



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA CAPACIDAD REMANENTE EN BARRAS DE REFUERZO DE
MALLAS AMARRADAS Y ELECTROSOLDADAS PROVENIENTES DE MUROS
ESTRUCTURALES ENSAYADOS CÍCLICAMENTE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MARCO ANDRÉS VELÁSQUEZ QUIÑONES

PROFESOR GUÍA:
FABIÁN RODOLFO ROJAS BARRALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONARDO MAXIMILIANO MASSONE SÁNCHEZ
RICARDO ANTONIO HERRERA MARDONES

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: MARCO ANDRÉS VELÁSQUEZ QUIÑONES
FECHA: JULIO 2020
PROFESOR GUÍA: FABIÁN ROJAS BARRALES

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA CAPACIDAD REMANENTE EN BARRAS DE REFUERZO DE
MALLAS AMARRADAS Y ELECTROSOLDADAS PROVENIENTES DE MUROS
ESTRUCTURALES ENSAYADOS CÍCLICAMENTE

El estudio de los elementos de refuerzo en estructuras de hormigón armado, cobran relevancia en un país sísmico como lo es Chile, donde la gran cantidad de movimientos telúricos son capaces de deteriorar las estructuras en el tiempo, llevando a que, ante eventos mayores, las sollicitaciones sobre la estructura lleven al hormigón a perder su capacidad de tracción, desprendiendo su recubrimiento, y dejando al descubierto los refuerzos internos que comienzan a fatigarse ante la demanda cíclica, pudiendo llevar al colapso la estructura.

Estos elementos de refuerzo, son generalmente fierros entramados en formas de mallas, los cuáles son amarrados in situ durante el proceso de construcción. Hoy en día, el mercado ofrece una gran variedad de calidades de acero para la enfierradura que conforman los refuerzos, siendo la más típica entre ellas las de grado A63-42H, las cuales tienen la característica de no ser soldables. Sin embargo, se han ido introduciendo en el mercado nuevos refuerzos, como A630s que es un refuerzo soldable y dúctil, lo cual abre la posibilidad de su uso en mallas de refuerzo. Pero todavía falta estudiar algunas de sus capacidades como su resistencia a la fatiga.

Es por esto que, para este trabajo de título, se realiza un estudio acerca de mallas de refuerzo fabricadas con acero A63-42H Soldable, conocidas como mallas A630s, con la particularidad de que estas mallas provienen de muros estructurales que fueron ensayados cíclicamente con anterioridad, en un estudio realizado por ACMA® con la colaboración del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

Para ello, se procede a ensayar barras extraídas desde zonas próximas y distantes al lugar de falla de dichas mallas (producto de los ensayos previos), llevando estas probetas a la rotura, frente a distintos niveles de deformación (1, 3 y 5%), y distintas relaciones de aspecto ($L/d=6$ y $L/d=12$, esta última para inducir la respuesta al pandeo).

Finalmente, se analizan los resultados en los cuales se observa una notable disminución de la capacidad remanente de las barras cuando estas son inducidas al pandeo, además del diferente daño ocasionado en las barras según su orientación en el mallado, y según su cercanía a la zona de falla. Además, es posible notar una reducción de capacidad con respecto a las probetas de acero inalteradas ensayadas antes del estudio de los muros ciclados.

Dedicatoria

*Dedico este trabajo a todos los cercanos que confiaron
en mí durante esta etapa de mi vida*

Agradecimientos

Agradecer de sobremanera a mi familia, que ha sido un pilar fundamental de apoyo durante mi etapa universitaria, quienes han estado en los altos y bajos confiando, y echando un empujón para seguir adelante con todo.

Agradecer a mi polola, que nunca dejó de confiar en mí y apoyarme a pesar de la distancia, siempre estuvo dando una palabra de aliento, porque cada una de sus palabras, eran precisas para el momento que más se necesitaba.

También agradecer a mis amigos civiles, en un principio compañeros de carrera, pero luego convertidos en un grupo afiatado, donde las risas no faltaban, donde cada uno tenía sus cualidades que los hacían ser únicos e inigualables.

A mis compas y partners, Bastián Moya y Felipe Rojas, que con su fiel apañe nunca faltaron los buenos baciles, en donde sea que hubiese que estar, allá estábamos, para celebrar un día más de vida. Nunca faltaron sus buenas historias, que hicieron mucho más agradable el paso por la Universidad, y que de seguro de esas historias nos acordaremos por mucho tiempo más.

Por último, agradecer al equipo de mis amores, Colo Colo, que sin duda me dio muchas alegrías, junto al eterno goleador, Esteban Efraín Paredes.

Tabla de contenido

1	Introducción	10
1.1	Motivación.....	11
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivos generales	12
1.2.2	Objetivos específicos	12
1.3	Alcance.....	12
2	Revisión bibliográfica	14
2.1	Antecedentes Generales	14
2.1.1	Extracción mallas desde probetas M3	16
2.2	Comportamiento del Acero	20
2.2.1.	Comportamiento del acero en tracción	20
2.2.2.	Comportamiento del acero en compresión.....	21
2.2.3.	Comportamiento del acero frente a cargas cíclicas	22
2.2.4.	Fatiga del acero a bajos ciclos	23
2.3	Soldabilidad en el acero	29
2.4	Fotogrametría.....	32
3	Ensayos experimentales	36
3.1	Metodología.....	36
3.2	Montaje experimental.....	37
3.3	Protocolo de ensayos	40
3.3.1	Ensayos cíclicos	41
3.4	Calibración de equipo	42
3.5	Fotogrametría.....	44
4	Resultados	48
4.1	Corrección del módulo de elasticidad	48
4.2	Corrección por fotogrametría.....	50
4.3	Resumen y análisis de resultados	55
5	Conclusiones y recomendaciones	63
	Bibliografía	65

Apéndice

A	Fichas técnicas	67
A.1	Ficha técnica barras acero soldables	67
A.2	Ficha técnica mallas electro soldadas A630s	67
B	Inspección visual mallas	68
C	Código de programación.....	71
C.1	Procesamiento de datos máquina universal.....	71
C.2	Procesamiento de fotos.....	76
D	Resumen de resultados.....	84
D.1	Resultados ensayos Begoña Hamasaki (2013).....	84
D.2	Resultados ensayos barras malla M3MEA.....	85
D.3	Resultados ensayos barras malla M3MEB.....	86
D.4	Gráficos comparativos pre y post ciclado de muros M3MEB.....	87

Índice de tablas

Tabla 2.1. Simbología para identificación de probetas según ensayo.....	19
Tabla 2.2. Valores en combinación de colores.....	33
Tabla 3.1. Tipo y cantidad de ensayos por malla.....	41
Tabla 3.2. Ensayos cíclicos, según relación L/d y amplitud de deformación.....	42
Tabla 3.3. Datos según canal de salida máquina universal, en [V].....	43
Tabla 4.1. Ensayos barras electrosoldadas pre ciclado de muros.....	56
Tabla D.0.1. Resultados Begoña (2013), barras L/d=6, ϕ 8, A630-420H	84
Tabla D.0.2. Resultados Begoña (2013), barras L/d=8, ϕ 8, A630-420H	84
Tabla D.0.3. Resultados Begoña (2013), barras L/d=12, ϕ 8, A630-420H.....	84
Tabla D.0.4. Resumen de resultados para probetas de la malla proveniente del muro M3MEA.....	85
Tabla D.0.5. Resumen de resultados para probetas de la malla proveniente del muro M3MEB.....	86

Índice de figuras

Figura 1.1. Falla en muro Edificio Regina Oriente, Terremoto 27F (2010), Chile.....	10
Figura 2.1. Detalles serie de muros M3. (a) Esquema general y dimensiones, (b) Distribución armadura. [2].....	15
Figura 2.2. Probetas ensayadas serie M3. (a) M3MEA, (b) M3MEB, (c) M3FPA, (d) M3FPB. [3].	16
Figura 2.3. Mallas extraídas de series de muros M3. (a) Malla M3MEA, (b) Malla M3MEB, (c) Malla M3FPA.....	17
Figura 2.4. Disposición para corte de barras malla M3MEA: a) Barras según orientación; b) Probetas según parámetros.	18
Figura 2.5. Disposición para corte de barras malla M3MEB: a) Barras según orientación; b) Probetas según parámetros.	18
Figura 2.6. Barras agrupadas según la malla de la cual se extraen, y probetas cortadas listas para ensayar.....	20
Figura 2.7. Curva tensión-deformación del acero a tracción, Massone y Moroder (2009).	21
Figura 2.8. Curvas monotónicas experimentales acero a compresión, Monti y Nuti (1992).	22
Figura 2.9. Diagrama tensión-deformación del acero bajo cargas cíclicas.....	23
Figura 2.10. Representación de las deformaciones plásticas y elásticas.....	24
Figura 2.11. Amplitud de deformación constante, Koh y Stephens (1991)	25
Figura 2.12. Esquema gráfico con parámetros del modelo de Koh y Stephens. Ver Pablo Herrera T (2014)	26
Figura 2.13. Curvas tensión-deformación de probetas #6 y #7 a deformación constante de 2,5%, Brown y Kunnath (2004)	27
Figura 2.14. Curvas de vida a la fatiga obtenidas por Brown y Kunnath (2004) a partir del modelo de Koh y Stephens.	27
Figura 2.15. Curvas cíclicas de tensión-deformación, Monti y Nuti (1992).....	28
Figura 2.16. Resultados de curvas de vida a la fatiga para barras $\phi 8$: (a) $L/d=6$, (b) $L/d=8$, (c) $L/d=12$. Ver Begoña Hamasaki (2013).....	29
Figura 2.17. (a) Soldadura con material de aporte; (b) Soldadura sin material de aporte.....	30
Figura 2.18. Modelo cromático RGB.	32
Figura 2.19. Imagen color real y representación matricial de modelo RGB en MATLAB. ..	34
Figura 2.20. Imagen real y sus coordenadas como modelo RGB.....	35
Figura 3.1. Máquina Universal Instron 600XL.....	37
Figura 3.2. Montaje Experimental	38

Figura 3.3. Extensómetro axial modelo 3542. (Imagen referencial)	39
Figura 3.4. Esquema referencial con largo libre de ensayo y empotramiento en máquina	41
Figura 3.5. Esquema ensayo cíclico. [13].	42
Figura 3.6. Tramo lineal curvas tensión-deformación, diferencias en módulo de elasticidad.	44
Figura 3.7. Interfaz software DSLR Remote Pro Multi-Camera.	45
Figura 3.8. Selección número de cuadros e intervalo de tiempo entre ellos (Imagen referencial)	46
Figura 3.9. Probeta electrosoldada utilizada en ensayo.	46
Figura 4.1. (a) Corrección ajuste de carga datos máquina; (b) Diferencias de pendiente en tramo lineal-elástico de la curva tensión-deformación	49
Figura 4.2. Ajuste módulo de elasticidad de los datos de la máquina con respecto al extensómetro.....	50
Figura 4.3. Deformación unitaria vs tiempo, obtenido por fotogrametría, $L/d=6$ y $\varepsilon=3\%$	51
Figura 4.4. Centrado de datos en torno al origen.	51
Figura 4.5. Superposición curvas deformación-tiempo. a) Datos sin centrar, b) Datos centrados.....	52
Figura 4.6. Diferencia porcentual entre máximos y mínimos de dos métodos de medición distintos.	53
Figura 4.7. Ajuste de deformación según fotogrametría.	54
Figura 4.8. Curva tensión-deformación con datos corregidos por fotogrametría	54
Figura 4.9. Comportamiento barra inalterada con punto de soldadura, $L/d=8$, $\varepsilon=3\%$	55
Figura 4.10. Gráfico comparativo barras Begoña (2013), y barras electrosoldadas pre ciclado muros.....	56
Figura 4.11. Vida a la fatiga del material, mallas muros M3MEA, orientación horizontal..	57
Figura 4.12. Vida a la fatiga del material, mallas muros M3MEB, orientación horizontal..	58
Figura 4.13. Vida a la fatiga del material, mallas muros M3MEA, orientación vertical	59
Figura 4.14. Vida a la fatiga del material, mallas muros M3MEB, orientación vertical	59
Figura 4.15. Curvas de vida a la fatiga. a) Barras Horizontales, b) Barras verticales.....	60
Figura 4.16 Ensayos barras electrosoldadas pre ciclado y post ciclados de muros M3MEA, orientación horizontal.....	61
Figura 4.17 Ensayos barras electrosoldadas pre ciclado y post ciclados de muros M3MEA, orientación vertical.	61
Figura 4.18. Casos especiales barras sobre diagonal opuesta a la de falla. (a) Muro M3MEA, (b) Muro M3MEB.	62
Figura A.0.1. Propiedades mecánicas barras soldables CAP.....	67

Figura A.0.2. Características técnicas mallas ACMA A360s	67
Figura B.0.1. Falla en diagonal. (a) Muro M3MEA, (b) Malla Muro M3MEA.....	68
Figura B.0.2. Falla en diagonal. (a) Muro M3MEB, (b) Malla Muro M3MEB.....	69
Figura B.0.3. Acercamiento a zona de falla y daño en las barras de malla:(a) Malla muro M3MEA. (b) Malla muro M3MEB.....	69
Figura B.0.4. Falla en diagonal. (a) Muro M3FPA, (b) Malla Muro M3FPA.....	70
Figura D.0.1 Ensayos barras electrosoldadas pre ciclado y post ciclados de muros M3MEB, orientación horizontal.....	87
Figura D.0.2 Ensayos barras electrosoldadas pre ciclado y post ciclados de muros M3MEB, orientación vertical.	87

Capítulo 1

Introducción

Dado que Chile es caracterizado por ser un país sísmico, es de gran importancia conocer el comportamiento de sus estructuras y de los elementos que la componen, que son los que le otorgan las propiedades de resistencia y rigidez frente a los movimientos cíclicos ocasionados por un sismo. Es por ello que las edificaciones y estructuras en general deben estar compuestas por muros altamente resistentes y capaces no colapsar frente al daño post sismo (ver Figura 1.1). Para esto, se dispone de elementos de refuerzo internos, que por lo general son barras de acero estándar dispuestos de manera longitudinal y transversal dentro del muro de hormigón (en forma de mallas), siendo estas barras capaces de resistir solicitaciones de carga axial, momento y corte.



Figura 1.1. Falla en muro Edificio Regina Oriente, Terremoto 27F (2010), Chile.

Las barras de acero, son elementos bastante utilizados en estructuras de hormigón armado, dado que otorga la gran capacidad a tracción que el hormigón no posee. Además, tienen la capacidad de deformarse en un rango elástico si las solicitaciones son menores, o bien capacidad de fluir y deformarse plásticamente ante cargas importantes y desplazamientos mayores. Ante este último escenario, se producen mayores daños en la estructura, donde es posible que ésta falle o conlleve a la rotura a los elementos estructurales.

Cómo se menciona con anterioridad, la disposición de las barras dentro del hormigón, conforman mallas de refuerzo. Estas mallas son generalmente amarradas in situ por alambres de acero galvanizado, en disposición de lo indicado en los planos estructurales, y

las normas atinentes. Además de las mallas amarradas, existen las mallas electrosoldadas, conocidas típicamente por ser estandarizadas y fabricadas con acero de calidad AT56-50H. A diferencia de dichas mallas, para este trabajo de título se estudiarán barras de refuerzo provenientes de mallas electrosoldadas A630S (es decir, con soldabilidad garantizada), que son refuerzos de alta resistencia fabricados a partir de acero A63-42H Soldable [1].

1.1 Motivación

Cómo se menciona en el apartado anterior, existen barras de acero de distintas calidades, siendo la A630-420H la más común entre ellas. Una particularidad de estas barras usadas típicamente en enfierraduras de construcción, es que no tienen la capacidad de ser soldables. Es por ello que, para obtener una barra soldable, es necesario modificar la composición química del material (trabajo realizado por CAP en el caso de las mallas de estudio), buscando mantener sus propiedades de ductilidad y resistencia sin mayores alteraciones.

En estudios experimentales previos (realizado por ACMA® con la colaboración del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile) acerca de muros reforzados con mallas amarradas y mallas electrosoldadas (simples), se llegó a la conclusión de que estas mallas tienen misma resistencia y rigidez, ambas con comportamiento controlado por deformaciones de corte. Además, se tiene que probetas con armadura amarrada alcanzan desplazamientos de techo un 20% superior a la solución electrosoldada. Esto permite conocer el comportamiento del sistema, pero, también es necesario saber cómo será el comportamiento interno de estas mallas, y cuánto más podrán resistir posterior a la fluencia hasta llegar a la rotura.

Es por eso, que la solución electrosoldada se ve como buena alternativa a futuro para ser utilizada en la construcción de obras menores o edificaciones, debido además a la gran cantidad de ventajas que presenta con respecto a la solución tradicional, siendo entre ellas la facilidad y rapidez de instalación en terreno, lo que conlleva a final del día a menores costos en cuanto a mano de obra y reducción de tiempo de ejecución de las obras, teniendo también certeza de la sección de acero a utilizar, junto con las cuantías y dimensiones que son ajustadas a cada proyecto, todo llevado a cabo mediante un proceso controlado.

Además de lo anterior, las soluciones electrosoldadas cuentan con características mecánicas que cumplen con las normativas vigentes (en particular NCh204), sin diferir mucho de las propiedades de las mallas amarradas con acero de construcción, presentando en el papel una resistencia a la tracción $F_u = 630 [MPa]$, tensión de fluencia mínima de $F_y = 420 [MPa]$, y una ductilidad $F_u/F_y = 1,25 [1]$ (revisar Apéndice A).

Estas características y ventajas, conlleva a que las mallas electrosoldadas sean material de estudio al ser comparadas con respecto a las mallas de fierro preparado, estudiando en este trabajo de título el comportamiento de las barras que la componen, teniendo en consideración la vida a la fatiga del material para barras cerca de la zona de falla y lejos de la zona de falla, de las mallas procedentes de los estudios previos en muros ciclados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

Esta memoria tiene como objetivo estudiar la capacidad remanente en barras horizontales y verticales provenientes de mallas de refuerzo electrosoldada post ensayos cíclicos de muros.

1.2.2 Objetivos específicos

Para el cumplimiento del objetivo general acerca del estudio de barras electrosoldadas, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión bibliográfica acerca del comportamiento dúctil de las barras de acero frente a cargas cíclicas y su fatiga post ciclos (considerando la variación de demanda de estos).
- Recopilar y analizar la información acerca de la capacidad de las barras de refuerzo ensayadas con anterioridad al ciclado de muros.
- Estudiar mediante ensayos, la capacidad remanente de las barras de refuerzo que fueron ensayadas con anterioridad, controlando ciertos parámetros tal como la cantidad de ciclos a realizar, y la cantidad de ensayos necesarios para obtener una muestra representativa.
- Realiza ensayos cíclicos, tanto en barras horizontales como verticales, para obtener así resultados numéricos, que luego se procesan por medio de herramientas computacionales para observar y cuantificar mediante curvas, los ciclos remanentes y la deformación remanente para llegar a la falla.

1.3 Alcance

La memoria se distribuye de la siguiente forma con el fin de lograr los objetivos previamente expuestos:

Capítulo 1: Introducción

Se presenta la motivación principal que hace llevar a cabo esta memoria, junto con los objetivos que se esperan obtener al final del presente trabajo.

Capítulo 2: Revisión bibliográfica

En esta sección se plasman los antecedentes generales y específicos que conllevan al estudio de las mallas electrosoldadas. Además, se incluye la recopilación de información de trabajos de investigación que ayudan a analizar los resultados obtenidos, para así lograr los objetivos propuestos.

Capítulo 3: Ensayos Experimentales

Se explica la metodología y los protocolos que se llevan a cabo para realizar los ensayos experimentales que permitan obtener los resultados. Se detalla el montaje, los tipos de ensayos a realizar, y la cantidad de probetas que se analizarán.

Capítulo 4: Análisis de resultados

A partir de los ensayos experimentales, se analizan los registros y datos obtenidos, estableciendo diversas comparaciones y singularidades detectadas durante el proceso de observación de resultados.

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

Se extraen las ideas principales producto del análisis de resultados, concluyendo finalmente respecto a lo desarrollado, considerando los objetivos propuestos inicialmente. Se establecen además recomendaciones para futuras memorias o investigaciones con respecto a temas similares al tratado.

Capítulo 2

Revisión bibliográfica

En esta sección, se tiene como principal objetivo presentar los antecedentes bibliográficos recopilados durante el desarrollo de esta memoria, con el fin de que el lector comprenda cada uno de los conceptos y tópicos que se tratan a lo largo de este trabajo. Así, la información que se expone en el presente capítulo proviene de distintas publicaciones y trabajos validados por la comunidad científica.

2.1 Antecedentes Generales

Con el fin de comparar el comportamiento de las mallas electro soldadas y las mallas de fierro preparado como refuerzo en distintos elementos estructurales, en el año 2018 ACMA S.A en conjunto con el departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, confeccionaron y ensayaron elementos estructurales como muros, vigas y losas, reforzados con los tipos de mallas ya mencionadas, donde las correspondientes a fierro preparado (FP) fueron elaboradas con acero de calidad A63-42H, mientras que las electro soldadas (ME) se elaboraron con acero de calidad A63-42H Soldable [2].

En el caso de los muros, los ensayos que se llevaron a cabo fueron ensayos cíclicos de manera de comparar el comportamiento de estos, en cuánto a ductilidad y resistencia. Para ello se dispuso de distintas series de muro: M1, M2, M3 y M4, con la particularidad que cada una de estas tenía diferente disposición de las mallas de refuerzo, es decir, si era un mallado simple o un mallado doble, además de la variación de distribución y espaciamiento de las barras verticales y horizontales.

El presente estudio se enfoca en el comportamiento de las barras horizontales y verticales de la serie de muros M3, la cual cuenta con un sistema de mallas simples, y una separación entre barras de 20 [cm] dentro del alma, contenidas en un espesor de muro de 12 [cm]. Con motivo de tener a disposición más de un antecedente del caso estudiado, se fabricaron dos probetas de cada tipo de refuerzo, es decir, dos con fierro preparado (M3FPA y M3FPB), y dos con mallas electrosoldadas (M3MEA y M3MEB). En la Figura 2.1 (a) y (b), se puede apreciar un esquema general del muro y la distribución de su armadura, respectivamente.

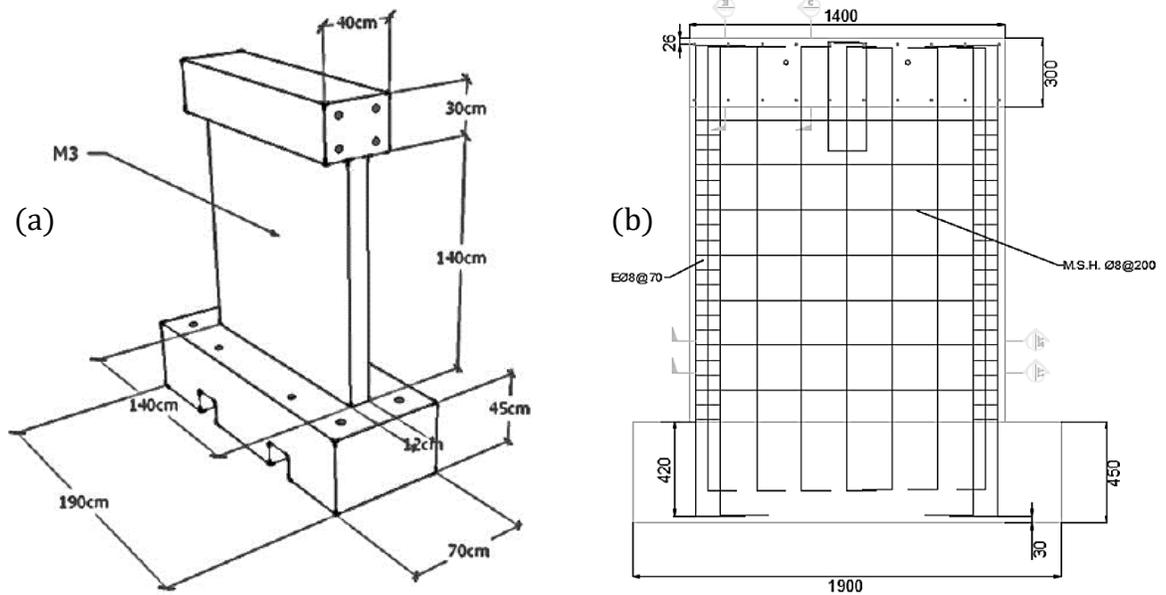


Figura 2.1. Detalles serie de muros M3. (a) Esquema general y dimensiones, (b) Distribución armadura. [2]

Las probetas M3, fueron sometidas a ensayos experimentales cíclicos, donde se ancló la fundación a una losa de reacción (de manera que la base quedará empotrada), para luego someterla a una carga lateral mediante un actuador hidráulico, que se conecta directamente a un muro de reacción en un extremo, y a la probeta propiamente tal en el otro extremo. Es de importancia mencionar que, al momento de realizar dichos ensayos, las probetas se encontraban cargadas axialmente a una magnitud constante, por medio de un sistema de cuatro gatos hidráulico, para así, de esta manera, simular la condición de servicio que reciben estos elementos estructurales.

Otro aspecto a considerar en el montaje experimental utilizado, es que se incluyeron unos topes laterales que limitan los desplazamientos que pueda experimentar la probeta producto de las cargas horizontales, y un marco de acero anclado a la losa de reacción que rodea la estructura para mantener la estabilidad del muro fuera del plano de donde se aplican las cargas, y así de esta forma cubrir las condiciones de borde del elemento.

Una vez realizados los ensayos, se obtuvieron las siguientes observaciones: las probetas presentan una falla frágil, manifestada por una grieta diagonal en 45° en la malla central (en ambos casos, FP y ME), producto de que ésta estaba siendo solicitada en su forma más crítica, donde las deformaciones de flexión y corte actuaban de forma equiparada, provocando que los daños se asocien a una falla por tracción diagonal. (ver Figura 2.2). En lo que respecta al desplazamiento de techo experimentado, se observó que las probetas de fierro preparado registran magnitudes de 32 [mm] en ambos sentidos de ciclado, a diferencia de las de solución electro soldadas, que alcanzan, a lo más, 25 [mm] de deriva de techo, Por último, se nota que la solución FP posee una ductilidad levemente mayor que la ME, mientras que la resistencia, no se ve afectada por el tipo de solución utilizada [3].

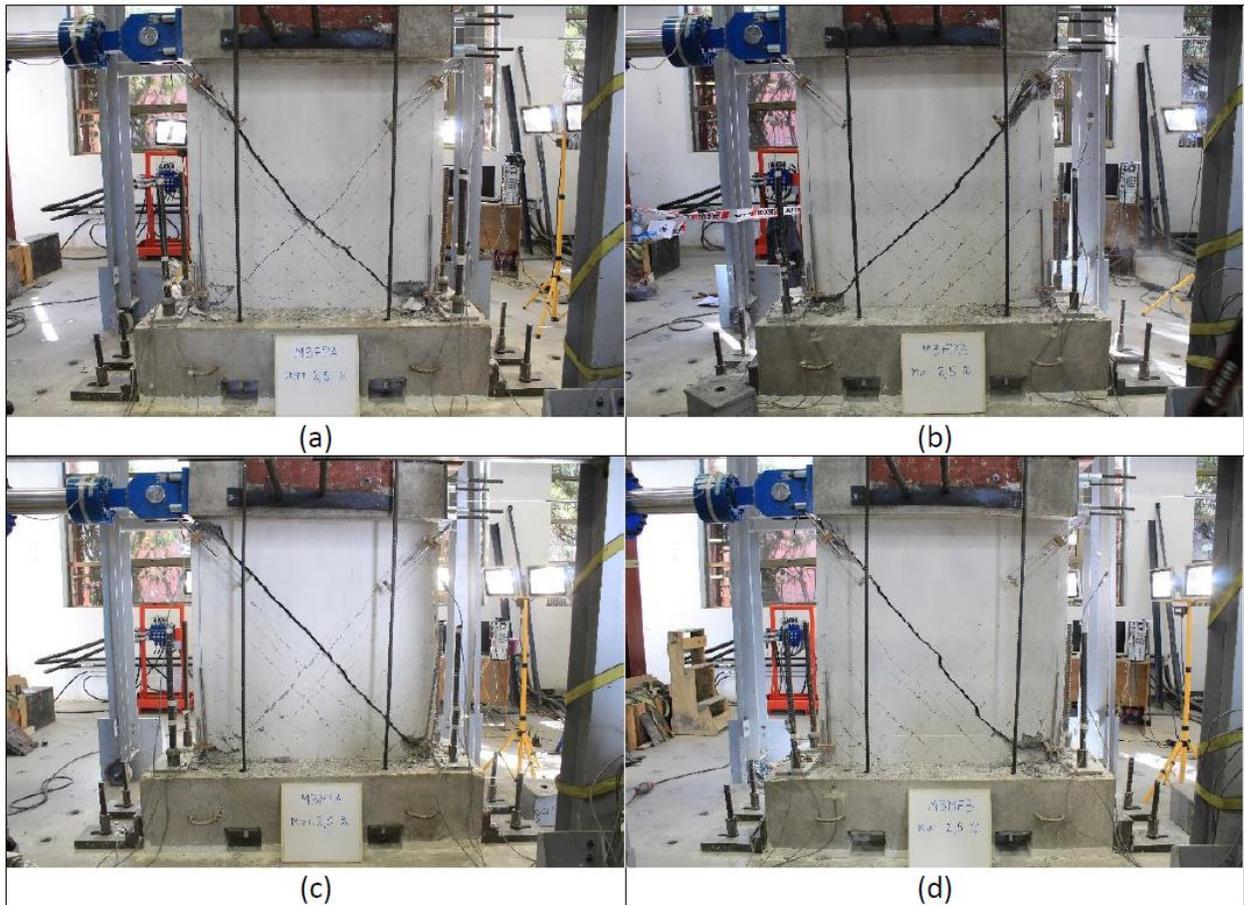


Figura 2.2. Probetas ensayadas serie M3. (a) M3FPA, (b) M3FPB, (c) M3FPA, (d) M3FPB. [3].

Respecto al corte en la diagonal de los muros (apreciable en la Figura 2.2), y en base a las mallas extraídas desde el interior del concreto (Figura 2.3), se pueden realizar ciertas observaciones en la zona de falla, las cuales se detallan en el Apéndice B.

2.1.1 Extracción mallas desde probetas M3

Para llevar a cabo el presente estudio, en primer lugar, se extraen las mallas completas desde el interior de los muros, los cuales se encontraban disponibles en las instalaciones de ACMA®. Para ello, se realizó un procedimiento invasivo para romper el hormigón, y de esta forma llegar al refuerzo de la estructura. Se contó con personal calificado de la empresa para realizar este proceso, donde la técnica constaba básicamente en ir rompiendo el hormigón con un martillo neumático, y con la ayuda de un combo en caso de ser necesario. Una vez que se lograba llegar a la malla central, se cortaban los extremos de la armadura colindante con la fundación de la probeta y con la viga de transferencia, obteniendo así, la malla central junto con los elementos de borde. Este procedimiento se realizó para las 4 configuraciones de los muros de la serie M3, resguardando que el refuerzo se mantenga lo más intacto posible. De las 4 mallas disponibles, solo fue posible rescatar 3 de éstas, debido a que una de ellas

(correspondiente al muro M3FPB de hierro preparado), resultó dañada considerablemente, por lo que no fue considerada como parte de este estudio.

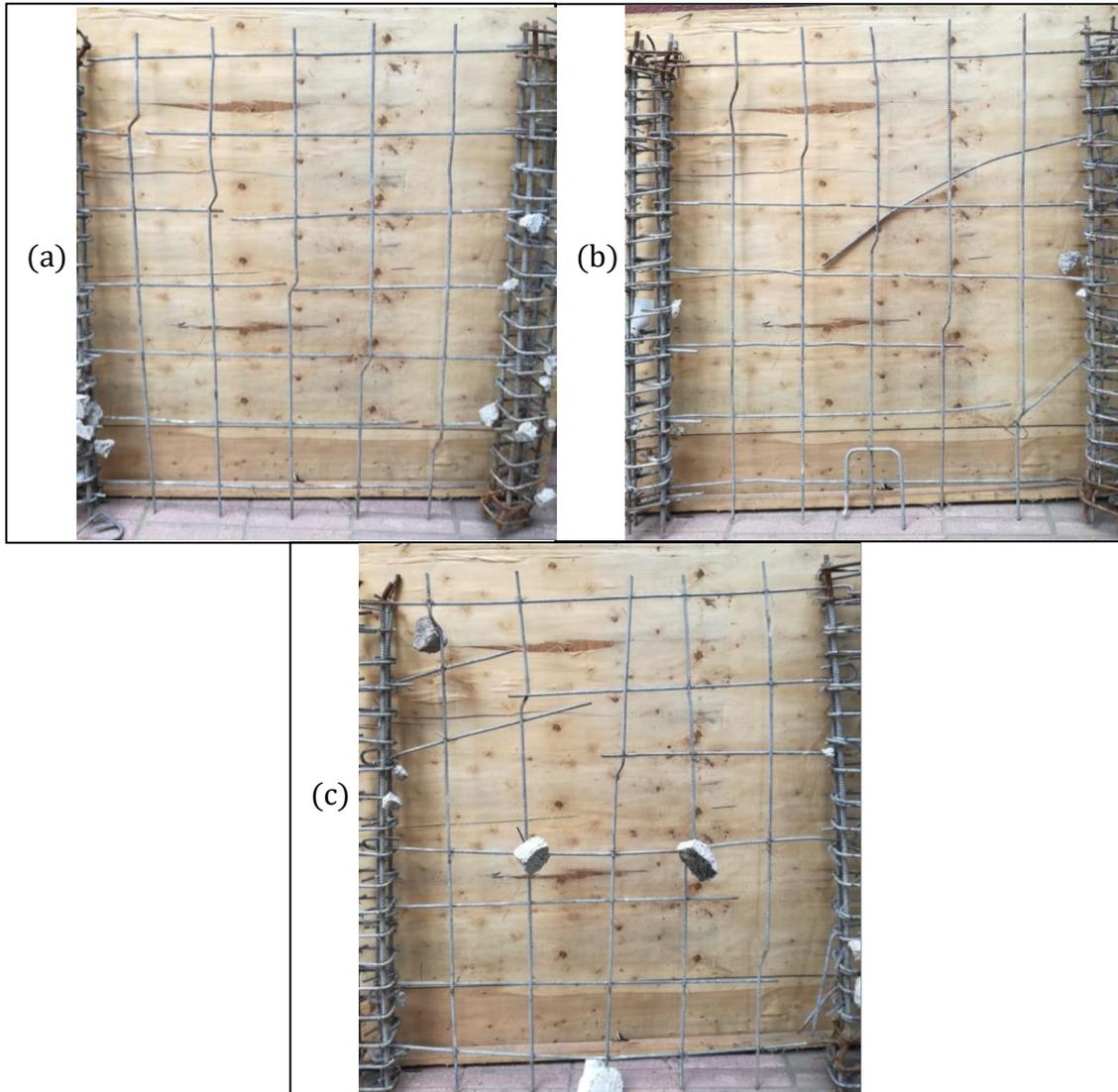


Figura 2.3. Mallas extraídas de series de muros M3. (a) Malla M3MEA, (b) Malla M3MEB, (c) Malla M3FPA

Posterior a la extracción de las mallas desde el interior del concreto que las recubre, se determina el largo de las probetas a ensayar, para así determinar la cantidad de probetas que se extraerán, y el lugar de dónde serán extraídas (según el tipo de ensayo que se quiera realizar). Ya determinado todos estos parámetros, se proceden a cortar las mallas con un disco de corte, agrupando los fierros de acuerdo con el tipo de muro al que pertenecen. En primer lugar, la malla se divide en dos cuadrantes (inferior y superior) con respecto a su falla diagonal, cortando así las barras de manera que, para la malla del muro M3MEA, el cuadrante inferior sean de estudio para fierros posicionados verticalmente, y el cuadrante superior para fierros posicionados horizontalmente, caso contrario a la selección de la orientación de las barras de la malla M3MEB (ver Figura 2.4 (a) y Figura 2.5 (a)). Finalmente se vuelve a cortar

las barras de acero (ya identificadas), para así extraer las probetas según sus determinadas características (ver Figura 2.4 (b) y Figura 2.5 (b)).

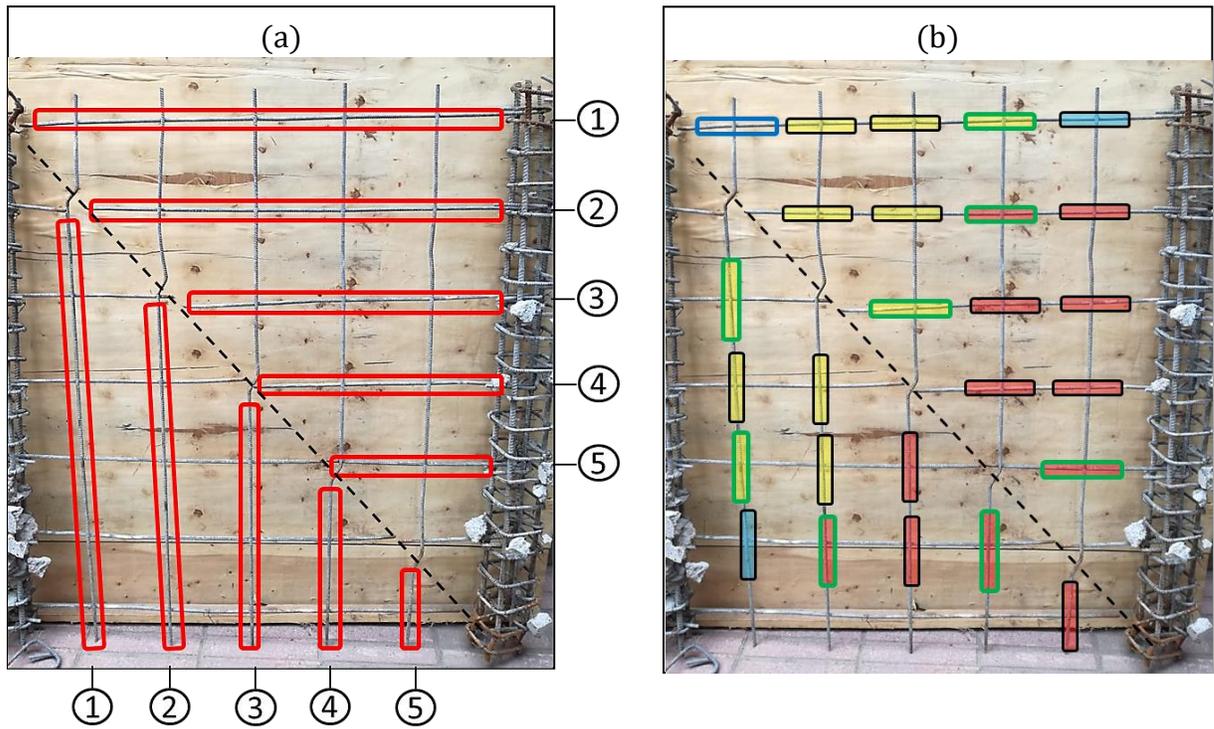


Figura 2.4. Disposición para corte de barras malla M3MEA: a) Barras según orientación; b) Probetas según parámetros.

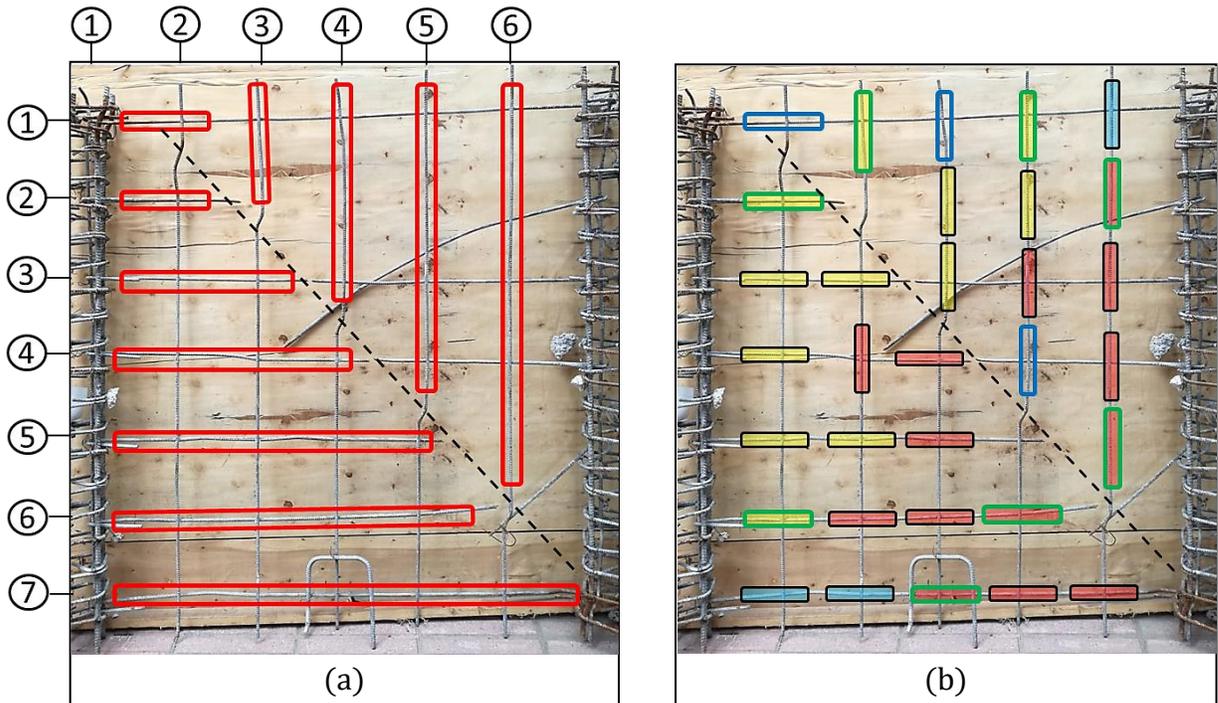


Figura 2.5. Disposición para corte de barras malla M3MEB: a) Barras según orientación; b) Probetas según parámetros.

Para tener una mayor claridad acerca de los ensayos que se realizarán para cada probeta, estas fueron esquematizadas previamente mediante sobre la malla, tal como se observa en la Figura 2.4 (b) y Figura 2.5 (b). La simbología de acuerdo con qué representa cada color dentro del mapeo se presenta en la Tabla 2.1

Tabla 2.1. Simbología para identificación de probetas según ensayo.

Simbología	Descripción
-----	Falla a corte en diagonal
	Probetas para ensayo cíclico, L/d=6
	Probetas para ensayo cíclico, L/d=12
	$\epsilon=1\%$
	$\epsilon=3\%$
	$\epsilon=5\%$

Con el fin de poder identificar las probetas según su posición dentro del mallado y según sus parámetros de ensayo, se designa una notación particular para cada una de ellas, con las cuales fueron rotuladas antes de su ensayo. La nomenclatura utilizada para describir las probetas se detalla a continuación.

$$P(H/V)(X)E(A/B)(Y) - ld(W)e(Z)$$

Dónde:

P : Probeta

(*H/V*) : Orientación de las barras (H: Horizontal, V: vertical).

(*X*) : Número barra con respecto a esquema de Figura 2.4 (a) y Figura 2.5 (a).

E : Electrosoldada

(*A/B*) : Depende a qué muro pertenece la barra (A: M3MEA, B: M3MEB).

(*Y*) : Ubicación de la barra c/r a la falla diagonal (1, 2, 3, etc., dónde 1 corresponde a la barra contigua a la falla).

(*W*) : Relación de aspecto barra (L/d=6 o 12)

(*Z*) : Amplitud de deformación a la que será sometida (1%, 3% o 5%).

Una vez que se identifican todas las barras y probetas, y se rotulan según la nomenclatura mencionada, se procede a cortar y agrupar las probetas según sus características (Figura 2.6), tomando las precauciones necesarias para dejar la cruceta del punto de soldadura intacta, quedando listas para ser ensayadas.

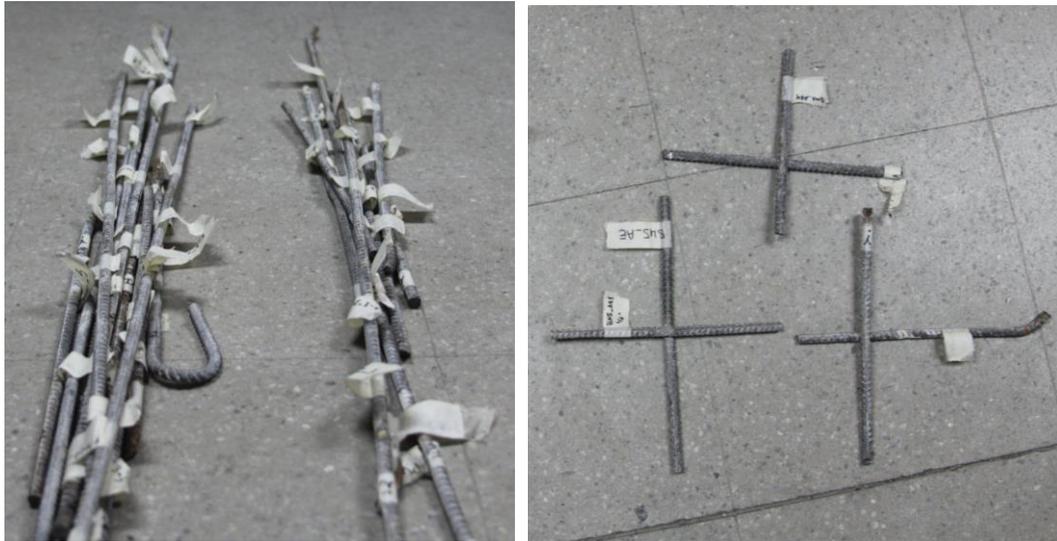


Figura 2.6. Barras agrupadas según la malla de la cual se extraen, y probetas cortadas listas para ensayar.

2.2 Comportamiento del Acero

Las barras de acero que se utilizan como elementos de refuerzo en estructuras de hormigón armado, se comportan de distinta manera según el tipo de carga a la que se esté solicitando la estructura, es decir, si la sollicitación es de tracción, de compresión, o cíclica, se van a generar distintas curvas de tensión-deformación.

Para representar el comportamiento del acero ante estos distintos tipos de carga, hay autores que proponen diversos modelos, ya sea numéricos (teóricos) o experimentales, que permiten explicar de buena manera la forma en que trabaja el acero de refuerzo.

2.2.1. Comportamiento del acero en tracción

Este tipo de comportamiento está descrito por una curva monótonica tensión-deformación que generalmente se define por medio de 4 tramos principales, donde a medida que se avanza en la curva, el acero va perdiendo su capacidad de resistir a la carga frente a amplitudes grandes de deformaciones, debido a que pasa de un comportamiento lineal a un comportamiento plástico, donde la barra ya no es capaz de volver a su longitud inicial, sino que alcanza tal grado de deformación, que es conducida la rotura.

En la Figura 2.7 es posible apreciar estos cuatro tramos principales: tramo lineal-elástico, tramo de fluencia, tramo de endurecimiento y tramo de degradación de la resistencia [4]. A continuación, se explica en que consiste cada uno de estos:

- Tramo lineal-elástico: este tramo está dado por un comportamiento lineal del acero, hasta que se alcanza el punto de fluencia. Esta recta tiene pendiente igual al módulo de elasticidad del acero E_s .
- Tramo de fluencia: aquí se observa que la tensión mantiene un valor constante hasta el inicio del endurecimiento, y que corresponde básicamente al valor de la fluencia del acero (el que cambia dependiendo la calidad del acero).
- Tramo de endurecimiento: este se desarrolla con un aumento de la tensión frente al incremento de deformaciones, llegando a un punto de tensión máxima.
- Tramo de degradación: Una vez alcanzado el punto de tensión máxima, la capacidad del acero comienza a decaer debido a grandes amplitudes de deformación, hasta llegar al punto de ruptura o punto último, donde se produce la ruptura de la barra y la caída de tensión hasta cero.

Cuando se alcanzan grandes deformaciones, se producen zonas donde existe concentración de deformaciones, debido al cambio de diámetro que sufre la barra al comenzar la degradación, por tanto, para evitar este problema se tiende a usar un valor medio de deformaciones unitarias a lo largo del ensayo experimental.

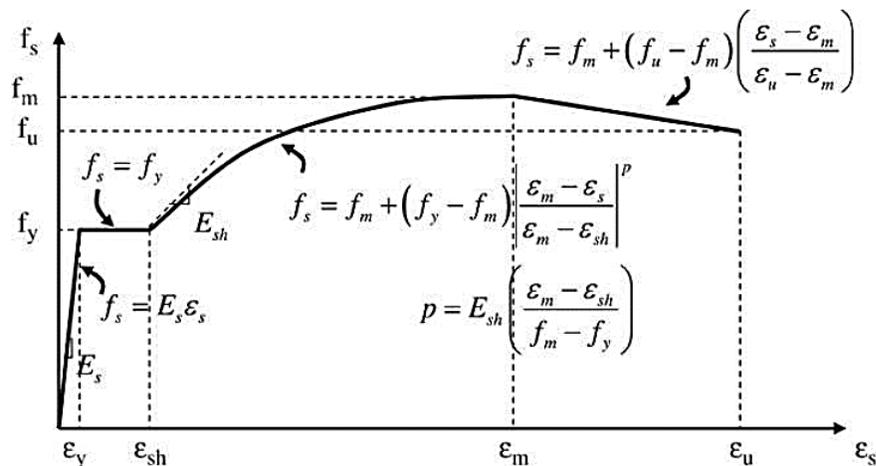


Figura 2.7. Curva tensión-deformación del acero a tracción, Massone y Moroder (2009).

2.2.2. Comportamiento del acero en compresión

Para el caso de la compresión, la curva monotónica de tensión-deformación del acero, se encuentra caracterizada por una región lineal a bajas tensiones, seguido por una corta zona de fluencia, alcanzando después una máxima tensión, y finalizando con un decaimiento de la carga. Este comportamiento descrito es similar al que experimenta el acero en tracción, a menos que exista pandeo, lo que modifica el comportamiento principalmente en las dos últimas zonas (máxima tensión y decremento de la carga), alcanzando menores valores de tensiones máximas y ruptura. Según Dodd y Restrepo (1995), esto se manifiesta al aumentar

la esbeltez de un elemento (representado por medio de la relación Largo/Diámetro de la barra) [5].

Monti y Nuti (1992), realizaron ensayos experimentales monotónicos (y cíclicos), con barras de acero que tenían distintas relaciones de aspecto de Largo/diámetro (L/d). A partir de estos ensayos obtuvieron curvas monotónicas de tensión-deformación, que seguían básicamente el mismo comportamiento descrito en el párrafo anterior. Así en la Figura 2.8, puede observarse el cómo afecta el pandeo en la compresión del acero.

A partir de los resultados de los ensayos de Monti y Nuti [6], y las curvas generadas, es posible concluir que, al ir aumentando el largo de la barra con respecto al diámetro, la tensión máxima o capacidad máxima del material va disminuyendo considerablemente debido al pandeo; mientras que para relaciones de L/d pequeñas (como por ej. $L/d=5$), la barra prácticamente no sufre pandeo, y la curva es bastante parecida a la de tracción. Además, para razones de L/d grandes (por ej. $L/d=11$), apenas se logra alcanza la fluencia, decayendo la resistencia de manera más pronta.

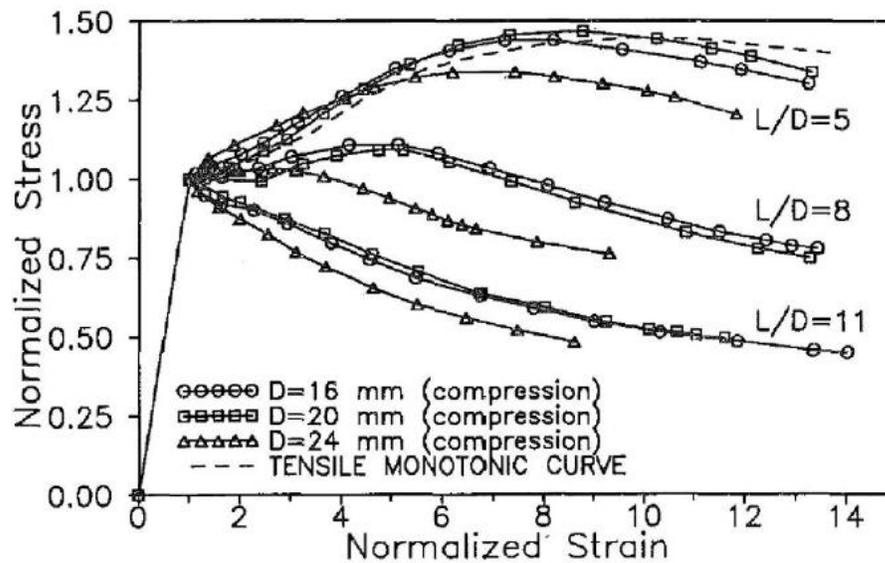


Figura 2.8. Curvas monotónicas experimentales acero a compresión, Monti y Nuti (1992).

2.2.3. Comportamiento del acero frente a cargas cíclicas

Cuando una barra de acero es sometida a cargas de tracción y luego de compresión (de manera alternada y continua en el tiempo), se va generando una envolvente, que comprende curvas de carga y descarga, que dan origen a los ciclos. Estos ciclos se pueden representar mediante gráficos de tensión-deformación, que se traducen en diagramas de histéresis tal como se muestra en la Figura 2.9.

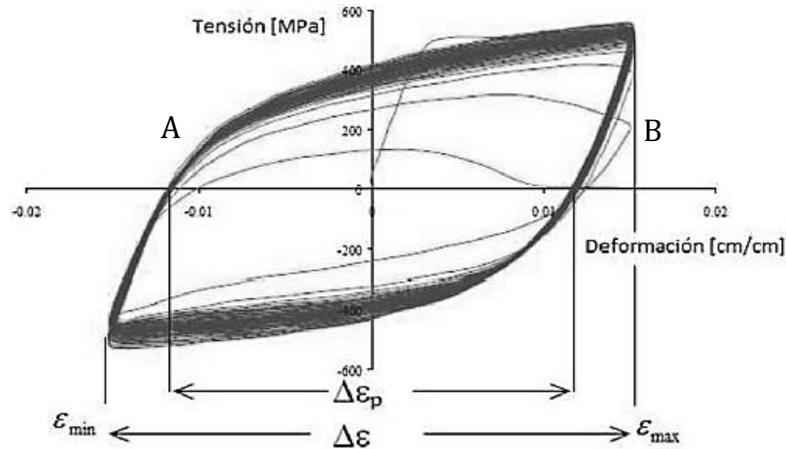


Figura 2.9. Diagrama tensión-deformación del acero bajo cargas cíclicas.

Tal como se menciona en el párrafo anterior, y como se puede observar en la Figura 2.9, estos ciclos están compuestos por curvas de carga (A) y descarga (B), que poseen máximos de tensión, y máximo de deformaciones, que van envolviendo un área correspondiente a la energía disipada por ciclo. Además, se puede apreciar que, al someter el acero a grandes deformaciones, es posible encontrar un rango plástico ϵ_p que, junto al rango elástico, conforman el rango total de deformaciones ($\Delta\epsilon$), el cual está comprendido entre una amplitud máxima (ϵ_{max}) y amplitud mínima (ϵ_{min}).

Cuando un material es sometido a progresivos ciclos de tracción-compresión, es probable que este se vaya dañando a medida que transcurre el tiempo, debido a deformaciones que pueden superar o no el límite elástico. Esto es lo que se conoce como fatiga del material, y el daño puede llegar a tal punto que se pierde la capacidad de resistencia del material, culminando finalmente en la rotura de éste.

En algunos casos, cuando deformaciones sobrepasan el límite elástico, se produce la falla ante un número reducido de ciclos, y es lo que se conoce como fatiga de bajo número de ciclos. En el apartado 2.2.4, se explica en más detalle este concepto, exponiendo algunos modelos que proponen ciertos autores con respecto al comportamiento del acero cuando éste llega a la rotura mediante cierta cantidad de ciclos, producto de la deformación o energía aplicada.

2.2.4. Fatiga del acero a bajos ciclos

La fatiga corresponde a un deterioro creciente del material sometido a cargas cíclicas, y que puede concluir con su rotura. Aquí aparece el concepto de vida a la fatiga, que se define básicamente como el número de ciclos que son necesarios para que ocurra la falla, ante una

determinada amplitud de deformación. Por lo general, el proceso de fatiga se inicia por la aparición de una grieta que se propaga y aumenta con el paso de los ciclos, hasta que el área que resiste la carga no es suficiente para soportar la concentración de tensiones, produciendo la rotura.

Este tipo de fatiga (de bajo número de ciclos), está controlada por grandes deformaciones que ocurren en regiones de comportamiento plástico, y se caracteriza porque la rotura llega ante un número pequeño de ciclos de carga (menor a 1000).

Existen diversas variables que se pueden considerar al momento de analizar la vida útil a la fatiga de un material, tales como la amplitud de deformación (total o plástica), la energía disipada, si la barra de acero está o no sujeta a pandeo, entre otras, que constituyen la base de distintos modelos analíticos y experimentales planteados en literatura, los cuales son explicados a continuación.

Modelo de Coffin y Manson (1954)

Este modelo está basado en la amplitud de deformación plástica, suponiendo que la deformación total experimentada en un ciclo de carga y descarga, se compone de un rango elástico y un rango plástico [7] y [8], tal como muestra la Figura 2.10.

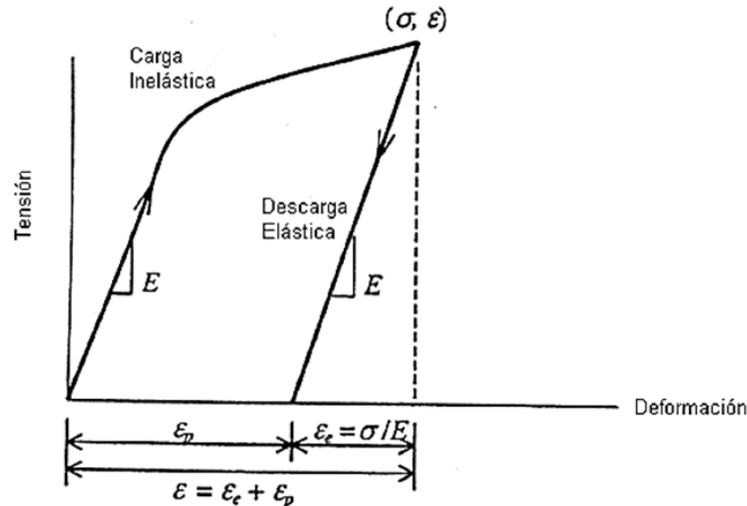


Figura 2.10. Representación de las deformaciones plásticas y elásticas.

Del gráfico anterior, es posible extraer la siguiente relación:

$$\epsilon = \epsilon_{elástica} + \epsilon_{plástica} = \frac{\sigma}{E} + \epsilon_{plástica} \quad (1)$$

Ante amplitudes grandes de deformación, se tiene que predominan las deformaciones plásticas, las que se pueden relacionar con el número de ciclos a la rotura, mediante la relación exponencial de la ecuación (2).

$$\varepsilon_p = C_f (2N_f)^{-\alpha} \quad (2)$$

En esta expresión, C_f y α son constantes del material, $2N_f$ corresponde al número de ciclos a la rotura, y ε_p es la amplitud de deformación plástica.

Modelo Koh y Stephens (1991)

Koh y Stephens [9] logran establecer una relación entre la amplitud de deformación total con el número de ciclos a la rotura, obtenida a partir de ensayos experimentales en barras de acero de alta resistencia ASTM A723. Esta relación, al igual que el modelo de Coffin y Manson, se hace válida para una amplitud de deformaciones constante.

En la siguiente figura, se puede observar un esquema del planteamiento propuesto por Koh y Stephens, donde en eje horizontal se muestra el número de ciclos, y en el eje vertical la amplitud de deformaciones.

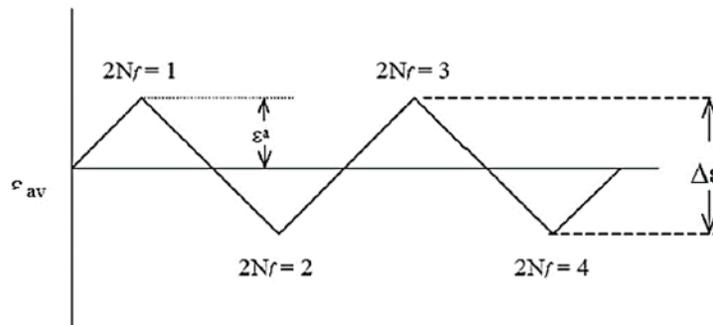


Figura 2.11. Amplitud de deformación constante, Koh y Stephens (1991)

En términos numéricos, el modelo propuesto se expresa según la ecuación (3)

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = M(2N_f)^m \quad (3)$$

Dónde:

ε_a : Amplitud total de deformación unitaria

$\Delta\varepsilon$: Diferencia entre amplitud máxima y mínima, $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}$

M, m: Constantes del material

$2N_f$: Número de ciclos a la rotura

Al llevar la expresión de la ecuación (3) a un gráfico de escala log-log, se obtiene un esquema como el de la Figura 2.12, donde la relación entre la amplitud de deformaciones y los ciclos a la rotura es lineal. De esta manera, las constantes m y M , quedan dadas por la pendiente de la recta, y por el punto de intersección de la recta con el eje vertical, respectivamente.

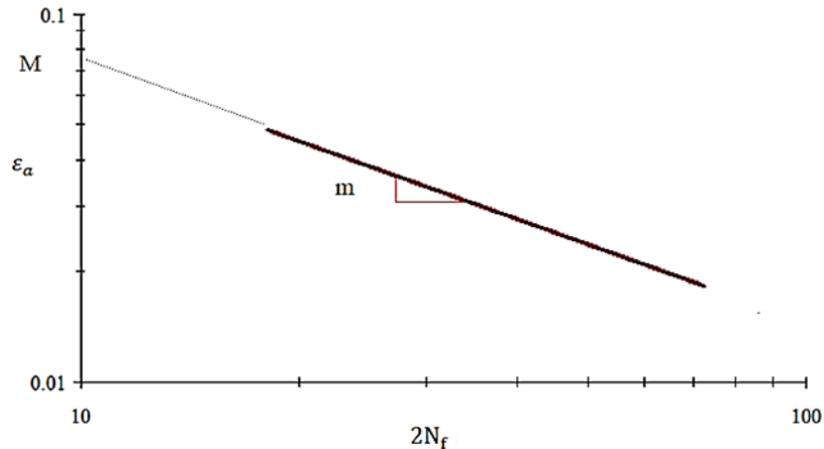


Figura 2.12. Esquema gráfico con parámetros del modelo de Koh y Stephens. Ver Pablo Herrera T (2014)

Modelos basados en energía

Otra forma de describir la fatiga de un material, es por medio de la energía que se disipa en el proceso que conlleva a la rotura del material. Existen modelos que relacionan la amplitud de deformación con la energía total disipada hasta la falla del material. Brown y Kunnath (2004) trabajaron con este tipo de modelos, que se pueden expresar como sigue:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = M(2W_f)^m \quad (4)$$

Dónde:

ε_a : Amplitud total de deformación unitaria

$\Delta\varepsilon$: Diferencia entre amplitud máxima y mínima, $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}$

M, m : Constantes del material

W_f : Energía disipada hasta la rotura.

Trabajo experimental de Brown y Kunnath

Brown y Kunnath [10] realizaron estudios experimentales acerca del comportamiento del acero sometido a fatiga para bajo número de ciclos. Para ello, utilizaron barras de refuerzo tipo #6, #7, #8 y #9, correspondientes a diámetro 19.1 mm, 22.2 mm, 25.4 mm y 28.65 mm, respectivamente. Para dichos ensayos consideraron una relación de aspecto de la barra de

$L/d=6$ (para restringir el pandeo), y deformaciones unitarias constantes que iban desde 0,015 hasta 0,03.

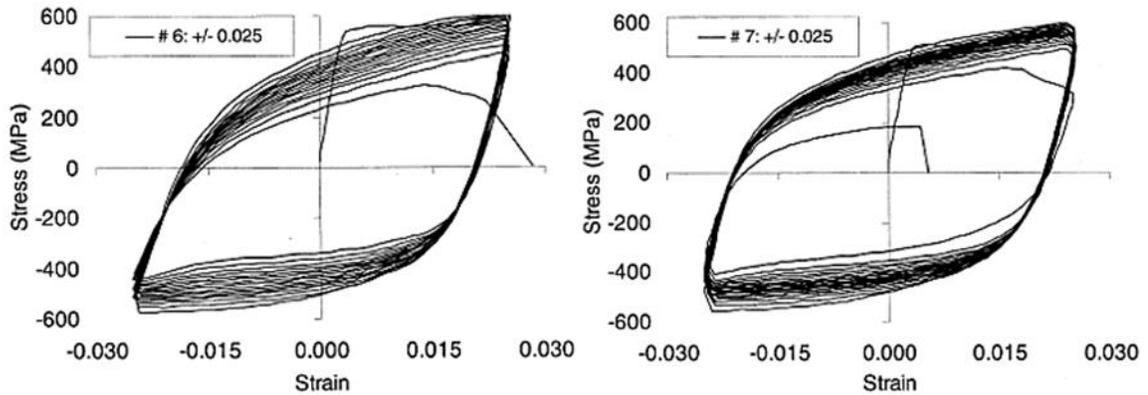


Figura 2.13. Curvas tensión-deformación de probetas #6 y #7 a deformación constante de 2,5%, Brown y Kunnath (2004)

Como es posible observar en las curvas tensión-deformación de la Figura 2.13, los comportamiento a tracción y a compresión son similares, esto debido a que se restringe el pandeo utilizando una relación de aspecto L/d baja, lo que evita pérdidas de capacidad en la parte de compresión. A esto se suma que, a medida que transcurren los ciclos, la capacidad máxima en tracción y compresión, va disminuyendo (debido a la fatiga del material y el daño que se acumula) hasta llegar a la rotura.

Extendiendo el ensayo experimental de Brown y Kunnath a los trabajos realizados por Koh y Stephens acerca de la relación entre los ciclos a la rotura y la amplitud de deformación total, se puede obtener una curva como la de la Figura 2.14, para distintos diámetros de barra.

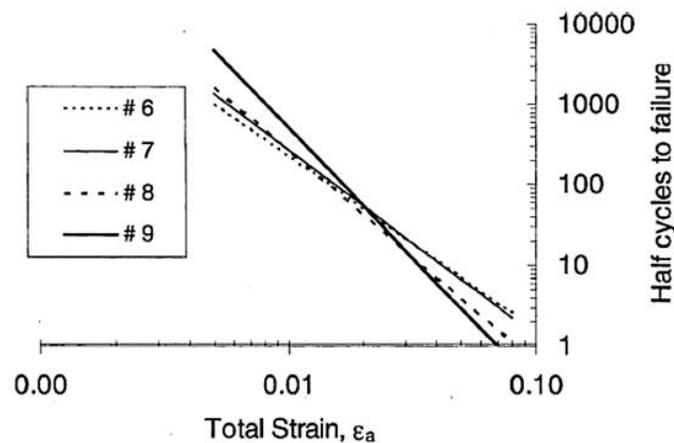


Figura 2.14. Curvas de vida a la fatiga obtenidas por Brown y Kunnath (2004) a partir del modelo de Koh y Stephens.

De este último gráfico, Brown y Kunnath (2004) concluyeron que, a mayor diámetro, la vida a la fatiga era mayor (material necesita una mayor cantidad de ciclos para llegar a la rotura) para deformaciones pequeñas. Sucede al revés con las barras de menor diámetro, que tienen una mayor vida a la fatiga para amplitud de deformaciones más grandes (por sobre el 0,02 aproximadamente).

Monti y Nuti (1992)

A diferencia de los modelos vistos anteriormente que no consideran el efecto del pandeo en la respuesta de las probetas, Monti y Nuti (1992), estudiaron experimentalmente fatiga del acero de refuerzo para bajo número de ciclos [6]. Además de los ensayos monotónicos realizados por estos autores (mencionados en 2.2.2), también realizaron ensayos cíclicos, considerando probetas con relaciones de $L/d=5, 8$ y 11 , donde se obtuvieron las curvas que se observan en la Figura 2.15.

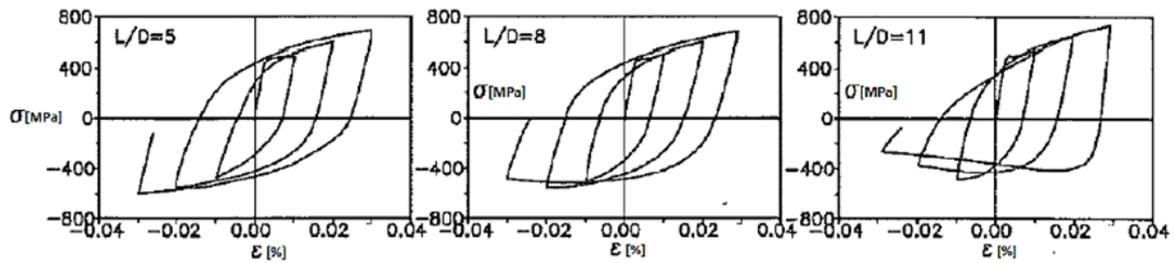


Figura 2.15. Curvas cíclicas de tensión-deformación, Monti y Nuti (1992)

En cuanto al comportamiento cíclico, concluyeron que, a medida que aumenta la relación L/d , la respuesta en compresión se ve afectada, donde se observa una degradación de la compresión debido al pandeo, mientras que éste último, no afecta en gran medida la respuesta a tracción. Asimismo, dan cuenta que la pendiente inicial en la fase de carga disminuye a medida que crece la razón L/d , no así la fase de descarga, que no sufre variaciones.

Una extensión al trabajo experimental de Brown y Kunnath, fue realizada por la estudiante Begoña Hamasaki [11] el año 2013, donde realizó ensayos experimentales sobre barras tradicionales de acero calidad A630-420H, de diámetro 8 y 16 [mm], utilizando razones de $L/d=6, 8, 12, 16, 20$ y 28 , con el fin de obtener curvas de vida a la fatiga para distintas configuraciones. A partir de sus resultados, se puede observar el comportamiento para barras de $\Phi 8$ con razón de $L/d=6, L/d=8$ y $L/d=12$, donde las últimas presentan una curva con tendencia a disminuir el número de ciclos con respecto a las del primer grupo, siendo las barras correspondientes a $L/d=8$ que presentan un comportamiento con tendencia intermedia a las otras relaciones de aspecto. Los gráficos de la Figura 2.16 logran plasmar esta diferencia de vida a la fatiga del material, según su relación de aspecto, donde se observa que decae a medida que aumenta la relación de aspecto.

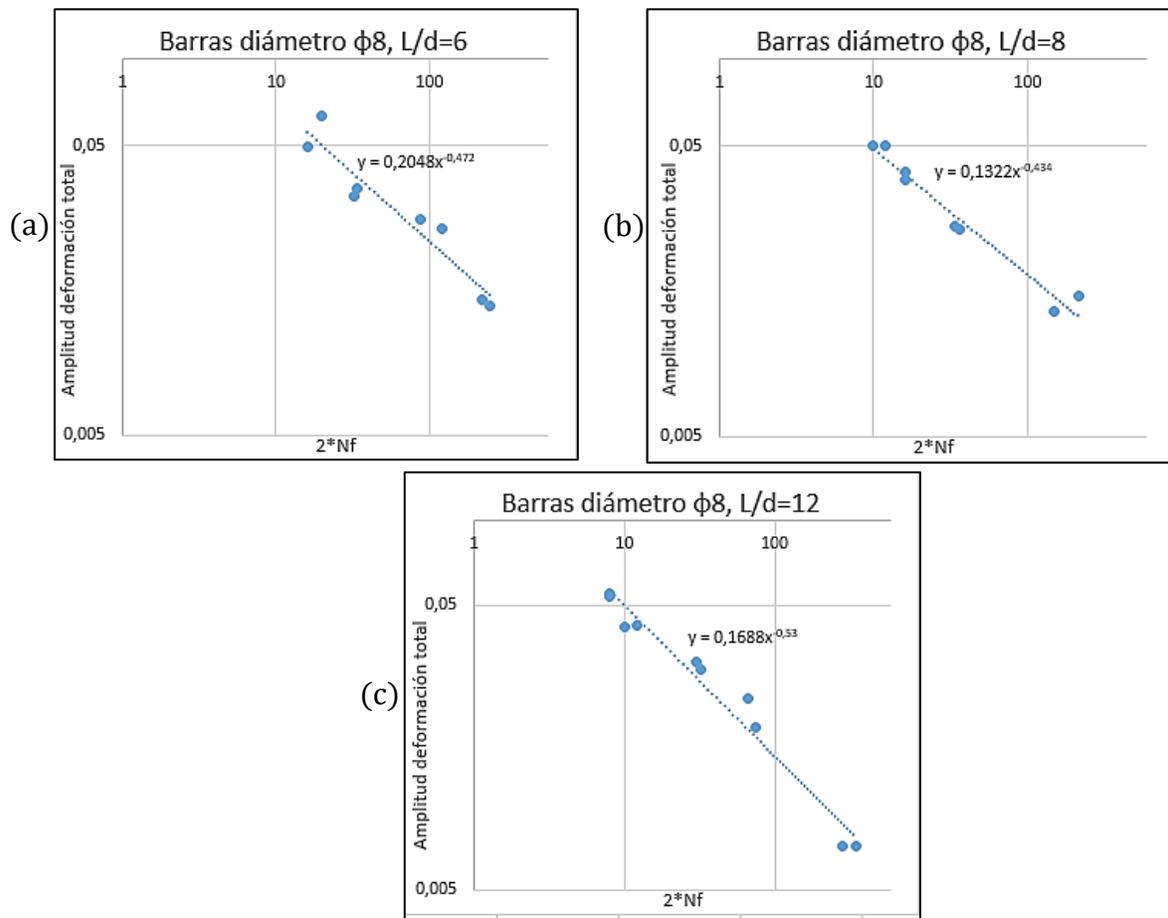


Figura 2.16. Resultados de curvas de vida a la fatiga para barras $\phi 8$: (a) $L/d=6$, (b) $L/d=8$, (c) $L/d=12$. Ver Begoña Hamasaki (2013)

2.3 Soldabilidad en el acero

La soldadura, es el proceso mediante el cual se realiza la unión de dos o más piezas de un material (por lo general metales o termoplásticos), mediante un proceso de fusión localizado. Al momento de llevar a cabo una soldadura, esta puede ser con material de aporte, en donde la unión de las piezas se realiza con el mismo material del metal base de las partes que están siendo soldadas; o sin material de aporte, donde las piezas se unen sin la necesidad de un material adicional entre las piezas.

En la práctica, existen diversas técnicas para soldar, tales como a soldadura por gas, la soldadura fuerte y blanda, la soldadura por arco eléctrico, soldadura por rayo de energía, soldadura de estado sólido, soldadura por resistencia eléctrica, entre otras, siendo esta última de especial interés para el estudio de este trabajo, debido a que las mallas electro soldadas están fabricadas con dicho tipo de soldadura, donde la unión se produce por generación de calor al atravesar la corriente eléctrica por las superficies de las barras de

acero, formándose pequeños charcos de metal fundido en los puntos donde se entrelazan las barras horizontales con las verticales.

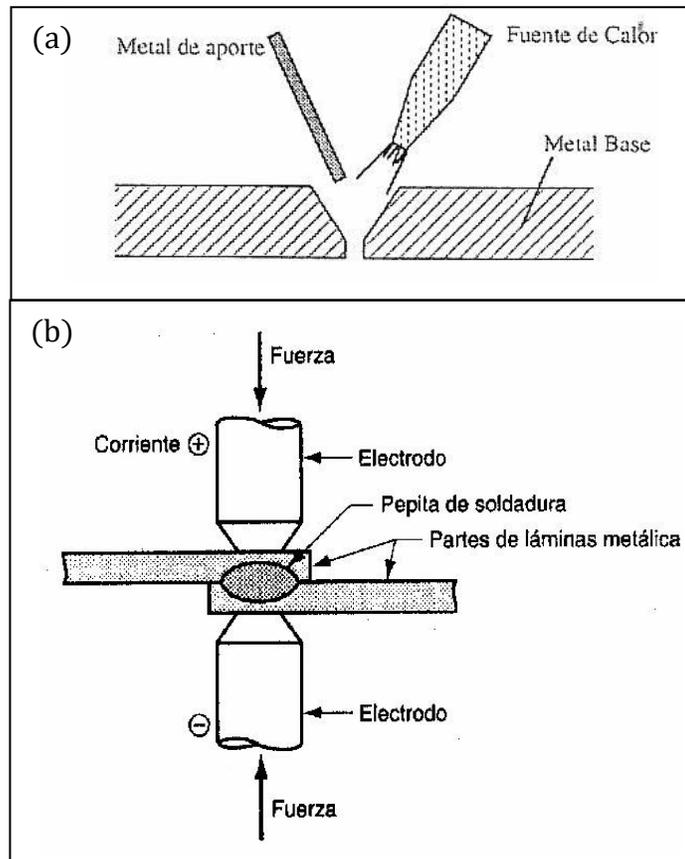


Figura 2.17. (a) Soldadura con material de aporte; (b) Soldadura sin material de aporte

Pero, no todos los aceros cuentan con la capacidad de ser soldables, sino que depende de una serie de factores, tales como la composición química de éste, cómo de las propiedades de dureza y templabilidad de la ZAT (Zona Afectada Térmicamente). Por tanto, se introduce el concepto de soldabilidad del acero, que describe en qué medida el metal base puede ser unido a otra pieza del mismo material, sin ver afectada sus propiedades (resistencia, ductilidad, anticorrosión, etc.) por la soldadura.

La ZAT, tal como se menciona en el párrafo anterior, es la zona afectada térmicamente, y corresponde a la región adyacente a la zona de soldadura, donde el material base no alcanza a fundir, pero sus propiedades cambian por el calor inducido en la junta soldada. En esta zona, generalmente se producen fisuras producto de los ciclos térmicos en el proceso de soldadura.

La dureza del acero, se entiende como la resistencia que opone este material, para resistir deformaciones (elásticas, plásticas, o rotura), producto de la acción de esfuerzos de

contacto originados por otro cuerpo más duro, el cual no debiese sufrir ningún tipo de alteración. Por otro lado, la templabilidad, es una propiedad del acero que se relaciona con la propensión de éste a endurecer bajos ciertas condiciones de enfriamiento. Esta propiedad, también depende de la composición química del acero, donde a mayor cantidad de carbono y otros elementos de aleación, la templabilidad es mayor (acero de mayor dureza), derivando en una menor soldabilidad.

Aquí, es de importancia introducir el concepto de Carbono Equivalente (CE), que representa la cantidad de carbono y aleaciones del acero en su composición química, y es uno de los indicativos a considerar para saber qué tan soldable es un acero. Existen diversas fórmulas para cuantificarlo. Una de estas es la que propone la norma ASTM A706 “Barras de acero de baja aleación, deformadas y lisas, para refuerzos de hormigón” en su punto 6.4:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cu}{40} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10} \quad (5)$$

Por otro lado, el Código API 1104 propone la expresión desarrollada por el International Institute of Welding (IIW) en 1967, que es la misma fórmula utilizada en la NCh203 Of 2006: Acero para uso estructural – Requisitos, donde el CE queda determinado por:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15} \quad (6)$$

Para tener un acero con soldabilidad garantizada, las normas establecen cierto límite para el valor del carbono equivalente. El límite fijado para establecer la soldabilidad de las barras de refuerzo es de 0.55 para la expresión (5), mientras que para la expresión (6) el límite establecido es de 0.5, según las normas respectivas que la formulan. Bajo estos límites, se dice que las barras presentan soldabilidad garantizada.

Las barras de acero utilizadas para construir las mallas de refuerzo electrosoldadas de la serie de muros M3, presentan soldabilidad garantizada, y cumplen con los requisitos de la NCh 204 Of. 2006: Acero Barras laminadas en caliente para hormigón armado, NCh3334:2014 Acero Barras laminadas en caliente soldables para hormigón armado, y la ASTM A706 – Especificación Normalizada para Barras de Acero de Baja Aleación Lisas y Corrugadas para Refuerzo de Concreto, además de estar certificadas por el Organismo Certificador IDIEM de la Universidad de Chile.

2.4 Fotogrametría

La fotogrametría, es una técnica cuyo objetivo principal es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones, y posición en el espacio, de un objeto cualquiera, utilizando básicamente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto.

El RGB (de su sigla en inglés Red, Green, Blue) es un modelo cromático que consiste en la representación de distintos colores a partir de la mezcla de los tres colores de luz primarios (rojo, verde y azul). Aquí, cada píxel que compone una imagen está representado por un valor numérico, comprendido dentro de un rango de valores que caracterizan el color asociado a dicho píxel.

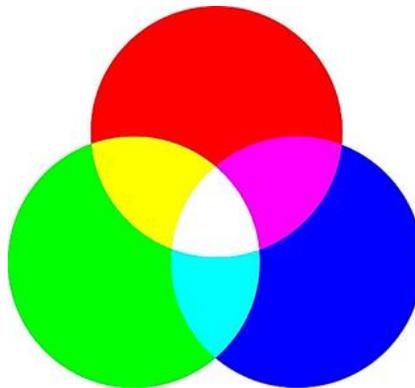


Figura 2.18. Modelo cromático RGB.

Por tanto, el modelo RGB aplicado a fotogrametría, consiste en el seguimiento de un objeto o punto objetivo que posee un determinado color, donde mediante el procesamiento de una secuencia de fotos y la aplicación de un filtro adecuado de la gama de colores requerida, es posible determinar diversos parámetros de utilidad de la dinámica de dicho objeto.

El filtro de colores, es posible realizarlo debido a que cada color posee un rango de valores que lo caracterizan, así la gama completa de colores se puede obtener a partir de la mezcla de los tres colores primarios de la luz, es decir, una combinación de rojo, verde y azul, tal como se representa el modelo cromático RGB. De esta manera, en lenguajes de programación como MATLAB, los colores son determinados por una combinación de colores primarios donde el aporte de cada uno de estos se representa por medio valores enteros que van en rangos de 0 a 255, donde 0 indica que el color primario en cuestión tiene aporte nulo en la mezcla, mientras que 255 señala que dicho color primario aporta en un 100%.

Tabla 2.2. Valores en combinación de colores.

Color	R	G	B	Representación
Blanco	255	255	255	[255,255,255]
Negro	0	0	0	[0,0,0]
Rojo	255	0	0	[255,0,0]
Verde	0	255	0	[0,255,0]
Azul	0	0	255	[0,0,255]
Amarillo	255	255	0	[255,255,0]
Cian	0	255	255	[0,255,255]
Magenta	255	0	255	[255,0,255]

Para realizar este proceso de seguimiento mediante fotos, en primer lugar, es necesario instalar una cámara fotográfica fija que permita capturar las imágenes que serán analizadas y a partir de cuales se puede obtener los parámetros requeridos, que en el caso de este estudio, son deformaciones de una barra de acero sometida a cargas cíclicas en distintos niveles de deformación (la descripción del montaje experimental se explicita en la sección 3.2 del Capítulo 3). En segundo lugar, se determina un objetivo a seguir, el cual tiene que estar dentro del ángulo focal de la cámara, y debe tener un color particular para poder realizar el posterior filtro. Finalmente se realiza el procesamiento de datos mediante el software matemático MATLAB.

La estructura básica de datos de MATLAB® es el arreglo, el cual es un conjunto ordenado de elementos reales o complejos. Las imágenes, son conjuntos ordenados de color o de datos de intensidad con valores reales, por lo que el arreglo está indicado de manera natural para representación de imágenes. La mayoría de las imágenes se representa por medio de matrices de dos dimensiones, donde cada elemento de la matriz corresponde a un único píxel de la imagen. En particular, las imágenes RGB, precisan de un arreglo tridimensional, donde el primer plano de la tercera dimensión representa la intensidad de los píxeles rojos, el segundo plano representa la intensidad de los píxeles verdes y el tercer plano representa la intensidad de los píxeles azules.

Por ejemplo, una imagen que está compuesta por $N \times M$ píxeles, se puede trabajar como una matriz de $N \times M$ elementos en caso de ser una imagen en B/N (escala de grises), o bien, como tres matrices de $N \times M$ elementos en caso de ser una imagen RGB, donde cada una de estas matrices representa el valor de un tono de color (ver Figura 2.19).

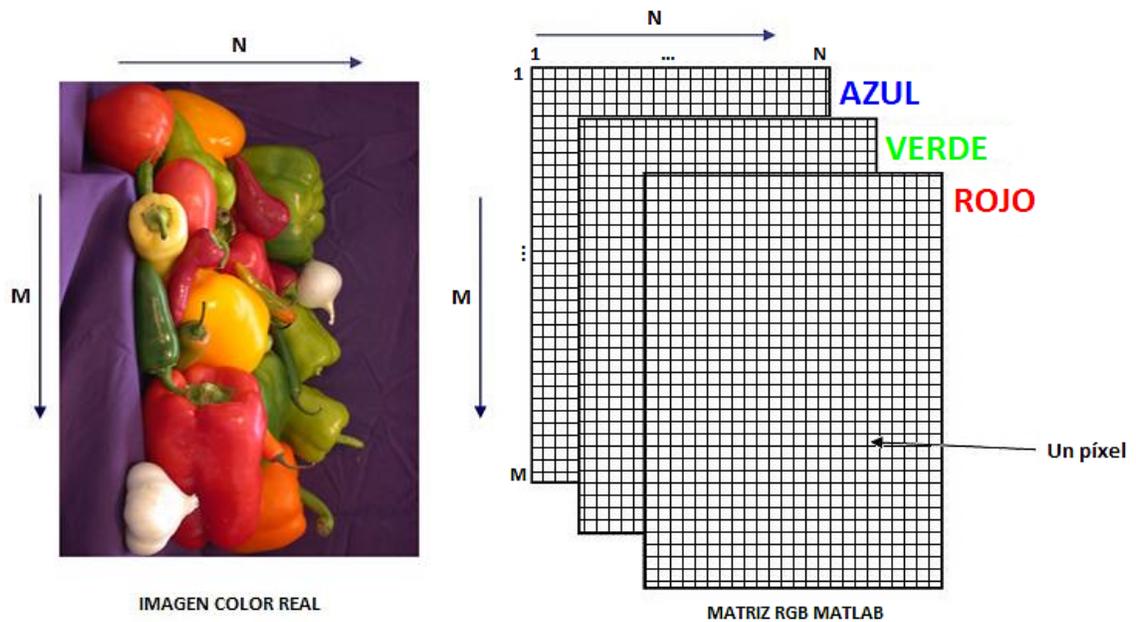


Figura 2.19. Imagen color real y representación matricial de modelo RGB en MATLAB.

Para poder leer las imágenes, existe una serie de comandos de la *caja de herramientas* de MATLAB. Una vez importada la imagen, es posible leer cada elemento (o píxel) como una doble coordenada dentro de la matriz. La primera componente de esta coordenada, se representa como $[X,Y]$, dónde X e Y corresponde a la fila y columna, respectivamente, de la posición del píxel asociado a la matriz de imagen, mientras que la segunda componente se expresa como $[R,G,B]$, donde R, G y B, corresponde a los valores de la intensidad de colores rojo, verde y azul, respectivamente, de dicho píxel (ver Figura 2.20). Cabe notar que el origen de las coordenadas (X,Y), se encuentra ubicado en la esquina superior izquierda de la imagen.

El seguimiento del punto objetivo se realiza analizando imagen por imagen, tomando como punto de referencia la fotografía inicial, antes de que el objeto, en este caso la barra, sea sometida a ciclos de carga bajo condiciones de amplitud de deformación controlada. Por tanto, mediante un código (ver Apéndice B), se realiza el filtro de colores por cada imagen, viendo cómo se desplaza el punto objetivo a través del tiempo en la secuencia de fotos.

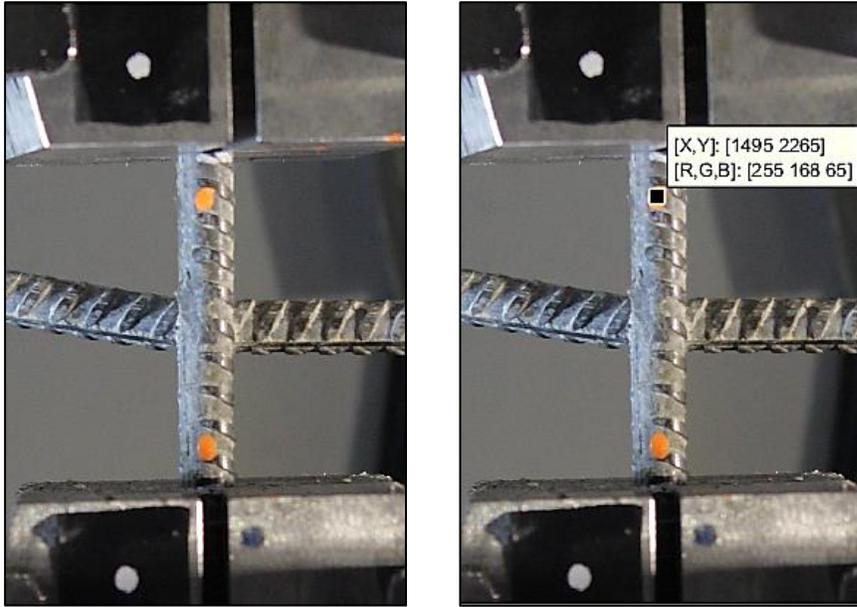


Figura 2.20. Imagen real y sus coordenadas como modelo RGB.

Capítulo 3

Ensayos experimentales

3.1 Metodología

Para determinar la pérdida de capacidad que sufrieron las barras de acero proveniente de las mallas electrosoldadas que reforzaban los muros M3 descritos en 2.1, se realizan distintos tipos de ensayos experimentales sobre probetas obtenidas directamente de las mallas, las que se extraen por medio del procedimiento señalado en 2.1.1.

Las probetas extraídas corresponden a barras de acero de calidad A630-420HS (soldables), todas de diámetro $\phi 8$ (8mm). Estas se obtienen de distintas zonas del mallado, por ejemplo, de zonas que están cerca de dónde falló el refuerzo (en la diagonal), y de zonas que se encuentran más lejos de dicha falla.

En general, se realizan ensayos cíclicos, donde se lleva el material a la rotura por medio de la fatiga, utilizando relaciones de aspecto de $L/d=6$ y $L/d=12$. Este tipo de ensayos, son realizados a deformación controlada, con valores que varían entre 1%, 3% y 5%.

Los ensayos mencionados en el párrafo anterior, se llevan a cabo mediante la Máquina Universal Instron modelo 600LX de 60 toneladas (Figura 3.1) que se ubica en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Esta máquina, consta de mordazas hidráulicas de capacidad nominal de 30 toneladas, que según se requiera, pueden ser instaladas a tracción o a compresión.

La máquina universal, entrega valores de carga y desplazamiento como output (datos de salida). Sin embargo, estos últimos, no son valores reales, dado que se considera la deformación experimentada por todo el sistema (incluyendo las mordazas). Para solucionar este problema, se agrega al montaje experimental, un extensómetro, de manera de medir las deformaciones de forma más precisa, y una cámara de alta resolución, para que mediante el proceso de fotogrametría se pueda corregir los valores considerando solo la deformación de la probeta y no del sistema completo.



Figura 3.1. Máquina Universal Instron 600LX

Para asegurarse de que la probeta quede empotrada de manera firme, se recomienda que ésta tenga una longitud de empotramiento de 7,5 cm, es decir, que cada extremo de la probeta quede inserto en esa longitud dentro de la mordaza. Si bien es lo recomendable, por temas prácticos cómo se verá más adelante, esta longitud puede variar, incluso llegando a ser menor que el valor indicado.

Los valores de carga y desplazamiento entregados por la máquina están en unidades de voltaje, por tanto, es necesario que los datos de salida se multipliquen por constantes de calibración, para así poder trabajar en las unidades deseadas (generalmente se utiliza “kg-f” y “mm” para datos correspondientes a fuerza y desplazamiento respectivamente).

Cabe mencionar, que antes de realizar los ensayos definitivos, se realizan una serie de ensayos de prueba (ver sección 3.4) para verificar que la máquina esté funcionando correctamente, además de ver los posibles errores en el proceso y corregirlos para que posteriormente se hagan los procedimientos adecuados. Estos ensayos de prueba, también sirve para ir codificando el programa de lectura de datos, con el fin de que al momento de realizar los definitivos, ya se tenga una base y se replique el mismo procedimiento.

3.2 Montaje experimental

De manera general, el montaje experimental consiste en: una máquina universal, un extensómetro para medir datos directos del desplazamiento de la probeta, una cámara fotográfica, focos de iluminación para mejor visibilidad de las fotos, y un telón blanco de fondo para evitar problemas de contraste en el procedimiento de fotogrametría. En la Figura 3.2 se muestra la configuración descrita.

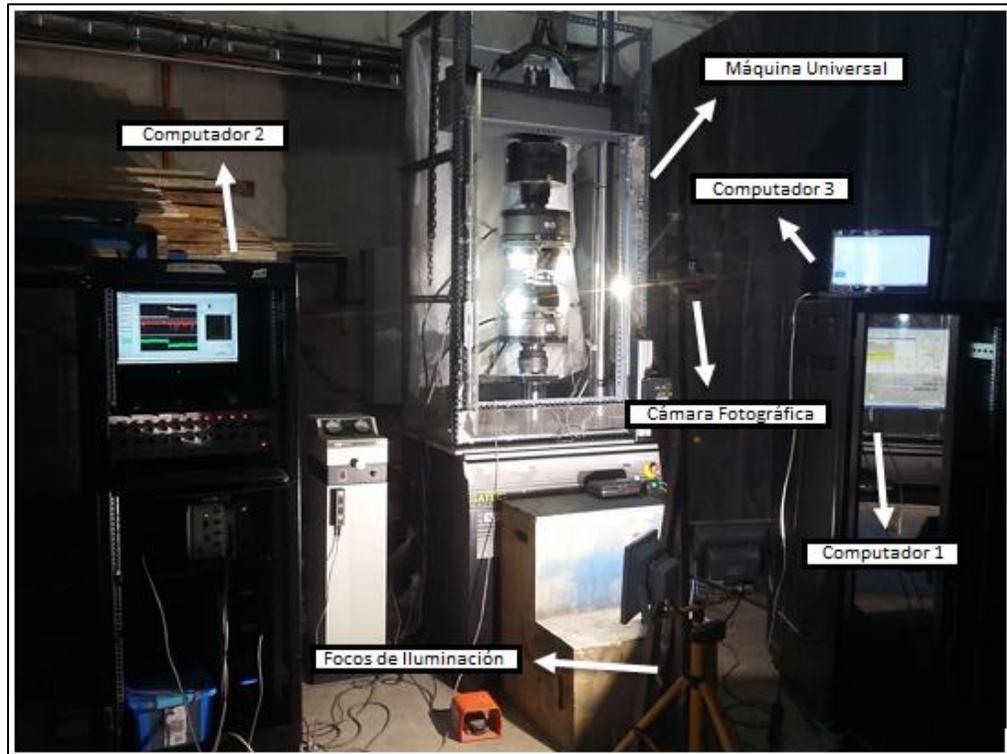


Figura 3.2. Montaje Experimental

Cómo bien ya se había mencionado, la máquina encargada de entregar los datos de carga y desplazamiento corresponde a la Máquina Universal ubicada en el departamento de Ingeniería Civil. Ésta, consta de dos mordazas, una superior y una inferior. La primera, se encuentra completamente inmóvil, mientras que la segunda, está conectada a un pistón hidráulico, que permite ajustar las probetas según el largo libre que se requiera, además de alargarlas o comprimir las según sea el ensayo deseado (tracción o cíclico).

La máquina universal, es controlada mediante un software (Partner), el cual posee distintas rutinas predefinidas que permiten ingresar los *inputs* (datos de entrada) dependiendo del tipo de ensayo al cual se somete la probeta, es decir, si éste es de tracción o cíclico. Este programa es manejado mediante un computador (Computador 1), que envía señales directamente a la máquina para que entre en funcionamiento.

Por otro lado, el Computador 2, es el que recibe las señales de desplazamiento y carga asociadas a la máquina, además de registrar los desplazamientos provenientes del extensómetro.

Finalmente, el Computador 3, es el que almacena los datos correspondientes al proceso de fotogrametría, por medio del programa DSLR Remote Pro, que permite a la cámara fotográfica capturar imágenes cada cierta cantidad de tiempo (Time Lapse), guardando los datos directamente en el disco duro del equipo.

A continuación, se describen en más detalles las distintas partes que conforman el montaje experimental:

Extensómetro

El extensómetro, es un sensor que capta los desplazamientos que sufre la probeta en su dirección axial producto de la acción de fuerzas externas. Para la realización de los ensayos, se utiliza un extensómetro modelo 3542-025M-020, de longitud calibrada de 25 [mm], con un recorrido de ± 5 [mm]. El registro de los datos que proporciona este sensor, es controlado mediante un software llamado LabView, el cual se controla con el Computador 2.



Figura 3.3. Extensómetro axial modelo 3542. (Imagen referencial)

Cámara fotográfica

La cámara que se utiliza para el procedimiento de fotogrametría, es una Canon EOS Rebel T6 de 18 megapíxeles, con un lente focal añadido de 18-135mm, y se instala de tal manera que esté ubicada al mismo nivel que la probeta, de tal forma que al momento de capturar la imagen, abarque la barra en su totalidad, además de incluir las mordazas superior e inferior dentro del campo focal, teniendo en consideración que la mordaza inferior es la que se desplaza durante el ensayo. Para tomar las imágenes, la cámara se conecta directamente a un computador (computador 3), y es controlada por medio de un software llamado DSLR Remote Pro Multi-Camera, que permite captar las imágenes cada cierta cantidad de tiempo, y guardarlas en un formato de alta calidad (CR2).

En la Figura 3.4, se muestra un esquema del montaje de la cámara fotográfica, y de cómo se posiciona ésta con respecto a la Máquina Universal, indicando a modo general, que la distancia entre la cámara y el objeto (D_o) se mantiene constante y es la misma para todos los ensayos que se realizan, al igual que la altura de la cámara (h_c), la cual se demarca con un plumón en la plataforma dónde ésta se fija, para que así, quede en todo momento a la altura de la probeta, y el foco no cambie de un ensayo a otro.

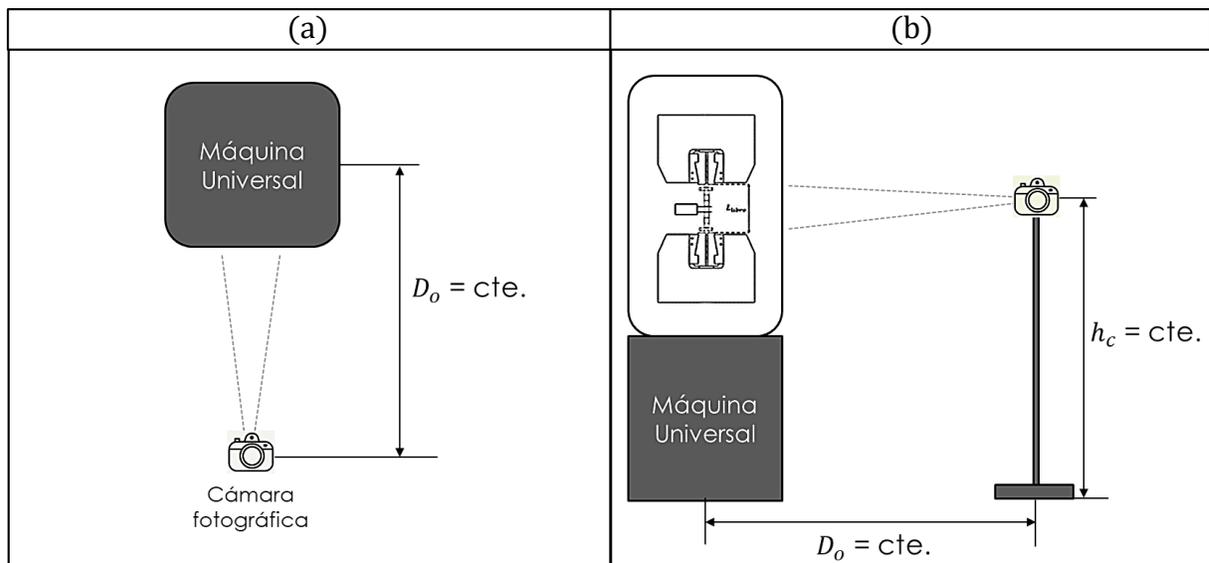


Figura 3.4. Esquema referencial montaje cámara fotográfica. (a) Vista en planta; (b) Vista lateral.

Focos de iluminación

Para lograr una buena iluminación de la zona de interés para la fotogrametría, se instalan dos focos halógenos a los costados de la Máquina Universal (uno a la izquierda y otro a la derecha de ésta), los cuales poseen una capacidad lumínica de 10W de potencia. Además de estos dos focos, se utiliza un Proyector de Área Led modelo PDLED-50W, el cual se instala de manera frontal a la probeta, con tal que ilumine los sectores que no alcanzan a cubrir los halógenos. En general, los proyectores lumínicos se disponen de tal manera que no se reflejen sombras sobre la probeta, para que así al momento de procesar las fotos para la fotogrametría, no haya problemas de contraste o que los puntos marcados sobre la barra de acero puedan ser visibles fácilmente.

3.3 Protocolo de ensayos

Se dispone de barras de acero de calidad A630-420HS, provenientes de las mallas electrosoldadas. Todas las barras a ensayar presentan un diámetro característico de 8 [mm], mientras que los largos de las probetas dependen del tipo de ensayo que se quiera realizar. Por ejemplo, para un ensayo cíclico con $L/d=6$, el largo libre corresponde a 6 veces el diámetro, es decir $L=4.8$ [cm], donde al sumar los 7.5 [cm] de empotramiento por lado (ver Figura 3.5), se tiene que la probeta debe tener una longitud total de 19.8 [cm]. Cabe mencionar, que este último valor puede variar en caso de que se reduzca el largo de empotramiento de la barra.

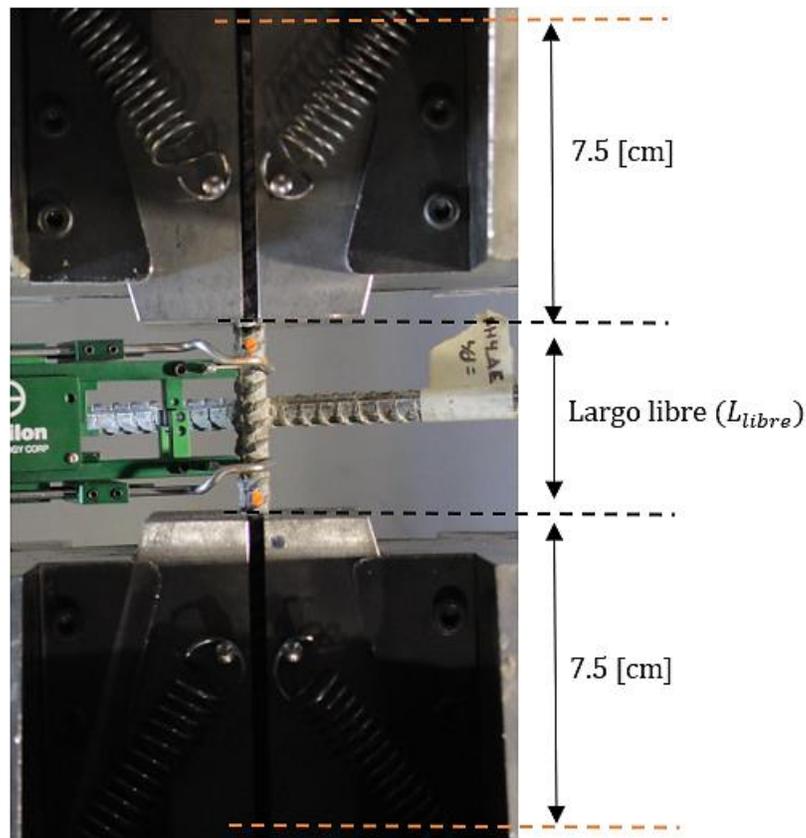


Figura 3.5. Esquema referencial con largo libre de ensayo y empotramiento en máquina

Los ensayos a realizar corresponden a ensayos cíclicos, es decir, se somete la probeta a esfuerzos de tracción-compresión durante varios ciclos. En la Tabla 3.1 se muestra la cantidad de probetas estimadas para realizar los distintos ensayos.

Tabla 3.1. Tipo y cantidad de ensayos por malla

Malla	Orientación barra	Cíclicos	
		L/d=6	L/d=12
M3MEA	Horizontal	10	4
	Vertical	7	4
M3MEB	Horizontal	12	4
	Vertical	8	4

3.3.1 Ensayos cíclicos

Los ensayos cíclicos, corresponden a aquellos donde se somete una probeta a ciclos de tracción-compresión, fatigando el material hasta llevarlo a la rotura. A diferencia del ensayo monotónico, aquí se controla la amplitud de deformaciones, las que por lo general están en el rango plástico, para que así se tenga una fatiga a bajo número de ciclos, tal como sucede en los movimientos sísmicos de mayores magnitudes.

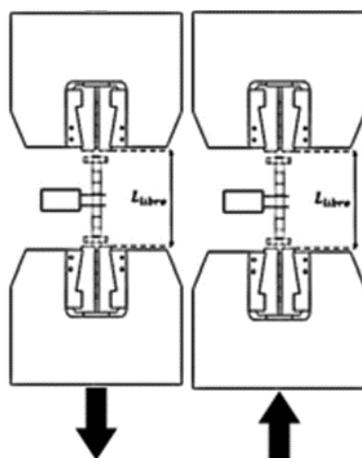


Figura 3.6. Esquema ensayo cíclico. [13].

Las barras predispuestas para los distintos ensayos tienen relaciones de aspecto de $L/d=6$ y $L/d=12$. Las primeras, son principalmente para ver la capacidad de la barra sin que esté afecta al pandeo, mientras que la segunda razón de aspecto es para ver cómo influye el pandeo en la fatiga del material. Estos ensayos se realizan a deformaciones controladas del 1%, 3% y 5%, y así poder crear líneas de tendencia que permitan observar la capacidad remanente del material. A continuación, se muestra una tabla resumen con la cantidad y tipo de ensayos que se llevan a cabo para su posterior análisis.

Tabla 3.2. Ensayos cíclicos, según relación L/d y amplitud de deformación.

L/d	Barra	$\epsilon=1\%$	$\epsilon=3\%$	$\epsilon=5\%$
6	Horizontal	9	11	3
	Vertical	6	7	2
12	Horizontal	4	4	-
	Vertical	4	4	-

Para realizar este tipo de ensayos, la máquina tracciona y comprime la probeta a una velocidad de 30 mm/min, que corresponde a la velocidad con la que se caracterizaron las barras de las mallas de refuerzo de los muros M3. Además, se considera que es una velocidad relativamente lenta, capaz de tomar suficientes fotos para que las curvas sean representativas, dado que la máquina al llegar a un peak de tracción o compresión, alcanza a estar aproximadamente 10 segundos en dicho peak hasta que nuevamente retoma la carga.

3.4 Calibración de equipo

Antes de iniciar los ensayos definitivos, se realizan varios ensayos de prueba con tal de verificar el completo y correcto funcionamiento de la máquina, así como el de los equipos que se utilizan en el proceso. Estos ensayos además sirven para ir puliendo el proceso y para

programar la rutina que permite la lectura de los datos, además de que permiten obtener constantes de calibración para el manejo de los datos.

La Máquina Universal cuenta con dos canales de salida de datos, al cual se suma el canal correspondiente a la conexión del extensómetro. Como ya se mencionó en la sección 3.1, la lectura de los datos no se realiza de manera directa, esto ya que los valores de desplazamiento y carga entregados por la Máquina Universal se encuentran expresados en unidades de voltios [V]. Para poder trabajar con esta información, es necesario convertir las unidades de desplazamiento a [mm] y las unidades de carga a [kgf], para así finalmente visualizar los resultados de deformación en [mm/mm] y los de tensión en [MPa]. Para llevar a cabo esta conversión, se necesitan constantes de calibración, que al multiplicarlas por los valores entregados inicialmente por la máquina, permiten obtener las unidades de medición deseadas (ver ecuaciones (7), (8) y (9)).

Tabla 3.3. Datos según canal de salida máquina universal, en [V].

Canal Salida	Dato Salida	Unidad
1	Carga (F_{maq})	[V]
2	Desplazamiento máquina (D_{maq})	[V]
3	Desplazamiento extensómetro (D_{ext})	[V]

$$F_1 = -F_{maq} * 611.3124 * 10 \quad (7)$$

$$D_2 = -D_{maq} * 30.54 - 61.716 \quad (8)$$

$$D_3 = -D_{ext} * 1.2389 \quad (9)$$

Dónde:

F_1 : Carga en [kgf]

D_2 : Desplazamiento máquina en [mm]

D_3 : Desplazamiento extensómetro en [mm]

A partir de estos ensayos y su posterior análisis (ver Figura 3.7), se puede dar cuenta de que, en el primer tramo donde la barra tiene un comportamiento lineal elástico, la curva que se genera tiene distinta pendiente para los resultados que se obtienen de la máquina con respecto a los que se obtienen del extensómetro. Esto sucede debido a que la máquina considera el desplazamiento del sistema completo, es decir, incluyendo las mordazas. Para corregir esta diferencia de datos, se realiza una corrección considerando que los datos iniciales que entrega el extensómetro (recta de tramo lineal), son más cercanos a la realidad, ya que el módulo de elasticidad que se obtiene es cercano al valor nominal del módulo de elasticidad del acero, que es de 200.000 MPa, difiriendo en menos de un 10% de este último valor.

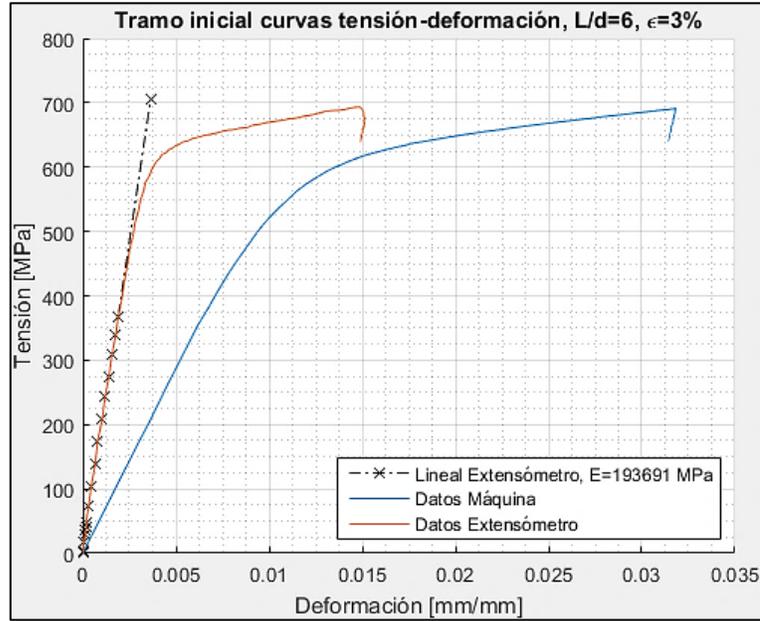


Figura 3.7. Tramo lineal curvas tensión-deformación, diferencias en módulo de elasticidad.

Por tanto, para todos los ensayos, los datos provenientes de la máquina universal pueden ser corregidos a partir de los datos correspondientes al comportamiento lineal elástico del acero (antes de llegar a la fluencia) obtenidos por extensómetro, según la siguiente ecuación:

$$\epsilon_{real} = \epsilon_{máquina} - \frac{\sigma * (E_{extensómetro} - E_{máquina})}{E_{extensómetro} * E_{máquina}} \quad (10)$$

Esta corrección, se asume válida debido a que la diferencia que se observa en el tramo lineal del inicio de las curvas (Figura 3.7), se atribuye principalmente a la deformación producto del movimiento de la mordaza al aplicar carga sobre las barras, lo cual no se puede detectar únicamente con los datos entregados por la máquina [14]. Además, es razonable que la corrección se relacione con la tensión y no con la deformación que sufre la probeta.

3.5 Fotogrametría

A través del proceso de fotogrametría, es posible obtener las deformaciones que sufre la probeta producto de la aplicación de la carga ejercida por la máquina. Para la obtención de estos datos, se utiliza una rutina de MATLAB, que permite que, por medio de la secuencia de imágenes capturadas por la cámara instalada en el montaje experimental, se pueda determinar cuánto se desplaza la barra a través del tiempo, con respecto a su posición inicial.

La cámara fotográfica captura imágenes cada 5 segundos, iniciando el proceso de captura segundos antes de que comience el ensayo, y terminando segundos después de que la barra alcanza la rotura. Esto se realiza para que, al momento de procesar los datos, sea posible observar la barra antes de ser deformada, así como en su máxima deformación en tracción y máxima deformación en compresión.

Durante los 5 segundos que transcurren entre una foto y otra, en ocasiones es posible que no se alcance a mostrar el verdadero peak de deformación a la que se llega en tracción o compresión, pero aun así es una buena aproximación discretizada, dado que al ser la velocidad de la máquina de 30 mm/min, el error que conduce es de aproximadamente de un 0,11% en términos de deformación unitaria, lo que es relativamente bajo.

Para lograr que la cámara capture las imágenes cada cierta cantidad de tiempo, es necesario ajustar el software (DSLR Remote Pro Multi-Camera) que controla la máquina fotográfica. Para ello, en la Interfaz del software, en la parte superior hay que dirigirse a la opción correspondiente a *Camera*, y luego dar click en la opción de *Time Lapse*.

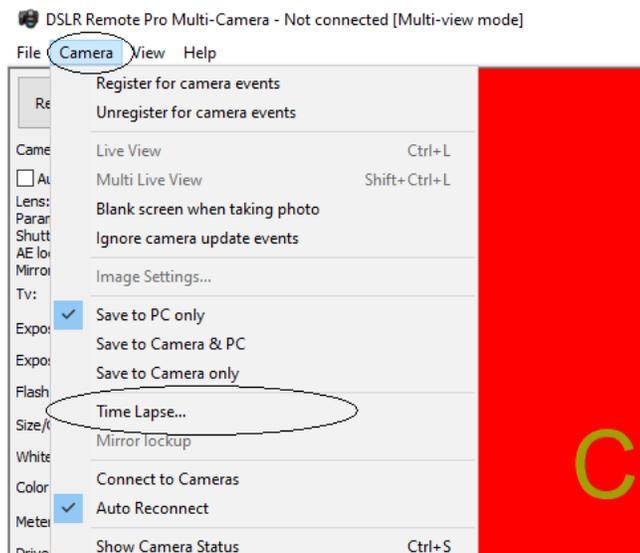


Figura 3.8. Interfaz software DSLR Remote Pro Multi-Camera.

Una vez realizado los pasos anteriores, se abrirá una ventana similar a la de la Figura 3.9. En esta, es posible ajustar el tiempo de transición entre imágenes, y la cantidad de fotos que el usuario desee tomar. Para los ensayos, el número de cuadros (Number of frames) se define con un valor alto, debido a que hay ensayos de larga duración (por ejemplo, los de deformación de 1%), por lo que se alcanza un gran número de imágenes. Para el intervalo entre cuadros (Interval between frames), se fija un valor de 5 segundos, tiempo suficiente para que la máquina fotográfica no presente problemas entre una captura y otra.

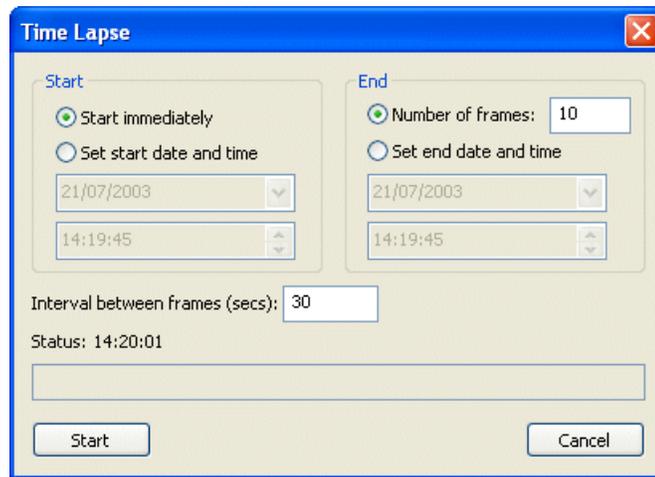


Figura 3.9. Selección número de cuadros e intervalo de tiempo entre ellos (Imagen referencial)

En el momento en que culmina el ensayo y se tiene la secuencia completa de imágenes, se procede al siguiente paso que consiste en procesar las fotos mediante un código programado en la herramienta computacional MATLAB (ver Apéndice B, sección B.2).

La rutina está basada principalmente en el seguimiento de un conjunto de píxeles (de un determinado color), a partir de una secuencia de imágenes. Este proceso consiste en filtrar los colores de los puntos de interés que serán seguidos. Dichos puntos de interés son marcas que se realizan en los extremos de la barra a ensayar (tal como visualiza en la Figura 3.10) con un plumón especial de color naranja, que permite una mejor identificación del color al momento de realizar el filtro de las imágenes en RGB (Red, Green, Blue).

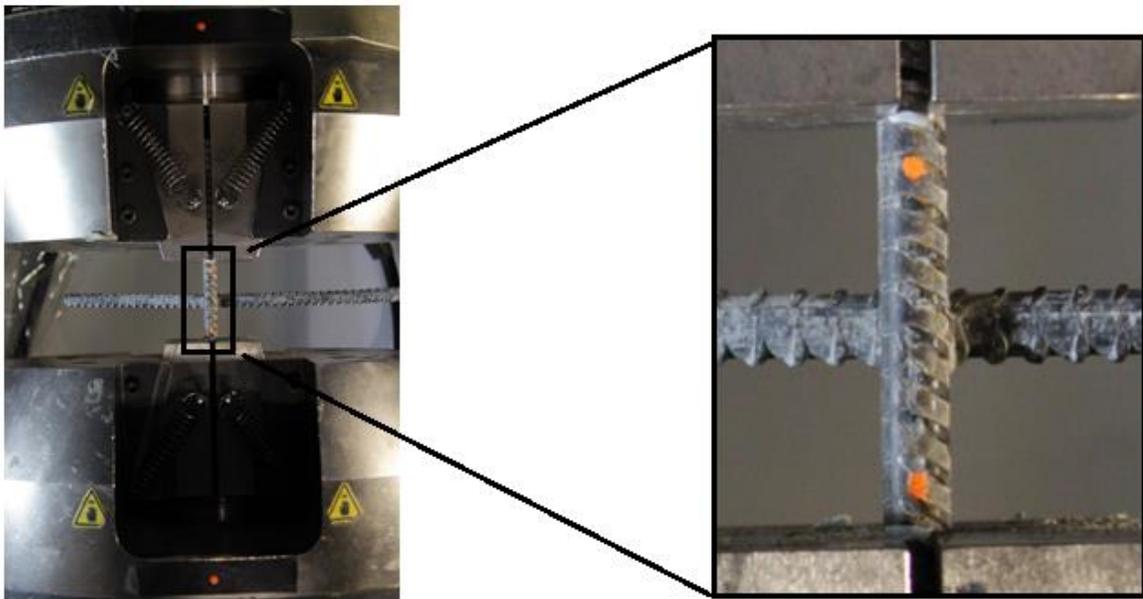


Figura 3.10. Probeta electrosoldada utilizada en ensayo.

Tal como se menciona en la sección 2.4, los colores son representados por valores numéricos para ser reconocidos por MATLAB. Por tanto, para realizar el seguimiento del punto de interés, se usa un filtro con valores mínimos y máximos para la combinación de colores primarios que da como resultado el color naranja. En general, para realizar el seguimiento, los límites establecidos para el color de interés son los siguientes:

$$200 < R < 255 \quad (11)$$

$$80 < G < 210 \quad (12)$$

$$10 < B < 120 \quad (13)$$

Luego, a partir de la primera foto de la secuencia (la cual se utiliza como referencia debido a que ésta se obtiene antes de iniciar el ensayo), se buscan las coordenadas iniciales de los puntos de interés. Éstas, se ingresan manualmente al código, como punto de partida, para que así, a partir de dichas coordenadas, el programa busque en una vecindad de puntos cercanos, los píxeles que correspondan al filtro indicado en las ecuaciones (11), (12) y (13).

Ya extraído el conjunto de píxeles que se encuentran dentro de los rangos de las combinaciones de color establecidas por el filtro, se procede a definir un promedio de las coordenadas en el eje X (horizontal) y coordenadas en el eje Y (vertical) de los píxeles pertenecientes al conjunto seleccionado, esto se hace tanto para el punto de interés superior como para el inferior, quedando así, cada uno de ellos, definidos de forma más representativa. Esto, se realiza además para cada imagen de la secuencia fotográfica.

El largo de barra, para este caso, se define como la distancia entre el punto de interés superior y el punto inferior dentro de la barra. Así, es posible calcular el largo de barra para cada imagen, pudiendo de esta manera obtener la variación del largo de la probeta en el tiempo, siendo el largo inicial el correspondiente a la primera foto capturada (pre-ensayo). Esto permite conocer cómo se desplaza la probeta y, en consecuencia, obtener la deformación unitaria de la barra.

Una vez que se obtiene la deformación unitaria en cada cuadro, tomando como referencia la imagen conseguida antes de comenzar el ensayo, es posible extraer una curva sinusoidal de deformación unitaria versus el tiempo que dura el ensayo completo. Esta curva, es posible compararla con la que se obtiene del procesamiento de datos de la máquina, para finalmente corregir dichos datos de deformación según lo obtenido por fotogrametría, dado que este último método es más representativo por el hecho que solo considera cuánto se deforma la barra, sin tomar en cuenta el movimiento de la mordaza.

Capítulo 4

Resultados

En el presente capítulo se exponen los principales resultados alcanzados durante el desarrollo de esta memoria.

Se inicia esta sección exhibiendo los resultados provenientes de la corrección del módulo de elasticidad que proviene de la diferencia de pendiente entre el tramo inicial de las curvas tensión-deformación entregadas por la máquina con respecto a la recta inicial del tramo elástico correspondiente a los datos entregados por el extensómetro.

Posteriormente, se produce un acercamiento más detallado de los resultados que arroja la corrección por fotogrametría según se vio en la sección 3.5, dando cuenta además de las diferencias que se pueden presentar según el tipo de ensayo.

Finalmente, de las correcciones realizadas a los datos entregados por los procedimientos ya mencionados, se muestran los resultados de deformaciones y números de ciclos a los que las barra son capaces de alcanzar; y aplicando los modelos presentados en la sección 2.2.4 del capítulo Antecedentes, es posible obtener la vida a la fatiga de las barras provenientes de los muros ya ensayados, las cuales son comparadas con las barras antes de ensayar los muros.

4.1 Corrección del módulo de elasticidad

Tal como se presentó en la sección 3.5, en el tramo inicial de los datos, en el rango lineal elástico, los datos entregados por los diferentes métodos presentan variaciones que se traducen en la entrega de distintos módulos de elasticidad. Los datos entregados por el extensómetro, según los resultados experimentales, arrojan una mayor cercanía respecto al valor nominal del módulo de elasticidad del acero (200.000 [MPa]), lo que entrega como indicio que los datos entregados por este instrumento, son más cercanos a la realidad.

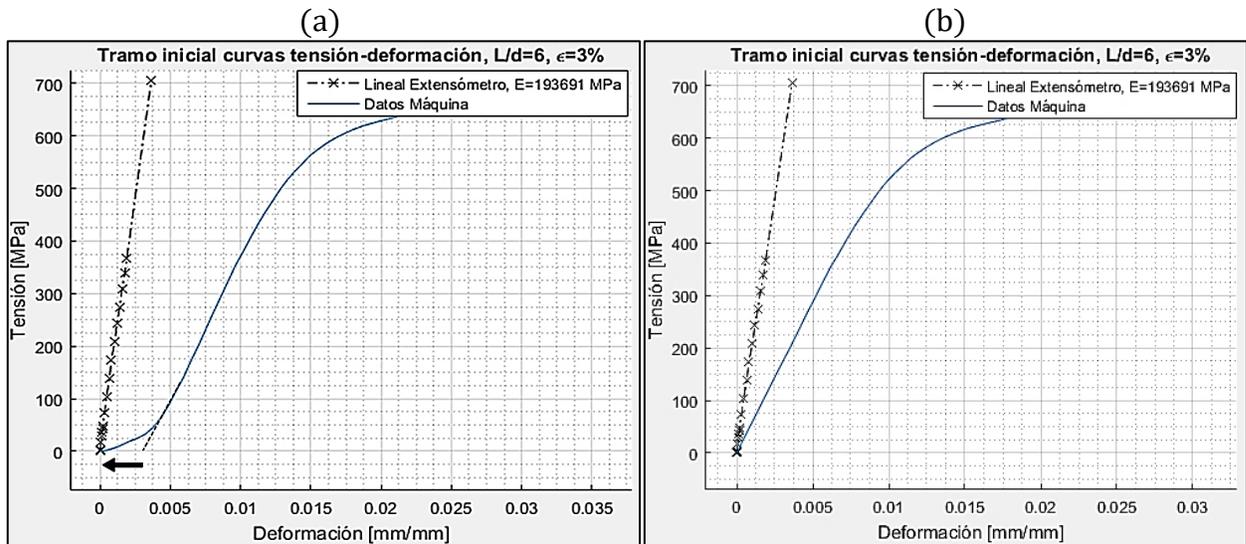


Figura 4.1. (a) Corrección ajuste de carga datos máquina; (b) Diferencias de pendiente en tramo lineal-elástico de la curva tensión-deformación

Al inicio de la curva obtenida por los datos de la máquina, existe una pequeña sección que no es recta, y se debe al ajuste de carga al comienzo del ensayo, hasta que la probeta entra en el rango lineal (ver Figura 4.1 (a)), el cuál ocurre en tracción hasta que se llega a la fluencia, donde luego se curva nuevamente el gráfico hasta alcanzar la amplitud de deformación máxima para así iniciar la posterior descarga que lo lleva a la compresión. Esta parte no lineal del comienzo es corregida para la determinación del módulo de elasticidad de los datos por máquina, considerando solo la parte lineal.

En la Figura 4.1 (b), se puede apreciar la diferencia de rigidez en la parte lineal de las curvas con mayor claridad, donde se presentan los datos iniciales del ensayo proveniente de una barra con relación aspecto de $L/d=6$ y deformación de 3%, comparados con la regresión lineal de los datos iniciales entregados por la medición del extensómetro.

Una vez bien definidos los datos a utilizar, y los módulos de elasticidad correspondientes, se procede a realizar el ajuste de la curva tensión-deformación de acuerdo con el módulo obtenido por los datos del extensómetro. Esto se realiza a partir de la ecuación (10), y como se observa en la Figura 4.2, corrige los datos desde el inicio, hasta que se llega a la ruptura, dejando el tramo lineal inicial paralelo a la recta que entrega el registro del extensómetro. Cabe notar que los datos del extensómetro, que son posteriores al rango lineal, no son de utilidad, ya que éste comienza a deslizar en la probeta, por lo que las mediciones se ven afectadas y no son representativas.

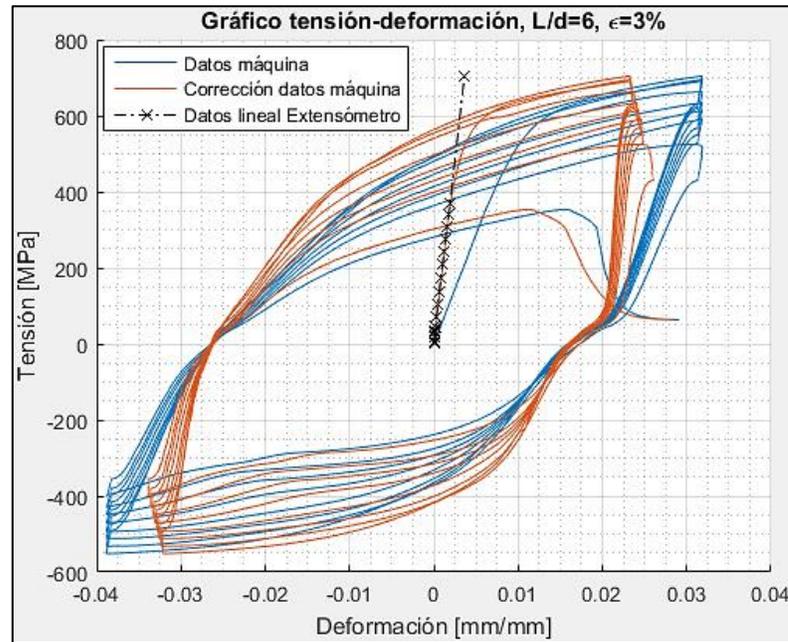


Figura 4.2. Ajuste módulo de elasticidad de los datos de la máquina con respecto al extensómetro

Al momento de revisar los registros, hay casos de barras en donde el tramo lineal antes de llegar a la fluencia es muy corto o simplemente no se presenta con claridad, lo que puede deberse a que la barra trabajó lo suficiente como para plastificarse y entrar a la fluencia casi de manera repentina una vez que se inicia el ensayo. Otro factor que puede influir es que este tipo de barras hayan sido afectadas durante el proceso de extracción desde el muro hormigonado, por lo que no fueron consideradas o se dejaron de lado de este estudio.

4.2 Corrección por fotogrametría

Una vez que se capturan las imágenes del ensayo completo, se procede a filtrarlas para su posterior procesamiento. Este filtro, consiste en descartar las fotografías que corresponden al proceso de extracción del extensómetro, dado a que los puntos de interés se ven intervenidos por quién retira el extensómetro.

Luego de realizar el filtro, mediante la rutina programada en MATLAB (ver sección B.2 del Apéndice B), se hace un seguimiento de dos puntos dentro de la barra que permiten obtener la deformación unitaria en intervalos de tiempo de 5 segundos. Al finalizar la rutina es posible graficar la curva cíclica de como varía la deformación unitaria de la barra en el tiempo, tal como se observa en la Figura 4.3 para una barra de relación de aspecto $L/d=6$ y amplitud de deformación unitaria controlada de 3%.

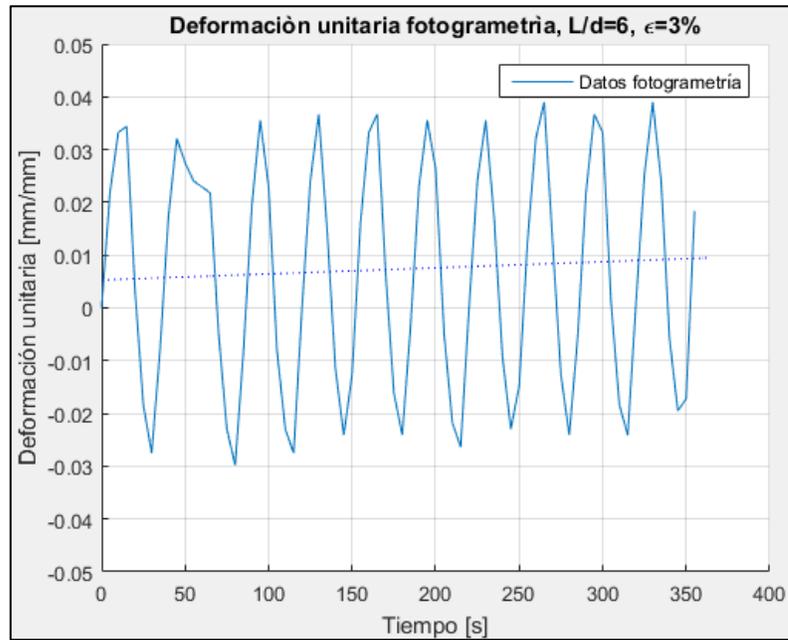


Figura 4.3. Deformación unitaria vs tiempo, obtenido por fotogrametría, L/d=6 y ε=3%.

Al observar el gráfico de la Figura 4.3, se da cuenta de una leve tendencia de los datos a oscilar en torno a un punto que no es el origen a medida que avanza el ensayo, lo que se debe a principalmente a un cambio en la referencia en la secuencia de imágenes, a causa de un posible deslizamiento de la probeta. Sin embargo, la amplitud de deformación no se ve afectada, dado que solo cambia el origen o punto medio. Esto es posible corregirlo mediante una función de MATLAB, conocida como *detrend*, que actúa analizando la serie de datos y la secuencia, haciendo que estos ciclos oscilen en torno al origen [15].

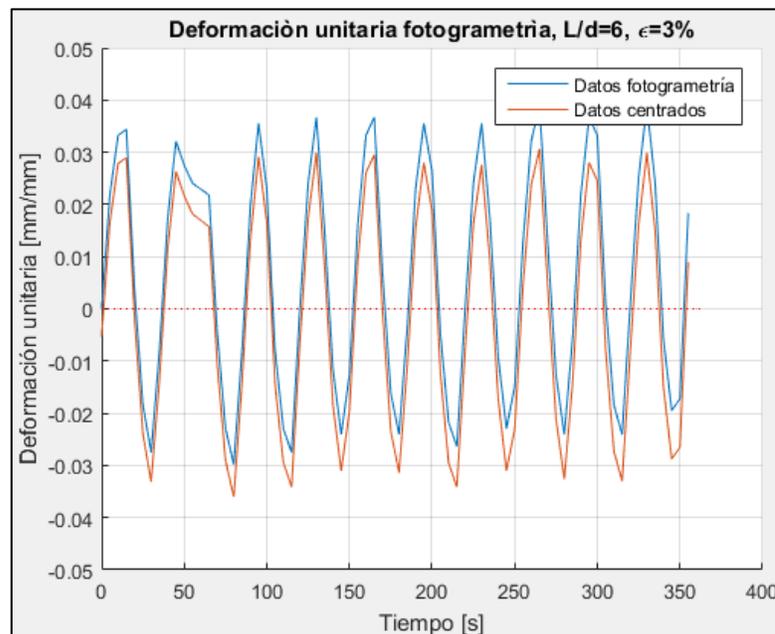


Figura 4.4. Centrado de datos en torno al origen.

Lo anterior, sucede en la mayoría de los ensayos, independiente de la deformación y de la relación de aspecto elegida, siendo en algunos casos es más notorios que en otros, pero aun así es posible corregirlos mediante esta función.

Para poder comparar los resultados obtenidos por fotogrametría con los que se obtienen a través de los registros que entregan la máquina, es necesario ajustar el tiempo en el que se inicia a tomar las fotos, con el tiempo en el que comienza a tomar los datos la máquina universal, para que así estén sincronizados y sea posible realizar la corrección.

Una vez que se logra calzar los tiempos de inicio, se superponen las curvas deformación unitaria-tiempo de la fotogrametría con la obtenida por el procesamiento de datos, con tal de hacer coincidir los máximos. Como se puede observar en la Figura 4.5. a), existe una notoria diferencia en los peaks de compresión y tracción, que es lo que se obtendría si es que no se centraran los datos respecto al origen.

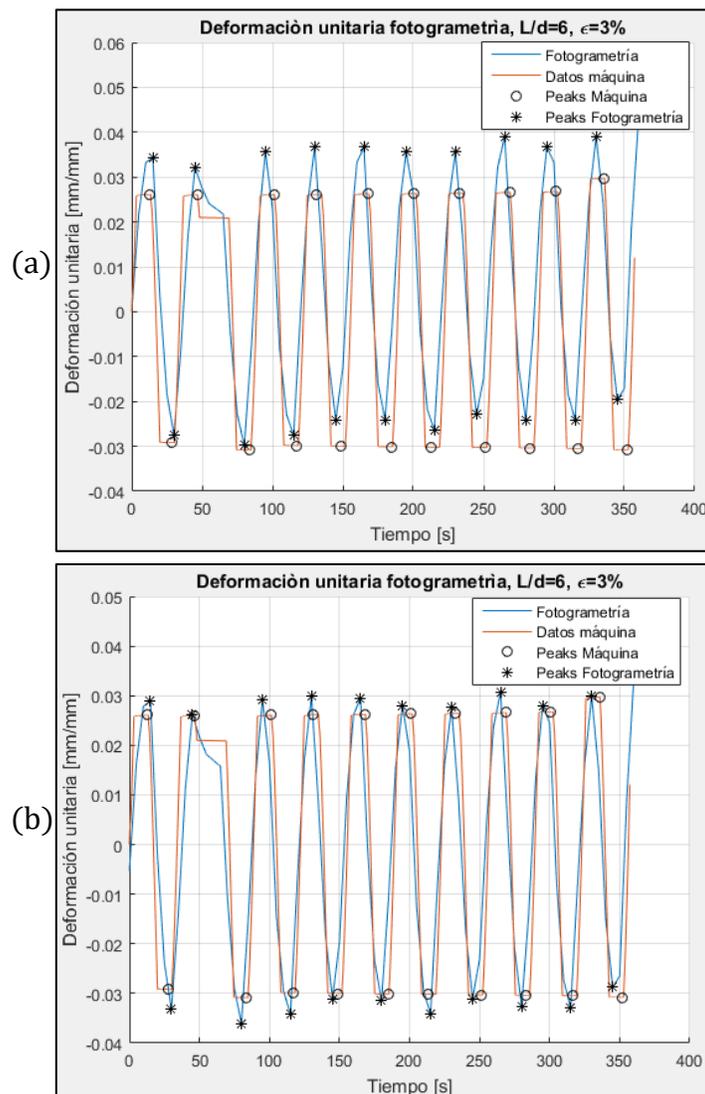


Figura 4.5. Superposición curvas deformación-tiempo. a) Datos sin centrar, b) Datos centrados

La Figura 4.5. b), muestra la superposición de curvas una vez que los gráficos deformación-tiempo obtenidos por fotogrametría fueron centrados. Se nota que la diferencia entre los máximos de compresión y los máximos de tracción, respectivamente, se reducen con respecto al caso a). Sin embargo, esta diferencia, es la que hay que corregir, llevando las amplitudes de deformación registradas por la máquina universal, a las amplitudes de deformación resultado del proceso de fotogrametría.

Si se grafica la diferencia porcentual entre los puntos de máxima tracción obtenidos por cada método de medición, y se hace lo mismo para los puntos de máxima compresión de un ciclo, con sus respectivos nivel de deformaciones unitarias alcanzadas, se puede obtener una curva de corrección que corresponde a una línea de tendencia entre estos dos puntos (ver Figura 4.6). Esta línea de tendencia corresponde una regresión lineal, y se asume válida para los datos de la curva deformación-tiempo que corresponden al ciclo de los peaks en cuestión.

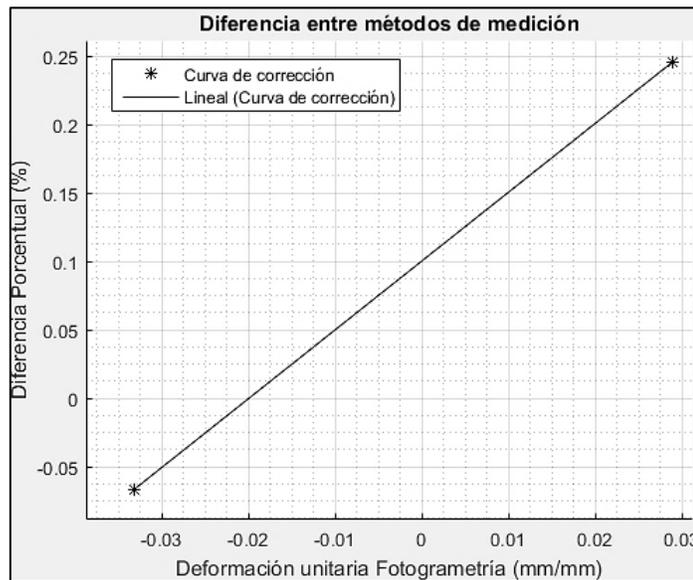


Figura 4.6. Diferencia porcentual entre máximos y mínimos de dos métodos de medición distintos.

Esta diferencia entre los métodos de medición se nota que ocurre a lo largo de todo el ensayo. Por lo tanto, la curva de corrección obtenida por las diferencias porcentuales entre los peaks, se realiza para cada uno de los ciclos hasta llegar a la rotura, realizando el mismo procedimiento descrito en el párrafo anterior.

De esta manera es posible ajustar las deformaciones obtenidas por la máquina universal, a las deformaciones que se obtienen por fotogrametría, manteniendo los datos de carga que no varían entre un método y otro. Este ajuste se puede observar en la Figura 4.7.

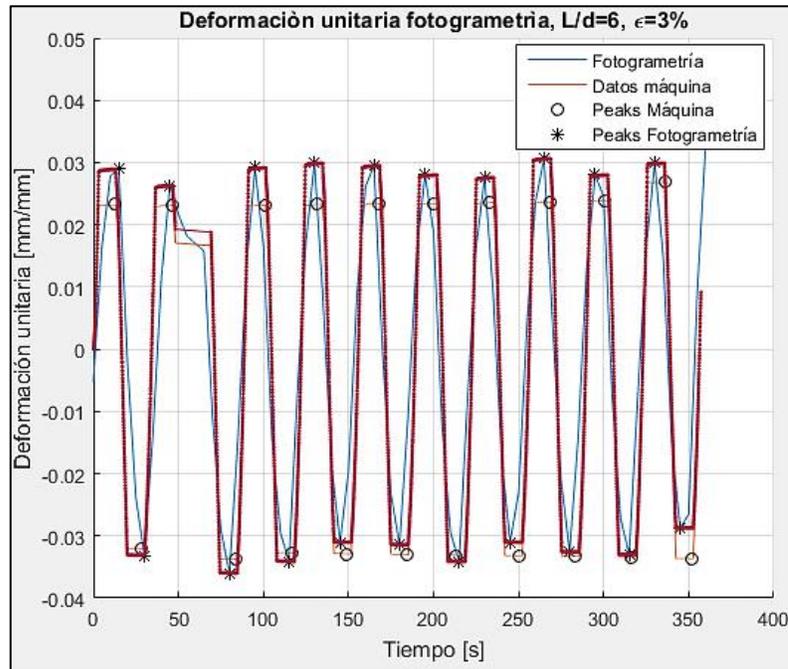


Figura 4.7. Ajuste de deformación según fotogrametría.

Finalmente, se obtiene la curva de tensión-deformación (Figura 4.8) correspondiente a los datos corregidos en primer lugar por rigidez, y posterior corrección de acuerdo con el proceso de fotogrametría. A partir de estos datos es posible extraer la amplitud de deformación media final, y el número de ciclos a la rotura, que permiten establecer las curvas de vida a la fatiga del material.

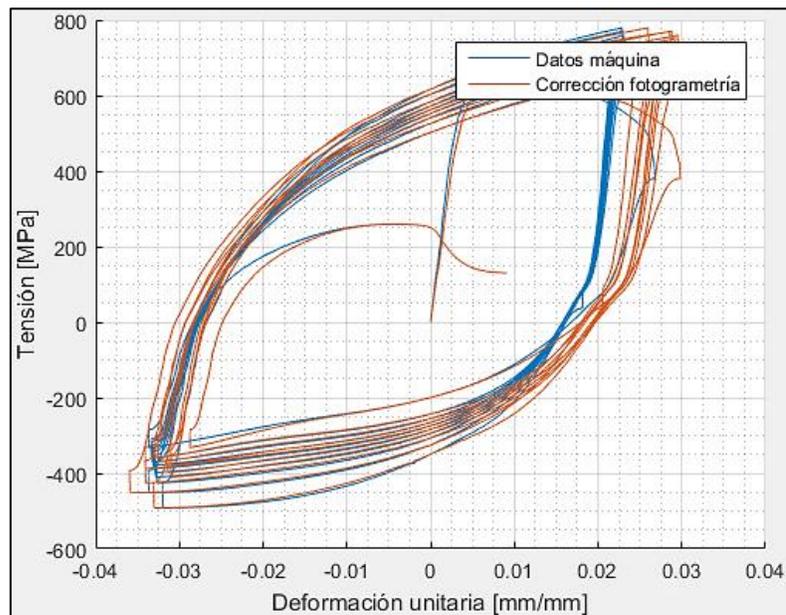


Figura 4.8. Curva tensión-deformación con datos corregidos por fotogrametría.

4.3 Resumen y análisis de resultados

Para las barras que conforman la malla electrosoldada, se realizaron ensayos previos al ciclado de muros, para fierros de relación $L/d=8$ y $L/d=25$, donde dichas barras, se llevaron a deformaciones de aproximadamente 3% y 5% respectivamente, con y sin puntos de soldadura con el fin de caracterizarlas y ver su comportamiento. Para esta memoria, interesa ver cómo se comportan las barras con un punto de soldadura, a manera de ser comparable con los ensayos realizados acerca del presente trabajo de título. Sin embargo, de igual manera se incluye como punto de referencia la barra electrosoldada ensayada sin punto de soldadura, para tener mayor cantidad de datos a ser comparados.

A continuación, se muestran uno de los resultados de las barras inalteradas descritas anteriormente, con un punto de soldadura, y de relación de aspecto $L/d=8$, correspondiente a los casos de interés.

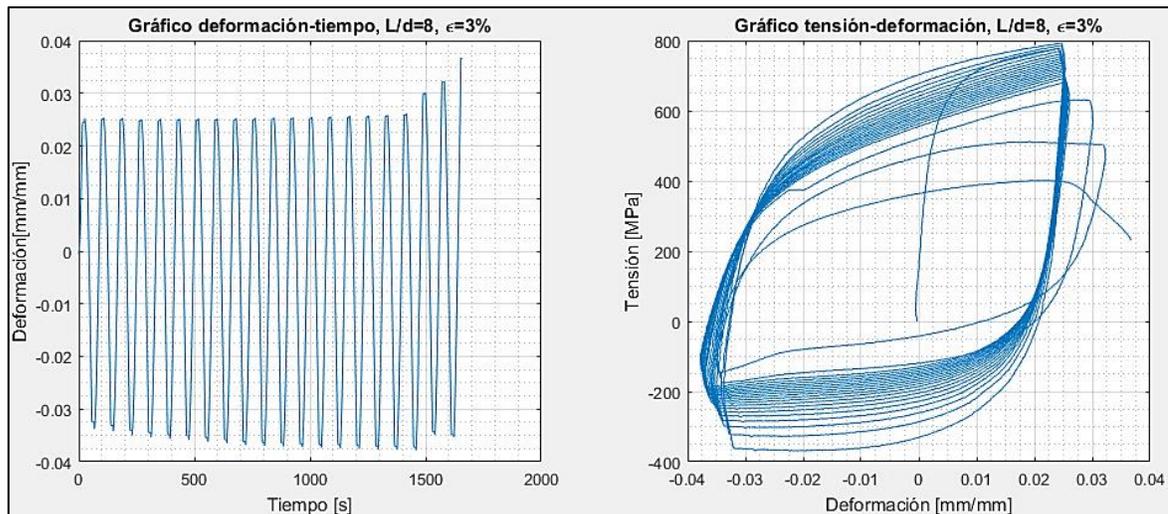


Figura 4.9. Comportamiento barra inalterada con punto de soldadura, $L/d=8$, $\epsilon=3\%$.

Cómo se puede apreciar en la Figura 4.9, presenta un comportamiento similar en compresión como en tracción, sin verse alterado mayormente por pandeo. Además, mediante los cálculos se logra establecer que la barra en cuestión posee una capacidad de resistir 22 ciclos, ante una amplitud de deformación total de 2,9% aproximadamente.

Cabe destacar que los ensayos realizados pre ciclado de muros, se llevaron a cabo con mediciones de sensores LVDT, constando con dos de aquellos sensores, y a partir de sus registros se realizaron las correcciones correspondientes a las deformaciones, haciendo uso del módulo de elasticidad nominal del acero de 200.000 [MPa]. En la tabla de a continuación se muestran los resultados con los números de ciclos para cada ensayo.

Tabla 4.1. Ensayos barras electrosoldadas pre ciclado de muros.

Tipo de ensayo	Nº ciclos	Amplitud deformación [mm/mm]
Con punto soldadura	22	0,029
Sin punto soldadura	22	0,027

Como se establece en las conclusiones del trabajo de título de Joaquín Urzua López [13] con respecto al estudio de barras soldables como opción de refuerzo de estructuras de hormigón armado, estas barras poseen comportamiento similar a las barras de hierro tradicional en cuanto a su capacidad.

Tomando en consideración lo anterior, en conjunto con los estudios realizados por Begoña Hamasaki [11] sobre barras de acero A630-420H de diámetro $\phi 8$ expuestas a fatiga de bajo número de ciclos para relaciones de aspecto de $L/d=6$, $L/d=8$ y $L/d=12$, entre otras, los resultados de ensayos sobre barras electrosoldadas inalteradas pre ciclado de muros se pueden comparar con las curvas obtenidas por Begoña. Los resultados comparativos se muestran en la Figura 4.10, donde las barras electrosoldadas se señalan como “cps” (con punto de soldadura, y “sps” (sin punto de soldadura).

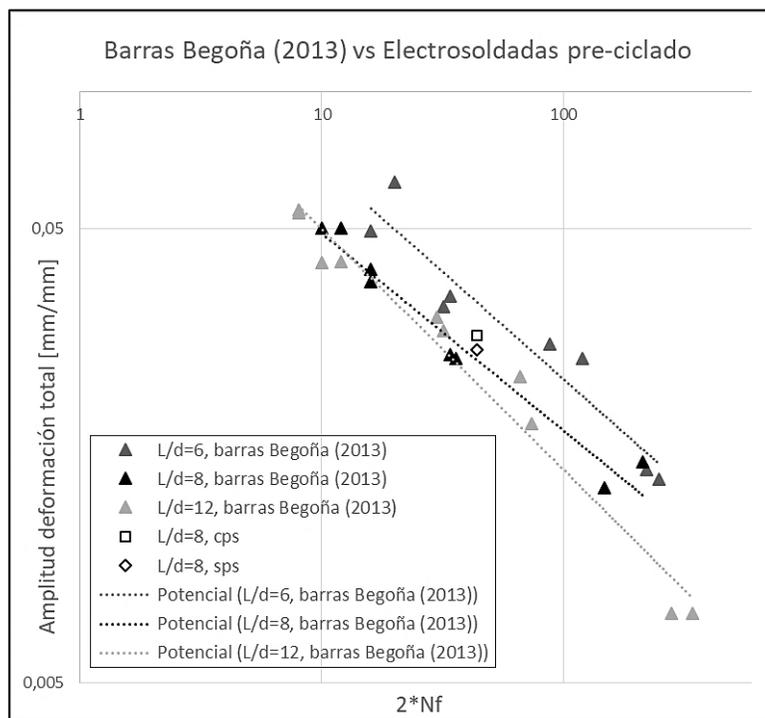


Figura 4.10. Gráfico comparativo barras Begoña (2013), y barras electrosoldadas pre ciclado muros.

Como se puede apreciar del gráfico de la figura anterior, las barras electrosoldadas ensayadas antes de ciclar los muros pertenecientes a la serie M3, presentan un comportamiento similar a la tendencia establecida para las barras de relación $L/d=8$ de barras tradicionales inalteradas, presentando una dispersión baja, lo que indica en cierta

manera, que para barras de acero soldable (A630s) de relación de aspecto $L/d=6$ y $L/d=12$, no existirían muchas diferencias con respecto a las de acero tradicional (A630).

Ahora bien, con respecto a los ensayos post ciclado de muros, a partir de la amplitud total de deformaciones, y la cantidad de ciclos que es capaz de aguantar una barra tras llevarla a la rotura, es posible obtener los gráficos de vida a la fatiga del material, según lo indicado en la sección 2.2.4. A partir del mismo procedimiento de Brown y Kunnath al extender los resultados de Koh y Stephens, se grafican las curvas de pérdida de capacidad correspondientes a las mallas provenientes de los muros M3MEA y M3MEB, tanto para las barras orientadas horizontalmente como para las barras orientadas verticalmente.

En la Figura 4.11, se puede observar las cuatro líneas de tendencia que corresponden a los ensayos de las barras horizontales del mallado M3MEA, donde es posible apreciar cuatro distintas configuraciones: dos que representan los resultados para probetas con relación de aspecto $L/d=6$, y dos para relaciones de aspectos $L/d=12$, donde están subdivididas de acuerdo a la posición de la probeta dentro de la malla, es decir, si ésta estaba ubicada cerca de la zona de falla, o si estaba lejos de la zona de falla.

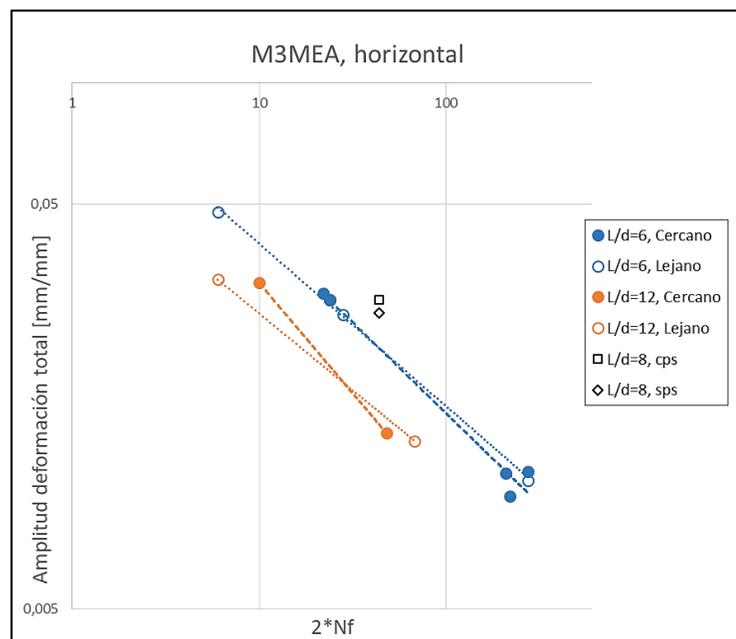


Figura 4.11. Vida a la fatiga del material, mallas muros M3MEA, orientación horizontal

Para barras con $L/d=12$, se puede apreciar claramente como se produce una reducción de la capacidad, donde se tienen curvas de tendencia por debajo de las curvas de barras con relación de aspecto $L/d=6$, lo que confirma lo propuesto por Monti y Nuti acerca de cómo las relaciones de aspecto más grandes afectan el comportamiento de la barra, debido al pandeo que se produce en ésta.

Al ver las curvas obtenidas para la malla electrosoldada proveniente del muro M3MEB (Figura 4.12), se puede notar la similitud en comportamiento con respecto a las barras horizontales de la malla M3MEA, donde se ve como el pandeo influye en la fatiga de las barras, reduciendo su capacidad entre aproximadamente un 30% a 40% de lo observable en las barras que no se pandean.

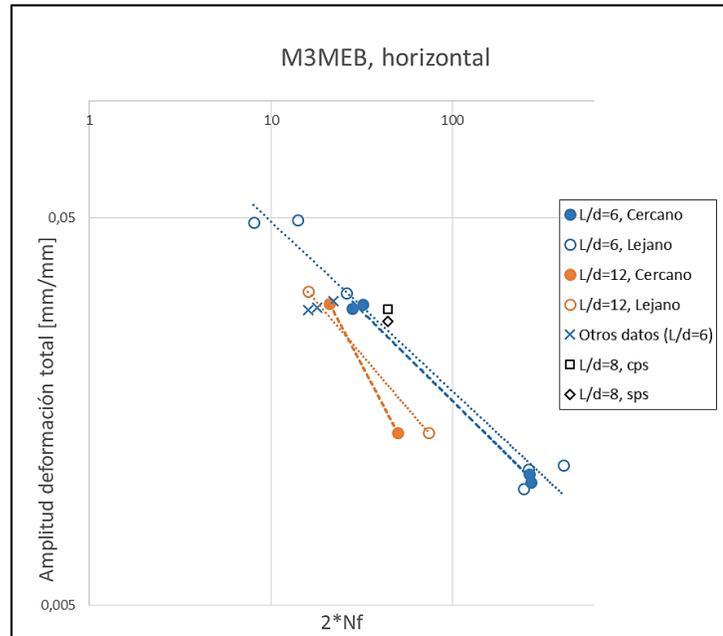


Figura 4.12. Vida a la fatiga del material, mallas muros M3MEB, orientación horizontal

Las barras verticales, de igual manera que las horizontales, presentan similitudes de comportamiento entre sí en lo que refiere a los dos tipos de mallas analizadas. En la Figura 4.13 y Figura 4.14, se puede dar cuenta de dichas similitudes.

Ahora bien, en la Figura 4.14, no se encuentra graficada la línea de tendencia de las probetas de L/d=12 lejanas a la zona de falla, debido a que se tuvo problema con uno de los ensayos concerniente a dicha curva. De igual manera la Figura 4.13 permite esclarecer un poco el comportamiento tipo de la probeta en cuestión, debido a que los datos presentan una tendencia similar tanto en la malla M3MEA como la malla M3MEB.

Para las curvas de deformación vs ciclos a la rotura en las probetas provenientes de orientación vertical, se observa una reducción de capacidad de hasta 60% por efecto del pandeo.

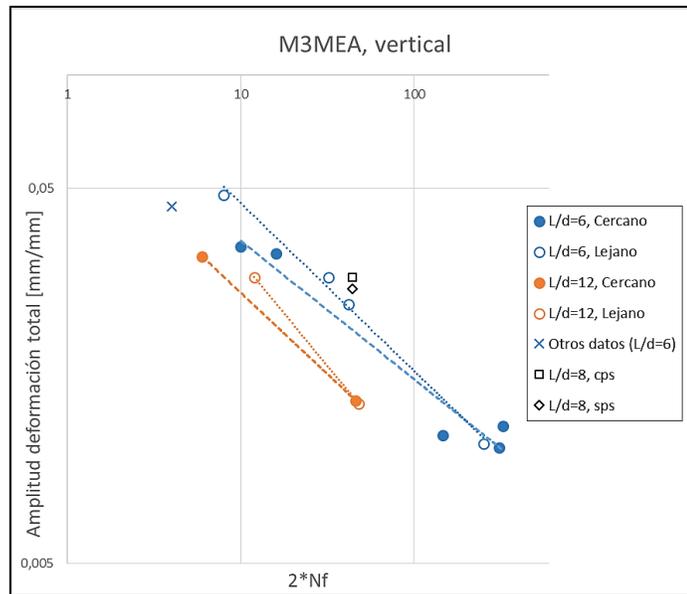


Figura 4.13. Vida a la fatiga del material, mallas muros M3MEA, orientación vertical

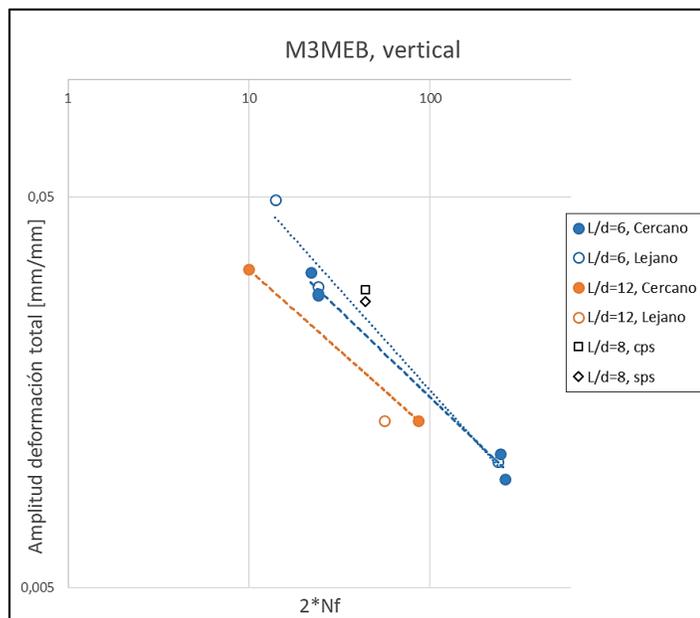


Figura 4.14. Vida a la fatiga del material, mallas muros M3MEB, orientación vertical

Sin embargo, si se llevan a comparación los resultados de las barras verticales con los obtenidos para las barras horizontales, es posible notar diferencia en las pendientes de las curvas, dependiendo de la cercanía a la zona de falla. Por ejemplo, en la Figura 4.15 (a), se nota que para deformaciones pequeñas a medianas (entre un 1 y 3%), las barras presentan menor vida a la fatiga cerca de la zona de falla.

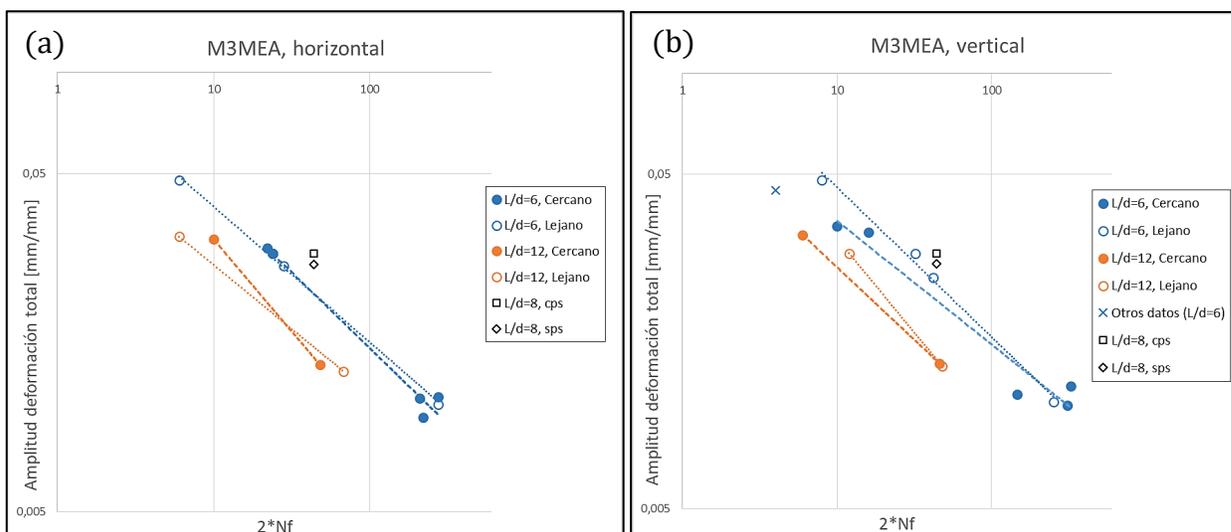


Figura 4.15. Curvas de vida a la fatiga. a) Barras Horizontales, b) Barras verticales

La Figura 4.15 (b), da cuenta que, en barras verticales ubicadas cerca de la zona de falla, para deformaciones de aproximadamente 3%, se reduce ligeramente la capacidad con respecto a los puntos que se encuentran más alejado de la rotura en la diagonal del muro, y teniendo un comportamiento similar para bajas deformaciones. Sin embargo, no es una diferencia notoria atribuible a la lejanía de las probetas con respecto a la falla, sino más bien producto de la dispersión de datos. Por lo tanto, los puntos de correspondientes a $L/d=6$ electrosoldados post ciclado de muros, se pueden reducir a una sola línea potencial; lo mismo se puede realizar con los puntos de las barras $L/d=12$. Estas potenciales son representadas como “Potencial ($L/d=6$)” y “Potencial ($L/d=12$)” en la Figura 4.16, respectivamente.

Al momento de observar y comparar todas las curvas con respecto a la barra inalterada, se da cuenta de una disminución de la resistencia en cuanto al número de ciclos para las barras ya ensayadas, donde, aun siendo probetas con relaciones de aspecto $L/d=6$, se obtienen números de ciclos más bajos que para una relación $L/d=8$. Esto denota una pérdida de capacidad de las barras post ciclado de muros, dado que, en la teoría, la curva de $L/d=8$, debiera estar entre las curvas de $L/d=6$ y $L/d=12$, sin embargo, estas últimas se encuentran por debajo de las barras con dicha relación de aspecto. Esto se observa con mayor claridad en la siguiente Figura 4.16.

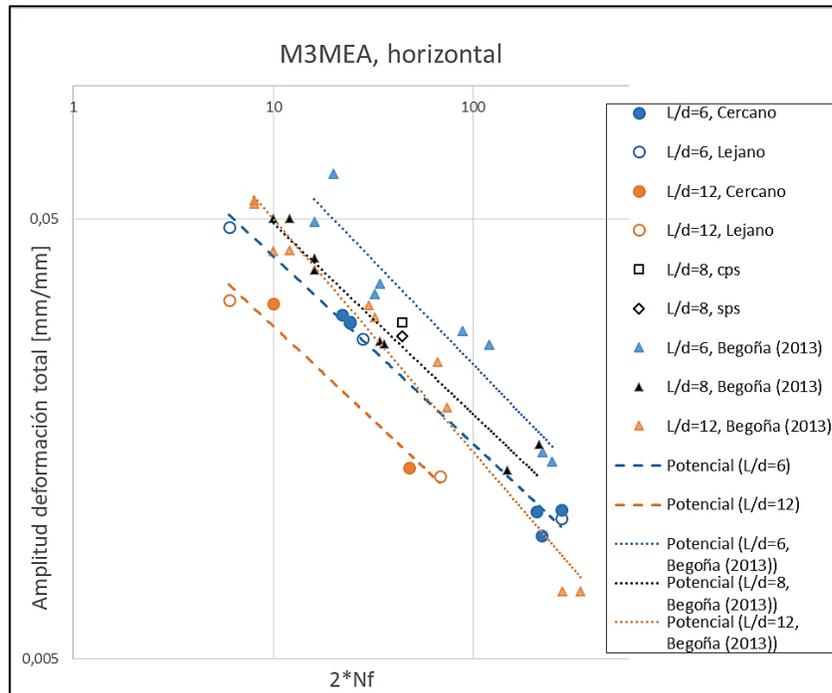


Figura 4.16 Ensayos barras electrosoldadas pre ciclado y post ciclados de muros M3MEA, orientación horizontal.

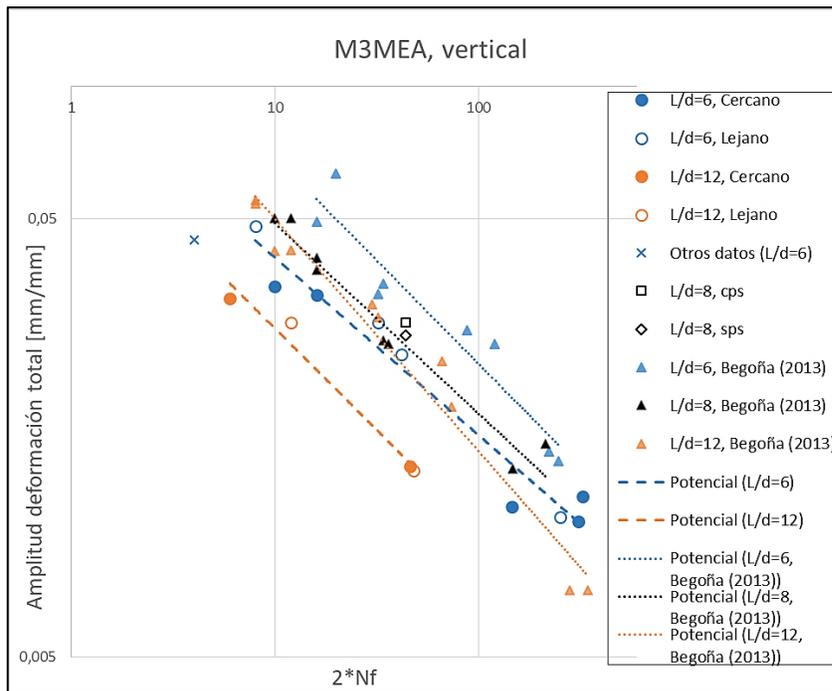


Figura 4.17 Ensayos barras electrosoldadas pre ciclado y post ciclados de muros M3MEA, orientación vertical.

En base a los gráficos comparativos de los ensayos pre y post ciclado de muros, se puede deducir que con respecto a las barras inalteradas obtenidas por Begoña (2013) (ver

también Figura 4.16 a Figura 4.17, y Figura D.0.1 a Figura D.0.2 de Apéndice C), tal como ya se había mencionado, existe una pérdida de capacidad, representada en la disminución de la cantidad de ciclos a la rotura frente a un mismo nivel de deformación, esto tanto para barras de $L/d=6$ y $L/d=12$. Esta pérdida varía entre un 20% a 50% en cuanto a la disminución de ciclos finales en las distintas configuraciones de las barras dentro de la malla.

Como se puede apreciar en los gráficos de M3MEB horizontal, y M3MEA vertical, hay datos de barras $L/d=6$ que no son incluidos dentro de las líneas de tendencia. Esto, se debe principalmente a que los resultados que se obtuvieron para ellos se alejan un poco de la tendencia obtenida para el conjunto respectivo. Esto puede ocurrir por dos posibles razones: perdieron capacidad durante el proceso de extracción de las barras desde el concreto, o, sufrieron daño al estar en la diagonal opuesta a la que falló por corte, ya que esta también presenta un agrietamiento con pérdida de recubrimiento, pudiendo las barras haber trabajado más de lo esperado.

Por ejemplo, la probeta PV1EA5-ld6e5 (1), perteneciente los ensayos sobre las barras verticales del muro M3MEA, se encuentran localizadas en la diagonal agrietada (contraria a la falla), tal como se indica en la Figura 4.18 (a). Lo mismo sucede con las probetas PH4EB2-ld6e3 (2) y la probeta PH6EB2-ld6e3 (3) de las barras extraídas sobre los fierros horizontales del muro M3MEB, señaladas en la Figura 4.18 (b).



Figura 4.18. Casos especiales barras sobre diagonal opuesta a la de falla. (a) Muro M3MEA, (b) Muro M3MEB.

En general, se puede dilucidar a partir de la información expuesta, que las barras trabajaron en su mayoría al ser ciclado los muros, viéndose afectada ambas diagonales, al igual que las barras cercanas a los elementos de borde. No obstante, cabe recalcar que aún así, las barras poseen una capacidad remanente capaz de aguantar ciclos de bajas deformaciones sin mayores problemas antes de llegar a la rotura.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

Cuando se habla de terremotos, se habla por lo general de bajas a medianas deformaciones y de baja cantidad de ciclos que, si se miden en el tiempo, llevan a la fatiga del material de refuerzo. Como se ha visto anteriormente y como resultado de investigaciones anteriores, barras amarradas con fierros de construcción, conllevan un buen desempeño a la hora de actuar como refuerzo, donde de acuerdo a lo establecido por Begoña Hamasaki (2013), para barras de $\phi 8$ y $\phi 16$, se puede extender las curvas de Brown y Kunnath para predecir el comportamiento frente a cargas de bajos ciclos.

Para las barras de $\phi 8$ estudiadas de las mallas electrosoldadas, en primer lugar, es posible apreciar una disminución de la capacidad al pasar de una barra $L/d=6$ a $L/d=12$, netamente por efecto del pandeo, corroborando que lo propuesto por Monti y Nuti (1992), es válido hasta aún después de un ciclado que pudo haber afectado en mayor medida a la barra.

También, es posible concluir que las barras, a pesar de que pierden su capacidad con respecto al estado inalterado, y si bien existe pérdida de capacidad para probetas próximas a la zona de falla, ésta reducción no es considerablemente grande, siendo de hasta un 20%, lo que puede indicar que la malla no solo trabaja en la zona del corte en la diagonal, sino que también se pueden distribuir esfuerzos hacia los elementos de borde, lo que hace que la diferencia no sea tan grande entre las barras cercanas y lejanas a la zona de falla.

Frente a lo anterior, se puede atribuir que algunas de las barras consideradas “lejanas” a la falla, se encuentran sobre la diagonal perpendicular respecto a donde se produce el corte. Como se da cuenta en el análisis de los resultados, existen algunas de estas barras que se localizan sobre la diagonal agrietada que fueron marginadas de las líneas de tendencias, debido a su mayor pérdida de capacidad.

Ahora bien, en lo que respecta al trabajo de las barras orientadas horizontalmente versus las orientadas verticalmente, se tienen leves diferencias en dónde las primeras trabajan más ante deformaciones pequeñas, mientras que las segundas se ven afectas ante deformaciones levemente mayores.

Cuando se llevan a comparación las barras ensayadas en este trabajo de título, con respecto a las pre cicladas, se asume válido que el comportamiento de las barras

electrosoldadas llevadas a la fatiga en bajo número de ciclos, es similar al que corresponde a las barras tradicionales [13]. Es por ello que es posible comparar, además, como afecta el ciclado de muros, teniendo como base los ensayos a barras inalteradas de barra tradicional [11], que tienen la particularidad de que, al igual que las probetas utilizadas para este trabajo de título, poseen una relación de aspecto $L/d=6$ y $L/d=12$, en fierros de diámetro $\phi 8$. Para complementar, sería necesario realizar más ensayos en barras de muro post ciclados, con relaciones de $L/d=8$.

Para próximos trabajos de título, se recomienda realizar ensayos cíclicos en mallas amarradas provenientes muros ensayados cíclicamente, para obtener curvas de vida a la fatiga y así establecer una comparación con respecto al comportamiento de las barras que provienen de mallas electrosoldadas (como las vistas en esta memoria). Adicionalmente, se recomienda efectuar ensayos monotónicos de tracción directa para estudiar las propiedades mecánicas, y ver la deformación remanente que tienen las probetas electrosoldadas vs amarradas, que a diferencia del estudio realizado por Joaquín Urzúa (2019) de barras de acero soldable, estos ensayos se realizarían post ciclado, teniendo la precedencia que, para barras soldadas inalteradas al compararla con las amarradas, dan resultados similares en cuánto a su comportamiento.

Si bien posible rescatar lo que sucede dentro la malla post ciclado del muro, sería un buen caso de estudio el analizar cómo se comportan los elementos de borde para las disposiciones de enfierradura amarrada y electrosoldada, es decir, como se ven afectadas las barras para distintos niveles de deformaciones, considerando que estos elementos presentan estribos y ganchos que de igual manera trabajaron en los ensayos previos.

Bibliografía

- [1] ACMA. Malla ACMA A630S, productividad, seguridad y resistencia para sus obras. (2019).
- [2] Estudio experimental de mallas electrosoldadas ACMA® A630S en muros y losas de H.A. Santiago, Chile, 2018.
- [3] Estudio experimental de mallas electrosoldadas con acero A630S certificado soldable en muros y losas de H.A. Santiago, Chile, 2018.
- [4] Massone, L. y Moroder, D. Buckling modeling of reinforcing bars with imperfections. *Engineering Structures*, V. 31, No. 3, 2009, pp. 758 – 767
- [5] Dodd, L. L. y Restrepo-Posada, J.I. Model for Predicting Cyclic Behavior of Reinforcing Steel. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 121, No. 3, 1995, pp. 433 – 445.
- [6] Monti, G. y Nuti, C. Nonlinear Cyclic Behavior of Reinforcing Bars Including Buckling. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.118, No. 12, 1992, pp. 3268 – 3284.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Koh, S.K. y Stephens, R.I. Mean Stress Effects on Low Cycle Fatigue For a High Strength Steel. *Fatigue Fracture of Engng Mater and Struct*, Vol. 14, No. 4, 1991, pp. 413 – 428.
- [10] Brown, J y Kunnath, S.K. Low Cycle Fatigue Failure of Reinforcing Steel Bars. *ACI Materials Journal*, V. 101, No. 6, 2004, pp. 457 – 466.
- [11] Hamasaki, Begoña. “Estudio experimental de la fatiga por bajo número de ciclos de barras longitudinales para elementos de hormigón armado”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad De Chile, 2013.
- [12] CAP. Acero- Especificación Aceros Especiales, 2018.

[13] Urzua, Joaquín. “Estudio de factibilidad técnica del uso de soldaduras para prefabricar armaduras de refuerzo de hormigón armado”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad De Chile, 2019.

[14] Herrera, Pablo. “Estudio experimental del comportamiento de barras de refuerzo en muros de hormigón armado pertenecientes a un edificio dañado durante el terremoto del 2010”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad De Chile, 2014.

[15] Egger, Jorge. “Análisis experimental de fatiga cíclica en barras de refuerzo de acero de alta resistencia mediante fotogrametría”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad De Chile, 2020.

[16] Instituto Nacional de Normalización. NCh 204 – 2006 Acero – Barras Laminadas en Caliente Para Hormigón Armado.

[17] Instituto Nacional de Normalización. NCh 3334:2014 Acero - Barras Laminadas en Caliente Soldables Para Hormigón Armado - Requisitos.

Apéndice A

Fichas técnicas

A.1 Ficha técnica barras acero soldables

Propiedades mecánicas de barras CAP-SOL

Propiedades Mecánicas de Barras Soldables CAP-SOL		BARRAS-ROLLOS NCh 204 grado A630 ASTM 615 grado 60
Rm mínima efectiva	Rm mín. (MPa)	630
Re (rango de fluencia)	Re máx. (MPa)	580
	Re mín (MPa)	420
Razón Rm/Re		≥ 1.25
Alargamiento porcentual de ruptura mínimo en probeta de 200 mm entre marcas		$(7000/Rm)-k$

Figura A.0.1. Propiedades mecánicas barras soldables CAP.

A.2 Ficha técnica mallas electrosoldadas A630s.

Características Técnicas:	
Propiedad	Valor:
Resistencia a la Tracción	630 MPa mín.
Tensión de Fluencia	420 MPa mín. - 580 MPa máx.
Relación Tracción/Fluencia	1,25 mín.

*Cumple con Norma Chilena NCh 204.

Figura A.0.2. Características técnicas mallas ACMA A360s.

Apéndice B

Inspección visual mallas

Una vez extraídas las mallas desde el interior del concreto, y analizando la falla, se observa que producto del ciclado de muros y las solicitaciones, se produce una grieta en la diagonal del muro, la cual se produce generalmente cuando la capacidad resistente (del muro) a fuerza cortante es inferior a la de flexión, donde al igual que en una falla por flexión, los talones del muro pueden agrietarse.

Otra de las observaciones que se puede realizar a primera vista, es que no solo se produce una grieta en la diagonal de corte, sino que también se produce un leve agrietamiento en la diagonal perpendicular a la de falla, donde es posible visualizar ciertas fisuras, como por ejemplo, en la zona que se encuentra bajo la falla de la diagonal de corte (ver Figura B.0.1 (a)). Esta distribución de fisuras dentro del muro, es un indicio de que no solo las zonas aledañas o contiguas a la grieta principal trabajaron, sino que el daño se distribuyó a otras zonas del muro. Esto último, es posible verlo en que no existe una diferencia notoria de pérdida de capacidad entre las barras cercanas y más lejanas a la zona de falla, tal como se menciona en el capítulo de Resultados.

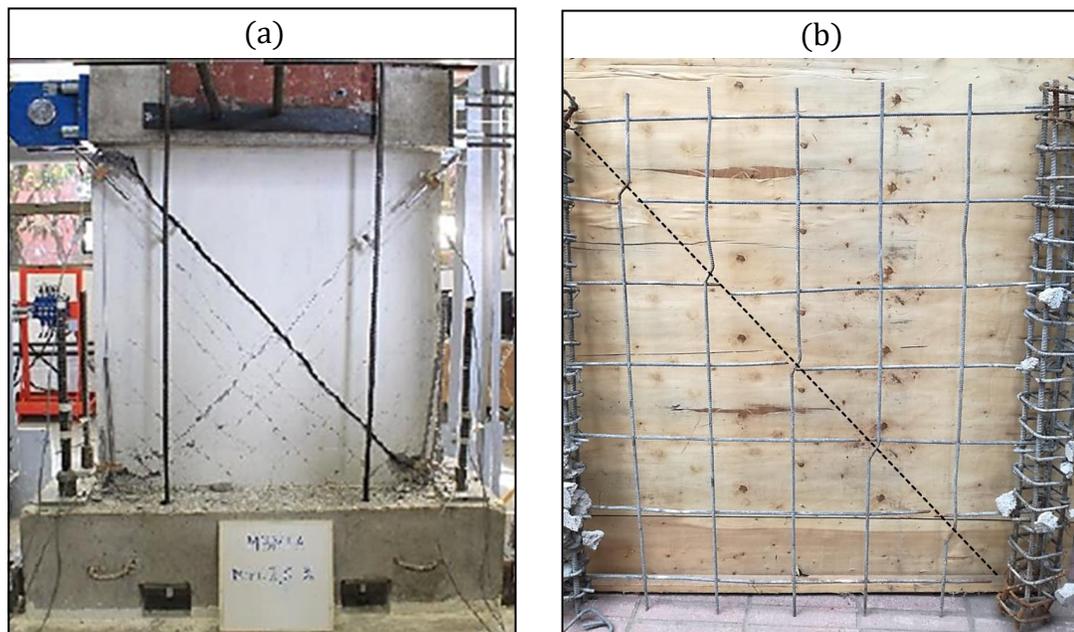


Figura B.0.1. Falla en diagonal. (a) Muro M3MEA, (b) Malla Muro M3MEA

En la Figura B.0.1 (a) se muestra la diagonal de falla a modo de grieta en el concreto, mientras que en la Figura B.0.1 (b) se muestra ésta misma, pero a diferencia de la primera, se aprecia como se ve afectada la enfierradura producto de la tensión diagonal. Realizando una inspección visual, es posible visualizar que, a lo largo de esta falla, las barras verticales se ven afectadas mediante un pandeo local de estas, mientras que en las barras horizontales se produce corte y separación de las barras. Lo mencionado, también se puede ver en el análisis de la malla electrosoldada proveniente de la configuración B de la serie de muros M3.

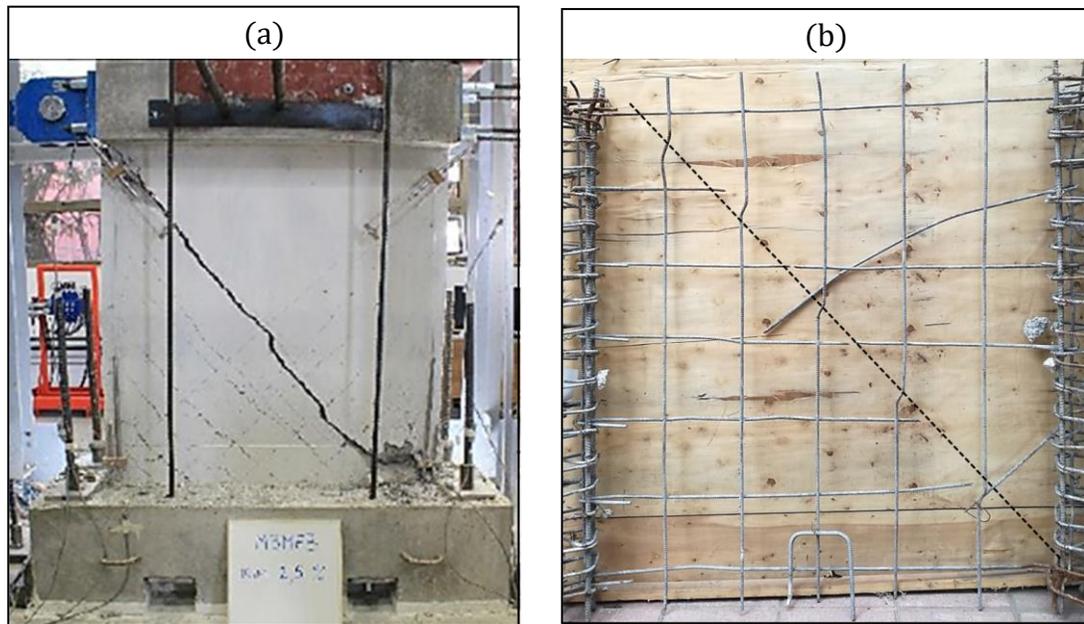


Figura B.0.2. Falla en diagonal. (a) Muro M3MEB, (b) Malla Muro M3MEB

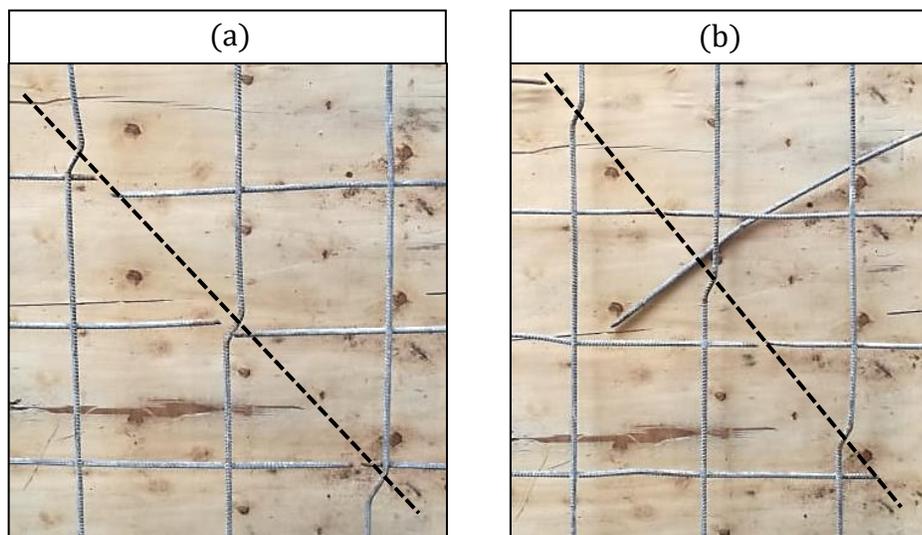


Figura B.0.3. Acercamiento a zona de falla y daño en las barras de malla:(a) Malla muro M3MEA. (b) Malla muro M3MEA.

Junto con lo anterior, se distingue que las barras verticales pandeadas localmente, y los cortes de las barras horizontales, no sigue un patrón en relación con los puntos de soldadura, es decir, no presenta una tendencia a fallar en la posible zona crítica que representan los encuentros entre las barras horizontales y verticales del mallado, donde probablemente se produciría una falla frágil a primera impresión debido a las solicitaciones que actúan sobre el muro. Esto es posible verificarlo realizando un acercamiento en la zona de falla, y comparando cómo se ven afectadas las mallas del muro M3MEA y M3MEB, tal como se presenta en la figura anterior.

La figura B.0.3, muestra un acercamiento a la zona central donde se produce la falla en las mallas de los muros M3MEA y M3MEB, donde es posible dilucidar, que por ejemplo para la malla proveniente del muro M3MEA, el pandeo local de las barras verticales y los cortes en barras horizontales, se producen muy cerca del punto soldadura entre las barras, pero aun así, no falla exactamente en éste. Por el contrario, en la malla del muro M3MEB, presenta cortes y barras verticales pandeadas, en zonas intermedias entre las uniones electrosoldadas de los fierros, lo que esclarece lo expuesto en el párrafo anterior.

Algo similar sucede con la malla proveniente del muro con refuerzo de fierro preparado (M3FPA), el cual no falla en los puntos de unión, sino que tiende a fallar en la diagonal, o cercano a ésta, donde hay una mayor dispersión de los puntos críticos de falla debido al deslizamiento de las amarras, lo cual se observa en la figura B.0.4.

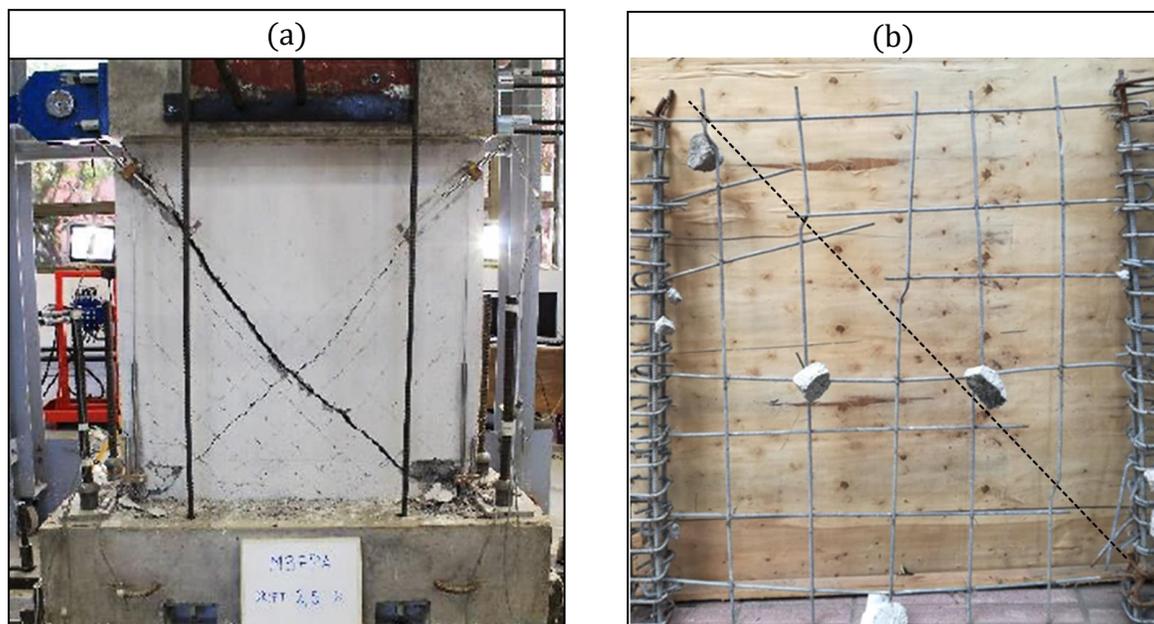


Figura B.0.4. Falla en diagonal. (a) Muro M3FPA, (b) Malla Muro M3FPA

Apéndice C

Código de programación

C.1 Procesamiento de datos máquina universal

```
clc; clear all; close all;
reg1=load('PV4FPAA2-1d6e3d.txt'); %lectura archivo en Volt
reg2='PV4FPAA2-1d6e3.xlsx';

%LECTURA DATOS TXT (LabView)
carga=-reg1(:,1)*611.3124*10; %Carga en [kgf]
carga=carga-carga(1,1);
despl=-reg1(:,2)*30.54-61.716; %Desplazamiento en [mm]
despl=despl-despl(1,1);
ext=-reg1(:,3)*1.2389; %Extensometro en [mm] considerando 25mm
ext=ext-ext(1,1);

t=0:0.05:0.05*(length(carga)-1); %Creación vector tiempo

%LECTURA DATOS EXCEL (Partner)
excel=xlsread(reg2);
tiempo2=excel(:,1); %tiempo en [s]
despl2=excel(:,2); %desplazamiento en [mm]
carga2=excel(:,3); %carga en [kgf]

%CONSTANTES DE CONVERSIÓN, ÁREA y LONGITUD BARRA
conv=9.80665; %conversión kgf a N (1kgf=9,8N)
area=pi*4^2; %área barra phi8 [mm^2]
largo=8*6; %L=6*d [mm]
largoe=25; %Largo extensómetro 25 [mm]

%CORRECCION TIEMPOS DE SUPERPOSICION Y RUPTURA
tsuperpos=43.55; %tiempo para calzar gráficos /poner 0 para empezar
i0=find(t>=tsuperpos); %índice donde despl=0 y carga=0, para calzar gráficos
excel y txt
dd=despl(i0);
cc=carga(i0);
ee=ext(i0);
tt=t(1:length(dd));

text=48.4; %tiempo en que se saca extensómetro /empezar con 10000
iext=find(tt<=text);

trupt=357.4; %tiempo en el que se produce ruptura /empezar con 10000
indices1=find(tt<=trupt); %tomar valores antes de la ruptura
indices2=find(tiempo2<=trupt); %tomar valores antes de la ruptura

%CONVERSION A TENSION Y DEFORMACIONES
c1=-cc(indices1)*conv/area; %Tensión LabView
```

```

c2=carga2(indices2)*conv/area; %Tensión Partner
d1=-dd(indices1)/largo; %Deformación LabView
d2=despl2(indices2)/largo; %Deformación Partner
t1=tt(1:length(c1));
t2=tiempo2(1:length(c2));
e=ee(iext)/largo; %Deformación Extensómetro

%GRÁFICOS
figure(1)
hold on
subplot(1,3,1)
plot(d1,c1)
xlabel('Desplazamiento [-]'); ylabel('Tensión [MPa]'); title('Datos LabView
barra \phi8')
grid on; grid minor
subplot(1,3,2)
plot(d2,c2)
xlabel('Desplazamiento [-]'); ylabel('Tensión [MPa]'); title('Datos Partner
barra \phi8')
grid on; grid minor
subplot(1,3,3)
plot(e,c1(iext))
xlabel('Desplazamiento [-]'); ylabel('Tensión [MPa]'); title('Datos
Extensómetro barra \phi8')
grid on; grid minor

figure(2)
hold on; grid on; grid minor
plot(tiempo2,despl2)
xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Despl [mm]'); title('Desplazamiento aplicado
barra \phi8')
hold on; grid on; grid minor
plot(tt,-dd,'r')
xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Despl [mm]'); title('Desplazamiento aplicado
barra \phi8')
legend('Partner','Labview')

figure(3)
hold on; grid on; grid minor
plot(tiempo2,carga2)
xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Fuerza [tonf]'); title('Carga aplicada barra
\phi8')
hold on; grid on; grid minor
plot(tt,-cc,'r')
xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Fuerza [tonf]'); title('Carga aplicada barra
\phi8')
legend('Partner','Labview')

figure(4)
hold on; grid on; grid minor
plot(tt(iext),-ee(iext))
xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Despl [mm]'); title('Desplazamiento aplicado
barra \phi8')
legend('Extensómetro')

%% CORRECCIÓN MODULO ELASTICIDAD
l1=[]; l2=[]; l3=[]; %Rangos lineales
l1=9:22; %LabView

```

```

l2=12:22; %Partner
l3=1:6; %Extensómetro

xe=e(l3); ye=c1(l3); Xe=[xe,ones(length(xe),1)]; coefe=Xe\ye; %parámetros
regresión lineal Extensómetro
if abs(200000-coefe(1))/200000<=0.1
    Ex=[e(l3);max(c2)/coefe(1)];
    Ey=[c1(l3);max(c2)];
    coefe(1)=round(coefe(1));
else
    Ex=[0 max(c2)/200000];
    Ey=[0 max(c2)];
    coefe(1)=200000;
end

figure(5)
hold on; grid on; grid minor
plot(Ex,Ey,'-.kx')
plot(d1(l1),c1(l1))
plot(d2(l2),c2(l2)) %Poner solo rango lineal
xlabel('Deformación [mm/mm]'); ylabel('Tensión [MPa]'); title('Gráfico
tensión-deformación');
legend(strcat('E=',num2str(coefe(1)),' MPa'),'LabView','Partner')

x1=d1(l1); y1=c1(l1); X1=[x1,ones(length(x1),1)]; coef1=X1\y1; %parámetros
regresión lineal LabView
x2=d2(l2); y2=c2(l2); X2=[x2,ones(length(x2),1)]; coef2=X2\y2; %parámetros
regresión lineal Partner

Eext=coefe(1); %Módulo elasticidad Extensómetro
Emaq1=coef1(1); %Módulo elasticidad LabView
Emaq2=coef2(1); %Módulo elasticidad Partner

largo2=length(c2(1:l2(1)));
d2(1)=(d2(l2(1))*Emaq2-c2(l2(1)))/Emaq2;
for i=2:largo2;
    d2(i)=c2(i)/Emaq2+d2(1);
end
d2=d2-d2(1);

ereal1=[];
for i=1:length(c1)
    ereal1(i)=d1(i)-c1(i)*(Eext-Emaq1)/(Eext*Emaq1);
end

ereal2=[];
for i=1:length(c2)
    ereal2(i)=d2(i)-c2(i)*(Eext-Emaq2)/(Eext*Emaq2);
end

figure(13)
hold on
grid on; grid minor;
plot(ereal2,c2)
plot(d2,c2)

figure(6)
hold on; grid on; grid minor

```

```

plot(Ex,Ey, '-.kx')
plot(ereal1(l1),c1(l1))
plot(ereal2(l2),c2(l2)) % Poner solo rango lineal
xlabel('Deformación [mm/mm]'); ylabel('Tensión [MPa]'); title('Gráfico
tensión-deformación');
legend(strcat('E=',num2str(coefe(1)), ' MPa'),'Ajuste LabView','Ajuste
Partner') %legend('LabView','Partner','Extensómetro')

figure(7)
hold on; grid on; grid minor
plot(d1,c1)
plot(ereal1,c1)
plot(Ex,Ey, '-.kx')
xlabel('Deformación [mm/mm]'); ylabel('Tensión [MPa]'); title('Gráfico
tensión-deformación');
legend('LabView','Ajuste LabView','Extensometro')

figure(8)
hold on; grid on; grid minor
plot(d2,c2)
plot(ereal2,c2)
plot(Ex,Ey, '-.kx')
xlabel('Deformación [mm/mm]'); ylabel('Tensión [MPa]'); title('Gráfico
tensión-deformación, L/d=6, \epsilon=3%');
legend('Partner','Ajuste Partner','Extensometro')

figure(11)
hold on; grid on; grid minor
plot(Ex,Ey, '-.kx')
plot(d2(1:100),c2(1:100)) %Poner solo rango lineal
xlabel('Deformación [mm/mm]'); ylabel('Tensión [MPa]'); title('Tramo inicial
curvas tensión-deformación, L/d=6, \epsilon=3%');
legend(strcat('Extensómetro, E=',num2str(coefe(1)), ' MPa'),'Datos Partner')

figure(14)
hold on; grid on; grid minor
plot(Ex,Ey, '-.kx')
plot(d2(1:100),c2(1:100)) %Poner solo rango lineal
plot(ereal2(1:100),c2(1:100)) %Poner solo rango lineal
xlabel('Deformación [mm/mm]'); ylabel('Tensión [MPa]'); title('Tramo inicial
curvas tensión-deformación, L/d=6, \epsilon=3%');
legend(strcat('Extensómetro, E=',num2str(coefe(1)), ' MPa'),'Datos Partner',
'Corrección')

figure(12)
hold on; grid on; grid minor
plot(d2,c2)
plot(ee(iext)/largoe,-cc(iext)*conv/area)
% plot(ee(iext)/largoe,-cc(iext)*conv/area)
xlabel('Deformación [mm/mm]'); ylabel('Tensión [MPa]'); title('Gráfico
tensión-deformación, L/d=6, \epsilon=3%');
legend('Datos Partner','Datos Extensómetro')

% CONTEO DE CICLOS
econteo=ereal2';
cconteo=c2;
for i=1:10
    if round(d2(i),3)==0

```

```

        econteo(1)=[];
        cconteo(1)=[];
    end
end
c2c=[0;ccconteo;0];
d2c=[0;econteo;0]; %agrega un cero al principio y al final
ceros=0; %lleva conteo de los ceros
indices=[]; %guarda el índice donde se encuentran los ceros
j1=1; %índice que va de uno en uno.
for i=1:length(d2c)-1
    if d2c(i)>=0 & d2c(i+1)<=0
        ceros=ceros+1;
        indices(j1)=i;
        j1=j1+1;
    elseif d2c(i)<=0 & d2c(i+1)>=0
        ceros=ceros+1;
        indices(j1)=i;
        j1=j1+1;
    end
end
Nciclos=round(ceros/2-1) %numero de ciclos

if econteo(end)<0
    indices(length(indices)+1)=length(d2c);
end

save('indices.mat','indices');

%DEFORMACIONES MAXIMAS Y MINIMAS
c2c=[0;ccconteo;ccconteo(end)];
d2c=[0;econteo;econteo(end)]; %deja matriz de deform igual a la de carga
jmin=1;
jmax=1;
for i=1:length(indices)-1
    imax(i)=max(abs(d2c(indices(i):indices(i+1)))); %guarda máximos y mínimos
    (valores absolutos)
    if rem(i,2)==0
        minimos(jmin)=-imax(i); %los peaks pares 2,4,6,... son mínimos
        jmin=jmin+1;
    else
        maximos(jmax)=imax(i); %los peaks impares 1,3,5,... son máximos
        jmax=jmax+1;
    end
end
maximos(end)=[]; %borra el máximo donde se produce la ruptura

%DEFORMACION MEDIA
for i=1:length(maximos)
    media(i)=(maximos(i)+abs(minimos(i)))/2;
end
Defmedia=sum(media)/length(media)

t2c=tiempo2(1:length(d2c));
indices(end)=[];
ereal2t=ereal2';

figure(9)
hold on

```

```

plot(t2c,d2c)
scatter(t2c(indices),d2c(indices))
title('Ceros')

save('e_maq.mat','d2c');
save('t_maq.mat','t2c');
save('c_maq.mat','c2c');

%% CORROBORAR PUNTO MAXIMOS

%Índices de Ceros donde empieza y termina un ciclo
z=1;
for i=1:length(indices)
    if rem(i,2)~=0
        ceros_ciclo(z)=i;
        z=z+1;
    end
end
indices_ciclo=indices(ceros_ciclo);

%Encontrar índices donde están máximos y mínimos máquina
for i=1:length(maximos)
    for j=1:length(t2c)
        if t2c(j)>=t2c(indices_ciclo(i)) & t2c(j)<=t2c(indices_ciclo(i+1))
            if d2c(j)==maximos(i)
                ind_max(i)=j;
            end
            if d2c(j)==minimos(i)
                ind_min(i)=j;
            end
        end
    end
end

figure(10)
grid on
hold on
plot(t2c,d2c)
scatter(t2c(ind_max),d2c(ind_max),'ko')
scatter(t2c(ind_min),d2c(ind_min),'ko')
legend('Datos máquina')

```

C.2 Procesamiento de fotos

```

clear all
clc
close all
tic
cd('C:\Users\Casa\Documents\Marco_V\Resultados\Ensayos\200127\PV4FPAA2-
1d6e3\Fotos\Fotos_mod'); % Directorio donde están las imágenes.
dir('*JPG'); % Identifica el tipo de archivo en el
directorio.
lista = dir('*JPG'); % Lista con todos los archivos tipo foto.
t_foto = 0:5:5*(length(lista)-1); % Vector de tiempo.
def=0.05;

```

```

a = imread(lista(1).name);           % Vector con la primera imagen.
figure(1)                            % Imagen base donde se obtienen los filtros.
imshow(a)

%% FOTO BASE
[N,M,Z]=size(a);                     %tamaño de la imagen
b = ones(N,M);                       % Tamaño de la foto (3456 x 5184).

x1 = 1486;      y1 = 1975;           % Se ingresa información de los puntos de la
primera imagen base
x2 = 1497;      y2 = 2842;           % antes de que haya movimiento para acotar
la zona de búsqueda.
px1(1) = x1;    py1(1) = y1;        % Puntos iniciales de iteración.
px2(1) = x2;    py2(1) = y2;

for i = y1 - 80 : y2 + 80           % Se filtra la imagen base en y.
    for j = min(x1,x2) - 80 : max(x1,x2) + 80 % Se filtra la imagen base
en x.
        if ((a(i,j,1) >= 200 && a(i,j,1) < 255) && (a(i,j,2) >= 80 && a(i,j,2)
< 210) && (a(i,j,3) >= 10 && a(i,j,3) < 120))
            b(i,j) = 1;
        else
            b(i,j) = 0;
        end
    end
end

%BORRAR DATOS FUERA DE RANGO
for j=1:M
    for i=y1+100:y2-100
        b(i,j)=0;
    end
end
for i=1:N
    for j=1:min(x1,x2)-50
        b(i,j)=0;
    end
    for j=max(x1,x2)+50:M
        b(i,j)=0;
    end
end

xcont1 = 0;      ycont1 = 0;        % Cantidad de datos en x.
xcont2 = 0;      ycont2 = 0;        % Cantidad de datos en y.
xsum1 = 0;       ysum1 = 0;         % Suma de coordenadas en x.
xsum2 = 0;       ysum2 = 0;         % Suma de coordenadas en y.

rad=40;

for i = px1(1) - rad : px1(1) + rad % Radio en x del punto superior.
    for j = py1(1) - rad : py1(1) + rad % Radio en y del punto superior.
        if b(j,i) ~= 0
            xcont1 = xcont1 + 1;
            ycont1 = ycont1 + 1;
            xsum1 = xsum1 + i;
            ysum1 = ysum1 + j;
        end
    end
end

```

```

end
for i = px2(1) - rad : px2(1) + rad      % Radio en x del punto inferior.
    for k = py2(1) - rad : py2(1) + rad  % Radio en y del punto inferior.
        if b(k,i) ~= 0
            xcont2 = xcont2 + 1;
            ycont2 = ycont2 + 1;
            xsum2 = xsum2 + i;
            ysum2 = ysum2 + k;
        end
    end
end

puntox1 = round(xsum1/xcont1);          puntoy1 = round(ysum1/ycont1);
puntox2 = round(xsum2/xcont2);          puntoy2 = round(ysum2/ycont2);

px1(1) = puntox1;          py1(1) = puntoy1;
px2(1) = puntox2;          py2(1) = puntoy2;

%% FOTOS RESTANTES

largo(1) = (py2(1) - py1(1));

for t = 2:length(lista)
    a = imread(lista(t).name);
    b = ones(N,M);
    for i = y1 - 80 : y2 + 80
        for j = min(x1,x2) - 80 : max(x1,x2) + 80
            if ((a(i,j,1) >= 200 && a(i,j,1) < 255) && (a(i,j,2) >= 80 &&
a(i,j,2) < 210) && (a(i,j,3) >= 10 && a(i,j,3) < 120))
                b(i,j) = 1;
            else
                b(i,j) = 0;
            end
        end
    end
end

    %BORRAR DATOS FUERA DE RANGO
for j=1:M
    for i=y1+100:y2-100
        b(i,j)=0;
    end
end

for i=1:N
    for j=1:min(x1,x2)-50
        b(i,j)=0;
    end
    for j=max(x1,x2)+50:M
        b(i,j)=0;
    end
end

xcont1 = 0;          ycont1 = 0;          % Cantidad de datos en x.
xcont2 = 0;          ycont2 = 0;          % Cantidad de datos en y.

xsum1 = 0;          ysum1 = 0;          % Suma de coordenadas en x.

```

```

xsum2 = 0;          ysum2 = 0;          % Suma de coordenadas en y.

for i = px1(t-1) - rad : px1(t-1) + rad    % Radio en x del punto
superior.
    for j = py1(t-1) - rad : py1(t-1) + rad % Radio en y del punto
superior.
        if b(j,i) ~= 0                    % b(y,x)
            xcont1 = xcont1 + 1;
            ycont1 = ycont1 + 1;
            xsum1 = xsum1 + i;
            ysum1 = ysum1 + j;
        end
    end
end
for i = px2(t-1) - rad : px2(t-1) + rad    % Radio en x del punto
inferior.
    for k = py2(t-1) - rad : py2(t-1) + rad % Radio en y del punto
inferior.
        if b(k,i) ~= 0                    % b(y,x)
            xcont2 = xcont2 + 1;
            ycont2 = ycont2 + 1;
            xsum2 = xsum2 + i;
            ysum2 = ysum2 + k;
        end
    end
end

puntox1 = round(xsum1/xcont1);      puntox2 = round(xsum2/xcont2);
puntoy1 = round(ysum1/ycont1);      puntoy2 = round(ysum2/ycont2);

px1(t) = puntox1;      py1(t) = puntoy1;
px2(t) = puntox2;      py2(t) = puntoy2;

largo(t) = (py2(t) - py1(1));
e_foto(t) = (largo(t) - largo(1))/largo(1);

figure(2)

subplot(3,2,[1 5])
plot(t_foto(1:t),e_foto(1:t),'r'), title('Def. Unitaria entre Ptos. '),
xlabel('Tiempo, [s]'), ylabel('Def. Unitaria, [-]'),
axis([0 t_foto(end)+50 -(def+0.01) (def+0.01)])
pause(0.0001)
grid on, grid minor, hold on

subplot(3,2,[2 6])
spy(b), xlim([min(x1,x2)-400 max(x1,x2)+400]), ylim([y1-100 y2+100])
hold on
plot(px1(t),py1(t),'*y',px2(t),py2(t),'*y')
title([num2str(t)])
hold off
end

p_barra = [py1' py2'];
delta = largo - largo(1,1);          % Delta barra en pixeles.
e_foto = delta/largo(1,1);          % Deformación unitaria.
save('e_barra.mat','e_foto');
save('t_foto_barra.mat','t_foto');

```

```

save('p_barra.mat','p_barra');

toc

%CORRECCIÓN CURVA

clc; clear all; close all;

cd('C:\Users\Casa\Documents\Marco_V\Resultados\Ensayos\200127\PV4FPAA2-
1d6e3\Fotos\Fotos_mod')
load('e_barra.mat','e_foto');
load('t_foto_barra.mat','t_foto');
load('p_barra.mat','p_barra');

cd('C:\Users\Casa\Documents\Marco_V\Resultados\Ensayos\200127\PV4FPAA2-
1d6e3\Datos')
load('e_maq.mat','d2c');
load('t_maq.mat','t2c');
load('c_maq.mat','c2c');
load('indices.mat')

tsuperpos=15; %tiempo para calzar graficos /poner 0 para empezar
i0=find(t_foto>=tsuperpos); %indice donde despl=0 y carga=0, para calzar
gráficos excel y txt
e_foto=e_foto(i0);
t_foto=t_foto(1:length(e_foto));

e_foto=e_foto-e_foto(1);
y=detrend(e_foto);

e_maq=d2c;
c_maq=c2c;
t_maq=t2c;

figure(1)
grid on
hold on
plot(t_foto,e_foto)
plot(t2c,d2c)
legend('Fotogrametría','Datos máquina')

figure(2)
grid on
hold on
plot(t_foto(1:end-2),e_foto(1:end-2))
xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Deformación unitaria [mm/mm]')
ylim([-0.05 0.05]);
legend('Datos fotogrametría')
plot(t_foto,e_foto-y,':b')
title('Deformación unitaria fotogrametría, L/d=6, \epsilon=3%')

figure(3)
grid on
hold on
plot(t_foto(1:end-2),e_foto(1:end-2))
plot(t_foto(1:end-2),y(1:end-2))
xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Deformación unitaria [mm/mm]')

```

```

ylim([-0.05 0.05]);
legend('Datos fotogrametría','Datos centrados')
plot(t_foto,y-y,':r')
title('Deformación unitaria fotogrametría, L/d=6, \epsilon=3%')

e_foto=detrend(e_foto);

[e_foto_max,t_foto_max] =
findpeaks(e_foto,t_foto,'MinPeakHeight',0.0001,'MinPeakDistance',10);
[e_foto_min,t_foto_min] = findpeaks(-
e_foto,t_foto,'MinPeakHeight',0.0001,'MinPeakDistance',10);

[e_max,t_max] =
findpeaks(e_maq,t_maq,'MinPeakHeight',0.001,'MinPeakDistance',20);
[e_min,t_min] = findpeaks(-
e_maq,t_maq,'MinPeakHeight',0.001,'MinPeakDistance',20);
% e_max(end)=[]; %borra el máximo donde se produce la ruptura
e_min=-e_min;

dif_peaks_e(1,:) = (e_max - e_foto_max') ./ e_max;
dif_peaks_e(2,:) = (e_min - (-e_foto_min')) ./ e_min;

e_peaks(1,:) = e_max;          e_ceros(1,1) = e_maq(1);
e_peaks(2,:) = e_min;          t_ceros(1,1) = t_maq(1);

for i = 10:length(e_maq)-1 % Tiempo para el cual el ensayo partió pero sin
haber completado un ciclo.
    if e_maq(i) == 0 & e_maq(i+1) > e_maq(i)
        e_ceros = [e_ceros, -e_maq(i)];
        t_ceros = [t_ceros, t_maq(i)];
    elseif e_maq(i)*e_maq(i+1) < 0 & e_maq(i+1) > e_maq(i)
        e_ceros = [e_ceros, e_maq(i)];
        t_ceros = [t_ceros, t_maq(i)];
    end
end

e_ceros(1,end) = e_maq(end);
t_ceros(1,end) = t_maq(end);

fm = 20;

%Índices de Ceros donde empieza y termina un ciclo
z=1;
for i=1:length(indices)
    if rem(i,2)~=0
        ceros_ciclo(z)=i;
        z=z+1;
    end
end
indices_ciclo=indices(ceros_ciclo);

e_foto_corr = e_maq;    i_ceros = indices_ciclo;

for i = 1:length(e_foto_max) % Se recorren los ciclos.
    for j = floor(i_ceros(i)):floor(i_ceros(i+1))
        poly_e = polyfit(e_peaks(:,i), dif_peaks_e(:,i),1);
        difp_e = polyval(poly_e, e_foto_corr(j));
    end
end

```

```

        e_foto_corr(j) = (1 - difp_e)*e_maq(j);           % Def. Unitaria
Corregida por Fotogrametría.
    end
end

figure(6)
grid on
hold on
plot(t_foto,e_foto)
plot(t2c,d2c)
scatter(t_max,e_max,'ko')
scatter(t_foto_max,e_foto_max,'k*')
scatter(t_min,e_min,'ko')
scatter(t_foto_min,-e_foto_min,'k*')
legend('Fotogrametría','Datos máquina','Peaks Máquina','Peaks Fotogrametría')
xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Deformación unitaria [mm/mm]')
title('Deformación unitaria fotogrametría, L/d=6, \epsilon=3%')

figure(7)
grid on
hold on
plot(t_foto,e_foto)
plot(t2c,d2c)
scatter(t_max,e_max,'ko')
scatter(t_foto_max,e_foto_max,'k*')
scatter(t_min,e_min,'ko')
scatter(t_foto_min,-e_foto_min,'k*')
plot(t2c,e_foto_corr,'.-')
legend('Fotogrametría','Datos máquina','Peaks Máquina','Peaks Fotogrametría')
xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Deformación unitaria [mm/mm]')
title('Deformación unitaria fotogrametría, L/d=6, \epsilon=3%')

%% DEFORMACION

%Encontrar índices donde están máximos y mínimos foto
for i=1:length(e_foto_max)
    for j=1:length(t_foto)
        if t_foto(j)>=t2c(indices_ciclo(i)) &
t_foto(j)<=t2c(indices_ciclo(i+1))
            if e_foto(j)==e_foto_max(i)
                ind_max_f(i)=j;
            end
            if e_foto(j)==e_foto_min(i)
                ind_min_f(i)=j;
            end
        end
    end
end

%Encontrar índices donde están máximos y mínimos maquina
for i=1:length(e_max)
    for j=1:length(t2c)
        if t2c(j)>=t2c(indices_ciclo(i)) & t2c(j)<=t2c(indices_ciclo(i+1))
            if d2c(j)==e_max(i)
                ind_max(i)=j;
            end
            if d2c(j)==e_min(i)
                ind_min(i)=j;
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end

ecorregido=e_foto_corr;
ecorregido=ecorregido-ecorregido(1);
tcorregido=t2c(1:length(ecorregido));
maximos_ec=ecorregido(ind_max);
minimos_ec=ecorregido(ind_min); %máximos y mínimos e corregido

%DEFORMACION MEDIA
for i=1:length(maximos_ec)
    media(i)=(maximos_ec(i)+abs(minimos_ec(i)))/2;
end
Defmedia=sum(media)/length(media)

figure(8)
grid on
hold on
plot(t_foto,e_foto)
plot(t2c,d2c)
plot(tcorregido,ecorregido,'.-')
xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Deformación unitaria [mm/mm]')
legend('Fotogrametría','Datos máquina','Corrección')

figure(9)
hold on
grid on; grid minor
plot(d2c,c2c)
plot(ecorregido,c2c(1:length(ecorregido)))
xlabel('Deformación unitaria [mm/mm]'); ylabel('Tensión [MPa]')
legend('Datos máquina','Corrección fotogrametría')

```

Apéndice D

Resumen de resultados

D.1 Resultados ensayos Begoña Hamasaki (2013).

Tabla D.0.1. Resultados Begoña (2013), barras
L/d=6, ϕ 8, A630-420H

L/d=6		
N° ciclos	2Nf	Ampl. Def.
124	248	0,014
111	222	0,0147
60	120	0,0258
44	88	0,0278
16	32	0,0336
17	34	0,0355
8	16	0,0492
10	20	0,0633

Tabla D.0.2. Resultados Begoña (2013), barras
L/d=8, ϕ 8, A630-420H

L/d=8		
N° ciclos	2Nf	Ampl. Def.
107	214	0,0153
74	148	0,0134
17	34	0,0263
18	36	0,0259
8	16	0,0382
8	16	0,0406
6	12	0,05
5	10	0,05

Tabla D.0.3. Resultados Begoña (2013), barras L/d=12, ϕ 8, A630-420H

L/d=12		
N° ciclos	2Nf	Ampl. Def.
140	280	0,0071
172	344	0,0071
37	74	0,0186
33	66	0,0236
16	32	0,0298
15	30	0,0318
5	10	0,0421
6	12	0,0423
4	8	0,055
4	8	0,054

D.2 Resultados ensayos barras malla M3MEA

Tabla D.0.4. Resumen de resultados para probetas de la malla proveniente del muro M3MEA

Tipo Malla	Orientación	Probeta	Largo Libre [mm]	L/d	ϵ teórica	Nº Ciclos	2Nf	ϵ
M3MEA	Horizontal	ph1ea2-ld6e1	49	6,125	1%	104	208	0,0108
		ph1ea3-ld6e1	48,5	6,063	1%	138	276	0,0104
		Ph1ea4-ld12e1	96	12	1%	34	68	0,013
		Ph1ea5-ld6e3	50	6,25	3%	16	28	0,0267
		ph2ea1-ld6e1	49	6,125	1%	105	220	0,0095
		ph2ea2-ld6e1	49	6,125	1%	125	276	0,0109
		ph2ea3-ld12e3	96	12	3%	3	6	0,0326
		ph2ea4-ld6e5	48	6	5%	3	6	0,0479
		PH3Ea1-ld12e1	96	12	1%	24	48	0,0136
		ph3ea2-ld6e3	49	6,125	3%	12	24	0,0291
		ph3ea3-ld6e3	48	6	3%	12	24	0,029
		Ph4ea1-ld6e3	50	6,25	3%	12	24	0,029
		Ph4ea2-ld6e3	50	6,25	3%	11	22	0,0302
		ph5ea1-ld12e3	96	12	3%	5	10	0,032
		Vertical	pv1ea1-ld12e1	96	12	1%	23	46
	pv1ea2-ld6e1		49	6,125	1%	162	324	0,0116
	pv1ea3-ld12e1		96	12	1%	24	48	0,0133
	Pv1ea4_ld6e5		50	6,25	5%	4	8	0,048
	Pv1ea5_ld6e5		48	6	5%	2	4	0,0446
	pv2ea1-ld6e1		49	6,125	1%	154	308	0,0102
	pv2ea2-ld6e1		49	6,125	1%	126	252	0,0104
	pv2ea3-ld12e3		95	11,875	3%	5	12	0,029
	Pv2ea4_ld6e3		48	6	3%	21	42	0,0245
	Pv3ea1-ld6e3		51	6,375	3%	6	10	0,035
	pv3ea2-ld6e3		49	6,125	3%	16	32	0,029
	Pv3ea3_ld6e1	50	6,25	1%	73	146	0,011	
Pv4ea1-ld12e3	97	12,125	3%	3	6	0,0329		
Pv5ea1-ld6e3	49	6,125	3%	8	16	0,0335		

D.3 Resultados ensayos barras malla M3MEB

Tabla D.0.5. Resumen de resultados para probetas de la malla proveniente del muro M3MEB

Tipo Malla	Orientación	Probeta	Largo Libre [mm]	L/d	ϵ teórica	Nº Ciclos	2Nf	ϵ
M3MEB	Horizontal	ph2eb1-ld12e1	96,5	12,063	1%	25	50	0,0139
		ph3eb1-ld6e1	48	6	1%	133	266	0,0109
		ph3eb2-ld6e1	48	6	1%	136	272	0,0104
		ph4eb1-ld6e1	48	6	1%	124	248	0,01
		ph4eb2-ld6e3	49	6,125	3%	9	18	0,0293
		ph5eb1-ld6e1	48	6	1%	205	410	0,0115
		ph5eb2-ld6e1	48	6	1%	131	262	0,0112
		ph5eb3-ld6e3	49	6,125	3%	14	28	0,0291
		ph6eb1-ld12e1	96	12	1%	37	74	0,0139
		ph6eb2-ld6e3	49	6,125	3%	8	16	0,0289
		ph6eb3-ld6e3	49	6,125	3%	13	26	0,032
		ph6eb4-ld12e3	96,5	12,063	3%	10	21	0,03
		ph7eb1-ld6e5	49	6,125	5%	7	14	0,0494
		ph7eb2-ld6e5	49	6,125	5%	4	8	0,0485
		ph7eb3-ld12e3	95	11,875	3%	8	16	0,0322
		ph7eb4-ld6e3	50	6,25	3%	11	22	0,0305
	Ph7eb5-ld6e3	49	6,125	3%	16	32	0,0298	
	Vertical	pv3eb1-ld12e1	96	12	1%	43	86	0,0134
		pv3eb2-ld6e3	48	6	3%	12	24	0,0283
		pv4eb2-ld6e1	48	6	1%	122	244	0,011
		pv4eb3-ld6e1	48	6	1%	130	260	0,0095
		pv5eb1-ld12e1	96,5	12,063	1%	28	56	0,0134
		pv5eb2-ld6e1	48	6	1%	119	238	0,0105
		pv5eb3-ld6e3	48	6	3%	11	22	0,032
		pv6eb1-ld6e5	48	6	5%	7	14	0,0491
		pv6eb2-ld6e3	48,5	6,063	3%	13	24	0,0295
pv6eb3-ld6e3		48,5	6,063	3%	12	24	0,028	
pv6eb4-ld12e3	96	12	3%	5	10	0,0326		

D.4 Gráficos comparativos pre y post ciclado de muros M3MEB.

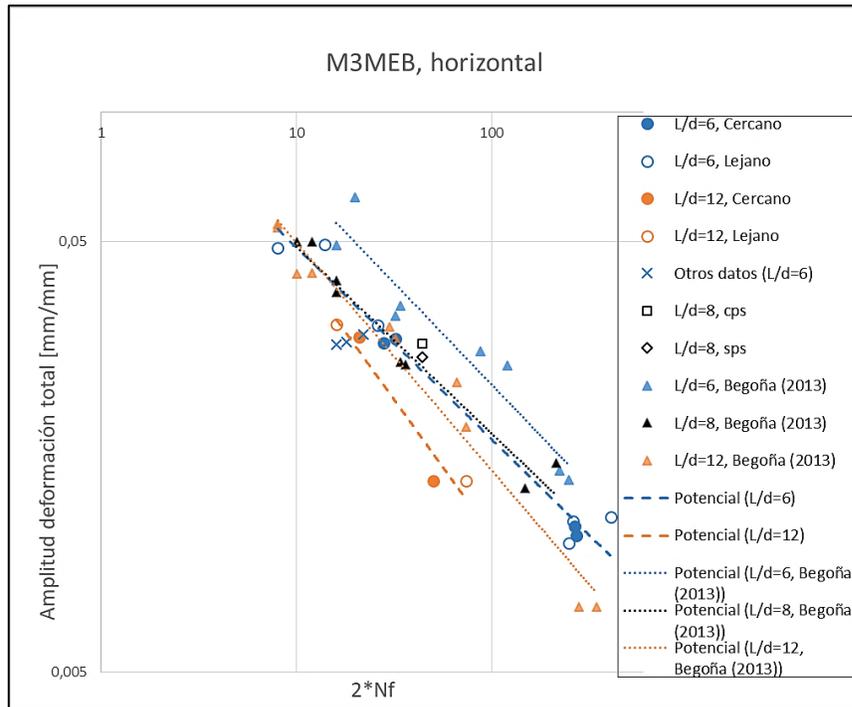


Figura D.0.1 Ensayos barras electrosoldadas pre ciclado y post ciclados de muros M3MEB, orientación horizontal.

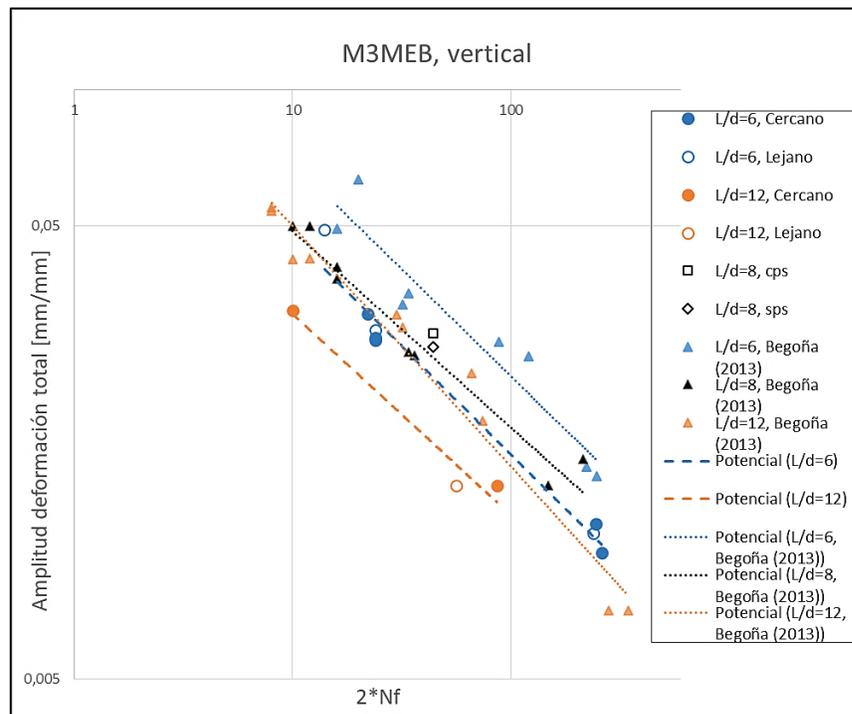


Figura D.0.2 Ensayos barras electrosoldadas pre ciclado y post ciclados de muros M3MEB, orientación vertical.