma de medir la capacidad de resistir la fatiga de bajo ciclaje de las barras de acero ASTM A706 y A615 sin permitir el pandeo, R. Hawileh et al. [9] realizaron ensayos cíclicos en barras de grado 60 (420 MPa) y diámetro 19 mm (Barras No. 6) con una longitud libre de 152.4 mm (6 in.). En esta serie de ensayos se utilizó una camisa de acero con un espesor de 40 mm para evitar el pandeo de las barras al momento de aplicar fuerzas de compresión. La figura 2.3 reproduce una fotografía de la publicación de los autores.

Este tubo de acero, o camisa, presentó un diámetro interno ligeramente mayor al diámetro de las barras y fue lubricado con aceite en su interior con el objetivo de permitir el libre desplazamiento de éstas. Además, su longitud se hizo un poco menor a la longitud libre de las barras para así evitar que la camisa se viera sometida a esfuerzos de compresión.

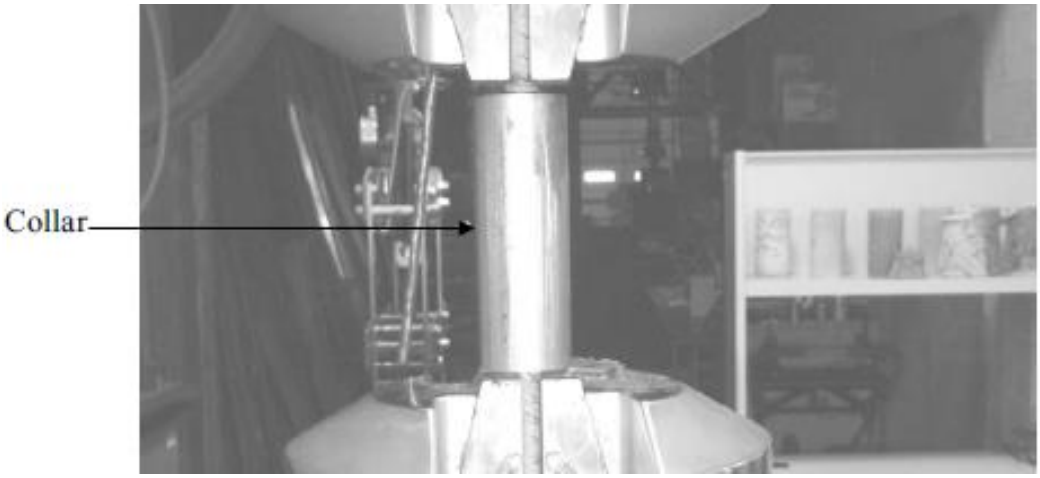

Figura 2.3 Ensayo cíclico con camisa de acero, como fue realizado por R. Hawileh et al. (2010)

Debido a la imposibilidad de medir la deformación de las barras directamente, se tuvo que recurrir a un método indirecto. Para esto, se obtuvo una correlación entre el desplazamiento medido por el pistón de la máquina de carga mediante su LVDT interno y un transductor de deformación (MSG) montado directamente sobre la barra de prueba, como se observa en la figura 2.4. Luego, se utilizó esta correlación para transformar la medición del LVDT a la deformación real que mediría el MSG.

Figura 2.4 Montaje del experimento para relacionar el desplazamiento del LVDT con el MSG, como fue realizado por R. Hawileh et al. (2010)

Los ensayos se realizaron utilizando una máquina con mordazas hidráulicas de 50 Tf y fueron controlados por deformación.

Se utilizó una frecuencia de carga de 0.05 Hz y amplitudes constantes. Las deformaciones aplicadas variaron entre 0% y de 2% a 8% en tracción, correspondiente a R=0.

En las tablas 2.1 y 2.2 se pueden ver los resultados obtenidos para el número de ciclos hasta la falla de las barras ASTM A706 y A615, respectivamente, para las distintas deformaciones máximas de tracción impuestas. La figura 2.5 muestra la curva de histéresis de una de las barras, mientras que en la figura 2.6 se observa una fotografía de un espécimen ya ensayado.

Tabla 2.1 Número de ciclos hasta la falla de barras A706, R. Hawileh et al. (2010)

$\varepsilon_{s,\max}$	N_f
0.02	113.2
0.03	39.1
0.04	18.57
0.05	10.87
0.06	7.1
0.07	5.2
0.08	4

Tabla 2.2 Número de ciclos hasta la falla de barras A615, R. Hawileh et al. (2010)

$\varepsilon_{s,\max}$	N_f
0.02	128.7
0.04	24.2
0.06	9.1
0.08	5.7

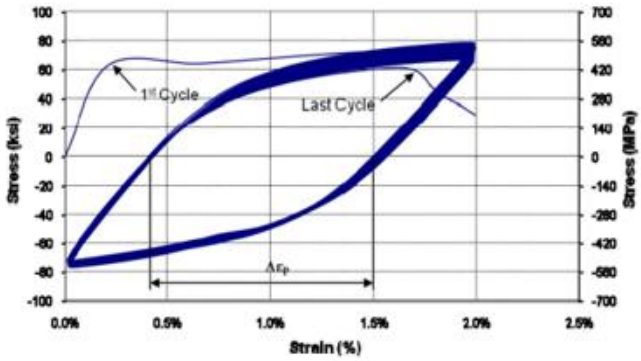

Figura 2.5 Curva de histéresis sin pandeo, R. Hawileh et al. (2010)

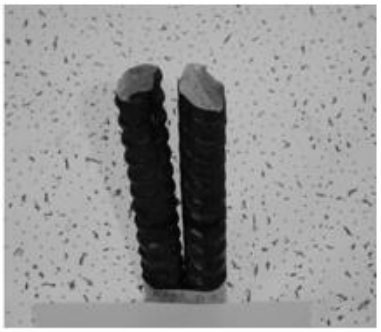

Figura 2.6 Barra ensayada sin pandeo, R. Hawileh et al. (2010)

De estos ensayos se obtuvieron los siguientes modelos para la resistencia a la fatiga de bajo ciclaje:

Barras A706: $\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = 0.09\left(2N_f\right)^{-0.409}$. *(24)*

Barras A615: $\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = 0.1008(2N_f)^{-0.428}$. *(25)*

La metodología del ensayo y los resultados obtenidos por Hawileh corresponden a lo que se busca obtener en esta memoria.

2.2 Uso de estribos soldados en barras longitudinales

Como se indicó en la sección 1.1, en el laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María de Valparaíso, se han realizado estudios sobre el uso de armadura inclinada en 45° en las zonas de formación de rótulas plásticas, correspondiente a probetas viga-columna de hormigón armado sometidos a solicitaciones sísmicas. Estos ensayos se realizaron utilizando el actuador MTS 244 de la mesa sísmica del laboratorio LEMCO, la figura 2.7 muestra una fotografía del montaje de las probetas [10]. El programa de carga utilizado se observa en la tabla 2.3.

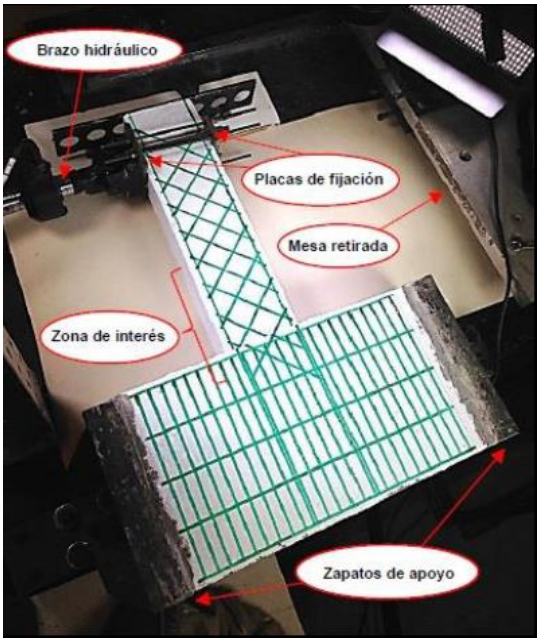

Figura 2.7 Montaje de las probetas,

F. Basualdo (2019)

Tabla 2.3 Programa de carga

N° de ciclos	Amplitud
5 ciclos	5 [mm]
5 ciclos	10 [mm]
5 ciclos	15 [mm]
5 ciclos	20 [mm]
10 ciclos	25 [mm]
5 ciclos	30 [mm]

F. Basualdo [10], realizó ensayos en probetas para comparar los efectos que tienen las amarras y las soldaduras de los estribos en estos elementos, tanto en estribos tradicionales rectos en 90° como en estribos inclinados en 45°. En todas las probetas se utilizaron barras de acero soldable CAPSOL A630-420HS. La elección de este tipo de barras tuvo su origen en el problema presentado en los ensayos sísmicos realizados en el LEMCO por B. Silva [11] y C. Pino [12] sobre probetas viga-columna de hormigón armado con estribos inclinados en 45° y amarrados al refuerzo longitudinal, en donde, en las etapas finales de los ensayos, se observó que los estribos deslizaban, favoreciendo el pandeo de las barras longitudinales. Esto dio inicio a una serie de ensayos en los que, para evitar el deslizamiento de los estribos, se decidió soldarlos utilizando barras soldables CAPSOL como refuerzo longitudinal en lugar de las tradicionales barras A630-420H, que no son adecuadas para la soldadura.

El caso de interés para esta memoria es la probeta denominada GF1, la cual se confeccionó con estribos inclinados en 45° y soldados a las barras longitudinales. La figura 2.8 muestra el detalle de la armadura.

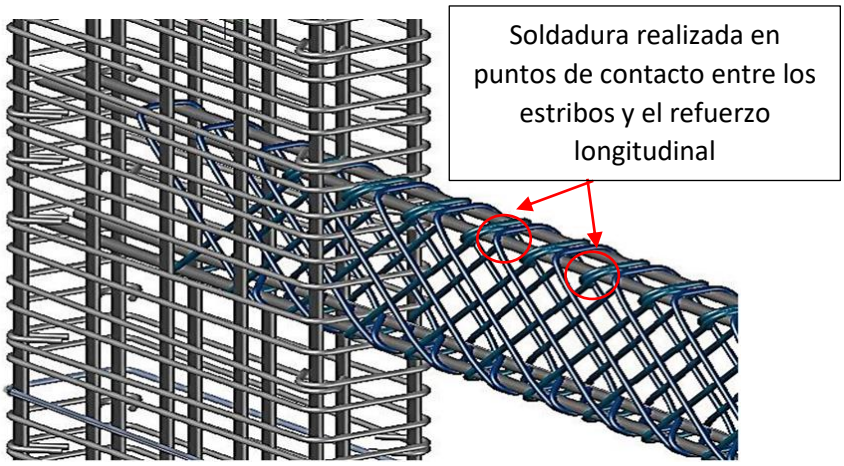

Figura 2.8 Detalle de la armadura en la probeta GF1,

F. Basualdo (2019)

Se utilizó soldadura tipo alambre MIG 70-S 0.8 mm, esto, en condiciones normales de obra y sin ninguna preparación especial.

La mayoría de las probetas en las que se soldó el estribo a las barras longitudinales cortaron algunas de las barras principales del refuerzo, generando así una falla catastrófica antes de que se pudiera terminar el programa de ensayos. Por lo visto, las propiedades resistentes del acero CAPSOL utilizado se vieron afectadas considerablemente por la soldadura.

La probeta GF1 es la que tuvo el peor resultado, cortando dos barras principales del refuerzo longitudinal durante el primer y segundo ciclo de 25 mm. La figura 2.9 muestra la curva fuerza desplazamiento obtenida, mientras que en la figura 2.10 se observan las barras cortadas.

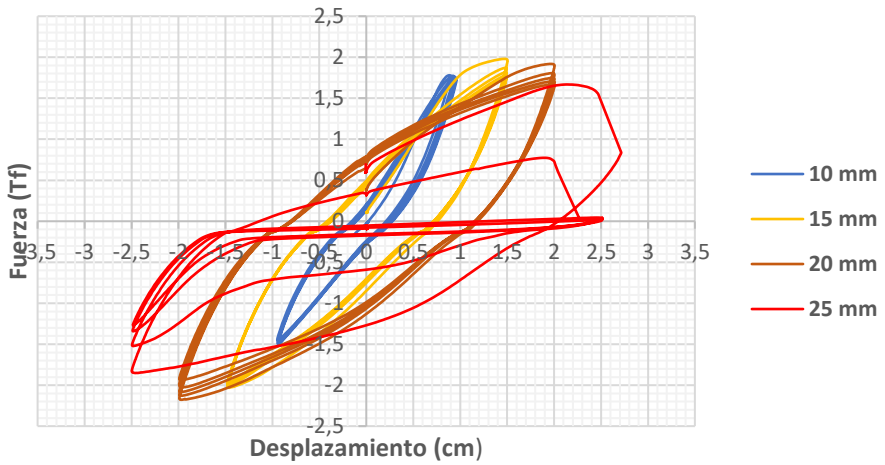

Figura 2.9 Curva de fuerza desplazamiento para GF1,

F. Basualdo (2019)

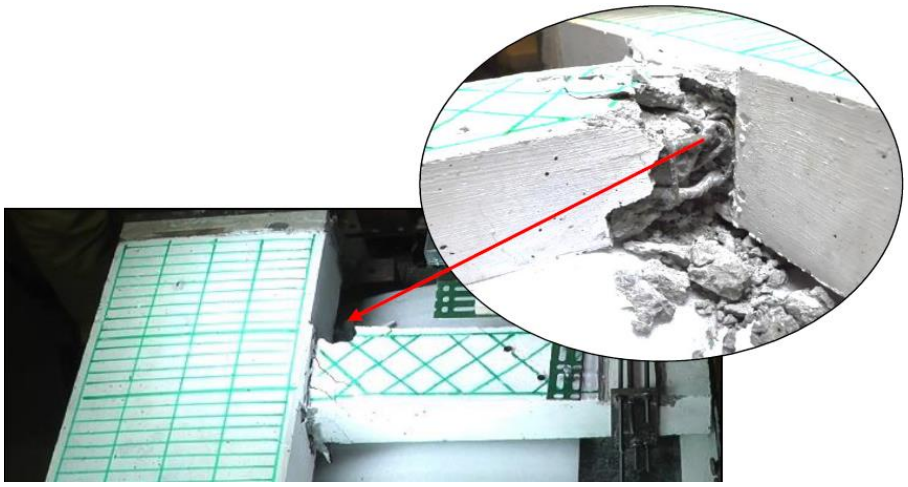

Figura 2.10 Estado de la probeta GF1 durante el segundo ciclo de 25 mm,

F. Basualdo (2019)

Por otro lado, G. Figueroa [13] realizó ensayos con barras de refuerzo longitudinal CAPSOL y estribos soldados a éstas, pero con la diferencia de que se realizó un tratamiento térmico de precalentamiento a las barras del refuerzo longitudinal, el cual consistió en calentar la zona a soldar, midiendo la temperatura y cuidando de no sobrepasar los 180°C.

El caso de interés para esta memoria es la probeta denominada P4 y que corresponde exactamente al tipo antes mencionado, la cual se confeccionó con estribos inclinados en 45° y soldados a las barras longitudinales. La figura 2.11 muestra el detalle de la armadura y la figura 2.12 la curva fuerza desplazamiento obtenida.

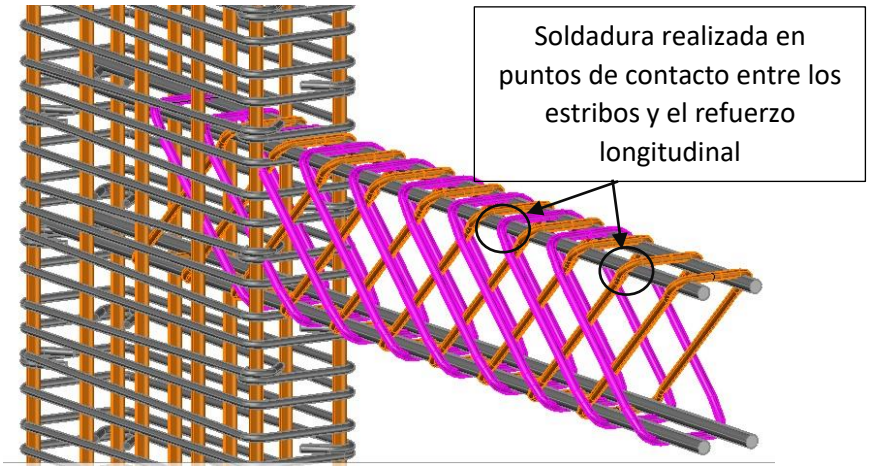

Figura 2.11 Detalle de la armadura en la probeta P4,

G. Figueroa (2019)

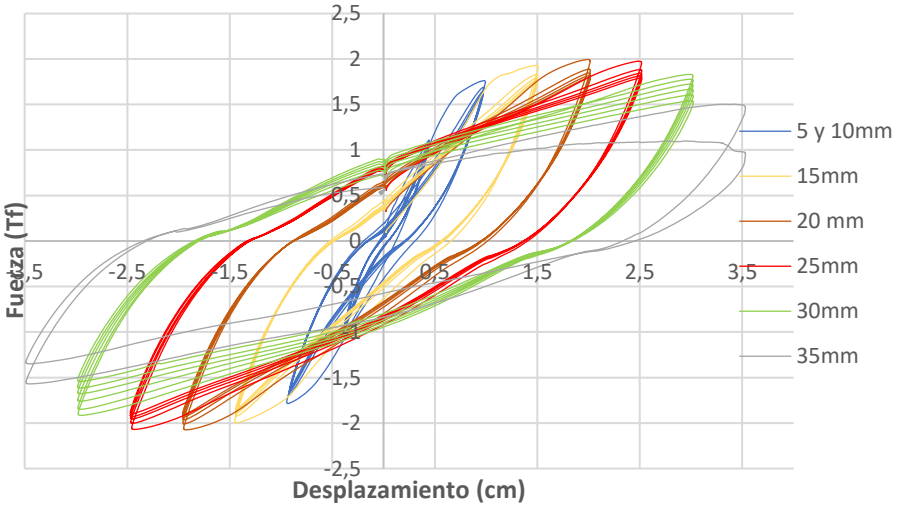

Figura 2.12 Curva de fuerza desplazamiento para P4,

G. Figueroa (2019)

La probeta P4 presentó un comportamiento comparativamente mejor que cualquier otra probeta, llegando incluso a la amplitud de 35 mm sin cortar ninguna de las barras.

El objetivo de realizar ensayos cíclicos a las barras extraídas de estas probetas ensayadas, fue dilucidar las causas que generaron el corte del refuerzo en probetas como GF1, comprobando si la falta de tratamiento térmico previo afectó la resistencia a la fatiga de bajo ciclaje de las barras.

En el Anexo A se presenta un resumen con aspectos importantes referentes a la soldabilidad de las barras de refuerzo y a los tratamientos de precalentamiento.

Capítulo 3

Programa experimental

En este capítulo se presentan las barras de acero obtenidas, el programa de ensayos y el equipo utilizado.

Las barras se dividen en dos grupos, el primero corresponde a las adquiridas en el comercio provenientes de distintos fabricantes presentes en el mercado nacional y el segundo a barras CAPSOL, acero soldable extraído de los restos de los elementos ensayados.

3.1 Barras presentes en el mercado nacional

Se obtuvieron tres tipos de barras de refuerzo con diámetro 8 mm; AZA y CAP, con sus respectivos aceros tipo A630-420H, seleccionadas debido a que son las más utilizadas en la construcción nacional para elementos resistentes a cargas sísmicas, y ACMA, con su acero tipo AT56-50H, también de uso común, especialmente en su forma de mallas soldadas para la construcción de radieres, piscinas, estanques, losas, y otros elementos que no resultan sometidos a cargas sísmicas. La figura 3.1 muestra algunos ejemplos de uso en la construcción nacional.

Para los ensayos se utilizó un largo de barra entre mordazas de 11.5 cm y una longitud total de 22.5 cm, de los cuales 5 cm se insertaron en la mordaza inferior y 6 cm en la mordaza superior de la máquina de ensayos. La figura 3.2 muestra una fotografía de las barras seleccionadas con sus respectivas medidas.

Figura 3.1 Uso de barras seleccionadas en construcción nacional. A la izquierda el uso de barras CAP en una columna, a la derecha el uso de mallas ACMA en una losa, obtenidas de www.capacero.cl y www.acma.cl

Figura 3.2 Barras seleccionadas ACMA, CAP y AZA, ordenadas respectivamente de arriba a abajo

Se eligió un programa de ensayos cíclicos simétricos con R=-1, deformaciones del 1%, 2% y 3%, y una frecuencia de carga de 1 Hz.

Además, se realizaron ensayos de tracción simple para obtener las curvas esfuerzo deformación de los tres tipos de barras, las cuales se muestran en la figura 3.3. La tabla 3.1 muestra los valores de fluencia y resistencia última obtenidos.

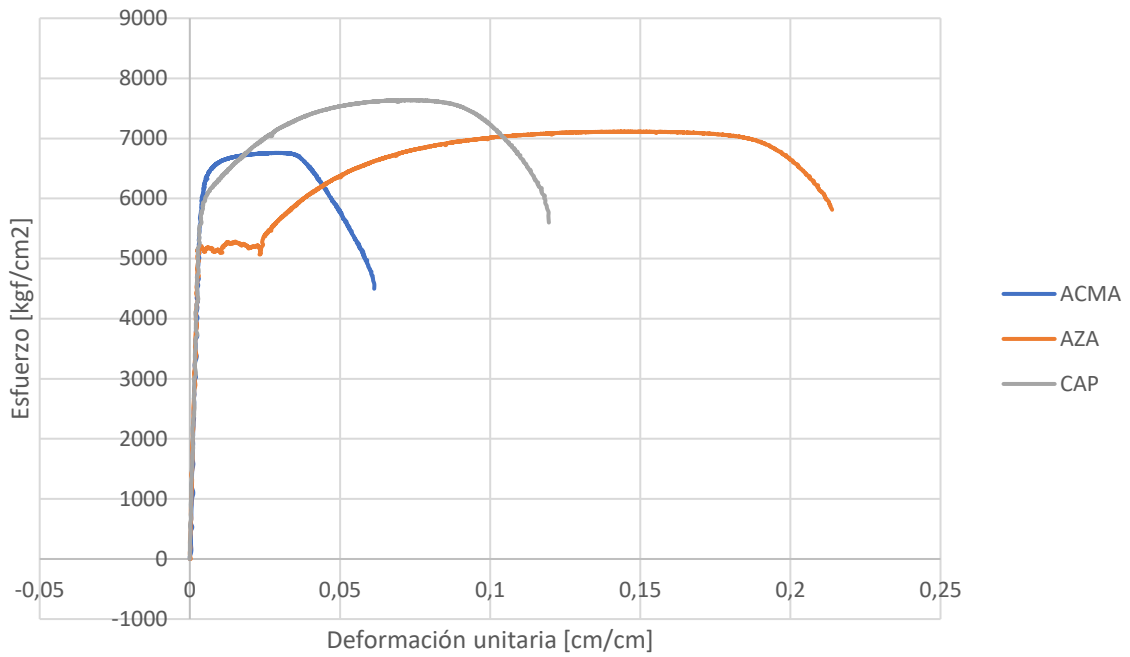

Figura 3.3 Gráficos esfuerzo deformación para las barras presentes en el mercado nacional

Tabla 3.1 Valores de fluencia y resistencia última de las barras presentes en el mercado nacional

Acero	Fluencia		Resistencia última	
	σ_y[kgf/cm^2]	ε_y[cm/cm]	σ_u[kgf/cm^2]	ε_u[cm/cm]
ACMA	6369,2	0,00573	6758,6	0,03073
AZA	5185,9	0,00275	7112,6	0,14749
CAP	6019,4	0,00528	7637,4	0,0729

3.2 Barras soldables CAPSOL

Se seleccionaron tres grupos de barras. El primero es el grupo de control, o sea, barras de acero CAPSOL que habían sobrado de la construcción de las probetas de hormigón armado, y a las que no se aplicó ningún tipo de tratamiento ni soldadura.

Los otros dos grupos corresponden a barras CAPSOL extraídas de restos de probetas de hormigón armado ensayadas en el laboratorio, y que tenían soldados estribos inclinados. Las probetas seleccionadas fueron las denominadas GF1 (Felipe Basualdo), con sus barras longitudinales sin precalentamiento, y P4 (Gonzalo Figueroa), mostrada en la figura 3.4, con sus barras sometidas a precalentamiento.

Para obtener las barras de las probetas, se quitó el hormigón en la zona de la viga donde las barras sufrieron las menores solicitaciones, o sea, en el extremo libre, lugar donde estaban intactas, como se observa en la figura 3.4. Las figuras 3.5 y 3.6 muestran fotografías de los trozos que se obtuvieron para los ensayos.

Figura 3.4 Probeta P4 después de ser ensayada (foto a la izquierda) y después de ser retirado el hormigón del extremo dejando a la vista el refuerzo (foto a la derecha)

Figura 3.5 Barras obtenidas de la probeta GF1

Figura 3.6 Barras obtenidas de la probeta P4

Una vez obtenidas las barras, los trozos de estribo y soldaduras se retiraron con sierras y esmeriles. En las figuras 3.7 y 3.8 se observan las barras libres de restos de estribos y listas para ensayar.

Figura 3.7 Barras listas para ensayar de la probeta GF1

Figura 3.8 Barras listas para ensayar de la probeta P4

Debido a la poca disponibilidad de barras, se tuvo que realizar los ensayos con una sola deformación y con una longitud de barra menor que las mostradas en la sección anterior.

Al momento de cortar las barras desde las probetas, se determinó que una longitud total aceptable era de 18 cm. Debido a que 6 cm debían ir sujetos en la mordaza superior y 5 cm en la mordaza inferior, se obtuvo un largo de barra entre mordazas de 7 cm. En la figura 3.9 se observa una barra de control con su longitud definitiva.

Figura 3.9 Barra de control CAPSOL

Se seleccionó un programa de ensayos cíclicos simétricos con R=-1, una deformación de 2% y una frecuencia de carga de 1 Hz. Se realizaron dos ensayos por grupo y los resultados se promediaron.

Se realizaron ensayos de tracción simple para obtener las curvas esfuerzo deformación de los tres grupos de barras, las que se muestran en la figura 3.10. La tabla 3.2 muestra los valores de fluencia y resistencia última obtenidas.

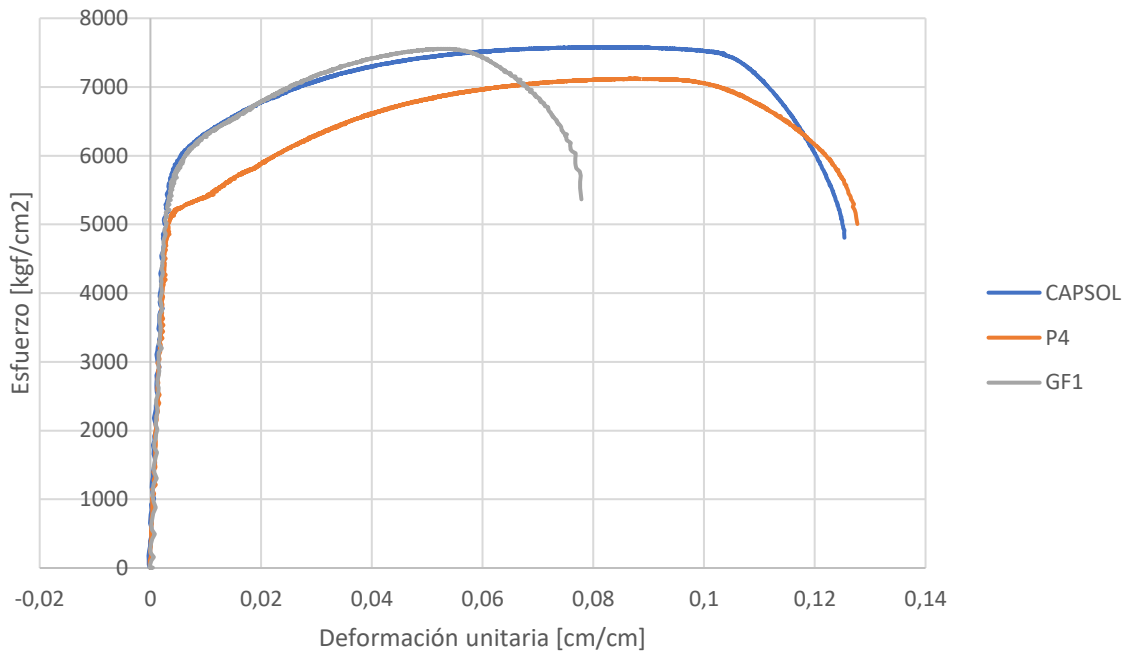

Figura 3.10 Gráficos esfuerzo deformación para las barras CAPSOL

Tabla 3.2 Valores de fluencia y resistencia última de las barras CAPSOL

Acero	Fluencia		Resistencia última	
	σ_y[kgf/cm^2]	ε_y[cm/cm]	σ_u[kgf/cm^2]	ε_u[cm/cm]
CAPSOL	5920,9	0,0048	7579,4	0,08228
GF1	5835,6	0,00501	7554,4	0,05258
P4	5234,4	0,00488	7119,8	0,08652

Las figuras 3.3 y 3.10 son comentadas en el capítulo 5 de resultados, sección 5.1.4.1 y 5.2.4, respectivamente.

3.3 Equipo

Para la realización de los ensayos se utilizó la máquina de tracción-compresión MTS 810 del laboratorio LEMCO con mordazas hidráulicas MTS 647.

Para la medición de la deformación aplicada, se utilizaron dos transductores láser Keyence IA-030, los cuales fueron ubicados en la mordaza superior. Dado el corto alcance que tienen éstos, fue necesario elevar la superficie reflectante, utilizando para ello la pieza que se observa en las figuras 4.5, 4.15 y 4.16 y que va fija a la mordaza inferior. La deformación se obtiene promediando el valor entregado por ambos láseres. La figura 3.11 muestra un esquema de la disposición del equipo utilizado.

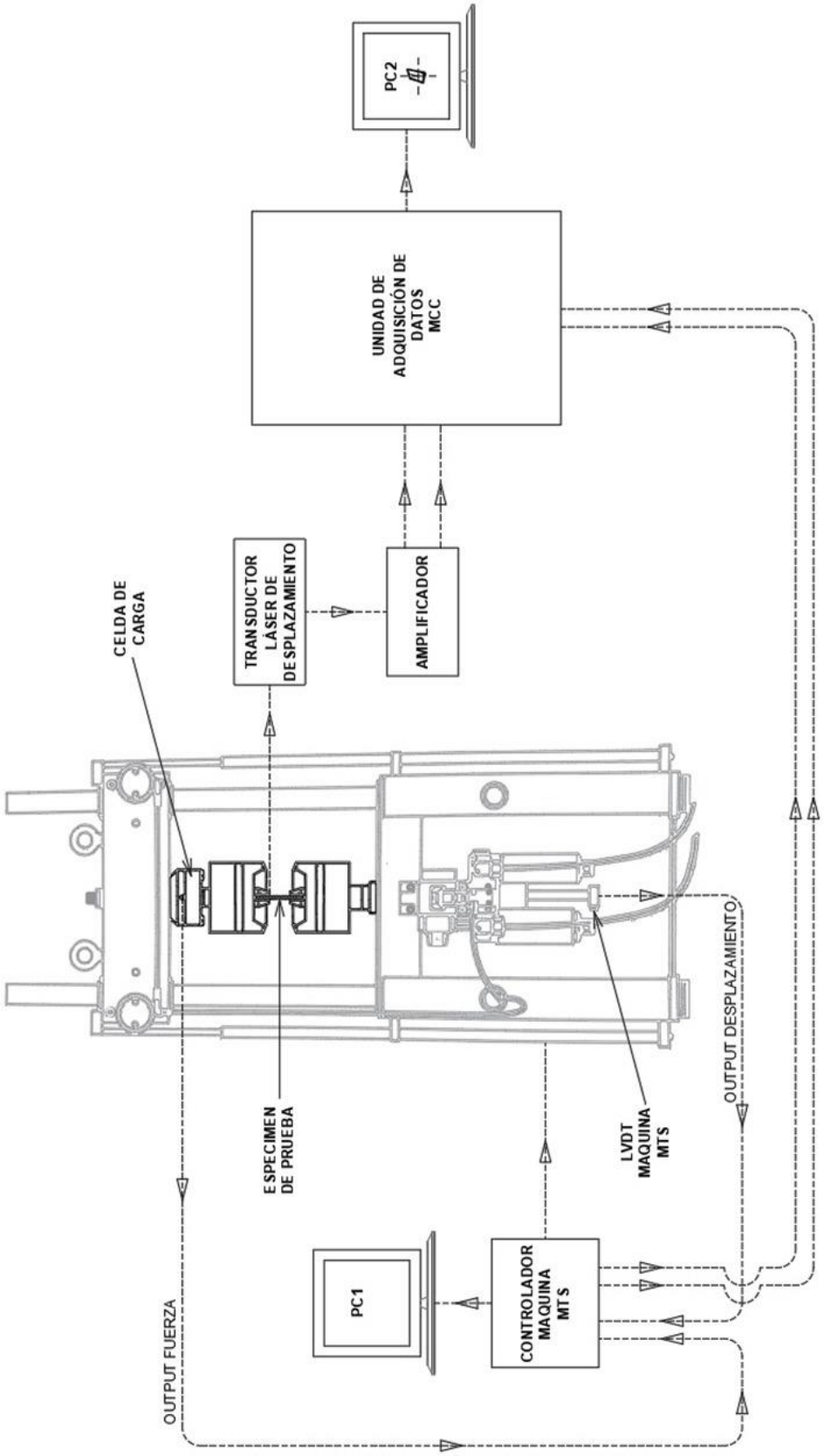

Figura 3.11 Disposición del equipo utilizado y de la obtención de datos, S. A. Rojas (2022)

Capítulo 4

Diseño de un dispositivo que restrinja el pandeo

4.1 Primer dispositivo

En esta sección se presenta el diseño inicial de la pieza que restringe el pandeo de las barras, así como algunas consideraciones a tener en cuenta al momento de realizar los ensayos.

4.1.1 Diseño y construcción del dispositivo

Para el diseño del dispositivo que restrinja el pandeo, se pensó primero en una camisa de acero con un diámetro interno un poco mayor al de las barras a ensayar. Para observar lo que ocurre dentro de la camisa, ésta debía tener aberturas en su zona frontal. Por facilidad de construcción, la camisa se compuso por discos de acero ASTM A36 sujetos mediante pernos, pudiendo así variarse la longitud de la camisa para ensayar barras de distintos largos.

El sistema de sujeción consistió en trozos de barras más cortos y del mismo diámetro que la barra ensayada, sostenidos en la mordaza superior de la máquina de ensayos a modo de tarugos.

La camisa diseñada se compone por tres tipos de discos: un disco base, que lleva el sistema de sujeción, y los discos que forman el cuerpo de la camisa, denominados tipo 1 y tipo 2. La figura 4.1 muestra los planos de los discos y en la figura 4.2 se presenta una fotografía de la camisa armada.

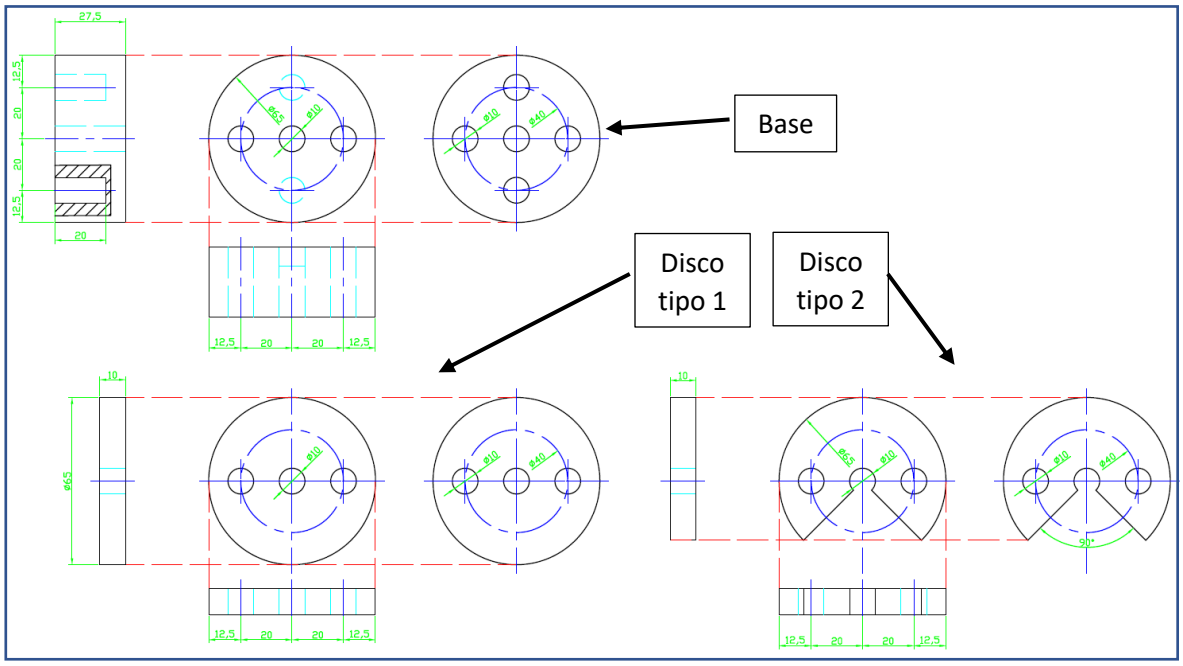

Figura 4.1 *Planos de diseño de los discos que componen la camisa*

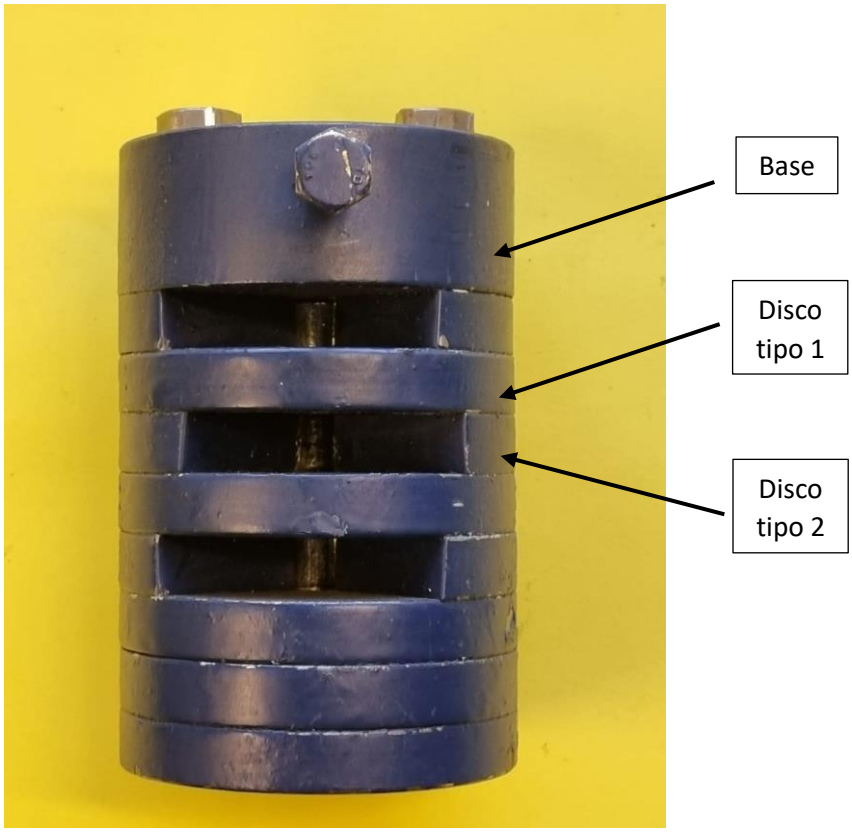

Figura 4.2 *Camisa armada con el disco base en la parte superior y los discos tipo 1 y tipo 2 puestos de forma alternada*

4.1.2 Montaje

En esta sección se detalla el montaje final de los ensayos efectuados con este modelo de camisa. La figura 4.3 muestra las medidas utilizadas para los ensayos de las barras con una longitud entre mordazas de 11.5 cm. Los tarugos se obtuvieron de la misma barra ensayada y se cortaron con un largo total de 6 cm, de los cuales 2 cm quedaron insertos en la camisa. La figura 4.4 muestra los pasos para el montaje del ensayo. El montaje final con el sistema láser de medición se observa en la figura 4.5.

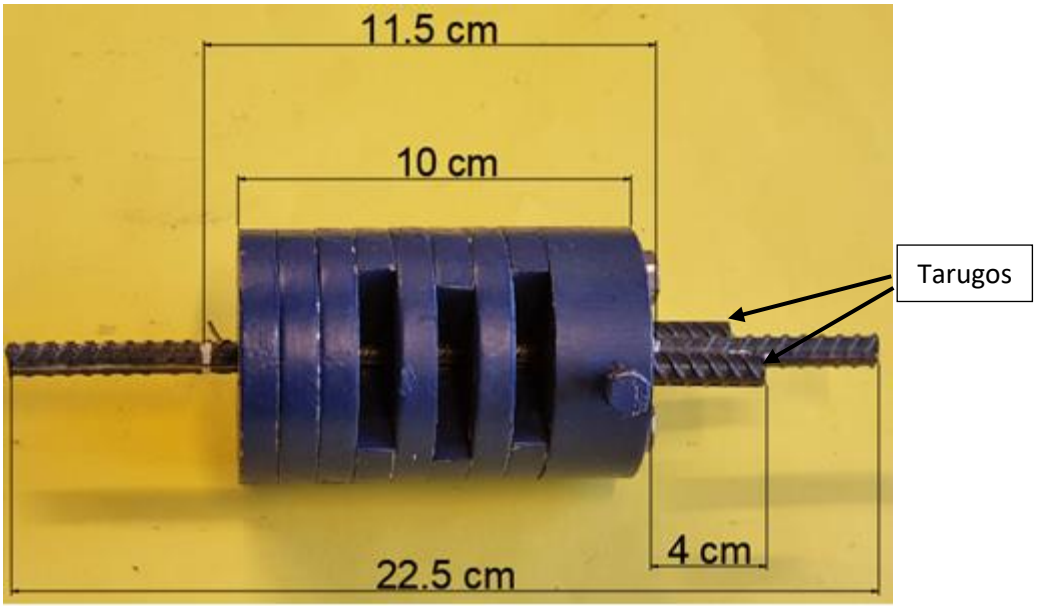

Figura 4.3 Conformación y medidas de la camisa para barras de 11.5 cm de longitud entre mordazas

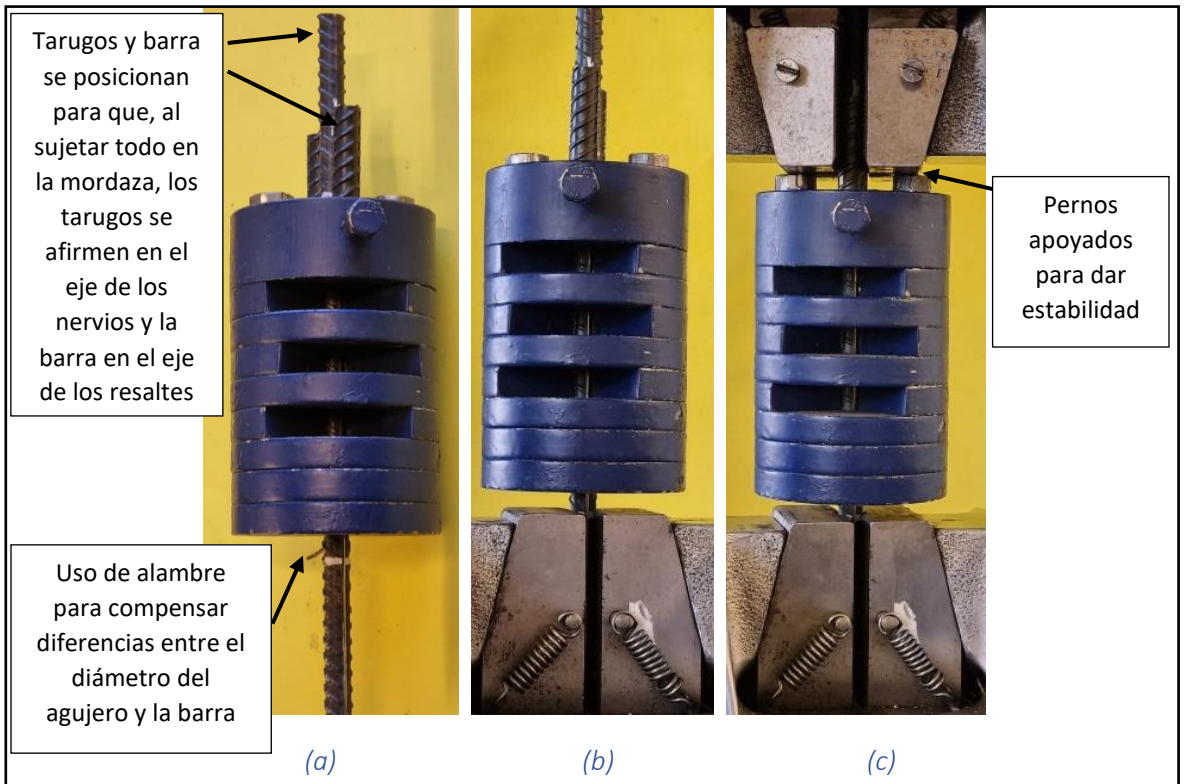

Figura 4.4 (a) Paso 1: Colocación de la barra y tarugos en la camisa; (b) Paso 2: Colocación de la barra en la mordaza inferior; (c) Paso 3: Descenso y cierre de la mordaza superior

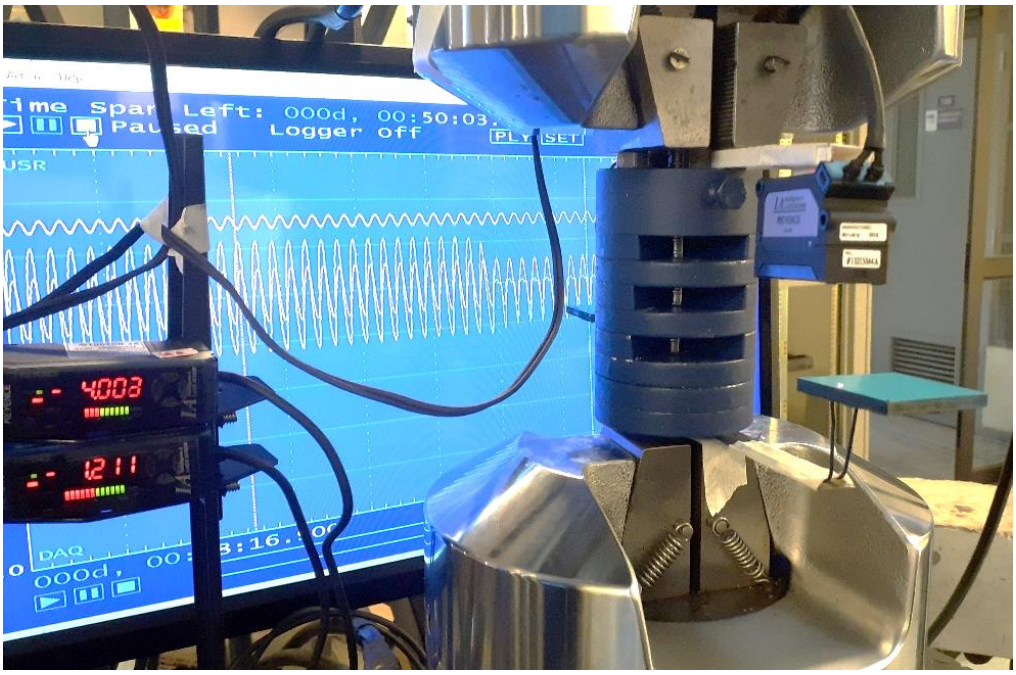

Figura 4.5 Montaje final con el sistema láser de medición instalado

4.1.3 Comentarios

En la figura 4.6 se observa una comparación entre una barra ensayada por S. A. Rojas [1] con carga cíclica sin impedir el pandeo y otra impidiendo el pandeo, ambas con una amplitud de desplazamiento del 1%. Se puede observar cómo, para esta amplitud, la camisa resulta exitosa al momento de impedir el pandeo.

Sin embargo, al realizar los primeros ensayos con amplitudes del 2%, se vio que este diseño no evitaba el pandeo ahora localizado en la zona de la mordaza inferior, en donde la barra queda fuera de la camisa. En la figura 4.7 se puede observar el aspecto final de una barra ACMA, la cual resistió 8 ciclos.

Figura 4.6 Comparación entre barra ensayada a) con pandeo y b) sin pandeo

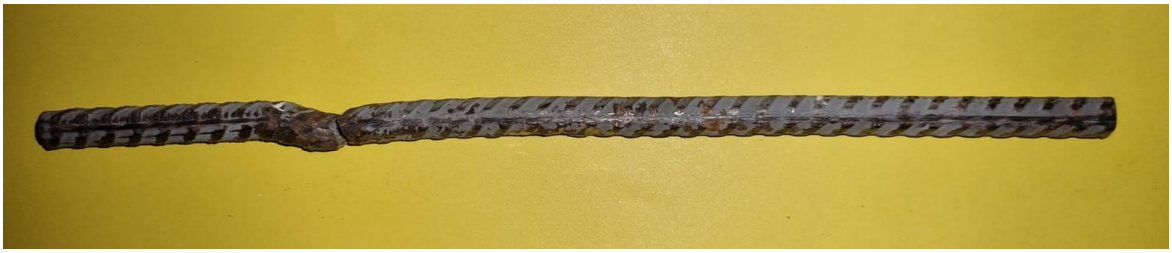

Figura 4.7 Pandeo en la zona de la mordaza inferior en un ensayo con amplitud de deformación del 2% utilizando la camisa de acero

Debido a esto, se suspendieron los ensayos correspondientes al 2% y 3% de amplitud y se decidió modificar el diseño de la camisa.

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos con amplitud de deformación del 1% realizados con este diseño de camisa. En la tabla 4.1 se presenta el número de ciclos que resistió cada una de las barras.

Tabla 4.1 Número de ciclos hasta la falla de cada barra con amplitud de deformación del 1%

Ciclos (Nf)	Fabricante		
Deformación	AZA	CAP	ACMA
1%	340	410	200

Como una primera aproximación se aprecia que la barra CAP es la que presenta una mayor resistencia a la fatiga, con 410 ciclos antes de la falla, seguido por AZA, con 340 ciclos. ACMA, por su parte, presentó una resistencia muy inferior, con tan solo 200 ciclos.

4.2 Modificación al diseño original y nuevo dispositivo

Se hizo necesario hacer una modificación al diseño de la camisa para evitar el pandeo producido en la zona de la mordaza inferior. En esta sección se presenta el diseño de la nueva pieza y las consideraciones a tomar al momento de realizar los ensayos.

4.2.1 Diseño y construcción del dispositivo definitivo

El nuevo modelo consistió en una camisa de acero inoxidable AISI 316 de una sola pieza, por la cual deslizaban en su interior una serie de anillos que iban sujetos a la barra ensayada mediante un perno prisionero tipo allen. En la figura 4.8 se presentan los planos de diseño y la figura 4.9 muestra una fotografía de la camisa y los anillos.

Se hizo una perforación a un costado de la camisa para corroborar que los anillos deslizaban de buena forma. La figura 4.10 muestra una fotografía de la camisa con la perforación y los tarugos instalados.

Para este nuevo dispositivo se mantuvo el sistema de sujeción, pero se modificó la longitud de los tarugos en la zona inserta dentro de la camisa. Con esta modificación, se obtuvieron tarugos de 8 cm de largo, quedando 4 cm del tarugo firmes en la mordaza y 4 cm dentro de la camisa.

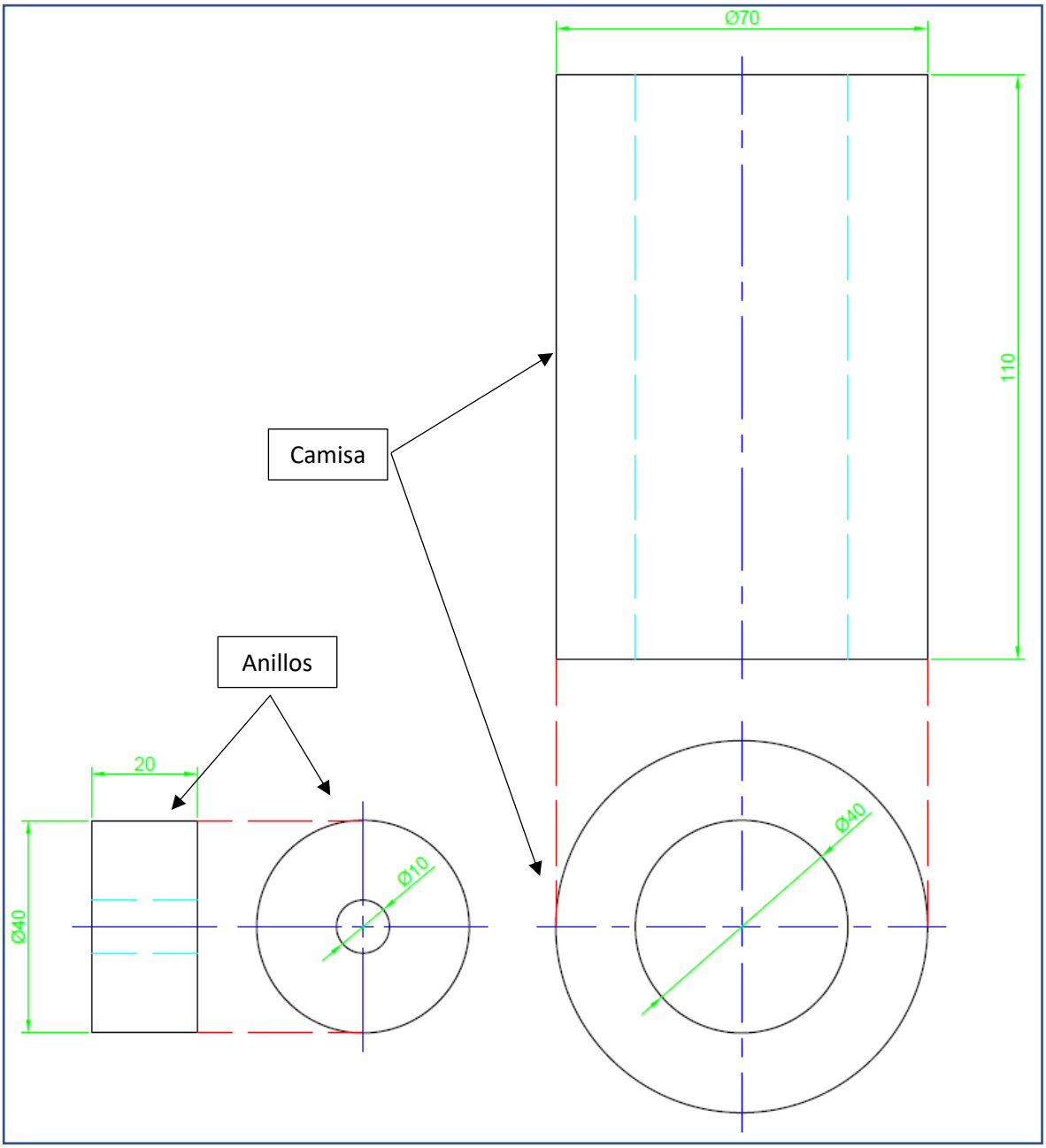

Figura 4.8 Planos de diseño de la camisa y los anillos, con medidas en mm

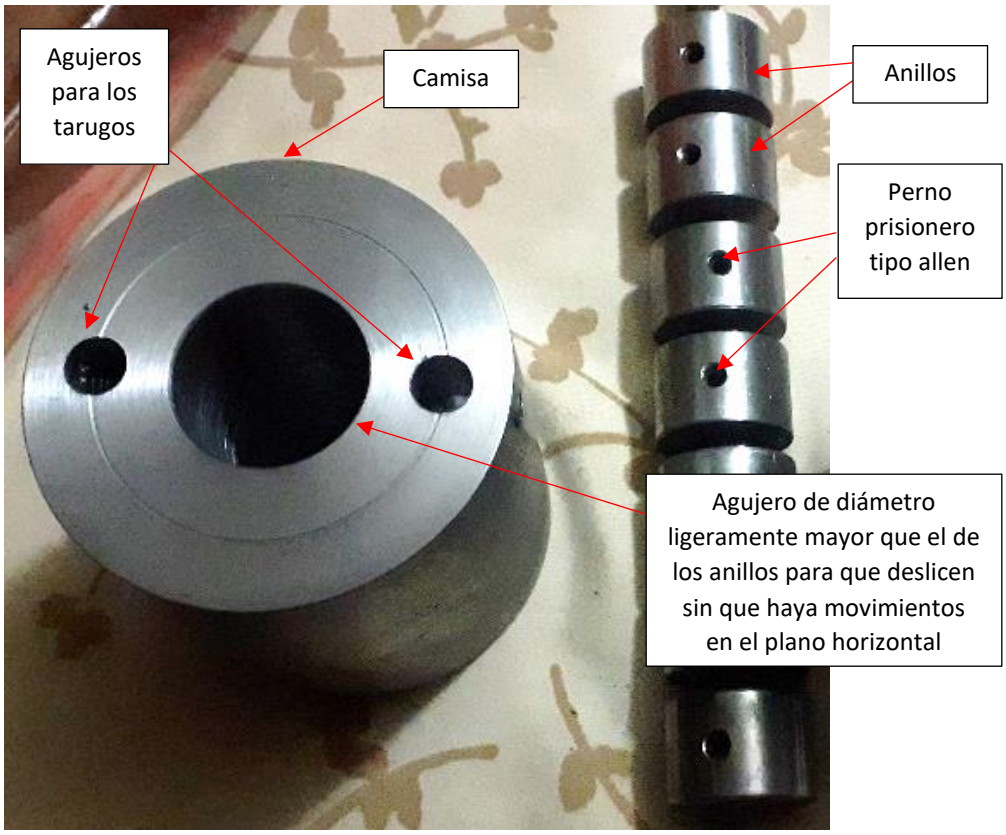

Figura 4.9 Camisa y anillos del nuevo sistema

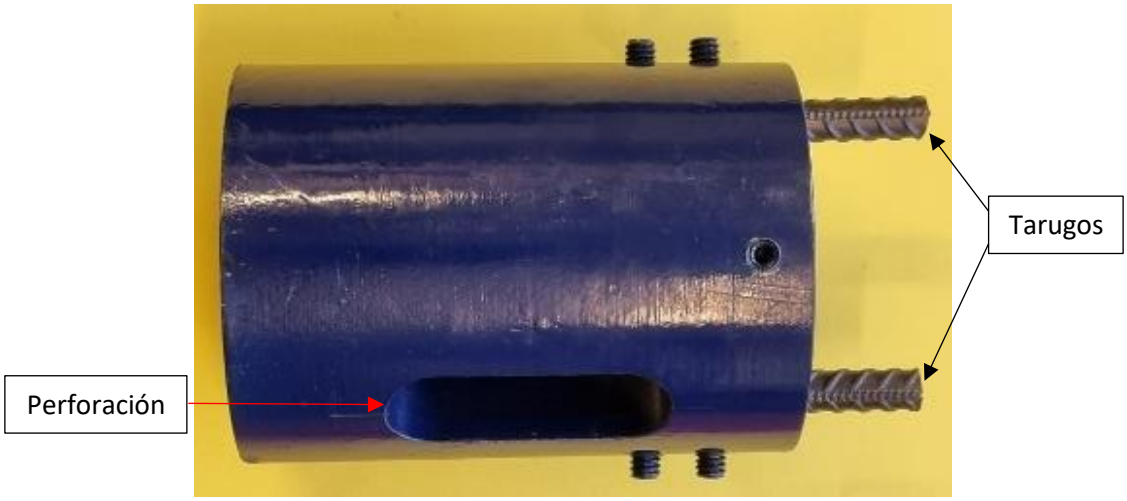

Figura 4.10 Camisa perforada con los tarugos instalados

Además, se instalaron tarugos en el anillo que va sobre la mordaza inferior, con el fin de mantenerlo fijo durante la realización de los ensayos y dar mayor estabilidad al sistema, tal como muestran las figuras 4.11 y 4.12.

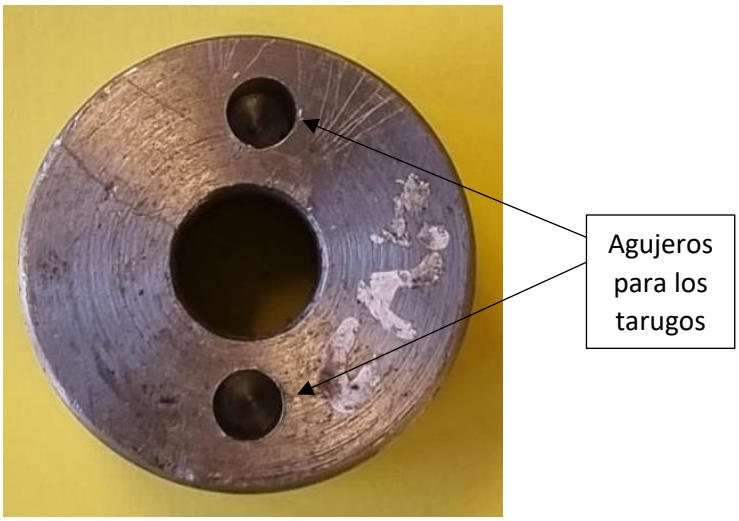

Figura 4.11 Anillo modificado que va sobre la mordaza inferior

Figura 4.12 Tarugos puestos en el anillo

4.2.2 Montaje

En esta sección se presenta el montaje correspondiente a barras con una longitud entre mordazas de 11.5 cm, para lo cual se utilizó una camisa de 10.5 cm de longitud. Los tarugos se obtuvieron de la misma barra ensayada.

El detalle del montaje se presenta en las figuras 4.13 y 4.14. El montaje final con el sistema láser de medición se muestra en la figura 4.15.

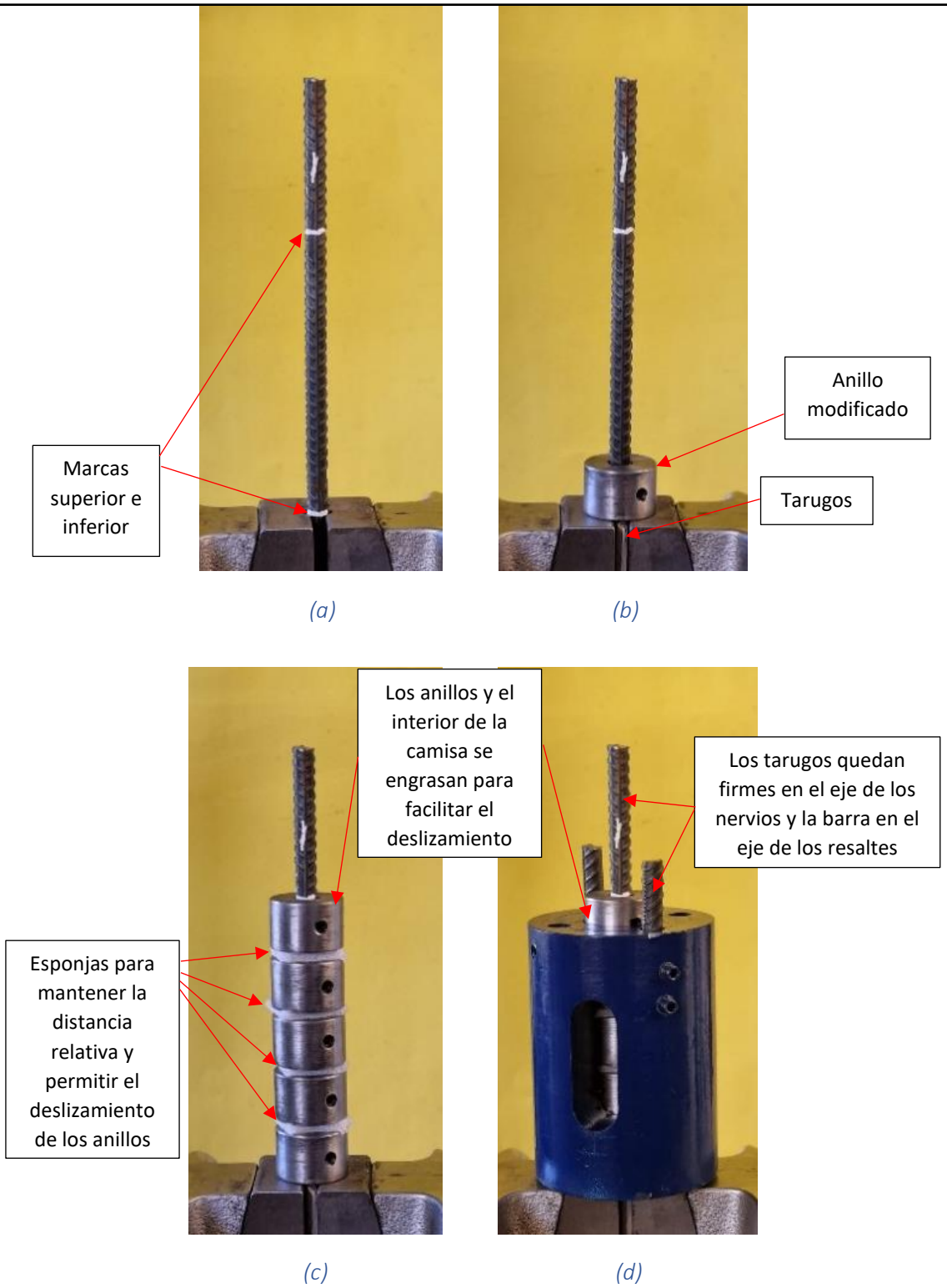

Figura 4.13 *(a) Paso 1: Colocación de la barra en la mordaza inferior; (b) Paso 2: Colocación del primer anillo; (c) Paso 3: Colocación de los anillos restantes y las esponjas; (d) Paso 4: Colocación de la camisa*

Figura 4.14 Paso 5: Descenso y cierre de la mordaza superior

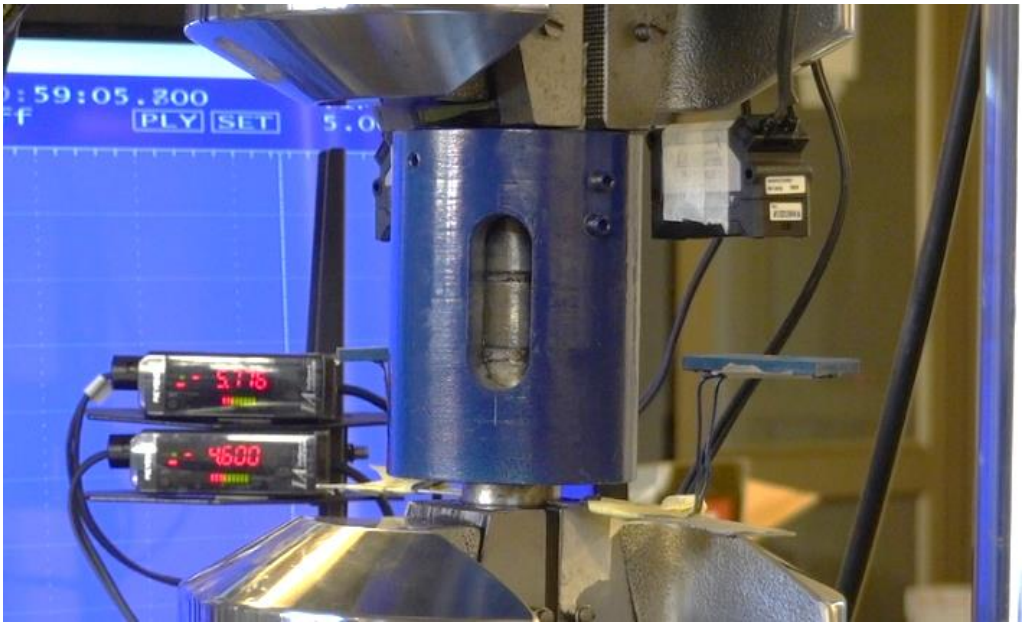

Figura 4.15 Montaje final con el sistema láser de medición instalado

Para el caso de las barras CAPSOL, con una longitud entre mordazas de 7 cm, se utilizó una camisa de 6.5 cm de longitud, 3 anillos y 2 esponjas. El montaje se realizó de la misma forma antes mencionada y su versión final con el sistema láser de medición se muestra en la figura 4.16.

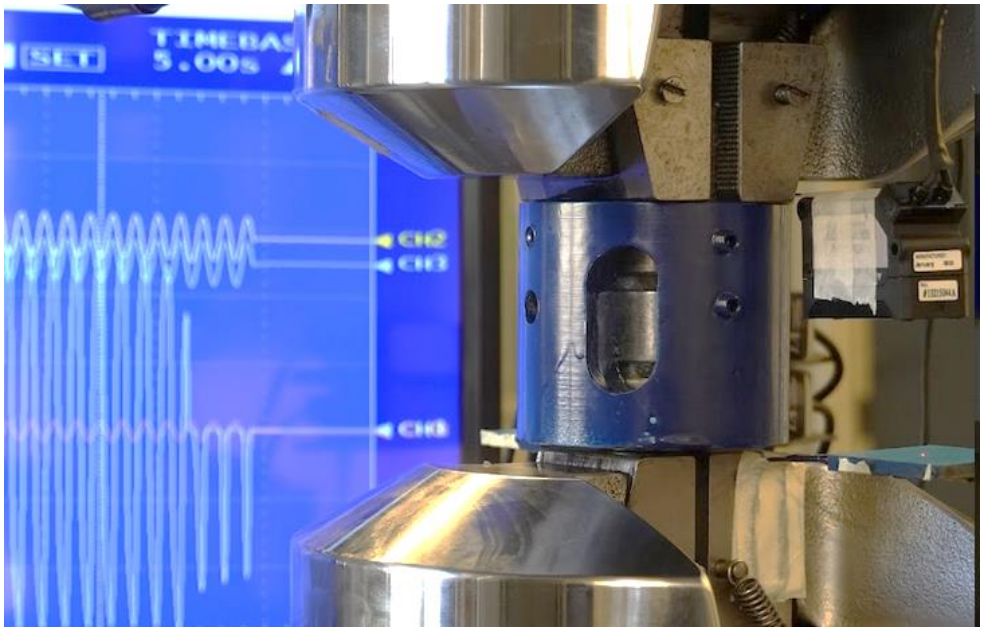

Figura 4.16 Montaje final con el sistema láser instalado para barras CAPSOL

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se presentan las curvas de histéresis de cada barra ensayada y el número de ciclos hasta la falla. Se muestran, además, algunos resultados obtenidos por S. A. Rojas [1] de los mismos ensayos, pero sin restringir el pandeo. Luego, se hacen comparaciones entre los resultados.

5.1 Resultados del dispositivo definitivo con barras de acero del mercado nacional

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos cíclicos sin pandeo de las barras presentes en el mercado nacional. Además, se muestran fotografías de las barras en su estado posterior a los ensayos.

5.1.1 Acero ACMA

5.1.1.1 Deformación 1%

En la figura 5.1 se muestra la curva fuerza elongación obtenida para barra ACMA con amplitud de deformación del 1%. Las líneas extras son un ciclo menor inicial y a la rotura. La tabla 5.1 resume los resultados obtenidos.

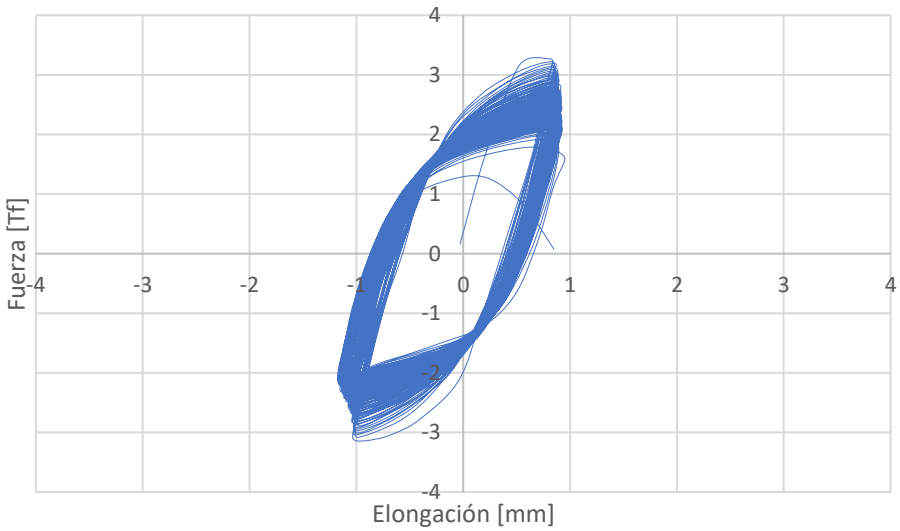

Figura 5.1 Gráfico acero ACMA con deformación 1%

Figura 5.2 Barra ACMA 1%

Tabla 5.1 Resultados de ensayo de barra ACMA con deformación 1%

Número de ciclos	264
Fuerza de tracción máxima [Tf]	3.27
Fuerza de compresión máxima [Tf]	3.14
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	1.79
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.12
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	1.27

5.1.1.2 Deformación 2%

En la figura 5.3 se muestra la curva fuerza elongación obtenida para barra ACMA con amplitud de deformación del 2%. Las líneas extras son un ciclo menor inicial y a la rotura. La tabla 5.2 resume los resultados obtenidos.

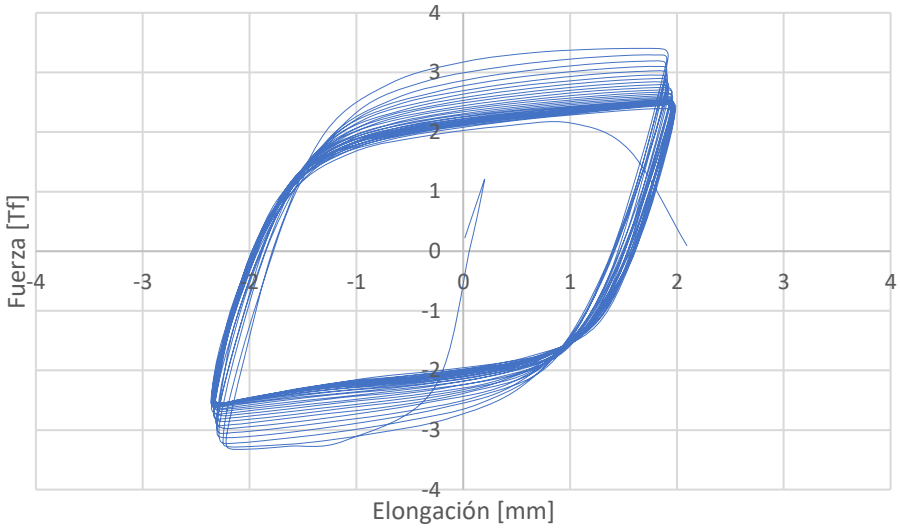

Figura 5.3 Gráfico acero ACMA con deformación 2%

Figura 5.4 Barra ACMA 2%

Tabla 5.2 Resultados de ensayo de barra ACMA con deformación 2%

Número de ciclos	30
Fuerza de tracción máxima [Tf]	3.4
Fuerza de compresión máxima [Tf]	3.32
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.39
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.58
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	2.15

5.1.1.3 Deformación 3%

En la figura 5.5 se muestra la curva fuerza elongación obtenida para barra ACMA con amplitud de deformación del 3%. Las líneas extras son un ciclo menor inicial y a la rotura. La tabla 5.3 resume los resultados obtenidos.

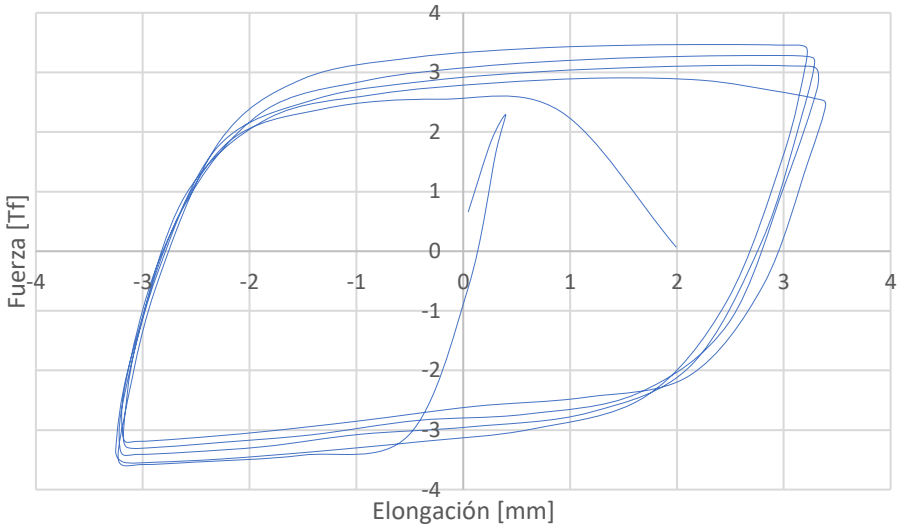

Figura 5.5 Gráfico acero ACMA con deformación 3%

Figura 5.6 Barra ACMA 3%

Tabla 5.3 Resultados de ensayo de barra ACMA con deformación 3%

Número de ciclos	5
Fuerza de tracción máxima [Tf]	3.46
Fuerza de compresión máxima [Tf]	3.58
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.91
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	3.2
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	2.55

5.21.2 Acero AZA

5.1.2.1 Deformación 1%

En la figura 5.7 se muestra la curva fuerza elongación obtenida para barra AZA con amplitud de deformación del 1%. Las líneas extras son un ciclo menor inicial y a la rotura. La tabla 5.4 resume los resultados obtenidos.

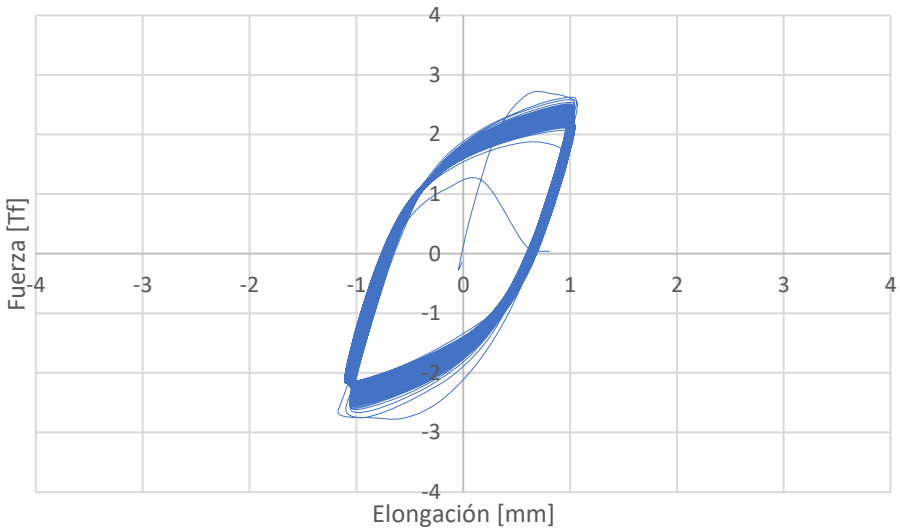

Figura 5.7 Gráfico acero AZA con deformación 1%

Figura 5.8 Barra AZA 1%

Tabla 5.4 Resultados de ensayo de barra AZA con deformación 1%

Número de ciclos	520
Fuerza de tracción máxima [Tf]	2.68
Fuerza de compresión máxima [Tf]	2.76
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.55
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	3.2
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	1.21

5.1.2.2 Deformación 2%

En la figura 5.9 se muestra la curva fuerza elongación obtenida para barra AZA con amplitud de deformación del 2%. Las líneas extras son un ciclo menor inicial y a la rotura. La tabla 5.5 resume los resultados obtenidos.

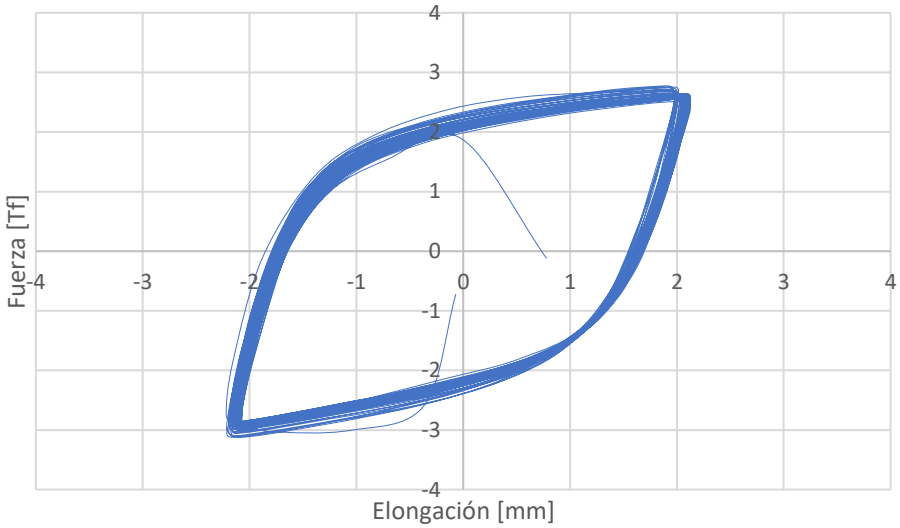

Figura 5.9 Gráfico acero AZA con deformación 2%

Figura 5.10 Barra AZA 2%

Tabla 5.5 Resultados de ensayo de barra AZA con deformación 2%

Número de ciclos	99
Fuerza de tracción máxima [Tf]	2.77
Fuerza de compresión máxima [Tf]	3.12
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.5
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.98
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	1.89

5.1.2.3 Deformación 3%

En la figura 5.11 se muestra la curva fuerza elongación obtenida para barra AZA con amplitud de deformación del 3%. Las líneas extras son un ciclo menor inicial y a la rotura. La tabla 5.6 resume los resultados obtenidos.

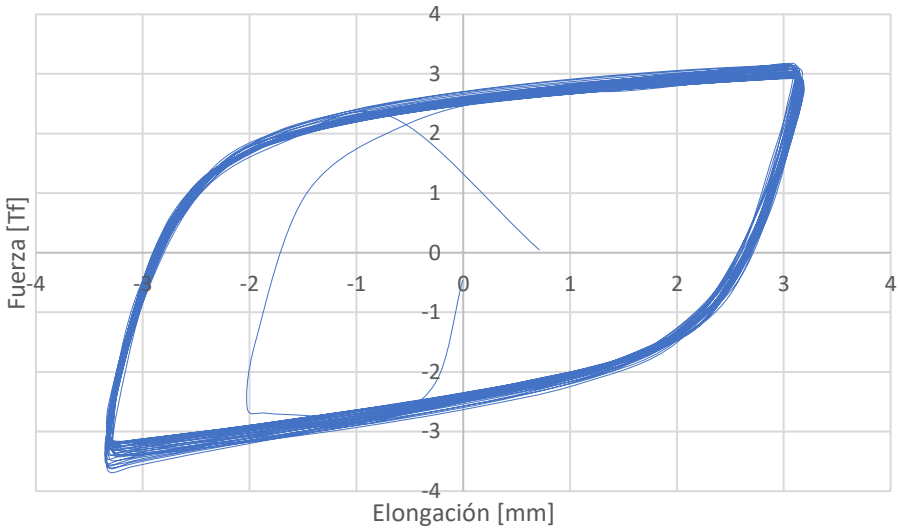

Figura 5.11 Gráfico acero AZA con deformación 3%

Figura 5.12 Barra AZA 3%

Tabla 5.6 Resultados de ensayo de barra AZA con deformación 3%

Número de ciclos	33
Fuerza de tracción máxima [Tf]	3.16
Fuerza de compresión máxima [Tf]	3.67
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	3.11
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	3.67
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	2.28

5.1.3 Acero CAP

5.1.3.1 Deformación 1%

En la figura 5.13 se muestra la curva fuerza elongación obtenida para barra CAP con amplitud de deformación del 1%. Las líneas extras son un ciclo menor inicial y a la rotura. La tabla 5.7 resume los resultados obtenidos.

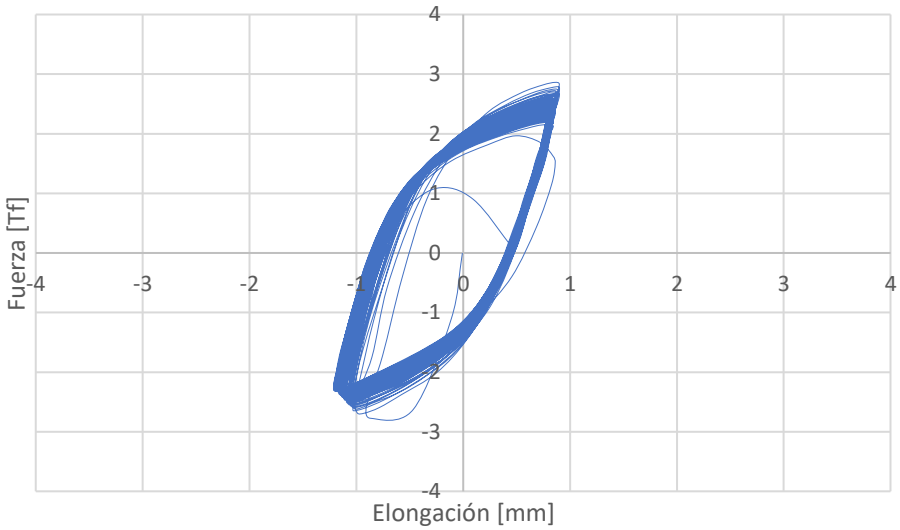

Figura 5.13 Gráfico acero CAP con deformación 1%

Figura 5.14 Barra CAP 1%

Tabla 5.7 Resultados de ensayo de barra CAP con deformación 1%

Número de ciclos	556
Fuerza de tracción máxima [Tf]	2.86
Fuerza de compresión máxima [Tf]	2.77
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	1.97
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.34
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	1.08

5.1.3.2 Deformación 2%

En la figura 5.15 se muestra la curva fuerza elongación obtenida para barra CAP con amplitud de deformación del 2%. Las líneas extras son un ciclo menor inicial y a la rotura. La tabla 5.8 resume los resultados obtenidos.

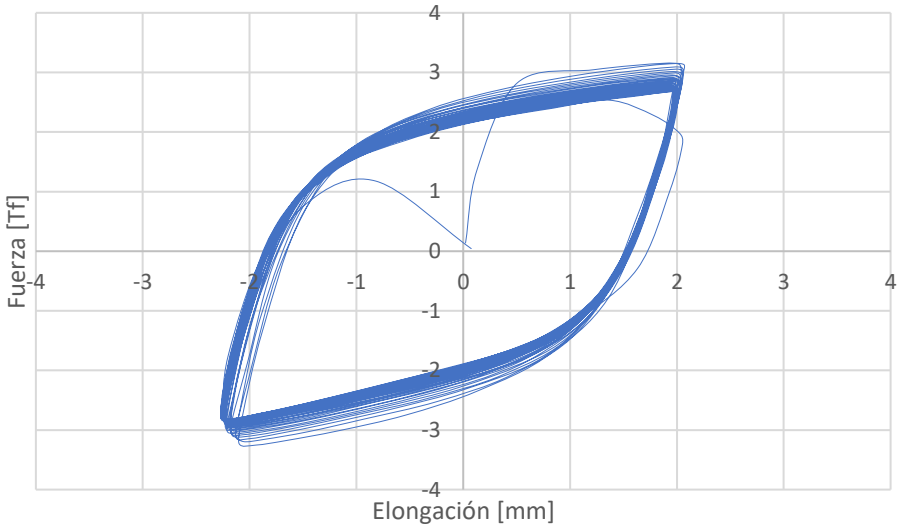

Figura 5.15 *Gráfico acero CAP con deformación 2%*

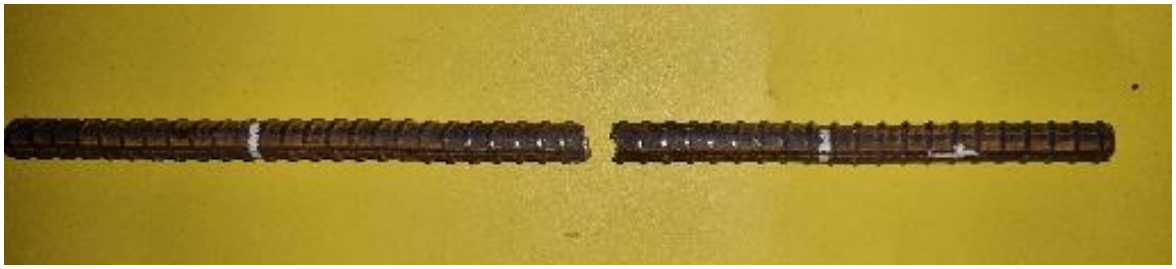

Figura 5.16 *Barra CAP 2%*

Tabla 5.8 Resultados de ensayo de barra CAP con deformación 2%

Número de ciclos	63
Fuerza de tracción máxima [Tf]	3.15
Fuerza de compresión máxima [Tf]	3.25
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.53
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.85
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	1.18

5.1.3.3 Deformación 3%

En la figura 5.17 se muestra la curva fuerza elongación obtenida para barra CAP con amplitud de deformación del 3%. Las líneas extras son un ciclo menor inicial y a la rotura. La tabla 5.9 resume los resultados obtenidos.

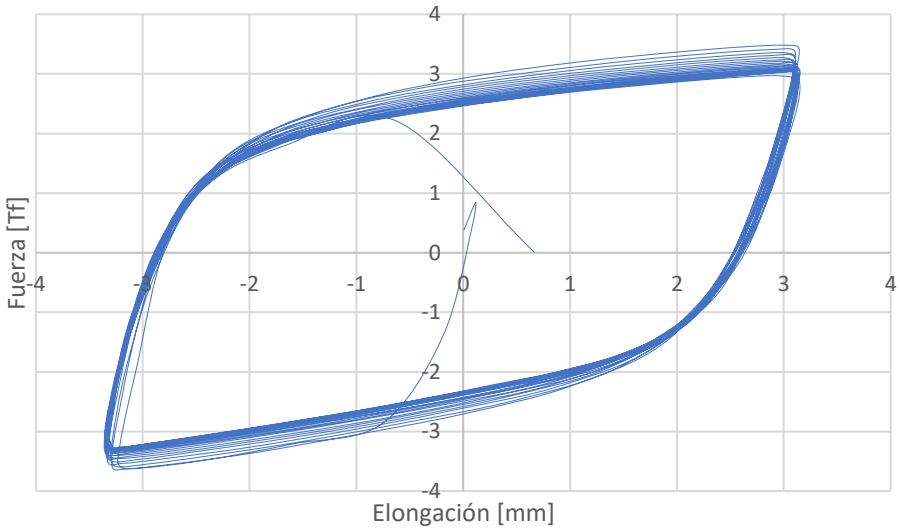

Figura 5.17 Gráfico acero CAP con deformación 3%

Figura 5.18 Barra CAP 3%

Tabla 5.9 Resultados de ensayo de barra CAP con deformación 3%

Número de ciclos	24
Fuerza de tracción máxima [Tf]	3.48
Fuerza de compresión máxima [Tf]	3.63
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.97
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	3.3
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	2.21

5.1.4 Comentarios

5.1.4.1 Números de ciclos hasta la falla

La tabla 5.10 muestra el resumen del número de ciclos hasta la falla de cada barra.

Tabla 5.10 Número de ciclos hasta la falla de cada barra con todas las deformaciones

Ciclos (Nf)	Fabricante		
Deformación	**AZA**	**CAP**	**ACMA**
1%	**520**	**556**	**264**
2%	**99**	**63**	**30**
3%	**33**	**24**	**5**

Para el caso de la deformación del 1%, se observa que los números de ciclos hasta la falla con el dispositivo definitivo son mayores que los números obtenidos con el modelo de camisa original. Además, la barra CAP presentó el mayor número de ciclos, seguido por AZA, con una diferencia no muy considerable. Estos resultados demostraron que la camisa definitiva impidió el pandeo de mejor forma.

Para el caso de las deformaciones del 2% y 3%, las barras AZA obtuvieron los números de ciclos hasta la falla más altos.

Los gráficos de histéresis de las figuras 5.7, 5.9 y 5.11, y de las figuras 5.13, 5.15 y 5.17, muestran ciclos estables y una baja degradación de la resistencia por parte de las barras AZA y CAP, hasta que se produce la rotura después de un alto número de ciclos.

Del gráfico esfuerzo deformación unidireccional con el ensayo estándar mostrado en la figura 3.3, se puede observar cómo las barras AZA presentaron mayor ductilidad y una meseta de fluencia definida en comparación con las barras CAP, con una ductilidad menor y sin meseta de fluencia. Sin embargo, esta diferencia no influyó en mayor medida en la resistencia a la fatiga de bajo ciclaje ya que ambas barras mostraron resultados similares.

Como se esperaba, y de acuerdo a su uso, las barras ACMA presentaron resultados muy inferiores a las de los otros dos fabricantes, tanto en el número de ciclos como en la degradación de la resistencia.

En la figura 5.19 se observa el gráfico del Número de ciclos vs Deformación para los tres tipos de barras.

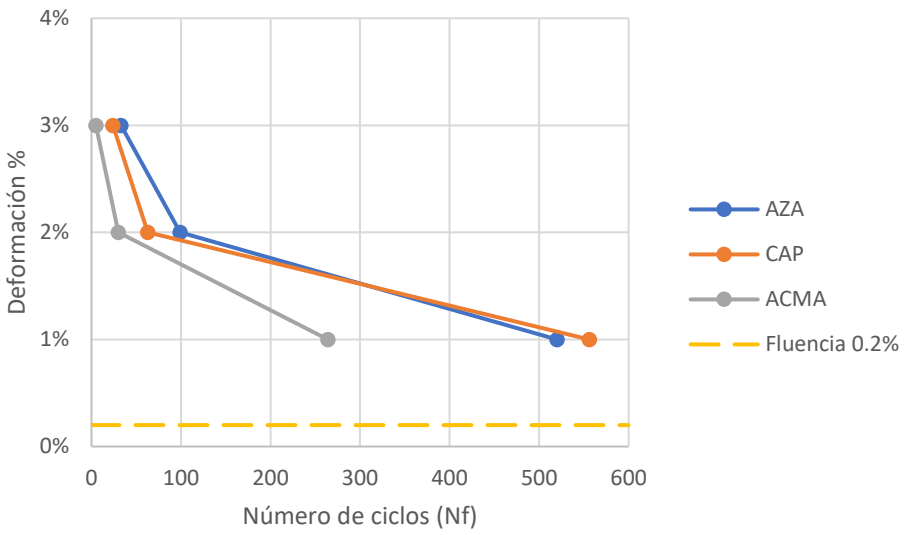

Figura 5.19 Gráfico N_f vs Deformación de los distintos fabricantes de acero

5.1.4.2 Comparación ensayos con pandeo y sin pandeo

En esta sección se presenta una comparación entre los números de ciclos hasta la falla obtenidos en los ensayos con pandeo restringido y los ensayos realizados en la memoria desarrollada paralelamente por S. A. Rojas [1] con pandeo permitido. La tabla 5.11 muestra los resultados correspondientes a estos ensayos.

Tabla 5.11 Número de ciclos hasta la falla incluyendo pandeo de cada barra con todas las deformaciones, S. A. Rojas (2022)

Ciclos (Nf)	**Fabricante**		
Deformación	**AZA**	**CAP**	**ACMA**
1%	**133**	**128**	**59**
2%	**43**	**32**	**20**
3%	**22**	**18**	**7**

Se observa que las barras AZA son las que presentaron los mejores resultados en todas las deformaciones, seguidas por CAP con números de ciclos un poco menores. Como se esperaba, las barras ACMA tuvieron números muy inferiores a los de las otras dos.

La figura 5.20 muestra un resumen de los números de ciclos hasta la falla de los tres tipos de barras incluyendo los ensayos con pandeo y sin pandeo.

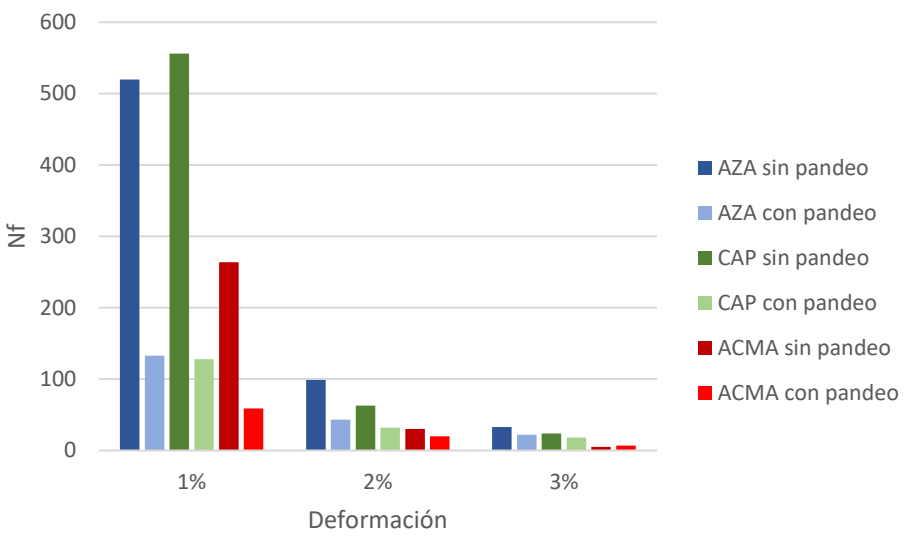

Figura 5.20 Gráfico de barras resumen de los ensayos con y sin pandeo

La tabla 5.12 muestra la disminución del número de ciclos al realizar ensayos con pandeo.

Tabla 5.12 Reducción de N_f al considerar el pandeo; sp: N_f sin pandeo, cp: N_f con pandeo

(sp-cp)/sp%	Fabricante		
Deformación	**AZA**	**CAP**	**ACMA**
1%	**74%**	**77%**	**78%**
2%	**57%**	**49%**	**33%**
3%	**33%**	**25%**	**-40%**

De los resultados se aprecia como, a medida que aumenta la deformación aplicada, disminuye la influencia del pandeo en la resistencia a la fatiga de bajo ciclaje. Esto confirma experimentalmente lo obtenido por C. Lacaze [14] de que, según sus resultados, existe una aparente disminución del impacto del pandeo en la fatiga de bajo ciclaje a mayor amplitud de deformación.

Según C. Lacaze [14], el daño generado por el pandeo se mantiene relativamente constante independiente de la amplitud de deformación aplicada, mientras que el daño generado por el efecto de la fatiga del material aumenta a medida que se aplican amplitudes de deformación mayores, generando así esta disminución de la influencia del pandeo sobre N_f.

Es interesante mencionar el caso especial de ACMA que, al aplicar una amplitud de deformación del 3%, se observó un aumento del 40% en el número de ciclos hasta la falla al permitir el pandeo de la barra. Sorprende este resultado. Sin embargo, se realizaron dos ensayos adicionales con el mismo programa, obteniendo números de ciclos hasta la falla de 4 y 6, inferiores a los 7 ciclos obtenidos por S. A. Rojas.

La figura 5.21 muestra el gráfico del Número de ciclos vs Deformación para los tres tipos de barras incluyendo los ensayos con y sin pandeo.

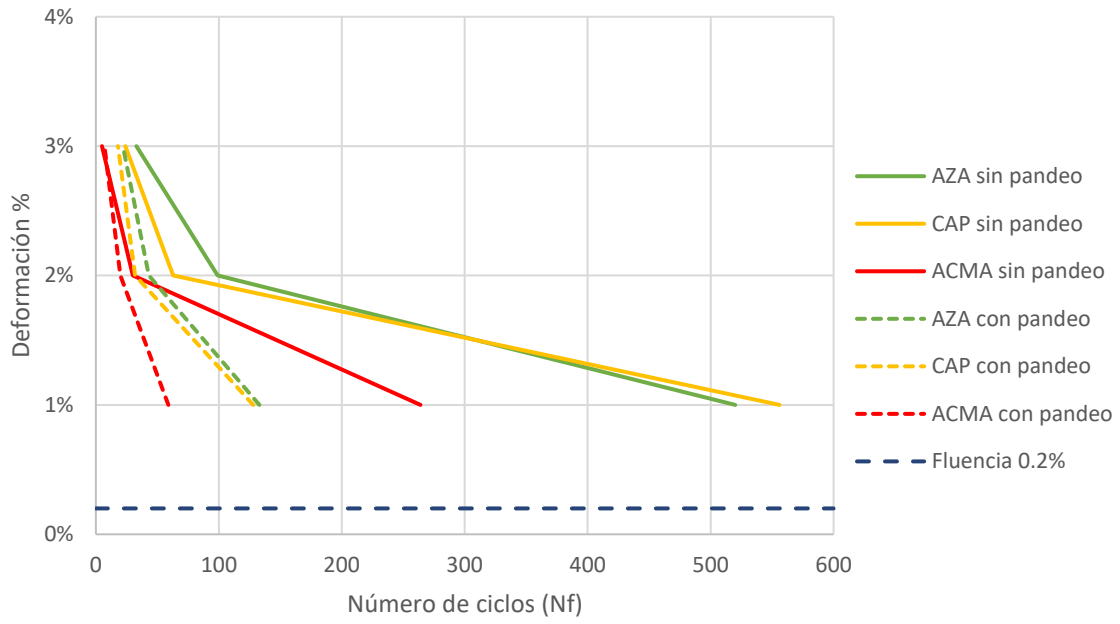

Figura 5.21 Gráfico N_f vs Deformación de los distintos fabricantes de acero, comparando ensayos con pandeo y sin pandeo

5.1.4.3 Modelo de Coffin-Manson

La figura 5.22 muestra el gráfico del Número de medios ciclos hasta la falla versus la Deformación en escala logarítmica. Se muestran además las líneas de tendencia que mejor se adaptan a los datos según la ecuación de Coffin-Manson modificada por Koh-Stephens:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = M(2N_f)^m \qquad (24)$$

Los valores de M y m para los distintos tipos de acero fueron obtenidos mediante el método de los mínimos cuadrados y se muestran en la tabla 5.13.

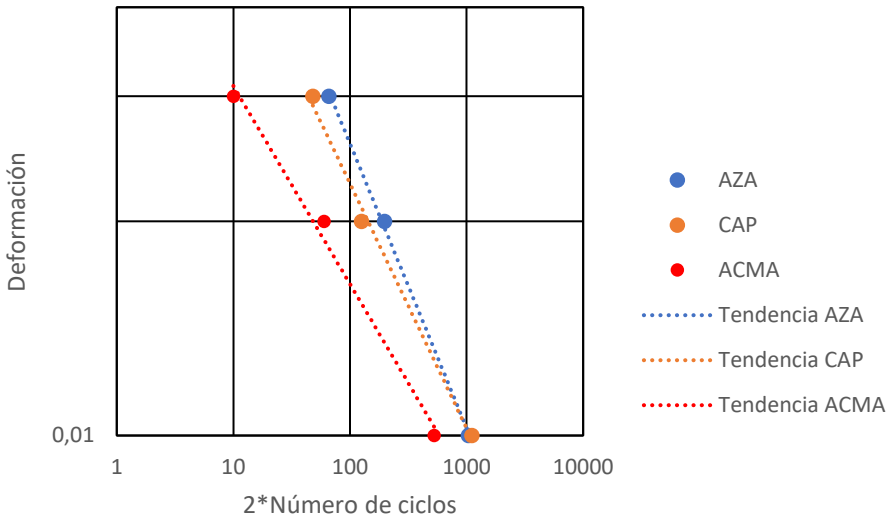

Figura 5.22 Gráfico $2N_f$ vs Deformación de los distintos fabricantes de acero

Tabla 5.13 Valores de M y m para los distintos tipos de acero

Acero	M	m	R^2
ACMA	**0,0589**	**-0,278**	**0,9899**
AZA	**0,1642**	**-0,4**	**0,9986**
CAP	**0,1104**	**-0,344**	**0,9931**

En la figura 5.23 se muestra una comparación entre los resultados obtenidos de los aceros nacionales con los modelos obtenidos por Koh-Stephens, Mander-Panthaki y Brown-Kunnath. De este gráfico se observa que las barras AZA y CAP presentaron una mejor respuesta ante la fatiga de bajo ciclaje, mostrando un mayor número de ciclos resistidos en todas las deformaciones estudiadas. Además, las pendientes obtenidas son muy similares, lo que implica que la degradación de la resistencia a la fatiga conforme se aumenta la deformación es comparable a lo esperado según los modelos de los respectivos autores.

Por otro lado, ACMA mostró una mayor degradación de la resistencia al aumentar la deformación, tal como lo indica su pendiente representada por el valor de m.

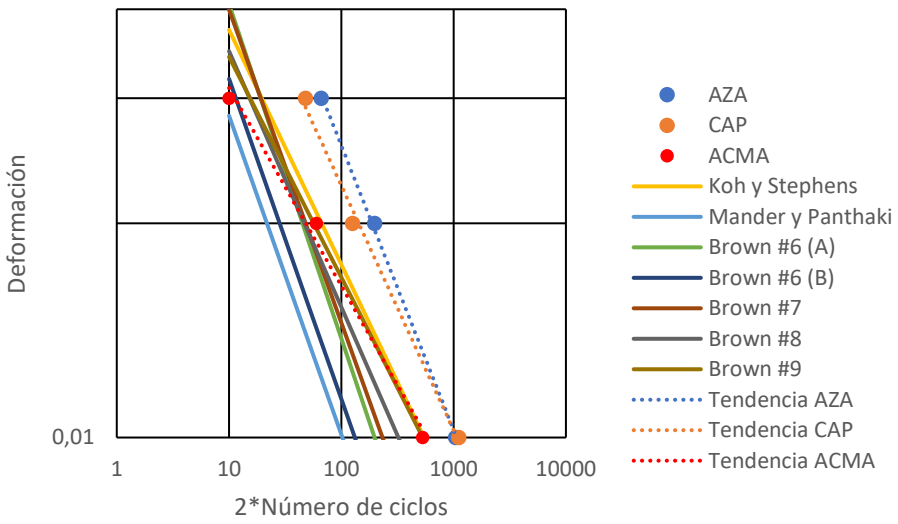

Figura 5.23 Comparación de resultados obtenidos con modelos de la literatura

5.2 Resultados del dispositivo definitivo con barras de acero soldables CAPSOL sometidas a distinta metodología de soldadura

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos cíclicos sin pandeo de las barras CAPSOL obtenidas desde las probetas GF1 y P4, junto con las barras de control. Además, se muestran fotografías de las barras en su estado posterior a los ensayos.

5.2.1 CAPSOL control

Las figuras 5.24 y 5.26 muestran las curvas fuerza elongación de las barras CAPSOL de control, sin ningún tipo de soldadura. Las líneas extras son un ciclo menor inicial y a la rotura. Las tablas 5.14 y 5.15 resumen los resultados obtenidos.

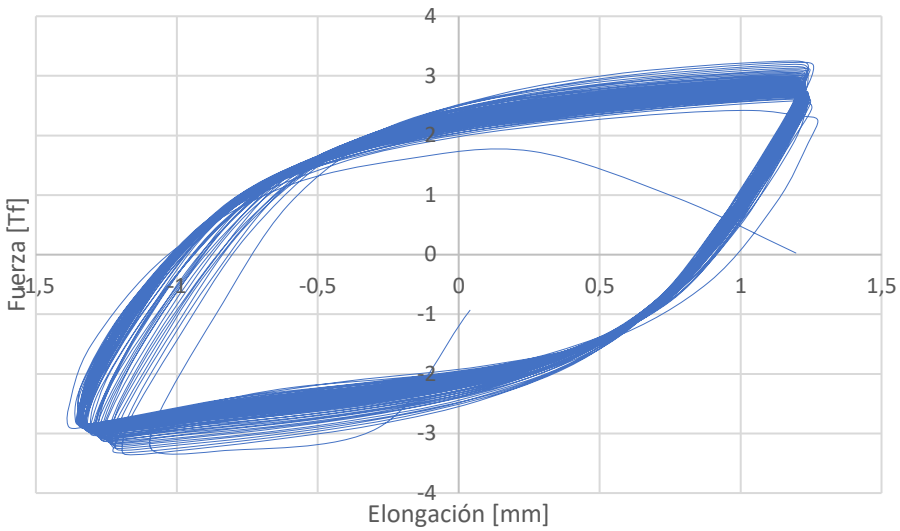

Figura 5.24 *Gráfico CAPSOL de control 1. Deformación unitaria 2%*

Figura 5.25 *Barra CAPSOL control 1*

Tabla 5.14 Resultados de ensayo de barra CAPSOL control 1

Número de ciclos	78
Fuerza de tracción máxima [Tf]	3.24
Fuerza de compresión máxima [Tf]	3.35
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.42
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.89
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	1.74

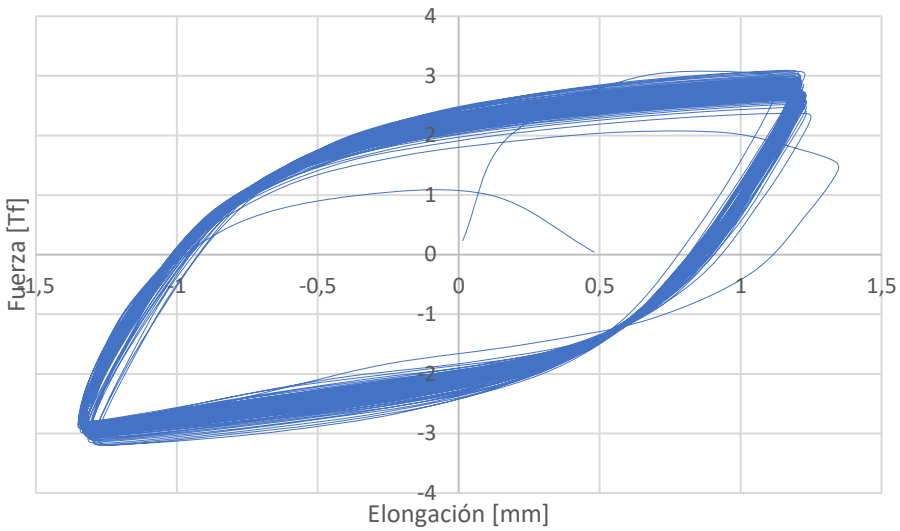

Figura 5.26 Gráfico CAPSOL de control 2. Deformación unitaria 2%

Figura 5.27 Barra CAPSOL control 2

Tabla 5.15 Resultados de ensayo de barra CAPSOL control 2

Número de ciclos	102
Fuerza de tracción máxima [Tf]	3.08
Fuerza de compresión máxima [Tf]	3.2
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.06
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.89
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	1

5.2.2 Probeta GF1

Las figuras 5.28 y 5.30 muestran las curvas fuerza elongación de las barras CAPSOL obtenidas de la probeta GF1, con soldadura y sin precalentamiento. Las líneas extras son un ciclo menor inicial y a la rotura. Las tablas 5.16 y 5.17 resumen los resultados obtenidos.

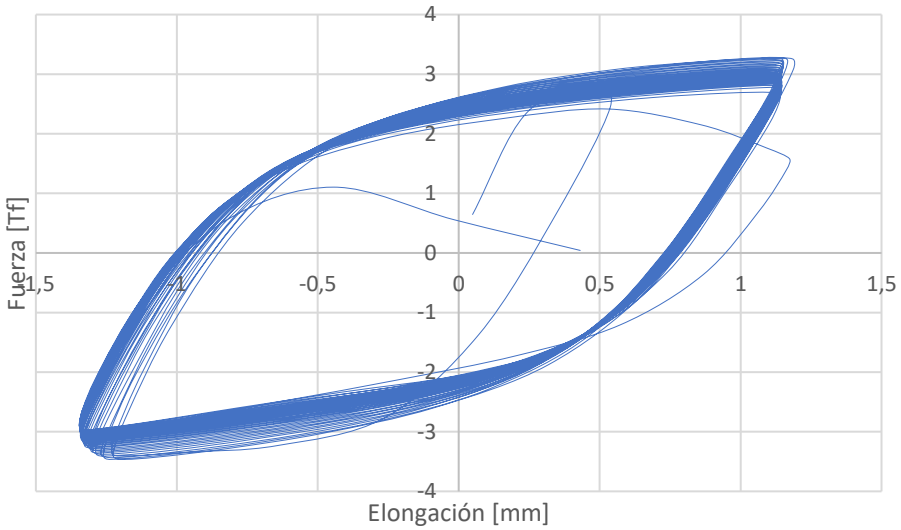

Figura 5.28 Gráfico CAPSOL de probeta GF1 1. Deformación unitaria 2%

Figura 5.29 Barra GF1 1

Tabla 5.16 Resultados de ensayo de barra CAPSOL GF1 1

Número de ciclos	43
Fuerza de tracción máxima [Tf]	3.28
Fuerza de compresión máxima [Tf]	3.46
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.42
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	3.01
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	1.1

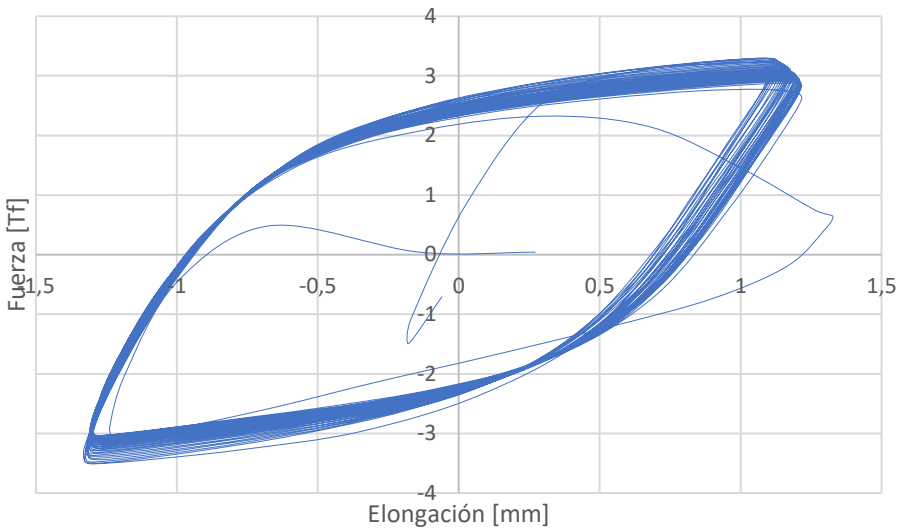

Figura 5.30 Gráfico CAPSOL de probeta GF1 2. Deformación unitaria 2%

Figura 5.31 Barra GF1 2

Tabla 5.17 Resultados de ensayo de barra CAPSOL GF1 2

Número de ciclos	37
Fuerza de tracción máxima [Tf]	3.29
Fuerza de compresión máxima [Tf]	3.5
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.32
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	3.06
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	0.49

5.2.3 Probeta P4

Las figuras 5.32 y 5.34 muestran las curvas fuerza elongación de las barras CAPSOL obtenidas de la probeta P4, con soldadura y con precalentamiento. Las líneas extras son un ciclo menor inicial y a la rotura. Las tablas 5.18 y 5.19 resumen los resultados obtenidos.

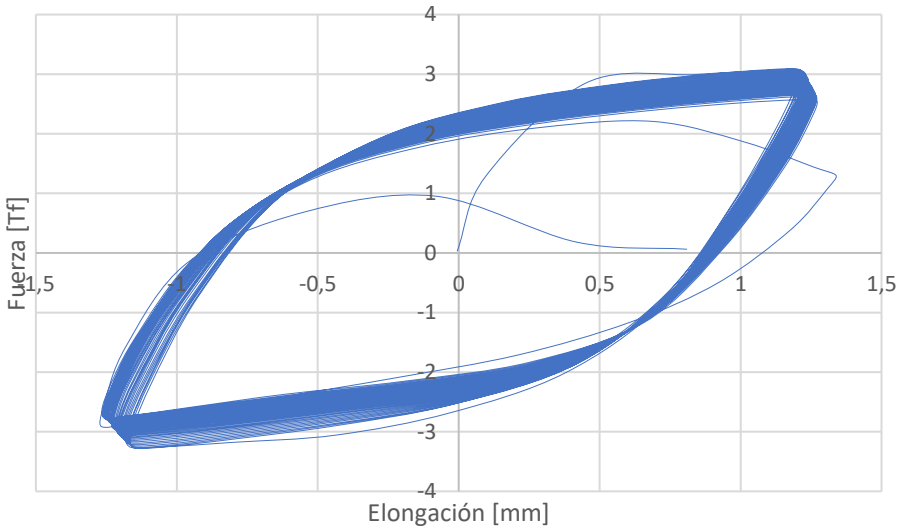

Figura 5.32 Gráfico CAPSOL de probeta P4 1. Deformación unitaria 2%

Figura 5.33 Barra P4 1

Tabla 5.18 Resultados de ensayo de barra CAPSOL P4 1

Número de ciclos	64
Fuerza de tracción máxima [Tf]	3.08
Fuerza de compresión máxima [Tf]	3.27
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.2
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.91
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	0.95

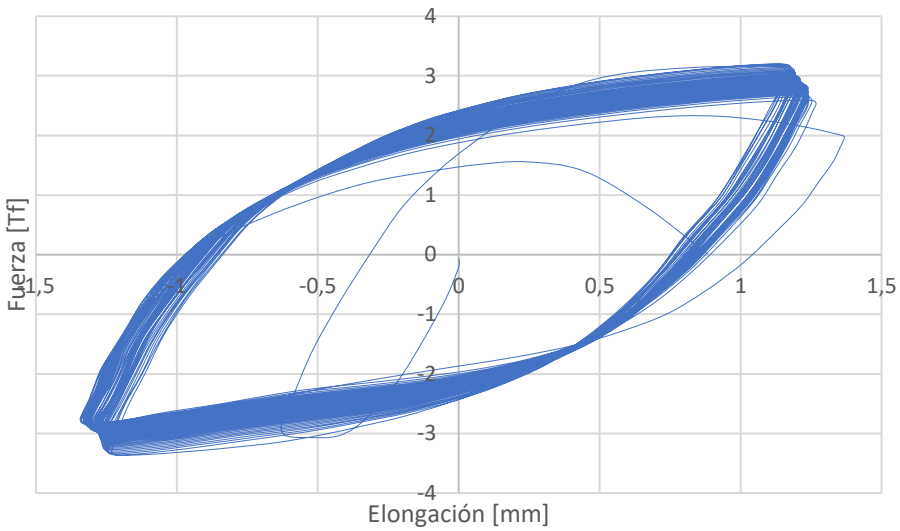

Figura 5.34 Gráfico CAPSOL de probeta P4 2. Deformación unitaria 2%

Figura 5.35 Barra P4 2

Tabla 5.19 Resultados de ensayo de barra CAPSOL P4 2

Número de ciclos	60
Fuerza de tracción máxima [Tf]	3.2
Fuerza de compresión máxima [Tf]	3.37
Fuerza de tracción máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.33
Fuerza de compresión máxima en el último ciclo completo [Tf]	2.9
Fuerza de tracción justo antes de la falla [Tf]	1.56

5.2.4 Comentarios

En la tabla 5.20 se muestra el resumen del número de ciclos hasta la falla de cada barra.

Tabla 5.20 Número de ciclos hasta la falla con deformación 2% CAPSOL

Ciclos (Nf)	Probeta		
Ensayo 2%	Control	GF1	P4
1	78	43	64
2	102	37	60
Promedio	90	40	62

Como se esperaba, las barras de control presentaron la mayor resistencia, con 90 ciclos antes de la falla, mientras que las barras de la probeta P4, con tratamiento térmico previo, mostraron una disminución en el número de ciclos equivalente al 31.1%.

Las barras pertenecientes a la probeta GF1, sin tratamiento previo, presentaron una disminución de más de la mitad de los ciclos, equivalente al 55.56%. Recordar que estas barras se fracturaron durante los ensayos de la probeta GF1.

A pesar de la disminución obtenida en el número de ciclos resistidos en las barras soldadas, las curvas esfuerzo elongación no mostraron gran diferencia en la degradación de la resistencia entre los especímenes de control y con soldadura.

En la figura 3.10 se observa que la soldadura con precalentamiento no afectó en mayor medida al ensayo de tracción, tal y como obtuvo A. Quezada [3], pero sí afectó en un porcentaje a los ensayos de fatiga. Por otro lado, la figura 3.10 muestra que la ductilidad de la barra obtenida de la probeta GF1 disminuyó casi a la mitad; por lo tanto, la soldadura sin precalentamiento afectó tanto a la resistencia de las barras como a su vida de fatiga.

Conclusiones

Se diseñó un sistema capaz de restringir el pandeo de las barras de acero para hormigón armado sometidas a ciclos de carga tracción-compresión, y se construyeron dos prototipos para ensayar probetas de 8 mm. Este sistema permitió recrear las condiciones a las que están sometidas las barras al encontrarse perfectamente confinadas dentro de un elemento de hormigón armado.

Para lograr esto se necesitaron dos diseños. En el primero la barra de 8 mm se ensayaba dentro de una camisa formada por una serie de anillos de acero, el cual se descartó debido a problemas de pandeo localizado en la zona de la mordaza inferior para las deformaciones del 2%. Sólo para deformaciones del 1% se obtuvieron resultados aceptables. Sin embargo, este modelo de camisa presenta dos ventajas, primero, se puede variar fácilmente su longitud para probar distintos largos de barra, y segundo, permite observar con mayor claridad el ensayo.

Debido a lo mencionado anteriormente, se debió rediseñar la camisa. El nuevo diseño permitió suplir la principal falencia del diseño original, que es impedir el pandeo en la zona de las mordazas, pero perdiendo la ventaja de poder observar la barra y de variar la longitud. Para solucionar este último problema se requieren diferentes camisas, como se hizo en esta memoria con una de 10.5 cm y otra de 6.5 cm, que se usaron para probar barras con longitud entre mordazas de 11.5 cm y 7 cm. Este diseño presentó resultados satisfactorios en todas las deformaciones.

Se obtuvieron las ecuaciones de los aceros nacionales según el modelo de Coffin-Manson modificado por Koh-Stephens, y se compararon con otros modelos de la literatura. Se confirmó que las barras de AZA y CAP tienen un comportamiento cíclico comparable a sus similares empleadas en los países de los respectivos autores.

Se comprobó experimentalmente que cuanto mayor es la amplitud de deformación aplicada, menor es la influencia del pandeo en la resistencia a la fatiga de bajo ciclaje.

La soldadura con precalentamiento no afectó los resultados de los ensayos de tracción, pero sí los de fatiga. La soldadura sin precalentamiento afectó significativamente tanto a los ensayos de tracción como a los de fatiga. Se comprobó que la fractura presentada en algunas barras con estribos soldados se debió a la falta de un tratamiento térmico previo.

De acuerdo al nivel de deformaciones consideradas en esta memoria, y comparando con los resultados de la memoria desarrollada paralelamente por S. A. Rojas, el pandeo disminuyó la resistencia a la fatiga de bajo ciclaje de las barras en al menos un 25%. Por lo tanto, para estos casos, es recomendable evitar el pandeo para postergar la fractura de las barras. Parece ser que buscar alguna forma de impedir el pandeo, como aumentar el confinamiento de las barras, sería una buena medida para evitar el corte del refuerzo. Sin embargo, habría que tener más datos para verificar que deformaciones mayores no ocurrirán en la práctica.

Referencias

[1] Rojas R, S.A. (2022) "Fracturas de barras de acero para hormigón armado debidas a la deformación crítica por pandeo y a la fatiga de bajo ciclaje", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

[2] Collins, A. (1993) *Failure of Materials in Mechanical Design,* 2nd Ed., Ohio State University, Columbus, Ohio.

[3] Quezada, A. (2010), "Efectos de la Soldadura en Empalmes de Acero de Refuerzo, para Hormigón Armado", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

[4] Brown, J., and Kunnath, S. K., "Low-Cycle Fatigue Failure of Reinforcing Steel Bars," *ACI Materials Journal*, V. 101, No. 6, Nov.-Dec. 2004, pp. 457-466.

[5] Manson, S. S., "Behavior of Materials Under Conditions of Thermal Stress", *Heat Transfer Symposium,* University of Michigan Engineering Research Institute, Ann Arbor, Mich., 1953, pp. 9-75.

[6] Coffin, L. F., Jr., "A Study of the Effect of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal", *American Society of Mechanical Engineers,* V. 76, 1954, pp. 931-950.

[7] Koh, S. K., and Stephens, R. I., "Mean Stress Effect on Low Cycle Fatigue for a High Strength Steel", *Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures,* V. 14, No. 4, 1991, pp. 413-428.

[8] Mander, J.B.; Panthaki, F.D., and Kasalanati, A., "Low Cycle Fatigue Behavior of Reinforcing Steel", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, V. 6, No. 4, 1994, pp. 453-467.

[9] Hawileh, R.; Rahman, A.; and Tabatabai, H., "Evaluation of the Low-Cycle Fatigue Life in ASTM A706 and A615 Grade 60 Steel Reinforcing Bars," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, V. 22, No. 1, 2010, pp. 65-76. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:1(65).

[10] Basualdo, F. (2019), "Efectos de las Amarras y Soldaduras de los Estribos en el Comportamiento Sísmico de los Elementos de Hormigón Armado", Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

[11] 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.

[12] Pino, C. (2016), "Vigas de hormigón armado con refuerzo transversal y anclajes inclinados 45° sometidas a solicitación sísmica", Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.

[13] Figueroa, G. (2019), “Aceros Soldables en Elementos de Hormigón Armado Sometidos a Solicitación Sísmica”, Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.

[14] Lacaze, C. (2009), “Estudio y modelamiento del impacto del pandeo en la fatiga de bajos ciclos en barras longitudinales para hormigón armado”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

ANEXO A

Soldabilidad de barras de refuerzo para hormigón armado

En este anexo se presentan definiciones de algunos términos referentes al proceso de soldadura.

Las barras de acero soldables para hormigón armado deben cumplir con la norma NCh 3334 Of.2014 “Acero-Barras laminadas en caliente soldables para hormigón armado-Requisitos”, la cual establece requisitos mecánicos, geométricos y de composición química que deben cumplir las barras soldables para elementos de hormigón armado, electrosoldados o soldados con aporte de material.

A.1 Composición química

Los requisitos de composición química establecidos en la norma garantizan la característica de soldabilidad, con o sin aporte de material, de estas barras.

La tabla A.1 muestra los límites de contenido exigidos por la norma:

Tabla A.1 Límites de contenido en el acero, NCh 3334

Elemento	% máximo
Carbono	0,30
Manganeso	1,50
Fósforo	0,035
Azufre	0,045
Silicio	0,50

A.2 Carbono equivalente (CE)

La capacidad de un material para ser soldado está fuertemente relacionada con la composición química de éste, y se evalúa con el parámetro llamado carbono equivalente (CE).

La norma establece para el carbono equivalente un límite máximo de 0.55%, el cual se calcula con la siguiente fórmula:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cu}{40} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10}$$

Esta ecuación se utiliza para evaluar el endurecimiento del acero basado en su composición química. La figura A.1 muestra la soldabilidad de un acero relacionando el porcentaje de carbono y el porcentaje de carbono equivalente:

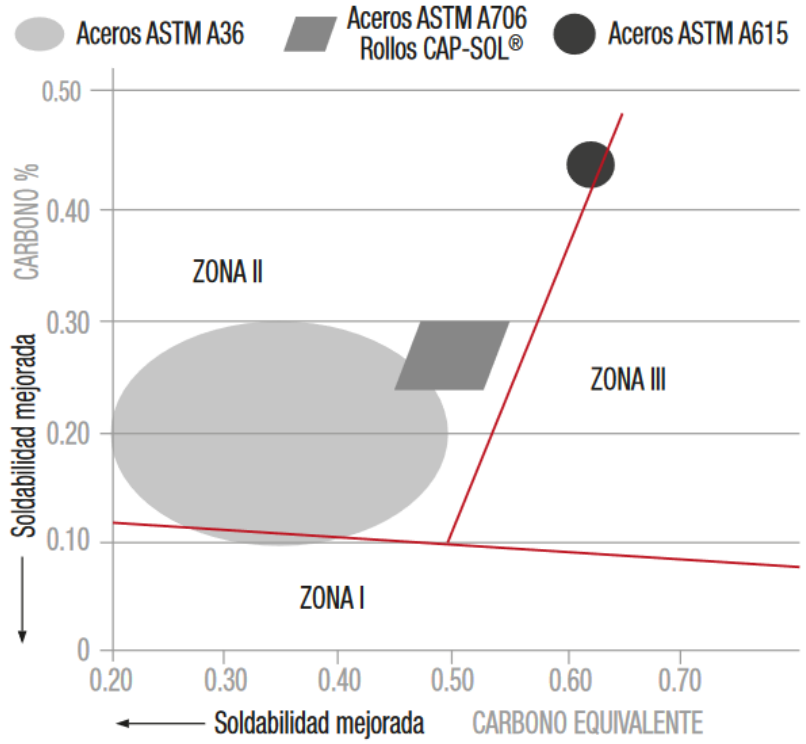

Figura A.1 Soldabilidad de los aceros según el contenido de carbono y CE, CAP

Por su contenido de carbono, los aceros se clasifican en acero de bajo carbono, con un contenido máximo de 0.3%; de contenido medio de carbono, desde 0.3% hasta 0.6%; y alto contenido de carbono, con más de 0.6%.

El contenido de carbono es relevante para lograr que la región soldada sea más resistente que el metal base. Durante el proceso de soldadura, el metal base adyacente a la soldadura se calienta, provocando cambios en la microestructura del acero que al enfriarse puede llevar a la

creación de nuevas estructuras con propiedades mecánicas diferentes del metal base. Los aceros de bajo carbono rara vez aumentan su dureza en el proceso de soldadura.

A.3 Zona afectada térmicamente (ZAT)

Cuando se aplica una soldadura, el calor afecta un área determinada del material más allá de la sección soldada. Toda esa área sufre modificaciones en sus propiedades mecánicas. La Zona Afectada Térmicamente, o ZAT, es aquella parte de metal en la fusión, que fue modificada por el calor entre la zona fundida y el límite del metal de base.

El tamaño de la ZAT depende de qué tanto se transmite el calor en la pieza intervenida. Esta transmisión de calor se calcula para cada material con el "coeficiente de difusividad térmica", el cual está dado por la conductividad térmica, la densidad del material y el calor específico que haya sido aplicado. Cuanto más alta es la difusividad térmica, más rápidamente se propaga el calor. De la misma manera, una difusividad alta significa un enfriamiento más rápido y por lo tanto una ZAT más reducida. Por el contrario, coeficientes más bajos implican que el calor no puede ser disipado eficientemente y por lo tanto la ZAT será más grande.

Desde el punto de vista de la metodología de soldadura aplicada, el tamaño de la ZAT depende de tres factores: la cantidad de calor aplicada, la duración de la exposición y las características de la zona afectada. Al aplicar mayores cantidades de energía, y por un tiempo prolongado, se generan ZAT más extensas.

Los estudios de fractura frágil en estructuras soldadas muestran que los sitios de inicio de la fractura frecuentemente parten en la ZAT. Esta región generalmente es un punto de concentración de esfuerzos y está sujeto a esfuerzos residuales y microestructuras susceptibles que pueden contener defectos.

A.4 Tratamientos de precalentamiento

Un factor que controla la microestructura de la ZAT y del metal de soldadura, es la velocidad de enfriamiento. Esta velocidad depende de los espesores del metal de base, la geometría de la unión, el calor aportado y la temperatura de precalentamiento. La velocidad de enfriamiento puede ser usada para prevenir la formación de microestructuras peligrosas en la ZAT y en la soldadura.

Por efectos de la velocidad de enfriamiento pueden originarse en el acero estructuras metalúrgicas duras, y en algunos casos, provocar una transformación directa de austenita a martensita.

La temperatura de precalentamiento tiene como principal función disminuir la velocidad de enfriamiento del conjunto soldado. Es la mínima temperatura que debe ser alcanzada en todo el

espesor y en una zona suficientemente ancha a ambos lados de la junta del material base antes de que comience el proceso de soldadura. Al calentar el material, se favorecen las transformaciones metalúrgicas a estructuras más blandas que resultan menos frágiles y propensas a fisuración en frío.

El precalentamiento produce también un efecto importante en la velocidad de difusión del Hidrógeno, consigue microestructuras con menores valores de dureza en la ZAT y en el metal de soldadura y previene la formación de martensita en aceros de alto carbono. Además, tiene el efecto secundario de reducir las tensiones residuales disminuyendo los gradientes térmicos asociados a la soldadura.

A.5 Fases de los aceros (Sistemas hierro-carbono)

Los aceros consisten en aleaciones de hierro (Fe) con carbono (C) (alrededor del 0.1% al 2%, según el tipo de acero). El porcentaje de carbono presente y la temperatura definen la fase de la aleación hierro-carbono y, por lo tanto, sus características físicas y propiedades mecánicas. El porcentaje de carbono determina el tipo de aleación ferrosa: hierro, acero o fundición.

Para contenido de carbono mayor a 6.67% se crea el compuesto químico denominado cementita (Fe_3C) que no tiene propiedades metálicas. Las fases de los sistemas hierro-carbono se estudian sólo hasta esta proporción.

La figura A.2 presenta las fases a distintas temperaturas para aleaciones Fe-C, con contenido de carbono de hasta 6.67%. Se muestran dos diagramas: en línea punteada el estable hierro-grafito, y en línea continua el metaestable Fe-Fe_3C. En ellos se muestran las fases de equilibrio, o equilibrio metaestable, respectivamente, para diferentes combinaciones de concentración de carbono y temperatura.

La condición de estable tiene lugar con enfriamientos extremadamente lentos, especialmente en rango de baja temperatura y bajo carbono, siendo entonces el de mayor interés el diagrama metaestable. En la tabla A.2 se resumen las fases y microconstituyentes de importancia metalúrgica.

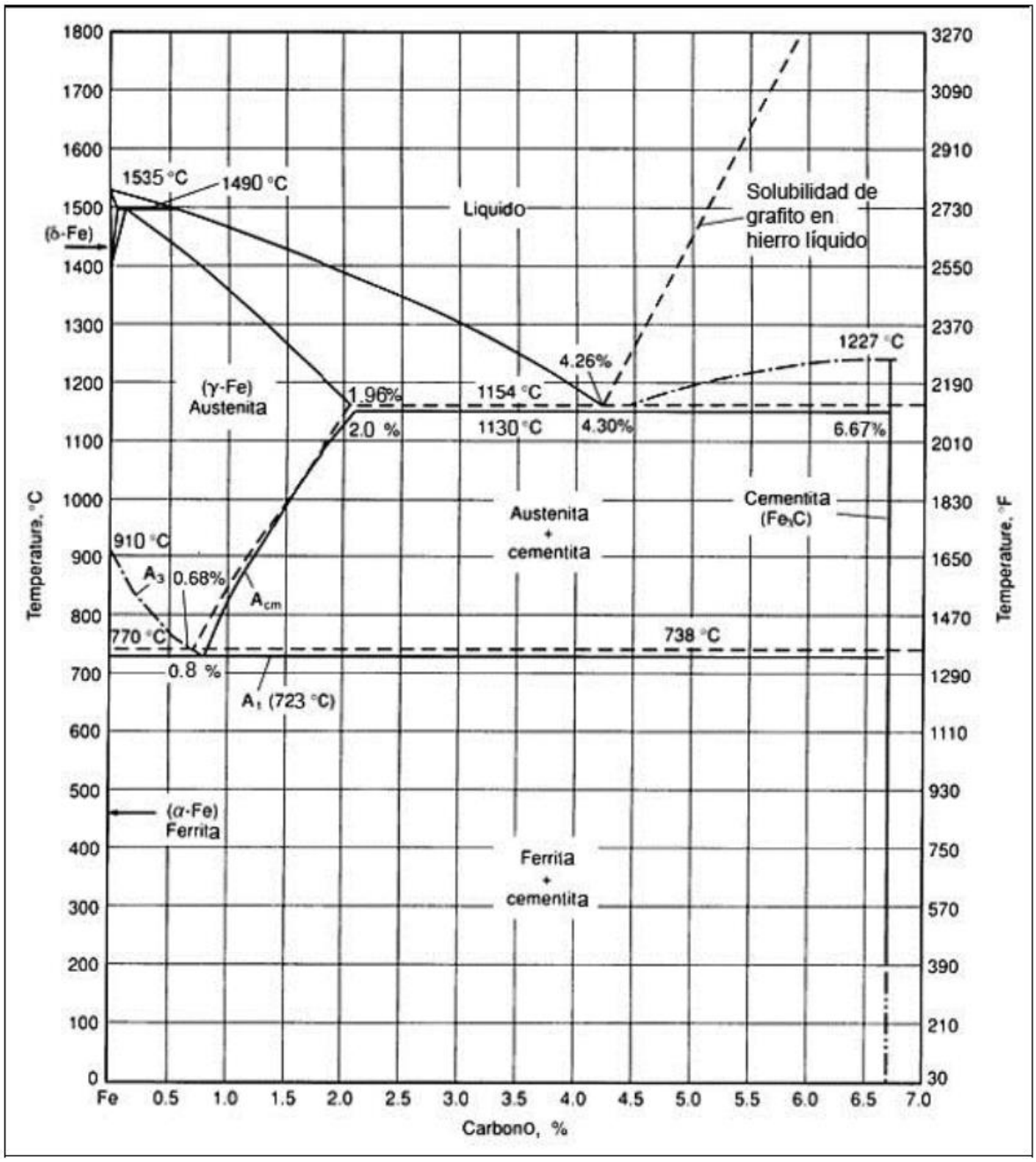

Figura A.2 Fases para aleaciones Fe-C, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

Tabla A.2 Resumen de las fases en las aleaciones Fe-C, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

Fase (o microconstituyente)	Estructura cristalina de las fases	Características
Ferrita (Fe α)	bcc	Fase de equilibrio de baja temperatura, relativamente blanda
ferrita-δ (Fe δ)	bcc	Fase de equilibrio estable a alta temperatura, isomorfa con hierro α
Austenita (Fe γ)	fcc	Fase de equilibrio estable a temperatura media, relativamente blanda
Cementita (Fe_3C)	ortorrómbica compleja	Fase metaestable, de alta dureza
Grafito	Hexagonal	Fase de equilibrio, estable
Perlita		Microconstituyente metaestable; mezcla laminar de ferrita y cementita
Martensita	bct (solución sobresaturada de carbono en ferrita)	Fase metaestable de alta dureza, morfología de placas o agujas, según el % de carbono
Bainita		Microconstituyente metaestable duro; mezcla no laminar de ferrita y cementita en escala extremadamente fina; la bainita superior se forma a temperaturas más altas y tiene aspecto plumáseo; la inferior se forma a temperaturas más bajas y su apariencia es acicular. La dureza aumenta cuando desciende la temperatura de formación.

Entre los campos monofásicos se encuentran regiones con mezclas de dos fases, tal como ferrita + cementita, austenita + cementita, y ferrita + austenita. A temperaturas más elevadas se halla el líquido, y por debajo de él, hay regiones de dos fases: líquido + austenita, líquido + cementita, y líquido + ferrita-δ. En los tratamientos térmicos, la fase líquida siempre se evita. Algunos límites entre fases tienen denominaciones especiales. Éstos son:

- **A_1:** Temperatura eutectoide, la mínima a la que se puede encontrar austenita.
- **A_3:** Límite de la región austenítica para aceros de bajo contenido de carbono.
- **A_{cm}:** Límite equivalente para aceros de alto contenido de carbono.

Los diagramas tiempo-temperatura-transformación, o simplemente diagramas TTT, grafican las condiciones (temperatura-tiempo) en que ocurre la transformación de la austenita para cada tipo de acero. La figura A.3 muestra un ejemplo de gráfico TTT.

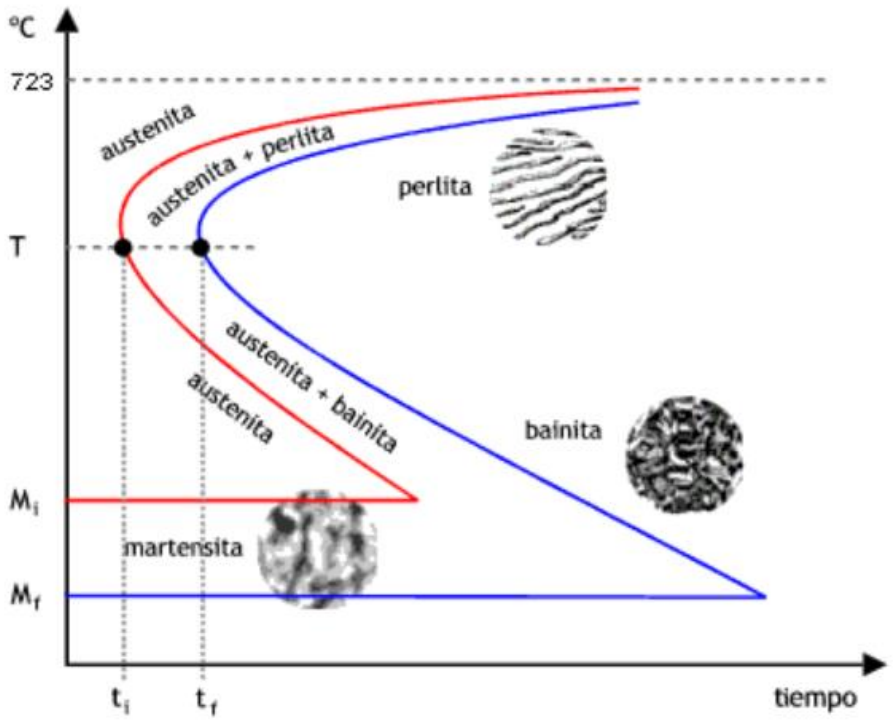

Figura A.3 Ejemplo de gráfico TTT, http://tecno.iesvegadelturia.es/

La figura A.4 muestra el diagrama TTT de las barras CAPSOL en su proceso de fabricación, mientras que la figura A.5 muestra la estructura final de éstas.

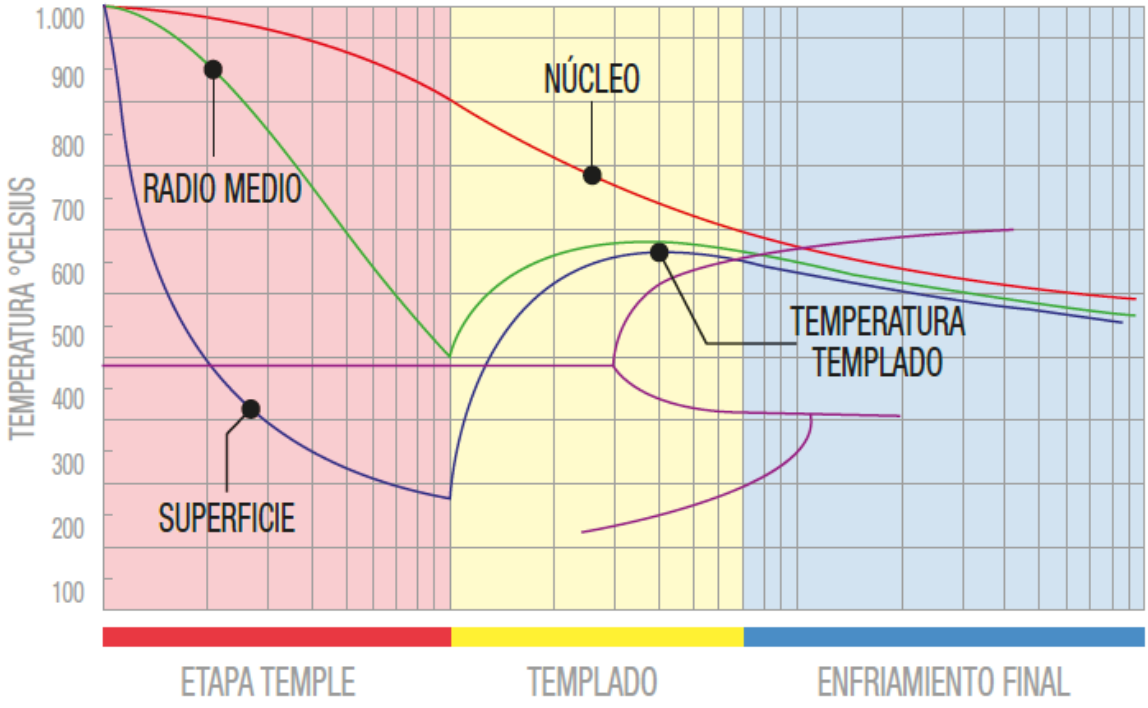

Figura A.4 Diagrama TTT de barras CAPSOL, CAP

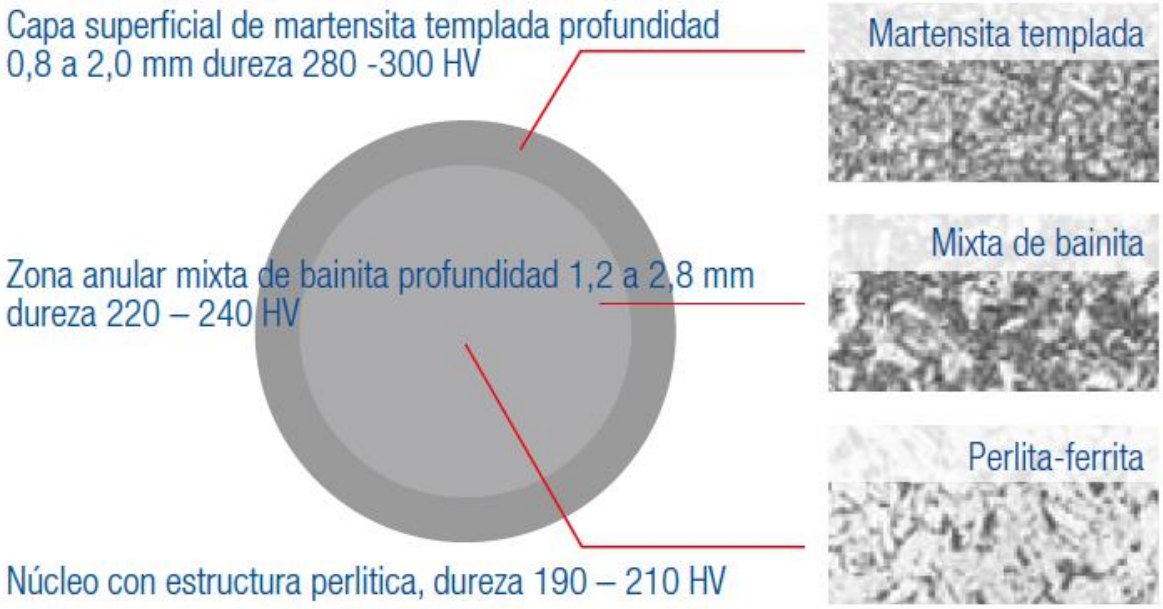

Figura A.5 Estructura de barras CAPSOL, CAP