



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

“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

BEGOÑA SUMIKO HAMASAKI LÓPEZ

PROFESOR GUÍA:  
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RICARDO HERRERA MARDONES.  
MAURICIO SARRAZÍN ARELLANO.

SANTIAGO DE CHILE  
ENERO DE 2013

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
CIVIL  
POR: BEGOÑA SUMIKO HAMASAKI LÓPEZ  
FECHA: 07/01/2013  
PROF. GUÍA: Sr LEONARDO MASSONE S.

“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FATIGA POR BAJO NÚMERO DE CICLOS DE BARRAS LONGITUDINALES PARA ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO”

El terremoto del 27 de febrero de 2010 dejó numerosos daños que afectaron parte de la obra gruesa de las construcciones en el país.

Uno de los patrones más observados fue a nivel de subterráneos y primer piso donde suelen variar la distribución estructural y forma de los muros. Las cabezas de los muros es la zona donde se encuentran las mayores deformaciones de compresión producto de las cargas de flexión y compresión provocando el descascaramiento del muro. Éste fenómeno deja expuestas a las barras de refuerzo, enfrentándolas a la acción sísmica sin restricciones laterales mas allá de los estribos, provocando inevitablemente pandeo en ellas.

Esta Memoria de título tiene como propósito comprender, a través de ensayos experimentales, el comportamiento a la fatiga con bajo número de ciclos de las barras de acero utilizadas en la construcción de elementos de hormigón armado. Se quiere determinar el número de ciclos que son necesarios para que distintas barras de refuerzo fallen por fatiga tras exponerlas a niveles altos de deformación. Además se desea incorporar el pandeo de las barras, ya que en la literatura actual no se ha abordado éste tema. El objetivo de cargar las probetas de forma cíclica es simular un movimiento sísmico y ver el comportamiento de cada una de ellas variando sus características geométricas.

Con éste propósito se varían seis relaciones largo/diámetro ( $L/d$ ) en el caso de barras  $\Phi 8$  y 4 relaciones  $L/d$  para  $\Phi 16$  sometiéndolas a diferentes rangos de deformaciones que varían entre un 1% y un 5% aproximadamente.

Además de demostrar que la relación largo/diámetro tiene poco impacto en el comportamiento de las curvas (obteniéndose un leve aumento en el número de ciclos para el mismo nivel de deformación), se observa la similitud con los modelos existentes en la literatura.

# Agradecimientos

A mis padres por darme todo lo necesario para llegar hasta aquí,

A mi hermano por cortar barras de acero,

A mi hermana por leer mis aburridos avances,

A mi abuelita por su apoyo y fe incondicional,

A mis padrinos por ser parte fundamental de mi formación,

A mis amigas y amigos por deformarme constantemente,

A mi pokemon favorito por soportarme,

A cada persona que ha dejado una marca en mi vida,

Gracias a todos.

# Tabla de Contenido

<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
MOTIVACIÓN .....	1
OBJETIVOS .....	1
<i>Objetivos Generales.....</i>	<i>1</i>
<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>1</i>
ALCANCES .....	1
<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>2</b>
ANTECEDENTES GENERALES .....	2
ANTECEDENTES ESPECÍFICOS .....	3
<i>Pandeo inelástico de barras de refuerzo .....</i>	<i>3</i>
Comportamiento monotónico .....	4
Comportamiento cíclico .....	5
<i>Fatiga de bajos ciclos.....</i>	<i>5</i>
Comportamiento del acero.....	5
Modelos de Koh y Stephens .....	7
Relación Coffin-Manson .....	8
Trabajo experimental de Brown .....	10
<b>ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FATIGA POR BAJO NÚMERO DE CICLOS DE BARRAS LONGITUDINALES PARA ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO .....</b>	<b>11</b>
PROTOCOLO DE ENSAYO .....	12
<i>Consideraciones generales.....</i>	<i>12</i>
<i>Calibración de equipos.....</i>	<i>13</i>
ENSAYOS EXPERIMENTALES .....	14
<i>Montaje de los ensayos.....</i>	<i>14</i>
<i>Ensayos de Prueba .....</i>	<i>16</i>
<i>Ensayos definitivos .....</i>	<i>19</i>
<i>Ensayos a tracción.....</i>	<i>20</i>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>21</b>
CORRELACIÓN LVDT .....	21
CORRECCIÓN MÓDULOS DE ELASTICIDAD .....	24
ESTIMACIÓN DE LA DEFORMACIÓN MEDIA .....	27
CONTEO DE CICLOS A ROTURA .....	27
TABLAS RESUMEN DE RESULTADOS .....	28
<b>CONCLUSIONES Y LIMITACIONES.....</b>	<b>35</b>
CONCLUSIONES.....	35
LIMITACIONES .....	36
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>37</b>

<b>ANEXOS.....</b>	<b>38</b>
ANEXO A: GRÁFICOS .....	38
ANEXO B: VELOCIDADES DE ENSAYO.....	50
ANEXO C: CORRELACIONES ENTRE LVDT .....	51
ANEXO D: MÓDULOS DE ELASTICIDAD CORREGIDOS .....	54
ANEXO E: GRÁFICOS LOG-LOG N° DE CICLOS V/S DEFORMACIÓN.....	57
ANEXO F: MUESTRAS ENSAYOS Y PROBETAS ENSAYADAS.....	62

## Índice de Figuras

Figura 1:	Figura obtenida de los daños del terremoto del 27 de febrero de 2010.....	4
Figura 2:	Curvas monotónicas experimentales (Monti y Nuti, 1992) .....	5
Figura 3:	Curvas cíclicas tensión-deformación.....	5
Figura 4:	Φ8, deformaciones de ≈2% (a), ≈4% (b) .....	6
Figura 5:	Φ16, deformaciones de ≈2% (c), ≈4% (d).....	6
Figura 6:	Amplitud de deformación constante. Ver Lacaze, C. [8].....	7
Figura 7:	Diferencia entre la amplitud máxima y mínima, $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}$ .....	8
Figura 8:	Carga inelástica seguida de una descarga elástica (ver referencia [1]). .....	9
Figura 9:	Respuesta numérica versus respuesta experimental en ensayo de Brown y Kunnath [2] .....	10
Figura 10:	Maquina universal para pandeo Instron modelo 600LX de 60 toneladas, (a) mordazas mecánicas, capacidad 10 [T], (b) mordazas hidráulicas, capacidad 25 [T]- .....	12
Figura 11:	Largo pandeo, Figura obtenida de los daños del terremoto.....	13
Figura 12:	Montaje ensayos .....	14
Figura 13:	Montaje general de laboratorio.....	15
Figura 14:	Resultados ensayo de prueba p8dl20(E-LVDT-ext)1007 .....	17
Figura 15:	anillos con tornillos .....	18
Figura 16:	Ensayos a tracción Φ8, L/d=16.....	20
Figura 17:	Ensayos a tracción Φ16, L/d=16.....	20
Figura 18:	Tensión versus deformación unitaria del ensayo p8dl8_5%_2. S/c: sin corrección del modulo de elasticidad.....	21
Figura 19:	En (a) se muestran las medidas de los tres LVDT utilizados para p8dl8_5%_2 y en (b) las dos con mejor correlación.....	22
Figura 20:	Sigma versus deformación unitaria del ensayo p16dl12_5%_2. S/c: sin corrección del modulo de elasticidad.....	22
Figura 21:	A la izquierda se muestran las medidas de los tres LVDT utilizados para p16dl12_5%_2 y a la derecha las dos con mejor correlación.....	23
Figura 22:	Sigma versus deformación unitaria del ensayo p8dl8_1%_1. S/c: sin corrección del modulo de elasticidad, esta corrección se verá en “Corrección de Modulo de Elasticidad” dentro de este mismo capítulo. 23	
Figura 23:	A la izquierda se muestran las medidas de los tres LVDT utilizados para p8dl8_1%_1 y a la derecha las dos con mejor correlación. ....	24
Figura 24:	Sigma versus deformación unitaria del ensayo p8dl2_3%_2. S/c: sin corrección del modulo de elasticidad. 25	
Figura 25:	E LVDT s/c v/ E real del ensayo p8dl12_3%_2.....	25
Figura 26:	Sigma versus deformación unitaria del ensayo p8dl2_3%_2. La figura 26 (a) es s/c y 26 (b) c/c. C/c: con corrección del modulo de elasticidad. ....	26
Figura 27:	E LVDT c/c del ensayo p8dl2_3%_2.....	26
Figura 28:	Amplitud de desplazamiento total probeta .....	27
Figura 29:	Tendencias de las relaciones L/d en barras Φ8 considerando la deformación versus el número de ciclos en una relación log-log. ....	30

Figura 30:	Tendencias de las relaciones L/d en barras $\Phi 16$ considerando la deformación versus el número de ciclos en una relación log-log. ....	31
Figura 31:	$\Phi 8$ v/s Ensayos de Brown.....	32
Figura 32:	$\Phi 16$ v/s Ensayos de Brown.....	33
Figura 33:	Tendencias de $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	34
Conclusiones y limitaciones .....		35
Figura 34:	Sigma v/s deformación L/d=6, 2%, $\Phi 8$ .....	38
Figura 35:	Sigma v/s deformación L/d=6, 3%, $\Phi 8$ .....	38
Figura 36:	Sigma v/s deformación L/d=6, 4%, $\Phi 8$ .....	38
Figura 37:	Sigma v/s deformación L/d=6, 5%, $\Phi 8$ .....	39
Figura 38:	Sigma v/s deformación L/d=8, 1% en $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	39
Figura 39:	Sigma v/s deformación L/d=8, 2% en $\Phi 8$ .....	39
Figura 40:	Sigma v/s deformación L/d=8, 3% en $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	40
Figura 41:	Sigma v/s deformación L/d=8, 4% en $\Phi 8$ .....	40
Figura 42:	Sigma v/s deformación L/d=8, 5% en $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	41
Figura 43:	Sigma v/s deformación L/d=12, 1% en $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	41
Figura 44:	Sigma v/s deformación L/d=12, 2% en $\Phi 8$ .....	41
Figura 45:	Sigma v/s deformación L/d=12, 3% en $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	42
Figura 46:	Sigma v/s deformación L/d=12, 4% en $\Phi 8$ .....	42
Figura 47:	Sigma v/s deformación L/d=12, 5% en $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	43
Figura 48:	Sigma v/s deformación L/d=16, 1% en $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	44
Figura 49:	Sigma v/s deformación L/d=16, 2% en $\Phi 8$ .....	44
Figura 50:	Sigma v/s deformación L/d=16, 3% en $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	45
Figura 51:	Sigma v/s deformación L/d=16, 4% en $\Phi 8$ .....	45
Figura 52:	Sigma v/s deformación L/d=16, 5% en $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	45
Figura 53:	Sigma v/s deformación L/d=20, 1% en $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	46
Figura 54:	Sigma v/s deformación L/d=20, 2% en $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	46
Figura 55:	Sigma v/s deformación L/d=20, 3% en $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	47
Figura 56:	Sigma v/s deformación L/d=20, 4% en $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	47
Figura 57:	Sigma v/s deformación L/d=20, 5% en $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . ....	48
Figura 58:	Sigma v/s deformación L/d=28, 1% en $\Phi 8$ .....	48
Figura 59:	Sigma v/s deformación L/d=28, 3% en $\Phi 8$ .....	48
Figura 60:	Sigma v/s deformación L/d=28, 5% en $\Phi 8$ .....	49
Figura 61:	Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para $\Phi 8$ , L/d=6.....	57
Figura 62:	Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para $\Phi 8$ , L/d=8.....	57
Figura 63:	Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para $\Phi 8$ , L/d=12.....	58
Figura 64:	Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para $\Phi 8$ , L/d=16.....	58
Figura 65:	Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para $\Phi 8$ , L/d=20.....	59
Figura 66:	Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para $\Phi 8$ , L/d=28.....	59
Figura 67:	Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para $\Phi 16$ , L/d=8.....	60
Figura 68:	Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para $\Phi 16$ , L/d=12.....	60
Figura 69:	Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para $\Phi 16$ , L/d=16.....	61
Figura 70:	Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para $\Phi 16$ , L/d=20.....	61

Figura 71:	Montaje con LVDT antes y después de la fractura.....	62
Figura 72:	L/d=12, $\Phi 8$ . .....	62
Figura 73:	L/d=16, $\Phi 8$ . .....	63
Figura 74:	L/d=16, $\Phi 16$ . .....	63
Figura 75:	L/d=20, $\Phi 16$ . .....	63
Figura 76:	$\Phi 8$ .....	64

## Índice de Tablas

Tabla 1:	Resumen de expresiones de vida a la fatiga mediante modelo Koh - Stephens (ec.1) .....	10
Tabla 2:	Resumen de expresiones de vida a la fatiga mediante modelo Coffin – Manson (ec. 5) .....	11
Tabla 3:	Constantes calibración Extensómetros .....	13
Tabla 4:	Constantes calibración LVDT (linear variable displacement transformer). .....	14
Tabla 5:	Ensayos de prueba. “ $\Phi$ ” es el diámetro de la barra, “L efectivo” la distancia entre mordaza y mordaza, “L/d” la relación largo/diámetro. “def” es la deformación, ya sea en porcentaje o [mm]. .....	16
Tabla 6:	Ensayos experimentales en barras $\Phi 8$ . “L/d” es la relación largo/diámetro y “largo” es el largo efectivo teórico entre mordaza y mordaza.....	19
Tabla 7:	Ensayos experimentales en barras $\Phi 16$ . “L/d” es la relación largo/diámetro y “largo” es el largo efectivo teórico entre mordaza y mordaza.....	19
Tabla 8:	Deformaciones y N° de ciclos para $\Phi 8$ .....	28
Tabla 9:	Deformaciones y N° de ciclos para $\Phi 16$ .....	28
Tabla 10:	Parámetros para $\Phi 8$ y $\Phi 16$ . .....	32
Tabla 11:	Velocidades de ensayo para $\Phi 8$ .....	50
Tabla 12:	Velocidades de ensayo para $\Phi 16$ .....	50
Tabla 13:	Correlación LVDT L/d=6 para $\Phi 8$ .....	51
Tabla 14:	Correlación LVDT L/d=8 para $\Phi 8$ y $\Phi 16$ .....	51
Tabla 15:	Correlación LVDT L/d=12 para $\Phi 8$ y $\Phi 16$ .....	52
Tabla 16:	Correlación LVDT L/d=16 para $\Phi 8$ y $\Phi 16$ .....	52
Tabla 17:	Correlación LVDT L/d=20 para $\Phi 8$ y $\Phi 16$ .....	53
Tabla 18:	Correlación LVDT L/d=28 para $\Phi 8$ .....	53
Tabla 19:	Módulos de Elasticidad $\Phi 8$ , L/d=6. ....	54
Tabla 20:	Módulos de Elasticidad $\Phi 8$ , L/d=8. ....	54
Tabla 21:	Módulos de Elasticidad $\Phi 8$ , L/d=12. ....	55
Tabla 22:	Módulos de Elasticidad $\Phi 8$ , L/d=16. ....	55
Tabla 23:	Módulos de Elasticidad $\Phi 8$ , L/d=20. ....	56
Tabla 24:	Módulos de Elasticidad $\Phi 8$ , L/d=28. ....	56

# Introducción

## Motivación

Las acciones sísmicas producen desplazamientos laterales cíclicos que van los distintos elementos de una estructura. Estas deformaciones pueden estar en el rango elástico cuando es un sismo menor, pero en un sismo de mayor magnitud se pueden provocar también deformaciones plásticas que, en el peor de los casos, podría provocar rotura en los distintos materiales y tener como consecuencia el colapso de una estructura.

A pesar de que el último terremoto en Chile (ocurrido en febrero de 2010) tuvo muy pocos colapsos de estructuras, es necesario observar y analizar los distintos daños causados en las edificaciones y aprovechar así esta instancia, para investigar y aprender un poco más del comportamiento de distintos materiales y elementos estructurales en situaciones extremas o no convencionales.

Hubo varios tipos de daños que se repitieron en distintas estructuras, específicamente a nivel de muros y columnas. El descascaramiento de elementos de hormigón armado dejó en evidencia el pandeo de barras de acero que incluso, en casos más extremos, fallaban frágilmente al fracturarse.

Con este trabajo de título se busca, a través de ensayos de barras de acero de distintos diámetros y largos, contrastar modelos numéricos existentes en la literatura que correlacionan la deformación total o plástica con el número de ciclos a falla por fatiga.

## Objetivos

### Objetivos Generales

Estudiar experimentalmente la fatiga a bajo número de ciclos de barras longitudinales en elementos de hormigón armado variando la relación largo/diámetro.

### Objetivos Específicos

- Analizar la respuesta a pandeo de elementos estructurales al encontrarse en el rango plástico de deformaciones, es decir, deformaciones importantes cuando se aplica un bajo número de ciclos.
- Validar modelos numéricos existentes en la literatura a través de ensayos experimentales.

## Alcances

En la “revisión bibliográfica” se revisan los antecedentes necesarios para desarrollar esta memoria de título, considerando temas como el pandeo inelástico de barras de refuerzo, fatiga de bajo número de ciclos, distintos modelos numéricos existentes en la literatura, etc.

El capítulo “Estudio experimental de la fatiga por bajo número de ciclos de barras longitudinales para elementos de hormigón armado” tiene relación con la parte experimental de esta investigación. Allí Se describe el protocolo de ensayo, montaje y los ensayos realizados.

“Análisis de resultados” contiene todas las tablas resúmenes de los experimentos llevados a cabo en el desarrollo de este trabajo de título. Lo sigue “Conclusiones y Limitaciones” que es donde se concluye con respecto a los resultados y se describen las limitaciones encontradas en el camino del desarrollo de la investigación.

En “Referencias” se encuentran todas las fuentes utilizadas para poder realizar esta memoria.

Finalmente, en “Anexos” están todos los gráficos de las probetas ensayadas, detalles relevantes de cada grupo de ensayos, constantes calibradas de los equipos y algunas muestras de fotos de las probetas después de llegar a la rotura.

## Revisión Bibliográfica

### Antecedentes generales

En Chile una cantidad importante de estructuras (edificios sobre 5 pisos, puentes, etc) están construidas en Hormigón armado.

El hormigón es el material resultante de la mezcla de cemento (u otro conglomerante) con áridos (grava, gravilla y arena) y agua. Su principal característica estructural es que resiste muy bien los esfuerzos de compresión, sin embargo no tiene buen comportamiento frente a la tracción, flexión, esfuerzo cortante, etc., por éste motivo se utilizan armaduras de hierro o acero que si son capaces de resistirlos. Estas armaduras corresponden al **acero de refuerzo** que se quiere analizar.

Los materiales se **fatigan** cuando alcanzan su rotura luego de deteriorarse progresivamente al estar sometidos a cargas cíclicas durante una cierta cantidad de tiempo. La vida que tenga un material dependerá de la cantidad de ciclos a los cuales se exponga, en general se ha observado que a mayor **amplitud de deformación**, menor es la cantidad de ciclos necesarios para la **falla**.

Asumiendo que los materiales a considerar no presentan fisuras pre existentes se distinguen dos grandes casos: la fatiga de alto número de ciclos y la de **bajo número de ciclos**, entendiéndose como límite entre ambos los 1000 ciclos [8]. La diferencia entre ambos es que la primera está controlada por pequeñas deformaciones, a diferencia del segundo caso donde son las grandes deformaciones plásticas y que es el caso a abarcar en esta memoria.

La deformación elástica es aquella que es capaz de devolver exactamente un punto a su misma posición original, sin embargo la **deformación plástica** es aquella que se da después de la elástica, y en estas condiciones los materiales ya nunca vuelven a tomar su forma original. Cuando el material empieza a acumular deformaciones, éste empieza a formar una fisura la que se termina propagando a velocidad creciente, debilitando la sección transversal del material para terminar con su rotura.

## Antecedentes específicos

### Pandeo inelástico de barras de refuerzo

Entre 1985 y 2009 se dio permiso de construcción a 1939 edificios de 9 o más pisos en Chile, donde la mayoría se ubicaban en la Región Metropolitana. En los últimos años es normal ver construcciones de 20 o 25 pisos de altura.

El terremoto de febrero de 2010 dejó varios daños en edificios de hormigón armado, los cuales se fueron repitiendo a lo largo de toda la zona centro-sur del país.

Se observaron varios tipos de fallas, dentro de las cuales está la generada por corte en vigas cortas y machones, cambios de estructuración (cierre/abertura de muros, por ejemplo), uniones viga-columna y viga-muro, tanto por desalineamiento de ejes (produciendo un flujo de corte que deteriora la conexión) como por detallamiento simple de los estribos (o ejecución constructiva).

Uno de los patrones más observados fue a nivel de subterráneos (habitualmente se encuentran los estacionamientos, bodegas, etc.) y primer piso (por lo general no se sigue el patrón de departamentos de los pisos superiores) donde suelen variar la distribución estructural y forma de los muros.

Las cabezas de los muros son las que más sufrieron los efectos sísmicos ya que es en esta zona donde se encuentran las mayores deformaciones de compresión producto de las cargas de flexión y compresión provocando el descascaramiento del muro.

Cuando el recubrimiento que rodea las barras de refuerzo se deteriora, al punto de dejarlas expuestas, y éstas enfrentan la acción sísmica sin restricciones laterales mas allá de los estribos, es inevitable que ocurra pandeo. Sobre todo considerando que se encontraron muchos estribos mal anclados, que se soltaron al no tener recubrimiento, dejando un largo efectivo de las barras de acero mucho mayor que el de diseño.

A la fractura llegaron varias barras de borde tras exponerse a ciclos de grandes deformaciones sin presentar reducción de la sección transversal, lo que indica que no es una falla por estar sometida a tracción, sino más bien una falla a la fatiga, probablemente por un bajo número de ciclos.

La Figura 1 muestra un ejemplo de pandeo inelástico de barras de refuerzo, en el cual se pueden observar las dimensiones del desplazamiento transversal de la barra producto del sismo. Son deformaciones que alcanzaron entre el 5% y 10% de su largo original entre estribo y estribo (L).

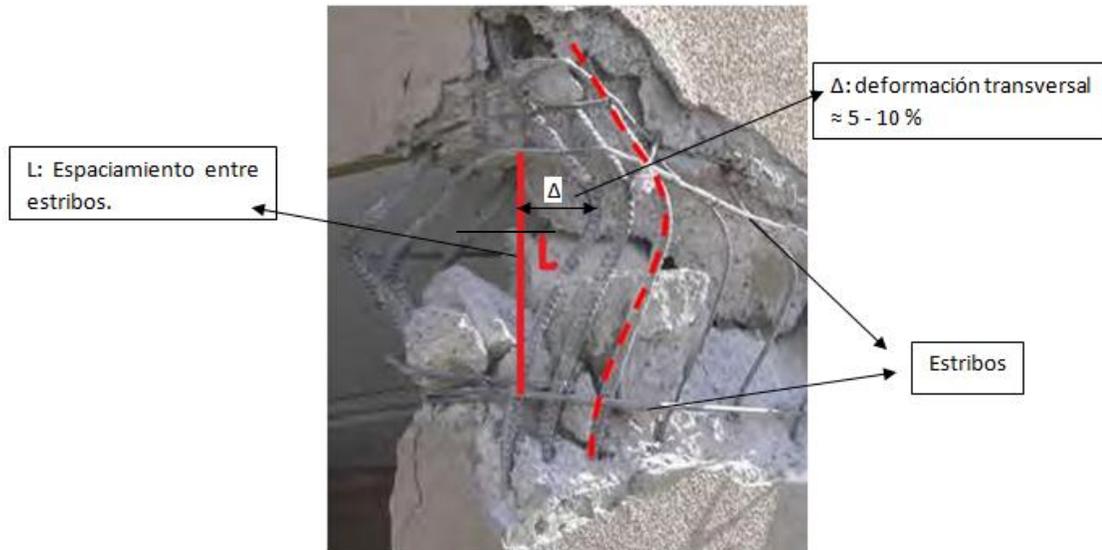


Figura 1: Figura obtenida de los daños del terremoto del 27 de febrero de 2010.

Dentro de la literatura existen varios estudios en relación al comportamiento del acero, incluyendo al pandeo de barras producto del bajo número de ciclos.

Monti y Nuti [7], por ejemplo, realizaron ensayos experimentales monotónicos y cíclicos considerando razones de  $\frac{L}{d} = 5,8$  y  $11$  (con L: largo efectivo de la barra, d: diámetro de la barra).

### *Comportamiento monotónico*

Para las respuestas monotónicas (Figura 2) se consideraron tres diámetros distintos (16, 20 y 24 mm) para las distintas relaciones  $L/d$ , concluyéndose, en términos generales, que:

- La capacidad máxima del material disminuye de manera considerable al ir aumentando el largo de la barra; es más, cuando la separación entre estribos es de aproximadamente 11 veces el diámetro ( $L/d=11$ ) la respuesta a compresión apenas alcanza la fluencia. Sin embargo, cuando la relación es cercana a 5 la barra prácticamente no sufre pandeo, siendo su curva muy semejante a la respuesta en tracción del acero.

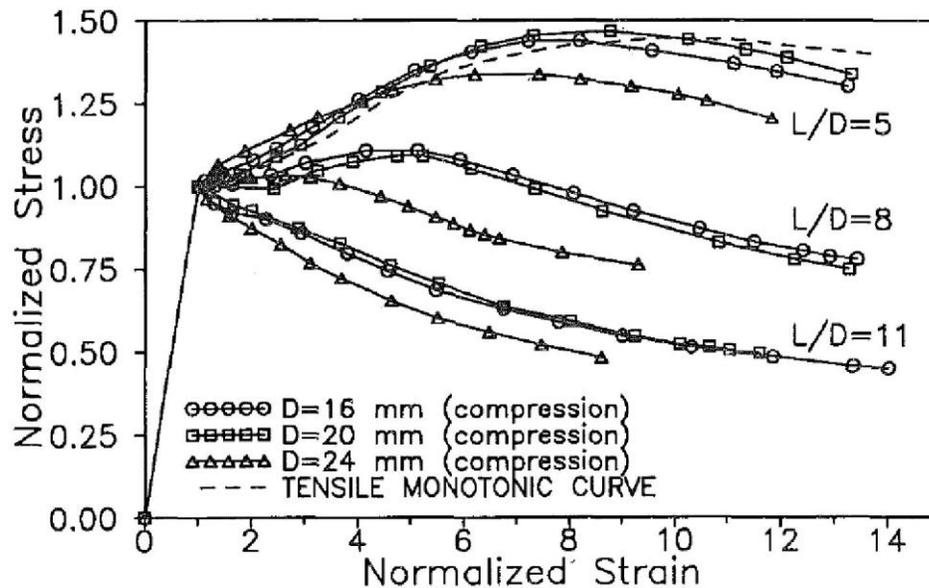


Figura 2: Curvas monotónicas experimentales (Monti y Nuti, 1992)

### Comportamiento cíclico

Las conclusiones con respecto a estos ensayos son las siguientes (Figura 3):

- El pandeo no altera la respuesta cuando el ensayo es a tracción, al contrario del comportamiento a compresión.
- La pendiente inicial de la fase de carga va disminuyendo a medida que la razón  $L/d$  aumenta, sin embargo en la fase inicial de descarga no se observan variaciones.

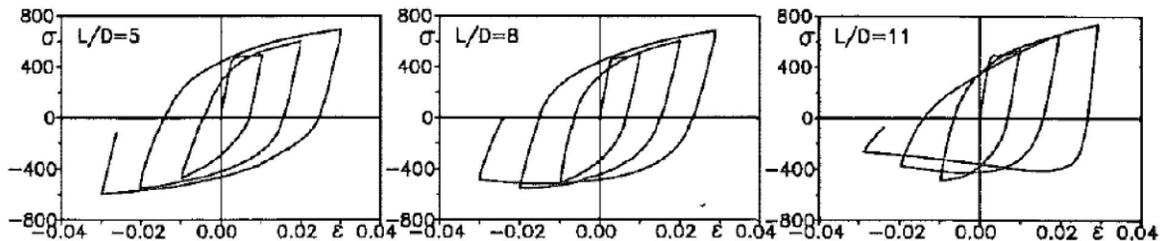


Figura 3: Curvas cíclicas tensión-deformación

### Fatiga de bajos ciclos

#### Comportamiento del acero

El trabajo desarrollado por Mander [3], trabajando con barras de refuerzo de acero y su fatiga al ser expuestas a cargas cíclicas con bajo número de ciclos, muestra que el comportamiento del acero de refuerzo influye en el comportamiento del elemento estructural de hormigón armado.

No es la misma curva tensión versus deformación para un 2% de deformación que para un 4%, por ejemplo. En la figura 4 (a) y (b) siguientes se pueden ver algunos casos:

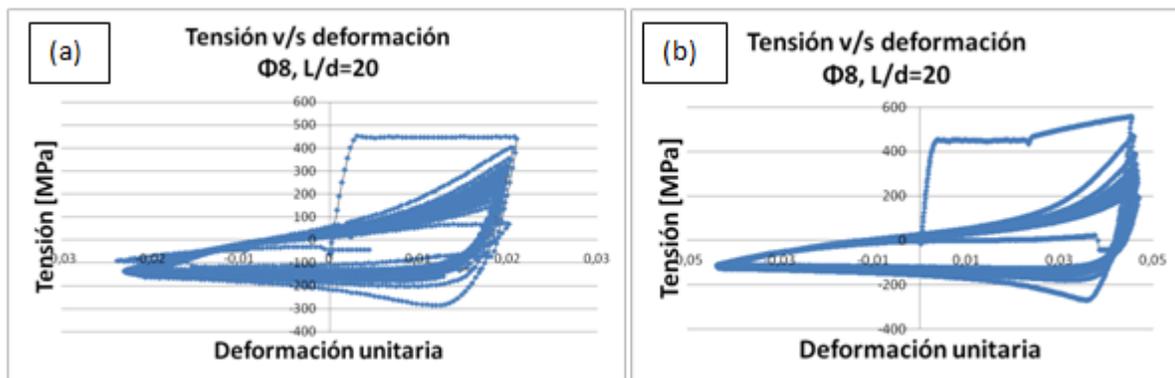


Figura 4:  $\Phi 8$ , deformaciones de  $\approx 2\%$  (a),  $\approx 4\%$  (b)

Donde (a) muestra la curva del primer ensayo con un 2% de deformación para  $\Phi 8$  y  $L/d=20$  y (b) muestra el primer ensayo con un 4% de deformación para  $\Phi 8$  y  $L/d=20$ .

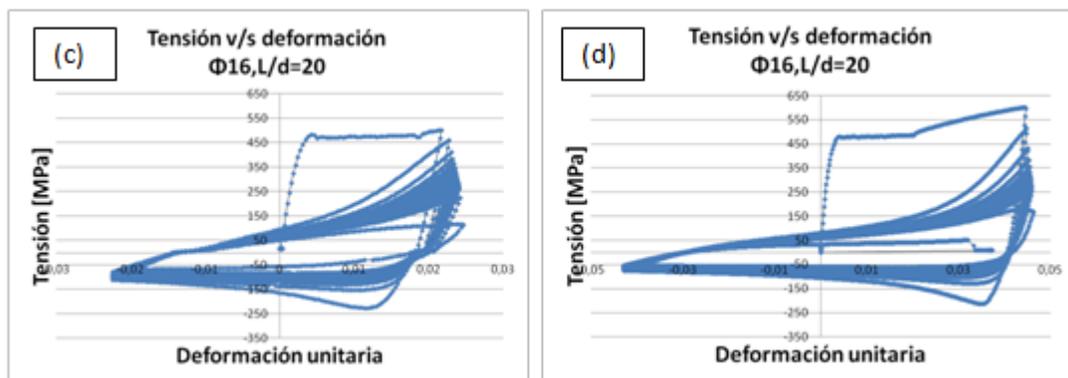


Figura 5:  $\Phi 16$ , deformaciones de  $\approx 2\%$  (c),  $\approx 4\%$  (d)

Donde (c) muestra la curva del primer ensayo con un 2% de deformación para  $\Phi 16$  y  $L/d=20$  y (d) muestra el primer ensayo con un 4% de deformación para  $\Phi 16$  y  $L/d=20$ .

El la figura 4 muestra 2 curvas obtenidas de ensayos con barras de diámetro 8 mm, con una relación largo/diámetro = 20 con deformaciones del 2 y 4 % respectivamente. En el caso (a) se puede observar que en el primer periodo de tracción la curva no sobrepasa los límites plásticos, a diferencia de (b) donde se llega a un evidente estado de endurecimiento. En el caso de la barra de diámetro 16 mm que se muestra en la figura 5 también en el caso de mayor deformación (d) se llega a un avanzado periodo de endurecimiento, pero a diferencia de  $\Phi 8$ , en el caso (c) si se ve la entrada a este periodo. Esta diferencia entre el comportamiento de los diámetro se irán

justificando más adelante en el capítulo de “Análisis de resultados”, sin embargo hay que tener presente que estas deformaciones son aproximadas y deberán pasar por un proceso de corrección, detallado en “Corrección de amplitudes de desplazamiento”.

De los casos anteriores también se puede rescatar que existe una disminución de la capacidad en compresión con la deformación y que a medida de que se van logrando las deformaciones deseadas la capacidad decrece en los dos sentidos a medida de que van avanzando los ciclos. Estos fenómenos y otros efectos serán comparados también de acuerdo a la relación L/d, más adelante, en el capítulo antes mencionado.

Para relacionar la deformación con el número de ciclos para alcanzar la rotura de la barra hay métodos en la literatura, Koh y Stephens [5] trabajaron en esto, al igual que Coffin – Manson [2], los que son mencionados a continuación.

### Modelos de Koh y Stephens

Koh y Stephens [5], a partir de ensayos experimentales, lograron relacionar el número de ciclos necesario para que fallaran las barras con una amplitud constante de deformación.

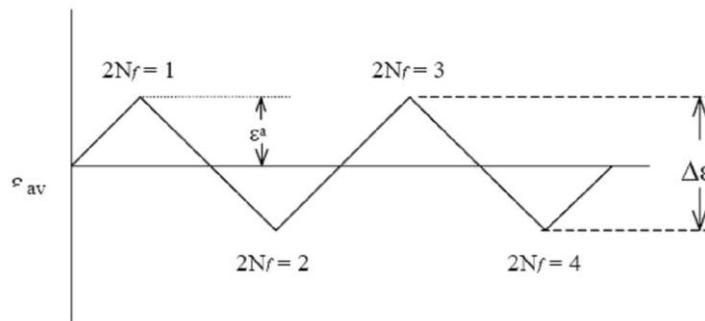


Figura 6: Amplitud de deformación constante. Ver Lacaze, C. [8].

Este modelo considera la siguiente expresión:

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

**Ecuación 1**

Donde:

$\varepsilon_a$ : Amplitud de deformación.

$\Delta\varepsilon$ : diferencia entre la amplitud máxima y mínima,  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}$  (ver figura 7).

M,m: Constantes del material.

$2N_f$ : Número de ciclos a la falla.

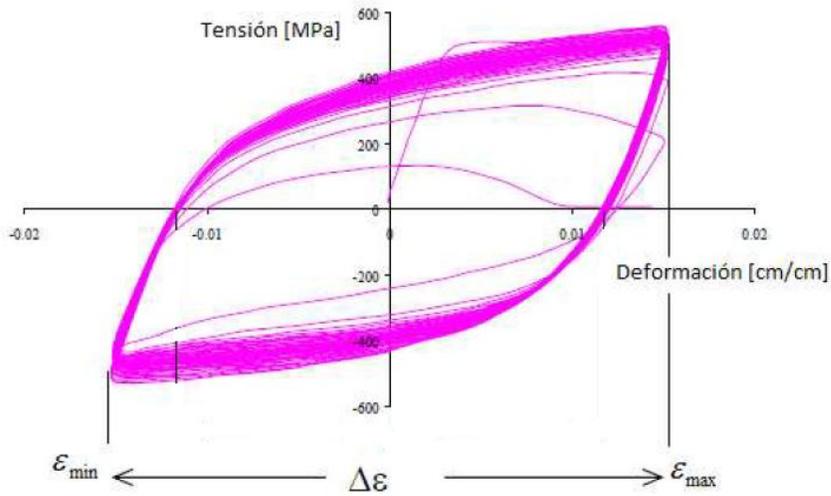


Figura 7: Diferencia entre la amplitud máxima y mínima,  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}$

La Ecuación 1 considera la **deformación total**, es decir, la parte elástica y plástica de la deformación.

### *Relación Coffin-Manson*

Considerando una deformación constante, se tiene un modelo que supone que la deformación total corresponde a una deformación elástica y una plástica, de esta manera se logra expresar la deformación total como:

$$\varepsilon = \varepsilon_{elástica} + \varepsilon_{plástica} = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{plástica}$$

**Ecuación 2**

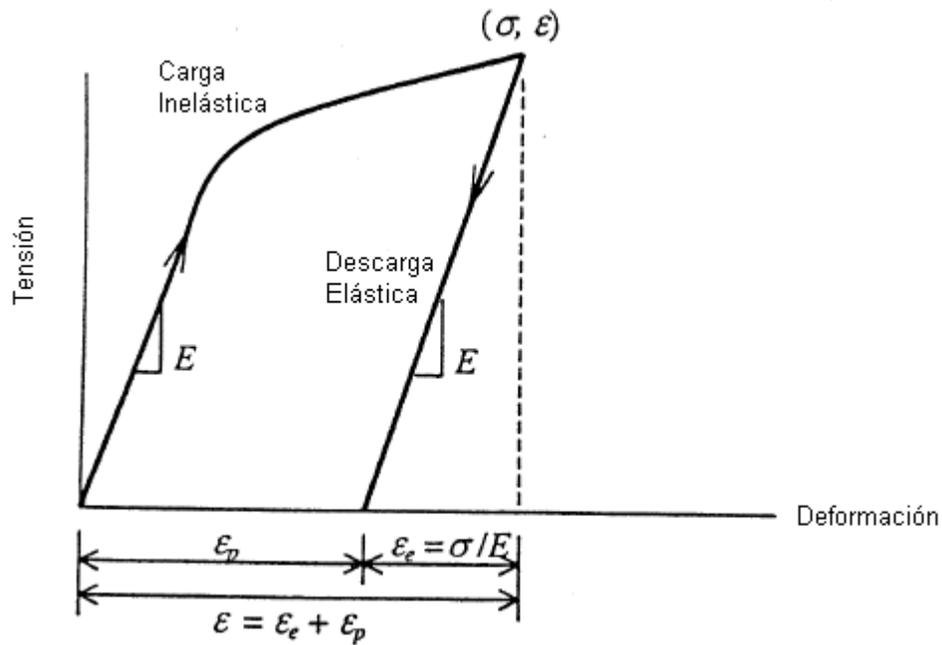


Figura 8: Carga inelástica seguida de una descarga elástica (ver referencia [1]).

Al graficar la tensión versus la deformación plástica en escala logarítmica la relación que se obtiene es lineal e igual a:

$$\sigma = K(\varepsilon_{plástica})^n$$

Ecuación 3

Donde K y n son constantes del material, por lo que la deformación total puede ser expresada como:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n}$$

Ecuación 4

Cuando las amplitudes de deformación son grandes, las **deformaciones plásticas** son predominantes y es posible relacionarlas con el número de ciclos a la falla mediante la relación que se muestra a continuación:

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

Ecuación 5

Donde  $C_f$  y  $\alpha$  son constantes del material.

Esta última ecuación es conocida como la relación de Coffin – Manson.

### Trabajo experimental de Brown

Estudiaron Brown y Kunnath [2] la falla por fatiga de bajo número de ciclos en probetas longitudinales de acero de refuerzo con diámetros considerados de: 19.1 mm, 22.2 mm y 25.4 mm, pero solo considerando la relación  $\frac{L}{d} = 6$  para así eliminar el sesgo por pandeo en la fatiga de bajos ciclos, Sin embargo, la realidad chilena, que es la que se quiere estudiar, trabaja con relaciones  $\frac{L}{d}$  mucho mayores como se observó para el terremoto, aunque las nuevas disposiciones están corrigiendo esta situación

### Resultados del trabajo experimental de Brown

La respuesta experimental se va degradando continuamente con el número de ciclos hasta la rotura por efecto de la fatiga por bajo número de ciclos y del daño acumulado (Ver figura 9).

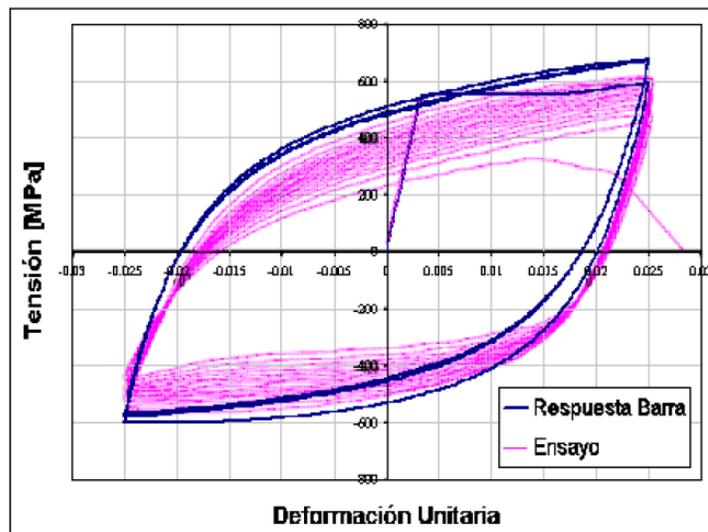


Figura 9: Respuesta numérica versus respuesta experimental en ensayo de Brown y Kunnath [2]

En la literatura se entiende como daño acumulativo a la fracción de vida utilizada del material antes que ocurra su rotura bajo una serie de eventos cíclicos. De esta manera se puede definir un indicador tal que si la suma de los daños alcanza un 100%, se produce la falla del material.

Los modelos analizados anteriormente consideran este daño al momento de relacionar las deformaciones con los números de ciclos a rotura.

Brown trabajó con Ecuación 1 y Ecuación 5 para relacionar la amplitud de deformación con el número de ciclos a la falla para cada tipo de ensayo. De ésta manera obtuvo:

Tabla 1: Resumen de expresiones de vida a la fatiga mediante modelo Koh - Stephens (ec.1)

Tipo Ensayo	Koh - Stephens	$C_f$	$\alpha$
#19	$\varepsilon_a = 0.142(2N_f)^{-0.503}$	0.142	0.503
#22	$\varepsilon_a = 0.115(2N_f)^{-0.437}$	0.115	0.437
#25	$\varepsilon_a = 0.091(2N_f)^{-0.377}$	0.091	0.377
Todos	$\varepsilon_a = 0.112(2N_f)^{-0.433}$	0.112	0.433

Tabla 2: **Resumen de expresiones de vida a la fatiga mediante modelo Coffin – Manson (ec. 5)**

Tipo Ensayo	Coffin - Manson	$C_f$	$\alpha$
#19	$\varepsilon_{ap} = 0.124(2N_f)^{-0.536}$	0.124	0.536
#22	$\varepsilon_{ap} = 0.105(2N_f)^{-0.478}$	0.105	0.478
#25	$\varepsilon_{ap} = 0.088(2N_f)^{-0.432}$	0.088	0.432
Todos	$\varepsilon_{ap} = 0.102(2N_f)^{-0.473}$	0.102	0.473

Brown concluye que las barras de mayor diámetro presentan mayor resistencia al esfuerzo con amplitudes de deformación inferiores, sin embargo, la tendencia se invierte con barras de menor diámetro.

Este estudio indica que en el diseño de componentes de hormigón armado sometidos a cargas dinámicas, es necesario tener en cuenta el comportamiento de fatiga de bajo número de ciclos de barras de refuerzo, además de las características monotónicas.

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FATIGA POR BAJO NÚMERO DE CICLOS DE BARRAS LONGITUDINALES PARA ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO**

Tal como se explicó anteriormente, lo que se quiere realizar en este trabajo de título es extender los resultados de los ensayos de Brown y Kunnath [2] agregando mayores relaciones largo/diámetro, para considerar el efecto del pandeo en la cantidad de ciclos antes de la fatiga de las barras a ensayar.

En un terremoto real las deformaciones son asimétricas, además de tener ciclos de deformaciones aleatorias. Sin embargo, en esta tesis solo se considerarán ensayos con deformación simétrica, es decir, la misma amplitud para traccionar y comprimir la barra en cada ciclo.

## Protocolo de ensayo

### Consideraciones generales

Los ensayos se realizan sobre barras de A630-420H. Las variables a considerar son el diámetro de las barras, sus relaciones de largo/diámetro y la amplitud de deformaciones, que irá entre un 1% y un 5%. El equipo a utilizar pertenece al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y es donde se ensayaron las probetas antes mencionadas.

La máquina universal se muestra en la Figura 10. Es una Instron modelo 600LX de 60 toneladas. En un principio solo se constaba con mordazas de 10 toneladas, pero para los ensayos definitivos se utilizan mordazas de 25 toneladas con ajuste hidráulico. Éstas últimas además de poseer mayor capacidad y mejor tecnología de empotramiento, son capaces de mantener la barra en posición durante la etapa de compresión.



Figura 10: Máquina universal para pandeo Instron modelo 600LX de 60 toneladas, (a) mordazas mecánicas, capacidad 10 [T], (b) mordazas hidráulicas, capacidad 25 [T]-

El Largo “L” de la barra es el considerado en la Figura 11, así entre mordaza y mordaza se está modelando lo que sería entre estribo y estribo. Al momento de realizar los ensayos “L” es el largo efectivo de la barra modelando el empotramiento perfecto.



Figura 11: Largo pandeo, Figura obtenida de los daños del terremoto.

En la imagen se muestra una relación largo/diámetro  $\approx 14$ , que fue tomada en una de las fallas que dejó el terremoto del 27 de febrero de 2010. A pesar de que no se muestra una fractura propiamente tal, si se ve un pandeo evidente.

Los diámetros a utilizar corresponden a  $\Phi 8$  y  $\Phi 16$ .

### Calibración de equipos

Al notar algunas diferencias entre la realidad con los datos entregados por los dispositivos utilizados, se calibraron todos los equipos, es así como los resultados entregados en el presente trabajo de título son todos realizados por maquinarias calibradas en el laboratorio del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Los parámetros de los dispositivos son los siguientes:

Tabla 3: Constantes calibración Extensómetros.

Extensómetro	Constante [mm/volt]
25	1,2389
50	1,9831

Tabla 4: Constantes calibración LVDT (linear variable displacement transformer).

LVDT	Constante [volt/in]
p3	2,33
p4	2,37
p5	2,43

## Ensayos experimentales

### Montaje de los ensayos

En términos generales, se corta la barra según el largo que se requiera para la probeta a ensayar, se fija entre las mordazas y se acomodan los dispositivos para medir deformaciones, tal como se muestra en la figura:

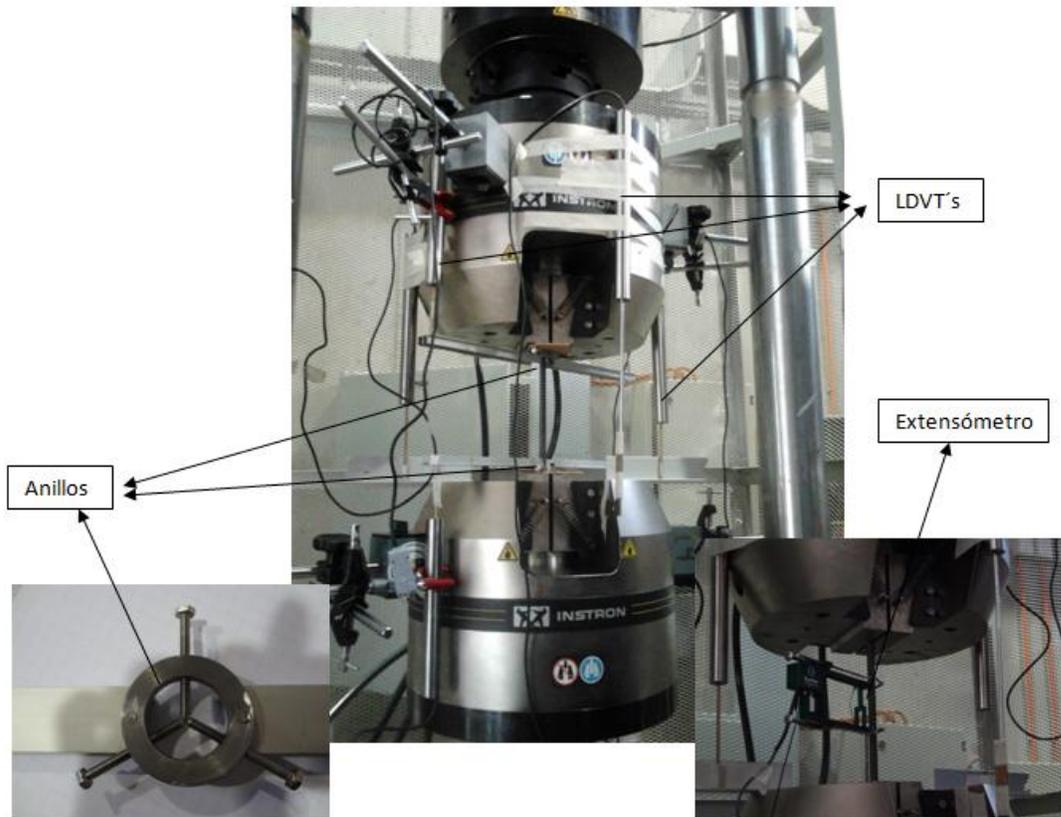


Figura 12: Montaje ensayos

La Figura 12 muestra los siguientes dispositivos:

- LVDT: Dispositivos que se colocan externos a la barra y miden el desplazamiento de las mordazas, por ende las deformaciones de la barra en cada instante.
- Extensómetro: Mide deformaciones en el centro de la barra.
- Anillos: Pieza mecánica que se fabrica a pedido con el fin de medir las deformaciones en el extremo de la barra, justo donde se empotra con la mordaza.

El ensayo comienza cuando el computador principal (a través de un programa especial) le ordena a la maquina universal un ensayo cíclico (tracción y luego compresión) a una velocidad predeterminada para cada ensayo (Ver anexo B) hasta un cierto desplazamiento en cada sentido. El ensayo comienza traccionando la barra hasta la amplitud deseada ( $+\Delta$ ) y luego aplica una compresión hasta la misma amplitud ( $-\Delta$ ) y así sucesivamente realizando ciclos hasta que la probeta llega a la rotura registrando el número de ciclos realizados.

Las deformaciones ( $\pm \Delta$ ) se aplican según el sensor de desplazamiento del equipo.

La maquina universal transmite las mediciones de desplazamientos y carga registrados en [volts] hacia un computador secundario, en cual entrega los resultados en un archivo .txt. Estas señales al pasar por transformaciones quedan en las unidades de medida deseadas: [mm] en el caso de desplazamientos y [N] en el caso de la carga. Una imagen general de todos estos equipos es la siguiente:

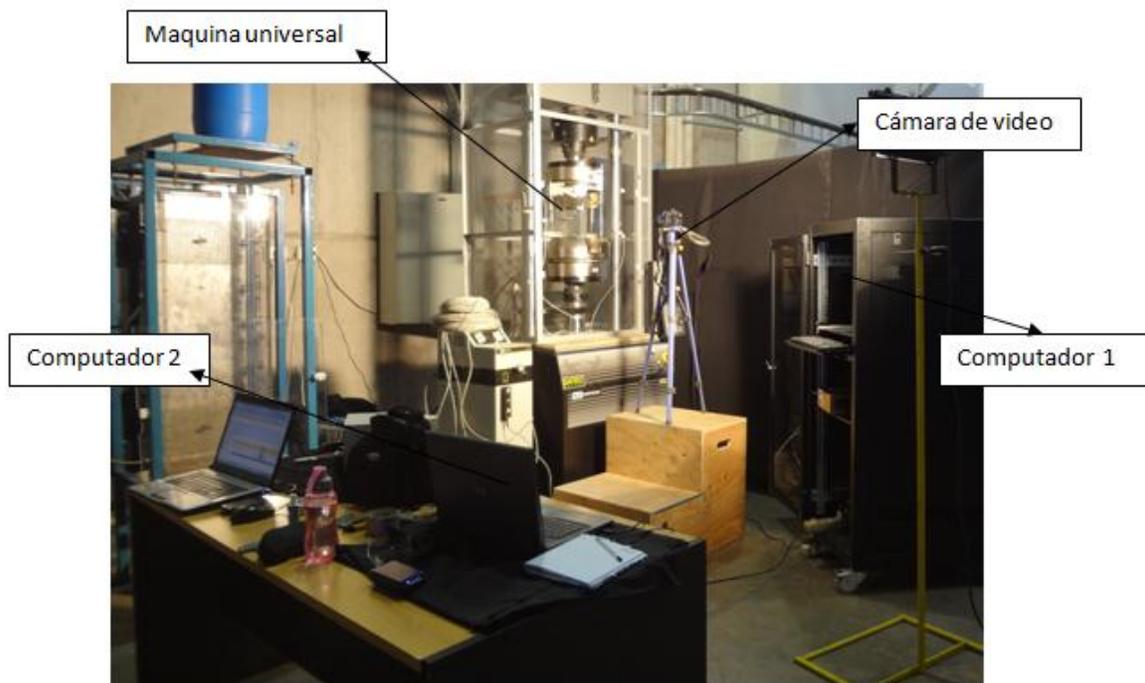


Figura 13: Montaje general de laboratorio.

En la Figura 13 se muestra:

- Cámara de video: cámara que registró cada uno de los ensayos finales realizados.
- Máquina universal: Máquina universal de carga con la cual se realizaron los ensayos.

- Computador 1: Equipo controlador de la máquina universal.
- Computador 2: Equipo encargado de recibir las señales de la máquina universal, además de cada uno de los dispositivos colocados para medir deformaciones.

Una vez obtenidos los datos, se procesan y validan los gráficos, módulos de elasticidad y ciclos a rotura de cada probeta.

### Ensayos de Prueba

Para determinar de qué forma se obtendrían los valores de las deformaciones se realizarán varias pruebas tomando en cuenta, en principio, solo el uso de LVDT para compararlos con los resultados arrojados por la misma máquina y determinar cuáles son los más cercanos a lo deseado.

Por los bajos módulos de Elasticidad obtenidos (no se llega al 100% del modulo nominal) se agregó el extensómetro, para tener aún más datos para comparar.

Luego de 9 ensayos de prueba con la barra  $\Phi 8$  en el caso de mayor y menor largo (o relaciones  $L/d$ ) variando el porcentaje de deformación se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 5: Ensayos de prueba. “ $\Phi$ ” es el diámetro de la barra, “L efectivo” la distancia entre mordaza y mordaza, “L/d” la relación largo/diámetro. “def” es la deformación, ya sea en porcentaje o [mm].

N° ensayo	Fecha	$\Phi$ [mm]	L efectivo [cm]	L/d	def [%]	def [mm]
1	24/05/12	8	4,8	6,0	5	2,40
2	24/05/12	8	13,85	17,3	5,8	8,03
3	05/07/12	8	5	6,3	0,96	0,48
4	05/07/12	8	16	20,0	5	8,00
5	09/07/12	8	5,1	6,4	2,82	1,44
6	09/07/12	8	16,2	20,3	2,96	4,80
7	10/07/12	8	5,1	6,4	3	1,53
8	10/07/12	8	16	20,0	3	4,80
9	10/07/12	8	16,1	20,1	5	8,05

Para cada fecha se trabaja con distintas formas de medir deformaciones. Estos son:

- En los ensayos del 24/05/12 las deformaciones se obtuvieron directamente de la máquina de mordazas mecánicas.
- En los ensayos del 05/07/12 las deformaciones se obtuvieron de la máquina de mordazas mecánicas y de dos LVDT.

- En los ensayos del 09/07/12 y del 10/07/12 las deformaciones se obtuvieron de la máquina de mordazas hidráulicas, de tres LVDT y de un extensómetro.

Las diferencias entre los tres métodos de medir deformaciones son evidentes. En la Figura 14 se muestra una parte de los datos tomados de uno de los ensayos. Considerando un  $\approx 3\%$  de deformación, se grafican los resultados de deformación que logra medir el extensómetro, los LVDT y el programa de la máquina universal versus la tensión aplicada.

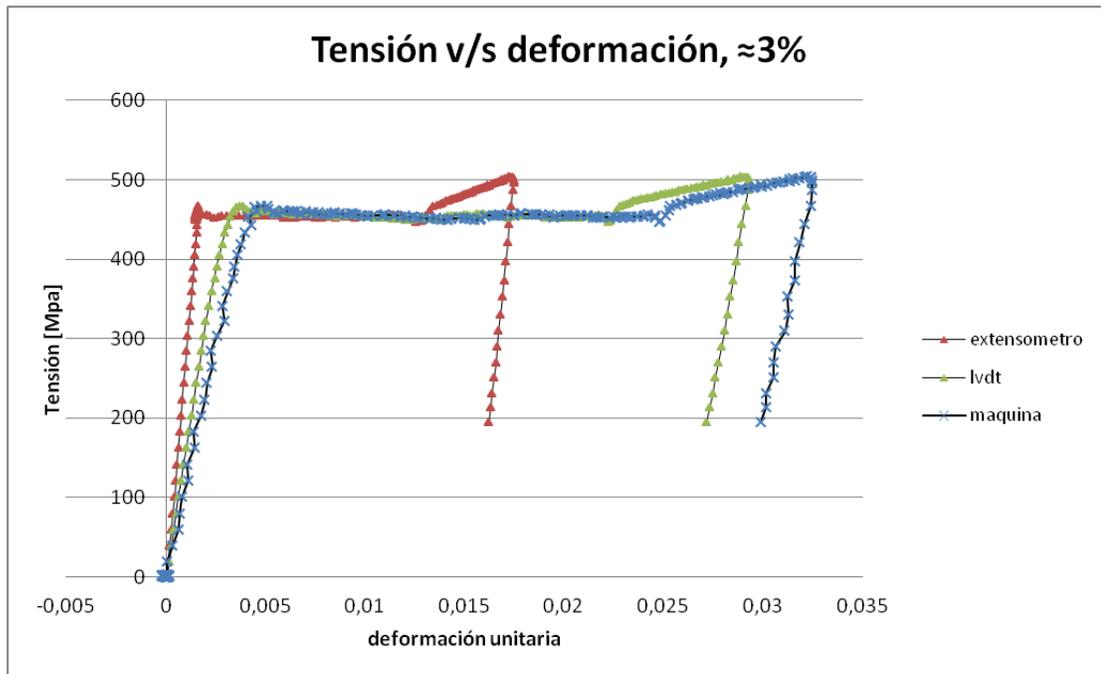


Figura 14: Resultados ensayo de prueba p8dl20(E-LVDT-ext)1007

En la Figura 14 se ve una clara diferencia tanto en los módulos de elasticidad como en el momento donde empieza la descarga. En el caso de las mediciones aportadas por el programa de la máquina, hay que tomar en cuenta que ésta además de considerar la deformación de la probeta también mide la deformación de las mordazas (ya que no son infinitamente rígidas como se asume), lo que nos aleja de los resultados reales tanto para el módulo como para la descarga.

El extensómetro, a pesar de mostrar el módulo correspondiente al acero, se descarta de las mediciones finales porque desliza al momento de realizar el ensayo, por ende muestra una descarga anticipada en la curva tensión v/s deformación y también nos aleja de la realidad que se desea.

Los LVDT son, según la experiencia en estas pruebas, la forma más confiable de medir deformaciones. Aún así se utilizan por lo menos 3 dispositivos y se consideran los 2 más correlacionados por si fallara uno de ellos.

Para ver el comportamiento de la probeta en los extremos se agrega una nueva pieza externa, unos anillos que permitirían medir las deformaciones en las mordazas y así observar si se puede mejorar aún más las curvas resultantes.

Los anillos, como se mostraron en el montaje, son piezas que se mandan a fabricar y consisten en una argolla con tres tornillos que tienen la finalidad de quedar apretados con la barra hasta tal punto de ser capaces de moverse con ella en caso de desplazamiento, sin embargo esta idea es desechada al deslizar los dispositivos y desligarse completamente del montaje del experimento. Esto último ocurre debido al pequeño adelgazamiento de la barra en sus extremos al momento de empezar el ensayo (en tracción) donde los tornillos no son capaces de seguir acoplados a la probeta. Se propone intentar nuevos ensayos con algún sistema de resortes que sean capaces de seguir la barra todo el ensayo sin deslizar.



Figura 15: **anillos con tornillos**

## Ensayos definitivos

Los ensayos realizados se presentan en las tablas 6 y 7:

Tabla 6: **Ensayos experimentales en barras  $\Phi 8$ . “L/d” es la relación largo/diámetro y “largo” es el largo efectivo teórico entre mordaza y mordaza.**

Barras $\Phi 8$		
L/d	Largo [cm]	deformación [%]
6	4,8	1,2,3,4 y 5%
8	6,4	1,2,3,4 y 5%
12	9,6	1,2,3,4 y 5%
16	12,8	1,2,3,4 y 5%
20	16	1,2,3,4 y 5%
28	22,4	1, 3 y 5%

Tabla 7: **Ensayos experimentales en barras  $\Phi 16$ . “L/d” es la relación largo/diámetro y “largo” es el largo efectivo teórico entre mordaza y mordaza.**

Barras $\Phi 16$		
L/d	Largo [cm]	deformación [%]
8	12,8	1,3 y 5%
12	19,2	1,3 y 5%
16	25,6	1,3 y 5%
20	32	1, 2, 3, 4 y 5%

Es decir, se ocuparán largos efectivos de barra desde 4,8 a 32 cm analizando dos probetas de cada caso, pasando por dos diámetros distintos:

- 5 relaciones de largo/diámetro y 5 amplitudes de deformaciones distintas para el caso  $\Phi 8$  además de una sexta relación incorporada para 3 amplitudes.
- 4 relaciones de largo/diámetro con 3 y 5 amplitudes de deformaciones distintas para el caso  $\Phi 16$ , con el fin de validar y ver el comportamiento para un diámetro mayor.

Cada ensayo tendrá una manera de ser reconocido con la siguiente notación:

$$p(X)_{dl}(Y)_{(Z)\%}(w)$$

Donde,

X: Corresponde al  $\Phi$  de la barra (8 o 16).

Y: Se refiere a la relación largo/diámetro (6, 8, 12, 16, 20 o 28).

Z: Hace mención a la deformación de la barra (1, 2, 3, 4 o 5 %).

W: En el número de ensayo (1<sup>er</sup> o 2<sup>do</sup> ensayo).

### Ensayos a tracción

Se realizaron dos ensayos a tracción para  $\Phi 8$  y  $\Phi 16$ , los resultados se muestran a continuación en las figuras 16 y 17:

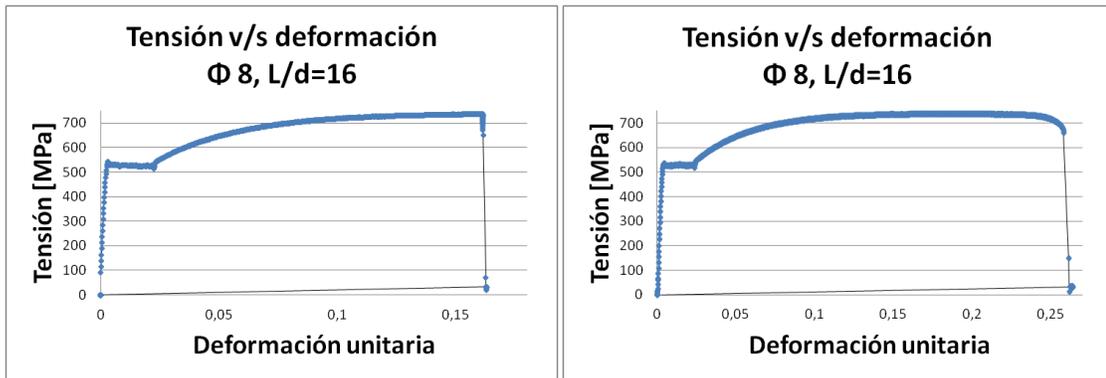


Figura 16: Ensayos a tracción  $\Phi 8$ , L/d=16.

Los ensayos monotónicos entregaron módulos de elasticidad del 99,9% con respecto al módulo de elasticidad nominal considerado de 200.000 [MPa].

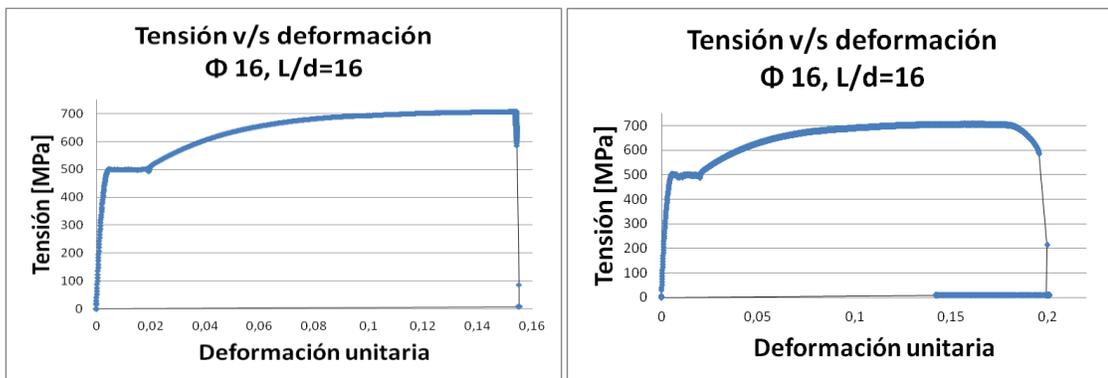


Figura 17: Ensayos a tracción  $\Phi 16$ , L/d=16.

Los ensayos monotónicos entregaron módulos de elasticidad del 99,8% y 99,7% respectivamente con respecto al módulo de elasticidad nominal considerado de 200.000 [MPa].

Todos los porcentajes antes mencionados son en referencia al módulo de elasticidad corregido de cada ensayo. Ésta corrección se explica en “Corrección Módulo de Elasticidad” en el capítulo “Análisis de Resultados”.

## Análisis de Resultados

### Correlación LVDT

Para obtener buenos resultados primero se necesita tener la seguridad de que la forma de medir deformaciones es la adecuada. Para esto se analizarán los LVDT. A pesar de que se cuenta con 3 dispositivos, se ocuparán los dos más correlacionados. A continuación algunos ejemplos gráficos:

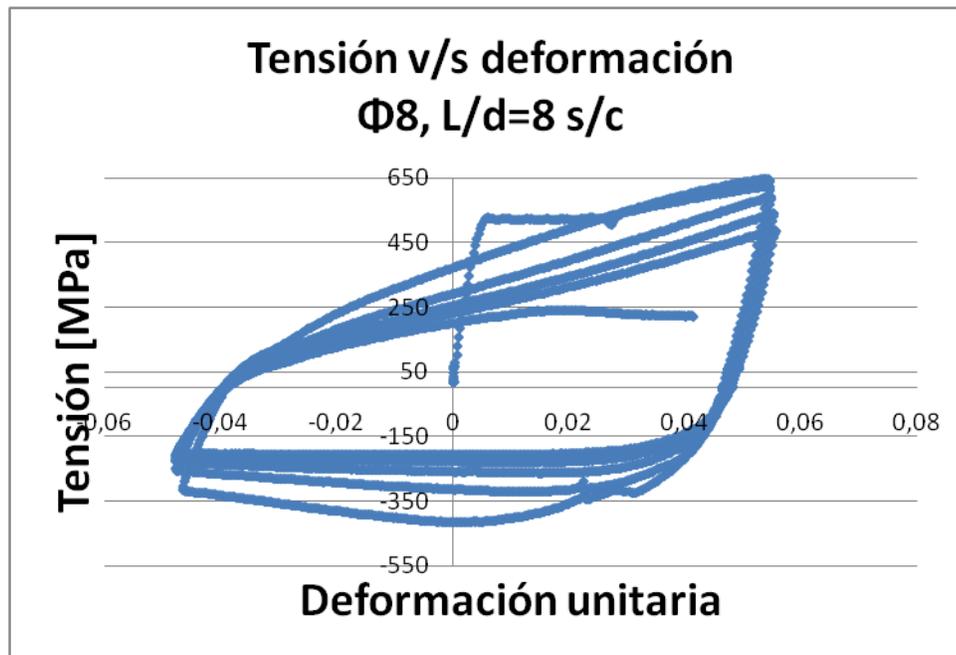


Figura 18: Tensión versus deformación unitaria del ensayo p8dl8\_5%\_2. S/c: sin corrección del módulo de elasticidad.

Donde la Tensión [MPa] corresponde a la carga [N] sobre el Área nominal [ $mm^2$ ] de la probeta y la deformación unitaria corresponde a la deformación [mm] sobre el largo nominal de la probeta [mm].

La figura 18 muestra la curva tensión-deformación del ensayo p8dl8\_5%\_2. Las deformaciones provienen de las mediciones con LVDT, las cuales se muestran a continuación:

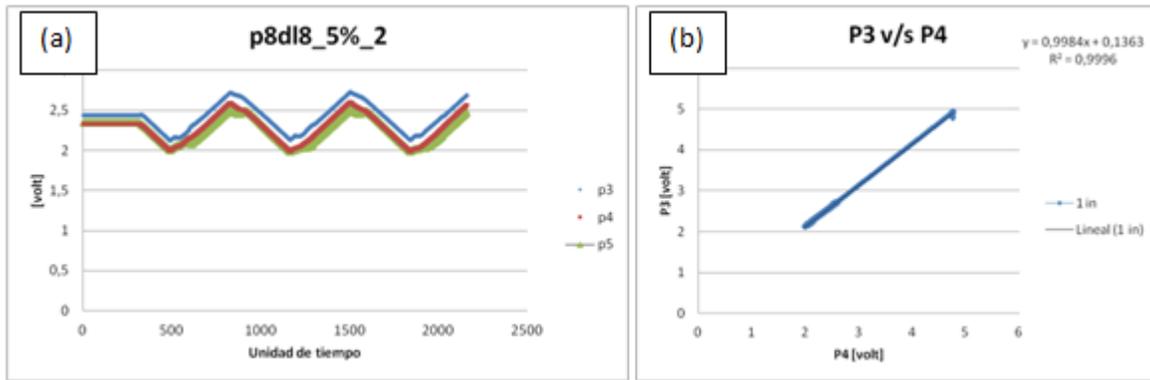


Figura 19: En (a) se muestran las medidas de los tres LVDT utilizados para p8dl8\_5%\_2 y en (b) las dos con mejor correlación.

Los LVDT fueron nombrados con el fin de identificarlos: “p3”, “p4” y p5” corresponden a los tres elementos utilizados.

La Figura 19 (a) muestra la medición de los LVDT ([volt]) versus una unidad de tiempo estándar. La finalidad del gráfico es mostrar el comportamiento de las mediciones a través del tiempo. En (b) se grafican los dos LVDT más cercanos, uno en función del otro, para verificar su correlación.

Como segundo ejemplo del procedimiento se verá un ensayo con  $\Phi 16$ :

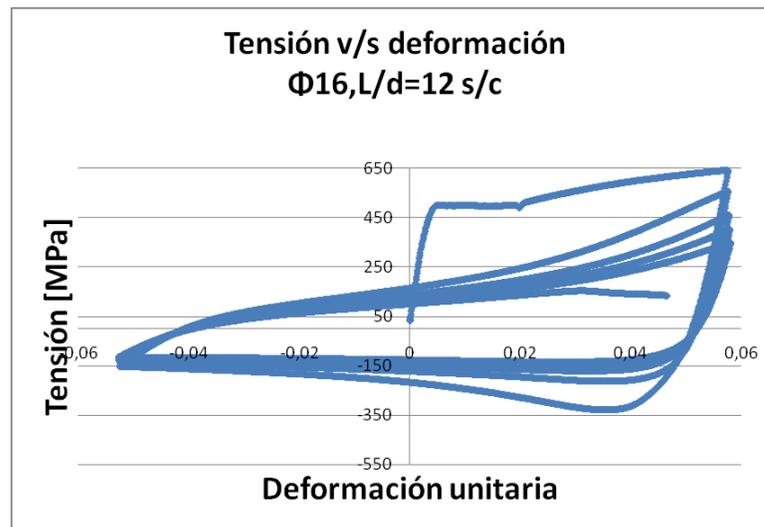


Figura 20: Sigma versus deformación unitaria del ensayo p16dl12\_5%\_2. S/c: sin corrección del modulo de elasticidad.

La figura 20 muestra la curva tensión-deformación del ensayo p16dl12\_5%\_2. Las deformaciones provienen de las mediciones con LVDT, las cuales se muestran a continuación:

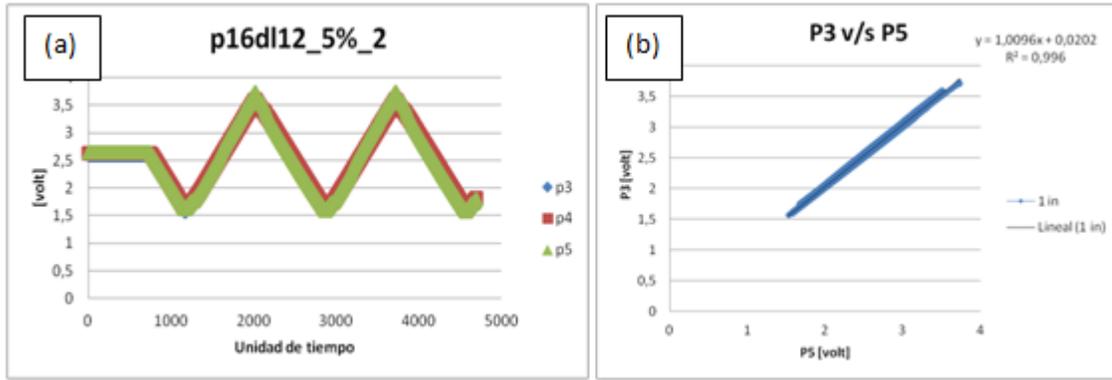


Figura 21: A la izquierda se muestran las medidas de los tres LVDT utilizados para p16dl12\_5%\_2 y a la derecha las dos con mejor correlación.

La Figura 21 (a) muestra la medición de los LVDT ([volt]) versus una unidad de tiempo estándar. La finalidad del gráfico es mostrar el comportamiento de las mediciones a través del tiempo. En (b) se grafican los dos LVDT más cercanos, uno en función del otro, para verificar su correlación.

Cuando se analizan casos de L/d bajos y deformaciones pequeñas, las correlaciones de los LVDT decaen, como se muestra en caso siguiente:

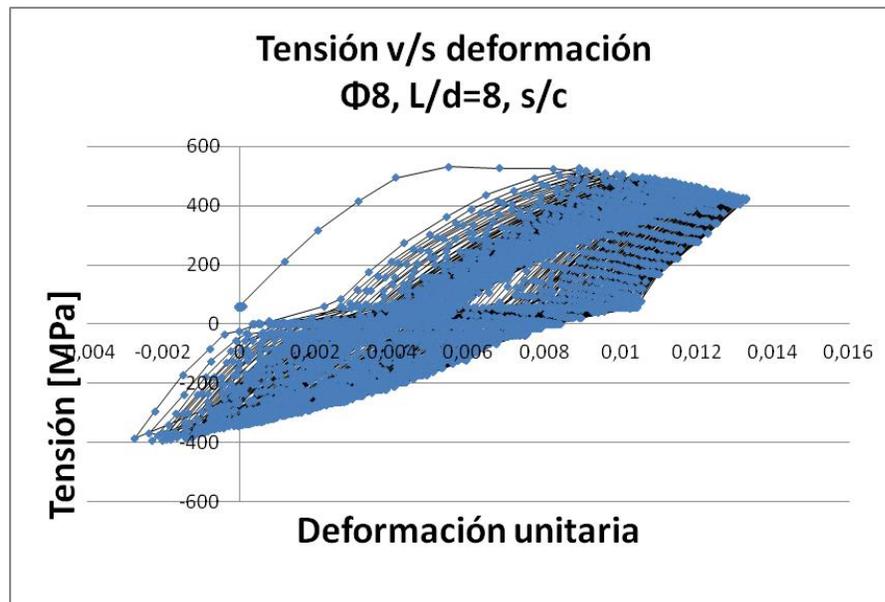


Figura 22: Sigma versus deformación unitaria del ensayo p8dl8\_1%\_1. S/c: sin corrección del módulo de elasticidad, esta corrección se verá en “Corrección de Modulo de Elasticidad” dentro de este mismo capítulo.

La figura 22 muestra la curva tensión-deformación del ensayo p8dl8\_1%\_1. Las deformaciones provienen de las mediciones con LVDT, las cuales se muestran a continuación:

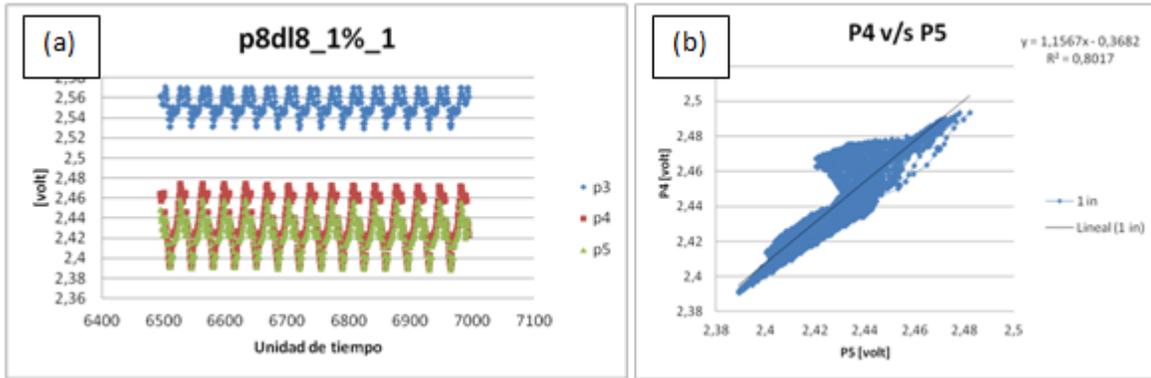


Figura 23: A la izquierda se muestran las medidas de los tres LVDT utilizados para p8dl8\_1%\_1 y a la derecha las dos con mejor correlación.

En las tablas del Anexo C se muestran todas las relaciones entre LVDT y destacadas están las utilizadas, que corresponden a los mejores casos.

En el Anexo A se encuentran todos los gráficos Tensión – deformación de los ensayos y se ve como coincide la baja correlación de los LVDT con la no claridad de las curvas. Éste fenómeno se da específicamente para deformaciones cercanas al 1 %, y llega a afectar a deformaciones de hasta entre 2 y 3 % cuando las relaciones L/d son pequeñas (6, 8 e incluso 12). Se ven pequeñas alteraciones del gráfico Tensión – deformación desde correlaciones menores al 0,98, llegando en algunos casos a menos de 0,96.

Este tipo de fenómenos llevan a poner en duda la credibilidad de los datos para los casos con deformaciones pequeñas, ya que son condiciones que se van reiterando a lo largo de todas las relaciones L/d consideradas.

### Corrección Módulos de Elasticidad

A pesar de tener curvas representativas del fenómeno tracción –compresión de las barras de acero, por lo menos en los casos de mayores deformaciones, existe una diferencia entre el módulo de elasticidad experimental obtenido del ensayo de la probeta con el nominal.

Ésta diferencia aparece a raíz de la deformación que se produce en la barra por el apriete de la mordaza (flexibilizándola), fenómeno que los LVDT no son capaces de captar por estar sujetos a las mordazas y no a la probeta. Ésta diferencia es aceptable y se puede corregir punto a punto. A continuación se ve un ejemplo de tal corrección:

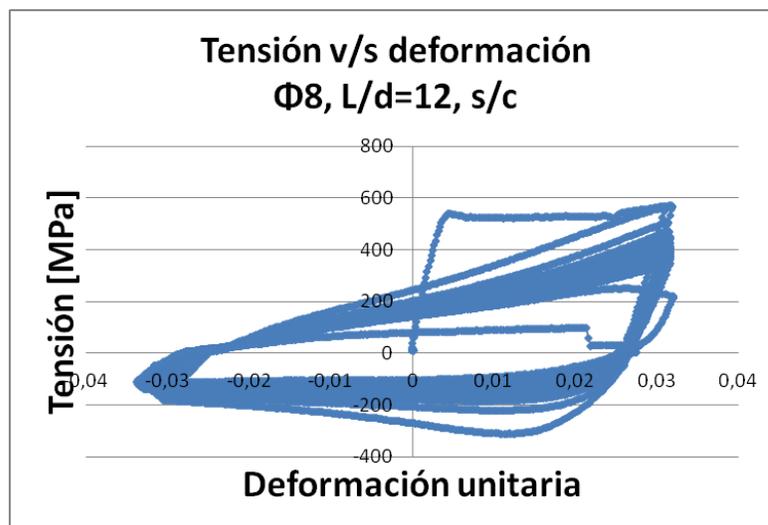


Figura 24: **Sigma versus deformación unitaria del ensayo p8d12\_3%\_2. S/c: sin corrección del módulo de elasticidad.**

En La figura 24 se aprecia la curva Tensión – deformación directamente de los LVDT, la cual entrega una pendiente o Módulo de Elasticidad E que se aprecia en la figura 25:

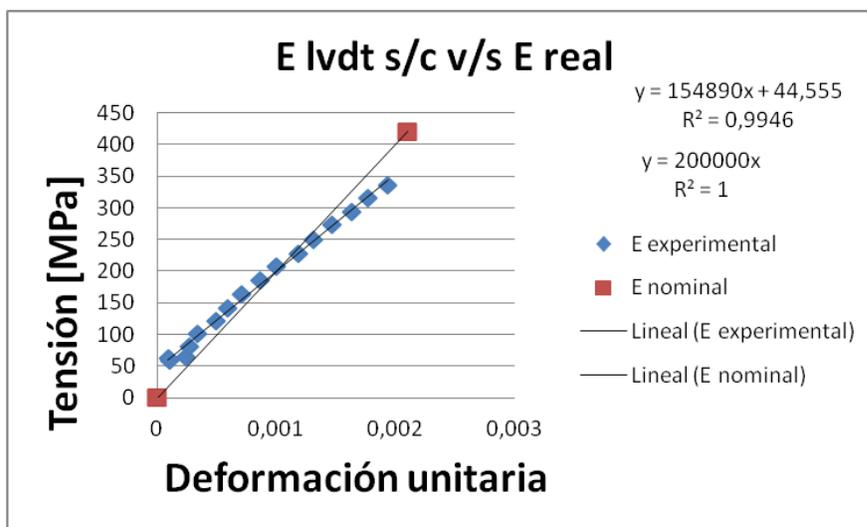


Figura 25: **E LVDT s/c v/ E real del ensayo p8d112\_3%\_2.**

Es clara la diferencia entre el módulo nominal del acero (200000 MPa) y el E que entrega el ensayo midiendo deformaciones con los LVDT. Esta diferencia nace del error de la medición de los dispositivos que entregan las deformaciones, luego:

$$\varepsilon_{\text{corregida}} = \varepsilon_{\text{lvdt}} - \varepsilon_{\text{real}} = \varepsilon_{\text{lvdt}} - \frac{\sigma_{\text{ensayo}}}{\text{PENDIENTE}},$$

Ecuación 6

Donde,

$$PENDIENTE = \frac{E_{experimental} * E_{real}}{E_{real} - E_{experimental}}$$

Ecuación 7

Con esto se tendrá una nueva deformación para cada punto de la curva, lo que se representa a continuación en la figura 26 (b):

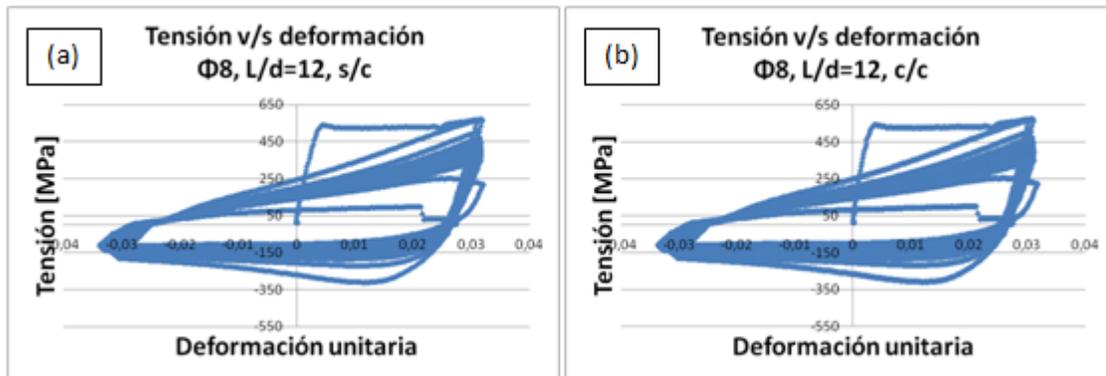


Figura 26: **Sigma versus deformación unitaria del ensayo p8dl2\_3%\_2. La figura 26 (a) es s/c y 26 (b) c/c. C/c: con corrección del módulo de elasticidad.**

Rescatando el Módulo de elasticidad corregido de la última figura, se tiene:

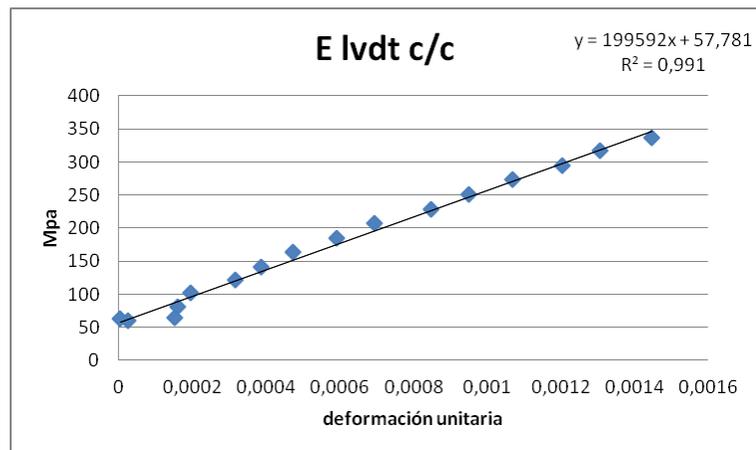


Figura 27: **E LVDT c/c del ensayo p8dl2\_3%\_2.**

Finalmente, se puede corroborar la corrección del módulo de elasticidad de la barra, desde un 77,4% a un 99,8%.

Este procedimiento se aplicó a cada uno de los ensayos y la comparación de sus respectivos E s/c con E c/c se encuentran en el Anexo D.

### Estimación de la deformación media

Las curvas del Anexo A deja en evidencia un fenómeno que predomina cuando la relación largo/diámetro y la deformación son pequeñas. Éste se refiere al desplazamiento de la curva completa, es decir, a pesar de que la probeta se está desplazando a una distancia constante en tracción y compresión, al momento de ser representado gráficamente, no queda claro cuánto es el desplazamiento real promedio. Recordemos además que la amplitud de desplazamiento constante se ingresa a la máquina universal, pero es medida por los LVDT y en este proceso puede haber algunas diferencias.

Se analizó ciclo a ciclo cada curva de cada ensayo para encontrar los máximos valores cuando se estaba traccionando la barra y la máxima compresión, para así tomar un promedio de las distancias absolutas y tener la amplitud de desplazamiento real, tal como muestra la figura 28:

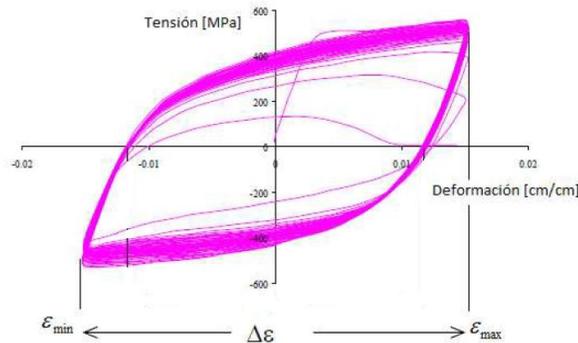


Figura 28: Amplitud de desplazamiento total probeta.

La amplitud corresponde a  $\Delta = \frac{\Delta\epsilon}{2}$ .

### Conteo de ciclos a rotura

La máquina universal utilizada contiene un contador interno de ciclos, sin embargo se definió, también a modo de corroborarlos, como medio ciclo cada vez que la probeta cambia de ser traccionada a ser comprimida y viceversa, es decir, como la curva parte en el origen, cada vez que vuelva a él es un ciclo. Así, fueron considerados todos los ensayos realizados en esta memoria.

## Tablas resumen de resultados

Finalmente, teniendo el módulo de elasticidad corregido, definido el sistema de conteo de ciclos previo a la rotura y habiendo obtenido las deformaciones reales de la probeta, se está en condiciones de relacionar todos los N° de ciclos con la relación L/d:

- $\Phi 8$ :

Tabla 8: Deformaciones y N° de ciclos para  $\Phi 8$ .

L/d	def [%] s/c	def [%] c/c	N°Ciclos		L/d	def [%] s/c	def [%] c/c	N°Ciclos		
6	1,01	-	+150	(1), (4)	8	1,09	-	+300	(3), (4)	
	-	-	-	(2)		-	-	-	-	(2)
	1,60	1,40	124			1,63	1,53	107		
	1,65	1,47	111			1,50	1,34	74		
	2,71	2,58	60			2,74	2,63	17		
	2,97	2,78	44			2,72	2,59	18		
	3,58	3,36	16			3,94	3,82	7		
	3,72	3,55	17			4,21	4,06	8		
	5,06	4,92	8			5,16	5,00	5		
	6,50	6,33	10			5,05	5,00	5		

L/d	def [%] s/c	def [%] c/c	N°Ciclos	L/d	def [%] s/c	def [%] c/c	N°Ciclos
12	0,79	0,71	140	16	0,86	0,80	97
	0,76	0,71	172		0,85	0,79	119
	1,93	1,86	37		1,90	1,86	43
	2,44	2,36	33		2,04	2,01	27
	3,16	2,98	16		2,88	2,85	11
	3,18	3,18	15		3,23	3,17	16
	4,23	4,21	5		3,67	3,64	12
	4,29	4,23	6		4,05	4,01	9
	5,56	5,50	4		5,55	5,54	5
	5,50	5,40	4		5,12	5,06	4

L/d	def [%] s/c	def [%] c/c	N°Ciclos	L/d	def [%] s/c	def [%] c/c	N°Ciclos
20	0,85	0,82	95	28	1,0888	1,0576	108
	0,98	0,94	114		0,9151	0,8697	95
	2,14	2,10	49		3,1556	3,1258	32
	2,10	2,06	49		3,4140	3,3841	33
	3,46	3,42	25		5,7211	5,6893	10
	3,44	3,42	17		5,5114	5,4780	12
	4,55	4,49	9				
	4,20	4,19	8				
	5,80	5,77	10				
	5,77	5,74	10				

- $\Phi 16$ :

Tabla 9: Deformaciones y N° de ciclos para  $\Phi 16$ .

L/d	def [%] s/c	def [%] c/c	N°Ciclos		L/d	def [%] s/c	def [%] c/c	N°Ciclos
8	0,59	0,47	100	(1)	12	0,77	0,68	171
	-	-	-	(2)		0,82	0,74	134
	2,62	2,24	12			3,33	3,28	11
	2,80	2,75	13			3,33	3,08	12
	5,11	4,97	4			5,53	5,47	5
	5,31	5,19	5			5,65	5,47	6

L/d	def [%] s/c	def [%] c/c	N°Ciclos		L/d	def [%] s/c	def [%] c/c	N°Ciclos
16	0,93	0,88	104		20	1,15	1,10	109
	0,93	0,88	97			1,00	0,96	126
	3,29	3,24	16			2,32	2,31	34
	3,47	3,42	16			2,22	2,19	37
	5,82	5,78	7			3,31	3,27	24
	5,64	5,60	8			3,62	3,59	21
						4,46	4,42	14
				4,55	4,52	15		
				5,70	5,67	13		
				5,62	5,59	8		

Los casos destacados se explican a continuación:

- (1): Ensayos no considerados en el análisis por la poca fidelidad de los datos; se repitió el ensayo varias veces pero la rotación de las mordazas movieron los LVDT a tal punto que no es pertinente considerarlo.
- (2): Ensayo no realizado por no tener las condiciones para que sus resultados sean confiables.
- (3): Ensayo no considerado, por el desplazamiento de las mediciones. En la figura 21 se muestra claramente cómo el apriete de la mordaza afecta como “ruido” las mediciones de los LVDT.
- (4): Valores de deformación referenciales por la poca fidelidad de los datos experimentales.

La “def % s/c” es el promedio de las deformaciones sin corregir medidas por los LVDT en porcentaje, la “def % c/c” es el promedio de las deformaciones corregidas obtenidas de la sección “Corrección de amplitudes de desplazamiento”. Para obtener el número total de ciclos se consideró que un ciclo va desde el origen hasta que vuelve a él, aproximando hacia abajo.

Para  $\Phi 8$  las deformaciones varían entre un 13% y un 1%, siendo mayores diferencias en las deformaciones más pequeñas. Luego del 3% de deformación, éstas diferencias no superan el 6% para las relaciones  $L/d=6$ ,  $L/d=8$  y  $L/d=12$ . Para las relaciones  $L/d=16$ ,  $L/d=20$  y  $L/d=28$  luego del 3% las diferencias entre deformaciones no superan el 2%.

Para  $\Phi 16$  las deformaciones varían entre un 15% y un 1%, siendo mayores diferencias en las deformaciones más pequeñas. Luego del 3% de deformación, éstas diferencias no superan el 8% para las relaciones  $L/d=8$  y  $L/d=12$ . Para las relaciones  $L/d=16$  y  $L/d=20$  luego del 3% las diferencias entre deformaciones no superan el 1,7%.

Los gráficos correspondientes a estas tablas aplicando log-log por separado se encuentran en el Anexo E. Las tendencias de las relaciones  $L/d$  son las siguientes:

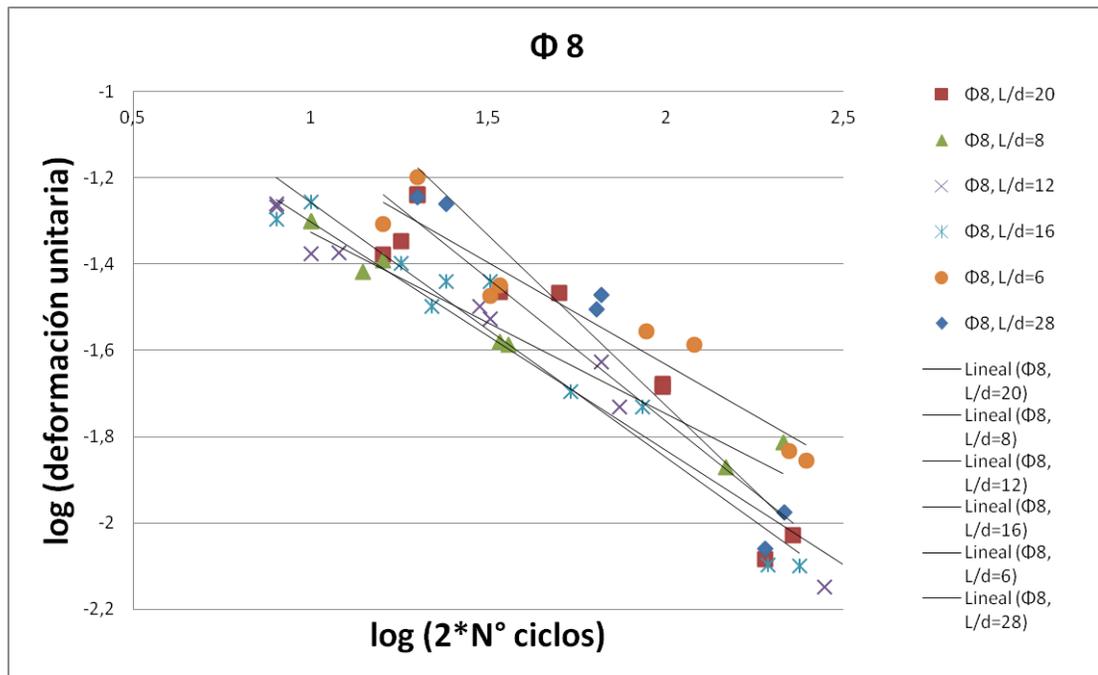


Figura 29: Tendencias de las relaciones  $L/d$  en barras  $\Phi 8$  considerando la deformación versus el número de ciclos en una relación log-log.

La figura 29 muestra una clara tendencia en la disminución del número de ciclos con el aumento de la deformación aplicada. Además se aprecia una correlación similar en grupos de relaciones  $L/d$ , es decir, entre  $L/d=6$  y  $L/d=8$ , así como entre  $L/d=12$  y  $L/d=16$  y finalmente entre  $L/d=20$  y  $L/d=28$ .

La pendiente con que decae la curva es cada vez más pronunciada cuanto mayor es el  $L/d$ .

De todas formas cabe destacar que en las relaciones  $L/d=20$  y  $L/d=28$ , con deformaciones cercanas al 5%, la tendencia es que se necesita una cantidad similar de ciclos para la fractura cuando se deforma un 4%, comportamiento que se corrobora con la barra  $\Phi 16$ .

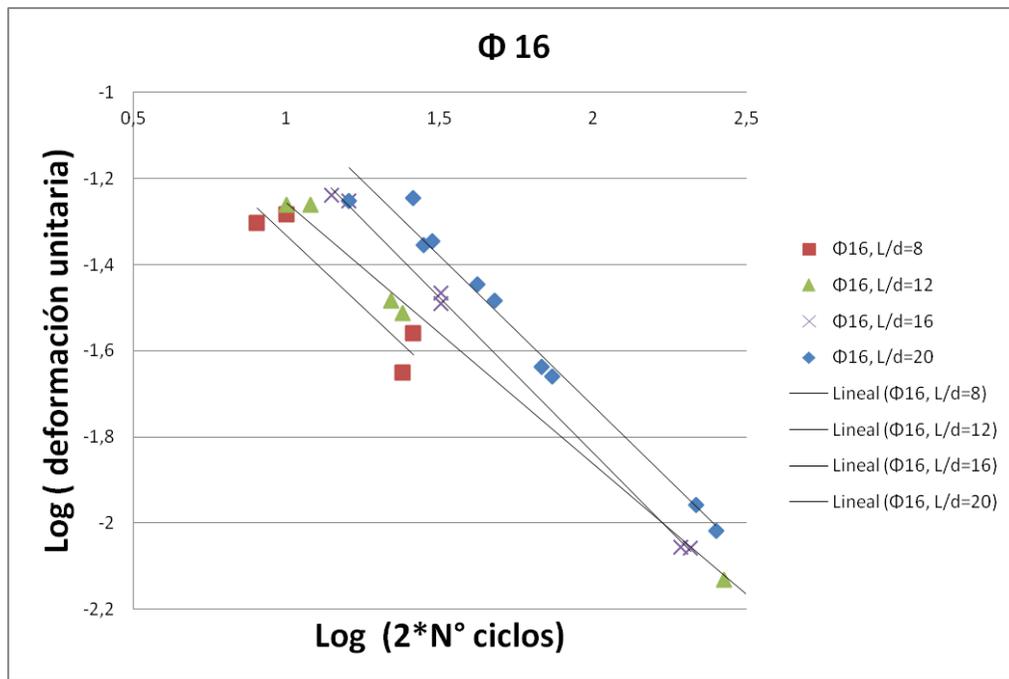


Figura 30: Tendencias de las relaciones L/d en barras Φ16 considerando la deformación versus el número de ciclos en una relación log-log.

En el caso Φ16 la tendencia entra las relaciones confirma la correlación del fenómeno generado en Φ8, sin embargo, en este caso todas las curvas poseen pendientes elevadas.

Para comparar con los modelos de la literatura se puede llevar lo obtenido a una ecuación potencial:

$$y = K * x + \Delta$$

Ecuación 8

$$\log(y) = K * \log(x) + \log(\Delta) = \log(x^K) + \log(\Delta)$$

Ecuación 9

$$y = \Delta * x^K$$

Ecuación 10

Donde,

$$y = \text{deformación} = \varepsilon = Cte * (2 * N^{\circ} \text{ciclos})^{\alpha}$$

Ecuación 11

Luego, los parámetros son los siguientes:

$$Cte = 10^A$$

$$\alpha = K$$

Y en cada relación L/d queda:

Tabla 10: Parámetros para  $\Phi 8$  y  $\Phi 16$ .

PHI 8			PHI 16		
L/d	Cte	$\alpha$	L/d	Cte	$\alpha$
6	0,205	-0,473	8	0,216	-0,668
8	0,124	-0,420	12	0,224	-0,606
12	0,169	-0,529	16	0,401	-0,720
16	0,215	-0,591	20	0,456	-0,694
20	0,358	-0,659			
28	0,704	-0,788			

La comparación por cada  $\Phi$  con los resultados de Brown [2] se ve en los siguientes gráficos:

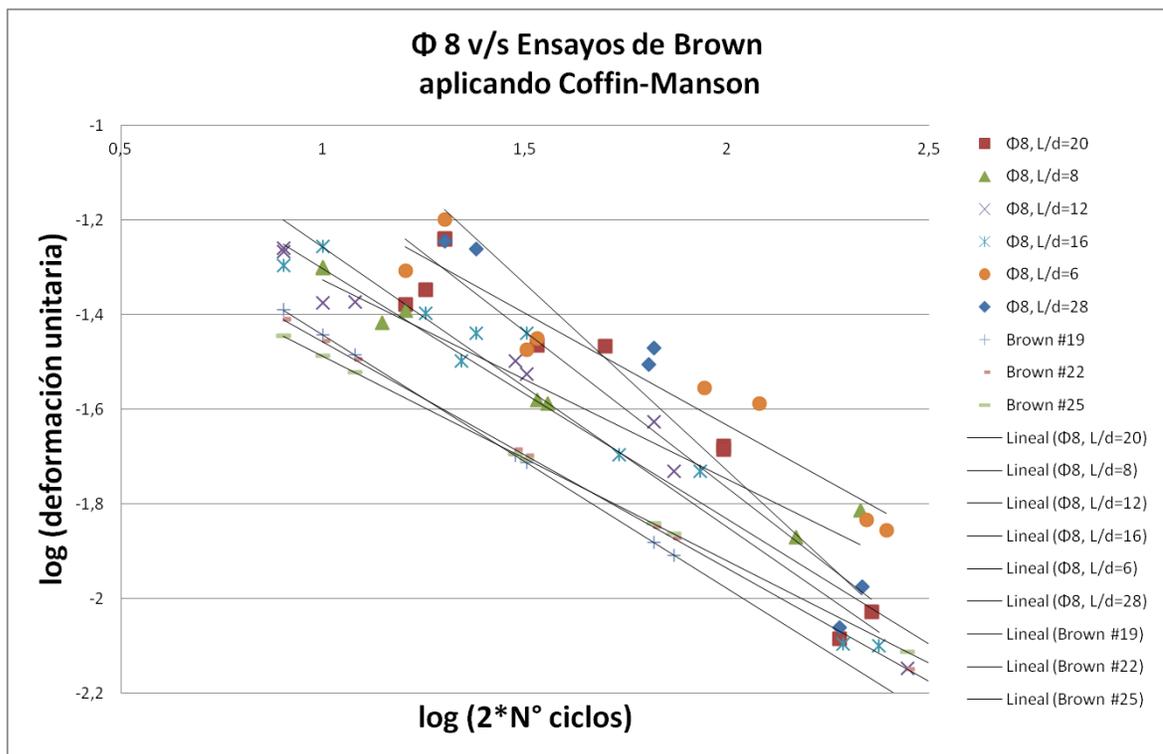


Figura 31:  $\Phi 8$  v/s Ensayos de Brown

En la figura 31 queda en evidencia la correlación entre los resultados realizados por Brown y los que se llevaron a cabo para este trabajo de título. Todas las relaciones L/d con  $\Phi 8$  tienen la misma tendencia de decaimiento de los números de ciclos mientras aumentan las deformaciones, al igual que lo mostrado por Brown, sobre todo para las relaciones L/d menores.

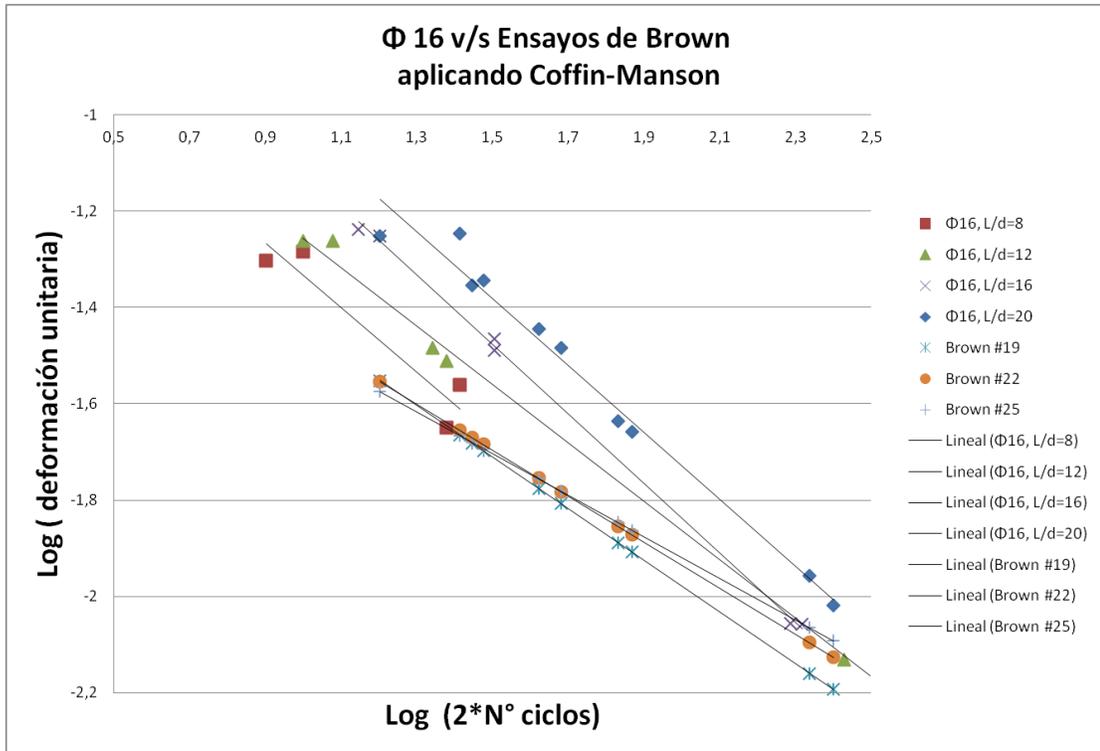


Figura 32: Φ16 v/s Ensayos de Brown

El comportamiento descrito para Φ 8 se corrobora para Φ 16, repitiéndose la tendencia, sin embargo la pendiente de los ensayos trabajados en esta investigación decaen más rápidamente que los realizados por Brown.

Finalmente, se muestran las tendencias de Φ8 y Φ16 en una misma figura:

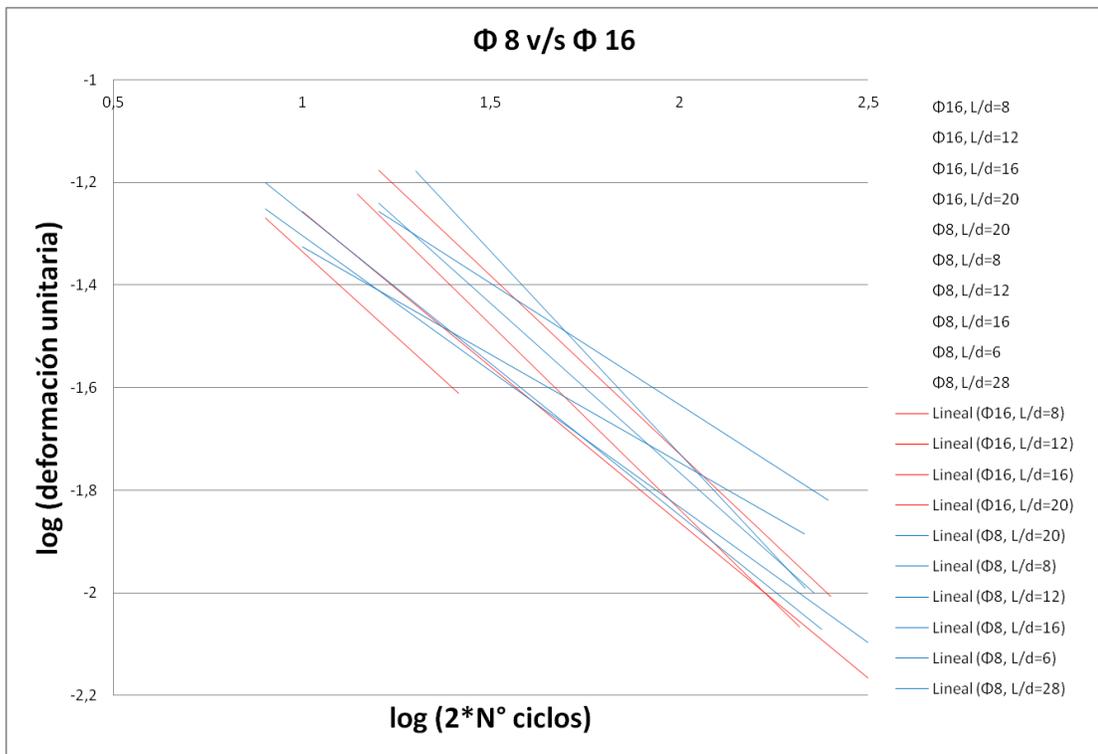


Figura 33: Tendencias de Φ 8 y Φ16.

Donde las tendencias en azul corresponden a los ensayos con Φ8 y las rojas a Φ16.

## Conclusiones y limitaciones

### Conclusiones

De los daños que dejó el terremoto del 27 de febrero de 2010 se analiza uno de los patrones más observados. El pandeo de las barras de refuerzo, producto del descascaramiento de muros exponiéndolas a la acción sísmica sin restricciones laterales más allá de los estribos, es la columna vertebral de la investigación que se lleva a cabo para este trabajo de Título.

Considerando los diámetros más utilizados en Chile, así como las relaciones largo/diámetro más ocupadas en construcción, se decide analizar el comportamiento de relaciones  $L/d$  para barras  $\Phi 8$ , de las cuales 4 son validadas con barras  $\Phi 16$ .

Cuando se habla de bajo número de ciclos en las condiciones que se hicieron los ensayos, lamentablemente es muy difícil estudiar con certeza la fatiga del material en relaciones y deformaciones muy pequeñas. El montaje y herramientas disponibles no dan certeza de que los resultados sean confiables por las continuas rotaciones de las mordazas alterando las mediciones.

Sin embargo, cuando se tienen deformaciones sobre el 2 ó 3% y se manejan relaciones  $L/d$  sobre 8, las curvas obtenidas son más confiables, las mordazas de la máquina universal no rotan y el comportamiento del material es más consecuente.

Al alcanzar deformaciones plásticas, e incluso endurecimiento para deformaciones mayores que 4%, es apreciable el daño que le provoca la carga cíclica al material, llegando a la rotura rápidamente en casos extremos (4-5 ciclos).

En las curvas deformación versus número de ciclos hasta la rotura, se puede apreciar el mismo comportamiento para todas las relaciones consideradas, en especial para deformaciones entre 2 y 4 %.

De esta investigación se puede rescatar que el comportamiento del acero a la fatiga por bajo número de ciclos es prácticamente independiente de la relación largo/diámetro, así como también de la sección transversal, por lo menos para los casos estudiados.

Caso curioso fue el observado con las deformaciones mayores, sobre el 5% en relaciones largo diámetro sobre 20, tanto en  $\Phi 8$  como  $\Phi 16$ . Los ciclos dejaron de seguir la tendencia a disminuir y empezaron a mantenerse. No se puede concluir sobre el tema ya que se necesitarían nuevas tablas de ensayos enfocadas en estos casos.

La literatura presenta modelos en base a deformaciones constantes en función del número de ciclos. El comportamiento de las curvas utilizadas por otros autores coincide con el comportamiento de los ensayos realizados en esta investigación, validando así las ecuaciones de Coffin-Manson.

## Limitaciones

El primer problema que se tuvo, tras lo cual se realizaron varios ensayos de prueba, fue decidir con qué equipos sería mejor medir las deformaciones de una manera externa que no involucrara la máquina universal. Los LVDT medían, pero no reflejaban bien el módulo de elasticidad del acero. Fue pensando en esto que se agregaron extensómetros. Sin embargo, después de la primera tracción el extensómetro deslizaba de la probeta perdiendo sentido las mediciones. Hubiera sido ideal que funcionara el sistema del “anillo”, pero lamentablemente deslizaba también. En este caso el fenómeno de deslizamiento se observa al partir el ensayo, producto del adelgazamiento en de la barra en la parte empotrada con las mordazas.

A pesar de que se emplea una corrección del módulo de elasticidad y de las deformaciones, queda pendiente el tema de apoyo de los LVDT. El montaje muestra cómo cada una de las barras de los LVDT está pegada a la mordaza superior apoyándose en la inferior como referencia. Este sistema funcionaría si las mordazas no tuvieran ningún tipo de movimiento que pudiera alterar las mediciones.

Con respecto al equipo en sí, las mordazas rotan levemente al estar ensayando las probetas, a pesar de que para barras largas prácticamente no tiene consecuencias en términos de mediciones. Cuando se trabaja con pequeñas deformaciones y pequeñas relaciones  $L/d$ , los errores son notorios, al nivel de que los datos pudiesen no ser válidos.

Lo anterior es especialmente relevante cuando se quiere abordar deformaciones pequeñas. Barras ensayadas con deformaciones cercanas al 1% nunca llegaron a la rotura para  $L/d$  pequeños, pero no se tiene la certeza si por propiedades del material o deficiencias del montaje.

Además de lo ya mencionado con respecto al montaje, no está de más mencionar que en más de alguna oportunidad se tuvieron problemas de desplazamientos de los gráficos. Esto podría tener varias explicaciones. En primer lugar hay que recordar que el sistema de agarre de los LVDT no es el más apropiado y podría estar girando la cabeza de la mordaza, lo que alteraría las correlaciones entre LVDT. Además de esto, en algunos de los ensayos sucedió que la máquina solía apretar la barra mientras se estaba ensayando, lo que producía automáticamente el traslado de las lecturas de los LVDT. Este problema debería solucionarse en ensayos futuros.

## Referencias

1. **Rojas, P.** “Modelamiento de la fatiga de bajo número de ciclos para el refuerzo longitudinal de elementos de hormigón armado susceptible de pandeo”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2011.
2. **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.
3. **Mander, J.B., Panthaki, F.D. y Kasalanti, A.** Low-Cycle Fatigue Behaviour of Reinforcing Steel. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 6, No. 4, 1994, pp. 453 – 468.
4. **Massone, L. M. y Moroder, D.** Buckling modelling of reinforcing bars with imperfections. Engineering Structures, V. 31, No. 3, 2009, pp. 758 – 767.
5. **Koh, S.K. y Stephens, R.I.** Mean stress effects on low cycle fatigue for a high strength steel. Fatigue Fracture of Engrg. Mater. and Struct., 14 (4), 1991, pp. 413 - 428.
6. **Kunnath, S.K., Heo, Y.A. y Mohle, J.F.** Nonlinear Uniaxial Material Model for Reinforcing Steel Bars. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2009, pp. 335 – 343.
7. **Monti, G. y Nuti, C.** “Nonlinear Cyclic Behaviour of Reinforcing Bars Including Buckling”, Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 118, No. 12, 1992, pp. 3268 – 3284.
8. **Lacaze, C.** “Estudio y Modelamiento del Impacto del Pandeo en la Fatiga de Bajos Ciclos en Barras Longitudinales para Hormigón Armado”, Tesis de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 2009, 94 pp.
9. **Chang, G. A. Mander, J. B.** “Seismic Energy Based Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns”, Part 1 – Evaluation of seismic capacity, Department of Civil Engineering, Technical Report NCEER-94-0006. State University of New York at Buffalo, 1994, p. 483.
10. **Massone, L. y Rojas, F.** "Capítulo 8: Comportamiento de edificios de hormigón armado" en el libro "Mw = 8.8 Terremoto en Chile - 27 de febrero 2010", Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2012.

# Anexos

## Anexo A: Gráficos

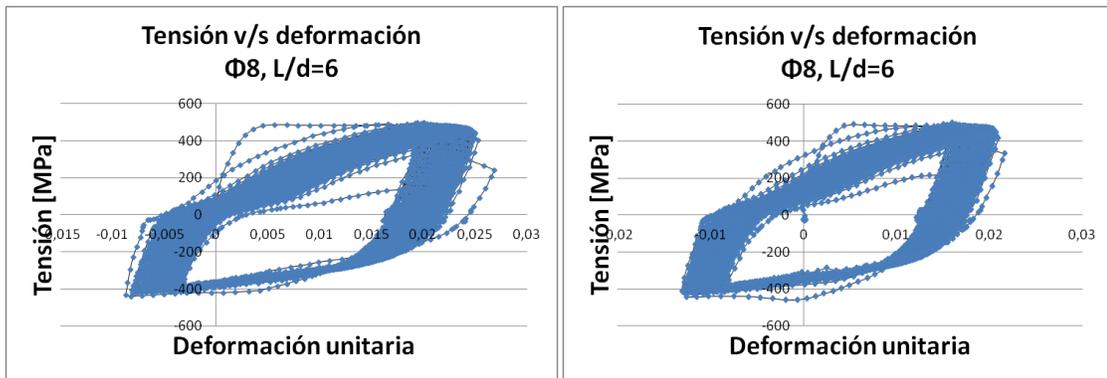


Figura 34: Sigma v/s deformación L/d=6, 2%, Φ8.

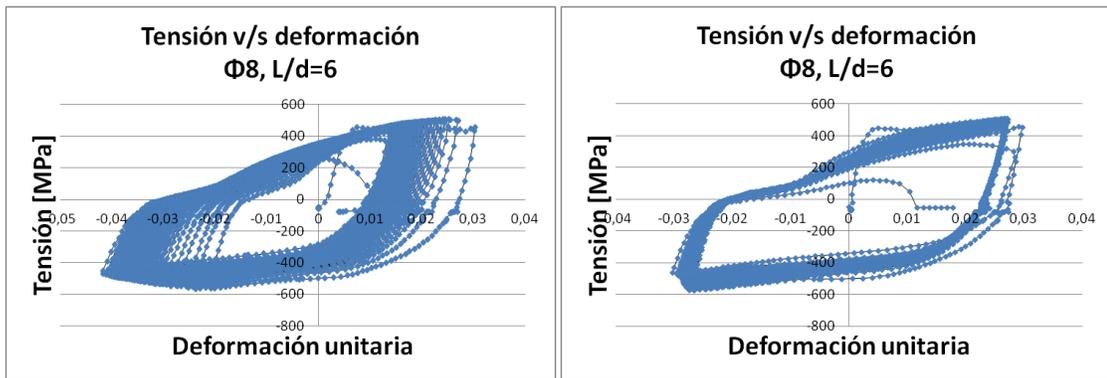


Figura 35: Sigma v/s deformación L/d=6, 3%, Φ8.

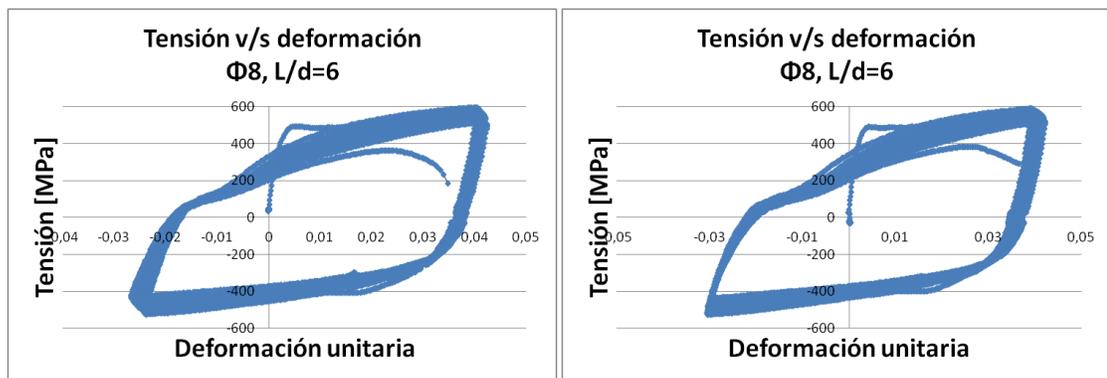


Figura 36: Sigma v/s deformación L/d=6, 4%, Φ8.

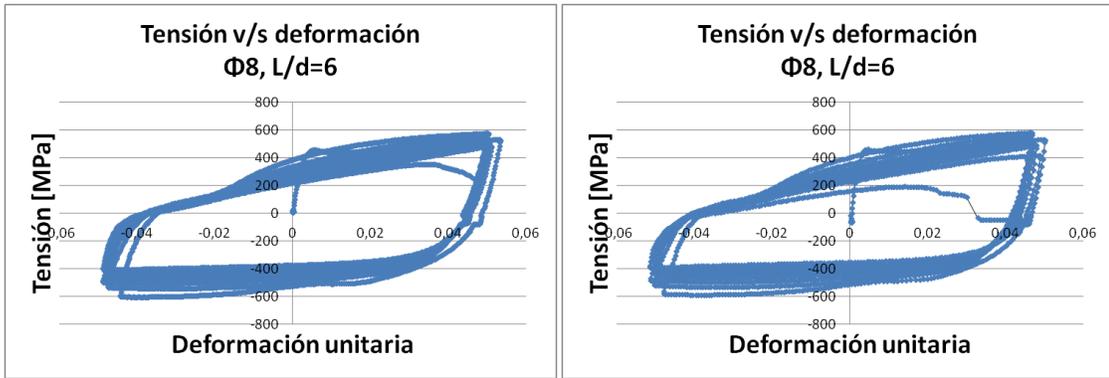


Figura 37: **Sigma v/s deformación L/d=6, 5%, Φ8.**

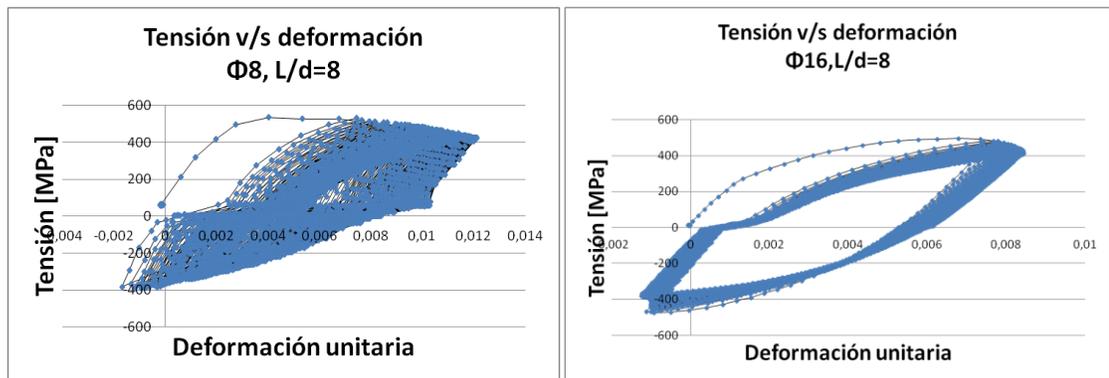


Figura 38: **Sigma v/s deformación L/d=8, 1% en Φ8 y Φ16.**

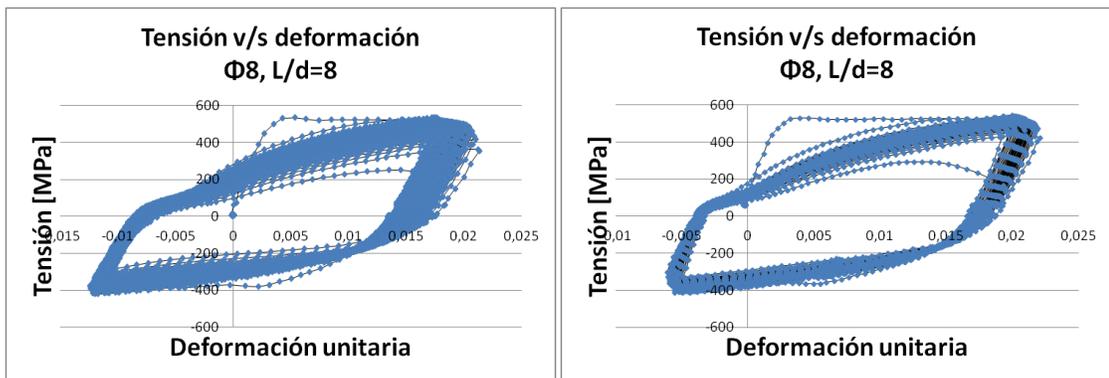


Figura 39: **Sigma v/s deformación L/d=8, 2% en Φ8.**

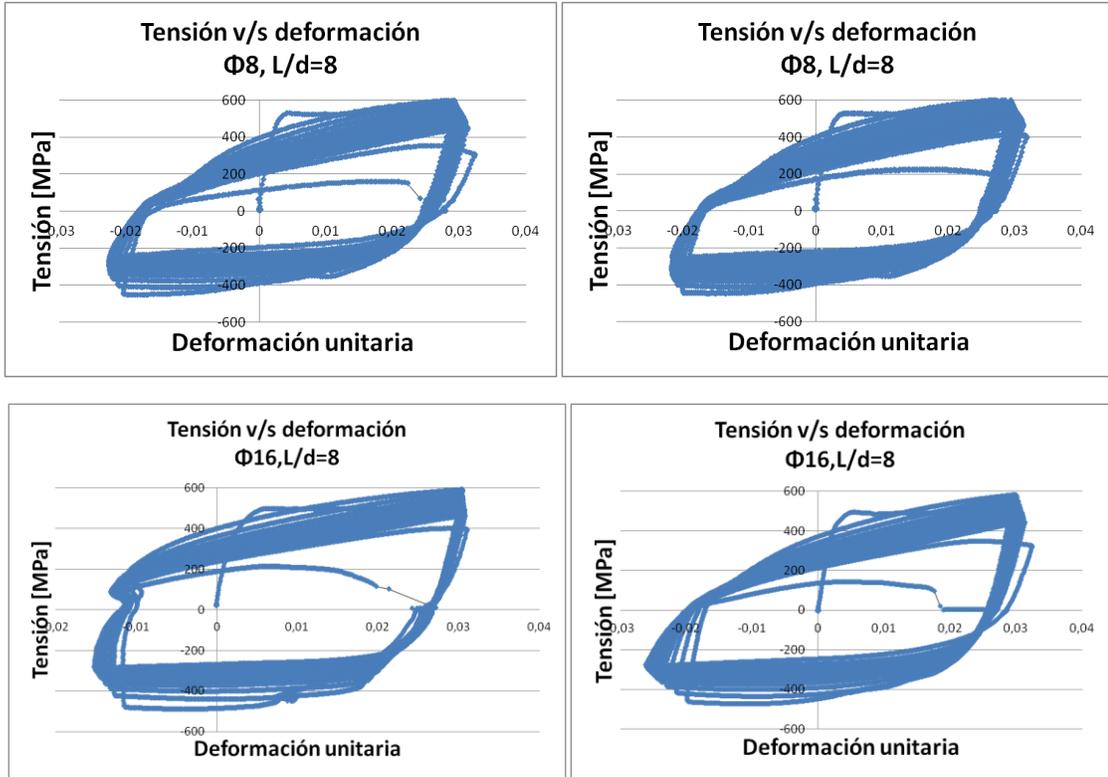


Figura 40: **Sigma v/s deformación L/d=8, 3% en Φ8 y Φ16.**

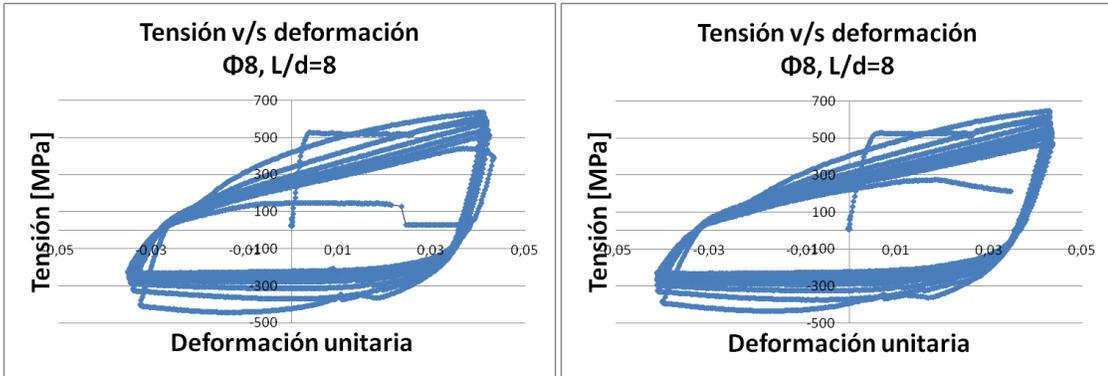
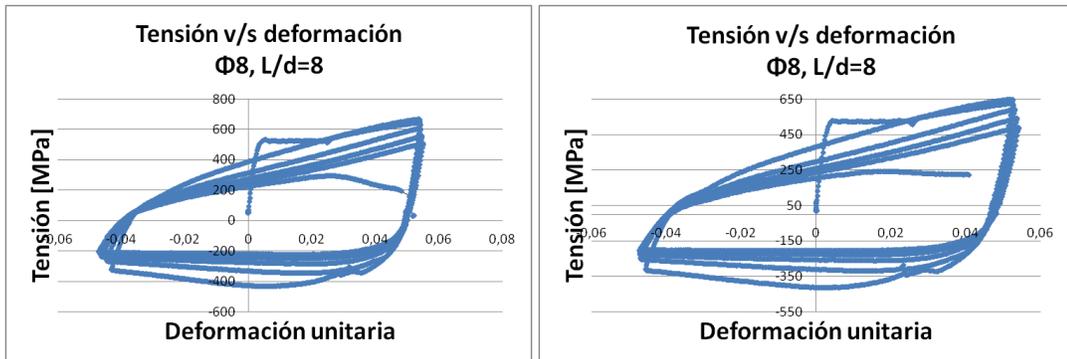


Figura 41: **Sigma v/s deformación L/d=8, 4% en Φ8.**



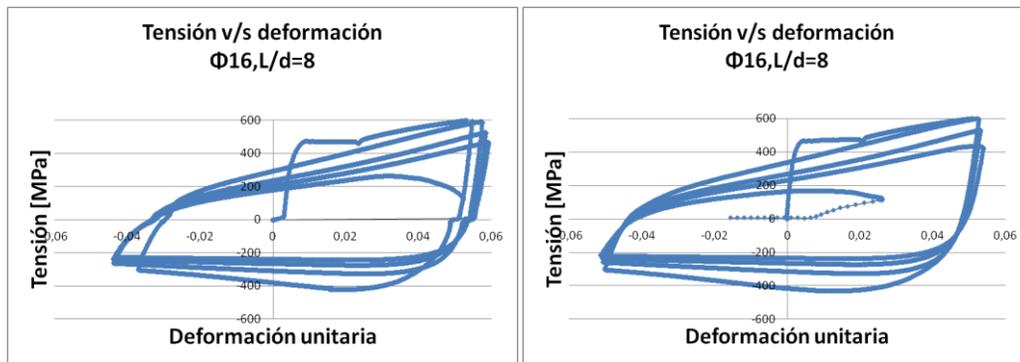


Figura 42: Sigma v/s deformación L/d=8, 5% en Φ8 y Φ16.

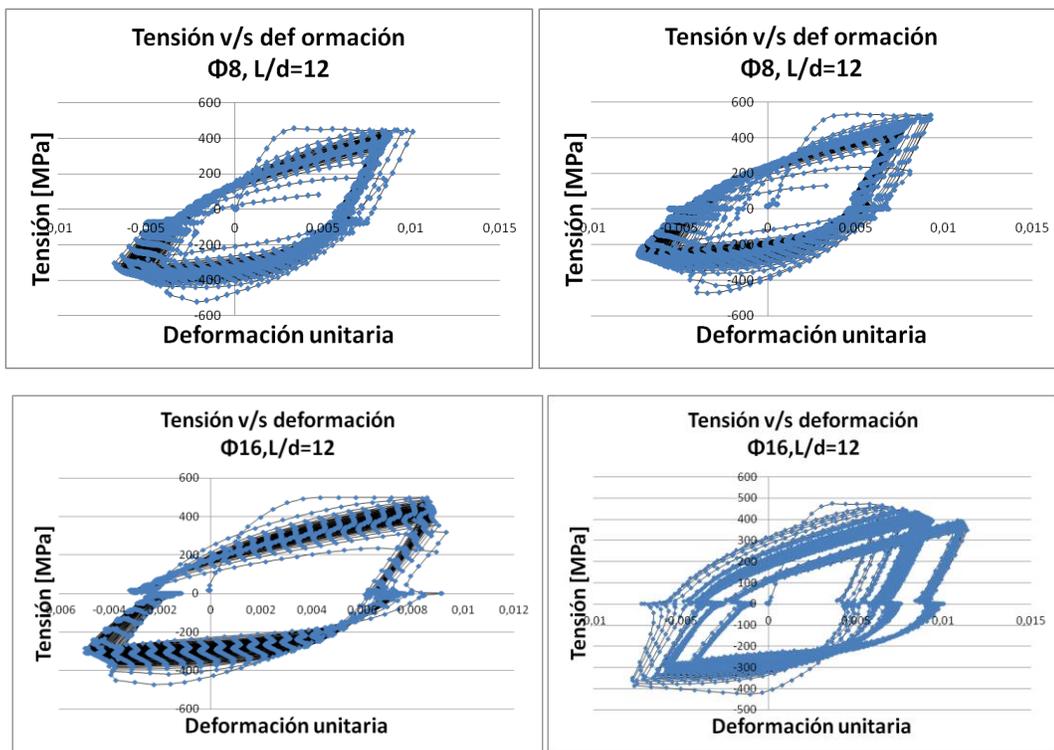


Figura 43: Sigma v/s deformación L/d=12, 1% en Φ8 y Φ16.

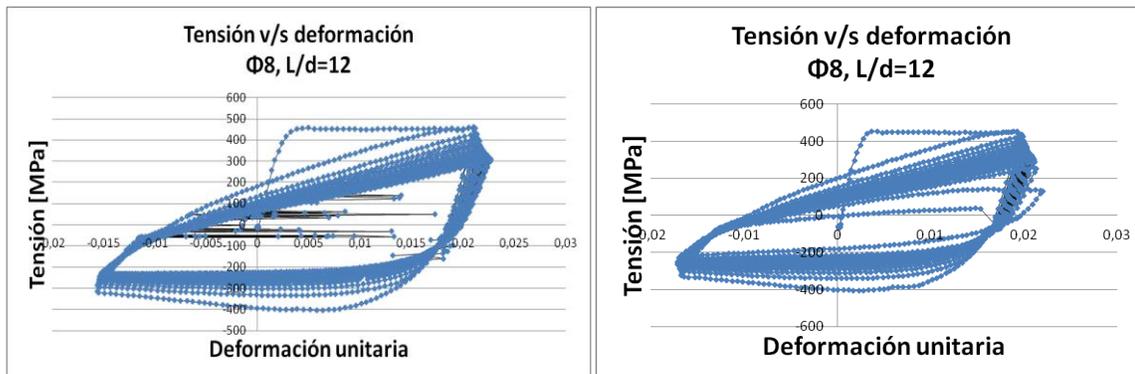


Figura 44: Sigma v/s deformación L/d=12, 2% en Φ8.

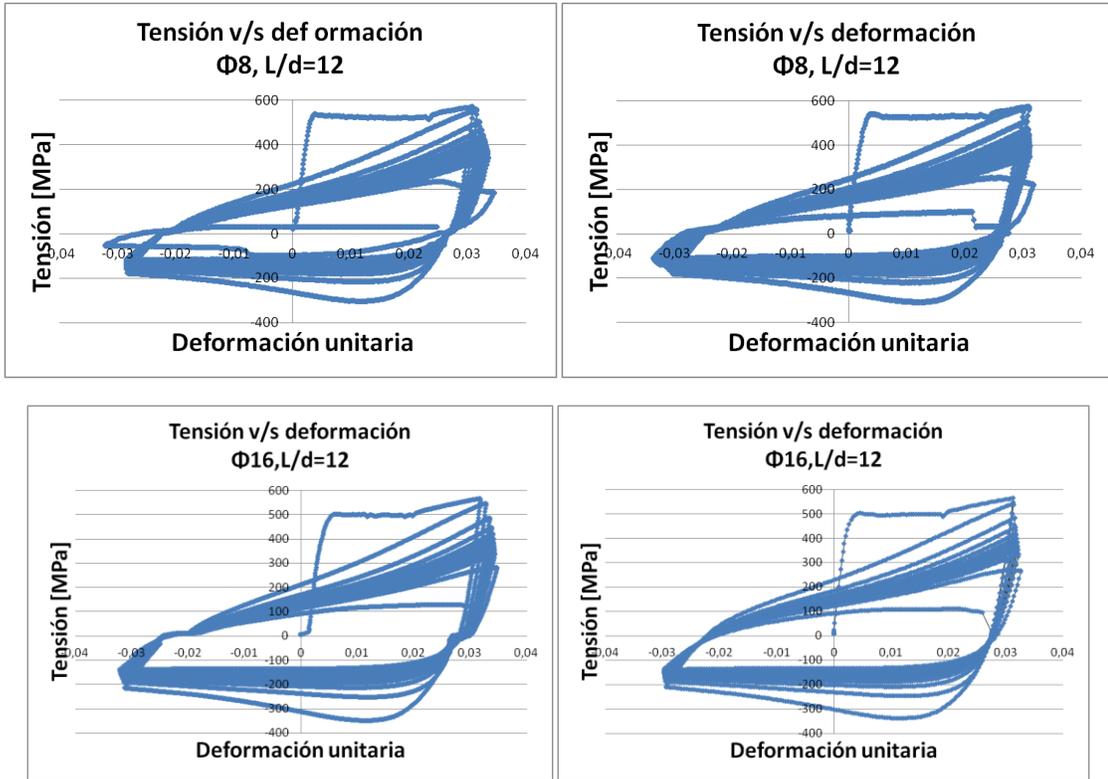


Figura 45: **Sigma v/s deformación L/d=12, 3% en Φ8 y Φ16.**

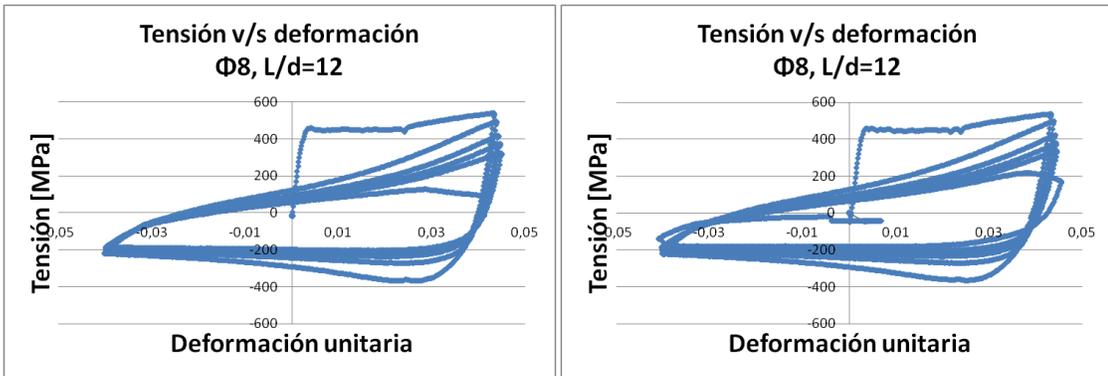


Figura 46: **Sigma v/s deformación L/d=12, 4% en Φ8.**

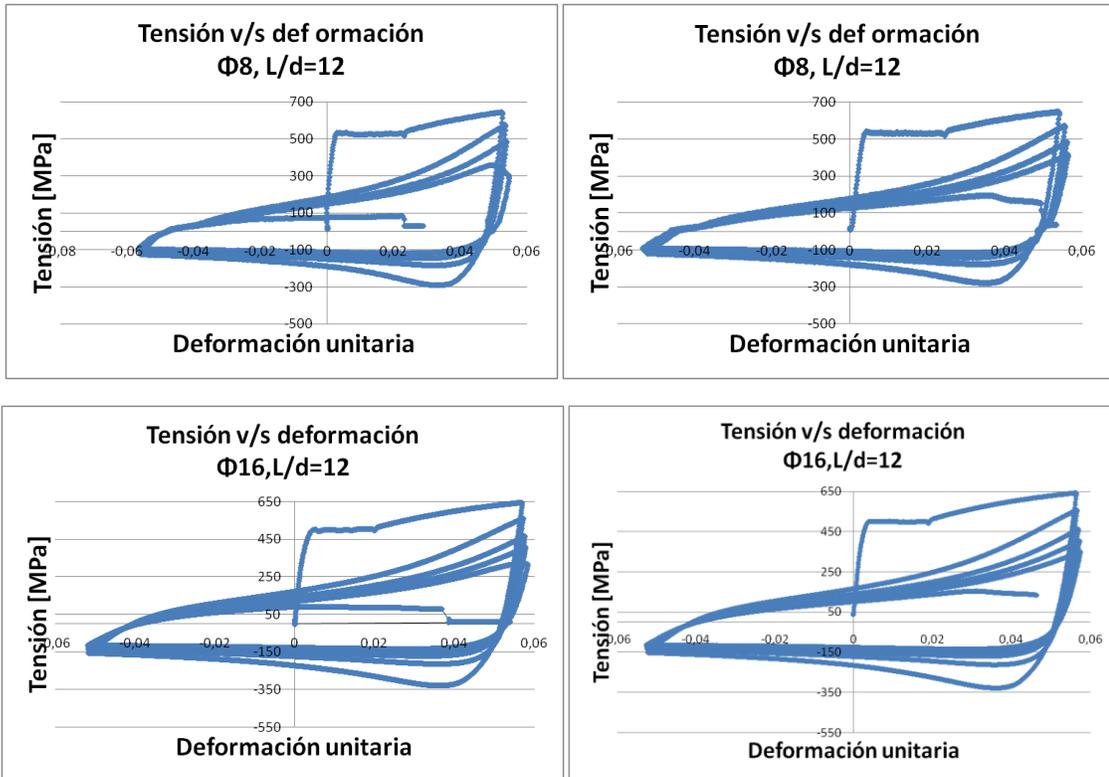


Figura 47: **Sigma v/s deformación  $L/d=12$ , 5% en  $\Phi 8$  y  $\Phi 16$ .**

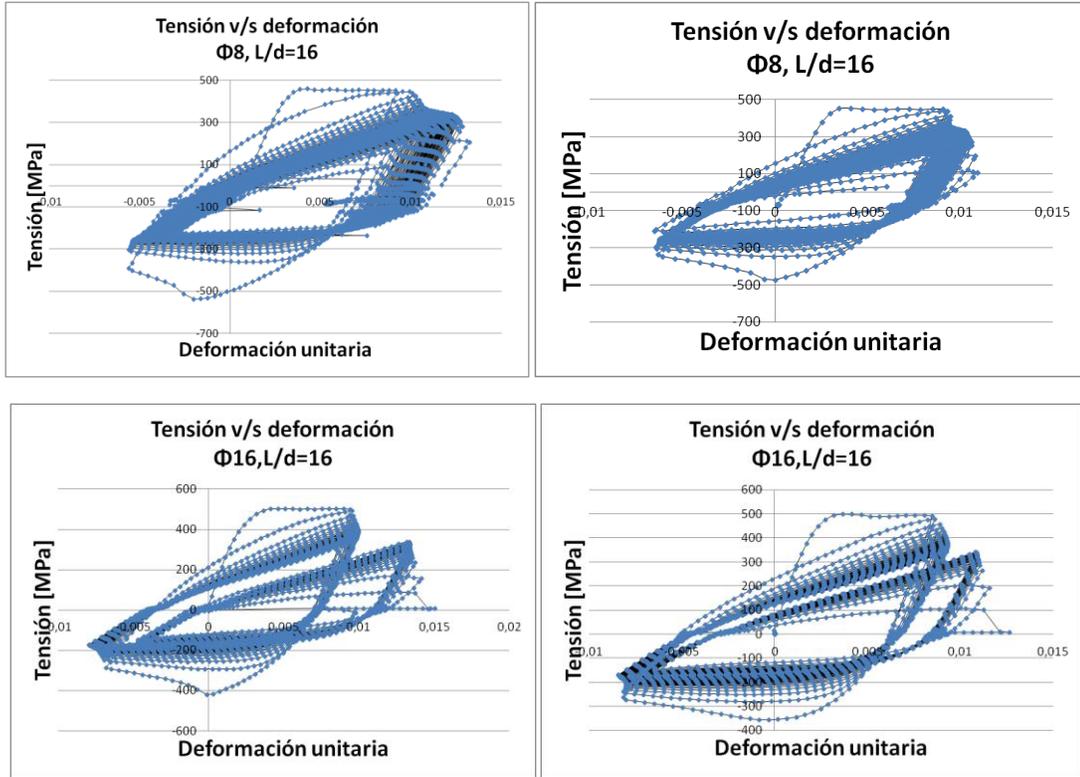


Figura 48: Sigma v/s deformación L/d=16, 1% en Φ8 y Φ16.

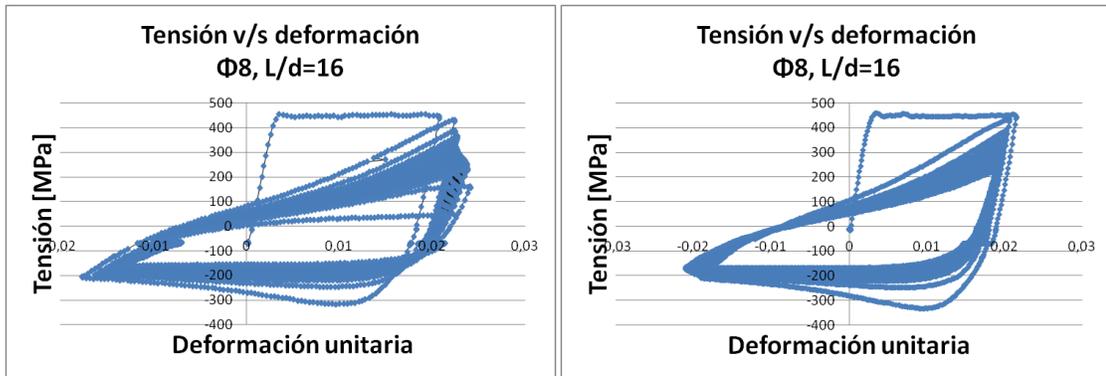
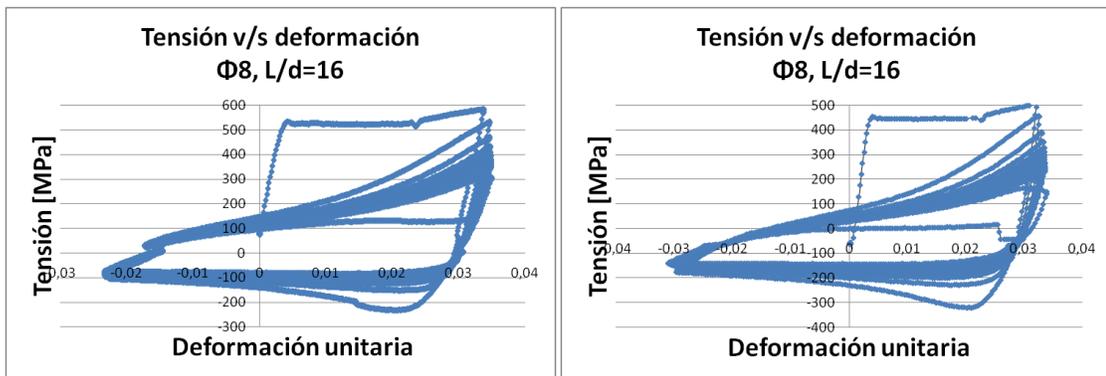


Figura 49: Sigma v/s deformación L/d=16, 2% en Φ8.



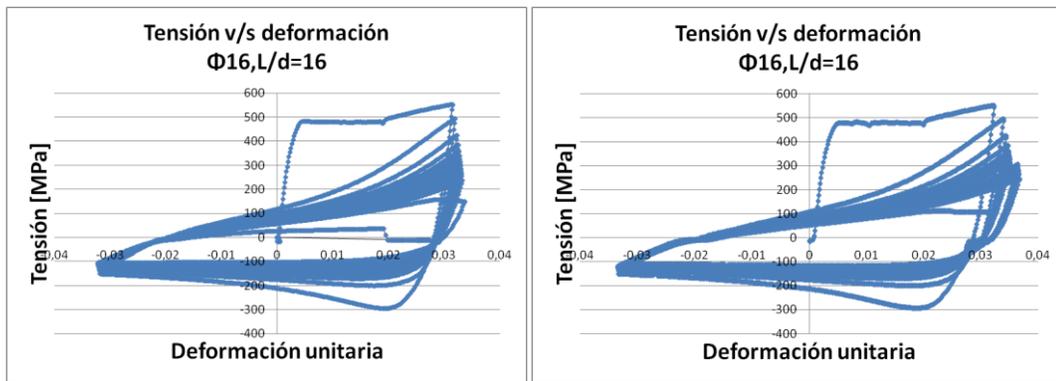


Figura 50: Sigma v/s deformación L/d=16, 3% en Φ8 y Φ16.

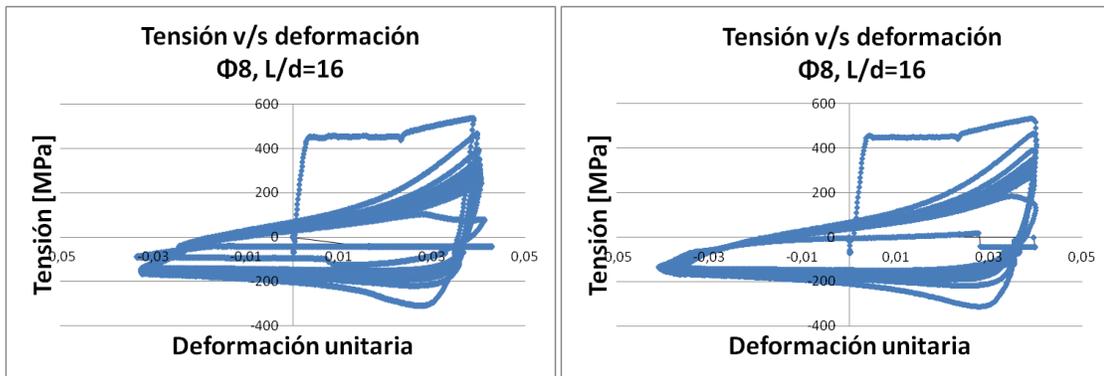


Figura 51: Sigma v/s deformación L/d=16, 4% en Φ8.

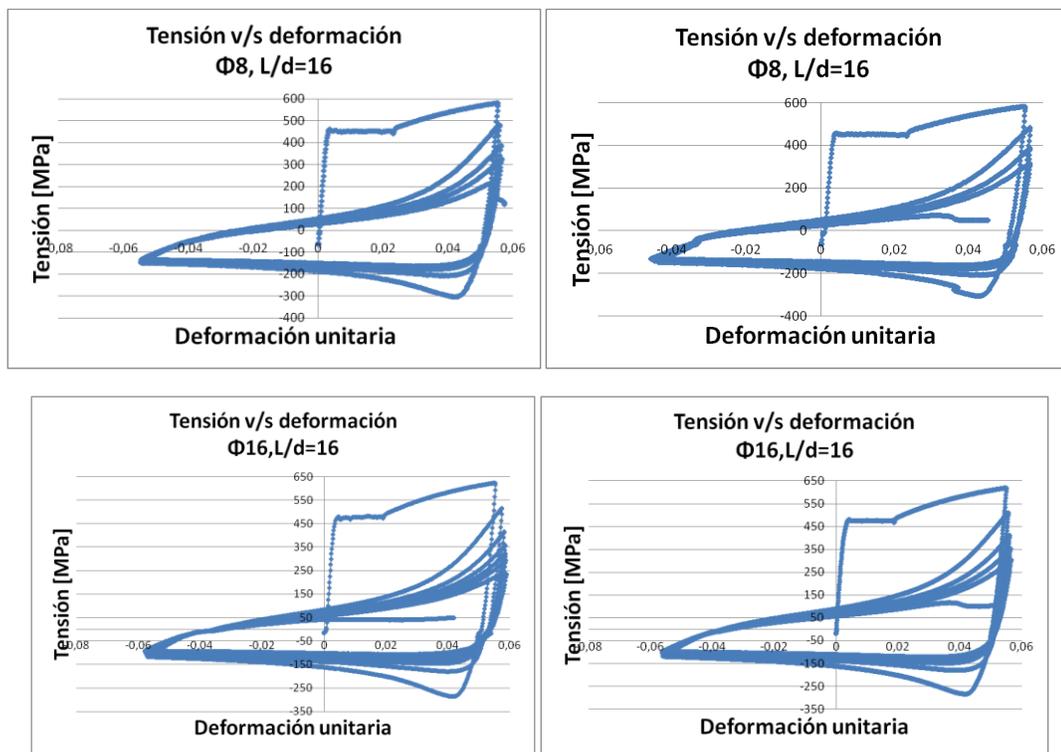


Figura 52: Sigma v/s deformación L/d=16, 5% en Φ8 y Φ16.

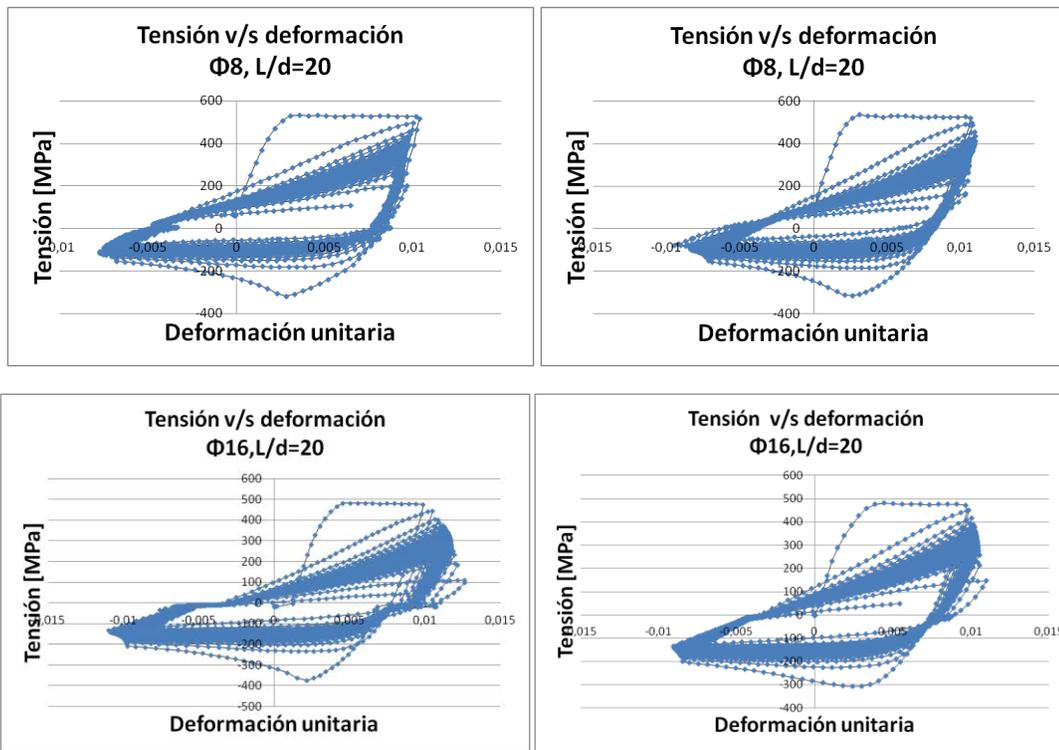


Figura 53: **Sigma v/s deformación L/d=20, 1% en  $\Phi 8$  y  $\Phi 16$ .**

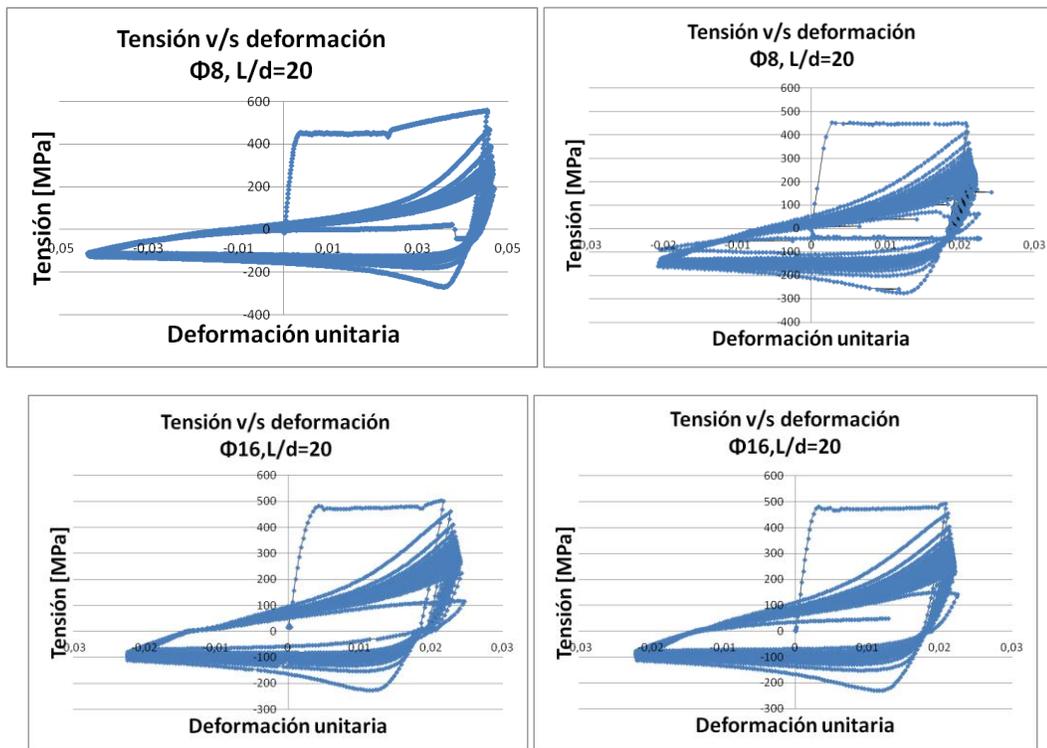


Figura 54: **Sigma v/s deformación L/d=20, 2% en  $\Phi 8$  y  $\Phi 16$ .**

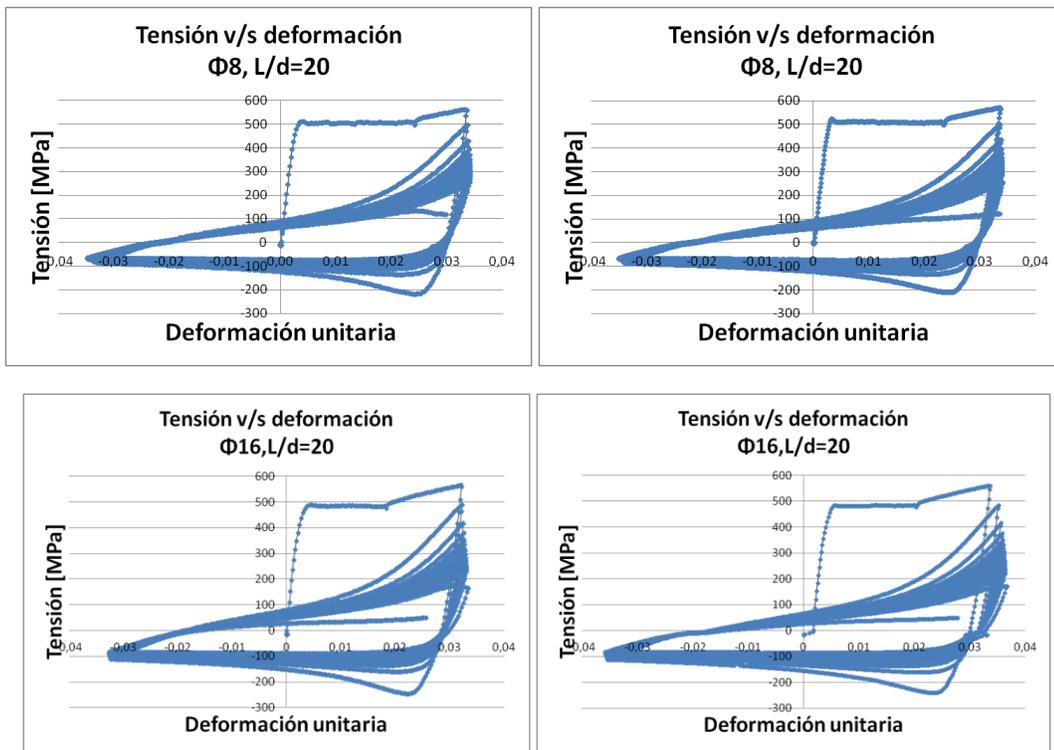


Figura 55: **Sigma v/s deformación  $L/d=20$ , 3% en  $\Phi 8$  y  $\Phi 16$ .**

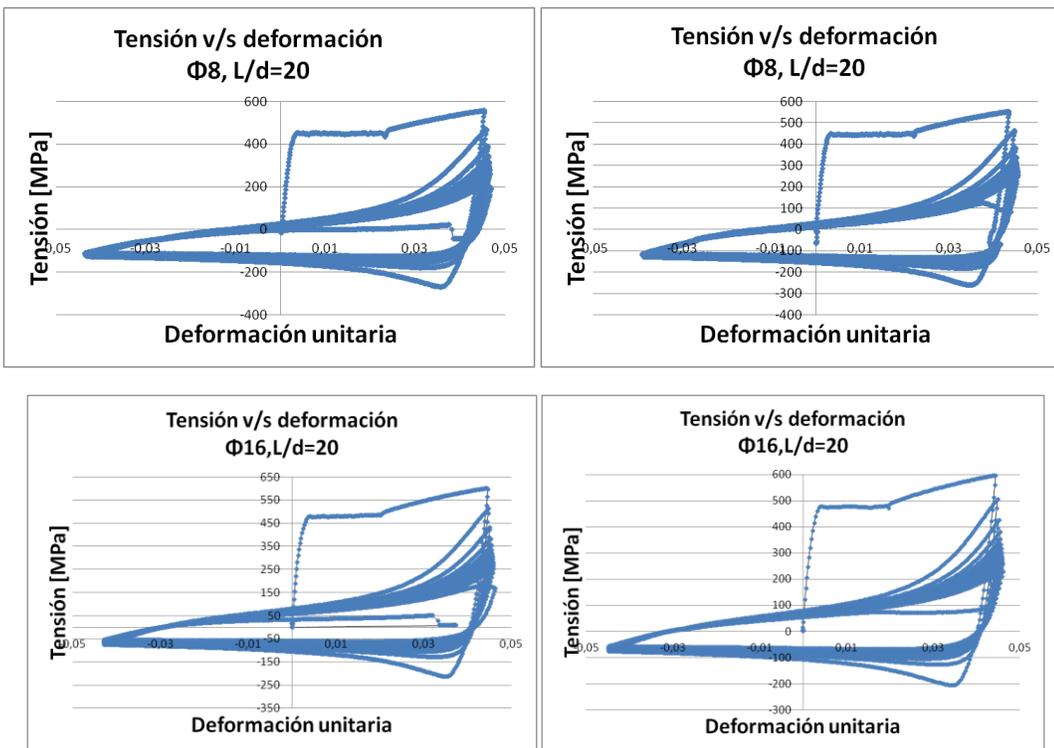


Figura 56: **Sigma v/s deformación  $L/d=20$ , 4% en  $\Phi 8$  y  $\Phi 16$ .**

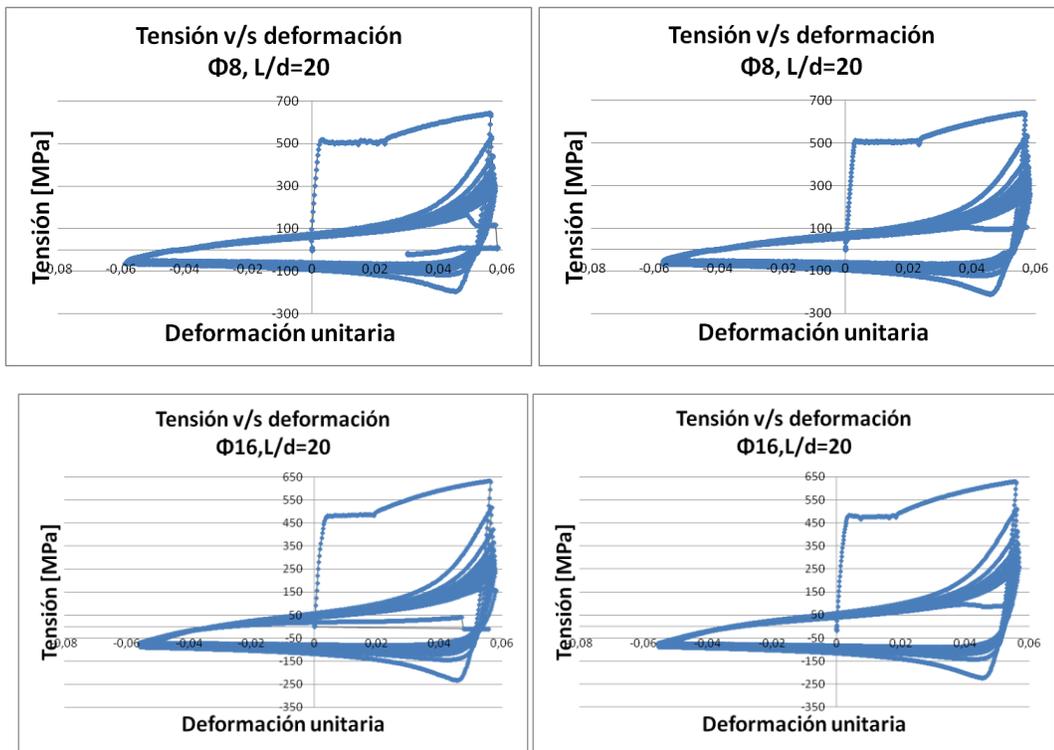


Figura 57: **Sigma v/s deformación L/d=20, 5% en Φ8 y Φ16.**

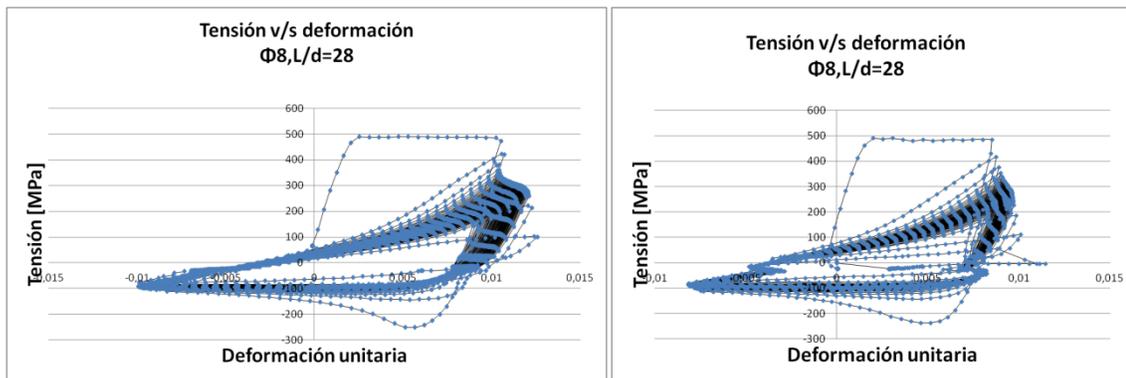


Figura 58: **Sigma v/s deformación L/d=28, 1% en Φ8.**

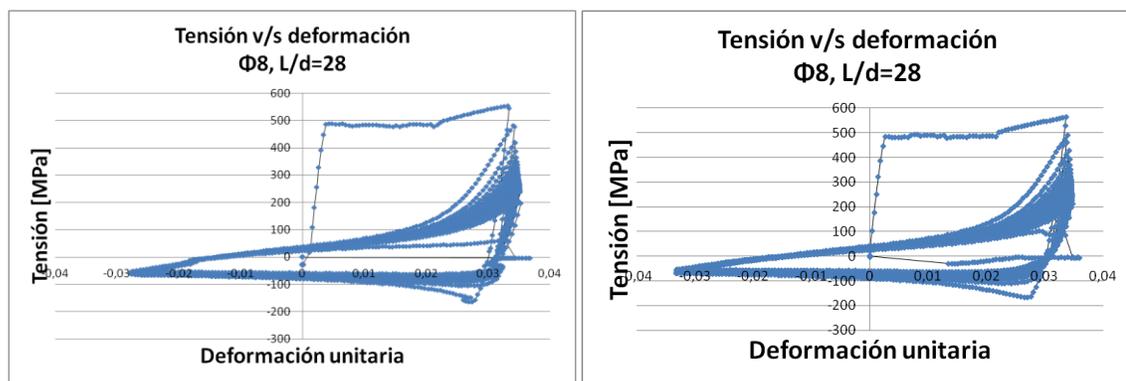


Figura 59: **Sigma v/s deformación L/d=28, 3% en Φ8.**

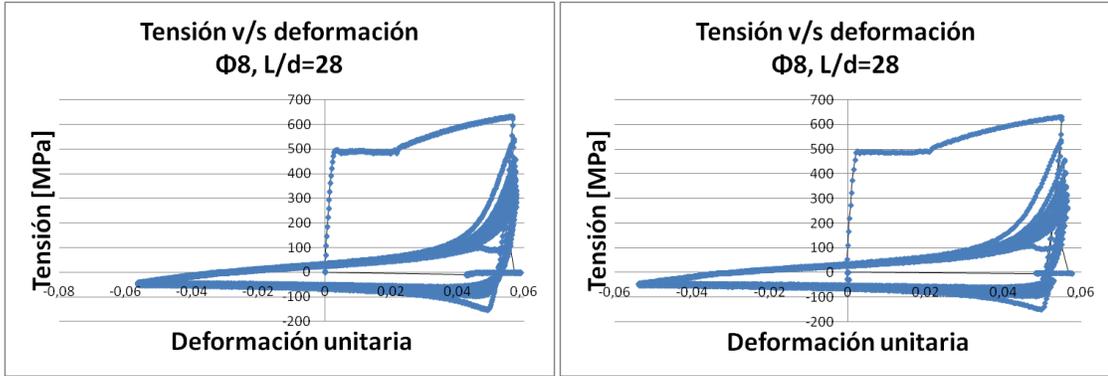


Figura 60: **Sigma v/s deformación L/d=28, 5% en  $\Phi 8$ .**

## Anexo B: Velocidades de ensayo

Tabla 11: Velocidades de ensayo para  $\Phi 8$

Barras $\Phi 8$	
L/d	Velocidad [mm/min]
6	20
8	25
12	25
16	30
20	30
28	35

Tabla 12: Velocidades de ensayo para  $\Phi 16$

Barras $\Phi 16$	
L/d	Velocidad [mm/min]
8	25
12	30
16	35
20	35

## Anexo C: Correlaciones entre LVDT

Tabla 13: Correlación LVDT L/d=6 para  $\Phi 8$ .

$\Phi 8$				
L/d	def [%]	P3-P4	P3-P5	P4-P5
6	1,57	<b>0,7921</b>	0,02	0,126
6	-	-	-	-
6	1,50	<b>0,9536</b>	0,107	0,115
6	1,49	<b>0,9609</b>	0,064	0,07
6	3,07	0,657	<b>0,94</b>	0,824
6	2,94	0,996	<b>0,999</b>	0,997
6	3,46	<b>0,9658</b>	0,717	0,806
6	3,60	<b>0,991</b>	0,685	0,725
6	5,00	0,948	<b>0,991</b>	0,941
6	5,02	0,993	<b>0,999</b>	0,989

Tabla 14: Correlación LVDT L/d=8 para  $\Phi 8$  y  $\Phi 16$ .

$\Phi 8$					$\Phi 16$			
L/d	def [%]	P3-P4	P3-P5	P4-P5	def [%]	P3-P4	P3-P5	P4-P5
8	.	0,9696	0,9859	<b>0,9745</b>	0,48	0,0714	<b>0,79</b>	0,126
8	-	-	-	-	0,00	-	-	-
8	1,61	<b>0,9482</b>	0,4563	0,5899	-	-	-	-
8	1,41	<b>0,996</b>	0,9727	0,9729	-	-	-	-
8	2,69	<b>0,9995</b>	0,9939	0,9935	2,31	0,853	<b>0,975</b>	0,9439
8	2,67	<b>0,9996</b>	0,9986	0,9979	2,93	0,991	<b>0,9988</b>	0,9939
8	3,92	<b>0,9911</b>	0,9279	0,9637	-	-	-	-
8	4,12	<b>0,9760</b>	0,805	0,902	-	-	-	-
8	5,11	<b>0,9997</b>	0,9989	0,9995	5,12	0,973	0,9881	<b>0,9927</b>
8	5,06	<b>0,9996</b>	0,9971	0,9973	5,27	0,994	<b>0,9992</b>	0,996

Tabla 15: Correlación LVDT L/d=12 para  $\Phi 8$  y  $\Phi 16$ .

$\Phi 8$					$\Phi 16$				
L/d	def [%]	P3-P4	P3-P5	P4-P5	def [%]	P3-P4	P3-P5	P4-P5	
12	0,72	0,909	0,9538	<b>0,9537</b>	0,93	<b>0,9922</b>	0,965	0,982	
12	0,97	0,866	<b>0,92</b>	0,91	0,81	0,9269	<b>0,977</b>	0,968	
12	1,99	<b>0,9993</b>	0,988	0,99	-	-	-	-	
12	1,94	<b>0,999</b>	0,987	0,99	-	-	-	-	
12	3,34	0,983	0,984	<b>0,997</b>	3,34	0,9685	0,989	<b>0,994</b>	
12	3,27	0,977	<b>0,998</b>	0,98	3,12	0,9995	<b>1</b>	0,999	
12	4,25	<b>0,998</b>	0,948	0,951	-	-	-	-	
12	4,32	<b>0,996</b>	0,959	0,953	-	-	-	-	
12	5,57	0,992	<b>1</b>	0,991	5,51	0,9829	<b>0,997</b>	0,993	
12	5,50	0,990	0,987	<b>0,999</b>	6,16	0,981	<b>0,996</b>	0,994	

Tabla 16: Correlación LVDT L/d=16 para  $\Phi 8$  y  $\Phi 16$ .

$\Phi 8$					$\Phi 16$			
L/d	def [%]	P3-P4	P3-P5	P4-P5	def [%]	P3-P4	P3-P5	P4-P5
16	0,82	0,962	0,9735	<b>0,9861</b>	0,93	0,8059	0,8796	<b>0,9783</b>
16	0,87	<b>0,996</b>	<b>0,985</b>	0,9849	0,93	0,8463	0,8963	<b>0,9799</b>
16	1,93	0,976	0,9728	<b>0,9939</b>	-	-	-	-
16	2,03	<b>0,978</b>	0,8766	0,9474	-	-	-	-
16	2,88	0,9734	0,9322	<b>0,9891</b>	3,3	0,9611	0,9139	<b>0,989</b>
16	3,25	0,9990	0,999	<b>0,999</b>	3,52	<b>0,9958</b>	0,9695	0,9862
16	3,75	0,9903	<b>0,9957</b>	0,9783	-	-	-	-
16	4,04	0,9976	0,9954	0,999	-	-	-	-
16	5,61	<b>0,997</b>	0,9864	0,9856	5,85	<b>0,9993</b>	0,9806	0,984
16	5,12	0,975	0,9883	<b>0,9963</b>	5,64	0,986	0,9626	<b>0,9923</b>

Tabla 17: Correlación LVDT L/d=20 para  $\Phi 8$  y  $\Phi 16$ .

$\Phi 8$					$\Phi 16$			
L/d	def [%]	P3-P4	P3-P5	P4-P5	def [%]	P3-P4	P3-P5	P4-P5
20	0,93	0,9554	0,939	<b>0,9591</b>	1,16	<b>0,9992</b>	0,915	0,919
20	0,96	<b>0,9549</b>	0,914	0,947	0,98	0,7142	0,757	<b>0,992</b>
20	2,19	<b>0,9907</b>	0,963	0,985	2,40	0,9883	0,962	<b>0,992</b>
20	2,21	<b>0,9989</b>	0,986	0,99	2,22	<b>0,9965</b>	0,965	0,947
20	3,44	<b>0,9983</b>	0,955	0,96	3,30	0,9931	0,982	<b>0,997</b>
20	3,49	<b>0,9988</b>	0,963	0,962	3,62	<b>0,9997</b>	0,965	0,969
20	4,52	<b>0,9960</b>	0,974	0,986	4,46	<b>0,9998</b>	0,99	0,99
20	4,22	0,9849	<b>0,999</b>	0,991	4,55	<b>0,999</b>	0,988	0,981
20	5,80	0,9945	<b>0,9995</b>	0,994	5,70	0,9907	0,977	<b>0,996</b>
20	5,77	0,9910	<b>0,998</b>	0,997	5,61	0,994	0,993	<b>0,9999</b>

Tabla 18: Correlación LVDT L/d=28 para  $\Phi 8$ .

$\Phi 8$				
L/d	def [%]	P3-P4	P3-P5	P4-P5
28	1,07	0,98	<b>0,9857</b>	0,9757
28	0,88	0,929	0,94	<b>0,9805</b>
28	3,14	0,991	0,9697	<b>0,9928</b>
28	3,39	<b>0,999</b>	0,9811	0,9735
28	5,70	<b>0,9998</b>	0,9902	0,9896
28	5,51	0,996	<b>0,9982</b>	0,9912

## Anexo D: Módulos de Elasticidad corregidos

Tabla 19: Módulos de Elasticidad  $\Phi 8$ ,  $L/d=6$ .

$\Phi 8$			
L/d	def [%]	Esc LVDT [%]	Ec LVDT [%]
6	1	104,376	100
6	1	-	-
6	2	50,8705	99,1045
6	2	53,4295	95,443
6	3	65,3345	83,3705
6	3	56,586	99,2985
6	4	50,6645	99,339
6	4	50,2235	99,531
6	5	63,7845	99,8095
6	5	52,7065	99,0515

Tabla 20: Módulos de Elasticidad  $\Phi 8$ ,  $L/d=8$ .

$\Phi 8$				$\Phi 16$	
L/d	def [%]	Esc LVDT [%]	Ec LVDT [%]	Esc LVDT [%]	Ec LVDT [%]
8	1	64,1225	99,8615	63,49	99,904
8	1	-	-	-	-
8	2	68,732	99,071		-
8	2	57,414	99,6235		-
8	3	58,352	99,9245	65,16	99,4155
8	3	60,5255	99,211	63,94	99,9215
8	4	60,0035	99,3365		-
8	4	57,7635	99,5905		-
8	5	56,371	99,799	57,85	99,9115
8	5	64,0675	99,8315	64,12	99,816

Tabla 21: Módulos de Elasticidad  $\Phi$  8, L/d=12.

$\Phi$ 8				$\Phi$ 16	
L/d	def [%]	Esc LVDT [%]	Ec LVDT [%]	Esc LVDT [%]	Ec LVDT [%]
12	1	71,4915	99,7795	65,618	99,7145
12	1	76,3905	99,3505	69,227	99,7715
12	2	70,596	64,81	-	
12	2	63,872	99,426	-	
12	3	62,4905	99,7825	66,0255	99,9525
12	3	77,445	99,796	70,3875	99,903
12	4	62,5505	99,795	-	
12	4	69,1015	99,777	-	
12	5	71,5405	99,793	72,0955	99,9225
12	5	63,4845	99,7565	73,2515	99,9695

Tabla 22: Módulos de Elasticidad  $\Phi$  8, L/d=16.

$\Phi$ 8				$\Phi$ 16	
L/d	def [%]	Esc LVDT [%]	Ec LVDT [%]	Esc LVDT [%]	Ec LVDT [%]
16	1	69,3655	99,8375	72,7915	99,825
16	1	69,069	99,8275	70,7015	99,71
16	2	68,0545	99,9145		-
16	2	66,9795	99,8445		-
16	3	70,2975	99,9225	68,7485	99,6825
16	3	65,592	99,902	71,8985	99,9115
16	4	67,5105	99,739		-
16	4	70,8785	99,9055		-
16	5	68,8935	103,011	72,4435	99,8995
16	5	70,6485	99,9165	74,634	99,9315

Tabla 23: Módulos de Elasticidad  $\Phi$  8, L/d=20.

$\Phi$ 8				$\Phi$ 16	
L/d	def [%]	E <sub>sc</sub> LVDT [%]	E <sub>c</sub> LVDT [%]	E <sub>sc</sub> LVDT [%]	E <sub>c</sub> LVDT [%]
20	1	78,7915	99,943	69,109	99,817
20	1	80,3305	99,963	73,7435	99,796
20	2	71,783	99,7285	84,399	99,911
20	2	72,133	99,9185	75,283	99,893
20	3	70,9215	99,9385	74,2845	99,8505
20	3	72,889	99,957	74,977	99,813
20	4	69,76	99,8955	70,7895	108,8045
20	4	71,629	99,8655	74,308	99,743
20	5	78,6305	99,9025	74,206	99,8755
20	5	72,4175	99,936	76,495	99,894

Tabla 24: Módulos de Elasticidad  $\Phi$  8, L/d=28.

$\Phi$ 8			
L/d	def [%]	E <sub>sc</sub> LVDT [%]	E <sub>c</sub> LVDT [%]
28	1	76,5965	99,908
28	1	76,0615	99,9235
28	3	75,152	99,7835
28	3	75,0915	99,8835
28	5	75,9295	99,92
28	5	67,855	99,6645

## Anexo E: Gráficos log-log N° de ciclos v/s deformación

- $\Phi 8$ :

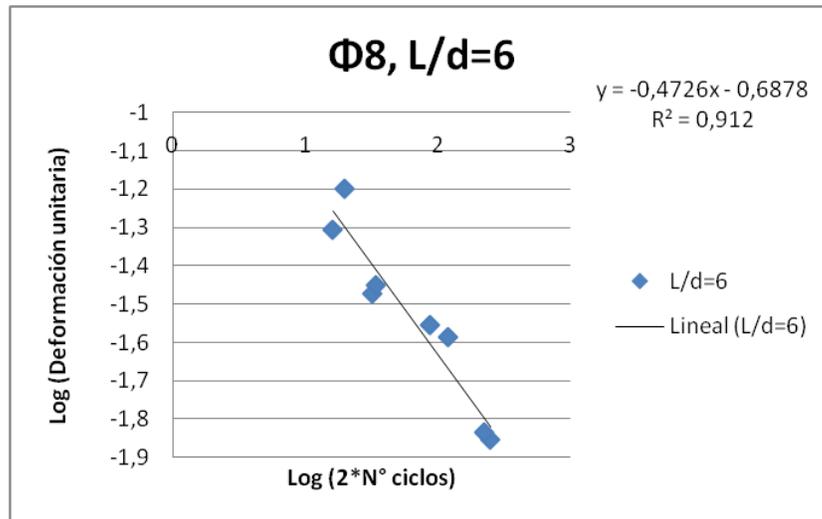


Figura 61: Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para  $\Phi 8$ ,  $L/d=6$ .

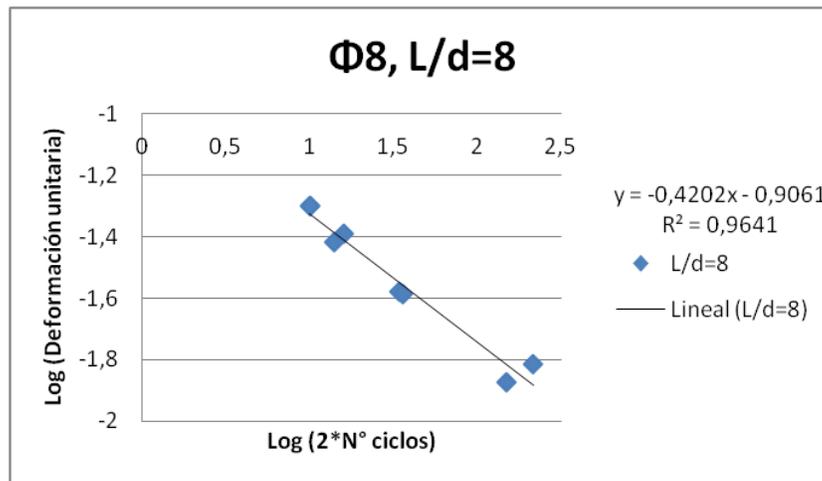


Figura 62: Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para  $\Phi 8$ ,  $L/d=8$ .

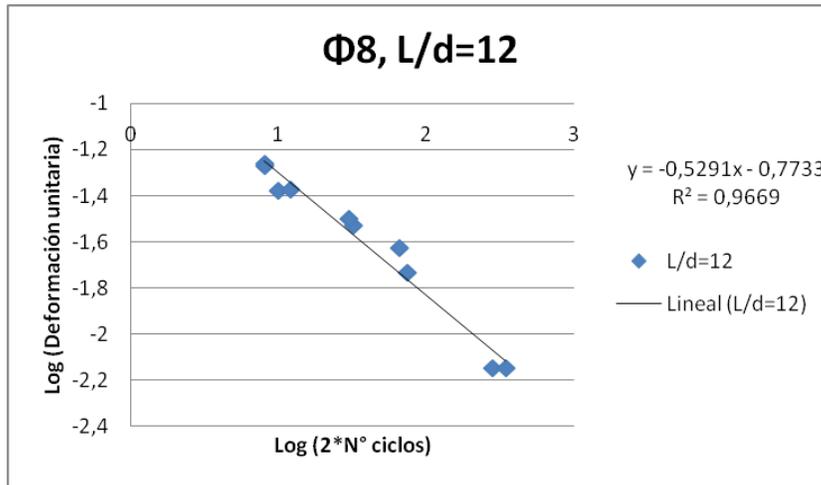


Figura 63: Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para  $\Phi 8$ ,  $L/d=12$ .

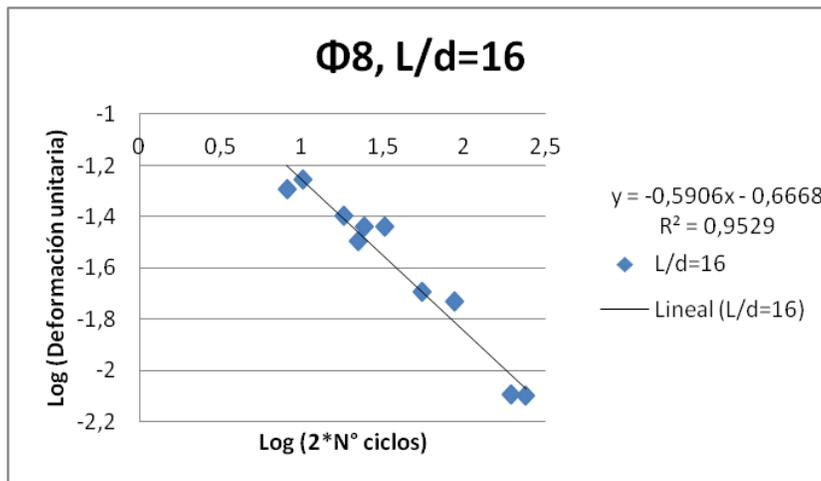


Figura 64: Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para  $\Phi 8$ ,  $L/d=16$ .

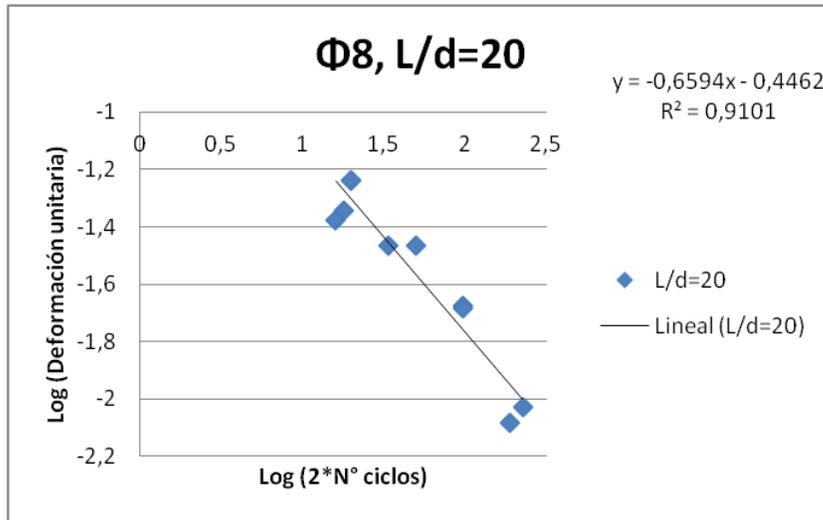


Figura 65: Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para Φ8, L/d=20.

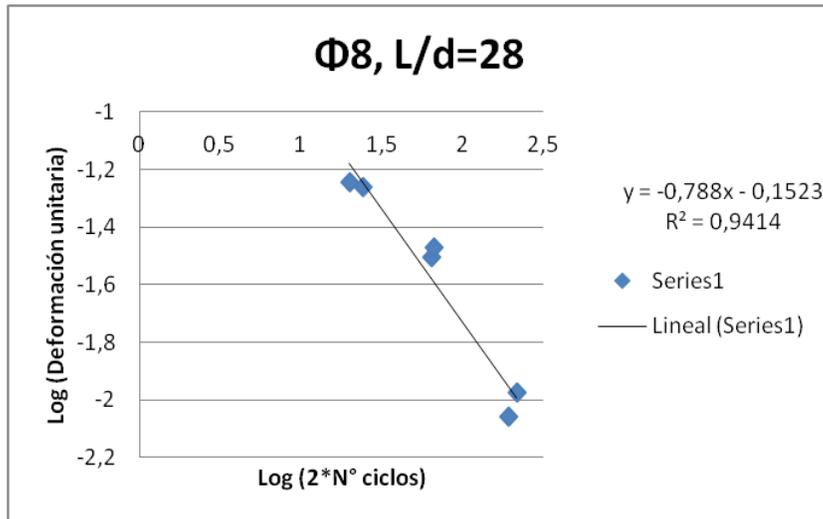


Figura 66: Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para Φ8, L/d=28.

- $\Phi 16$ :

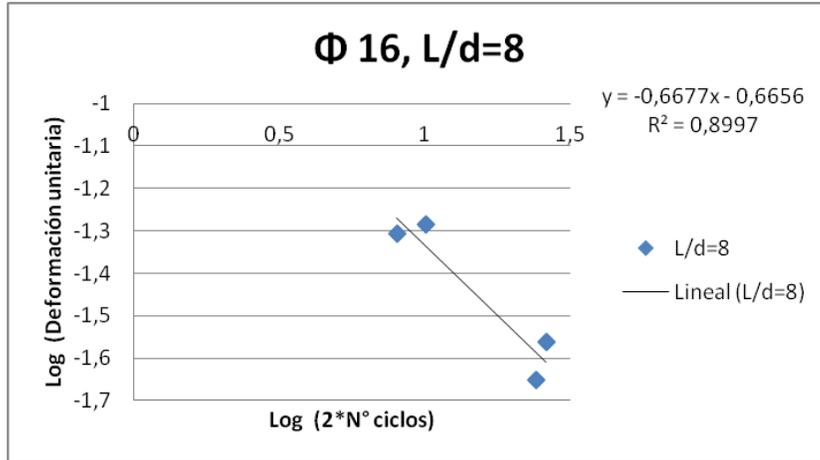


Figura 67: Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para  $\Phi 16$ , L/d=8.

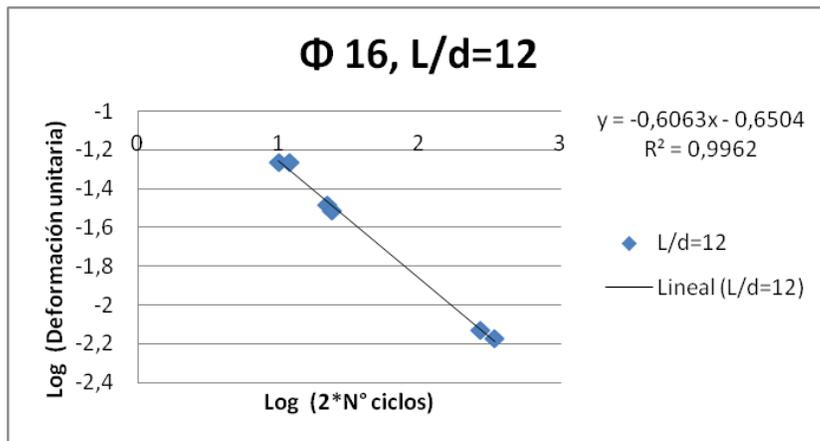


Figura 68: Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para  $\Phi 16$ , L/d=12.

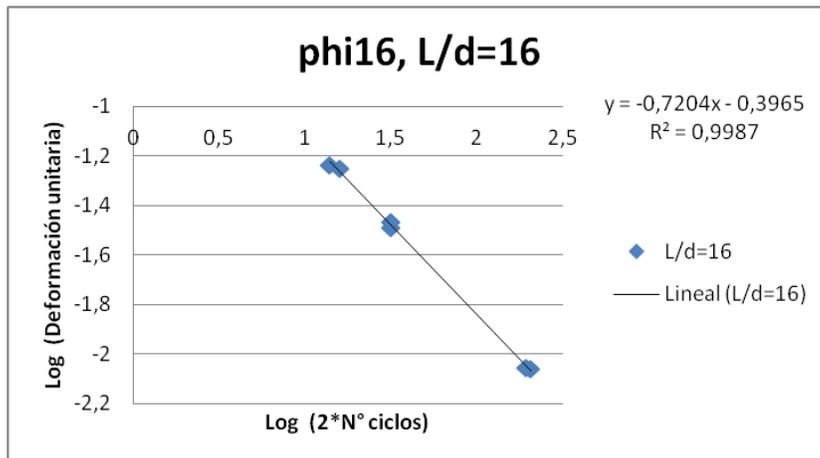


Figura 69: Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para  $\Phi 16$ ,  $L/d=16$ .

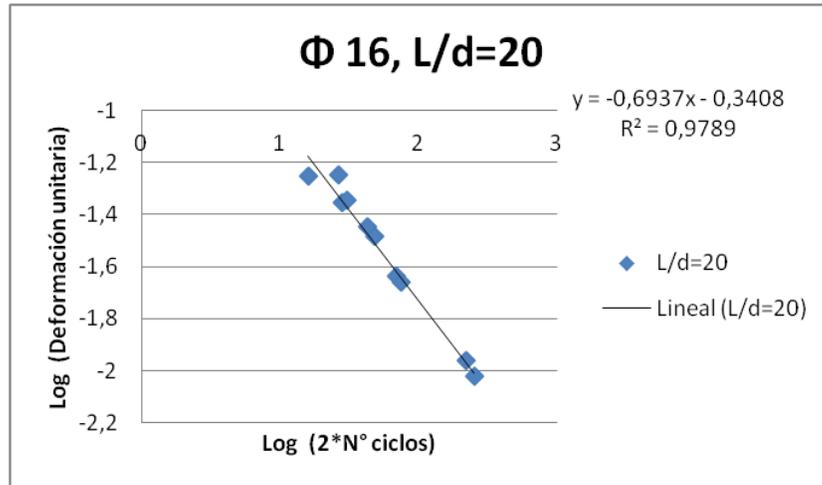


Figura 70: Relación log-log entre la deformación y el número de ciclos para  $\Phi 16$ ,  $L/d=20$

## Anexo F: Muestras ensayos y probetas ensayadas



Figura 71: Montaje con LVDT antes y después de la fractura.



Figura 72:  $L/d=12$ ,  $\Phi 8$ .



Figura 73:  $L/d=16, \Phi 8$ .



Figura 74:  $L/d=16, \Phi 16$ .



Figura 75:  $L/d=20, \Phi 16$ .



Figura 76:  $\Phi 8$ .