



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

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

PABLO ANDRÉS HERRERA TRONCOSO

PROFESOR GUÍA:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RICARDO HERRERA MARDONES
PATRICIO BONELLI CANABES

SANTIAGO DE CHILE
2014

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: PABLO HERRERA T.
FECHA: 30/05/2014
PROF. GUÍA: Sr. LEONARDO MASSONE S.

“ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE BARRAS DE REFUERZO EN MUROS DE HORMIGON ARMADO PERTENECIENTES A UN EDIFICIO DAÑADO DURANTE EL TERREMOTO DEL 2010”

Chile es un país que se caracteriza por su considerable actividad sísmica, lo cual tiene un impacto directo en el ámbito de la construcción y el diseño de estructuras.

Ante solicitaciones sísmicas se generan desplazamientos horizontales en las estructuras y esto causa que los muros y pilares sean sometidos a cargas cíclicas de compresión y tracción. Un tipo de daño frecuente asociado a estas solicitaciones, es la desintegración del hormigón que recubre las armaduras en estructuraciones en base a hormigón armado, con lo cual los refuerzos de acero se ven expuestos directamente a cargas cíclicas, pudiendo presentar pandeo y fractura ante deformaciones importantes.

En esta memoria se estudian barras de refuerzo de diámetros de 16, 22 y 25 milímetros correspondientes a muros de un edificio dañado durante el terremoto del 2010, ubicadas en zonas donde se observó daño por pandeo y fractura de algunas armaduras. Se realizan ensayos a cargas cíclicas con amplitud de deformaciones constantes en el rango plástico, utilizando una relación Largo/Diámetro = 20 para inducir pandeo. A partir de las curvas tensión-deformación obtenidas se busca conocer los ciclos remanentes a la rotura de estas barras, los cuales se comparan con el comportamiento de barras inalteradas utilizando modelos empíricos existentes que relacionan la deformación con los ciclos a la rotura.

Se observa pérdida de capacidad a fatiga en las probetas provenientes de barras de refuerzo que sufrieron daño visible por pandeo y de barras aparentemente rectas, ésta se cuantifica a partir de la diferencia entre el número de ciclos a rotura de las probetas y el número de ciclos de probetas obtenidas de barras inalteradas. Se tiene una pérdida de capacidad máxima de 17 ciclos a la rotura para probetas de diámetro 16 milímetros y una pérdida de capacidad de hasta 14 ciclos a la rotura para probetas de diámetro 22 y 25 milímetros.

Las diferencias mencionadas son consistentes con una solicitación sobre el edificio de alrededor de 15 ciclos de gran amplitud de deformaciones, originados por las aceleraciones de suelo mayores causadas por el terremoto en la zona. La magnitud de la pérdida de capacidad en las probetas se relaciona con la cercanía de su ubicación original a la zona con daño dentro de la barra de donde se obtuvieron y a las características geométricas del elemento estructural del que formaban parte.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia. En especial agradezco a mi madre por los valores que me entregó, por su paciencia, por darme todo lo necesario para llegar hasta aquí, por su apoyo, confianza y amor infinito.

Agradezco a mi hermana y a la abuela Pepa por lo incondicionales, por su apoyo, fe en mí y por crear un ambiente grato en mi hogar.

Agradezco a mi polola Jaclyn por ser un pilar fundamental, por escucharme, por tener un comentario preciso y adecuado siempre, por su amor gigante e incondicional, por ser una persona extraordinaria y por enseñarme a mejorar como persona.

Agradezco a mi tío Ricardo por aconsejarme, orientarme y brindarme conversaciones que me han hecho ver la vida de una forma crítica y sacar enseñanzas de cada situación.

A mis primos Felipe y Maureen por enseñarme que familia y amistad van de la mano. A mi tía Pili por su convencimiento de que siempre lograré mis objetivos

A mis amigos de siempre, en especial a Cesar, Matías, Ian B., Sebastián, Karen, Ian V. e Ignacio por estar siempre ahí aunque hayamos crecido, por hacer el camino mucho más fácil y por enseñarme que una amistad fuerte puede durar para siempre.

A mis amigos de la universidad, en especial a los de primer año y a los que hice en civil, por hacer feliz mi estadía en la universidad y por los innumerables momentos para contarles a los nietos.

A mi profesor guía Leonardo Massone por su buena onda, disposición a resolver dudas y a orientar el trabajo. A Pedro Soto y Víctor González por su paciencia y apoyo técnico fundamental. A la profesora María Ofelia Moroni y a Ricardo Herrera por sus adecuadas correcciones de forma y ortografía. Al profesor Patricio Bonelli por su interés en participar en éste trabajo.

A mi padre, aunque no estés estoy seguro de que me ayudaste a llegar aquí.

Muchas gracias a todos.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. Motivación	9
1.2. Objetivos	12
2. ANTECEDENTES.....	13
2.1. Descripción general del edificio en estudio	13
2.2. Estado de daño del edificio	14
2.3. Comportamiento del acero en tracción	18
2.4. Comportamiento del acero en compresión.....	19
2.5. Fatiga a bajos ciclos	20
2.6. Comportamiento del acero frente a cargas cíclicas	24
3. ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	33
3.1. Metodología.....	33
3.2. Ensayos	35
3.2.1. Protocolo de ensayo en barras del edificio.....	35
3.2.2. Ensayos cíclicos en barras de diámetro 16 milímetros	39
3.2.3. Ensayos cíclicos en barras de diámetro 22 milímetros	42
3.2.4. Corrección mediante fotogrametría	47
3.2.5. Ensayos cíclicos en barras de diámetro 25 milímetros	50
3.2.6. Ensayos de tracción	51
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	53
5. CONCLUSIONES.....	67
6. BIBLIOGRAFÍA.....	70
7. ANEXOS.....	72
7.1. ANEXO A: Levantamiento de daños estructurales.....	72
7.2. ANEXO B: Catastro de barras del edificio.	95
7.3. ANEXO C: Información de ensayos.	106
7.4. ANEXO D: Gráficos.....	117

Índice de Figuras

Figura 1: Registro del terremoto 27-F en Viña del Mar	10
Figura 2: Daño observado en muros de hormigón armado por flexo-compresión, Massone y Rojas (2012).....	11
Figura 3: Barra con pandeo.....	12
Figura 4: Barra con fractura.....	12
Figura 5: Vista aérea del edificio, Aguilar (2012).....	13
Figura 6: Barras de refuerzo con pandeo y fractura, Aguilar (2012).....	15
Figura 7: Muros con daño en eje 3, Bonelli (2010)	16
Figura 8: Muros con daño en eje 5, Bonelli (2010).....	16
Figura 9: Muros con daño en eje A, Bonelli (2010)	17
Figura 10: Caracterización de curva tensión-deformación en tracción, Massone y Moroder (2009).....	18
Figura 11: Curvas tensión-deformación en compresión obtenidas por Monti y Nuti (1992).....	19
Figura 12: Amplitud de deformación constante, Brown (1998).....	20
Figura 13: Esquema con parámetros del modelo de Koh y Stephens (1991)	21
Figura 14: Esquema con deformaciones elástica y plástica, Hamasaki (2013)	22
Figura 15: Curvas tensión-deformación de probetas #6 y #7 obtenidas por Brown y Kunnath (2004).....	25
Figura 16: Curvas tensión-deformación de probetas #8 obtenidas por Brown y Kunnath (2004)	25
Figura 17: Curvas deformación-ciclos a la rotura obtenidas por Brown y Kunnath (2004).....	26
Figura 18: Curvas deformación-ciclos a la rotura obtenidas por Koh y Stephens (1991).....	28
Figura 19: Curvas deformación-ciclos a la rotura con grandes deformaciones obtenidas por Koh y Stephens (1991)	29
Figura 20: Curvas tensión-deformación en cargas cíclicas obtenidas por Monti y Nuti (1992).....	30
Figura 21: Curvas tensión-deformación en cargas cíclicas obtenidas por Hamasaki para $L/D = 20$	30
Figura 22: Curva tensión-deformación en cargas cíclicas obtenidas por Hamasaki para $L/D = 28$	31
Figura 23: Relación deformación-ciclos a la rotura ensayos de Hamasaki (2013) para $D = 8$ mm	31
Figura 24: Relación deformación-ciclos a la rotura ensayos de Hamasaki (2013) para $D = 16$ mm	32
Figura 25: Máquina universal y sensores externos	34
Figura 26: Características y nomenclatura de probetas de barras con daño provenientes del edificio.....	36
Figura 27: Estirado de probetas con pandeo.....	38
Figura 28: Tramo elástico P16dl20d52	39
Figura 29: Ciclos a la rotura vs amplitud de deformación barra inalterada.....	41
Figura 30: Resultados de ensayos en probetas de barras de diámetro 16 mm.....	42
Figura 31: Fotografías de probeta sin deformación (1) y en sus máximas deformaciones (b) y (c)	43
Figura 32: Diferencia porcentual entre métodos de medición de deformaciones	44
Figura 33: Esquema de penetración de deformaciones.....	45
Figura 34: Deformaciones y desplazamientos causados por penetración de deformaciones y deslizamiento	46
Figura 35: Resultados de ensayos en probetas de barras de diámetro 22 mm.....	47
Figura 36: Posición del pistón vs tiempo	48
Figura 37: Fotografías de probeta sin deformación (a) y en sus máximas deformaciones (b) y (c)	49
Figura 38: Curva de corrección por fotogrametría para barras de diámetro 16 mm	49
Figura 39: Resultados de ensayos en probetas de barras de diámetro 25 mm.....	50
Figura 40: Comparación de ciclos a la rotura barras del edificio e inalteradas 16 mm.....	53
Figura 41: Líneas de tendencia barras del edificio e inalteradas 16 mm.....	54

Figura 42: Comparación de ciclos a la rotura barras del edificio e inalteradas 22 mm.....	55
Figura 43: Líneas de tendencia barras del edificio e inalteradas 22 mm.....	56
Figura 44: Comparación de ciclos a la rotura barras del edificio e inalteradas 25 mm.....	57
Figura 45: Líneas de tendencia barras del edificio e inalteradas 25 mm.....	58
Figura 46: Comparación de energía a la rotura barras del edificio e inalteradas 16 mm.....	60
Figura 47: Comparación de energía a la rotura barras del edificio e inalteradas 22 mm.....	60
Figura 48: Comparación de energía a la rotura barras del edificio e inalteradas 25 mm.....	61
Figura 49: Porcentajes de esfuerzos máximos de compresión por ciclos barra 16 mm.....	62
Figura 50: Porcentajes de esfuerzos máximos de compresión por ciclos barra 22 mm.....	62
Figura 51: Porcentajes de esfuerzos máximos de compresión por ciclos barra 25 mm.....	63
Figura 52: Porcentaje de esfuerzo máximo de compresión segundo ciclo barra 16 mm.....	63
Figura 53: Porcentaje de esfuerzo máximo de compresión segundo ciclo barra 22 mm.....	64
Figura 54: Porcentaje de esfuerzo máximo de compresión segundo ciclo barra 25 mm.....	64
Figura 55: Tracción en barras de diámetro 16 mm.....	65
Figura 56: Tracción en barras de diámetro 22 mm.....	66
Figura 57: Elevaciones ejes 1 a 5 y 7, Bonelli (2010).....	73
Figura 58: Elevaciones ejes 8 a 12, Bonelli (2010).....	74
Figura 59: Elevaciones ejes 14, 15 y A, Bonelli (2010).....	75
Figura 60: Elevaciones ejes C a G, Bonelli (2010).....	76
Figura 61: Elevaciones ejes H a K, Bonelli (2010).....	77
Figura 62: Planta piso 1, Bonelli (2010).....	78
Figura 63: Planta piso 2, Bonelli (2010).....	79
Figura 64: Planta piso 3, Bonelli (2010).....	80
Figura 65: Planta piso 4, Bonelli (2010).....	81
Figura 66: Planta piso 5, Bonelli (2010).....	82
Figura 67: Planta piso 6, Bonelli (2010).....	83
Figura 68: Planta piso 8, Bonelli (2010).....	84
Figura 69: Planta piso 9, Bonelli (2010).....	85
Figura 70: Planta piso 10, Bonelli (2010).....	86
Figura 71: Planta piso 11, Bonelli (2010).....	87
Figura 72: Planta piso 12, Bonelli (2010).....	88
Figura 73: Planta piso 13, Bonelli (2010).....	89
Figura 74: Planta piso 14, Bonelli (2010).....	90
Figura 75: Planta piso 15, Bonelli (2010).....	91
Figura 76: Planta piso 16, Bonelli (2010).....	92
Figura 77: Planta piso 17, Bonelli (2010).....	93
Figura 78: Muros con daño en subterráneo, Bonelli (2010).....	94
Figura 79: Barras numero 1, 2, 3, 4, 5 y 6.....	95
Figura 80: Barras numero 7, 8, 9, 10, 11 y 12.....	96
Figura 81: Barras numero 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19.....	97
Figura 82: Barras numero 20, 21, 22, 23, 24, 25 y 26.....	98
Figura 83: Barras numero 27, 28, 29, 30 (fracturada) y 31.....	99
Figura 84: Barras numero 32, 33, 34 y 35.....	100
Figura 85: Barras numero 36, 37, 38, 39 y 40.....	101

Figura 86: Barras numero 41, 42, 43, 44 y 45	102
Figura 87: Barras numero 46, 47, 48, 49 y 50	103
Figura 88: Dimensiones medidas durante catastro de barras del edificio.....	104
Figura 89: Gráficos tensión vs deformación unitaria p16dl20d21, p16dl20d22, p16dl20d31 y p16dl20d32	117
Figura 90: Gráficos tensión vs deformación unitaria p16dl20d33, p16dl20d41 y p16dl20d42	118
Figura 91: Gráficos tensión vs deformación unitaria p16dl20d51 y p16dl20d52	118
Figura 92: Gráficos tensión vs deformación unitaria b8rcpd5, b11rcpd3, b24rspd3 y b24rspd5.....	119
Figura 93: Gráficos tensión vs deformación unitaria b25rspd3, b25rspd5, b26rspd3 y b26rspd5	120
Figura 94: Gráficos tensión vs deformación unitaria b29rcpd3 y b29zpd3	120
Figura 95: Gráficos tensión vs deformación unitaria b30rcpd3, b30rcpd5, b32rcpd3 y b35rcpd3	121
Figura 96: Gráficos tensión vs deformación unitaria b50rspd3 y b50rspd5	121
Figura 97: Gráficos tensión vs deformación unitaria p22dl20d31, p22dl20d32 y p22dl20d51	122
Figura 98: Gráficos tensión vs deformación unitaria p22dl20d52 y p22dl20d53	123
Figura 99: Gráficos tensión vs deformación unitaria b1rspd3, b1rspd5, b2rcpd3 y b2zpd3	123
Figura 100: Gráficos tensión vs deformación unitaria b15rspd3, b20rcpd3 y b20rcpd5.....	124
Figura 101: Gráficos tensión vs deformación unitaria b21rcpd3 y b21rcpd5.....	124
Figura 102: Gráficos tensión vs deformación unitaria b22rcpd3, b22rcpd5, b23rcpd3 y b23rcpd5	125
Figura 103: Gráficos tensión vs deformación unitaria b23zpd3, b44rcpd3 y b49rspd3	126
Figura 104: Gráficos tensión vs deformación unitaria p25dl20d31, p25dl20d32, p25dl20d51 y p25dl20d52	127
Figura 105: Gráficos tensión vs deformación unitaria b3rspd3, b3rspd5, b4rcpd3 y b4zpd3	128
Figura 106: Gráficos tensión vs deformación unitaria b5rcpd3 y b5zpd3.....	128
Figura 107: Gráficos tensión vs deformación unitaria b6rcpd3, b6rcpd5, b12rcpd3 y b12zpd3	129
Figura 108: Gráficos tensión vs deformación unitaria b14rcpd3 y b14zpd3	129
Figura 109: Gráficos tensión vs deformación unitaria b16rcpd3, b17rcpd3, b17zpd3 y b18rcpd3.....	130
Figura 110: Gráficos tensión vs deformación unitaria b18rcpd5 y b18zpd5	130
Figura 111: Gráficos tensión vs deformación unitaria b19rcpd3, b19zpd3, b38rspd5 y b39rspd3	131

Índice de Tablas

Tabla 1: Alturas entre pisos, áreas de planta, de muro y distribución de áreas de muro, Aguilar (2012)	14
Tabla 2: Frecuencia fundamental para cada método de identificación, Aguilar (2012).....	14
Tabla 3: Grupos de ensayos	36
Tabla 4: Barras del edificio disponibles y ensayos tentativos	37
Tabla 5: Barras del edificio disponibles y ensayos realizados.....	37
Tabla 6: Deformación a la rotura en ensayos de tracción.....	52
Tabla 7: Valores de dimensiones medidas parte 1.....	104
Tabla 8: Valores de dimensiones medidas parte 2.....	105
Tabla 9: Parámetros de Koh y Stephens (1991) para ensayos de Hamasaki (2013)	106
Tabla 10: Parámetros de Koh y Stephens (1991) para ensayos de Brown y Kunnath (2004)	106
Tabla 11: Ensayo de prueba de deformaciones	107
Tabla 12: Primer ensayo barra de 16 mm. con fotogrametría a 5% de deformación	107
Tabla 13: Segundo ensayo barra de 16 mm. con fotogrametría a 5% de deformación	108
Tabla 14: Tercer ensayo barra de 16 mm. con fotogrametría a 5% de deformación.....	108
Tabla 15: Primer ensayo barra de 16 mm. con fotogrametría a 3% de deformación	108
Tabla 16: Segundo ensayo barra de 16 mm. con fotogrametría a 3% de deformación	108
Tabla 17: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas de barra inalterada D = 16 mm.....	109
Tabla 18: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas rectas sin pandeo D = 16 mm.....	109
Tabla 19: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas rectas con pandeo D = 16 mm.....	110
Tabla 20: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas zona con pandeo D = 16 mm	110
Tabla 21: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas de barra inalterada D = 22 mm.....	110
Tabla 22: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas rectas sin pandeo D = 22 mm.....	111
Tabla 23: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas rectas con pandeo D = 22 mm.....	111
Tabla 24: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas zona con pandeo D = 22 mm	111
Tabla 25: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas de barra inalterada D = 25 mm.....	112
Tabla 26: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas rectas sin pandeo D = 25 mm.....	112
Tabla 27: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas rectas con pandeo D = 25 mm.....	112
Tabla 28: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas zona con pandeo D = 25 mm	113
Tabla 29: Energía a la rotura y amplitud de deformación probeta de barra inalterada D = 16 mm	113
Tabla 30: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas rectas sin pandeo D = 16 mm.....	113
Tabla 31: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas rectas con pandeo D = 16 mm.....	113
Tabla 32: Energía a la rotura y amplitud de deformación probeta zona con pandeo D = 16 mm	114
Tabla 33: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas de barra inalterada D = 22 mm.....	114
Tabla 34: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas rectas sin pandeo D = 22 mm.....	114
Tabla 35: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas rectas con pandeo D = 22 mm.....	114
Tabla 36: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas zona con pandeo D = 22 mm.....	115
Tabla 37: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas de barra inalterada D = 25 mm.....	115
Tabla 38: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas rectas sin pandeo D = 25 mm.....	115
Tabla 39: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas rectas con pandeo D = 25 mm.....	115
Tabla 40: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas zona con pandeo D = 25 mm.....	116

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Chile es un país que se caracteriza por su elevada actividad sísmica debido a su ubicación en el lugar donde interactúan las placas de Nazca y Sudamericana, haciéndolo un lugar único por sus características sismológicas y por haber ocurrido sobre su territorio en 1960 el terremoto de mayor magnitud registrado en el mundo.

Debido a lo anterior es necesario adaptar la construcción y el diseño de estructuras a este escenario, estudiando los efectos que tienen los sismos sobre éstas y sobre el material que las componen, para así tener estructuraciones que funcionen de forma aceptable frente a sollicitaciones sísmicas frecuentes y extremas en algunos casos.

Una estructura de hormigón armado frente a una sollicitación sísmica, está sometida a deformaciones en los distintos elementos que la componen, principalmente en muros y pilares que al deformarse sufren esfuerzos por flexión y por compresión, pudiendo presentar daños en el refuerzo de acero, como pandeo o incluso fracturarse ante sollicitaciones cíclicas considerables, ya que el hormigón puede desintegrarse dejando las barras sin restricciones laterales y expuestas directamente a los esfuerzos de compresión.

Esta causa de falla de los elementos de hormigón armado se relaciona con la fatiga del acero por bajo número de ciclos y en este trabajo de título se busca, mediante ensayos de deformación cíclica, obtener información sobre el nivel de daño presente en refuerzos de acero de un edificio de hormigón armado ubicado en Viña del Mar, luego del terremoto ocurrido el 27 de febrero de 2010. En la figura 1 se aprecia un registro de aceleraciones de éste, medido con acelerómetros en la dirección Este-Oeste, ubicados en la estación Viña del Mar Centro.

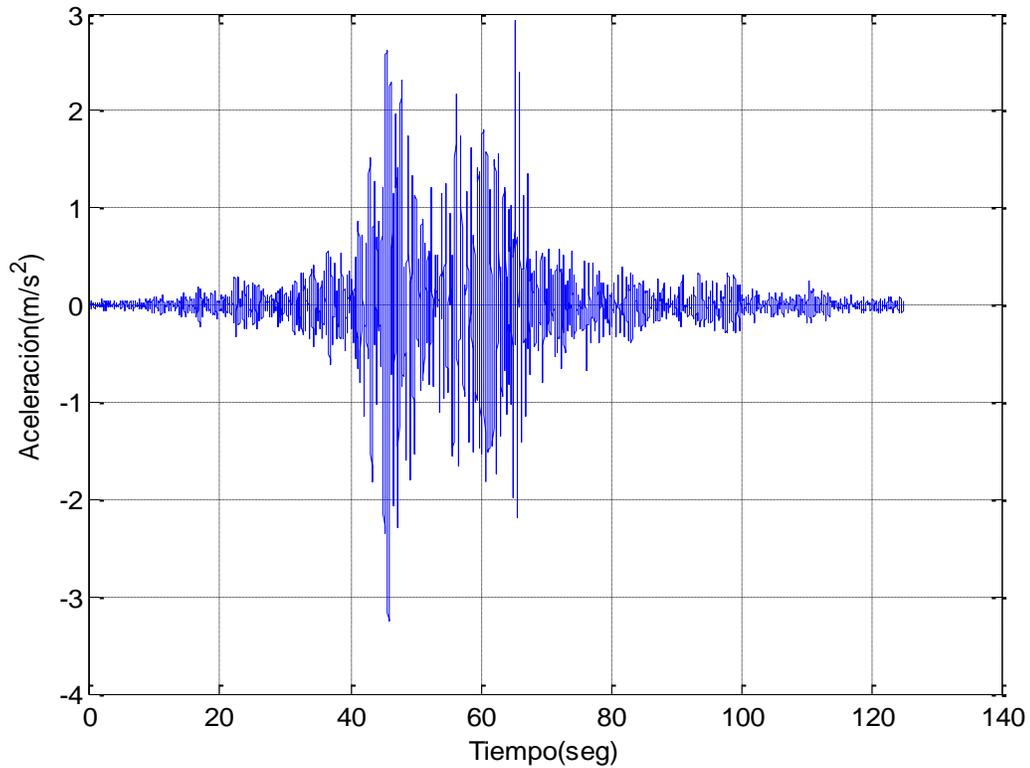


Figura 1: Registro del terremoto 27-F en Viña del Mar.

En la figura 1, a partir de la frecuencia de muestreo de 100 datos por segundo, se obtiene el tiempo en el eje de las abscisas durante el cual transcurre el terremoto, las aceleraciones de suelo en el eje de las ordenadas se manifiestan en deformaciones cíclicas en los elementos de hormigón armado del edificio, la magnitud de éstas depende de las aceleraciones máximas, y la cantidad de ciclos de deformación que sufren se relaciona directamente con los ciclos de aceleración que induzca el sismo al suelo, para el caso de la figura 1 existirían alrededor de 15 ciclos de grandes deformaciones sobre una estructura ubicada en la zona, originadas por las aceleraciones del suelo mayores a $1,5 \text{ m/s}^2$. En la figura 2 se observa el daño típico observado en elementos de hormigón armado debido a esta alternancia de deformaciones.

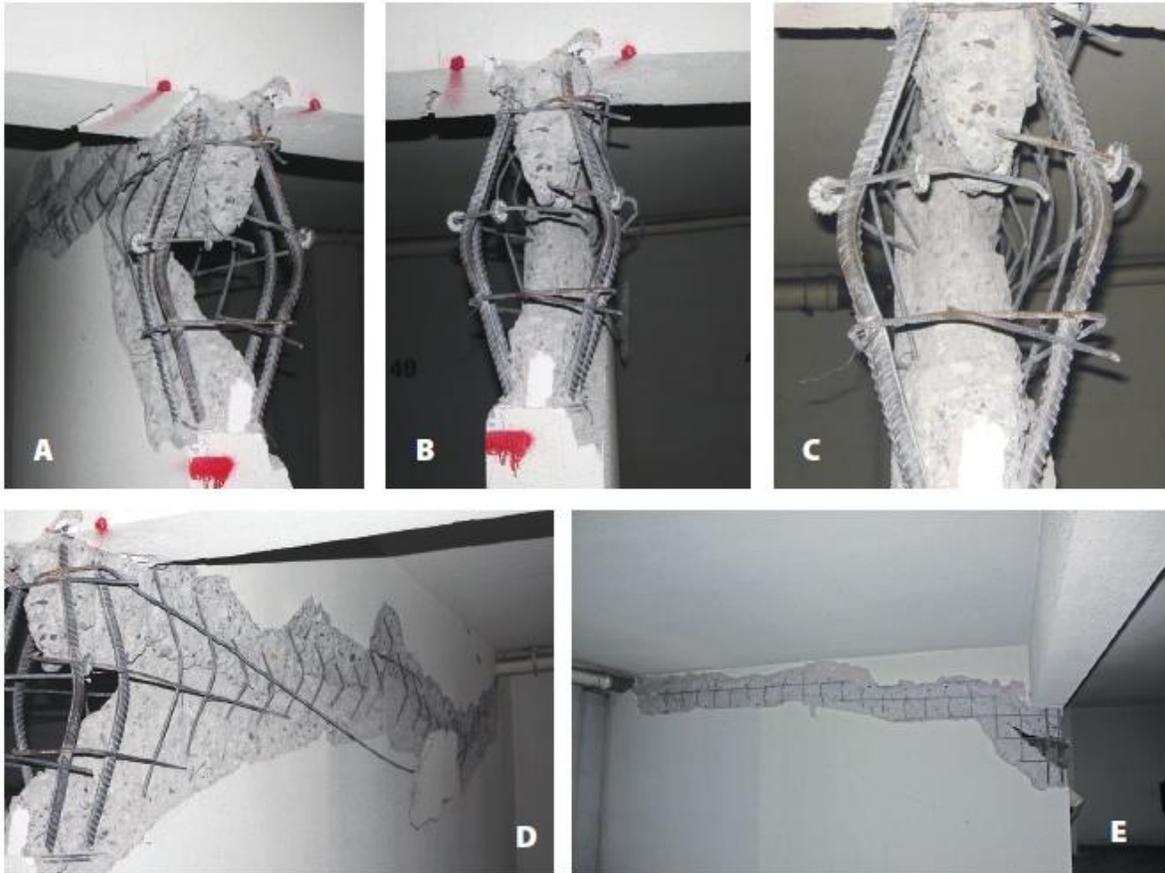


Figura 2: Daño observado en muros de hormigón armado por flexo-compresión, Massone y Rojas (2012).

En la figura 2 se aprecia daño considerable en las puntas de muros, el cual se explica porque en estas zonas se alcanzan las mayores deformaciones de compresión por cargas de flexión y compresión. Debido a lo anterior el recubrimiento puede desintegrarse, dejando a las barras de refuerzo expuestas a alternancias de deformación y causando que éstas puedan pandearse e incluso fracturarse.

La mayoría de las barras longitudinales disponibles para su estudio en este trabajo presentan falla por pandeo (véase figura 3), y en algunos casos existe evidente fractura por solicitaciones cíclicas con grandes deformaciones, ya que se observa falla frágil (véase figura 4). Debido a lo anterior, se desea predecir la vida útil restante que hubiesen tenido las armaduras frente a solicitaciones cíclicas adicionales, y determinar de manera cualitativa si este edificio hubiera sufrido o no un colapso en un escenario más severo.



Figura 3: Barra con pandeo.



Figura 4: Barra con fractura.

1.2. Objetivos

Objetivo General

- Estudiar experimentalmente el comportamiento de barras de refuerzo de distintos diámetros bajo cargas cíclicas, las cuales corresponden a muros dañados durante el terremoto del 2010.

Objetivos Específicos

- Analizar mediante las curvas de tensión-deformación la incidencia del pandeo en la respuesta de barras sometidas a cargas cíclicas.
- Obtener ciclos remanentes a la rotura de barras, contrastándolos con resultados de modelos empíricos existentes.

2. ANTECEDENTES

2.1. Descripción general del edificio en estudio

La estructura estudiada corresponde a un edificio ubicado en la comuna de Viña del Mar de la región de Valparaíso, zona sísmica 3.

El edificio está estructurado en base a muros de corte de hormigón armado, es de uso habitacional y está constituido de 17 pisos y un subterráneo, siendo su altura total igual a 48,3 metros. En la figura 5 se muestra una vista aérea del edificio.



Figura 5: Vista aérea del edificio, Aguilar (2012).

En la tabla 1 se muestran las alturas entre pisos (ΔH), áreas de planta, áreas de muro total y la distribución porcentual de área de muros por eje con respecto al área de planta para el subterráneo, piso 1 y piso tipo (piso 2 a 17).

Tabla 1: Alturas entre pisos, áreas de planta, de muro y distribución de áreas de muro, Aguilar (2012).

Piso	ΔH [m]	A Planta [m ²]	A Muros [m ²]	$A_{\text{muros-x}}/(A \text{ planta})$ [%]	$A_{\text{muros-y}}/(A \text{ planta})$ [%]
Subt. 1	3,5	1318	59	2	2,5
1	3,2	323,5	20,9	2,9	3,6
Tipo	2,6	323,5	20,9	2,9	3,6

Este edificio fue instrumentado con acelerómetros y se obtuvieron parámetros dinámicos mediante tres métodos de identificación en el trabajo de Aguilar (2012).

En la tabla 2 se muestra la frecuencia fundamental del edificio obtenida en su trabajo para cada método de identificación.

Tabla 2: Frecuencia fundamental para cada método de identificación, Aguilar (2012).

Modo	Frecuencia [hz] SSI	Frecuencia [hz] AMED	Frecuencia [hz] MOESP
1	0,80	0,43	0,73

2.2. Estado de daño del edificio

El edificio sufrió severos daños, sin embargo se encontraba en condiciones para ser reparado, en el anexo A se muestran planos con levantamientos de daños realizados por Bonelli (2010) en el edificio para los informes de reparación. Además en la figura 6 se aprecian elementos de hormigón armado del edificio con daño. Nótese que el refuerzo de acero se encuentra expuesto, con pandeo y en algunos casos con fractura.



Figura 6: Barras de refuerzo con pandeo y fractura, Aguilar (2012).

Otros elementos con daño se observan en las figuras 7, 8 y 9 que corresponden a elevaciones del subterráneo del edificio, en las cuales se muestran muros con daño y el correspondiente refuerzo de acero a la vista, con un daño apreciable. Similar a lo que se aprecia en la figura 2, este daño en las puntas de muros es típico frente a solicitaciones de flexo-compresión y a alternancia de cargas originadas por la acción sísmica.



Figura 7: Muros con daño en eje 3, Bonelli (2010).

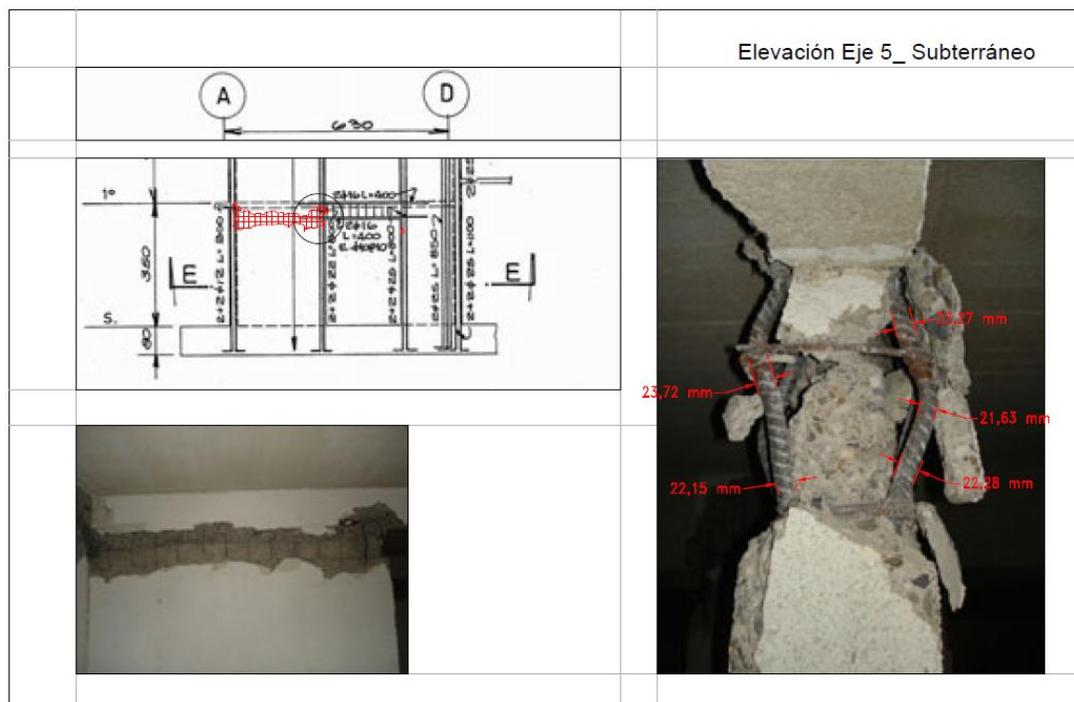


Figura 8: Muros con daño en eje 5, Bonelli (2010).

Las ubicaciones mostradas en las figuras 7 y 8 son un posible lugar de origen de barras con diámetro 22 milímetros disponibles para su estudio en este trabajo de título.

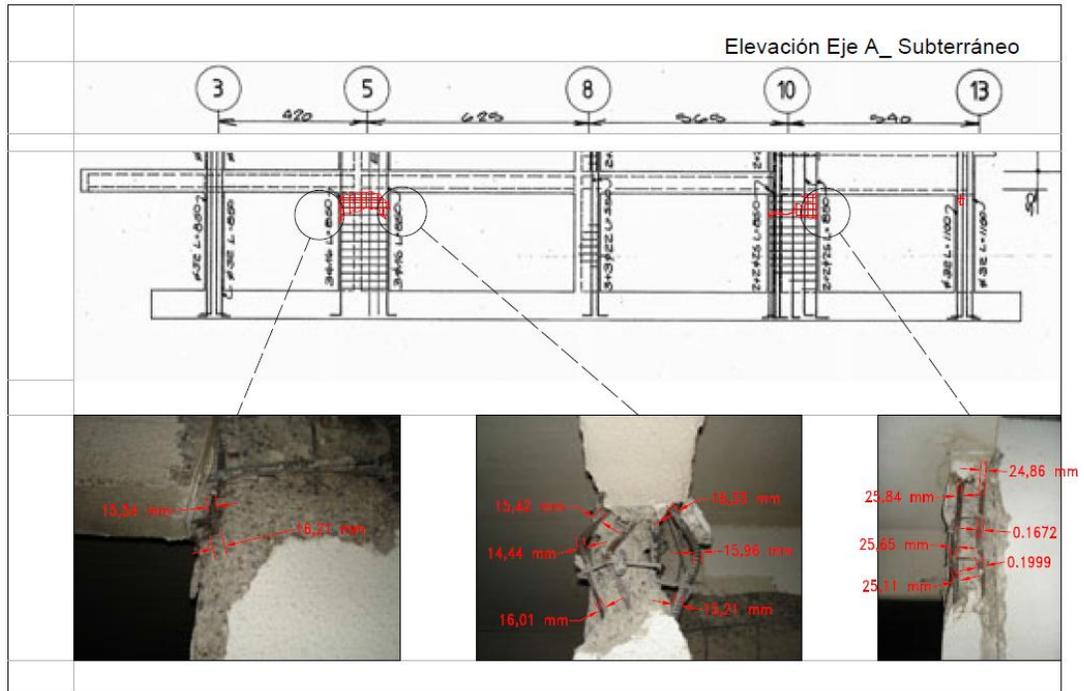


Figura 9: Muros con daño en eje A, Bonelli (2010).

Las ubicaciones mostradas en la figuras 9, son un posible lugar de origen de barras con diámetro 16 milímetros para las partes indicadas en el eje 5, mientras que la zona indicada en el eje 10 es un posible lugar de origen de barras con diámetro 25 milímetros disponibles para su estudio en este trabajo de título.

2.3. Comportamiento del acero en tracción

El comportamiento en tracción del acero normalmente utilizado como refuerzo de hormigón armado, es descrito por su curva monotónica de tensión-deformación. Diversos estudios y ensayos experimentales han concluido que ésta posee tres tramos definidos: tramo lineal elástico, tramo de fluencia y tramo de endurecimiento. Además existe un cuarto tramo, que corresponde a la degradación de la resistencia luego de haber alcanzado la tensión máxima, el cual se asume como un decaimiento lineal de la tensión.

En la figura 10 se muestran los cuatro tramos mencionados de la curva tensión-deformación.

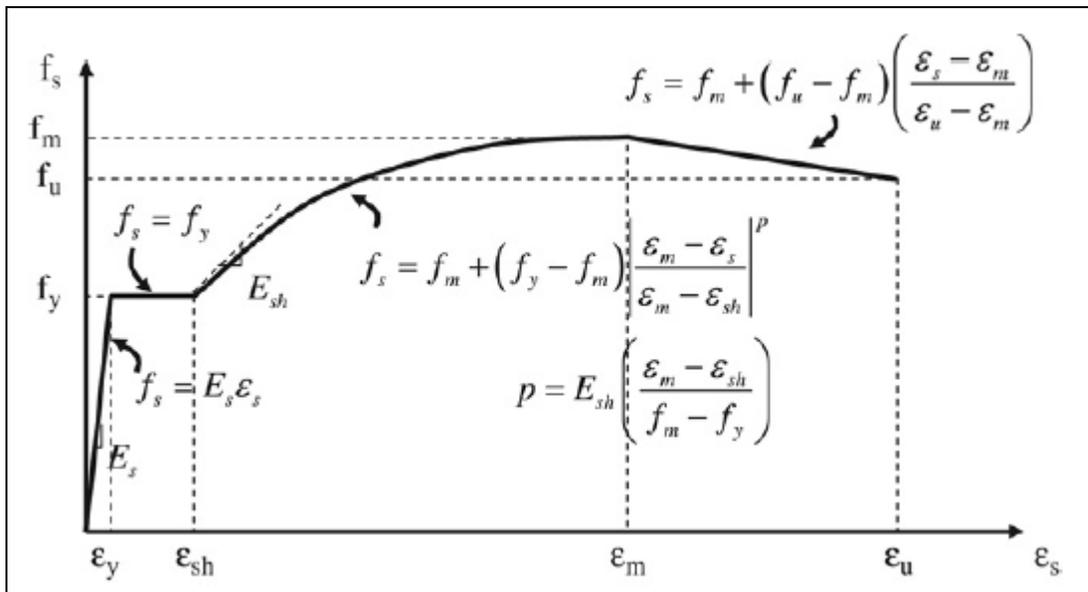


Figura 10: Caracterización de curva tensión-deformación en tracción, Massone y Moroder (2009)

- Tramo elástico

En éste se observa un comportamiento lineal del acero hasta alcanzar el punto de fluencia. La pendiente de este tramo corresponde al módulo de elasticidad del acero.

- Tramo de fluencia

En éste se observa un valor constante de la tensión correspondiente al valor de la fluencia del acero.

- Tramo de endurecimiento

En éste se observa un endurecimiento asociado al crecimiento de la tensión frente al aumento de deformaciones hasta llegar a un punto máximo de tensión.

- Tramo de degradación

Se observa un decaimiento de la tensión ante un aumento de deformaciones hasta llegar a la rotura del acero.

2.4. Comportamiento del acero en compresión

El comportamiento del acero en compresión es descrito por su curva monotónica de tensión-deformación. Éste es similar al que posee el acero en tracción mientras no exista pandeo acorde a lo estudiado por Dodd y Restrepo-Posada (1995), el cual se manifiesta al aumentar la esbeltez de un elemento representada por la relación de aspecto Largo/Diámetro.

El impacto del pandeo en el comportamiento en compresión del acero puede observarse en la figura 11, donde se muestran curvas monotónicas de tensión-deformación obtenidas experimentalmente por Monti y Nuti (1992) para distintas relaciones Largo/Diámetro (L/D).

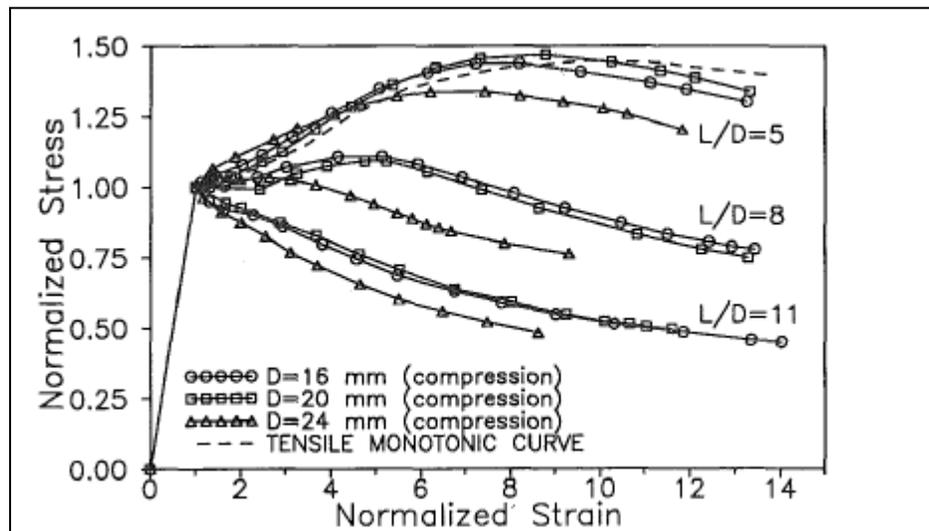


Figura 11: Curvas tensión-deformación en compresión obtenidas por Monti y Nuti (1992).

Se observa que cuando el cociente entre el largo de las barras y el diámetro (L/D) de éstas es pequeño la curva se asemeja a la de tracción. En contraste, con cocientes mayores se ve una disminución considerable de la resistencia de la barra debido al pandeo generado durante los ensayos, llegando a estar por debajo del punto de fluencia de las barras.

2.5. Fatiga a bajos ciclos

La fatiga de los materiales, en particular para el acero, corresponde a un deterioro creciente del elemento por el aumento del área de grietas que aparecen frente a cargas cíclicas de tracción y compresión, las cuales pueden causar la rotura del material aunque no necesariamente estén solicitados en sus tensiones máximas para un ensayo monotónico. Estudios analíticos como los de Brown (1998) han concluido que ante una mayor amplitud de deformación, se requiere menor cantidad de ciclos de carga para causar la rotura, proceso conocido como vida útil a la fatiga de un material.

Para describir la fatiga de un material considerando amplitudes constantes de deformación, como será en el caso de éste trabajo, se pueden destacar dos modelos empíricos ampliamente utilizados, que relacionan la deformación con los ciclos a la rotura:

a) Modelo de Koh y Stephens (1991)

Koh y Stephens (1991) relacionan el número de ciclos a la rotura con la amplitud de deformaciones a partir de ensayos experimentales.

En la figura 12 se observa un esquema de la relación entre ciclos (eje horizontal) y amplitud de deformaciones (eje vertical) propuesta por ellos.

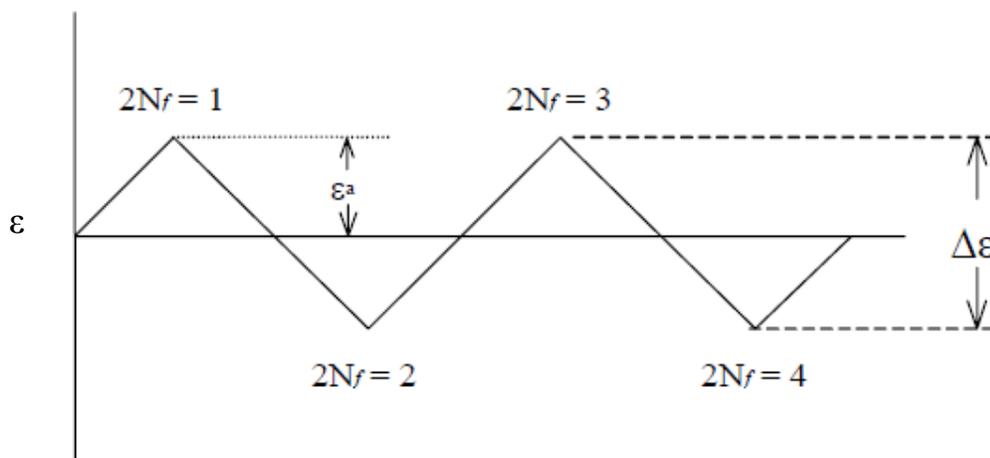


Figura 12: Amplitud de deformación constante, Brown (1998).

El modelo propuesto consiste en la expresión (1) mostrada a continuación.

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = M(2N_f)^m \quad (1)$$

Donde:

ε_a : Amplitud total de deformación unitaria.

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

M, m : Constantes del material.

$2N_f$: Numero de ciclos a la rotura.

En la figura 13 se observa un esquema con los parámetros de la ecuación (1) con ejes en escala log-log.

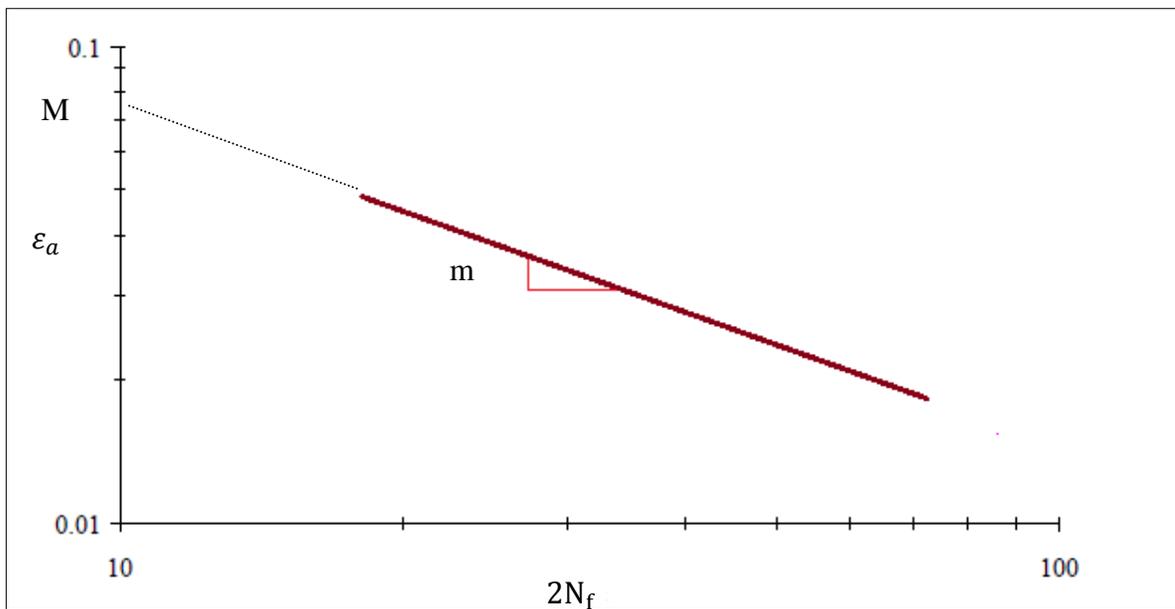


Figura 13: Esquema con parámetros del modelo de Koh y Stephens (1991).

Notar en la figura 13 que al utilizar escala log-log en los ejes, la relación entre la amplitud de deformaciones y los ciclos a la rotura es lineal, con ello obtener los parámetros M y m es

relativamente simple cuando se conoce dicha relación, obtenida generalmente mediante una línea de tendencia aplicada sobre una dispersión de datos experimentales.

b) Modelo de Coffin y Manson (1954)

El modelo propuesto consiste en la expresión (2) mostrada a continuación.

$$\varepsilon = \varepsilon_{elástica} + \varepsilon_{plástica} = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{plástica} \quad (2)$$

Este modelo supone que la deformación total es una suma entre la deformación elástica y la plástica, en la figura 14 se muestra un esquema que representa las componentes elástica y plástica de la deformación en un estado de carga y descarga.

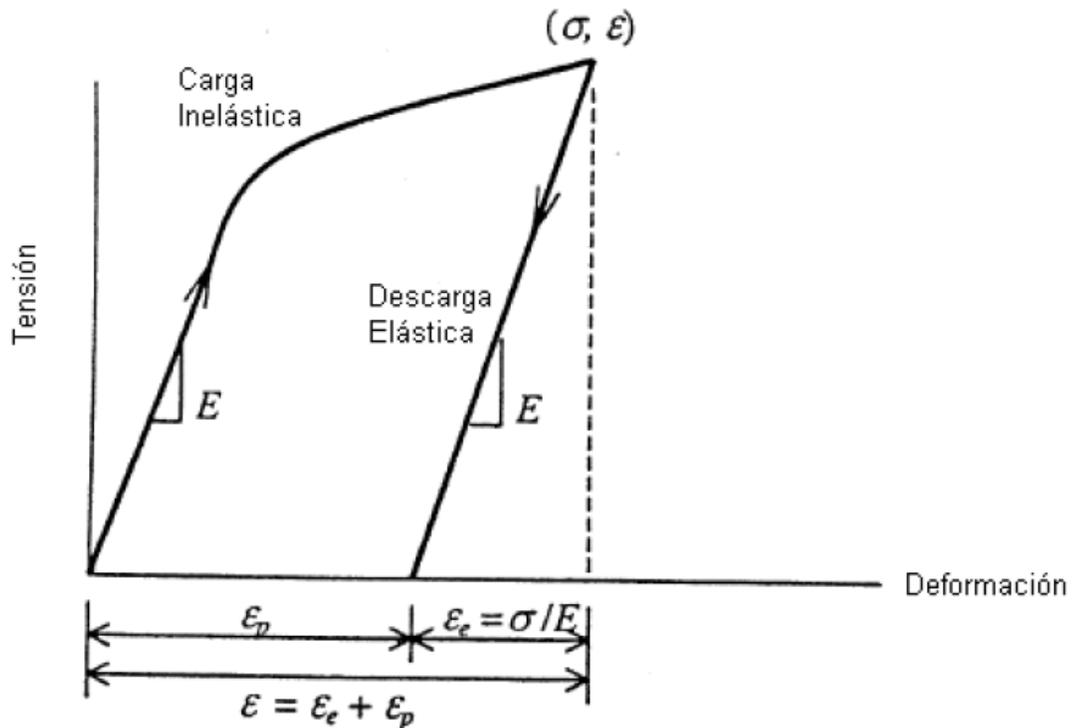


Figura 14: Esquema con deformaciones elástica y plástica, Hamasaki (2013).

Al graficar la tensión en función de la deformación plástica en escala logarítmica se obtiene la siguiente relación lineal:

$$\sigma = K(\varepsilon_p)^n \quad (3)$$

Donde n y K son constantes que dependen del material. Luego la deformación total puede ser escrita como sigue:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n} \quad (4)$$

Finalmente cuando se tienen amplitudes de deformación en rango plástico, éstas pueden relacionarse con el número de ciclos a la rotura con la siguiente expresión:

$$\Delta\varepsilon_p = C_f(2N_f)^{-\alpha} \quad (5)$$

Donde C_f y α son constantes y dependen del material, notar que esta expresión es similar a la ecuación (1).

Otra forma ampliamente utilizada de describir la fatiga de un material, es relacionar la amplitud de deformaciones con la energía disipada hasta la falla del material. Un modelo para relacionarlas, es utilizado en los trabajos de Brown y Kunnath (2004) y Hawileh et al. (2010) que consiste en la expresión (6) mostrada a continuación.

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = M(W_f)^m \quad (6)$$

Donde:

ε_a : Amplitud total de deformación unitaria.

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

M, m : Constantes del material.

W_f : Energía disipada hasta la rotura.

Este modelo es similar a la ecuación (1), sin embargo según Brown y Kunnath (2004) este último resulta ser menos confiable que el de Koh y Stephens (1991), dado que arroja un factor de correlación mas bajo entre sus datos obtenidos experimentalmente.

Es necesario destacar que los modelos mencionados son válidos en un análisis sobre ensayos de cargas cíclicas con amplitud constante de deformaciones. Durante un evento sísmico el refuerzo de acero se ve solicitado a amplitudes de deformación aleatorias, por lo que si se quiere caracterizar el efecto de la fatiga bajo este escenario, es necesario estimar el daño acumulado debido a la alternancia de cargas y relacionarlo con el número de ciclos a la rotura para deformaciones específicas, las cuales forman parte de las deformaciones aleatorias.

2.6. Comportamiento del acero frente a cargas cíclicas

A partir del comportamiento del acero en tracción y compresión expuesto anteriormente, es posible conocer su comportamiento ante cargas cíclicas. Diversos estudios experimentales se han efectuado sobre esto, sin embargo el efecto del pandeo ha sido considerado en pocos trabajos.

Brown y Kunnath (2004) estudiaron experimentalmente la falla por fatiga para un bajo número de ciclos en barras de refuerzo tipo #6, #7, #8 y #9 de diámetros 19.1, 22.2, 25.4 y 28,65 mm respectivamente, con relaciones L/D igual a 6. Para ello se realizó una serie de ensayos con deformaciones constantes sobre las barras, la amplitud de deformación utilizada a lo largo de los experimentos fue desde una deformación unitaria de 0,015 hasta 0,03.

En las figuras 15 y 16 se muestran curvas típicas de tensión-deformación con cargas cíclicas obtenidas experimentalmente por Brown y Kunnath (2004).

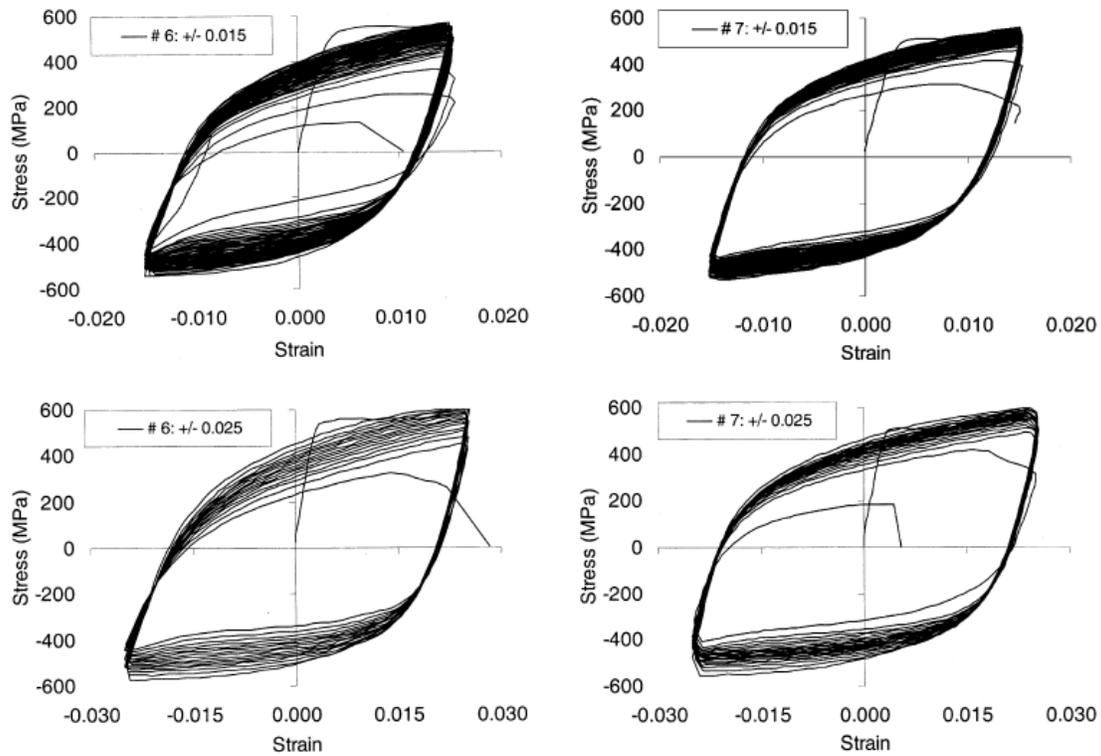


Figura 15: Curvas tensión-deformación de probetas #6 y #7 obtenidas por Brown y Kunnath (2004).

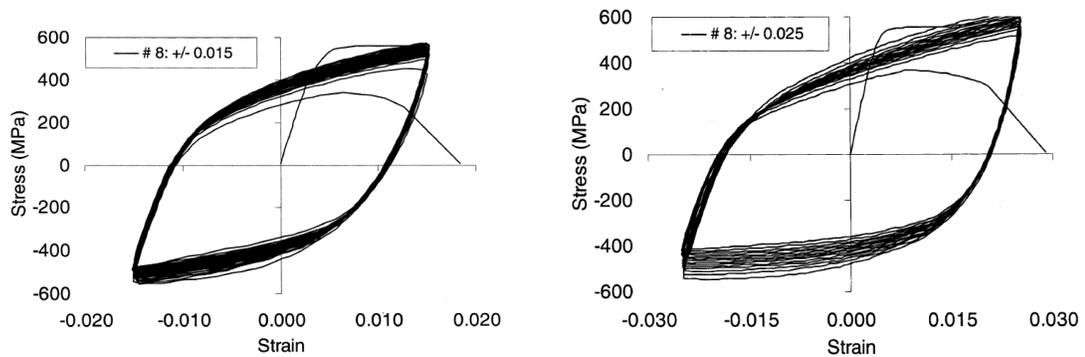


Figura 16: Curvas tensión-deformación de probetas #8 obtenidas por Brown y Kunnath (2004).

En los gráficos tensión-deformación, el eje de las abscisas corresponde a la deformación unitaria y el eje de las ordenadas a la tensión (MPa). Se observa que la tensión máxima resistida por las barras va disminuyendo paulatinamente a medida que los ciclos transcurren hasta llegar a la rotura por fatiga, lo que se traduce en una pérdida repentina de capacidad. Además se aprecia que la respuesta a tracción es similar a la de compresión, esto se debe a que al utilizar relaciones L/D igual a 6 se restringe el pandeo, por lo que la respuesta a compresión no se ve afectada en gran medida frente a éste.

Utilizando el modelo de Koh y Stephens (1991), los ensayos realizados por Brown y Kunnath (2004) son representados en una curva deformación vs ciclos a la rotura. Esta se muestra en la figura 17.

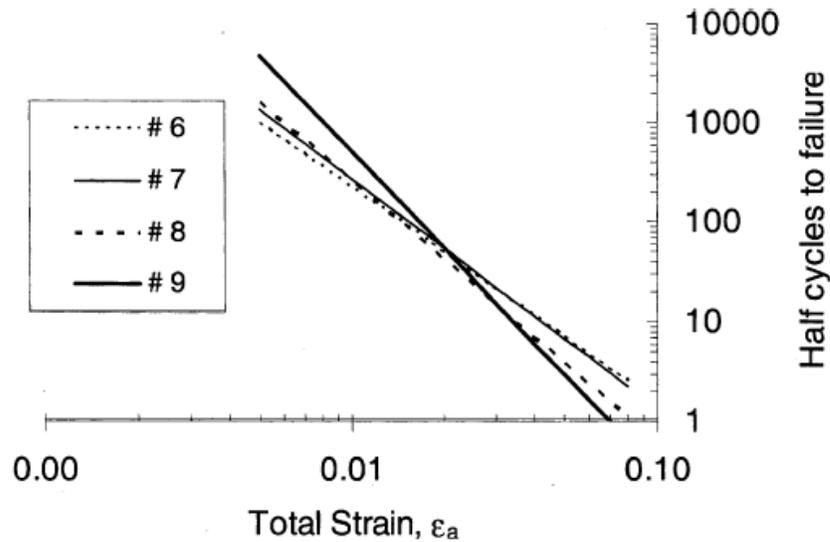


Figura 17: Curvas deformación-ciclos a la rotura obtenidas por Brown y Kunnath (2004).

A partir de la curva de la figura 17 Brown y Kunnath (2004) concluyen que el deterioro de la vida a la fatiga para deformaciones pequeñas es mayor mientras el diámetro de la barra ensayada sea menor, sin embargo esta tendencia se revierte al aumentar paulatinamente la deformación, luego para amplitudes de deformación mayores de aproximadamente 0.02, el deterioro de la barra es más severo mientras mayor sea el diámetro.

Ya que los resultados de los ensayos mostrados fueron obtenidos utilizando deformaciones iguales en tracción y en compresión, es necesario complementar con los ensayos realizados por Koh y Stephens (1991), ellos estudiaron experimentalmente la falla por fatiga para bajo número de ciclos variando la razón entre deformaciones R , definida en la ecuación (7).

$$R = \frac{\varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max}} \quad (7)$$

Este parámetro es definido a partir de la deformación mínima y máxima, ambas constantes durante un ensayo a cargas cíclicas y deformaciones controladas. El valor de la deformación mínima o máxima tiene signo negativo si es que corresponde a deformación por compresión o positivo si es que corresponde por tracción. Por ello este factor puede ser menor, igual o mayor a

0, siendo igual a -1 para deformaciones iguales para tracción y compresión como los ensayos realizados por Brown y Kunnath (2004).

Koh y Stephens (1991) realizaron los ensayos utilizando valores para R de -2; -1; 0; 0.5; 0.75. Para analizar y cuantificar los efectos de la tensión promedio y deformación promedio se definen en las ecuaciones (8) y (9) respectivamente.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (8)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min}}{2} \quad (9)$$

Para cuantificar el efecto de la tensión promedio en la fatiga a bajos ciclos, en el trabajo de Koh y Stephens (1991) se supone que la ecuación (2) se puede escribir como la ecuación (10), Esta expresión implica que la tensión promedio tiene influencia sólo en la zona elástica.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (10)$$

Considerando esto, Koh y Stephens (1991) grafican los ensayos a partir de los ciclos a la rotura y la amplitud utilizada, para distintas razones de deformación R en escala log-log. En la figura 18 se muestra el grafico con los ensayos y sus curvas de tendencia.

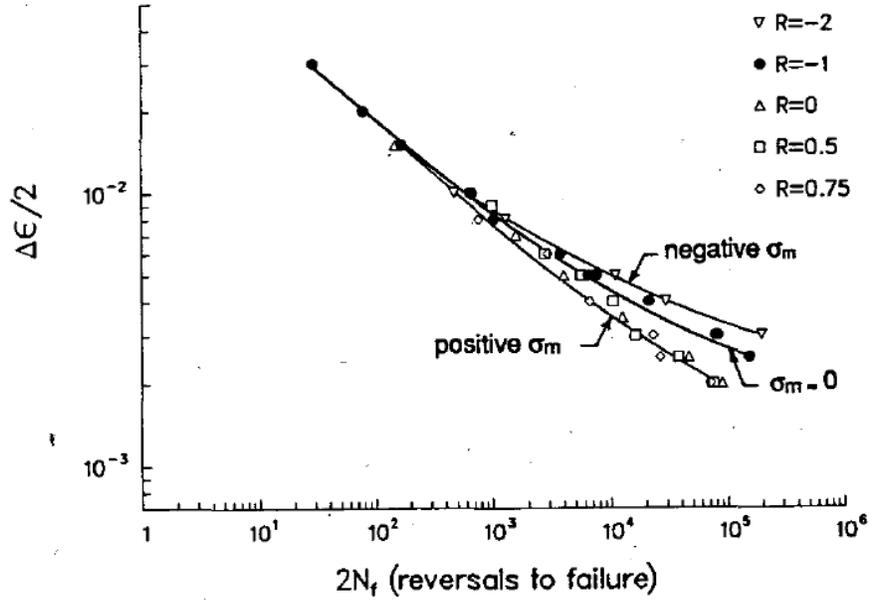


Figura 18: Curvas deformación-ciclos a la rotura obtenidas por Koh y Stephens (1991).

Se observa que la influencia de la tensión promedio es mayor cuando la deformación elástica es predominante, acorde a la ecuación (10).

Además, Koh y Stephens (1991) utilizan otro modelo que cuantifica los efectos de la tensión media que es de la forma mostrada en la ecuación (11).

$$\sqrt{\sigma_{max}\varepsilon_a E} = f(2N_f) \quad (11)$$

Donde σ_{max} corresponde a la tensión máxima en la mitad de la vida a la falla de cada ensayo, E es el módulo de elasticidad y f es una constante.

La ecuación (11) puede ser escrita como la ecuación (12) a partir de la ecuación (10).

$$\sigma_{max}\varepsilon_a = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_f)^{b+c} = A(N_f)^\alpha + B(N_f)^\beta \quad (12)$$

A partir de la ecuación (12) se propone la siguiente relación:

$$\sigma_{max}\varepsilon_{ap} = C(2N_f)^{-a} \quad (13)$$

la cual es válida si existen deformaciones en rango plástico.

Se grafican en escala log-log los resultados de los ensayos con mayores deformaciones utilizando la relación (13). En la figura 19 se aprecian los resultados obtenidos por Koh y Stephens (1991).

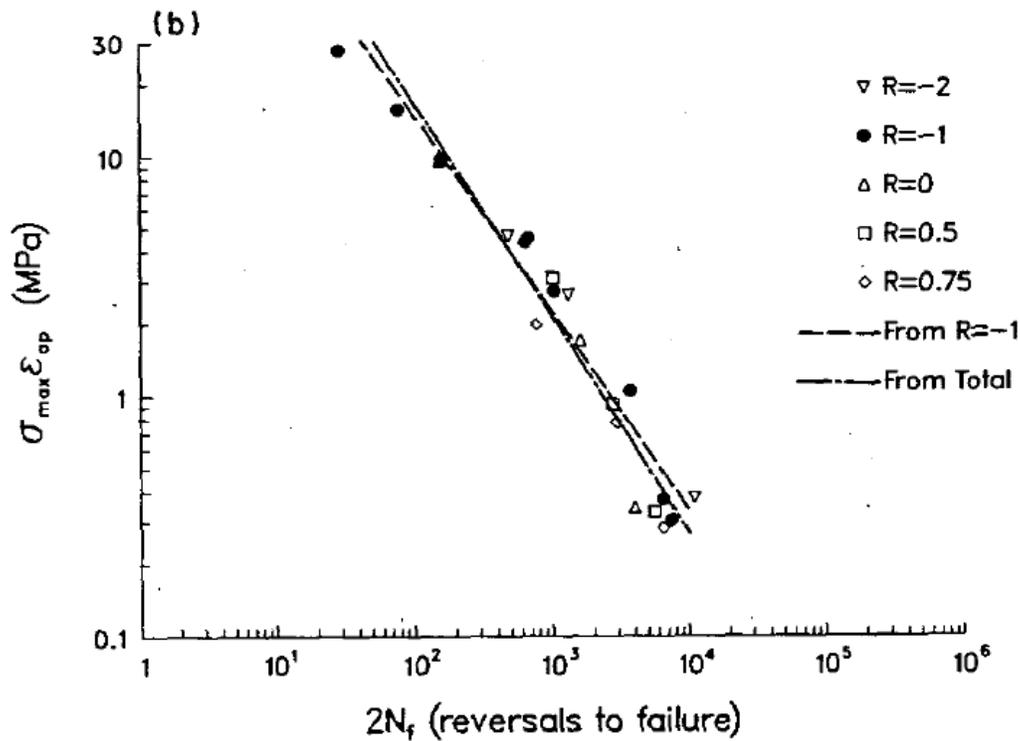


Figura 19: Curvas deformación-ciclos a la rotura con grandes deformaciones obtenidas por Koh y Stephens (1991).

Una de las curvas se obtuvo a partir de los ensayos con $R = -1$, mientras que la otra curva corresponde a todos los ensayos ($R = \{-2; -1; 0; 0.5; 0.75\}$). Debido a que ambas curvas son similares, se concluye que el factor R no tiene un efecto relevante en la fatiga a bajos ciclos, luego es esperable que la respuesta a la fatiga sea la misma o similar para ensayos con igual amplitud, independiente del valor R .

A pesar de que los trabajos experimentales realizados por Brown y Kunnath (2004) y por Koh y Stephens (1991), entregan información importante sobre el comportamiento del acero frente a cargas cíclicas, no fue considerado el efecto del pandeo en la respuesta de las probetas en sus trabajos. Por esto es necesario mostrar el trabajo experimental de Monti y Nuti (1992), ellos estudiaron experimentalmente la falla por fatiga para bajo número de ciclos de refuerzo de acero, para relaciones L/D de 5, 8 y 11.

En la figura 20 se muestran curvas tensión-deformación obtenidas experimentalmente por Monti y Nuti (1992) para L/D igual a 5, 8 y 11.

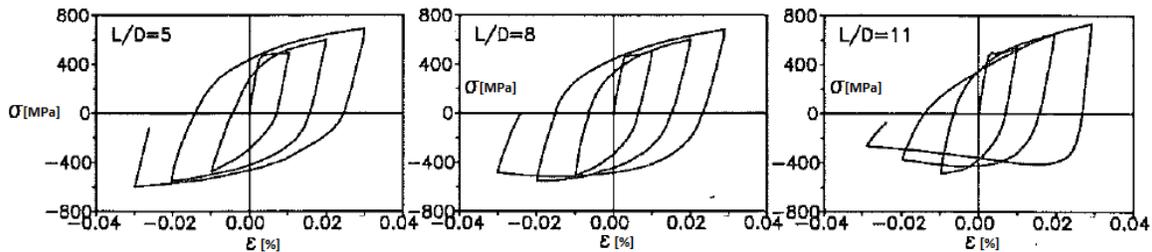


Figura 20: Curvas tensión-deformación en cargas cíclicas obtenidas por Monti y Nuti (1992).

Se puede apreciar que la respuesta a compresión difiere en mayor medida con respecto a las de tracción ante un aumento en la relación L/D, donde se observa una degradación de la tensión en compresión ocasionada por el pandeo de la barra.

Para complementar los trabajos mencionados anteriormente, Hamasaki (2013) estudió experimentalmente la falla por fatiga para bajo número de ciclos de refuerzo de acero, con diámetros de 8 y 16 mm y relaciones L/D de 6, 8, 12, 16, 20 y 28.

En las figura 21 y 22 se muestran curvas de tensión-deformación para relaciones de L/D igual a 20 y 28, obtenidas en aquel trabajo, para una amplitud de deformación constante e igual a una deformación unitaria del 5% en tracción y en compresión.

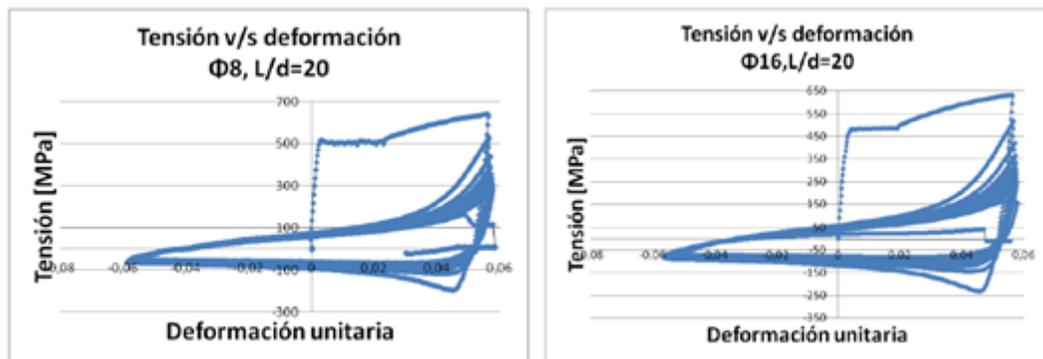


Figura 21: Curvas tensión-deformación en cargas cíclicas obtenidas por Hamasaki para L/D = 20.

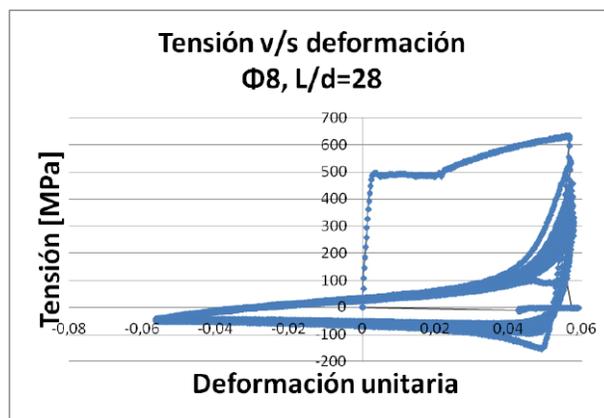


Figura 22: Curva tensión-deformación en cargas cíclicas obtenidas por Hamasaki para L/D = 28.

Se puede apreciar que la respuesta a compresión difiere notoriamente con respecto a las de tracción ante estos valores de la relación L/D debido al pandeo.

En las figuras 23 y 24 se muestran los resultados de Hamasaki (2013) a partir de sus ensayos efectuados, con el fin de analizar la influencia de la relación L/D de las probetas en la fatiga del acero.

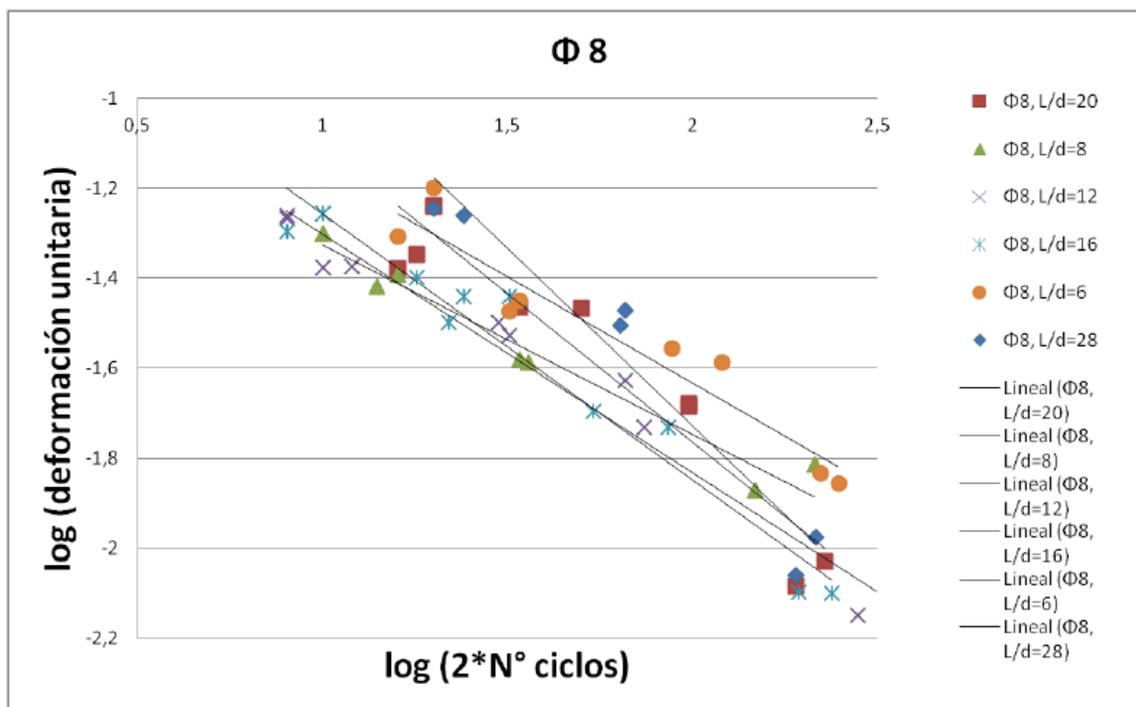


Figura 23: Relación deformación-ciclos a rotura ensayos de Hamasaki (2013) para D=8 mm.

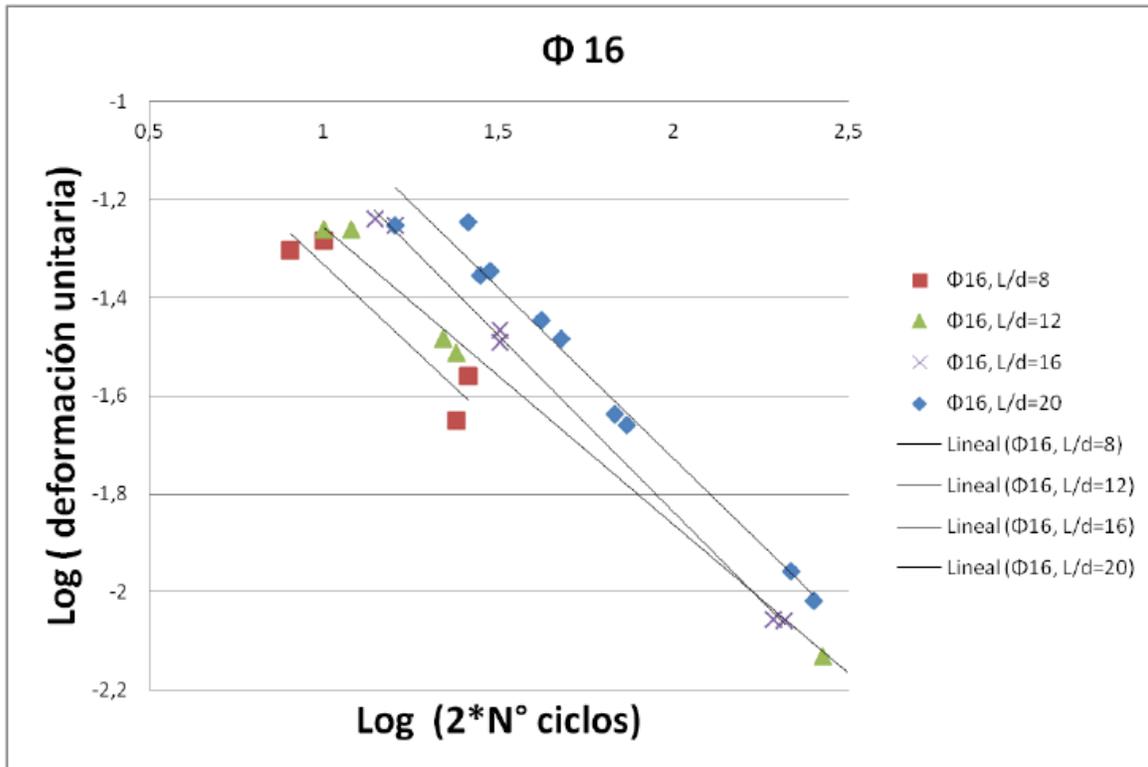


Figura 24: Relación deformación-ciclos a rotura ensayos Hamasaki (2013) para D=16 mm.

En las figuras 23 y 24 se pueden apreciar los resultados obtenidos para los ensayos sobre probetas con diámetro de 8 y 16 milímetros respectivamente para diferentes relaciones de aspecto (L/D), junto con las curvas de tendencia para los ensayos sobre probetas de igual diámetro e igual relación L/D, mediante las cuales se puede obtener los parámetros M y m del modelo de Koh y Stephens (1991), véase tabla 9 en Anexo C.

Se concluye que la resistencia de los refuerzos a compresión sufre una degradación pronunciada por efecto del pandeo, el cual se manifiesta en relaciones L/D altas. Por otro lado, se observa que el comportamiento de los ciclos a la rotura frente a deformaciones grandes tiene cierta dependencia de la relación L/D, ya que se observa una variación de la pendiente m de 0,368 para barras de diámetro 8 mm. y una variación de 0,114 para barras de diámetro 16 mm.

Otros estudios experimentales que vale destacar, son los realizados por Rodríguez et al. (1999) y los realizados por Moyer y Kowalsky (2003), en los que se concluye que el inicio del pandeo ante cargas cíclicas tiende a originarse después de una reversa desde tracción, el cual depende fuertemente del máximo valor de la deformación en tracción alcanzada antes de la reversa.

En este trabajo de título se propone estudiar la fatiga para bajo número de ciclos y deformaciones relativamente grandes, las cuales superan las deformaciones en el rango elástico. Nótese que, de acuerdo al estudio de Brown (1998), se espera que la rotura ocurra luego de un número de ciclos menor a 1000 para deformaciones que excedan el rango elástico.

3. ENSAYOS EXPERIMENTALES

3.1. Metodología

Se cuenta con barras de refuerzo dañadas provenientes del edificio en estudio, con diámetros nominales de 16, 22 y 25 milímetros.

Se hizo un catastro del estado de estas barras de refuerzo dañadas midiendo sus diámetros, largos rectos, longitudes de pandeo y desplazamientos laterales, para luego obtener probetas de ensayo provenientes de las zonas aparentemente rectas y de zonas que sufrieron pandeo dentro de las barras (véase anexo B).

Mediante la Maquina Universal Instron modelo 600LX de 60 toneladas cuya propiedad corresponde al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile se realizaron los ensayos experimentales. Ésta posee mordazas con capacidad nominal de 30 toneladas, las cuales permiten restringir el desplazamiento y giro de las probetas durante los ensayos.

Los ensayos consisten principalmente en someter las probetas a tracción y a cargas cíclicas de tracción y compresión con amplitudes de deformación constantes controladas en el rango plástico. Con lo anterior se busca simular solicitaciones sísmicas, a pesar que éstas no necesariamente causan deformación en tracción y compresión de igual amplitud.

Los valores de desplazamientos y cargas obtenidos en los ensayos son registrados mediante la Maquina Universal, con lo que éstos pueden ser procesados para su posterior análisis. Sin embargo los desplazamientos registrados por la máquina no son reales, ya que éstos consideran la deformación experimentada por todo el sistema incluyendo las mordazas, por lo que se incorporan al montaje experimental sensores externos para obtener mediciones de la deformación solamente de las probetas: dos LVDT y un extensómetro, además de la utilización de una cámara de alta resolución. En la figura 25 se muestra el montaje experimental incluyendo la maquina universal y sensores.

Los valores entregados por los sensores como también por la máquina tienen unidades de voltaje, por lo que deben ser calibrados para obtener la deformación en milímetros y la carga en kilogramos-fuerza multiplicándolos por una constante.

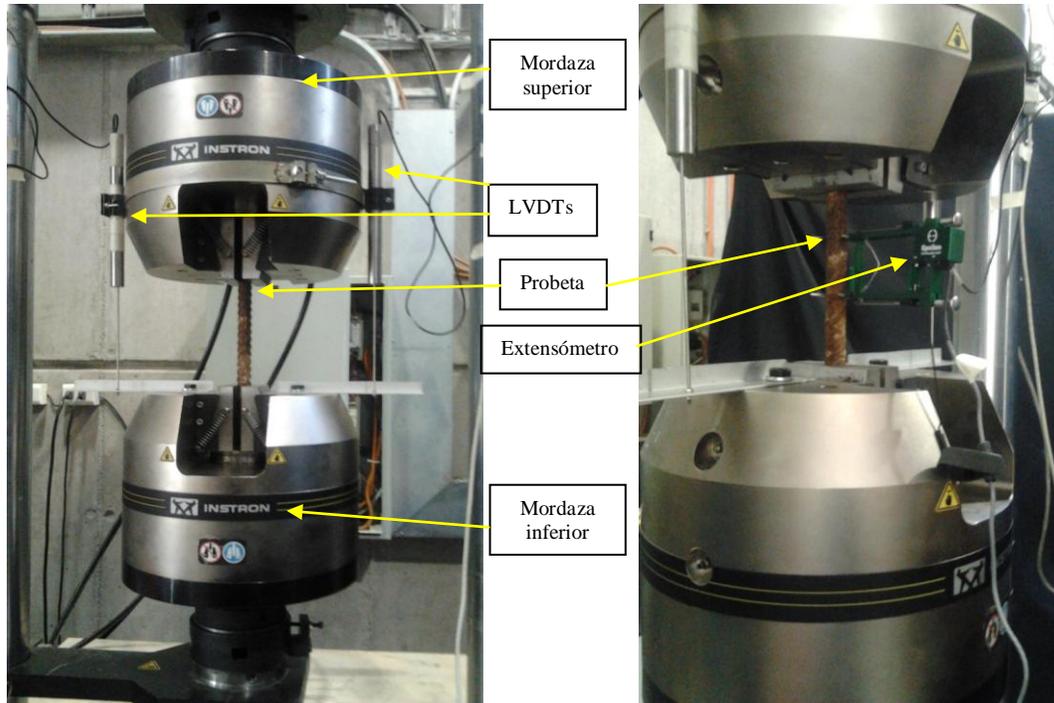


Figura 25: Máquina universal y sensores externos.

Las probetas ensayadas tienen relaciones L/D igual a 20 con tal de inducir el pandeo cuando éstas sufran esfuerzos de compresión, además de ser éste un número representativo del cociente entre la longitud de pandeo (L_p) y el diámetro de las barras (D) que presentan pandeo dentro de las probetas estudiadas, véase tablas 7 y 8 en Anexo B. Para obtener el largo L entre mordazas al comienzo de un ensayo, de tal forma de que la relación L/D sea 20 es necesario que la longitud total de la probeta sea de alrededor de 15 centímetros mas el largo L , estos 15 centímetros adicionales corresponden a una longitud de 7,5 centímetros de cada extremo de la barra empotrado dentro de la mordaza.

Luego se someten a ensayos de carga cíclica de amplitud de deformación igual a 3% y 5% las probetas provenientes de barras del edificio y se obtienen datos de probetas provenientes de barras inalteradas de diámetro nominal de 16, 22 y 25 milímetros. Estos últimos son obtenidos de experimentos anteriores y también a partir de ensayos sobre barras obtenidas del mercado, para comparar la respuesta de éstas con la de probetas provenientes del edificio, y con ello determinar la pérdida de capacidad de las barras de refuerzo del edificio debido al terremoto. Además se busca realizar ensayos a tracción sobre probetas provenientes de barras de 16, 22 y 25 milímetros del edificio, para establecer si existe daño no observable en un tramo de la barra a una distancia de hasta 40 veces el diámetro de ésta desde la zona con daño observable en la barra.

El número de ciclos a la rotura en un ensayo se obtiene directamente de la máquina universal ya que posee un conteo interno de ciclos, el cual se puede corroborar contando el número de reversas del desplazamiento del pistón de la máquina, además se detecta la deformación registrada por los sensores en el instante en que la barra falla por fatiga y con ello se puede obtener un número de ciclos que no sea necesariamente entero, con tal de tener mayor precisión al obtener los ciclos remanentes. El número de ciclos a la rotura junto a la amplitud de deformación de una dispersión de datos de ensayos, pueden relacionarse utilizando el modelo empírico propuesto por Koh y Stephens (1991), ecuación (1).

3.2. Ensayos

Mediante los datos obtenidos de barras inalteradas se busca determinar un punto de referencia para obtener la pérdida de capacidad a la fatiga sufrida por las barras del edificio, para barras del edificio se realizan ensayos de carga cíclica con tal de obtener ciclos remanentes a la rotura y ensayos de tracción para obtener deformaciones remanentes a la rotura. Se utilizan dos LVDT y un extensómetro para ensayos en probetas de barras con diámetro de 16 milímetros. Posteriormente se incorpora una cámara de alta resolución y se quita el extensómetro para los ensayos del resto de probetas de barras con diámetro de 22 y 25 milímetros, ya que no es posible adherirlo a las probetas de estos diámetros. Debido a esto se tienen distintos métodos para obtener la amplitud de deformación en un ensayo dependiendo del diámetro de la probeta.

3.2.1. Protocolo de ensayo en barras del edificio

Según las características de las barras con daño provenientes del edificio y enumeradas (véase el catastro de barras en anexo B), se obtienen probetas que cumplan una relación L/D igual a 20, las cuales son clasificadas dependiendo de su barra de origen, en particular si éstas provienen de una barra sin daño aparente en todo su tramo se denotan como probeta recta sin pandeo, si su origen es de una barra que posea un tramo con pandeo o fractura se denotan como probeta recta con pandeo, estas clasificaciones son válidas si es que la probeta es totalmente recta, en caso de no aplicar, se denotan como probeta zona con pandeo si es que la probeta corresponde a la zona con pandeo de la barra de origen. La nomenclatura utilizada para estas probetas se muestra en la figura 26.

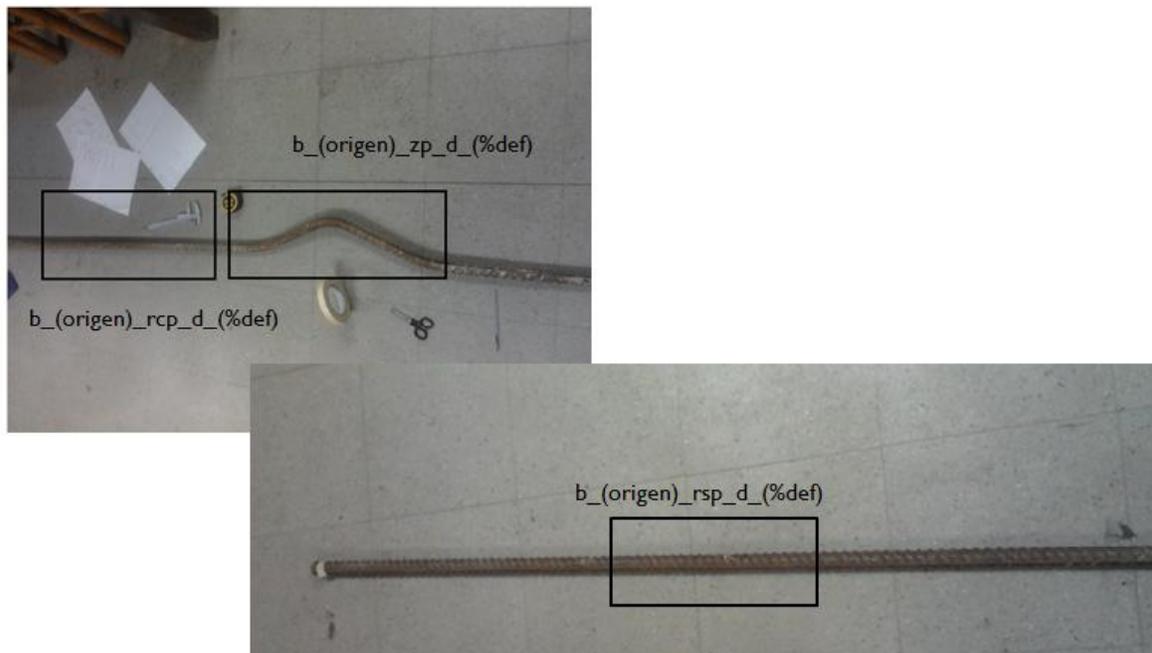


Figura 26: Características y nomenclatura de probetas de barras con daño provenientes del edificio.

Considerando lo anterior se establecen grupos de ensayos a realizar sobre las barras, los cuales se muestran en la tabla 3, a cada ensayo le corresponde una probeta.

Tabla 3: Grupos de ensayos.

Grupo de ensayos	Descripción
1	2 cíclicos en zona recta (3 y 5%), 1 monotónico, 1 cíclico en zona pandeada (3%)
2	1 cíclicos en zona recta (3%), 1 monotónico, 1 cíclico en zona pandeada (3%)
3	2 cíclicos en zona recta (3 y 5%), 1 monotónico
4	1 cíclico en zona recta (3%), 1 monotónico
5	1 cíclico en zona pandeada (3%)

Según las características y medidas que tenga una barra de acero perteneciente al edificio, le corresponderá uno de los grupos de ensayos a realizar sobre ésta. Si la barra posee un tramo con pandeo, será sometida a los grupos de ensayo 1, 2 o 5, la diferencia entre cuál de estos grupos de ensayos a aplicar se debe principalmente a las longitudes rectas que posea la barra, por ejemplo si la longitud recta es considerable, entonces podrían obtenerse dos probetas de zona recta y con ello a la barra se le aplican los ensayos del grupo 1, en caso de que no haya un tramo recto en la barra de largo suficiente para obtener una probeta recta, entonces se aplica el ensayo del grupo 5.

En la tabla 4 se muestran las barras provenientes del edificio disponibles enumeradas (véase numeración de barras en anexo B) junto a uno de los grupos de ensayos descritos en la tabla 3 que es posible realizar tentativamente sobre ellas.

Tabla 4: Barras del edificio disponibles y ensayos tentativos.

Diámetro [mm]	16	Diámetro [mm]	22	Diámetro [mm]	25
Grupo de ensayos	Barras disponibles	Grupo de ensayos	Barras disponibles	Grupo de ensayos	Barras disponibles
1	-	1	23	1	6, 12, 18, 19
2	29	2	2	2	4, 5, 13, 14, 16, 17
3	24, 25, 26, 30, 50	3	1, 15, 20, 21, 22, 49	3	-
4	8, 11, 32, 35	4	44	4	3, 38, 39
5	-	5	7, 27, 28, 48	5	-
Total ensayos	26		31		40
				Total	97

No fue posible realizar todos los ensayos de la tabla 4 por las siguientes razones:

- No fue posible hacer fallar en tracción algunas probetas de diámetro 22 mm.
- No fue posible hacer fallar en tracción la totalidad de las probetas de diámetro 25 mm.
- No fue posible hacer fallar para cargas cíclicas a una deformación del 5% algunas probetas de diámetro 25 mm.
- Algunas probetas se descartan por presentar imperfecciones en su tramo.

Por lo tanto en la tabla 5 se muestran los grupos de ensayos que efectivamente se realizan sobre barras del edificio.

Tabla 5: Barras del edificio disponibles y ensayos realizados.

Diámetro [mm]	16	Diámetro [mm]	22	Diámetro [mm]	25
Grupo de ensayos	Barras disponibles	Grupo de ensayos	Barras disponibles	Grupo de ensayos	Barras disponibles
1	-	1	23	1	6, 12, 18, 19
2	29	2	2	2	4, 5, 13, 14, 16, 17
3	24, 25, 26, 30, 50	3	1, 15, 20, 21, 22, 49	3	-
4	8, 11, 32, 35	4	44	4	3, 38, 39
5	-	5	7, 27, 28, 48	5	-
Total ensayos	26		27		22
				Total	75

Los números destacados en verde corresponden a las barras del edificio a las cuales no se les pudo aplicar el grupo de ensayos correspondiente por las razones mencionadas anteriormente, sin contar la ausencia de ensayos de tracción sobre barras de diámetro 25 mm.

El protocolo para ensayar una probeta obtenida de la zona con pandeo de una barra consiste en realizar un ensayo a tracción hasta que la probeta se encuentre recta, se considera que la probeta se encuentra totalmente estirada si es que después del ensayo de tracción, la longitud transversal de la probeta es menor a 8 milímetros. Luego se ensaya la probeta estirada con una relación $L/D = 20$. En la figura 27 se muestran los pasos mencionados.



Figura 27: Estirado de probetas con pandeo.

3.2.2. Ensayos cíclicos en barras de diámetro 16 milímetros

Inicialmente se efectúan ocho ensayos cíclicos con probetas de diámetro 16 mm provenientes de barras inalteradas obtenidas del Laboratorio Experimental de Estructuras de la Universidad de Chile, y se verifica que las mediciones de amplitud de deformación de los sensores estén acorde con los resultados obtenidos por Brown y Kunnath (2004). Éstos se componen de dos probetas para una amplitud de deformación del 2%, dos probetas para 3%, dos probetas para 4% y dos para 5% con una relación L/D igual a 20.

La nomenclatura para los ensayos en probetas de barras inalteradas de acá en adelante se denota como “P(Diámetro)ld(Relación L/D)d(Amplitud de deformación)(Numero probeta)”.

En la figura 28 se muestran los datos obtenidos para un ensayo cíclico con una amplitud de 5% en el tramo elástico.

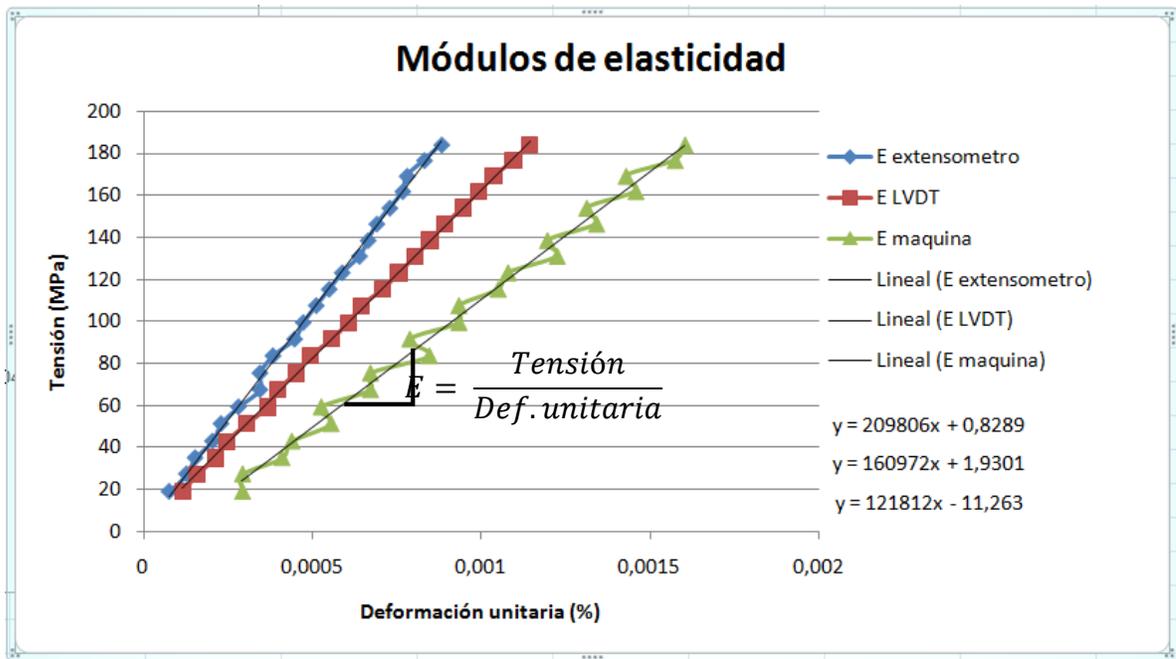


Figura 28: Tramo elástico P16dl20d52.

Las curvas de la figura 28 corresponden a la regresión lineal de los primeros 24 datos desde el comienzo de un ensayo para los valores entregados por la maquina universal, los LVDT y el extensómetro, notar que la diferencia entre las curvas corresponde a diferentes mediciones de la deformación. Cabe mencionar además que la curva que representa a los datos de los LVDT corresponde al valor medio entre las mediciones entregadas por los dos LVDT utilizados, la diferencia porcentual entre los valores del modulo de elasticidad a partir de las mediciones de cada uno es del orden de un 5%, por lo que se considera aceptable utilizar el valor promedio.

Se observan notorias diferencias en las mediciones de los LVDT y de la máquina con respecto al módulo de elasticidad de la probeta, por ello es necesario ajustar los valores entregados por los LVDT acorde al entregado por el extensómetro, dado que éste último aporta mediciones más reales.

Luego se ajusta el módulo de elasticidad obtenido utilizando los LVDT de manera que éste coincida con el obtenido utilizando extensómetro, con ello las deformaciones de los LVDT son corregidas utilizando la ecuación (14).

$$\varepsilon_{real} = \varepsilon_{lvdt} - \frac{\sigma \cdot (E_{extensometro} - E_{lvdt})}{E_{extensometro} \cdot E_{lvdt}} \quad (14)$$

La ecuación (14) asume una correlación lineal entre la corrección sobre la medición de los LVDT y la tensión. Esta corrección se asume válida debido a que en primer lugar, las diferencias observadas en la figura 28 se atribuyen a una deformación en las mordazas producto de la carga aplicada sobre las barras, la cual no es posible detectar únicamente con el uso de los LVDT. Luego es razonable que la corrección esté relacionada con la tensión y no con la deformación que sufra la probeta.

Se efectuó esta corrección por rigidez inicial para todos los ensayos sobre barras de 16 milímetros, si el extensómetro no fue utilizado por razones de seguridad durante un ensayo o si el valor entregado por éste refleja problemas de adherencia en él, se utiliza el valor nominal del módulo de elasticidad del acero igual a 200.000 MPa, en general las mediciones obtenidas utilizando el extensómetro tienen una diferencia menor del 10% respecto al valor nominal del módulo de elasticidad, un ensayo fue la excepción a esto y el valor entregado por el extensómetro difiere en un 19% del valor nominal, pero esto se considera aceptable ya que la probeta en cuestión parece haber sido sometida a una elongación considerable durante el terremoto, y con ello puede que efectivamente el módulo de elasticidad de la probeta se haya reducido.

Cabe mencionar que esta metodología se considera aceptable, ya que el módulo de elasticidad obtenido con extensómetro de una probeta posee una diferencia porcentual baja con respecto al valor nominal del módulo de elasticidad del acero, esto indica que es una buena aproximación utilizar éste último valor para realizar la corrección, para cuando no se dispone del extensómetro durante un ensayo.

Luego de obtener las deformaciones corregidas, se realiza un conteo de los ciclos considerando que transcurre un cuarto de ciclo cuando se alcanza la amplitud máxima de deformación desde el instante en que ésta pasa por el origen. En la tabla 17 del Anexo C se muestran los ciclos a la rotura y amplitud de deformación obtenidos en los ensayos cíclicos realizados sobre las probetas inalteradas de diámetro 16 mm.

Graficando el doble de los ciclos a la rotura y la amplitud de deformación en escala log-log se obtienen los parámetros del modelo de Koh y Stephens y se compara con los resultados obtenidos por Brown y Kunnath (2004) utilizando el mismo modelo, cuyos parámetros se muestran en la tabla 10 del Anexo C. En la figura 29 se muestra el gráfico de las curvas amplitud de deformación vs ciclos a la rotura de los ensayos realizados sobre barras inalteradas de 16 mm y los efectuados por Brown y Kunnath (2004).

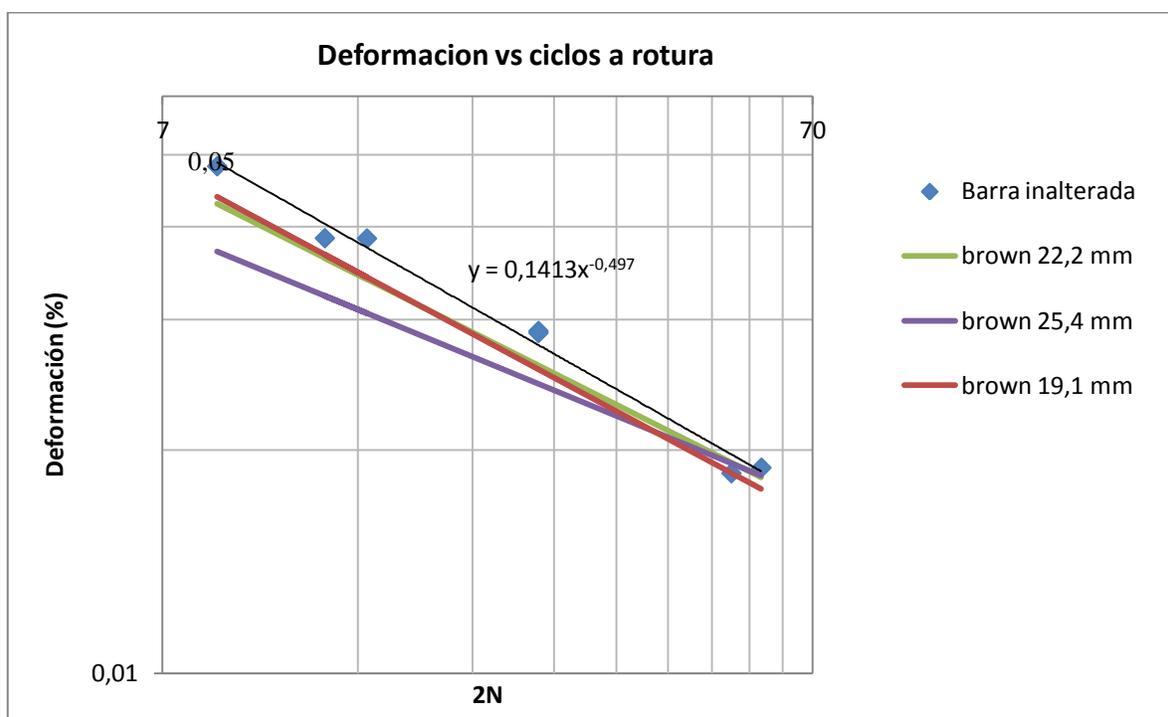


Figura 29: Ciclos a rotura vs amplitud de deformación barra inalterada.

Se observa que la curva obtenida a partir de las probetas de la barra inalterada es comparable con los ensayos de Brown y Kunnath (2004), además se comporta acorde a la tendencia de un aumento de la pendiente a medida que el diámetro disminuye frente a deformaciones considerables, según lo mencionado en la sección 2.6.

Finalmente se realizan los ensayos correspondientes a probetas que provienen de barras del edificio de diámetro 16 milímetros, efectuando la corrección de deformaciones por rigidez inicial. En la figura 30 se muestran los resultados de estos ensayos y de las probetas inalteradas con amplitud 3% y 5% en un gráfico deformación vs ciclos a la rotura.

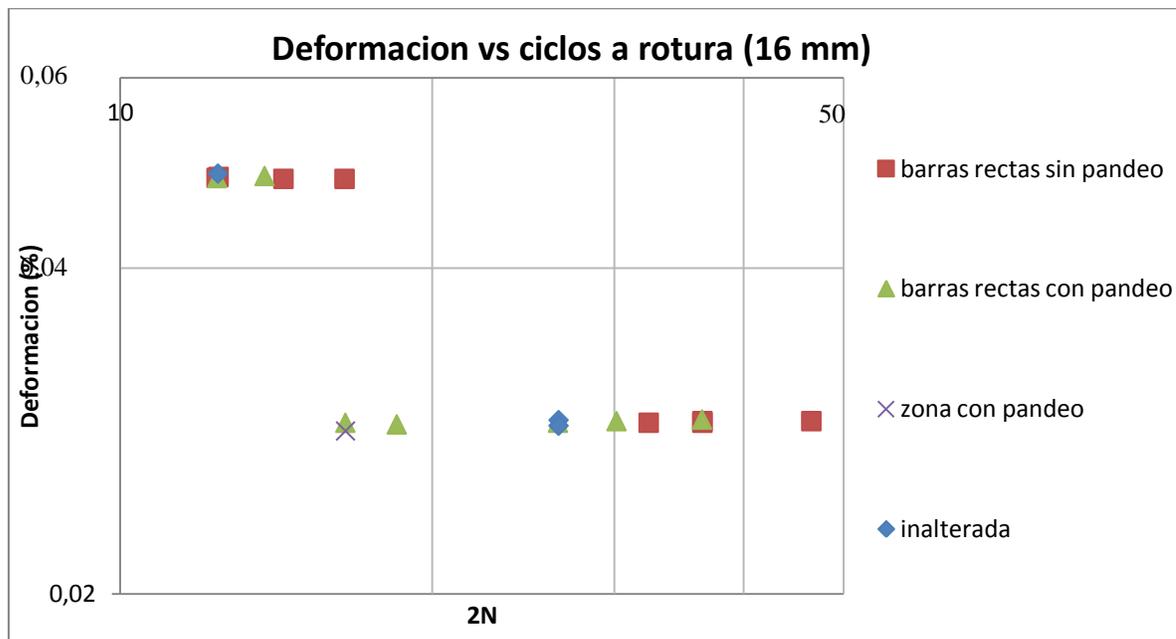


Figura 30: Resultados de ensayos en probetas de barras de diámetro 16 mm.

En la figura 30 se observa que las probetas que corresponden a una zona con pandeo tienen una menor cantidad de ciclos remanentes a la rotura, seguidas por las probetas rectas obtenidas de una barra con daño en el tramo, seguidas por las probetas rectas obtenidas de una barra sin daño aparente. Sin embargo las probetas de barra inalterada muestran un comportamiento de barra con daño, lo cual no tiene sentido. Esto se atribuye principalmente a calidades distintas entre el acero de la barra inalterada y el acero de barras del edificio.

En las tablas 18, 19 y 20 del Anexo C se muestran los valores correspondientes a la deformación y ciclos a la rotura de los ensayos de la figura 30.

3.2.3. Ensayos cíclicos en barras de diámetro 22 milímetros

Para los ensayos de barras con este diámetro se quita el extensómetro debido a que no es posible fijarlo a las probetas, ya que las pinzas no se adhieren a probetas de diámetro mayor o igual a 22 milímetros y desde el inicio de estos ensayos, se incorpora al montaje experimental una cámara fotográfica de alta resolución. Con ello es posible obtener amplitudes de deformación durante los ensayos. Para ello es necesario marcar las probetas, de forma que sea posible obtener la posición de algún punto específico de éstas a partir de una fotografía, mediante la numeración de los píxeles en un software para procesar imágenes.

Los ensayos sobre estas barras tienen una velocidad de 25 mm/min y las fotografías se toman en todos los ensayos cada 5 segundos desde el comienzo de éste hasta que la probeta falla por fatiga,

obteniendo una tasa de 26 imágenes por ciclo para una amplitud de deformación del 3% y 43 imágenes por ciclo para una amplitud de deformación del 5%. La velocidad de ensayo es relativamente lenta y dado que las imágenes se toman cada 5 segundos, se tiene un error máximo de medición de las deformaciones máximas correspondiente a 2,08 milímetros, lo que en deformación unitaria corresponde a una diferencia de 0,19%.

Se calibra la conversión entre píxeles y milímetros por medio de una regla en uno de los soportes de la maquina universal, de forma que aparezca en las fotografías. Es necesario mencionar que la regla es prescindible ya que dado que se busca principalmente deformaciones unitarias, estas pueden obtenerse directamente de las fotografías, sin embargo se utiliza de todas formas para tener noción de las dimensiones reales al tratar con las imágenes.

Con esto se obtiene la posición de puntos en las probetas que sean cercanos a los extremos, en los estados de la barra necesarios para obtener la amplitud de la deformación, es decir cuando la probeta aun no ha sido ensayada, cuando ésta se encuentra en su máxima deformación en tracción y cuando se encuentra en su máxima deformación en compresión, estos estados se obtienen mediante el seguimiento del movimiento de la mordaza inferior en las fotografías del ensayo.

En la figura 31 se observa los estados de la probeta mencionados.

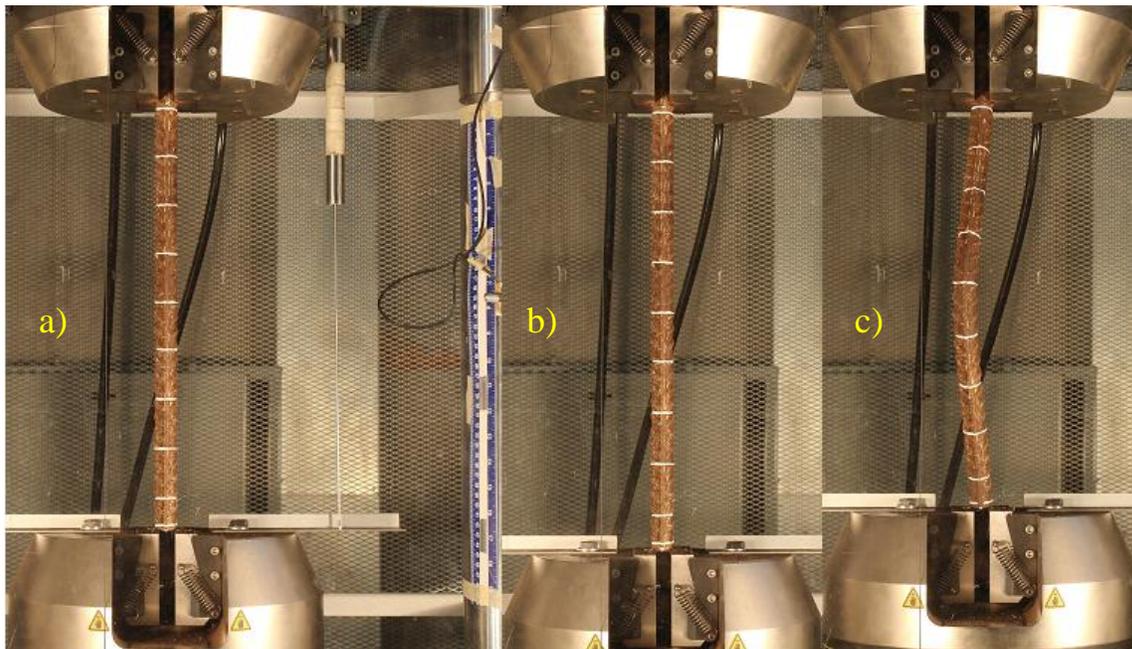


Figura 31: Fotografías de probeta sin deformación (a) y en sus máximas deformaciones (b) y (c).

Al final de los ensayos en barras de 22 mm. se realiza un ensayo adicional con la particularidad de que se configura una velocidad de ensayo de 5 mm/min en la máquina universal. Este ensayo apunta a tener mediciones más precisas de la amplitud y establecer si es necesario continuar utilizando la cámara en los ensayos posteriores.

Con los datos de este ensayo particular es posible comparar las deformaciones medidas con fotografías y las medidas por los LVDT con su corrección por rigidez inicial. En la figura 32 se observa la variación porcentual entre ambas mediciones durante el primer ciclo del ensayo.

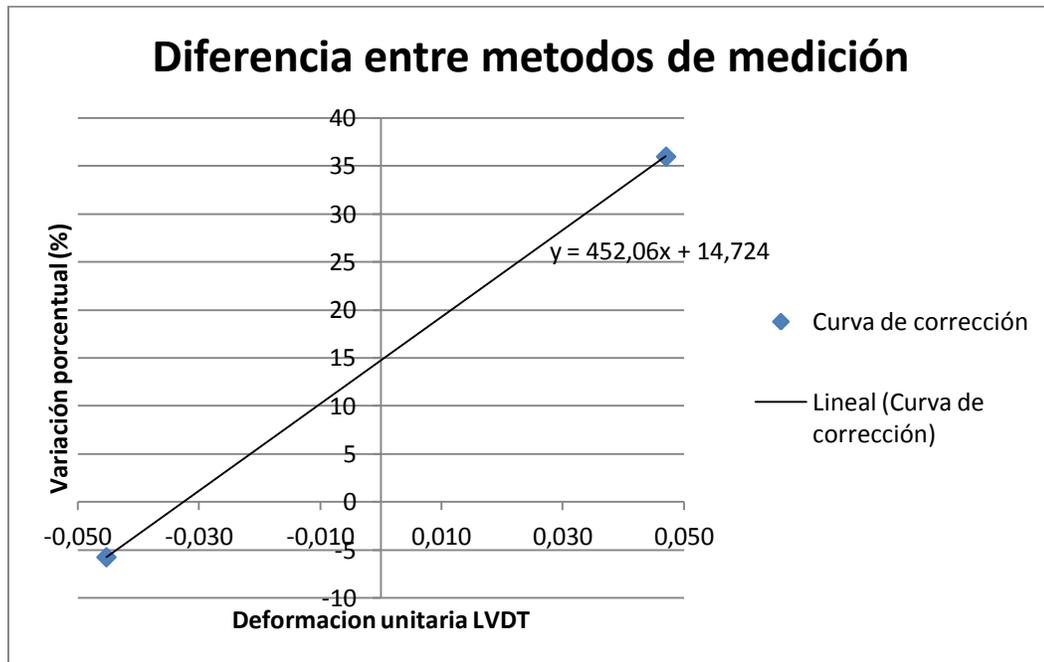


Figura 32: Diferencia porcentual entre métodos de medición de deformaciones.

En la figura 32 se observan dos puntos, estos corresponden a la diferencia porcentual entre la deformación máxima en tracción y en compresión, obtenidas con LVDT con respecto al valor de éstas mismas deformaciones pero obtenidas con el proceso de imágenes durante el primer ciclo de cargas. Se asume que ambos puntos generan una curva de tendencia lineal, mediante la cual es posible corregir según su ecuación las mediciones obtenidas con LVDT, al menos para las mediciones que transcurren entre el estado de deformación máxima en tracción y el estado de deformación máxima en compresión, los datos de la curva se muestran en la tabla 11 del Anexo C.

Se observan variaciones considerables entre las mediciones por ambos métodos. Esto se atribuye a dos posibles causas, la primera es un posible deslizamiento de la probeta durante un ensayo, lo cual consiste en que la probeta en un intervalo de tiempo pequeño no se encuentra sujeta a la mordaza y se mueve independiente de ésta. La segunda causa posible es un alargamiento de la

probeta en la zona que se encuentra dentro de la mordaza debido a que el empotramiento no es perfecto, esta última se denomina ‘*strain penetration*’ o penetración de deformaciones, también parece posible que ambos efectos puedan darse simultáneamente.

Cabe mencionar que en la totalidad de los ensayos, se observó una reducción en la lectura del manómetro del sistema de agarre de las mordazas al alcanzar la deformación máxima en tracción, lo cual podría indicar que los fenómenos de deslizamiento y penetración de deformaciones se manifiestan en ese instante.

En la figura 33 se presenta un esquema de la penetración de deformaciones.

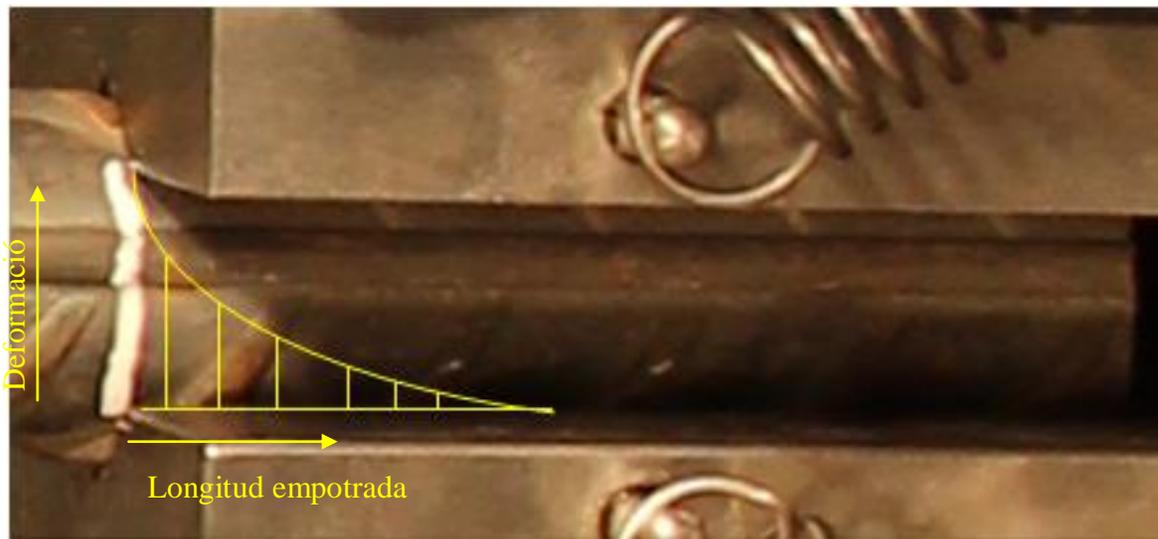


Figura 33: Esquema de penetración de deformaciones.

La figura 33 consiste en un esquema del efecto potencial que puede tener la penetración de deformaciones, es un alargamiento en la probeta que depende del nivel de empotramiento que se tenga sobre ella.

Este fenómeno es originado principalmente por el empotramiento imperfecto entre el sistema mordaza-barra que ante la aplicación de la carga, la barra es capaz de sufrir una disminución en su área transversal permitiendo que por un tiempo corto esta pueda deformarse en la zona en contacto con la mordaza. Un punto perteneciente a la zona de la barra en contacto con la mordaza se deformará menos a medida que se encuentre más dentro de la mordaza, como se puede apreciar en la figura 33.

En la figura 34 se muestra un esquema de las deformaciones y desplazamientos a causa de la penetración de deformaciones ($\delta s - \delta d$) y deslizamiento (δd).

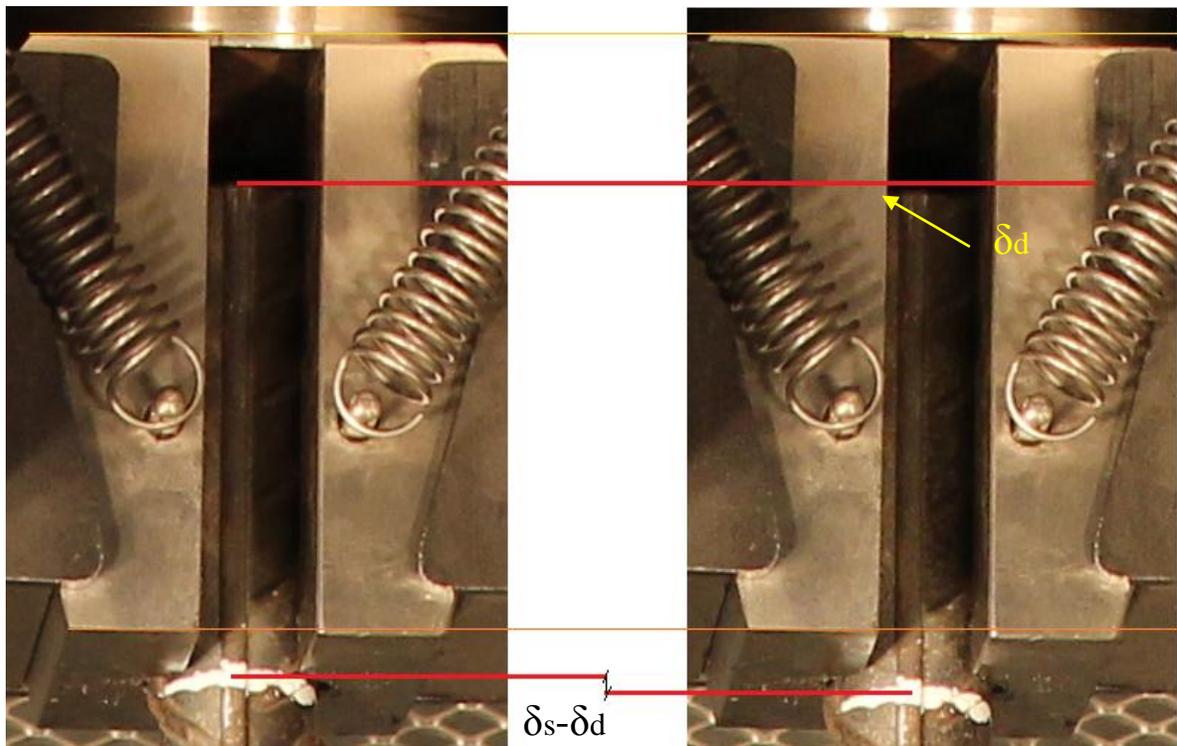


Figura 34: Deformaciones y desplazamientos causados por penetración de deformaciones y deslizamiento.

El esquema mostrado en la figura 34 está compuesto por dos imágenes de un ensayo sobre una misma probeta, la imagen de la izquierda corresponde a la probeta sin deformación y la imagen derecha es la probeta en su máxima deformación en tracción. Las líneas de color naranja se trazan para alinear la mordaza superior en ambas imágenes, y con ello descartar que el deslizamiento sea en realidad un movimiento anómalo de la mordaza.

Estos efectos mencionados generan variaciones entre las mediciones realizadas por los LVDT ya que no es posible detectarlos únicamente con el uso de éstos. Luego debido a la penetración de deformaciones, los LVDT realizan una lectura de la amplitud de deformaciones en tracción mayor a la real, y debido al deslizamiento los LVDT realizan una lectura de la amplitud de deformaciones en compresión menor a la real, lo cual explicaría las diferencias mostradas en la figura 32.

Finalmente se muestran los resultados de los ensayos correspondientes a probetas que provienen de barras del edificio de diámetro 22 milímetros y a probetas de barra inalterada, la amplitud se obtiene del proceso de imágenes para cada ensayo y para cada ciclo de cargas. En la figura 35 se muestran los resultados de estos ensayos en un gráfico deformación vs ciclos a la rotura, los valores se muestran en las tablas 21, 22, 23 y 24 del Anexo C.

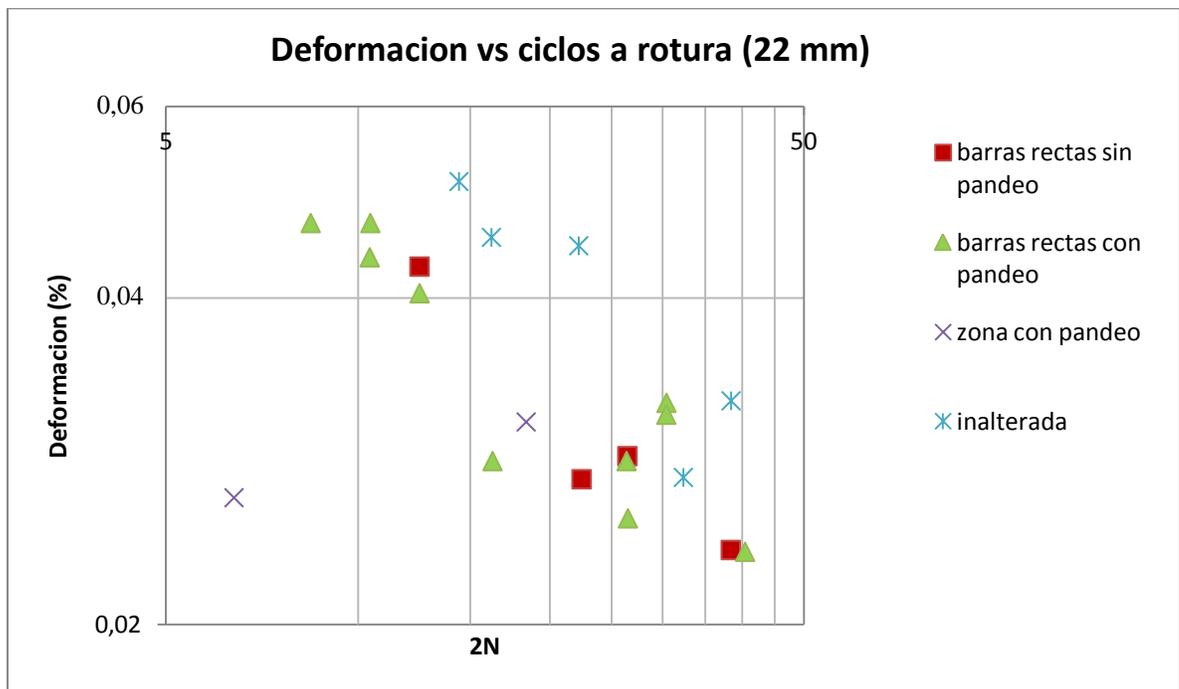


Figura 35: Resultados de ensayos en probetas de barras de diámetro 22 mm.

En la figura 35 se observa que en general, las probetas que corresponden a una zona con pandeo tienen una menor cantidad de ciclos remanentes a la rotura, sin embargo no es claro si las probetas rectas obtenidas de una barra con daño en el tramo o las probetas rectas obtenidas de una barra sin daño aparente son las que tienen menor cantidad de ciclos remanentes a la rotura.

3.2.4. Corrección mediante fotogrametría

Debido a que los efectos de la penetración de deformaciones y deslizamiento no se habían detectado antes de comenzar los ensayos sobre probetas de diámetro 22 milímetros, probablemente las mediciones de los LVDT durante los ensayos realizados en probetas de diámetro 16 milímetros no sean tan precisas, luego suponiendo que estos efectos están en función de la carga aplicada a la barra y que es lineal con respecto a la deformación medida por los LVDT, se pretende generar una curva de corrección para las deformaciones en función de las mediciones realizadas con los LVDT, con tal de tener una mejor medida de la amplitud de deformaciones en los ensayos sobre probetas de diámetro 16 mm.

Considerando lo anterior se realizaron ensayos sobre barras diámetro de 16 milímetros inalteradas. en los cuales se estableció un procedimiento especial de la maquina, en el cual al llegar a las amplitudes máximas de deformación en tracción y en compresión, el ensayo se detiene durante 10 segundos y con ello es posible obtener fotografías de la barra en sus máximas

deformaciones. Para medir las deformaciones correspondientes, a las barras se les marca en los extremos adyacentes a las mordazas de tal forma de detectar aquellos puntos en una fotografía y establecer una relación entre pixeles y deformación.

En la figura 36 se puede ver la posición del pistón de la máquina universal en función del tiempo con el procedimiento mencionado de la maquina.

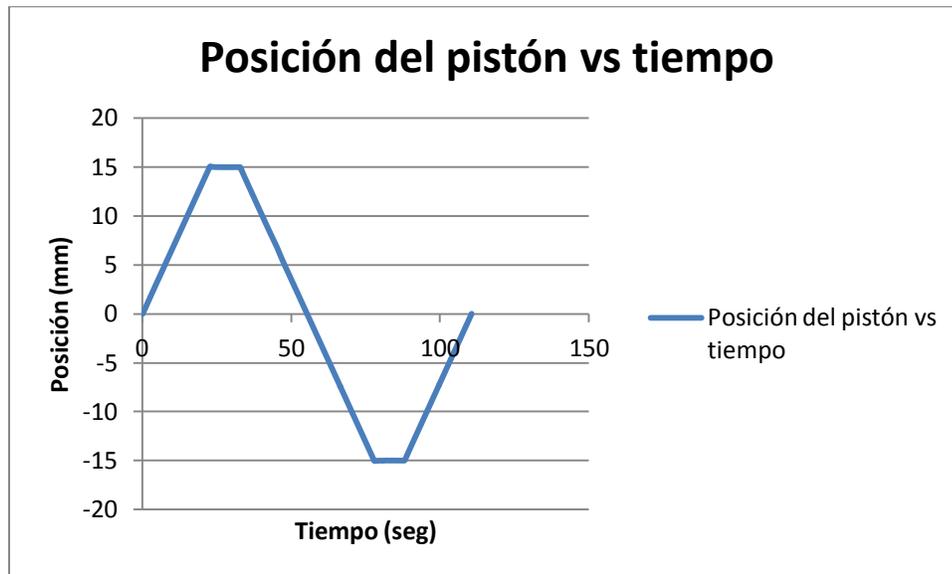


Figura 36: Posición del pistón vs tiempo.

En la figura 37 se puede ver una probeta de barra inalterada en su posición original, en su máxima deformación en tracción y en su máxima deformación en compresión utilizando el procedimiento mencionado.

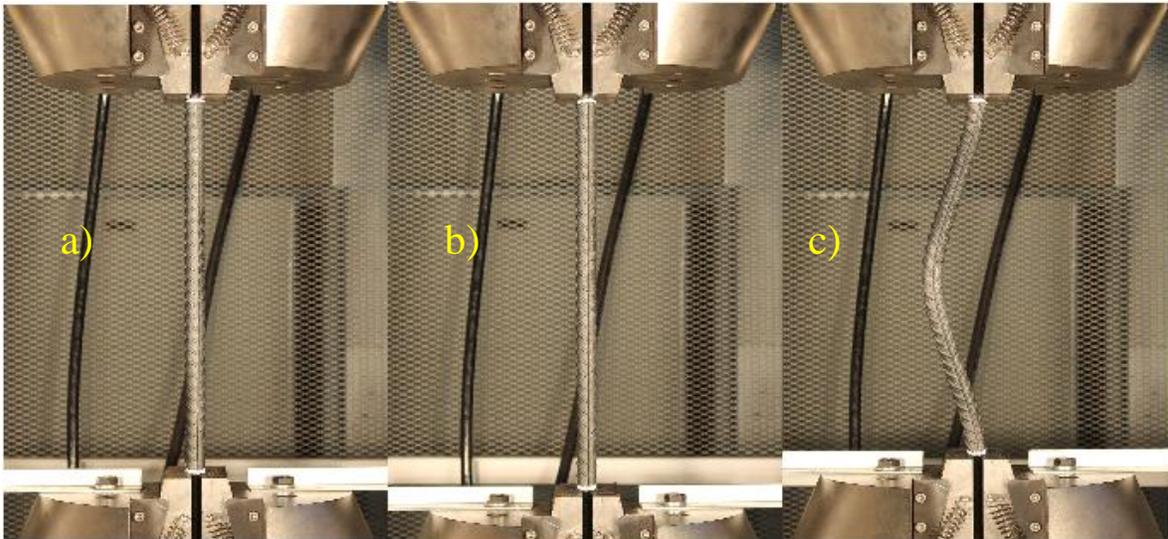


Figura 37: Fotografías de probeta sin deformación (a) y en sus máximas deformaciones (b) y (c).

De igual forma que lo realizado anteriormente en la figura 32, se obtienen las deformaciones con LVDT y con fotografías, y luego se calcula la diferencia porcentual entre ambas formas y con ello se puede tener una curva de corrección. En la figura 38 se muestran las curvas de corrección tentativas para amplitudes de deformación del 3% y 5% para probetas de diámetro 16 mm, los valores para generar las curvas se muestran desde la tabla 12 hasta la tabla 16 del Anexo C.

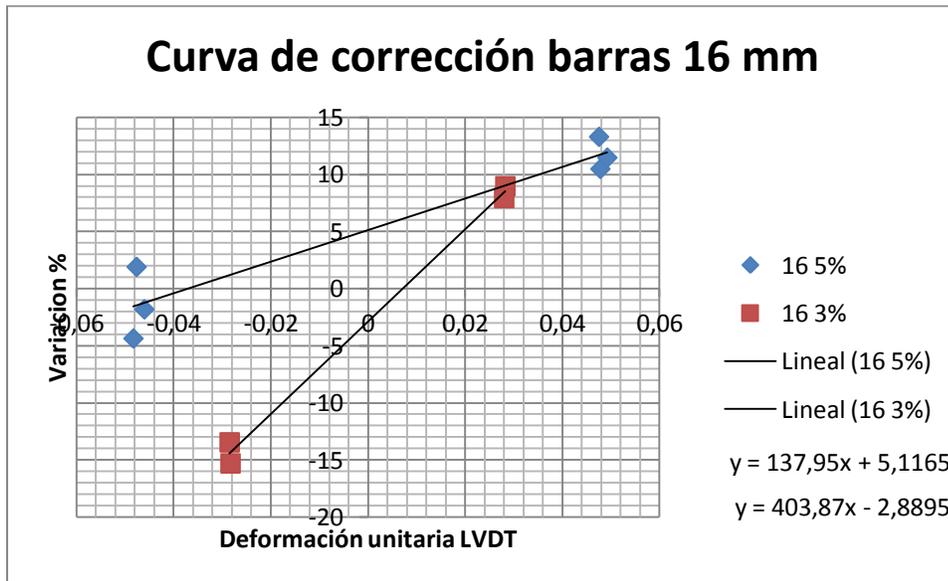


Figura 38: Curva de corrección por fotogrametría para barras diámetro 16 mm.

Se observa que la tendencia indica que no es posible establecer una curva de corrección lineal, para ajustar las deformaciones medidas por los LVDT durante los ensayos en probetas de 16

milímetros, ya que no se tienen factores de corrección generales, por lo tanto los ensayos sobre barras de diámetro 16 milímetros no se corrigen.

Para los ensayos sobre barras de diámetro 22 milímetros y para cada ensayo posterior sobre barras de 25 milímetros, es posible corregir las curvas entregadas por los LVDT a partir de las amplitudes obtenidas mediante el proceso de imágenes, para ello se supone una relación lineal entre las mediciones realizadas por cada método de las deformaciones máximas para cada ciclo, relación que no necesariamente es válida para el resto de los ciclos. En el anexo D se pueden observar los gráficos considerando esta corrección.

3.2.5. Ensayos cíclicos en barras de diámetro 25 milímetros

Al igual que en los ensayos sobre las barras de diámetro 22 milímetros, las amplitudes de deformación en estos ensayos se obtienen mediante el proceso de imágenes, pero utilizando el procedimiento de ensayo descrito en la sección 3.2.4.

En la figura 39 se muestran los resultados de estos ensayos en un gráfico deformación vs ciclos a la rotura

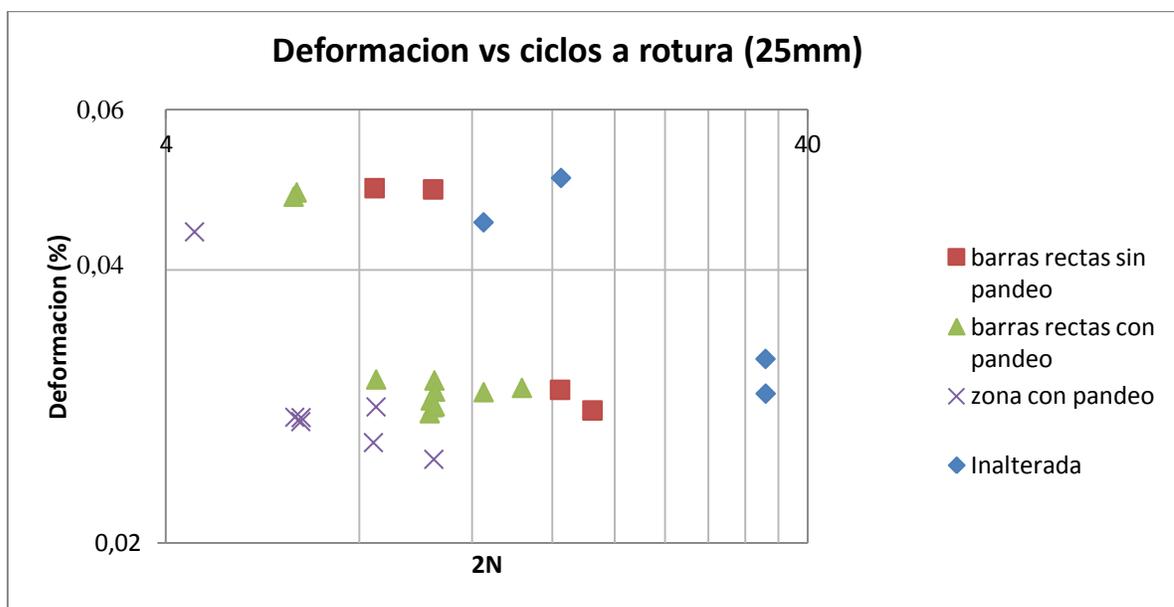


Figura 39: Resultados de ensayos en probetas de barras de diámetro 25 mm.

En la figura 39 se observa que las probetas que corresponden a una zona con pandeo tienen una menor cantidad de ciclos remanentes a la rotura, seguidas por las probetas rectas obtenidas de una

barra con daño en el tramo, seguidas por las probetas rectas obtenidas de una barra sin daño aparente y las probetas de la barra inalterada representan un estado sin daño por fatiga.

Desde la tabla 25 hasta la tabla 28 del Anexo C se muestran los valores correspondientes a la deformación y ciclos a la rotura de los ensayos de la figura 39.

3.2.6. Ensayos de tracción

La falla por tracción es definida de formas distintas dependiendo si el ensayo en tracción es para barras de diámetro 16 milímetros o para barras de diámetro 22 milímetros, principalmente porque para las primeras se obtienen mediciones de deformación principalmente por el uso de LVDTs, en cambio con las segundas principalmente con el proceso de imágenes.

Luego para una barra de diámetro 16 milímetros, la elongación máxima se obtiene a partir de la medición del LVDT corregida por rigidez inicial, al momento en que la carga cae abruptamente cuando la probeta falla. Para una barra de diámetro 22 milímetros, se obtiene la elongación máxima a partir de la imagen del momento en que la probeta falla, debido a que la velocidad del ensayo a tracción es de 20 mm/min, el valor obtenido en un ensayo sobre una probeta de 22 milímetros tiene un error de 1,67 milímetros ya que las imágenes se toman cada 5 segundos.

En la tabla 6 se muestran las deformaciones a la rotura de los ensayos de tracción realizados y la distancia del lugar en la barra donde se obtuvo la probeta hasta el daño observable en la barra, es necesario reiterar que no fue posible realizar este tipo de ensayos sobre barras de diámetro 25 milímetros y en algunas barras de diámetro 22 milímetros, según lo mencionado en la sección 3.2.1. ya que se excede la capacidad de 30 toneladas de las mordazas. La nomenclatura utilizada en las probetas es 'P(n° de barra de origen)rspT' o 'p(n° de barra de origen)rcpT' dependiendo si hay daño visible en la barra de origen, según lo mencionado en la sección 3.2.1. y 'D(diámetro)T(n°probeta)' para probetas de barras inalteradas.

Tabla 6: Deformación a la rotura en ensayos de tracción.

diámetro 16 [mm]	def. [%]	Distancia al daño [cm]	diámetro 22 [mm]	def. [%]	Distancia al daño [cm]
D16T1	0,163	-	D22T1	0,185	-
D16T2	0,188	-	P1rspT	0,2	-
D16T3	0,189	-	P2rcpT	0,218	59
P8rcpT	0,143	47	P21rcpT	0,206	118
P11rcpT	0,189	47	P23rcpT	0,261	177
P24rspT	0,203	-	P44rcpT	0,184	59
P25rspT	0,189	-	P49rspT	0,21	-
P26rspT	0,18	-			
P29rcpT	0,186	47			
P30rcpT	0,208	0			
P32rcpT	0,171	47			
P35rcpT	0,185	47			
P50rspT	0,19	-			

Se aprecia una disminución de la capacidad de elongación prácticamente en solo un caso que corresponde a la probeta P8rcpT, sin embargo en general no se observa una disminución notoria de éste parámetro.

En la sección siguiente se realiza el correspondiente análisis de éstos datos.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la sección 3.2.2. (véase desde tabla 17 a tabla 20 en Anexo C) se comparan con los resultados de ensayos sobre barras inalteradas de este trabajo y con los obtenidos por Hamasaki (2013) de ensayos de barras inalteradas de diámetro 16 milímetros y L/D igual a 20 (véase tabla 9 en Anexo C). En la figura 40 se muestra un gráfico deformación vs número de ciclos a la rotura de lo mencionado.

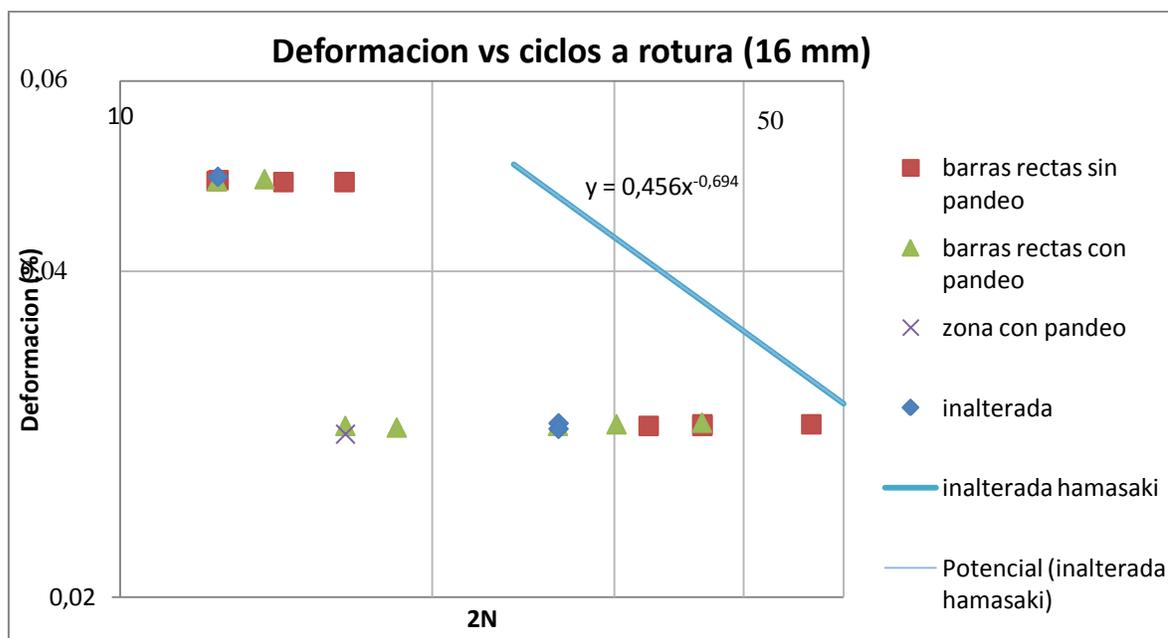


Figura 40: Comparación de ciclos a la rotura barras del edificio e inalteradas 16 mm.

Como se menciona anteriormente, los datos que corresponden a la barra inalterada obtenidos en este trabajo, a pesar de ser comparables con los resultados obtenidos por Brown y Kunnath (2004) como se presenta en la figura 29, no tiene sentido compararlos con el resto de los ensayos en probetas de este diámetro ya que muestran un comportamiento que no corresponde a una barra inalterada como se observa en la figura 30.

En la figura 41 se muestran las curvas de tendencia, las cuales se ajustan al modelo de Koh y Stephens (1991), sin considerar los ensayos sobre barra inalterada que no muestren un comportamiento consistente a un estado inalterado.

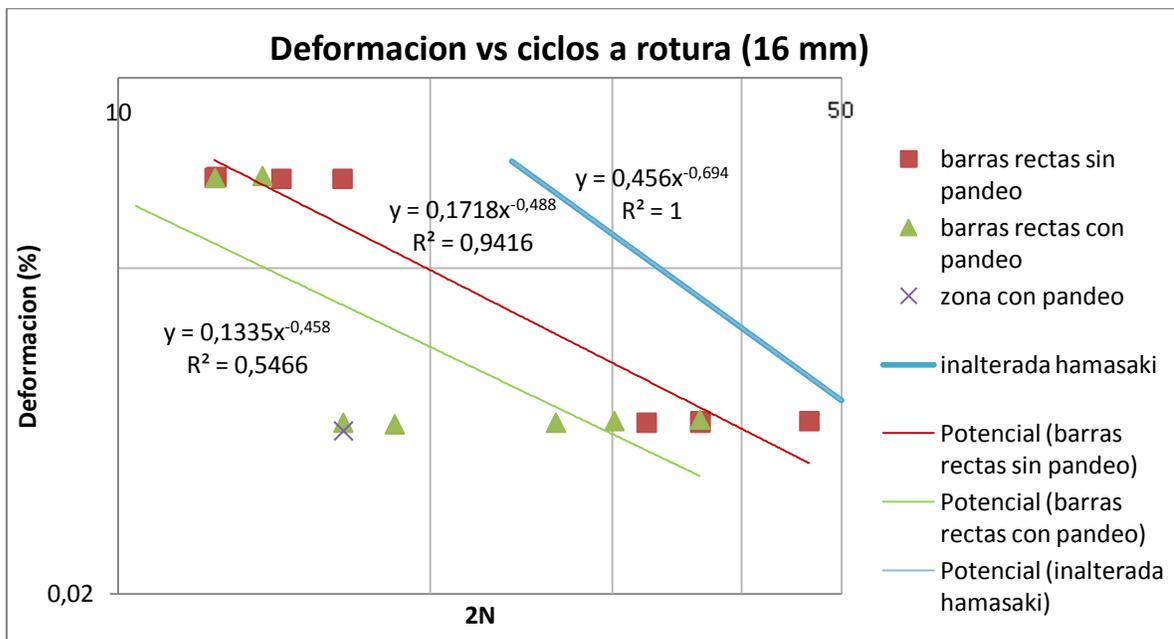


Figura 41: Líneas de tendencia barras del edificio e inalteradas 16 mm.

Se observa una pérdida máxima del orden de 68% de capacidad a la fatiga de una barra de refuerzo con daño que corresponde a 17 ciclos menos respecto al estado sin daño, debido al terremoto, siendo el caso más desfavorable el correspondiente a la probeta con pandeo.

Para las probetas obtenidas de una barra sin pandeo o daño en el tramo, la pérdida de capacidad es de un 36% a un 8% que corresponde de 9 a 2 ciclos menos respecto al estado sin daño.

Para las probetas obtenidas de una barra con pandeo o daño en el tramo, la pérdida de capacidad es de un 68% a un 28% que corresponde de 17 a 7 ciclos menos respecto al estado sin daño.

Algunas de las probetas ensayadas pueden provenir de barras que formen parte del ala del muro T del subterráneo que se encuentra en el eje A, entre los ejes 5 y 3a como se observa en la figura 9, si el sismo generó una flexión considerable en torno al alma de este muro, se explicaría la pérdida de capacidad a fatiga severa de algunas probetas. De hecho las diferencias entre las pérdidas de capacidad de las probetas para la misma amplitud de deformación, se explican por haber sido obtenidas de barras distintas, las cuales durante el terremoto no necesariamente fueron deformadas de igual forma.

En la figura 42 se muestran las curvas deformación vs ciclos a la rotura para los resultados de probetas de diámetro 22 mm obtenidos en la sección 3.2.3. (Véase desde tabla 21 hasta tabla 24 en Anexo C) y se comparan con los resultados obtenidos por Brown y Kunnath (2004) para probetas de diámetro 22,2 mm.

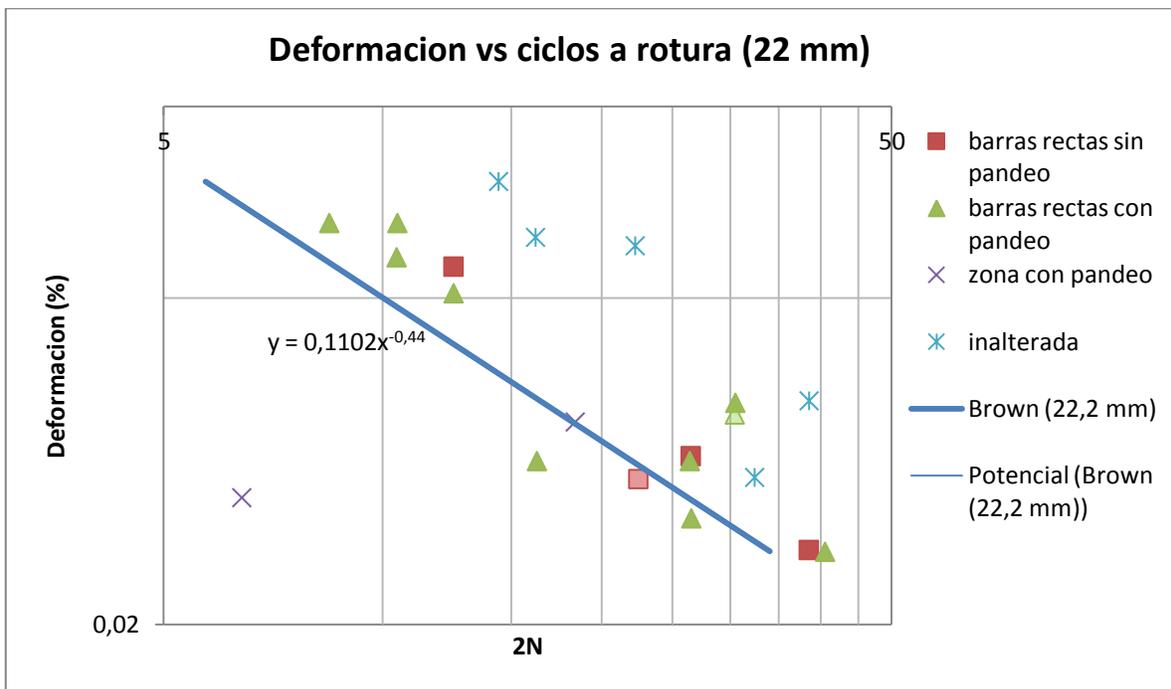


Figura 42: Comparación de ciclos a la rotura barras del edificio e inalteradas 22 mm.

Se observa que los datos corresponden a los resultados de Brown y Kunnath (2004), no tiene sentido compararlos con el resto de los ensayos en probetas de este diámetro ya que muestran un comportamiento que no corresponde a una barra inalterada.

En la figura 43 se muestran las curvas de tendencia, las cuales se ajustan al modelo de Koh y Stephens (1991), sin considerar los ensayos de Brown y Kunnath (2004).

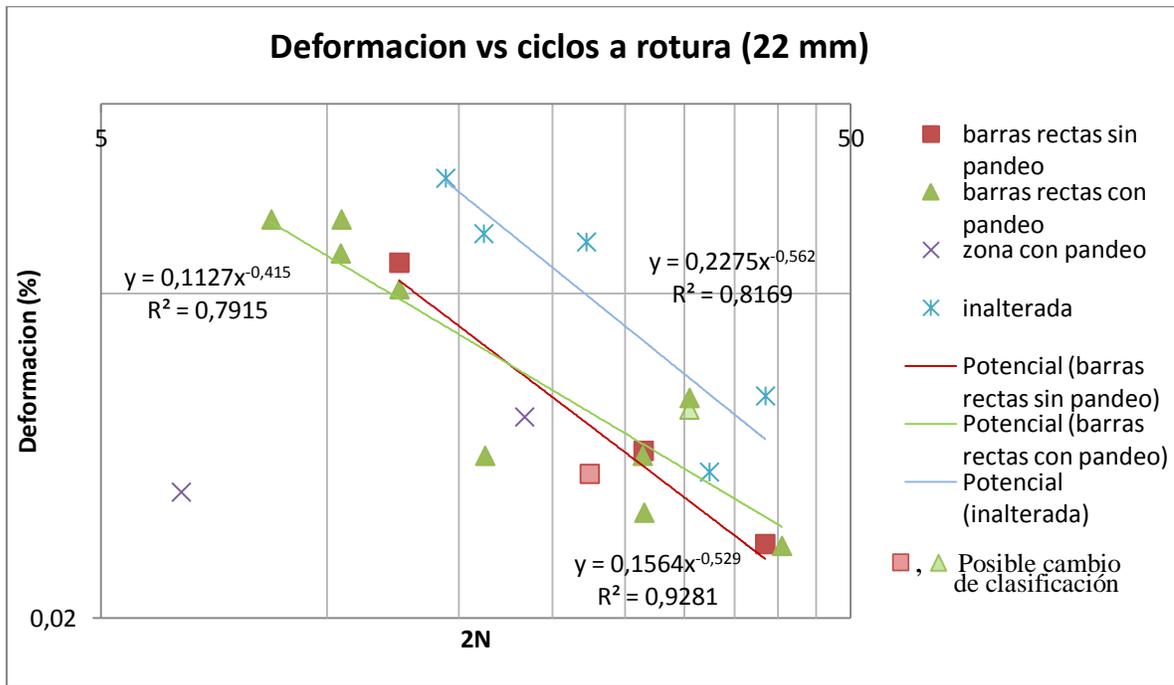


Figura 43: Líneas de tendencia barras del edificio e inalteradas 22 mm

Se observa una pérdida máxima del orden de 82% de capacidad a la fatiga de una barra de refuerzo con daño que corresponde a 14 ciclos menos respecto al estado sin daño, debido al terremoto, siendo el caso más desfavorable el correspondiente a una probeta con pandeo.

Para las probetas obtenidas de una barra sin pandeo o daño en el tramo, la pérdida de capacidad es hasta un 35% que corresponde a 6 ciclos menos respecto al estado sin daño.

Para las probetas obtenidas de una barra con pandeo o daño en el tramo, la pérdida de capacidad es hasta un 53% que corresponde a 9 ciclos menos respecto al estado sin daño.

Para las probetas que corresponden a la zona con pandeo en el tramo de una barra, la pérdida de capacidad es de un 82% hasta un 47%, que corresponde de 14 a 8 ciclos menos respecto al estado sin daño.

Es necesario mencionar que las amplitudes de deformación fueron obtenidas mediante el proceso de imágenes, luego estas son más precisas que las obtenidas para los ensayos en probetas de diámetro 16 milímetros.

No se aprecia una clara diferencia entre pérdida de capacidad para las probetas provenientes de una barra sin pandeo comparada con las provenientes de una barra con daño aparente. La variabilidad y la tendencia poco clara de la respuesta de las probetas rectas con pandeo, podría explicarse por haber sido obtenidas de barras que estuvieron ubicadas en distintos muros, por ejemplo pudieron haber sido obtenidas de una barra que estuvo localizada en el muro correspondiente al eje D en el subterráneo, entre los ejes 3A y 5; mientras que también otra

fuente de estas probetas podría ser la punta del alma de un muro T ubicada en el eje 5 en el subterráneo, y otra fuente podría ser la intersección del eje 3 con el eje B. Con esto las probetas que formaron parte del alma del muro T probablemente fueron sometidas a mayores deformaciones y estas corresponderían a los datos de probetas que sufrieron una mayor pérdida de capacidad.

Las diferencias entre las pérdidas de capacidad de las probetas para la misma amplitud de deformación, se explican por haber sido obtenidas de barras distintas, las cuales durante el terremoto no necesariamente fueron deformadas de igual forma, sobre todo considerando que dos de las fuentes de barras de este diámetro corresponden a ejes perpendiculares.

En la figura 44 se muestran las curvas deformación vs ciclos a la rotura para los resultados de probetas de diámetro 25 milímetros obtenidos en la sección 3.2.5. (Véase desde tabla 25 a tabla 28) y se comparan con los resultados obtenidos por Brown y Kunnath (2004) para probetas de diámetro 25,4 mm.

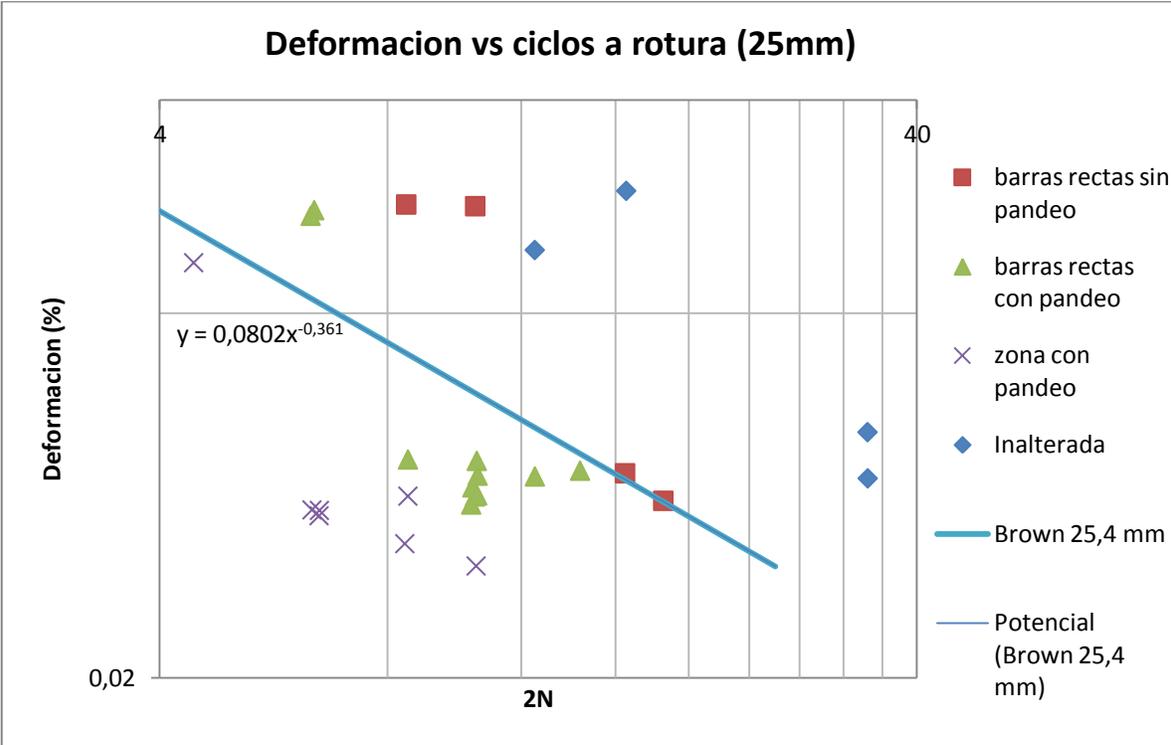


Figura 44: Comparación de ciclos a la rotura barras del edificio e inalteradas 25 mm

Se observa que los datos que corresponden a los resultados de Brown y Kunnath (2004), no tiene sentido compararlos con el resto de los ensayos en probetas de este diámetro ya que muestran un comportamiento que no corresponde a una barra inalterada.

En la figura 45 se muestran las curvas de tendencia, las cuales se ajustan al modelo de Koh y Stephens (1991), sin considerar los ensayos de Brown y Kunnath (2004).

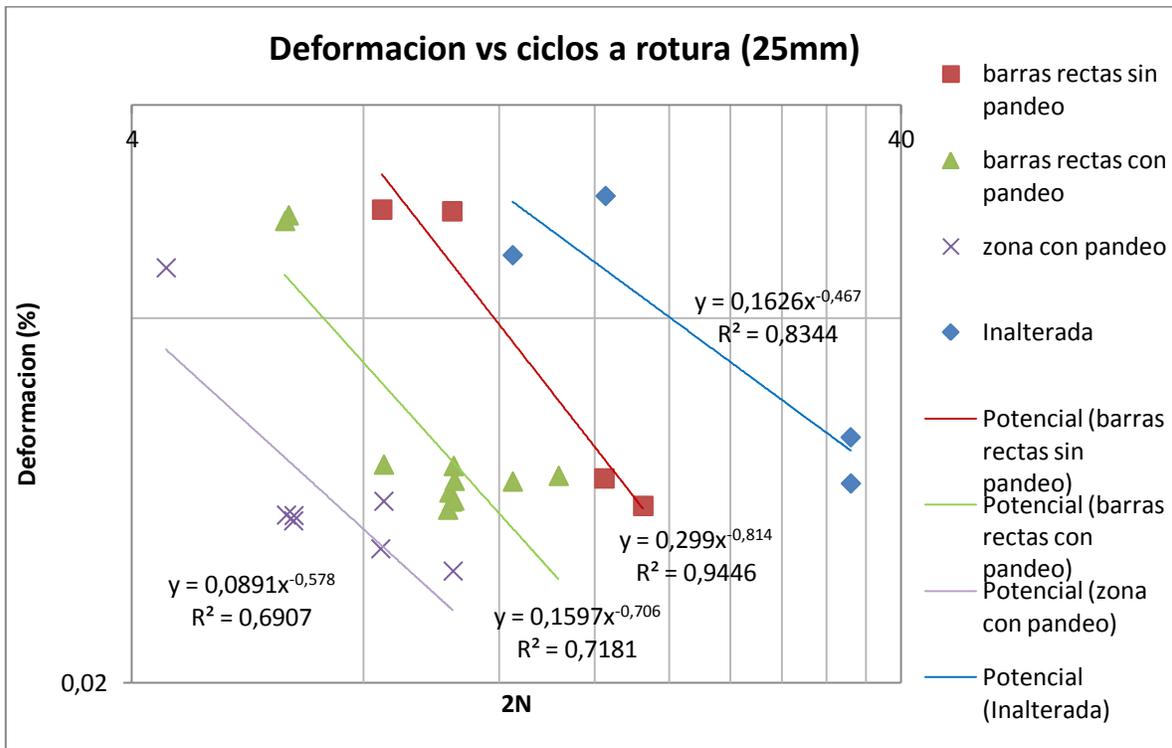


Figura 45: Líneas de tendencia barras del edificio e inalteradas 25 mm.

Se observa una pérdida máxima del orden de 82% de capacidad a la fatiga de una barra de refuerzo con daño que corresponde a 14 ciclos menos respecto al estado sin daño, debido al terremoto, siendo el caso más desfavorable el correspondiente a una probeta con pandeo.

Para las probetas obtenidas de una barra sin pandeo o daño en el tramo, la pérdida de capacidad es de un 53% a un 47% que corresponde de 9 a 8 ciclos menos respecto al estado sin daño.

Para las probetas obtenidas de una barra con pandeo o daño en el tramo, la pérdida de capacidad es de un 76% a un 58% que corresponde de 13 a 10 ciclos menos respecto al estado sin daño.

Para las probetas que corresponden a la zona con pandeo en el tramo de una barra, la pérdida de capacidad es de un 82% hasta un 71%, que corresponde de 14 a 12 ciclos menos respecto al estado sin daño.

En este caso la tendencia de pérdida de capacidad es notoria, una fuente de estas probetas puede corresponder al muro ubicado en el eje A, cruzado por el eje 10, como se muestra en la figura 9, el cual dada su geometría pudo haber experimentado deformaciones considerables en el eje A.

La evidente tendencia de los datos puede explicarse si es que gran parte de las probetas formaron parte de muros similares con daño o del mismo muro, al menos como se aprecia en la figura 9, hay 4 barras de diámetro 25 milímetros en cada punta del muro.

Se tiene a partir de los resultados expuestos, que para las amplitudes de deformación en estudio, la tendencia en general consiste en que las probetas con una zona con pandeo tienen menor número de ciclos remanentes a la rotura. Luego, en orden creciente de ciclos remanentes a la rotura siguen las probetas provenientes de una zona recta perteneciente a una barra con pandeo, seguidas por probetas rectas cuyo origen es una barra aparentemente recta, finalizando con las probetas provenientes de una barra inalterada.

La diferencia de pérdida de capacidad a fatiga observada entre probetas provenientes de una misma barra puede explicarse si se considera que la zona con pandeo es capaz de sufrir la concentración de la deformación del elemento completo, entonces este caso en la práctica es análogo a que las probetas provenientes de una zona con pandeo sufrieran deformaciones mayores que las probetas obtenidas de la vecindad al daño visible.

Una observación importante relacionada al daño que posee una probeta, es el hecho de que se puede apreciar en los gráficos tensión-deformación de algunos los ensayos (ver Anexo D) que existe una disminución o inexistencia del tramo correspondiente al de tensión constante de fluencia (figura 92 en Anexo D como ejemplo), esto puede ser un buen primer indicador de la magnitud del daño, ya que significa que la probeta ensayada sufrió al menos una deformación considerable en tracción.

Para complementar lo anterior y utilizando las curvas tensión-deformación del Anexo D, incluyendo las corregidas mediante el proceso de imágenes para probetas de diámetro 22 y 25 mm. se obtiene la energía disipada hasta la rotura por cada probeta, para esto es necesario integrar numéricamente el área delimitada por las curvas utilizando la regla del trapecio, según lo propuesto por Hawileh et al.(2010).

En las figuras 46, 47 y 48 se muestran los gráficos de energía a la rotura vs deformación unitaria para cada diámetro. Los valores de las figuras se muestran desde la tabla desde la tabla 29 a la tabla 40 del Anexo C.

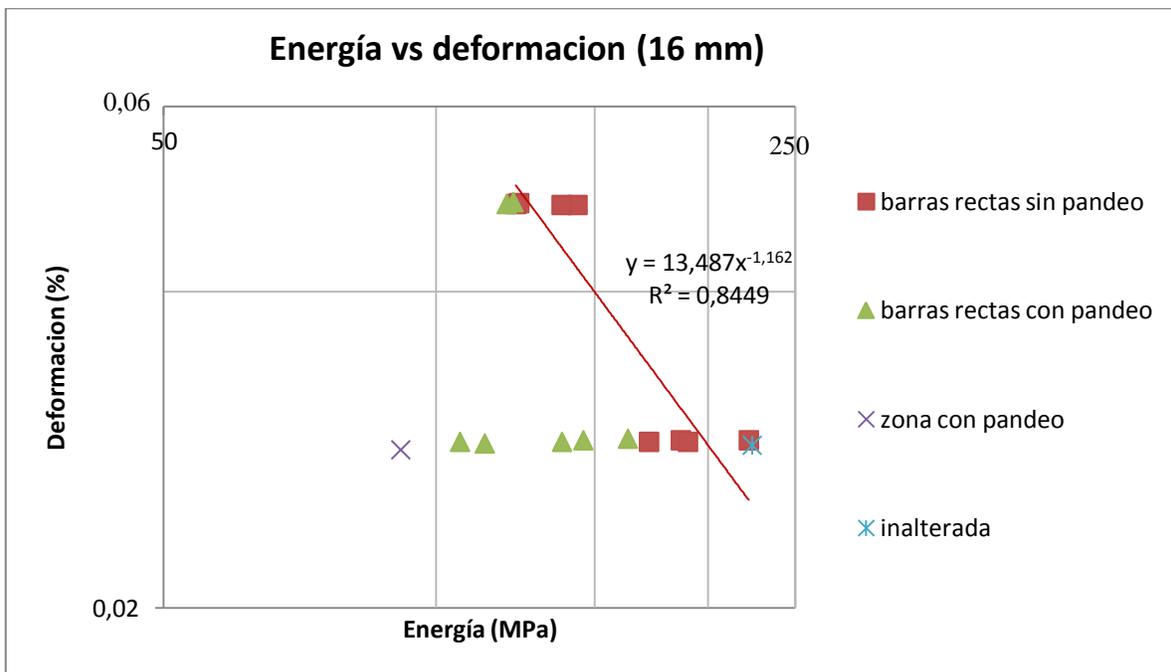


Figura 46: Comparación de energía a la rotura barras del edificio e inalteradas 16 mm.

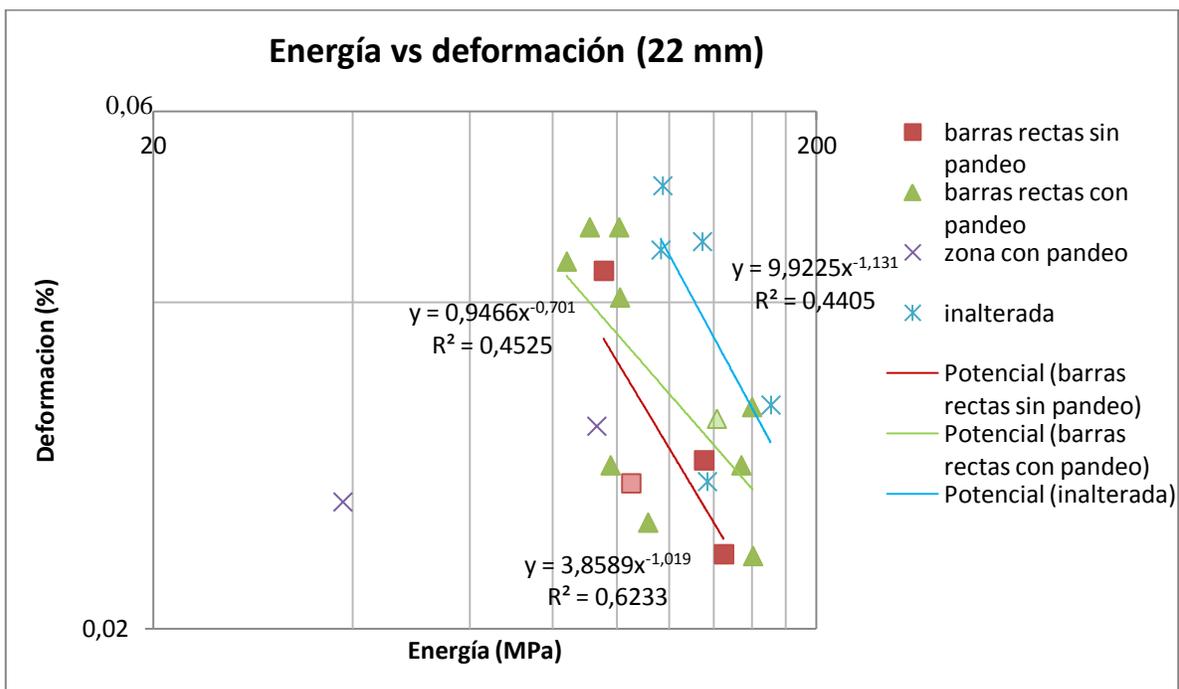


Figura 47: Comparación de energía a la rotura barras del edificio e inalteradas 22 mm.

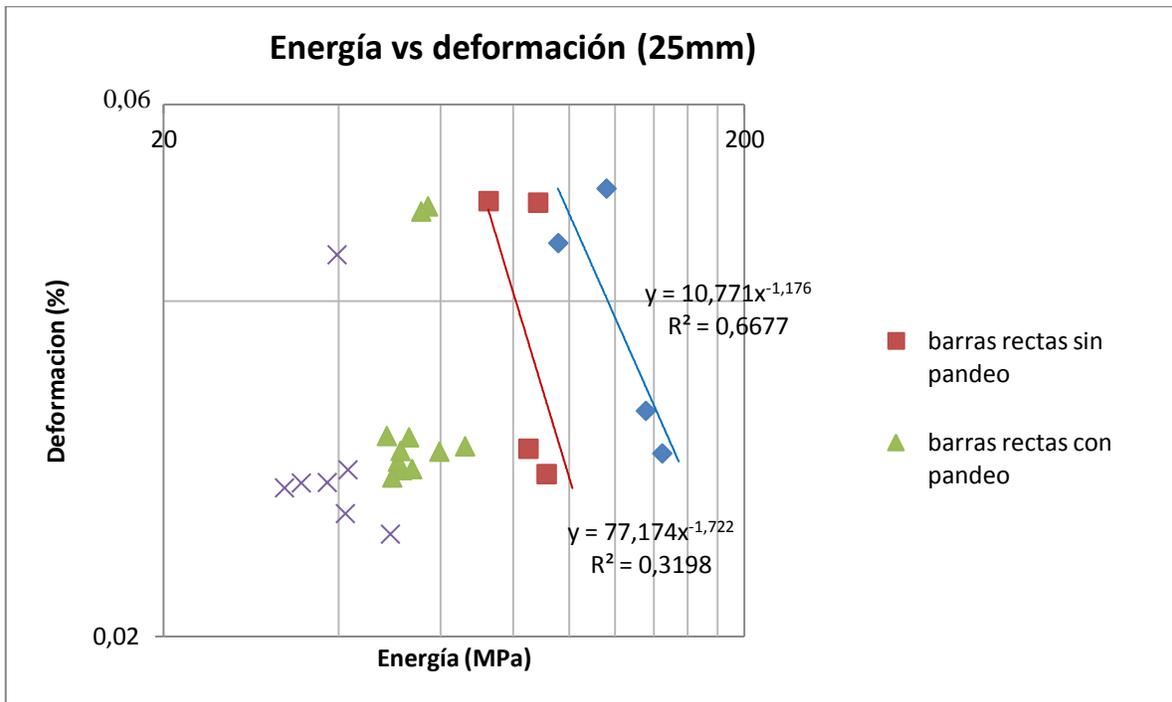


Figura 48: Comparación de energía a la rotura barras del edificio e inalteradas 25 mm.

Se observa que la tendencia de los datos es similar a la mostrada anteriormente en las figuras 41, 43 y 45 de ciclos a la rotura vs deformación, respecto a que las probetas con pandeo disipan menor energía, seguidas por las probetas rectas provenientes de una barra con pandeo, seguidas por las probetas rectas provenientes de una barra recta, finalizando con las probetas de barra inalterada que disipan una mayor cantidad de energía.

Se aprecia también que los factores de correlación R^2 obtenidos en los gráficos de energía vs deformación son menores a los obtenidos en los gráficos ciclos a la rotura vs deformación. Esto quiere decir que los datos obtenidos por el modelo de daño basado en energía mostrado en la expresión (6), son menos confiables que los obtenidos por el modelo de daño basado en ciclos a la rotura mostrado en la expresión (1), el mismo efecto en el factor de correlación se observó en el trabajo de Brown y Kunnath (2004).

Además de diferencias en el factor de correlación, el parámetro de los modelos mencionados que corresponde a la pendiente de las curvas de tendencia es mayor (de 0,286 a 1,7 unidades mayor) en los gráficos de energía vs deformación, llegando a ser una curva vertical en algunos casos de las figuras 46 y 48. Esta diferencia también se observa en el trabajo de Brown y Kunnath (2004) sin embargo ahí, la diferencia es del orden de un valor de 0,2.

Lo mencionado en el párrafo anterior con respecto a la pendiente se podría explicar por la diferencia entre la relación de aspecto (L/D) igual a 6 utilizada en los ensayos de Brown y Kunnath (2004) e igual a 20 en este trabajo de título, es posible que la energía disipada sea menos dependiente a la deformación que los ciclos a la rotura al aumentar la relación L/D.

Por otro lado se grafica el porcentaje de la tensión máxima a compresión en cada ciclo respecto a la tensión máxima a compresión registrada durante el primer ciclo, para cada diámetro de probetas: una probeta proveniente de una zona con pandeo y una probeta cuyo origen es una barra inalterada. En las figuras 49, 50 y 51 se muestra lo mencionado.

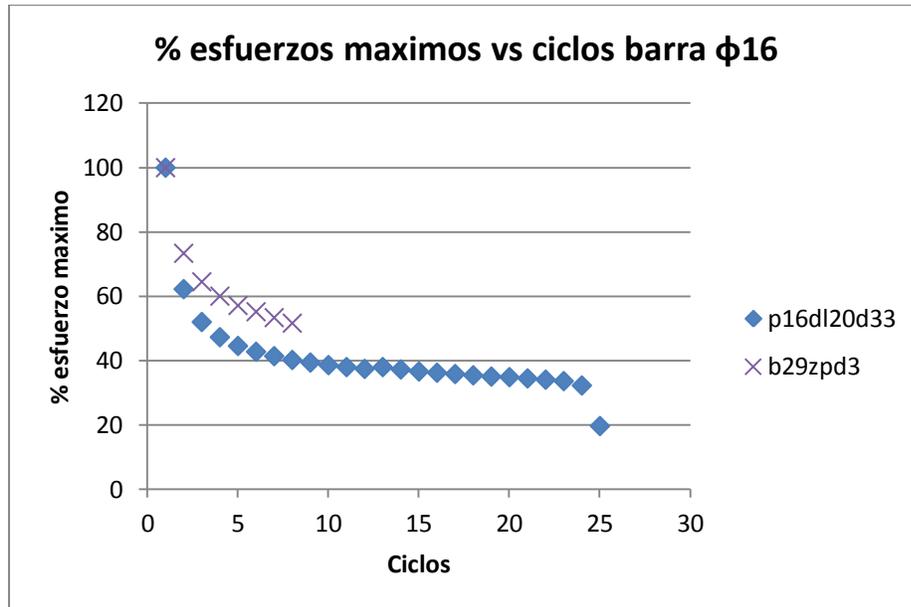


Figura 49: Porcentajes de esfuerzos máximos de compresión por ciclo barra 16 mm.

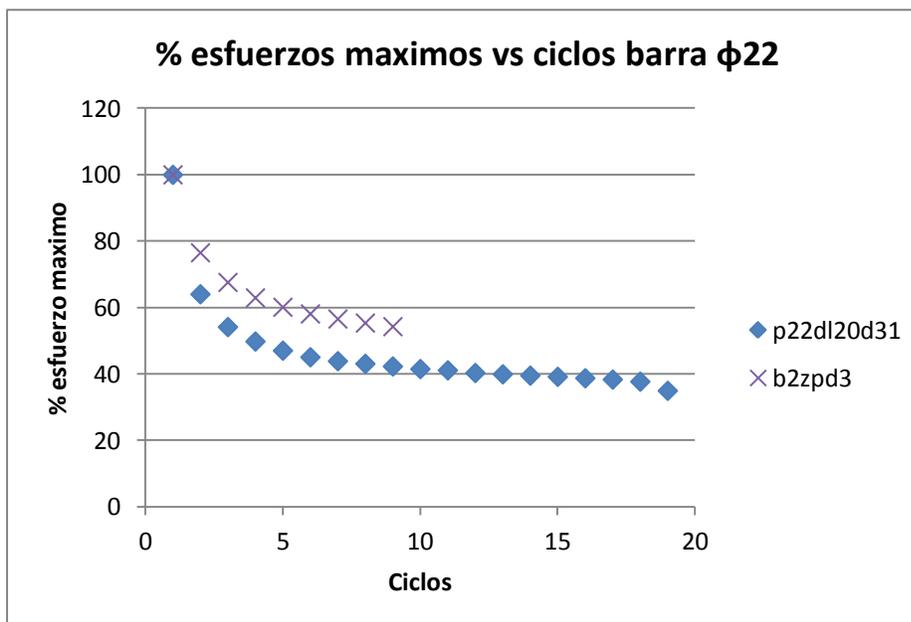


Figura 50: Porcentajes de esfuerzos máximos de compresión por ciclo barra 22 mm.

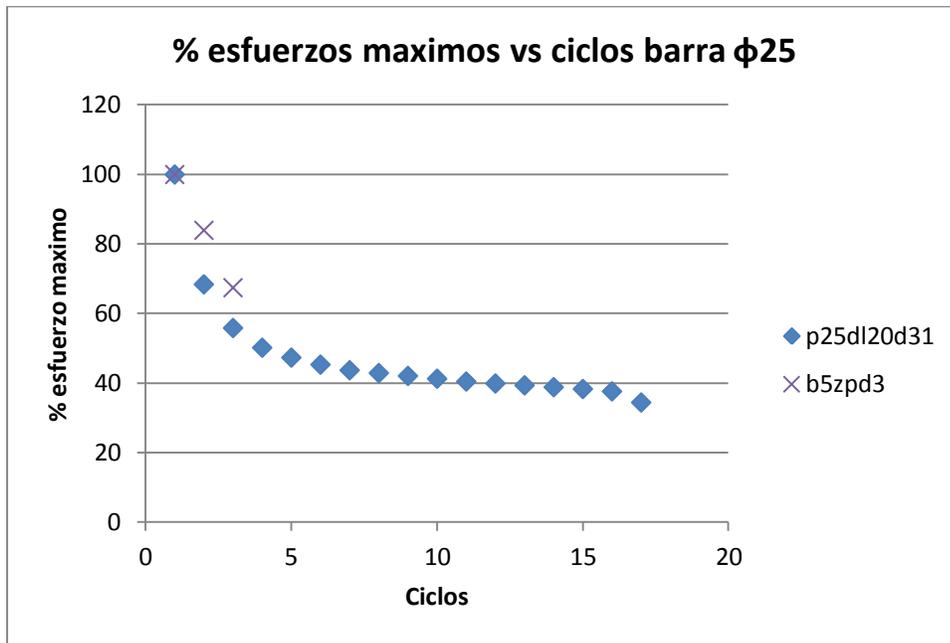


Figura 51: Porcentajes de esfuerzos máximos de compresión por ciclo barra 25 mm

Se observa una notoria disminución de la diferencia de tensión máxima entre el primer y segundo ciclo para una probeta con pandeo, esto indicaría que la barra de origen ha sufrido daño considerable por pandeo. Dado esto es necesario saber si es una tendencia general en todos los ensayos, luego se grafica el porcentaje de la tensión máxima en compresión del segundo ciclo con respecto al primero para todos los ensayos. En las figuras 52, 53 y 54 se muestra lo mencionado.

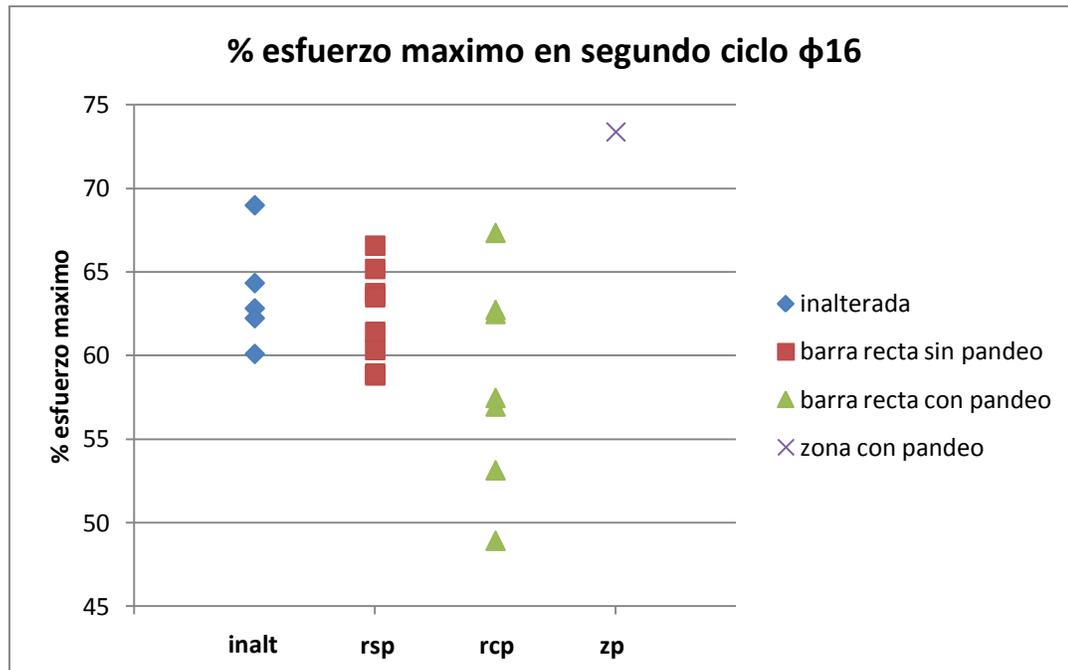


Figura 52: Porcentaje de esfuerzo máximo de compresión segundo ciclo barras 16 mm

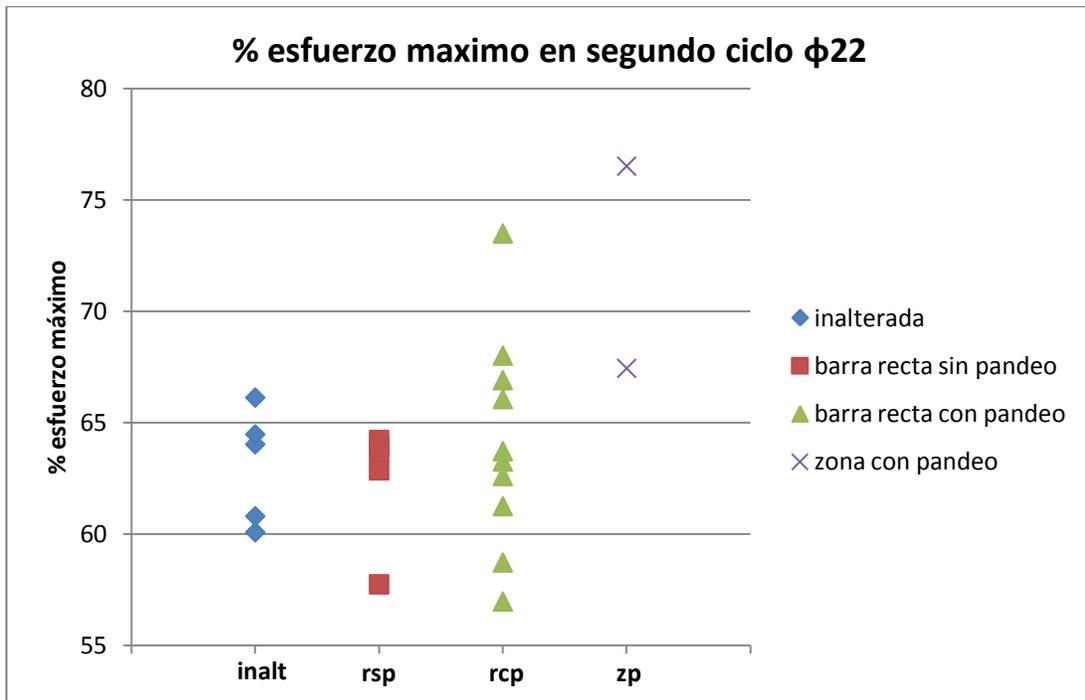


Figura 53: Porcentaje de esfuerzo máximo de compresión segundo ciclo barras 22 mm.

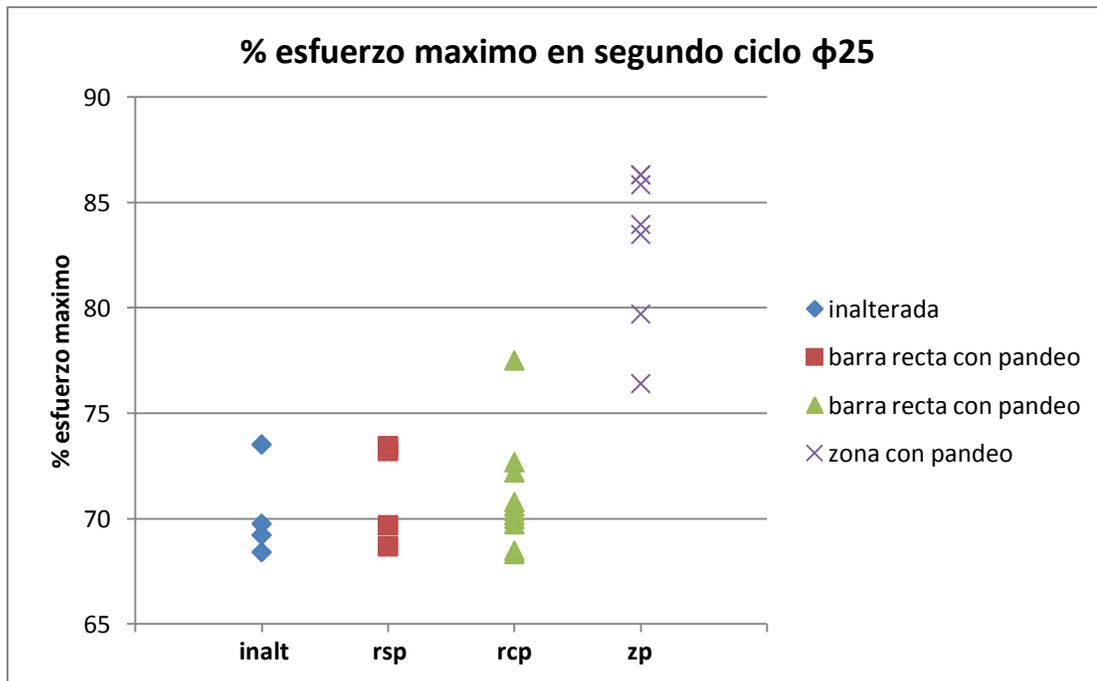


Figura 54: Porcentaje de esfuerzo máximo de compresión segundo ciclo barras 25 mm.

En las figuras 52, 53 y 54 se observa que la tendencia general es una disminución de la diferencia de tensión máxima entre el primer y segundo ciclo para las probetas con pandeo, siendo notorio en el caso de las barras de mayor diámetro. Esto indica que las barras de origen han sufrido daño considerable por pandeo y pareciera que el daño es más severo a medida que el diámetro de las barras sea mayor.

Finalmente respecto a los ensayos de tracción, dado que una probeta obtenida de una barra que no posee daño visible tiene una elongación máxima similar a la de una obtenida de una barra inalterada acorde a los valores de la tabla 6, se supone que el promedio de los valores obtenidos entre estos tipos de probetas corresponde a un valor referencial de la elongación para una barra sin daño.

En las figuras 55 y 56 se muestran los datos de elongación máxima para las probetas obtenidas de barras con daño en el tramo y una línea horizontal que corresponde al valor asociado a la deformación máxima en condición sin daño.

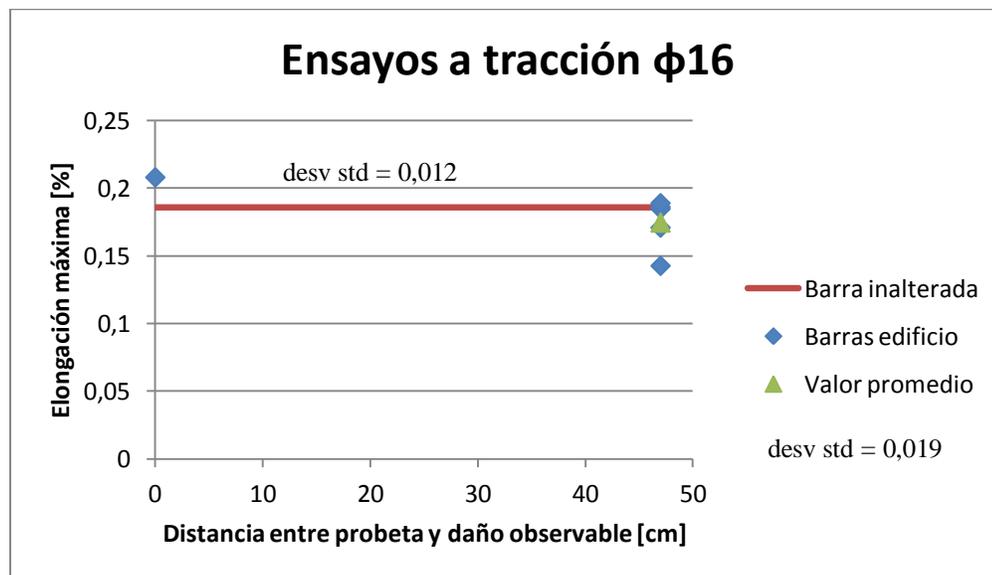


Figura 55: Tracción en barras de diámetro 16.

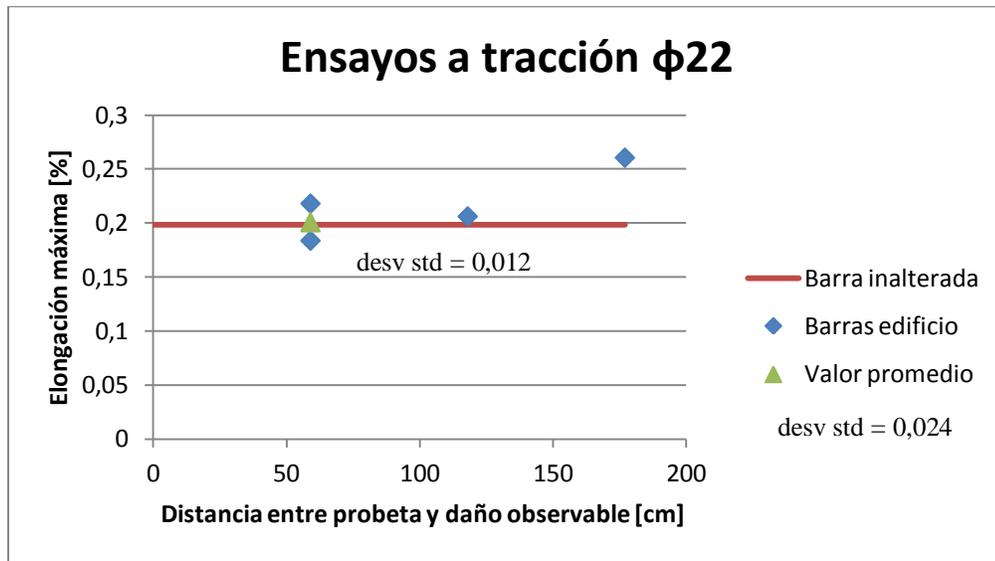


Figura 56: Tracción en barras de diámetro 22.

Las dos desviaciones estándar mostradas en cada caso, corresponden a los datos de los ensayos considerados como referenciales al estado sin daño y a los datos de ensayos a una misma distancia del daño apreciable. También en cada caso se muestra la media de datos que correspondan a deformación máxima de probetas ubicadas a una misma distancia del daño.

Los datos de deformación no muestran una pérdida de capacidad de elongación notoria en general, excepto para dos probetas de diámetro 16 milímetros ubicadas a 47 centímetros del daño observable, luego esto indicaría que el daño por pandeo o fractura en una barra de refuerzo se manifiesta menos o no se manifiesta a partir de cierta distancia al tramo dañado en la barra.

5. CONCLUSIONES

Luego del terremoto de febrero del 2010 y consiguientes daños que éste causó en varias estructuras, es necesario analizar las causas de las falencias en elementos estructurales durante un evento sísmico considerable y evitar que éstas se repliquen en el futuro. Para ello en éste trabajo se estudia un modo de falla recurrente en elementos de hormigón armado, que consiste en la fatiga del refuerzo de acero por bajo número de ciclos causado principalmente por la exposición de las barras de refuerzo a la acción sísmica, por el previo descascaramiento del hormigón que las recubre debido a esfuerzos de compresión elevados durante el terremoto, causando que éstas se pandeen o se fracturen.

Dado lo anterior, se estudian experimentalmente barras de refuerzo de diámetros 16, 22 y 25 milímetros que correspondían a muros dañados de un edificio durante el terremoto de febrero del año 2010 y que muestran en general daño por pandeo o fractura. El estudio consiste principalmente en realizar ensayos a cargas cíclicas con amplitudes constantes del 3% y 5% de deformación unitaria en probetas obtenidas de estas barras, las probetas se ensayan teniendo una relación $L/D = 20$ para inducir el pandeo. Éstas se obtienen principalmente de zonas con pandeo y de zonas rectas dentro de las barras de refuerzo. Con los datos obtenidos se busca establecer si existe pérdida de capacidad a la fatiga en las probetas provenientes de las barras del edificio, para ello es necesario establecer cuál es el estado sin daño de una barra, por lo que en el análisis también se incluyen ensayos sobre probetas de barras inalteradas. El método de medición de las amplitudes de deformación durante un ensayo fue siendo mejorado, comenzando por obtener las deformaciones mediante el uso de LVDT y utilizando como parámetro de corrección el módulo de elasticidad de la probeta en probetas de diámetro 16 milímetros, luego se incorpora una cámara de alta resolución para los ensayos de probetas de diámetro 22 y 25 milímetros, y con ella se obtienen las amplitudes de deformación de una forma más precisa mediante el proceso de imágenes.

Luego de realizados los ensayos mencionados se observa que el comportamiento a cargas cíclicas reflejado en los gráficos obtenidos de tensión-deformación son consistentes con los trabajos de Brown y Kunnath (2004), en el cual se ve que el número de ciclos a la fatiga es menor a 1000 para grandes deformaciones; y con los de Rodríguez (1999), en el cual se observa que el pandeo tiende a originarse luego de una reversa en el ciclo de carga desde tracción a compresión, lo cual es más probable de presentarse mientras mayor sea la amplitud de deformación por tracción acorde a lo estudiado por Moyer y Kowalsky (2003). Se observa también una degradación de la resistencia notoria en el valor máximo de la carga axial en compresión a causa del pandeo, lo cual es consistente con los trabajos de Monti y Nuti (1992) y Hamasaki (2013).

Al comparar los ensayos efectuados para probetas obtenidas de una misma barra de refuerzo dañada, se observa que los ciclos para alcanzar la rotura en general son menos para las zonas que presentan pandeo con respecto a las zonas aparentemente rectas, y se aprecia que para ambas zonas se tienen menos ciclos a la rotura con respecto a las barras inalteradas. Esto puede

explicarse si es que el daño es localizado en la zona donde existe pandeo, lo cual implicaría que el daño se reduce paulatinamente a medida que se aleja del tramo dañado. Por otro lado la diferencia de la pérdida de capacidad resistente a la fatiga entre barras distintas de un mismo diámetro depende de la ubicación donde éstas se encontraban, o sea que es esperable que una proveniente de un muro con características geométricas más desfavorables y que haya sufrido mayores deformaciones, sea susceptible a sufrir un mayor daño.

A partir de lo mencionado en el párrafo anterior, se estima que en el caso hipotético de que el terremoto hubiese causado un mayor número de ciclos de aceleración de suelo, el daño global de la estructura hubiese sido mayor ya que la capacidad a fatiga restante de algunas probetas se encontraban del orden de 2 a 4 ciclos, además que cuatro probetas de diámetro 22 milímetros correspondientes a una zona con pandeo fallaron durante el estirado de estas, o sea que la capacidad remanente de éstas era prácticamente nula. Con esto es posible que una mayor cantidad de elementos hubiese fallado o en el peor de los casos se haya tenido un colapso.

Para complementar lo anterior se comparó también la energía disipada por las probetas, obteniendo una tendencia de pérdida de capacidad en las probetas similar a la obtenida a partir del número de ciclos a la rotura. En estos resultados se observó que aparentemente la energía es menos sensible al aumento de la deformación si es que existe pandeo, por lo que es posible que la incidencia del pandeo sea conveniente caracterizarla mediante un modelo de energía en vez de un modelo basado en ciclos y deformación.

Se observó también que las probetas de mayor diámetro aparentemente son más susceptibles a sufrir daño por pandeo, al comparar los valores de carga máxima en compresión del primer y segundo ciclo de deformaciones.

Por otro lado según los ensayos de tracción aparentemente no existiría daño apreciable a partir de cierta distancia de una zona con pandeo o fractura dentro de un tramo en una barra de refuerzo, lo cual reforzaría la hipótesis de que el daño en un tramo dentro de una barra de refuerzo es menor mientras se encuentre más alejado de un tramo con daño visible.

Una forma para evitar el modo de falla estudiado sería disminuir el desplazamiento de techo y con ello disminuir las deformaciones de los elementos de forma que no haya ciclos de deformación con una deformación excesiva, sin embargo esto puede no ser trivial ni recomendable ya que se estaría limitando la disipación de energía mediante deformaciones durante un evento sísmico.

Otra forma aparentemente sería evitar el uso de barras con diámetros mayores a 25 milímetros por una posible mayor susceptibilidad a sufrir daño por pandeo, y además es posible que la menor capacidad remanente a la fatiga de las barras de 25 milímetros comparadas con las de 16 y 22 milímetros sea consecuencia de un mayor diámetro y con esto una tendencia a formar una grieta en la sección de forma más fácil. Además según los estudios de Brown y Kunnath (2004) efectivamente existe una disminución de la capacidad a fatiga a medida que se aumenta el diámetro para grandes deformaciones. Esta arista es recomendable que sea estudiada en el futuro

mediante ensayos cíclicos sobre barras de diámetros elevados que se usen en la actualidad en el país.

Con todo lo mencionado anteriormente es importante respetar la separación máxima entre estribos con tal de mantener una magnitud de carga crítica de pandeo aceptable, con ello evitar que se gatille el pandeo y con éste una disminución a la capacidad de carga en compresión y una concentración de deformaciones en la zona donde ocurre.

Finalmente es necesario contar con un montaje experimental que cuente con equipos tales como sensores ópticos y un posible uso de fotogrametría que sean capaces de medir las deformaciones lo más reales posibles en barras para futuros ensayos, considerando que es posible que existan fenómenos tales como penetración de deformaciones y deslizamiento de mayor incidencia si es que se propone realizar ensayos sobre barras de un diámetro mayor a 25 mm.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar, A. “Estudio experimental del comportamiento dinámico de un edificio de Viña del Mar dañado durante el terremoto 27/02/2010”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2012.
2. Bonelli, P. “Catastro de daños estructurales Edificio Rio Petrohue”. [diapositivas de PowerPoint], 2010.
3. Brown, J. Fatigue Characteristics of Reinforcing Bars under Simulated Seismic Loading. MS thesis, University of Central Florida, 1998.
4. 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.
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. Hamasaki, B. “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.
7. Hawileh, R., Rahman, A. y Tabatabai, H. Evaluation of the Low Cycle Fatigue Life in ASTM A706 and A615 Grade 60 Steel Reinforcing Bars. Journal of Materials in Civil Engineering, V. 22, No. 1, 2010, pp. 65 – 76.
8. 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.
9. Mander, J.B., Panthaki, F.D. y Kasalanati, A. Low Cycle Fatigue Behavior of Reinforcing Steel. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 6, No. 4, 1994, pp. 453 – 468.
10. Massone, L. y Moroder, D. Buckling modeling of reinforcing bars with imperfections. Engineering Structures, V. 31, No. 3, 2009, pp. 758 – 767.
11. 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.

12. 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.
13. Moyer, M.J. y Kowalsky, M.J. Influence of Tension Strain on Buckling of Reinforcement in Concrete Columns. *ACI Structural Journal*, V. 100, No. 1, 2003, pp. 75 – 85.
14. Rodriguez, M.E., Botero, J.C. y Villa, J. Cyclic Stress Strain Behavior of Reinforcing Steel Including Effect of Buckling. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 125, No. 6, 1999, pp. 605 – 612.

7. ANEXOS

7.1. ANEXO A: Levantamiento de daños estructurales.

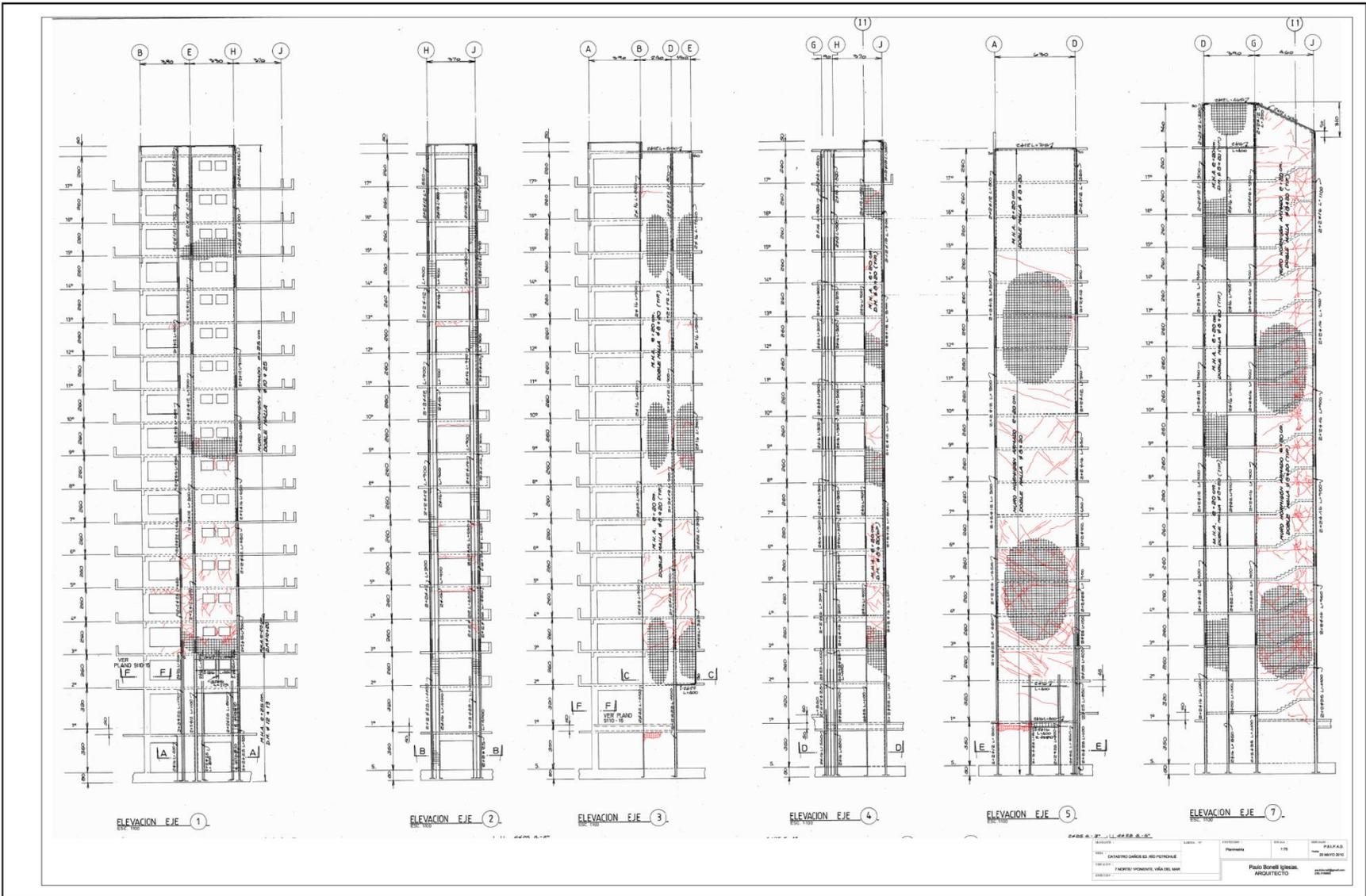


Figura 57: Elevaciones ejes 1 a 5 y 7, Bonelli (2010).

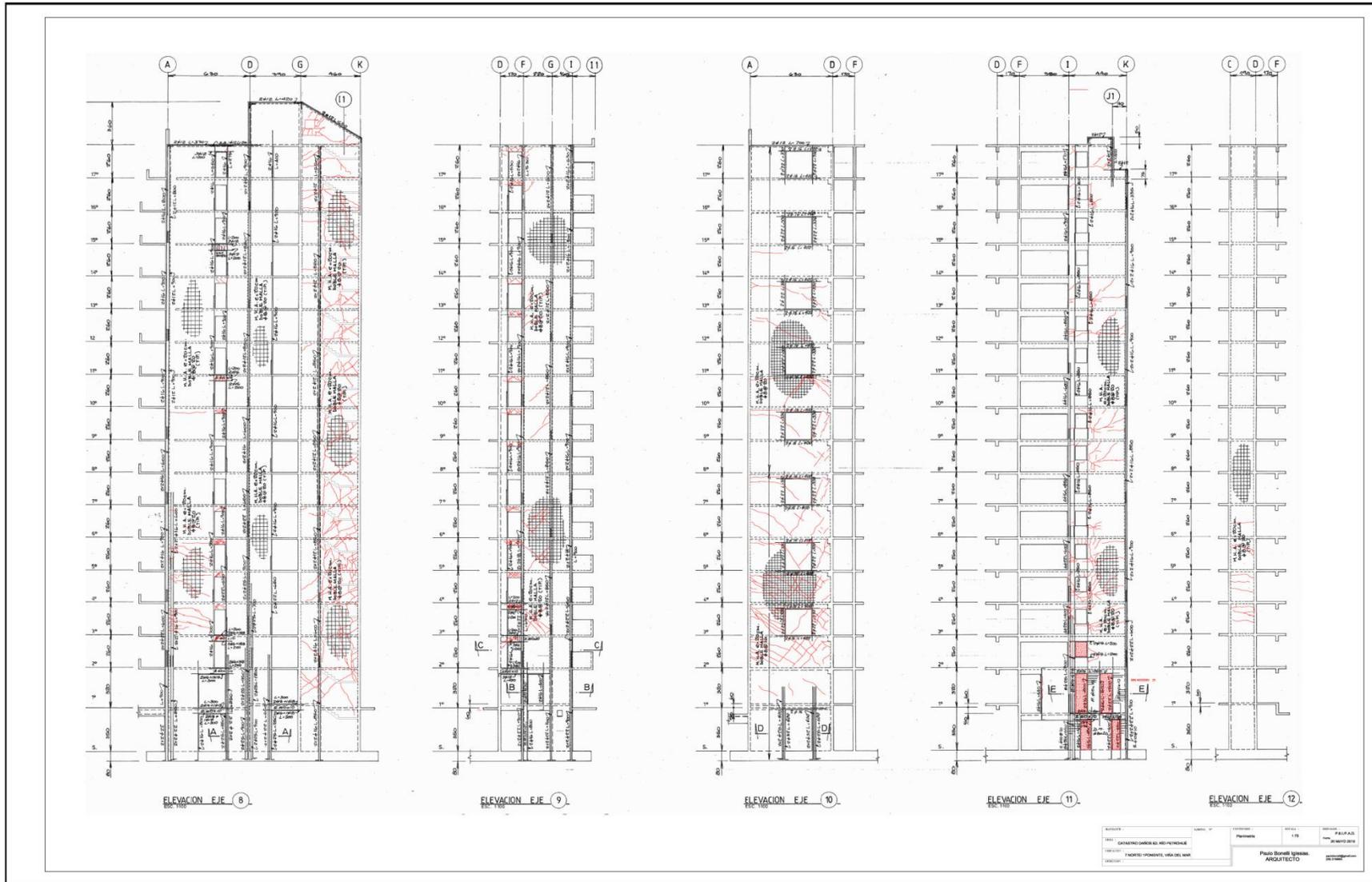


Figura 58: Elevaciones ejes 8 a 12, Bonelli (2010).

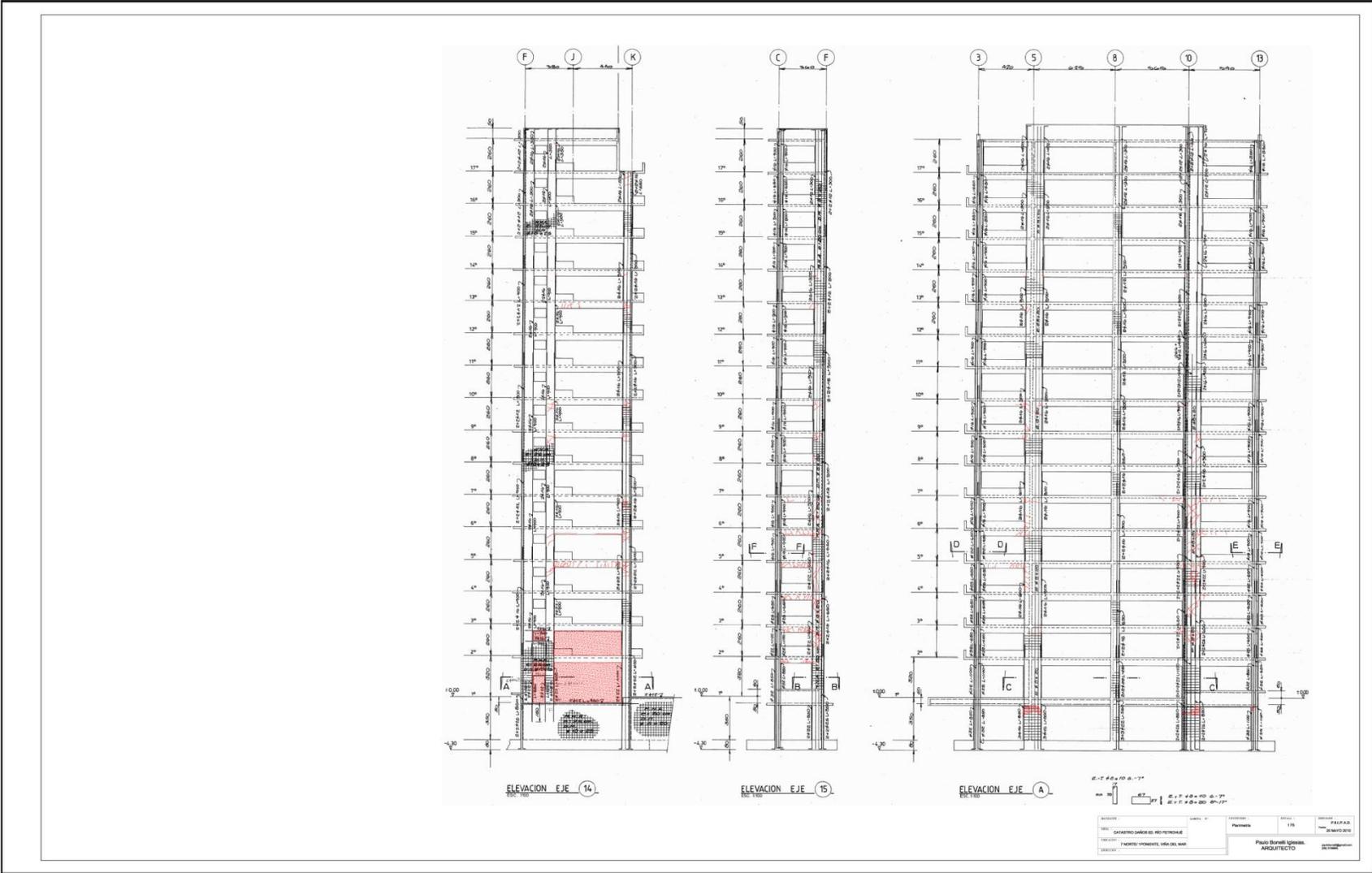


Figura 59: Elevaciones ejes 14, 15 y A, Bonelli (2010).

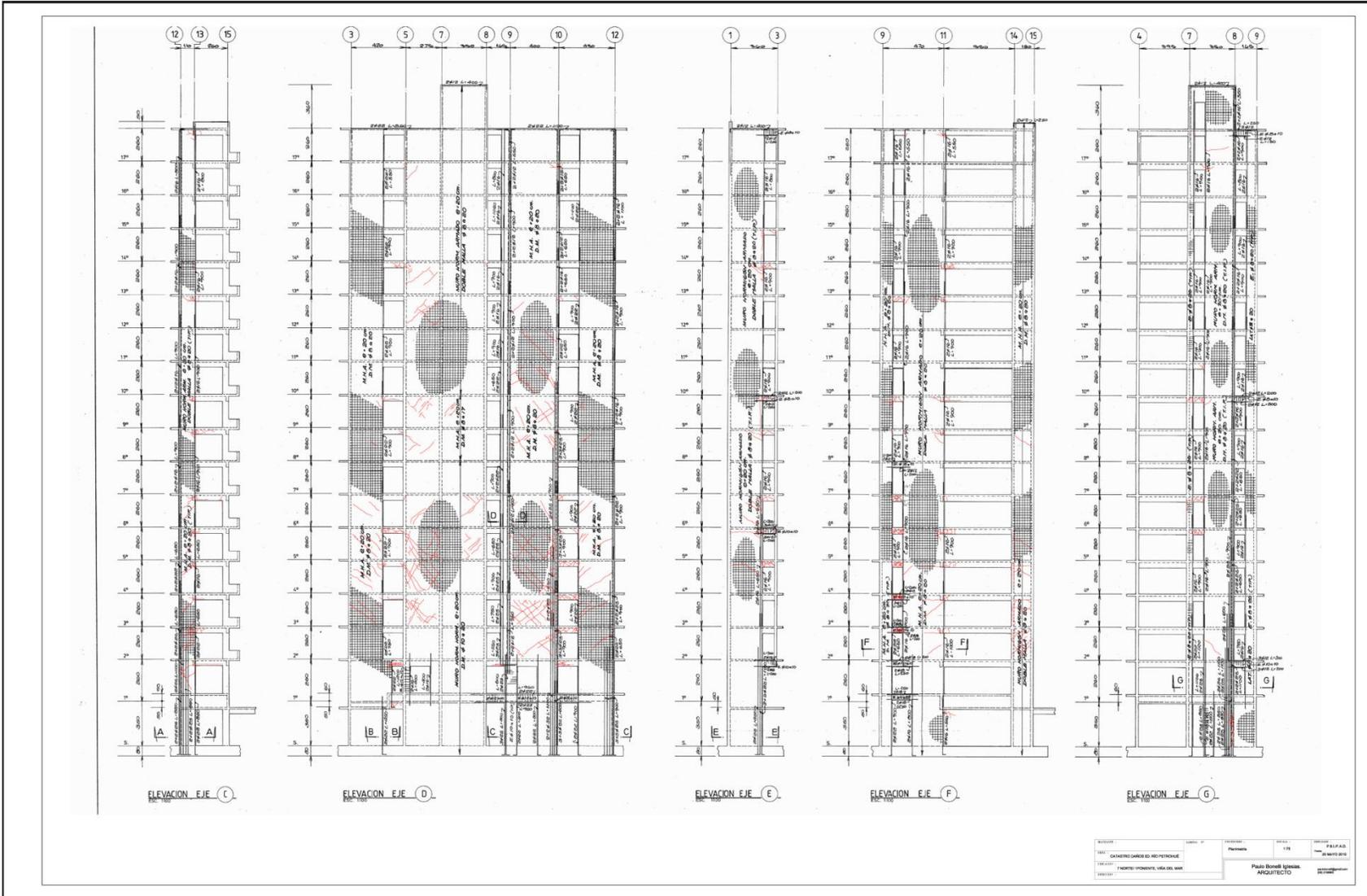


Figura 60: Elevaciones ejes C a G, Bonelli (2010).

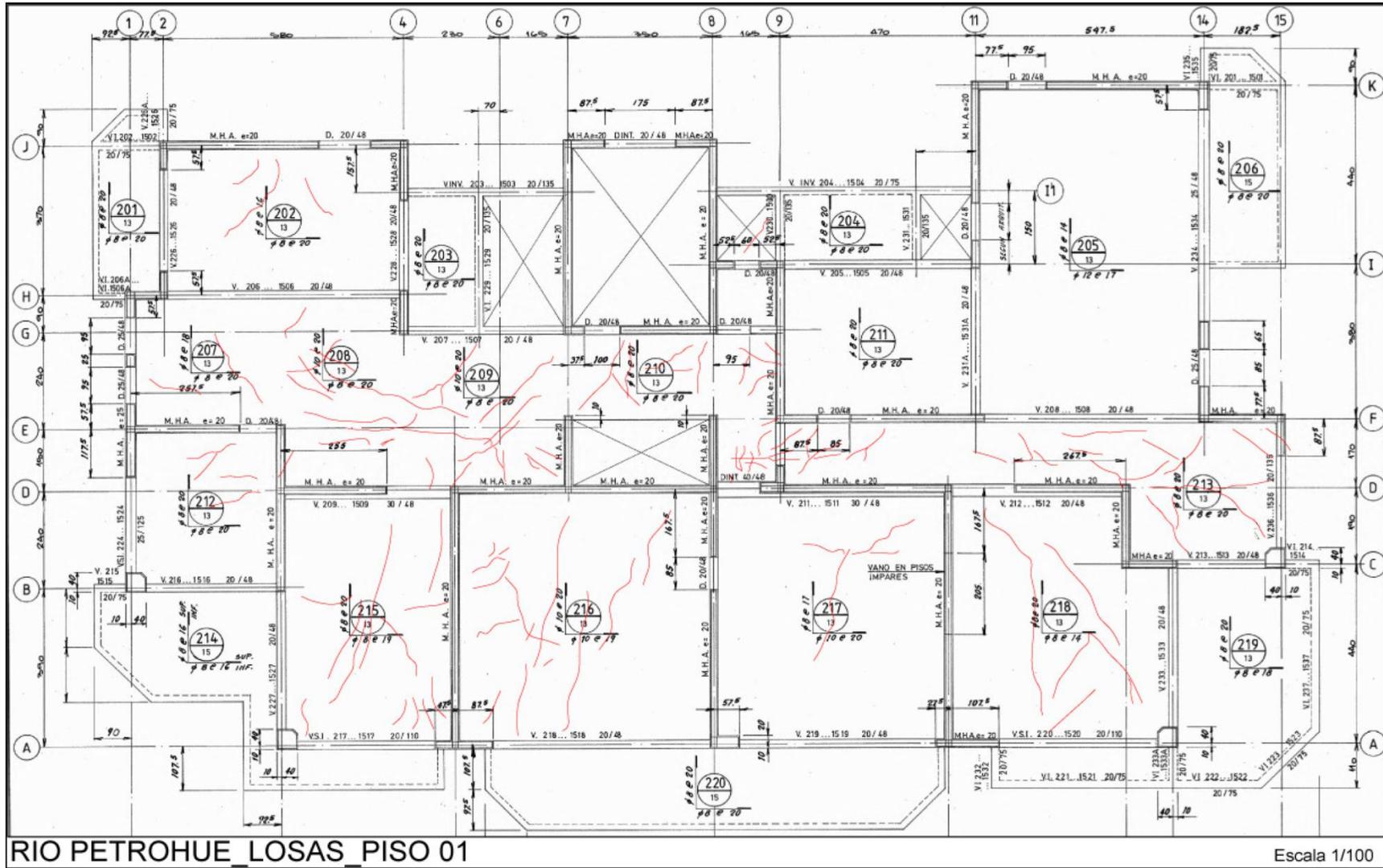


Figura 62: Planta piso 1, Bonelli (2010).

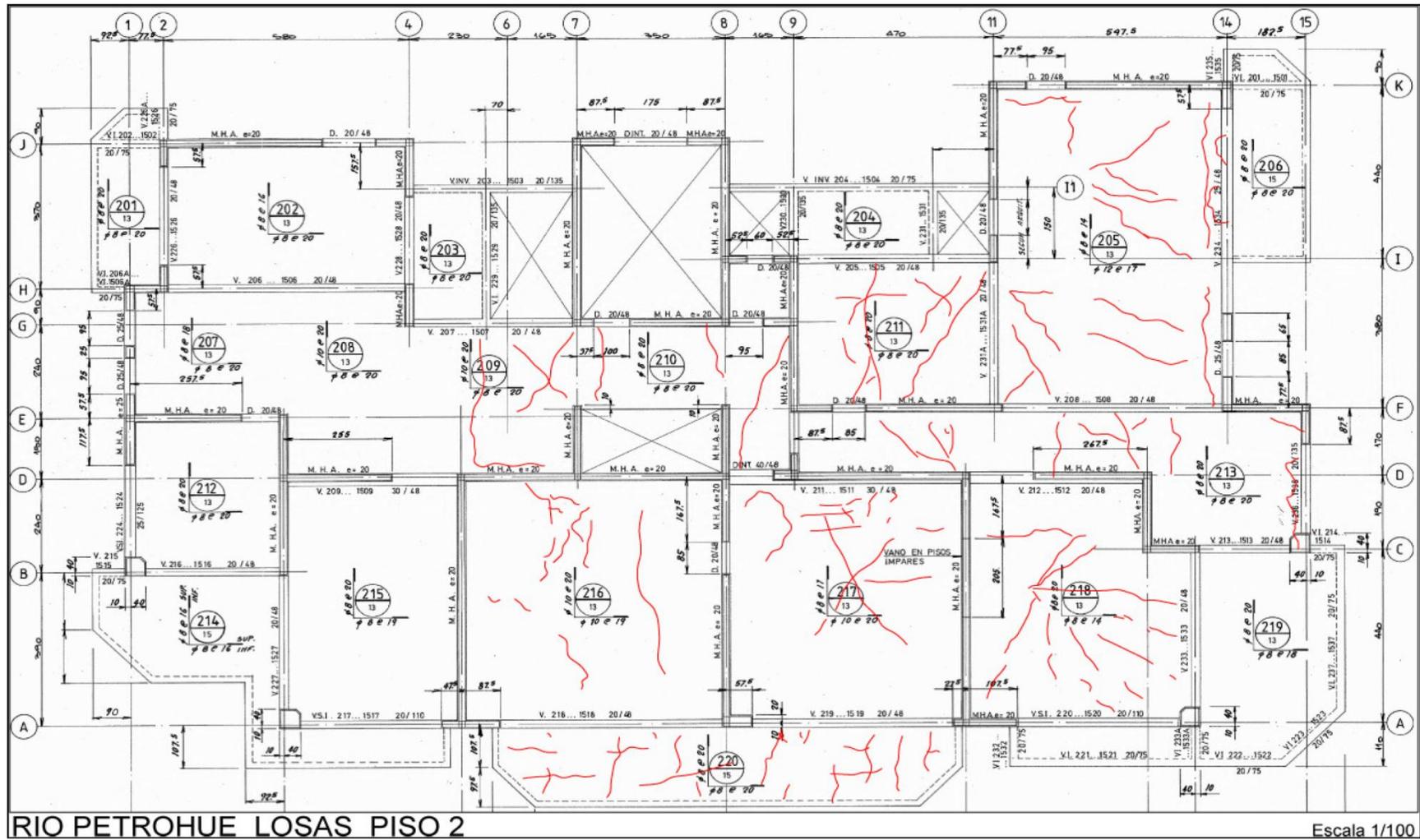


Figura 63: Planta piso 2, Bonelli (2010).

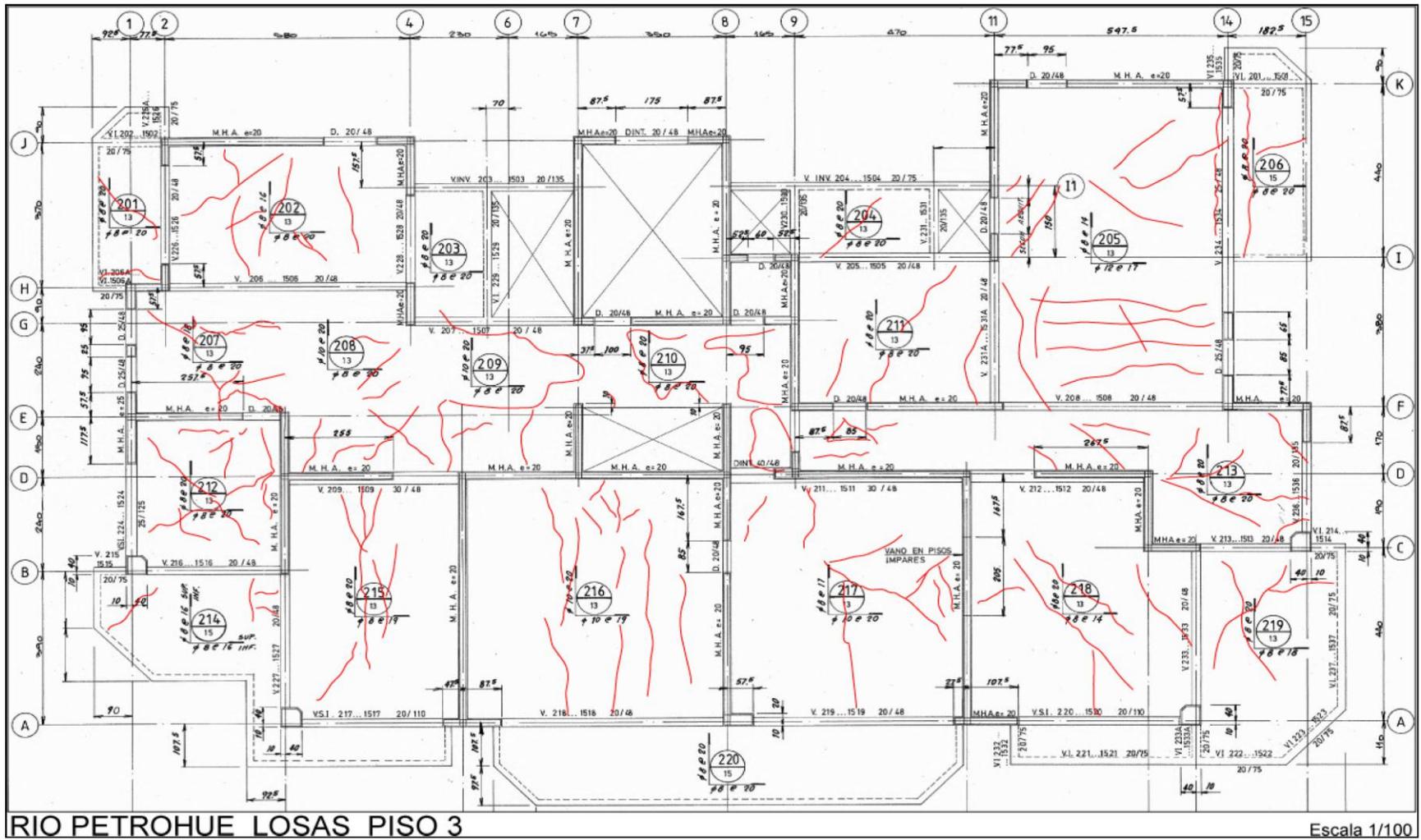


Figura 64: Planta piso 3, Bonelli (2010).

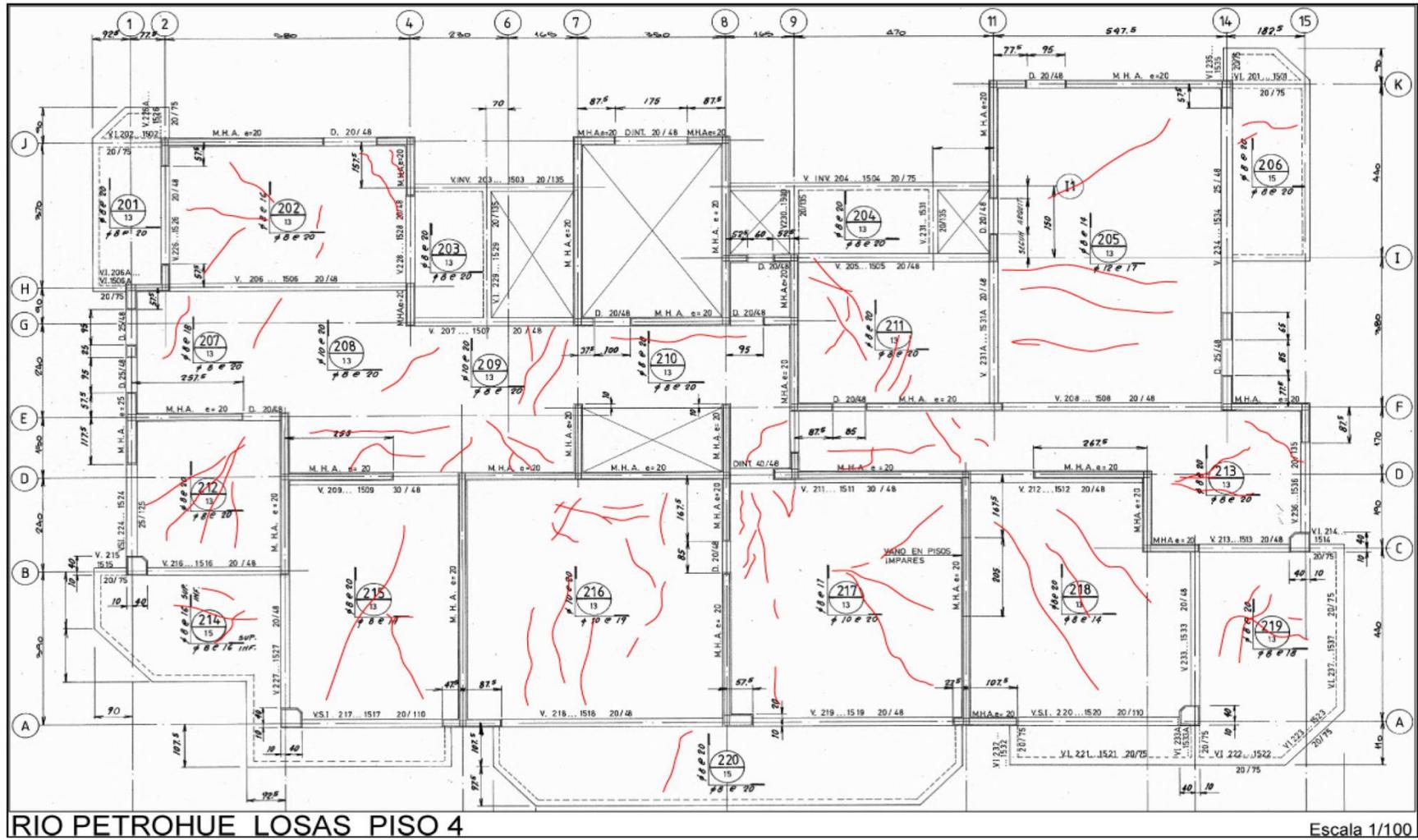


Figura 65: Planta piso 4, Bonelli (2010).

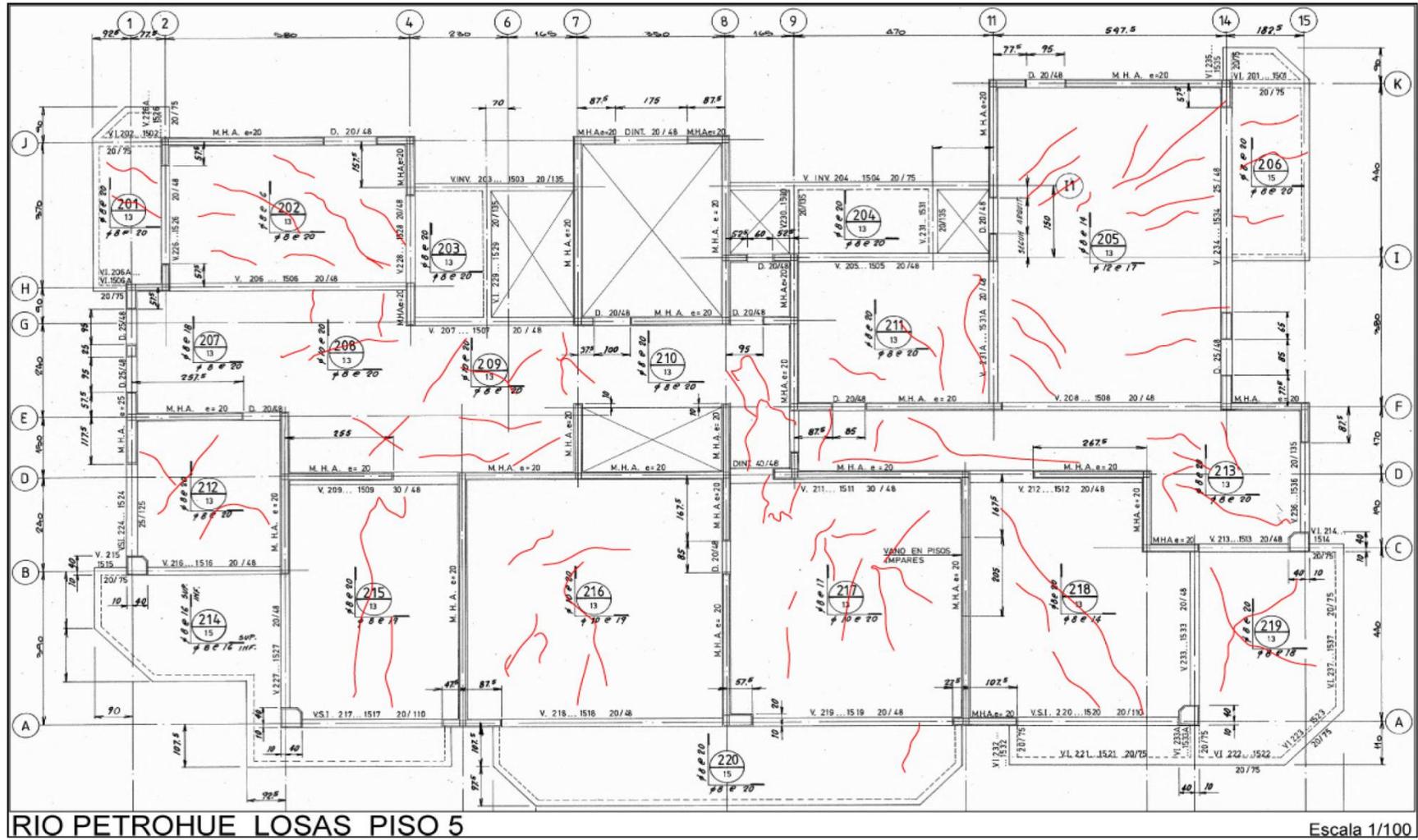


Figura 66: Planta piso 5, Bonelli (2010).

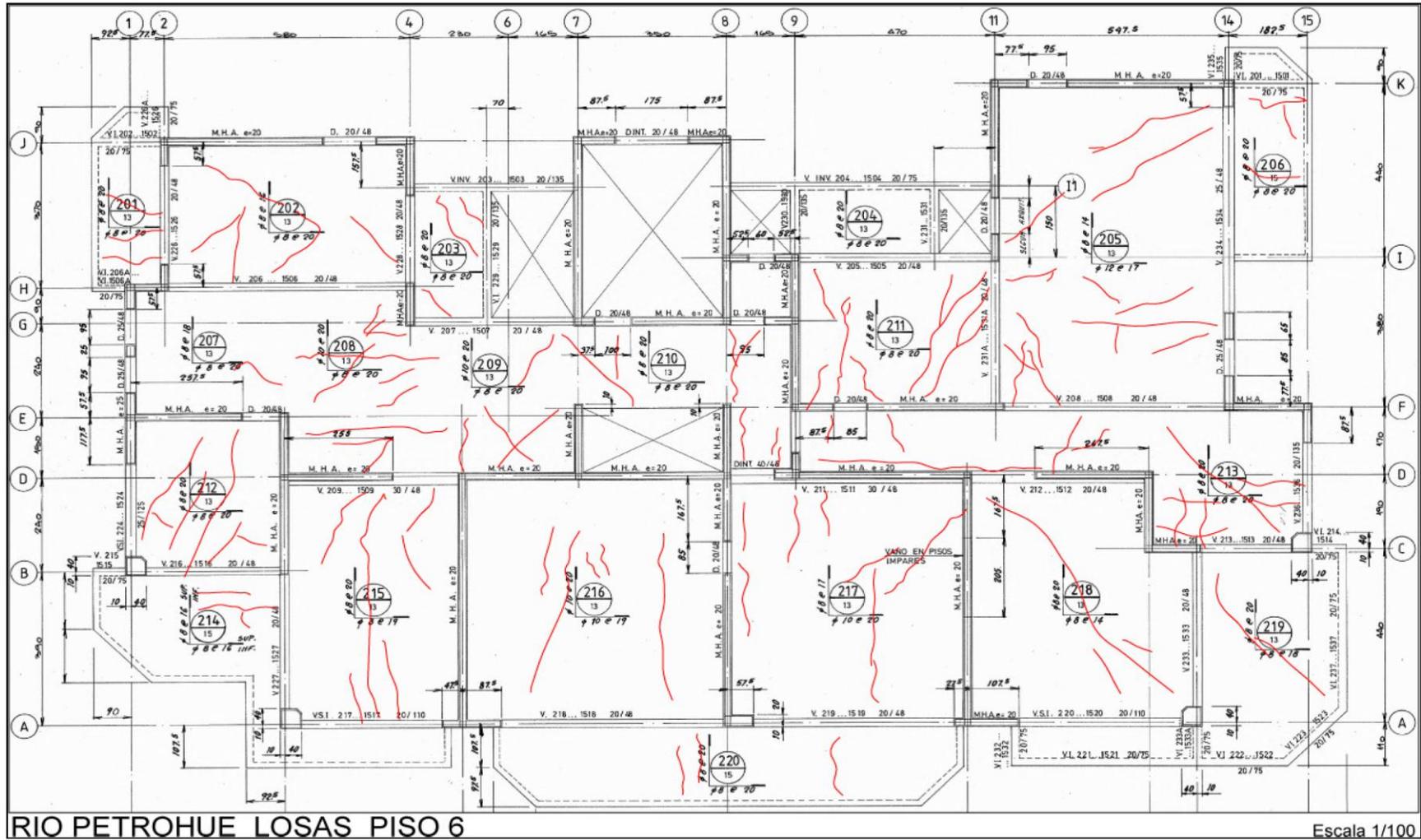


Figura 67: Planta piso 6, Bonelli (2010).

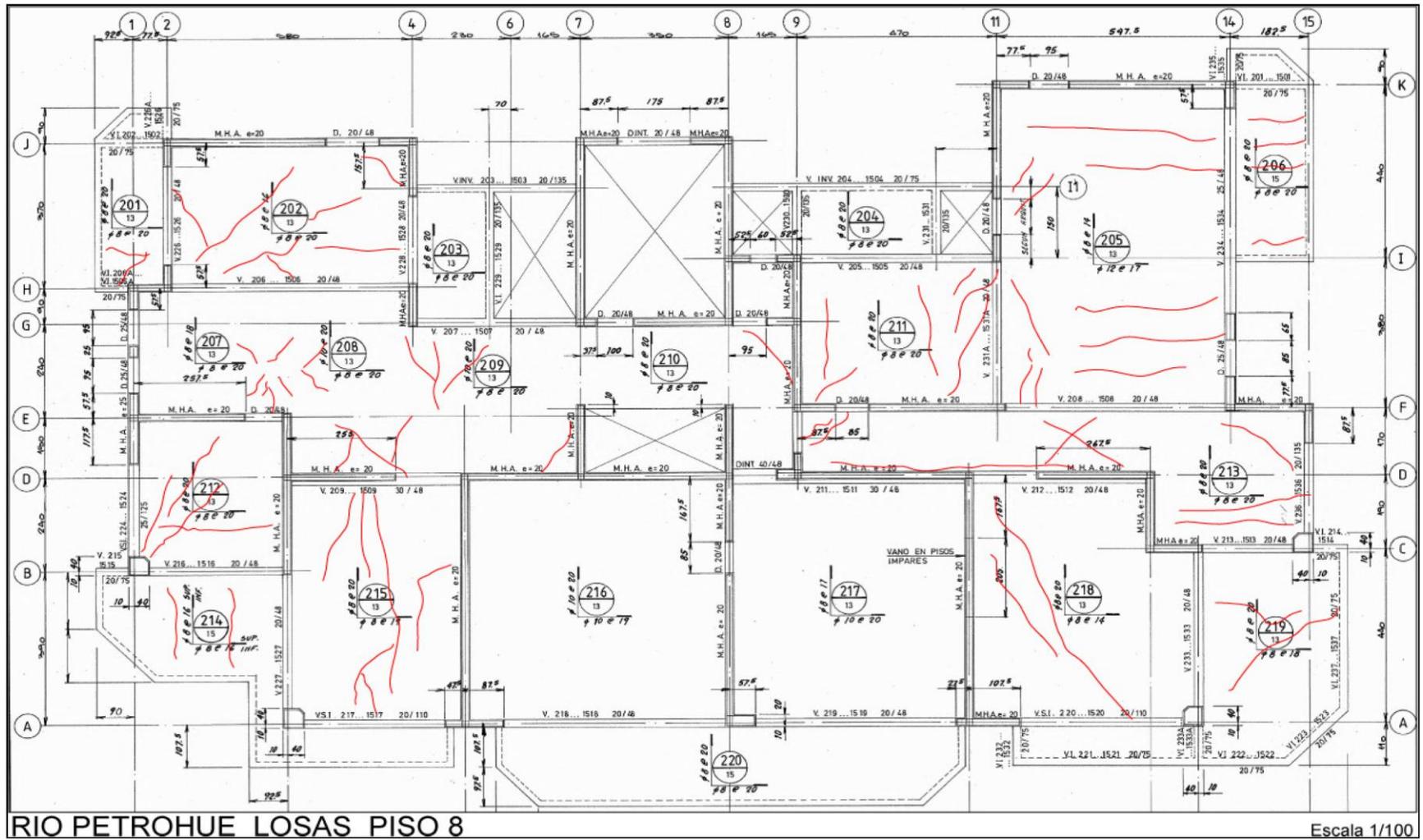


Figura 68: Planta piso 8, Bonelli (2010).

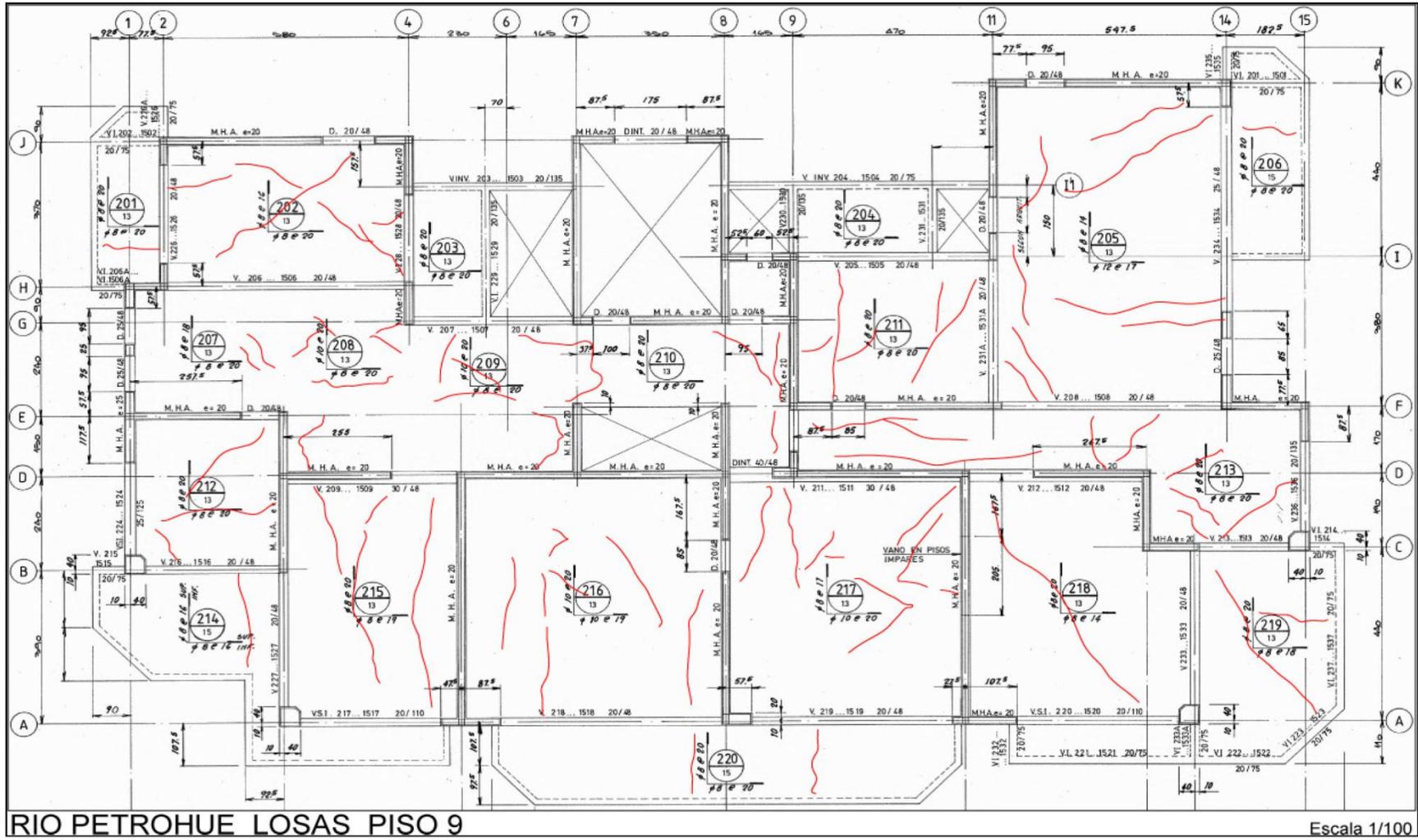


Figura 69: Planta piso 9, Bonelli (2010).

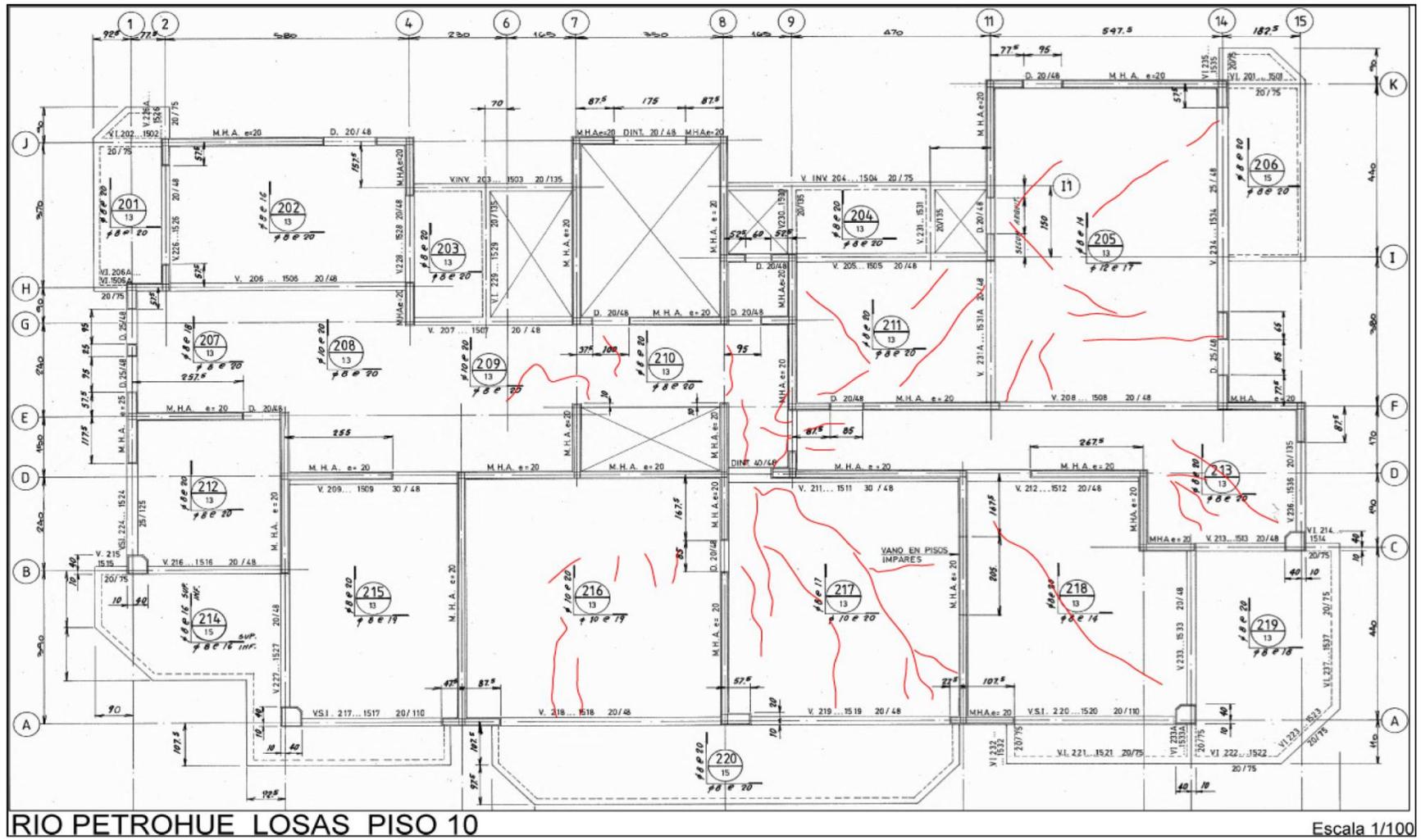


Figura 70: Planta piso 10, Bonelli (2010).

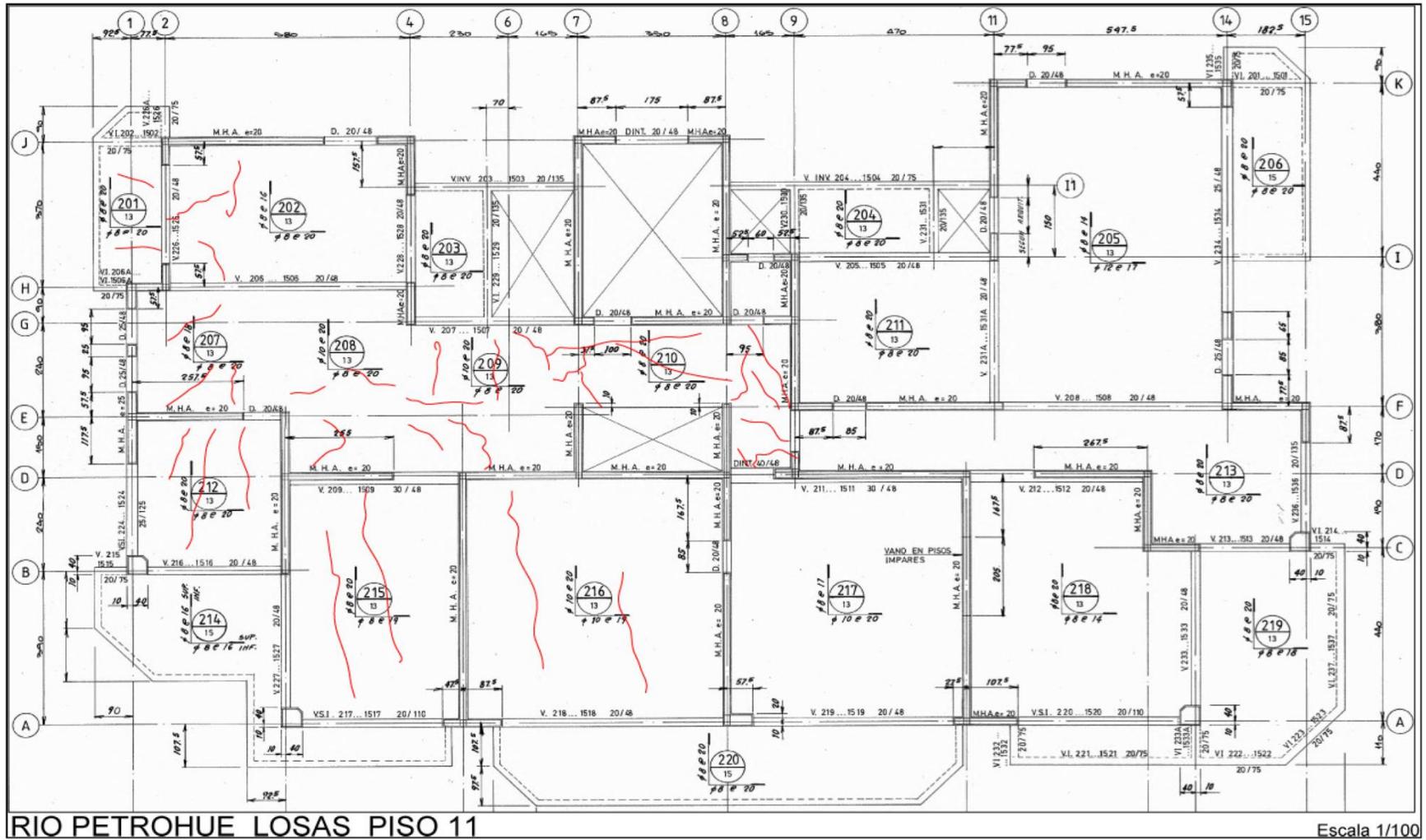


Figura 71: Planta piso 11, Bonelli (2010).

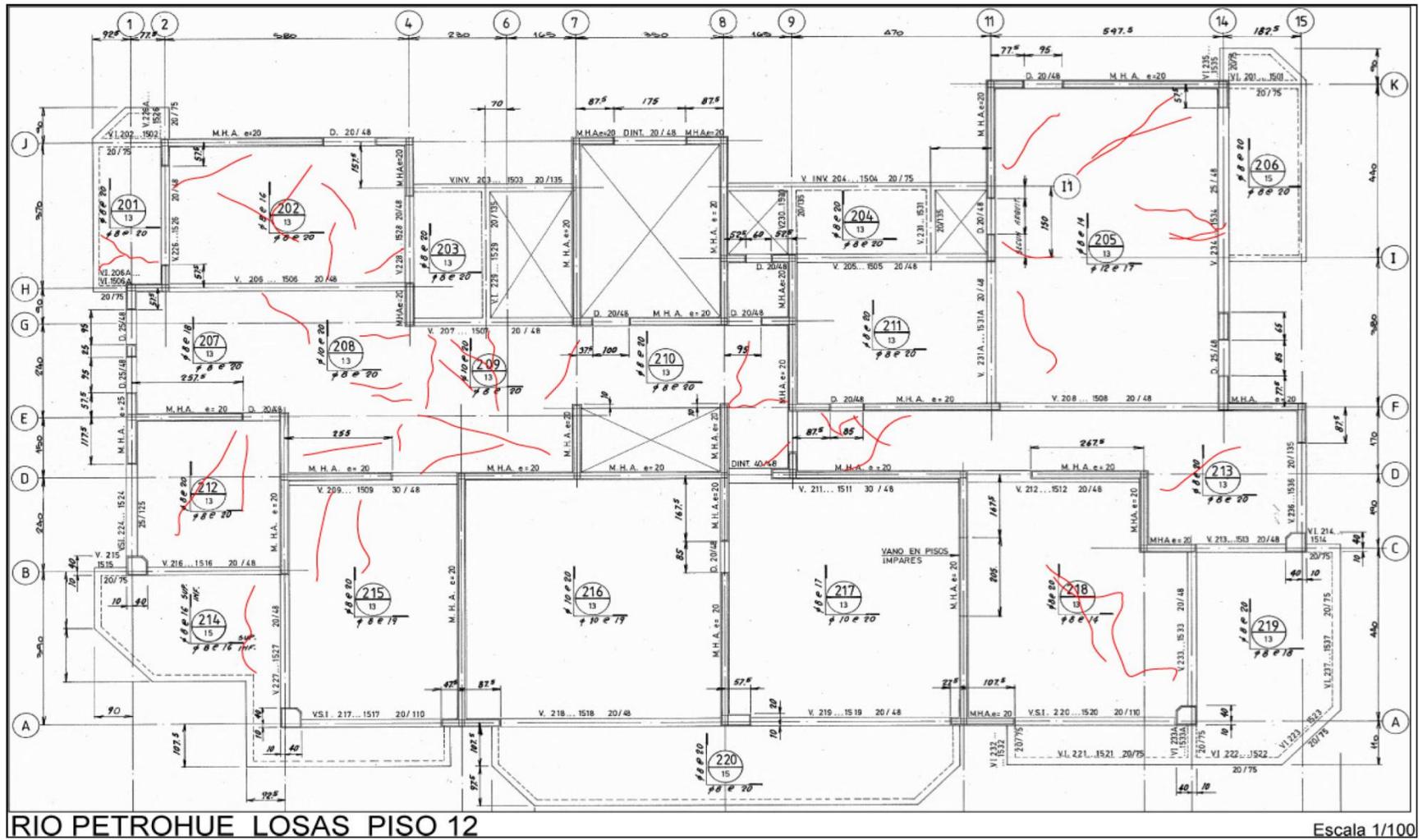


Figura 72: Planta piso 12, Bonelli (2010).

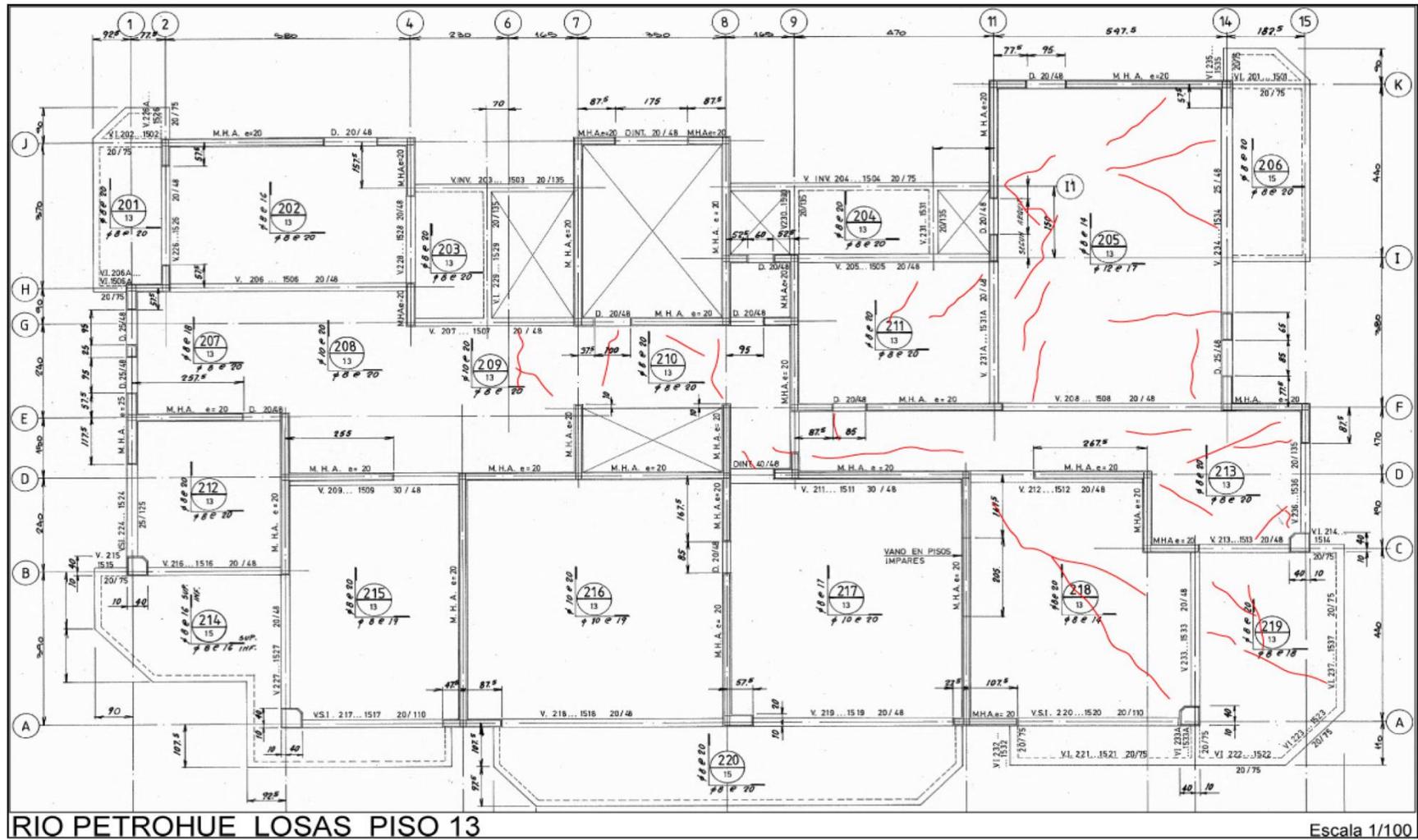


Figura 73: Planta piso 13, Bonelli (2010).

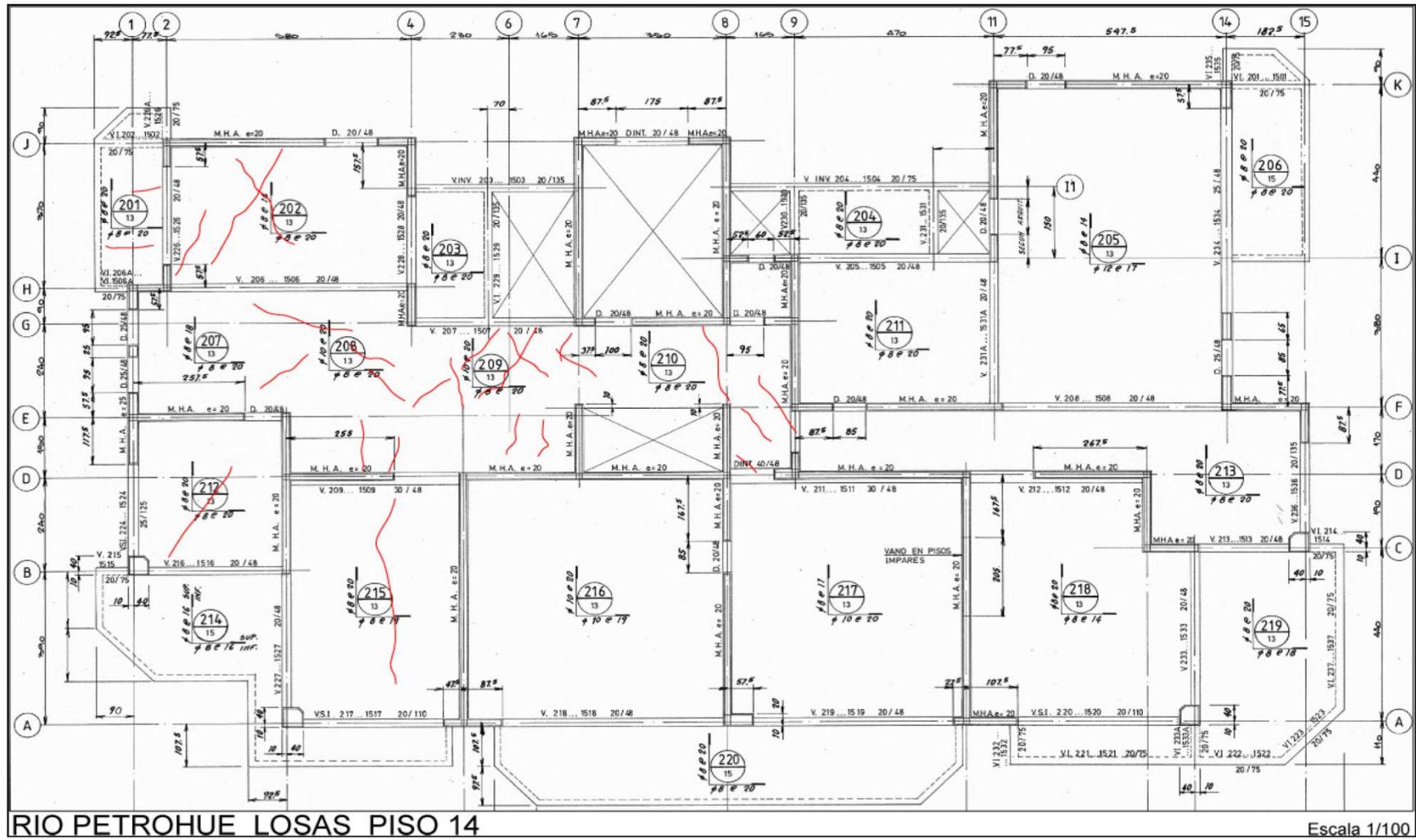


Figura 74: Planta piso 14, Bonelli (2010).

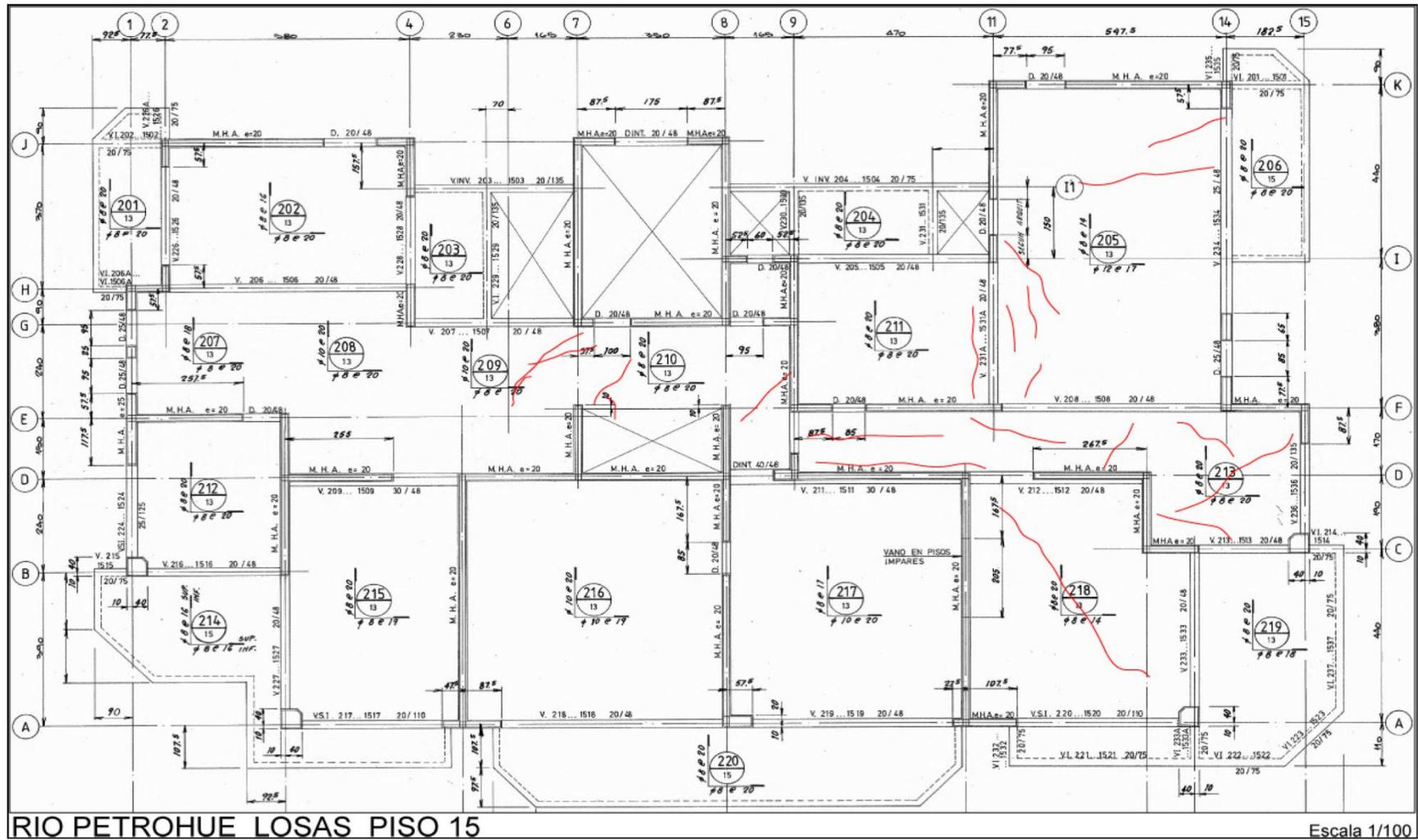


Figura 75: Planta piso 15, Bonelli (2010).

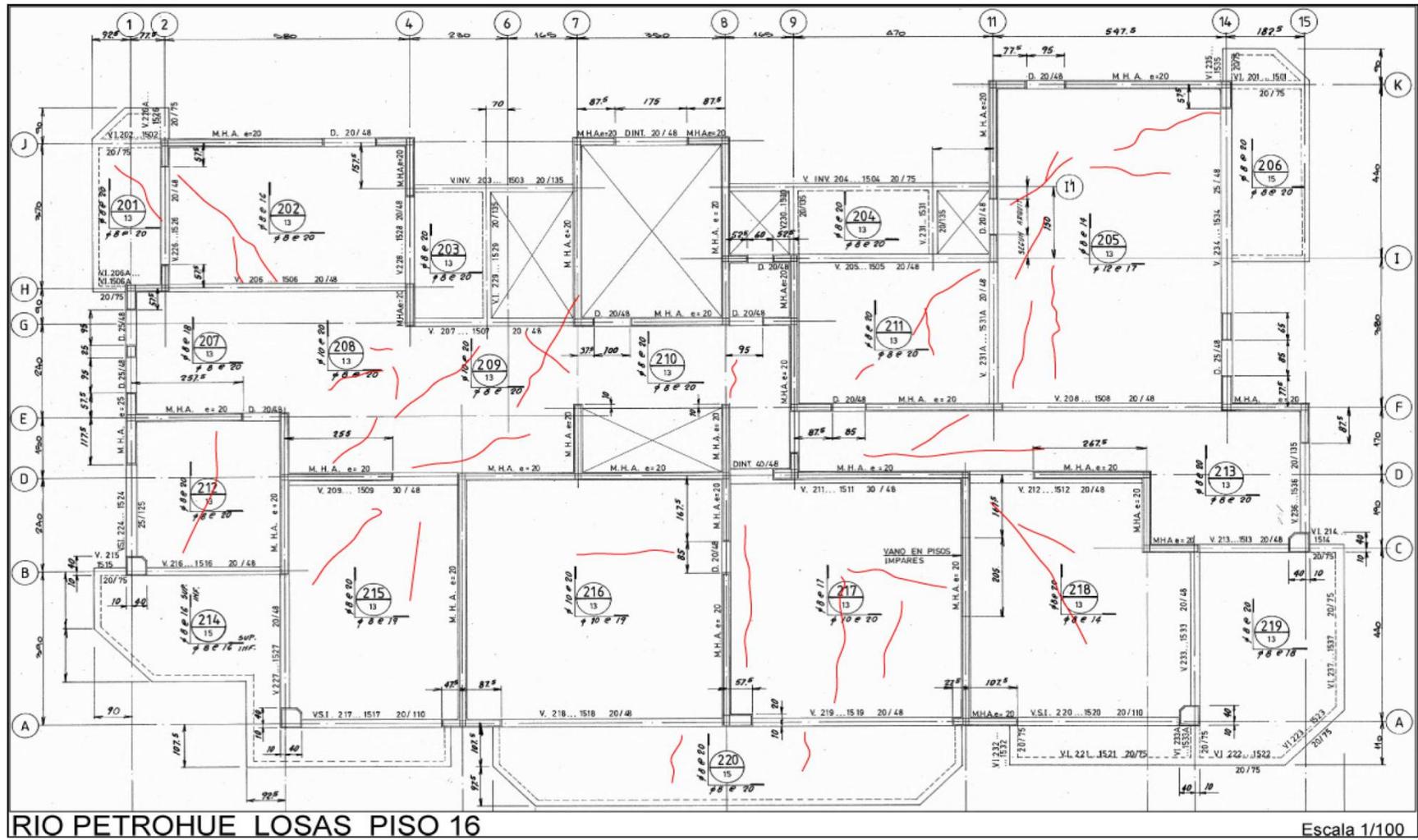


Figura 76: Planta piso 16, Bonelli (2010).

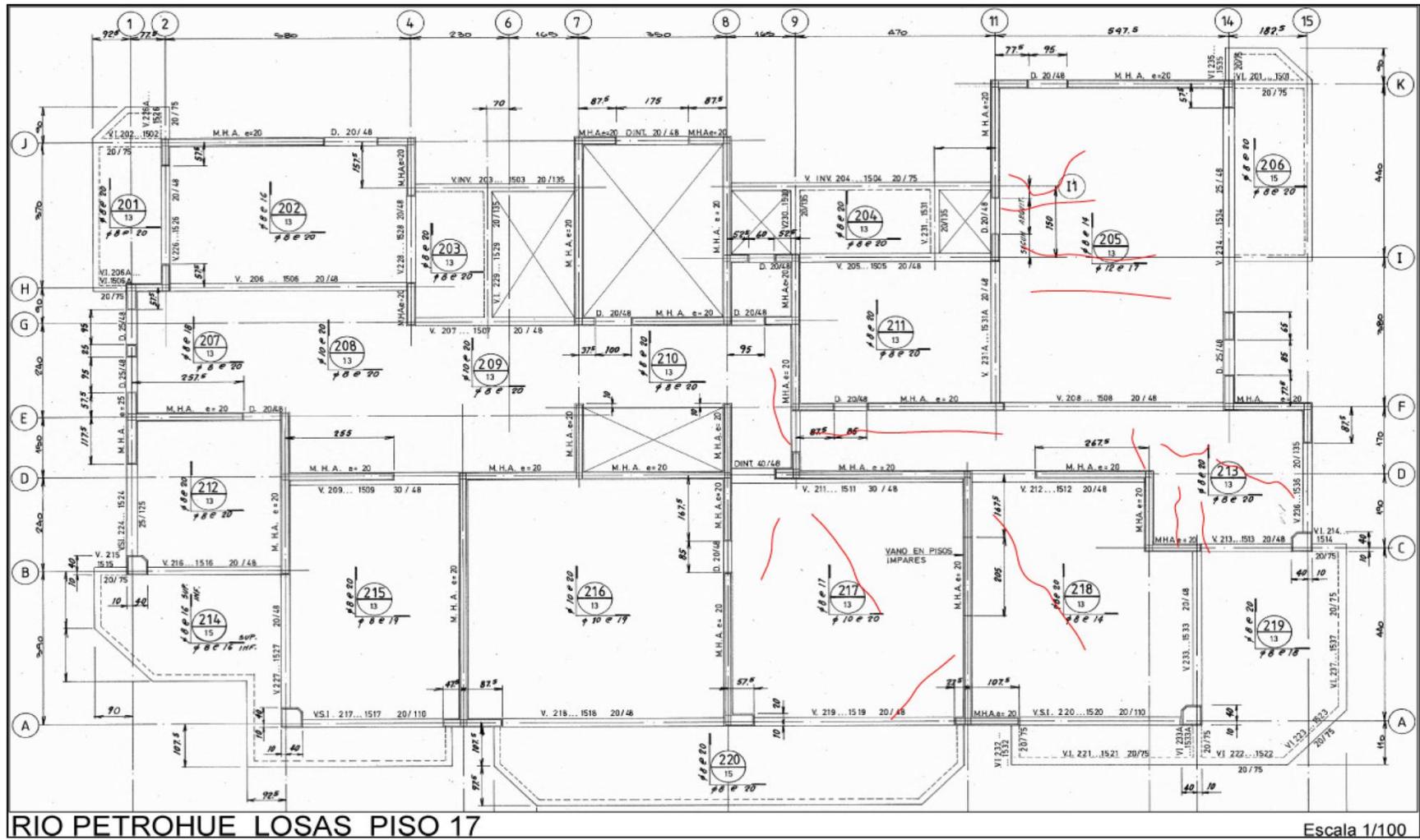


Figura 77: Planta piso 17, Bonelli (2010).

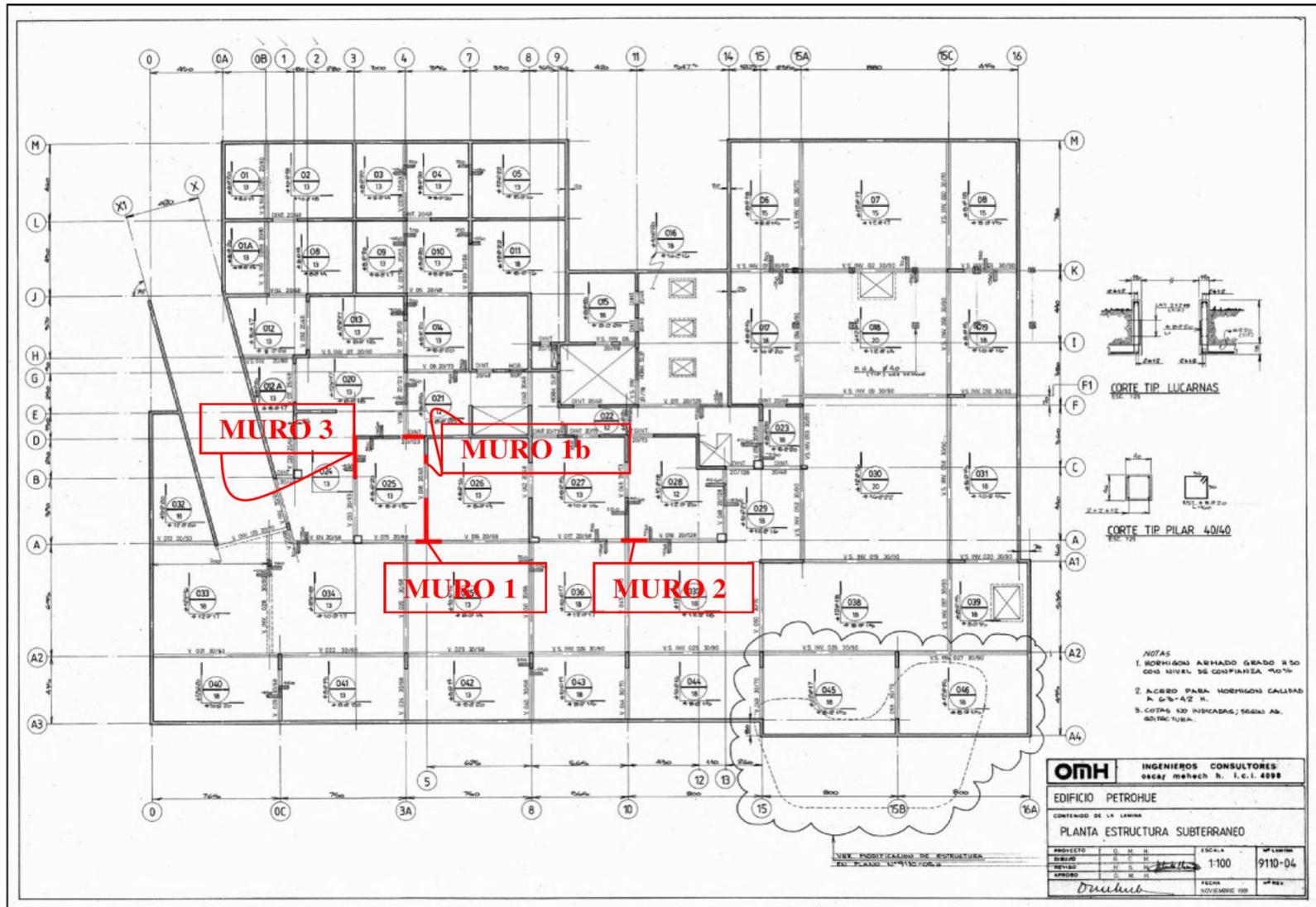


Figura 78: Muros con daño en subterráneo, Bonelli (2010).

7.2. ANEXO B: Catastro de barras del edificio.



Figura 79: Barras numero 1, 2, 3, 4, 5 y 6.



Figura 80: Barras numero 7, 8, 9, 10, 11 y 12.



Figura 81: Barras numero 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19.



Figura 82: Barras numero 20, 21, 22, 23, 24, 25 y 26.



Figura 83: Barras numero 27, 28, 29, 30 (fracturada) y 31.



Figura 84: Barras numero 32, 33, 34 y 35.



Figura 85: Barras numero 36, 37, 38, 39 y 40.



Figura 86: Barras numero 41, 42, 43, 44 y 45.



Figura 87: Barras numero 46, 47, 48, 49 y 50.

En la figura 88 se muestran las dimensiones medidas durante el catastro.

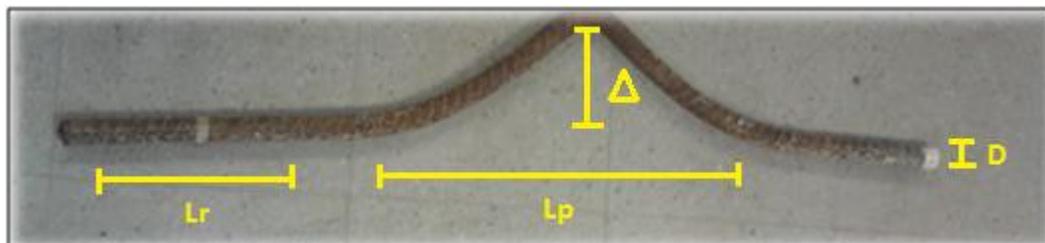


Figura 88: Dimensiones medidas durante catastro de barras del edificio.

En las tablas 7 y 8 se muestran los valores de las dimensiones medidas.

Tabla 7: Valores de dimensiones medidas parte 1.

Barra ID	D [mm]	Lr1 [cm]	Lr2 [cm]	Lp [cm]	Δ [cm]
1	22	245	125	-	-
2	22	60	140	48	5
3	25	140	-	-	-
4	25	100	60	50	10
5	25	90	60	58	8
6	25	110	214	25	2
7	22	30	25	54	11,5
8	16	90	10	-	-
9	16	30	10	-	-
10	16	50	5	-	-
11	16	100	5	-	-
12	25	225	125	8	-
13	25	35	95	70	8
14	25	60	105	57	8
15	22	295	10	-	-
16	25	35	95	58	7,5
17	25	70	90	70	10
18	25	200	30	60	7,5
19	25	190	30	70	11
20	22	300	-	75	14
21	22	300	-	73	16
22	22	295	-	50	15
23	22	95	100	52	5
24	16	350	-	-	-

Tabla 8: Valores de dimensiones medidas parte 2.

Barra ID	D [mm]	Lr1 [cm]	Lr2 [cm]	Lp [cm]	Δ [cm]
25	16	445	-	-	-
26	16	390	-	-	-
27	22	30	25	60	10
28	22	3	15	46	5
29	16	90	25	40	8,5
30	16	30	90	36	7
31	25	60	60	50	7
32	16	100	-	-	-
33	16	40	-	-	-
34	16	40	-	-	-
35	16	100	-	-	-
36	25	50	-	-	-
37	25	65	-	-	-
38	25	115	-	-	-
39	25	100	-	-	-
40	28	115	-	-	-
41	25	70	-	-	-
42	25	50	-	-	-
43	22	40	-	-	-
44	22	95	-	-	-
45	25	-	-	-	-
46	22	-	-	-	-
47	22	-	-	-	-
48	22	-	-	-	-
49	22	200	-	-	-
50	16	200	-	-	-

7.3. ANEXO C: Información de ensayos.

En la tabla 9 se muestran los parámetros M y m del modelo de Koh y Stephens (1991) obtenidos por Hamasaki (2013) en sus ensayos. El valor marcado en verde corresponde a los parámetros M y n de línea de tendencia usada en las figuras 40 y 41.

Tabla 9: Parámetros de modelo Koh y Stephens (1991) para ensayos de Hamasaki (2013).

Ensayo	M	m
D8 ld20	0,358	0,659
D8 ld6	0,205	0,473
D8 ld8	0,124	0,42
D8 ld12	0,169	0,529
D8 ld16	0,215	0,591
D8 ld28	0,704	0,788
D16 ld8	0,216	0,668
D16 ld12	0,224	0,606
D16 ld16	0,401	0,72
D16 ld20	0,456	0,694

En la tabla 10 se muestran los parámetros M y m del modelo de Koh y Stephens (1991) obtenidos por Brown y Kunnath (2004) en sus ensayos.

Tabla 10: Parámetros de modelo Koh y Stephens (1991) para ensayos de Brown y Kunnath (2004).

Ensayo	M	m
#6	0,12	0,47
#7	0,11	0,44
#8	0,08	0,36

En la tabla 11 se muestran las deformaciones unitarias obtenidas con corrección por rigidez inicial, y mediante el proceso de imágenes del ensayo adicional sobre una probeta de diámetro 22 mm. para analizar diferencias en los métodos para obtener la deformación. Los valores de la tabla corresponden a la posición en pixeles del extremo superior de la probeta en un ensayo (pixel 1), la posición del extremo inferior de la probeta (pixel 2), la longitud en pixeles y en milímetros, la deformación unitaria obtenida con imágenes, la deformación unitaria obtenida por corrección de rigidez inicial de los LVDT y la variación porcentual de ambas mediciones.

Estos valores se obtienen para el estado sin deformación de la barra, para la deformación máxima en tracción y en compresión.

Tabla 11: Ensayo de prueba de deformaciones.

conversión	
pixeles	milímetros
5	1

Prueba22							
Estado barra	Pixel 1	Pixel 2	longitud [pixeles]	Longitud[mm]	def unitaria con foto	def unitaria LVDT	$\Delta\%$
Sin deformación	558	2785	2227	445,4	0	0	-
Def max ciclo 1	579	2883	2304	460,8	0,035	0,047	36,29
Def min ciclo 1	548	2668	2120	424	-0,048	-0,045	-5,39

Los valores de variación porcentual y deformación medida con LVDT se utilizan para generar la figura 32.

De la tabla 12 hasta la tabla 16 se muestran los valores definidos en la tabla 11 obtenidos en ensayos de probetas de 16 mm a una amplitud de 3% y 5% de deformación. A partir de los valores de variación porcentual y medición con LVDT se genera la figura 38.

Tabla 12: Primer ensayo barra de 16 mm. con fotogrametría a 5% de deformación.

Prueba16def (5%)							
Estado barra	Pixel 1	Pixel 2	longitud [pixeles]	Longitud [mm]	deformación unitaria foto	def unitaria LVDT	$\Delta\%$
Sin deformación	768	2757	1989	331,50	0	0	-
def max ciclo 1	777	2852	2075	345,83	0,043	0,048	10,49
def min ciclo 1	759	2655	1896	316,00	-0,047	-0,048	1,91
def max ciclo 2	777	2852	2075	345,83	0,043	0,048	11,18
def min ciclo 2	759	2655	1896	316,00	-0,047	-0,048	1,95

Tabla 13: Segundo ensayo barra de 16 mm. con fotogrametría a 5% de deformación.

Prueba16def2 (5%)							
Estado barra	Pixel 1	Pixel 2	longitud [pixeles]	Longitud [mm]	deformación unitaria foto	def unitaria LVDT	$\Delta\%$
Sin deformación	766	2746	1980	330,00	0	0	-
def max ciclo 1	776	2839	2063	343,83	0,042	0,047	13,30
def min ciclo 1	767	2647	1880	313,33	-0,051	-0,048	4,35
def max ciclo 2	776	2838	2062	343,67	0,041	0,048	15,35
def min ciclo 2	767	2647	1880	313,33	-0,051	-0,048	4,32

Tabla 14: Tercer ensayo barra de 16 mm. con fotogrametría a 5% de deformación,

Prueba16def3 (5%)							
Estado barra	Pixel 1	Pixel 2	longitud [pixeles]	Longitud [mm]	deformación unitaria foto	def unitaria LVDT	$\Delta\%$
Sin deformación	668	2843	2175	362,5	0	0	-
def max ciclo 1	679	2950	2271	378,5	0,044	0,049	11,48
def min ciclo 1	664	2737	2073	345,5	-0,046	-0,046	1,81
def max ciclo 2	679	2950	2271	378,5	0,044	0,049	12,79
def min ciclo 2	664	2737	2073	345,5	-0,046	-0,046	1,79

Tabla 15: Primer ensayo barra de 16mm con fotogrametría a 3%.

Prueba16d5 (3%)							
Estado barra	Pixel 1	Pixel 2	longitud [pixeles]	Longitud [mm]	deformación unitaria foto	def unitaria LVDT	$\Delta\%$
Sin deformación	913	2767	1854	319,66	0	0	-
def max ciclo 1	917	2819	1902	327,93	0,025	0,028	8,98
def min ciclo 1	913	2705	1792	308,97	-0,033	-0,028	15,29

Tabla 16: Segundo ensayo barra de 16mm con fotogrametría a 3%.

Prueba16d6 (3%)							
Estado barra	Pixel 1	Pixel 2	longitud [pixeles]	Longitud [mm]	deformación unitaria foto	def unitaria LVDT	$\Delta\%$
Sin deformación	914	2766	1852	319,31	0	0	-
def max ciclo 1	918	2818	1900	327,59	0,025	0,027	7,94
def min ciclo 1	915	2706	1791	308,79	-0,032	-0,028	13,45

En la tabla 17 se muestran los ciclos a rotura y amplitud de deformación de probetas de barra inalterada de 16 mm. utilizadas para generar la figura 29, el dato marcado con rojo no se consideró ya que correspondía a un punto que no era representativo a la línea de tendencia generada. El valor en verde es de una probeta de distinta calidad, comparable a los ensayos sobre probetas de barras del edificio y se consideró en la figura 46.

Tabla 17: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas de barra inalterada D = 16 mm.

Probeta	N	Deformación (%)
P16dl20d21	29,2	0,019
P16dl20d22	26,2	0,019
P16dl20d31	13,2	0,029
P16dl20d32	13,2	0,029
P16dl20d33	24,2	0,029
P16dl20d41	6,2	0,039
P16dl20d42	7,2	0,039
P16dl20d51	6,2	0,049
P16dl20d52	4,2	0,048

De la tabla 18 a la tabla 20 se muestran los ciclos a la rotura y la amplitud de deformación obtenida mediante corrección por rigidez inicial en los ensayos de probetas de barras del edificio de 16 mm.. Además se muestra el valor del modulo de elasticidad utilizado para la corrección (valor con rojo si no se usó extensómetro).

Tabla 18: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas rectas sin pandeo D = 16 mm.

Diámetro 16 mm		barras rectas sin pandeo		
Probeta	N	2N	Deformación (%)	E(MPa)
b25rspd5	8,2	16,4	0,048	193795
b26rspd5	7,1	14,2	0,048	204035
b26rspd3	16,1	32,2	0,029	197497
b50rspd5	6,2	12,4	0,049	199937
b50rspd3	18,2	36,4	0,029	200558
b24rspd5	6,2	12,4	0,049	198492
b24rspd3	18,2	36,4	0,029	201246
b25rspd3	23,2	46,4	0,029	206924

Tabla 19: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas rectas con pandeo D = 16 mm.

Diámetro 16 mm	barras rectas con pandeo			
Probeta	N	2N	Deformación (%)	E(MPa)
b29rcpd3	18,2	36,4	0,029	199954
b11rcpd3	8,2	16,4	0,029	180149
b32rcpd3	9,2	18,4	0,029	192847
b35rcpd3	13,2	26,4	0,029	200000
b30rcpd3	15,1	30,2	0,029	209806
b30rcpd5	6,2	12,4	0,049	200000
b8rcpd5	6,9	13,8	0,048	200000

Tabla 20: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas zona con pandeo D = 16 mm.

Diámetro 16 mm	zona con pandeo			
Probeta	N	2N	Deformación (%)	E(MPa)
b29zpd3	8,2	16,4	0,028	200000

De la tabla 21 a la tabla 24 se muestran los ciclos a la rotura y la amplitud de deformación obtenida mediante proceso de imágenes en los ensayos de probetas de barras inalteradas y del edificio de 22 mm.

Tabla 21: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas de barra inalterada D = 22 mm.

Probeta de barra inalterada	N	2N	Deformación (%)
P22dl20d31	19,2	38,4	0,032
P22dl20d32	16,1	32,2	0,027
P22dl20d51	8,1	16,2	0,045
P22dl20d52	11,1	22,2	0,045
P22dl20d53	7,2	14,4	0,051

Tabla 22: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas rectas sin pandeo D = 22 mm.

Diámetro 22 mm	barras rectas sin pandeo		
Probeta	N	2N	Deformación (%)
b49rspd3	13,2	26,4	0,029
b15rspd3	19,2	38,4	0,023
b15rspd5	11,2	22,4	0,055
b1rspd3	11,2	22,4	0,027
b1rspd5	6,2	12,4	0,043

Se descarta la probeta b15rspd5 por no ser una muestra representativa ya que muestra un comportamiento que no está acorde al resto de los datos.

Tabla 23: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas rectas con pandeo D = 22 mm.

Diámetro 22 mm	barras rectas con pandeo		
Probeta	N	2N	Deformación (%)
b2rcpd3	8,1	16,2	0,028
b22rcpd3	13,2	26,4	0,028
b22rcpd5	4,2	8,4	0,047
b20rcpd3	15,2	30,4	0,032
b20rcpd5	5,2	10,4	0,047
b21rcpd3	20,2	40,4	0,023
b21rcpd5	6,2	12,4	0,040
b23rcpd3	13,2	26,4	0,025
b23rcpd5	5,2	10,4	0,044
b44rcp3	15,2	30,4	0,031

Tabla 24: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas zona con pandeo D = 22 mm.

Diámetro 22	zona con pandeo		
Probeta	N	2N	Deformación (%)
b2zpd3	9,1	18,2	0,031
b23zpd3	3,2	6,4	0,026
b7zpd3	-	-	-
b27zpd3	-	-	-
b28zpd3	-	-	-
b48zpd3	-	-	-

Las probetas correspondientes a zona con pandeo marcadas con color naranja sufrieron fractura durante el estirado.

De la tabla 25 a la tabla 28 se muestran los ciclos a la rotura y la amplitud de deformación obtenida mediante proceso de imágenes en los ensayos de probetas de barras inalteradas y del edificio de 25 mm.

Tabla 25: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas de barra inalterada D = 25 mm.

Probeta de barra inalterada	N	2N	Deformación (%)
P25dl20d31	17,1	34,2	0,032
P25dl20d32	17,2	34,4	0,029
P25dl20d51	8,2	16,4	0,050
P25dl20d52	6,2	12,4	0,045

Tabla 26: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas rectas sin pandeo D = 25 mm.

Diámetro 25 mm	barras rectas sin pandeo		
Barra origen	N	2N	Deformación (%)
b3rspd3	8,2	16,4	0,029
b3rspd5	5,2	10,4	0,049
b38rspd5	4,2	8,4	0,049
b39rspd3	9,2	18,4	0,028

Tabla 27: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas rectas con pandeo D = 25 mm.

Diámetro 25 mm	barras rectas con pandeo		
Barra origen	N	2N	Deformación (%)
b4rcpd3	7,1	14,2	0,030
b5rcpd3	5,2	10,4	0,030
b6rcpd3	5,2	10,4	0,028
b6rcpd5	3,2	6,4	0,049
b12rcpd3	5,1	10,2	0,029
b14rcpd3	6,2	12,4	0,029
b16rcpd3	5,1	10,2	0,028
b17rcpd3	5,2	10,4	0,028
b18rcpd3	5,2	10,4	0,029
b18rcpd5	3,1	6,2	0,048
b19rcpd3	4,2	8,4	0,030

Tabla 28: Ciclos a rotura y amplitud de deformación probetas zona con pandeo D = 25 mm.

Diámetro 25 mm	zona con pandeo		
Probeta	N	2N	Deformación (%)
b4zpd3	5,2	10,4	0,025
b5zpd3	3,2	6,4	0,027
b12zpd3	3,1	6,2	0,028
b14zpd3	4,2	8,4	0,026
b17zpd3	3,2	6,4	0,027
b18zpd5	2,2	4,4	0,044
b19zpd5	4,2	8,4	0,028

De la tabla 29 a la tabla 31 se muestran la energía a la rotura y la amplitud de deformación obtenidas en los ensayos de probetas de barras inalteradas y del edificio de 16 mm.

Tabla 29: Energía a la rotura y amplitud de deformación probeta de barra inalterada D = 16 mm.

Probeta de barra inalterada	Wf [Mpa]	Deformación (%)
P16dl20d33	223,7	0,029

Tabla 30: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas rectas sin pandeo D = 16 mm.

Probeta	Wf [MPa]	Deformación (%)
b25rspd5	143,4	0,048
b26rspd5	137,7	0,048
b26rspd3	172,0	0,029
b50rspd5	123,6	0,049
b50rspd3	186,6	0,029
b24rspd5	122,6	0,049
b24rspd3	189,9	0,029
b25rspd3	221,9	0,029

Tabla 31: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas rectas con pandeo D = 16 mm.

Probeta	Wf [MPa]	Deformación (%)
b29rcpd3	163,0	0,029
b11rcpd3	106,3	0,029
b32rcpd3	113,2	0,029
b35rcpd3	137,8	0,029
b30rcpd3	145,5	0,029
b30rcpd5	119,7	0,049
b8rcpd5	121,8	0,048

Tabla 32: Energía a la rotura y amplitud de deformación probeta zona con pandeo D = 16 mm.

Probeta	Wf [MPa]	Deformación (%)
b29zpd3	91,4	0,028

De la tabla 33 a la tabla 36 se muestran la energía a la rotura y la amplitud de deformación obtenidas en los ensayos de probetas de barras inalteradas y del edificio de 22 mm.

Tabla 33: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas de barra inalterada D = 22 mm.

Probeta de barra inalterada	Wf [MPa]	Deformación (%)
P22dl20d31	170,7	0,032
P22dl20d32	136,9	0,027
P22dl20d51	134,5	0,045
P22dl20d52	116,5	0,045
P22dl20d53	117,2	0,051

Tabla 34: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas rectas sin pandeo D = 22 mm.

Probeta	Wf	Deformación (%)
b49rspd3	135,3	0,029
b15rspd3	144,9	0,023
b1rspd3	105,2	0,027
b1rspd5	95,5	0,043

Tabla 35: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas rectas con pandeo D = 22 mm.

Probeta	Wf	Deformación (%)
b2rcpd3	97,8	0,028
b22rcpd3	154,0	0,028
b22rcpd5	100,7	0,047
b20rcpd3	159,8	0,032
b20rcpd5	90,9	0,047
b21rcpd3	160,4	0,023
b21rcpd5	101,0	0,040
b23rcpd3	111,4	0,025
b23rcpd5	83,9	0,044
b44rcp3	141,67	0,031

Tabla 36: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas de zona con pandeo D = 22 mm.

Probeta	Wf	Deformación (%)
b2zpd3	93,2	0,031
b23zpd3	38,6	0,026

De la tabla 37 a la tabla 40 se muestran la energía a la rotura y la amplitud de deformación obtenidas en los ensayos de probetas de barras inalteradas y del edificio de 25 mm.

Tabla 37: Energía a la rotura y amplitud de deformacion probetas de barra inalterada D = 25 mm.

Probeta de barra inalterada	Wf	Deformación (%)
P25dl20d31	135,3	0,032
P25dl20d32	144,4	0,029
P25dl20d51	115,7	0,050
P25dl20d52	95,6	0,045

Tabla 38: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas rectas sin pandeo D = 25 mm.

Barra origen	Wf	Deformación (%)
b3rspd3	84,9	0,029
b3rspd5	88,2	0,049
b38rspd5	72,5	0,049
b39rspd3	91,2	0,028

Tabla 39: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas rectas con pandeo D = 25 mm.

Barra origen	Wf	Deformación (%)
b4rcpd3	66,0	0,030
b5rcpd3	52,8	0,030
b6rcpd3	51,3	0,028
b6rcpd5	56,9	0,049
b12rcpd3	50,6	0,029
b14rcpd3	59,6	0,029
b16rcpd3	49,4	0,028
b17rcpd3	53,5	0,028
b18rcpd3	51,1	0,029
b18rcpd5	55,5	0,048
b19rcpd3	48,4	0,030

Tabla 40: Energía a la rotura y amplitud de deformación probetas zona con pandeo $D = 25$ mm.

Probeta	Wf	Deformación (%)
b4zpd3	49,1	0,025
b5zpd3	34,5	0,027
b12zpd3	38,2	0,028
b14zpd3	41,0	0,026
b17zpd3	32,2	0,027
b18zpd5	39,7	0,044
b19zpd5	41,5	0,028

7.4. ANEXO D: Gráficos.

BARRAS $\Phi 16$:

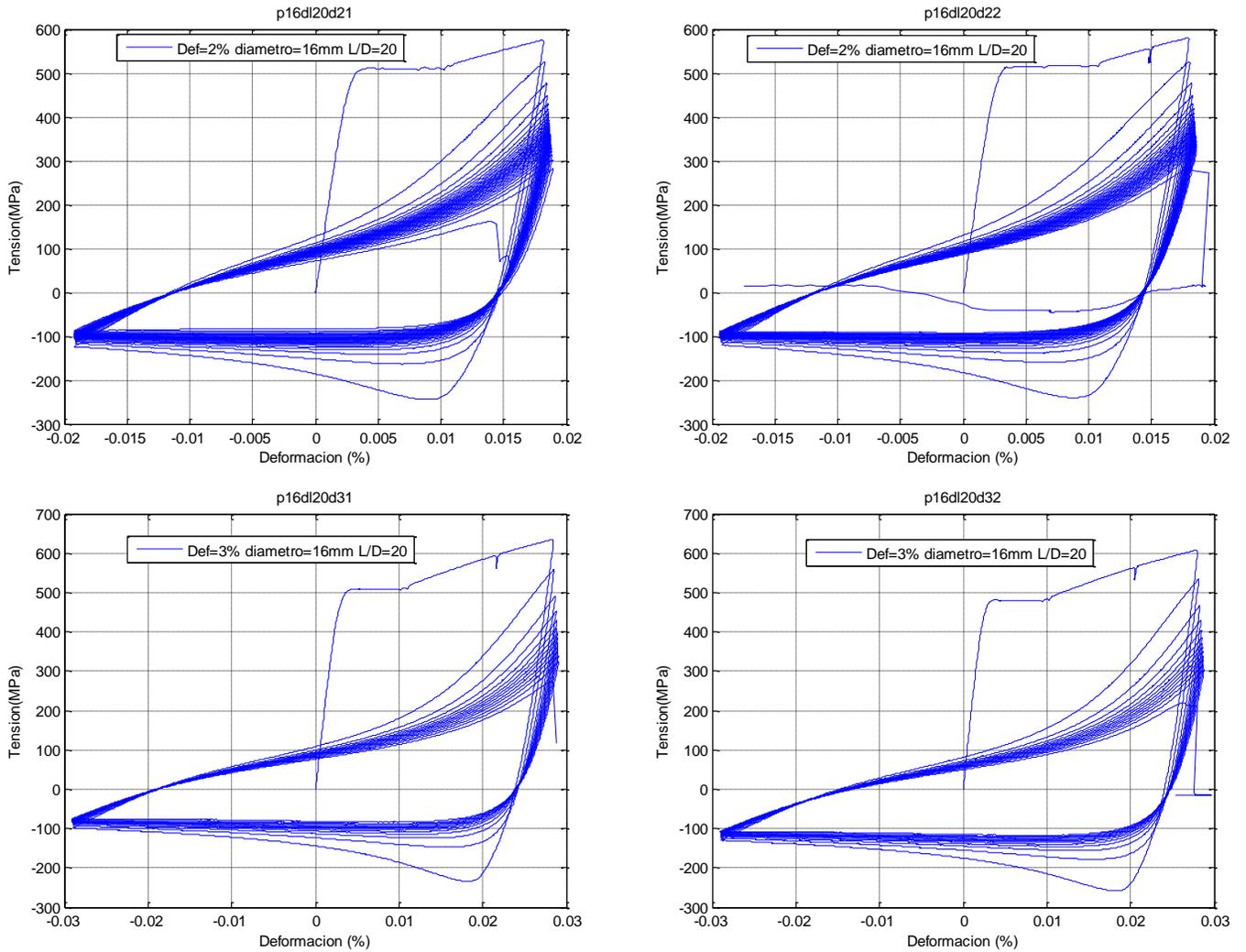


Figura 89: Gráficos tensión vs deformación unitaria p16dl20d21, p16dl20d22, p16dl20d31 y p16dl20d32.

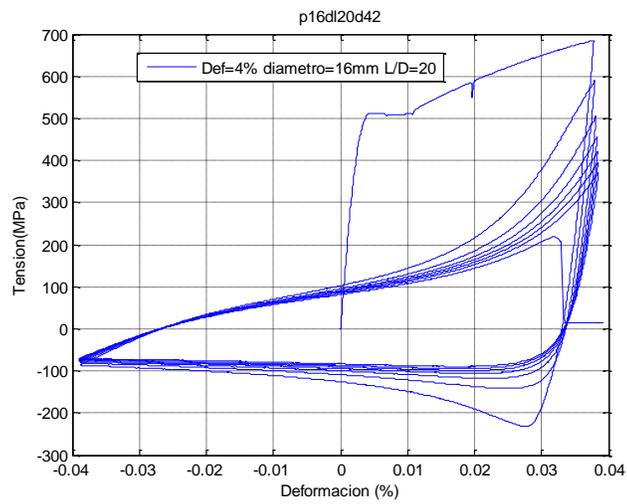
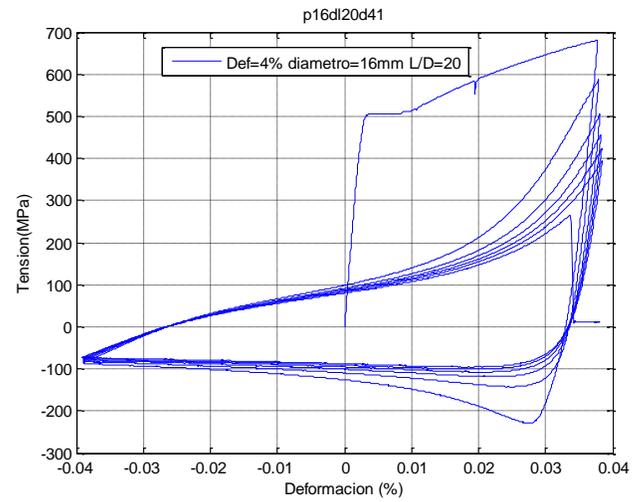
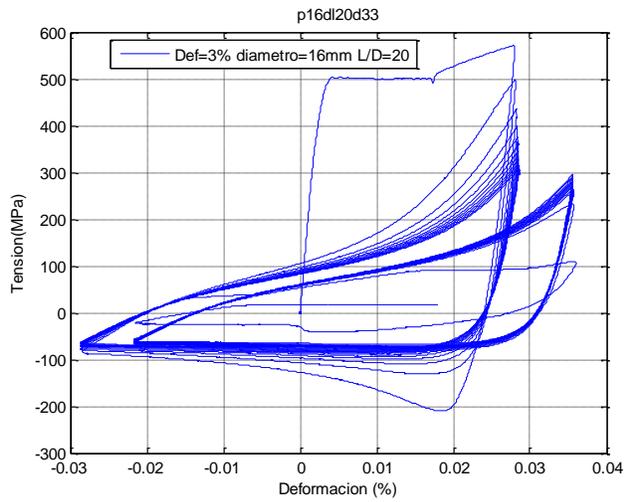


Figura 90: Gráficos tensión vs deformación unitaria p16dl20d33, p16dl20d41 y p16dl20d42.

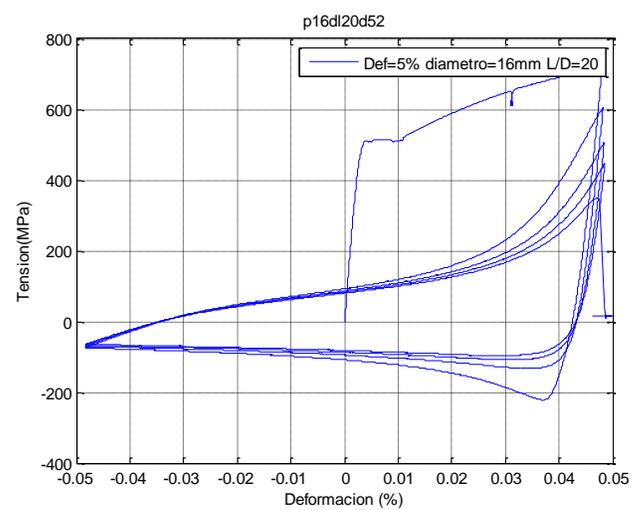
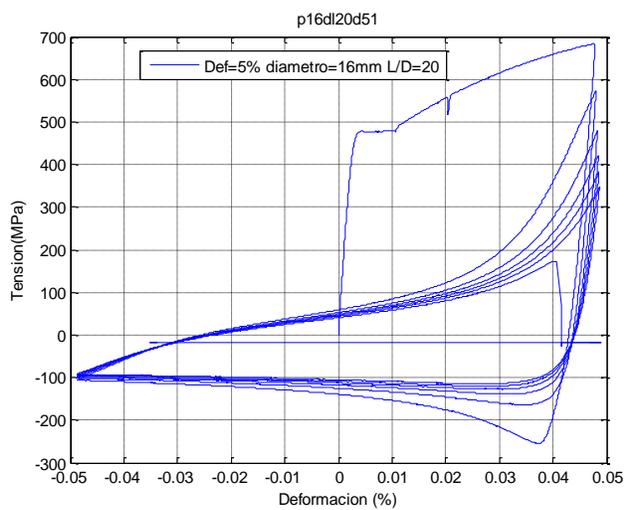


Figura 91: Gráficos tensión vs deformación unitaria p16dl20d51 y p16dl20d52.

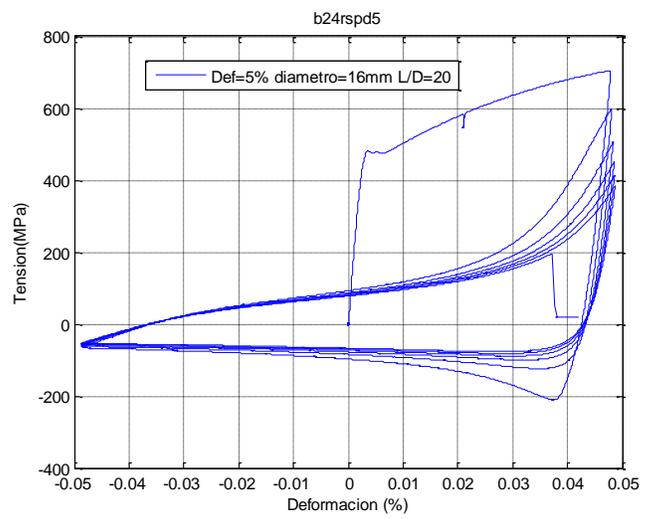
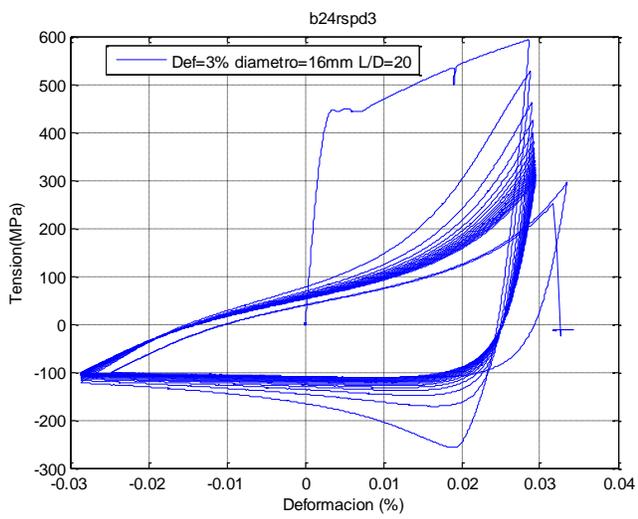
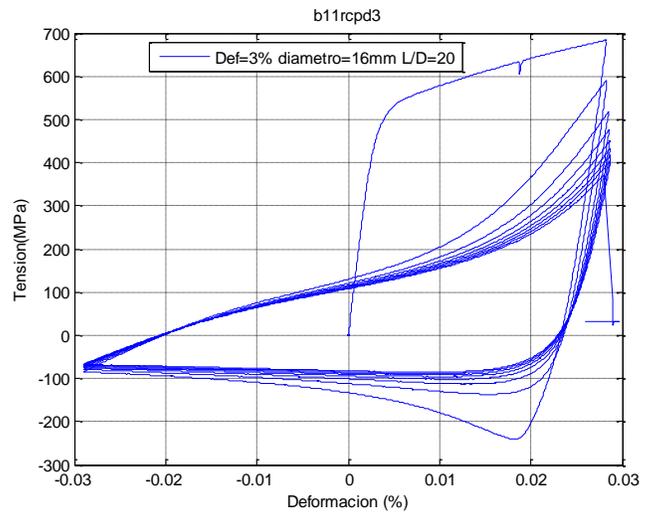
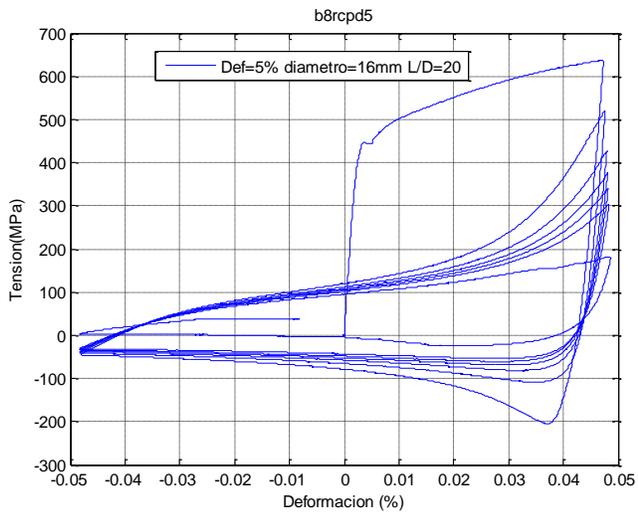


Figura 92: Gráficos tensión vs deformación unitaria b8rcpd5, b11rcpd3, b24rspd3 y b24rspd5.

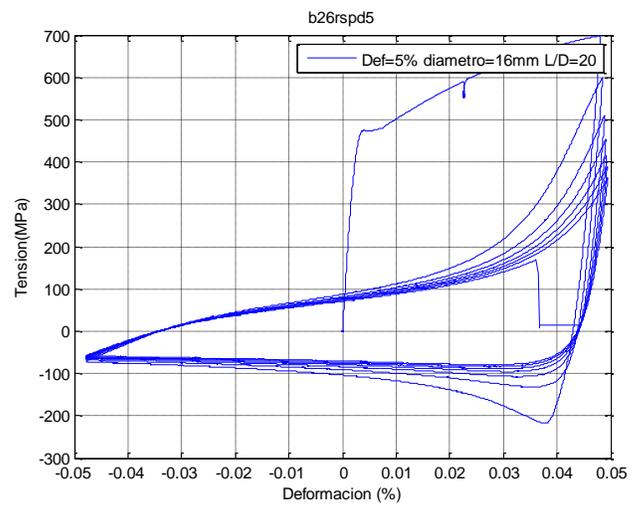
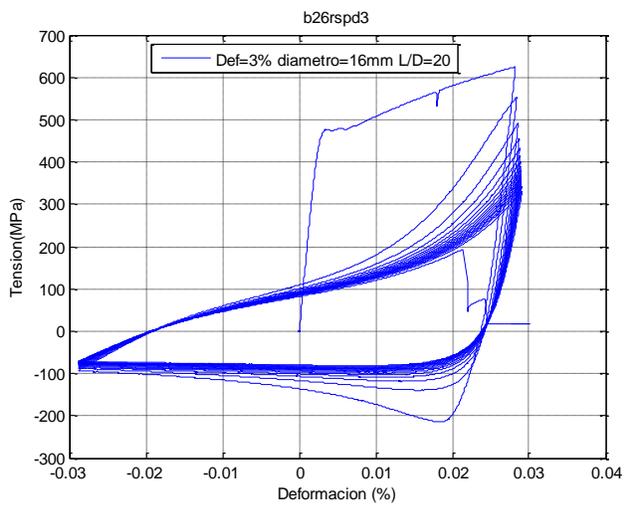
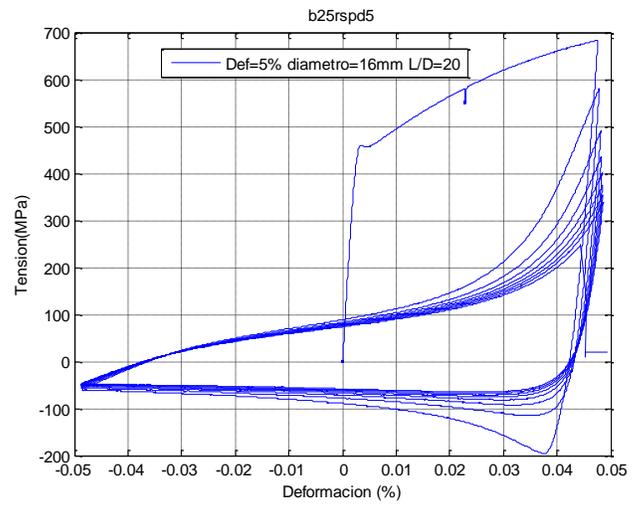
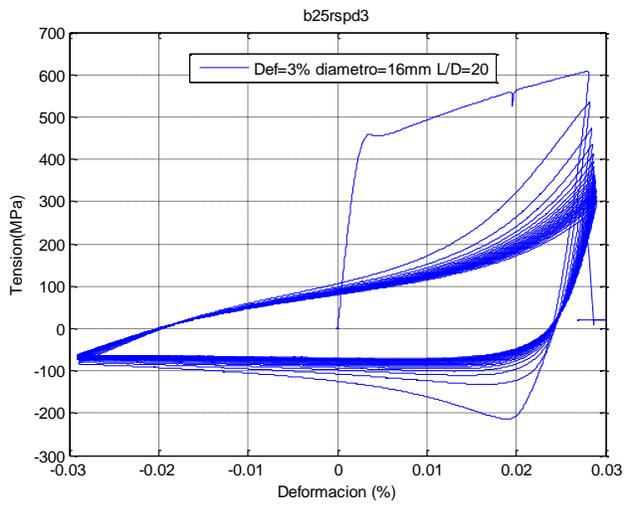


Figura 93: Gráficos tensión vs deformación unitaria b25rspd3, b25rspd5, b26rspd3 y b26rspd5.

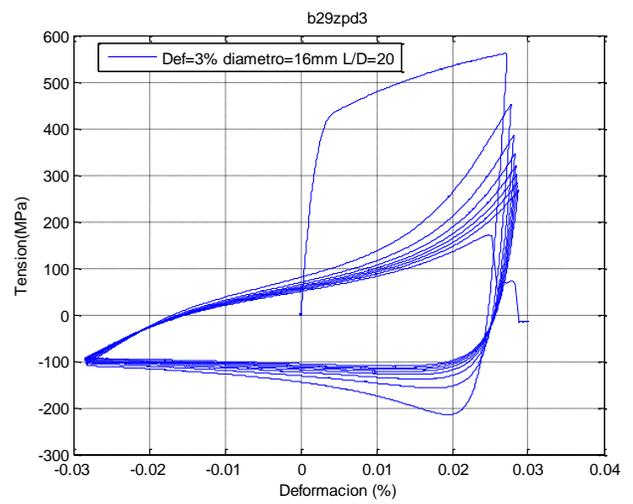
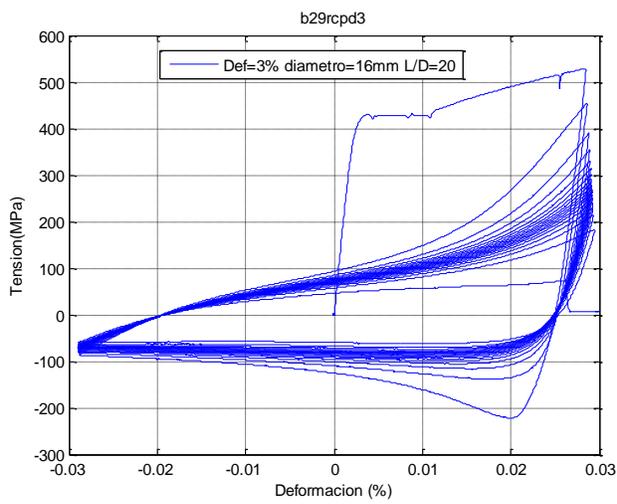


Figura 94: Gráficos tensión vs deformación unitaria b29rcpd3 y b29zpd3.

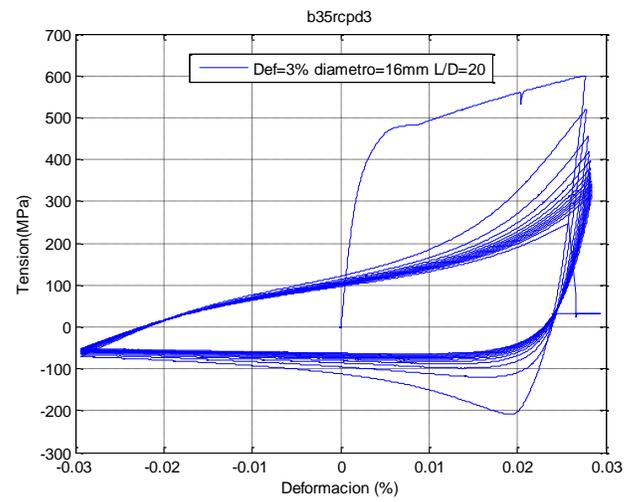
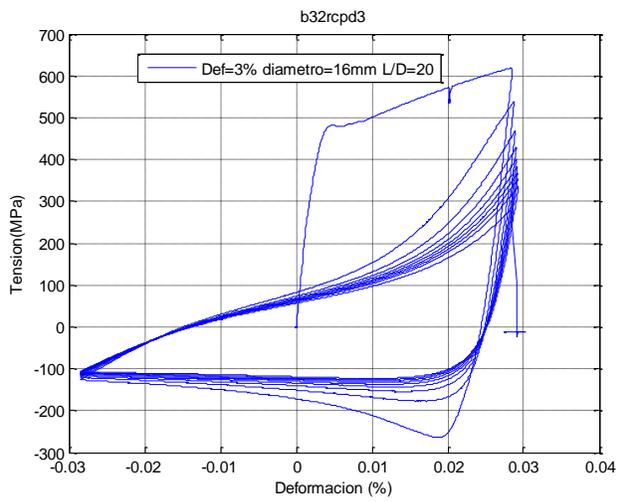
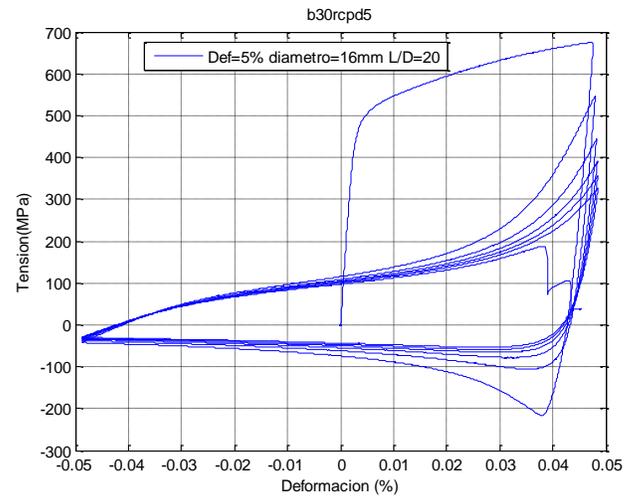
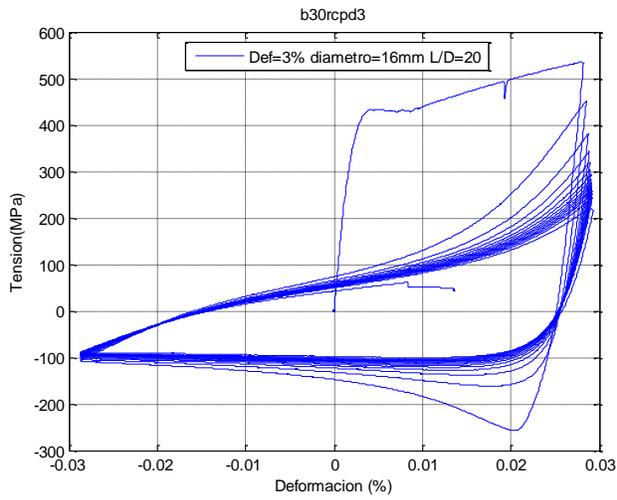


Figura 95: Gráficos tensión vs deformación unitaria b30rcpd3, b30rcpd5, b32rcpd3, b35rcpd3.

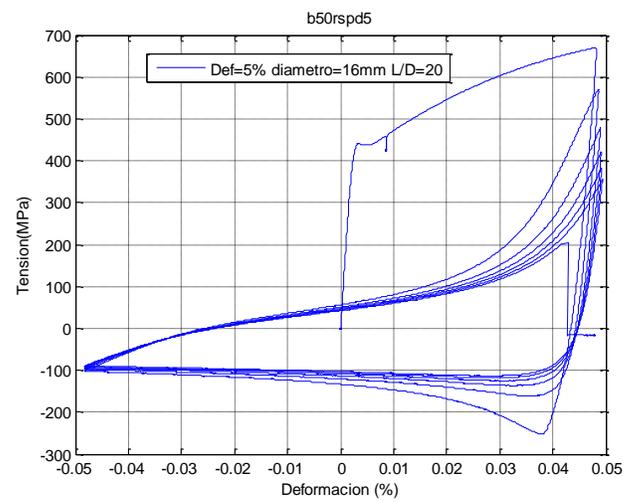
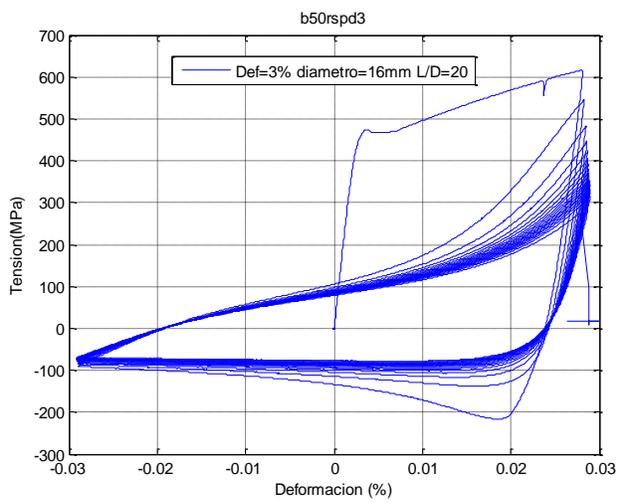


Figura 96: Gráficos tensión vs deformación unitaria b50rspd3 y b50rspd5.

BARRAS $\Phi 22$:

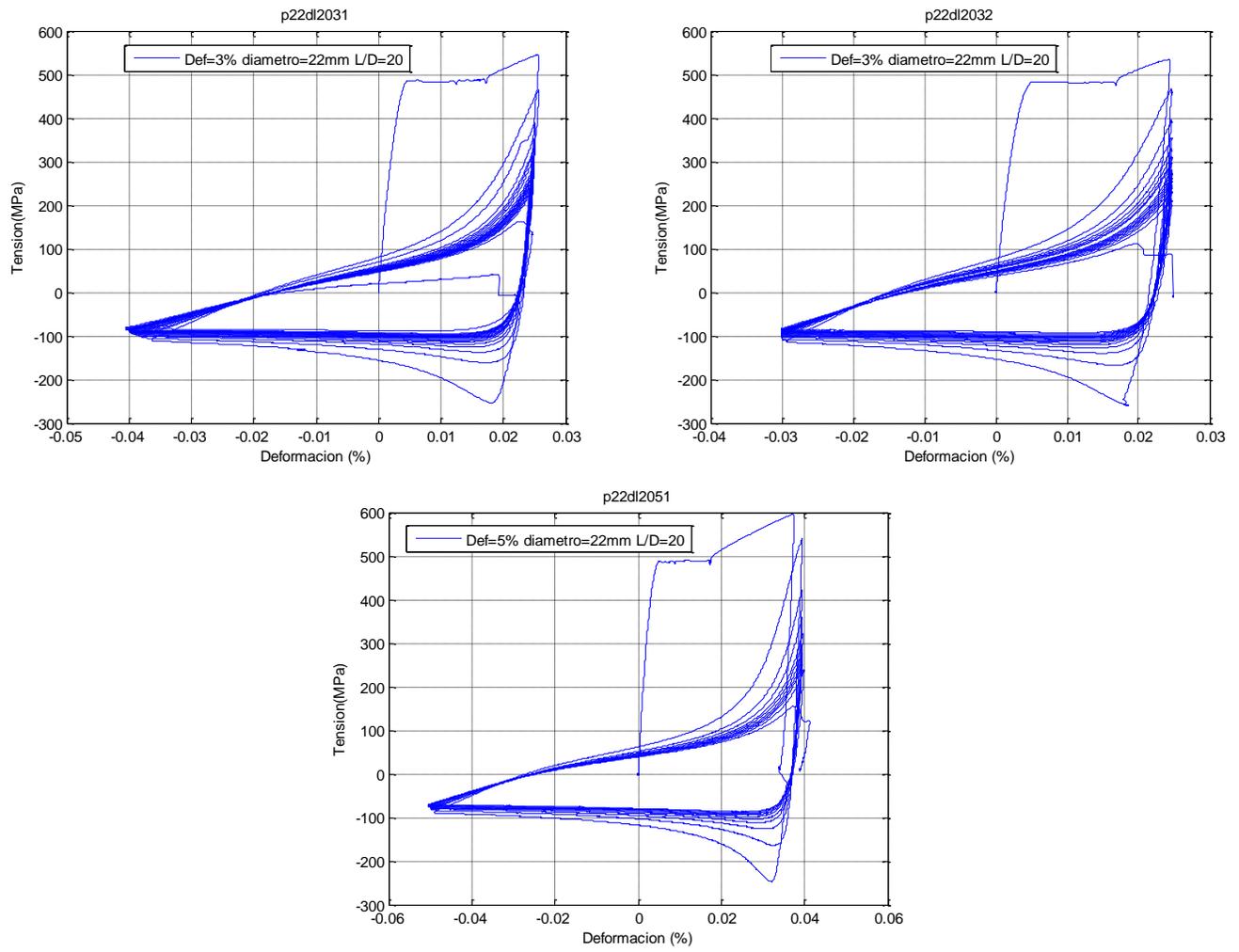


Figura 97: Gráficos tensión vs deformación unitaria p22dl20d31, p22dl20d32 y p22dl20d51.

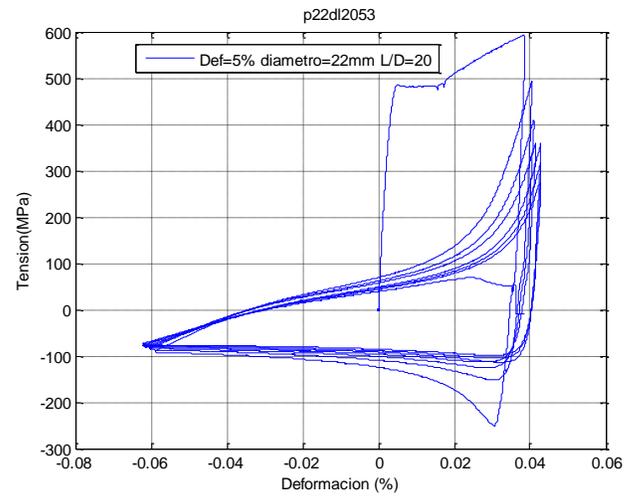
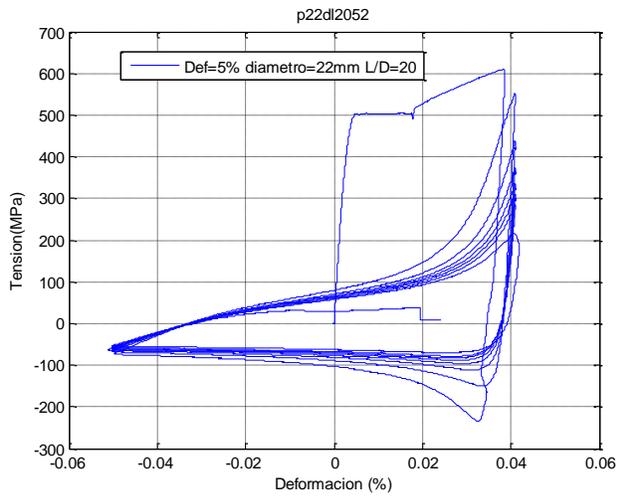


Figura 98: Gráficos tensión vs deformación unitaria p22dl20d52 y p22dl20d53.

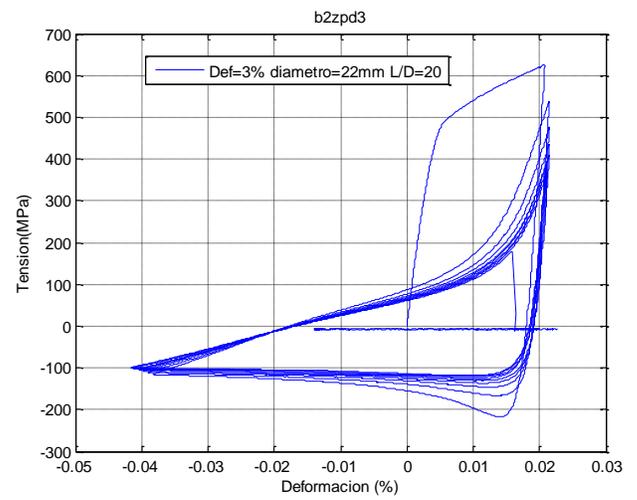
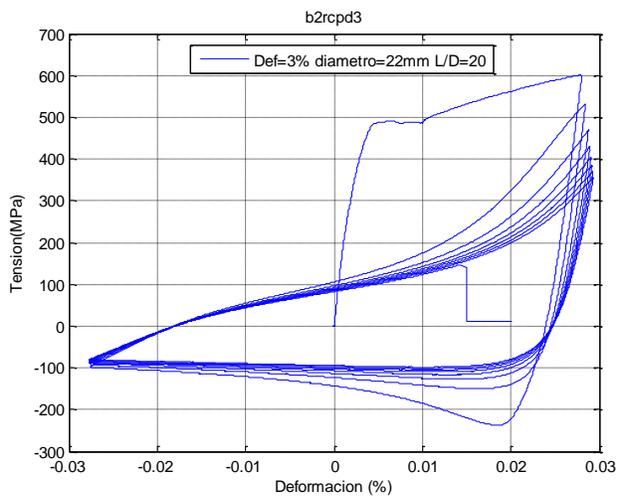
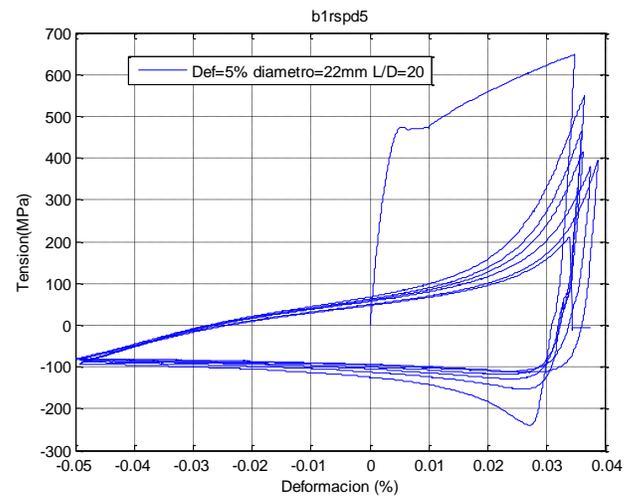
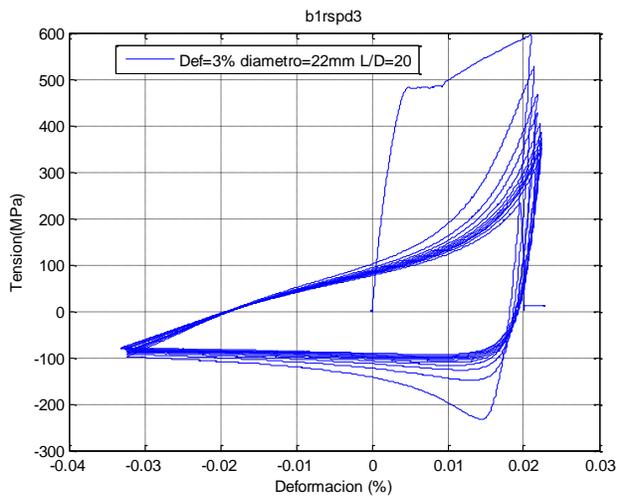


Figura 99: Gráficos tensión vs deformación unitaria b1rspd3, b1rspd5, b2rcpd3 y b2zpd3.

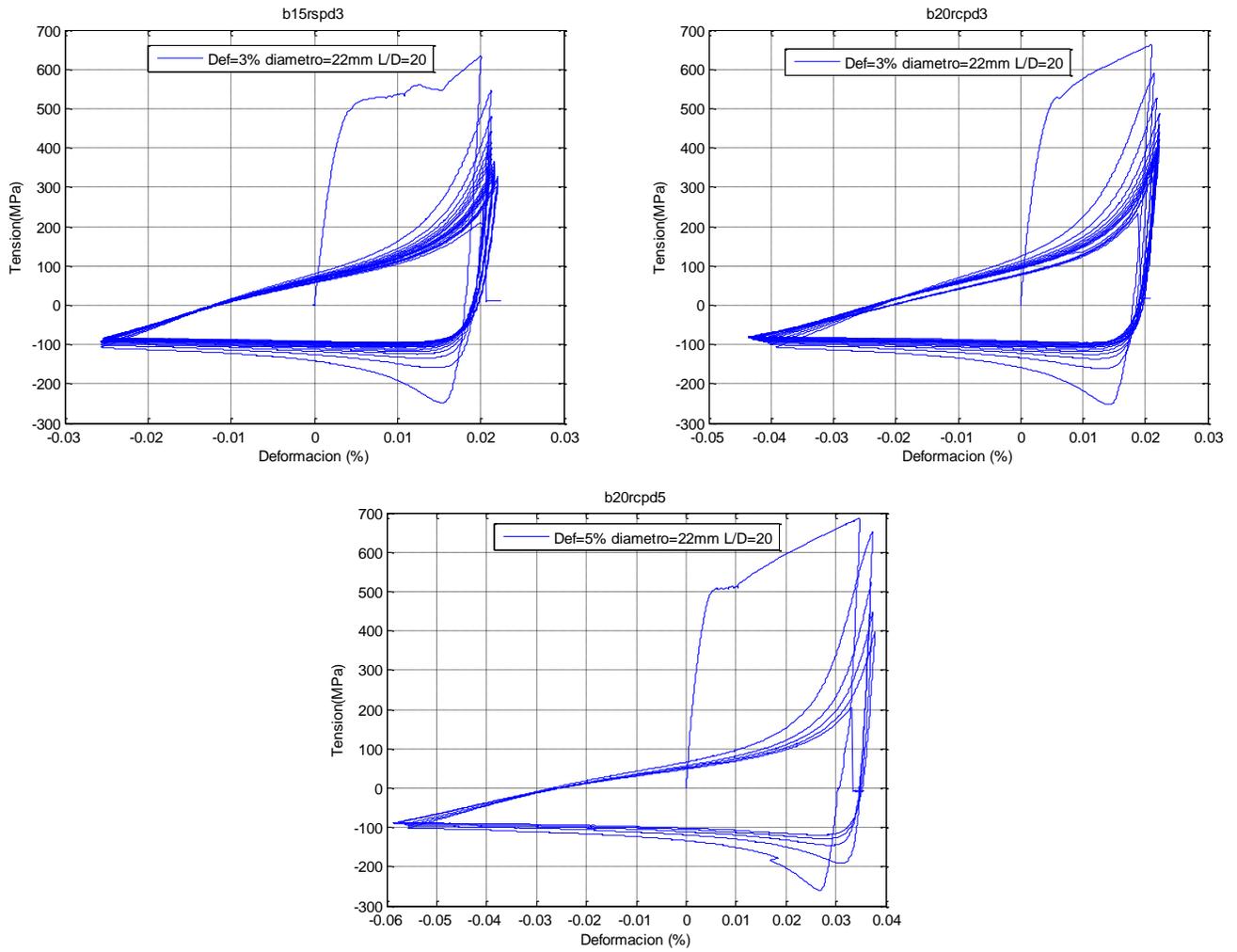


Figura 100: Gráficos tensión vs deformación unitaria b15rspd3, b20rcpd3 y b20rcpd5.

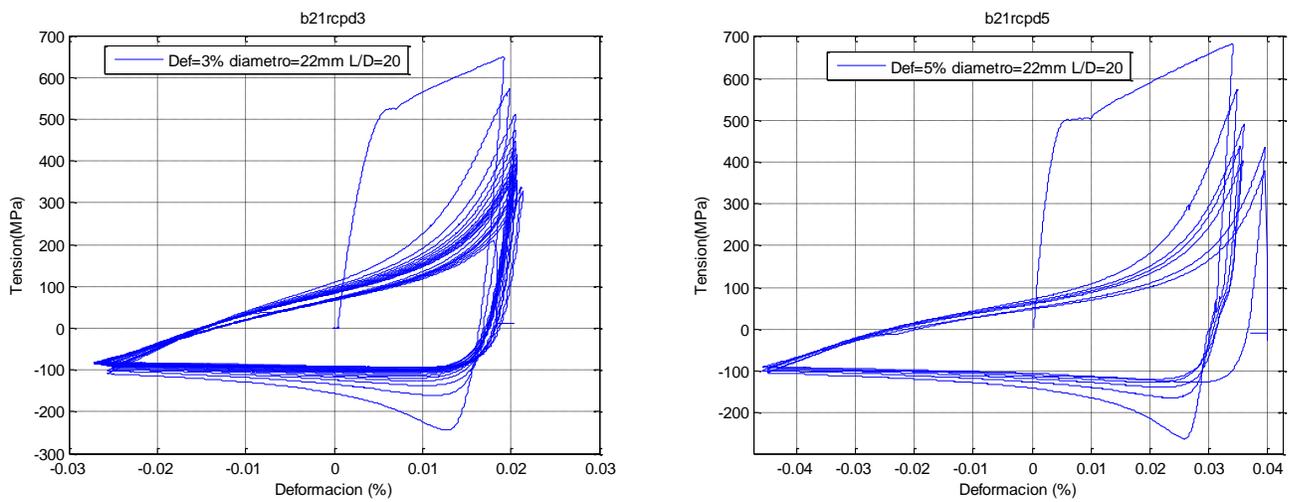


Figura 101: Gráficos tensión vs deformación unitaria b21rcpd3 y b21rcpd5.

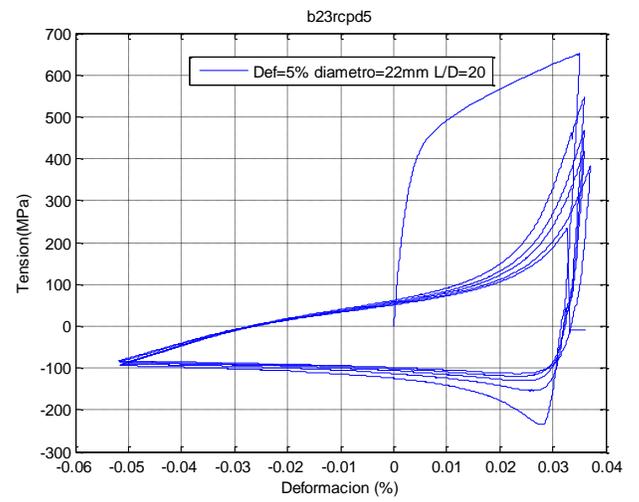
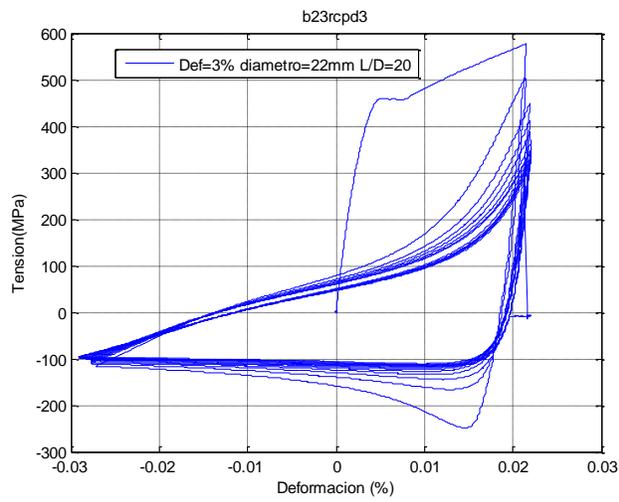
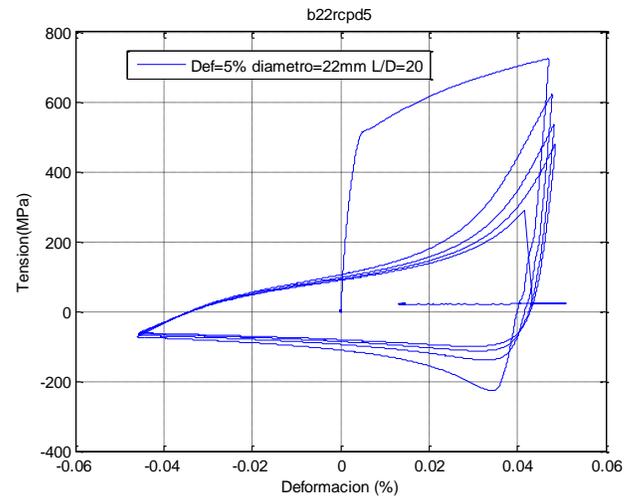
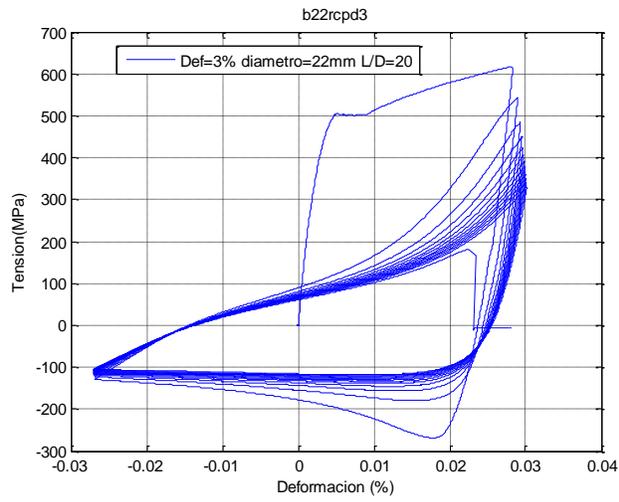


Figura 102: Gráficos tensión vs deformación unitaria b22rcpd3, b22rcpd5, b23rcpd3 y b23rcpd5.

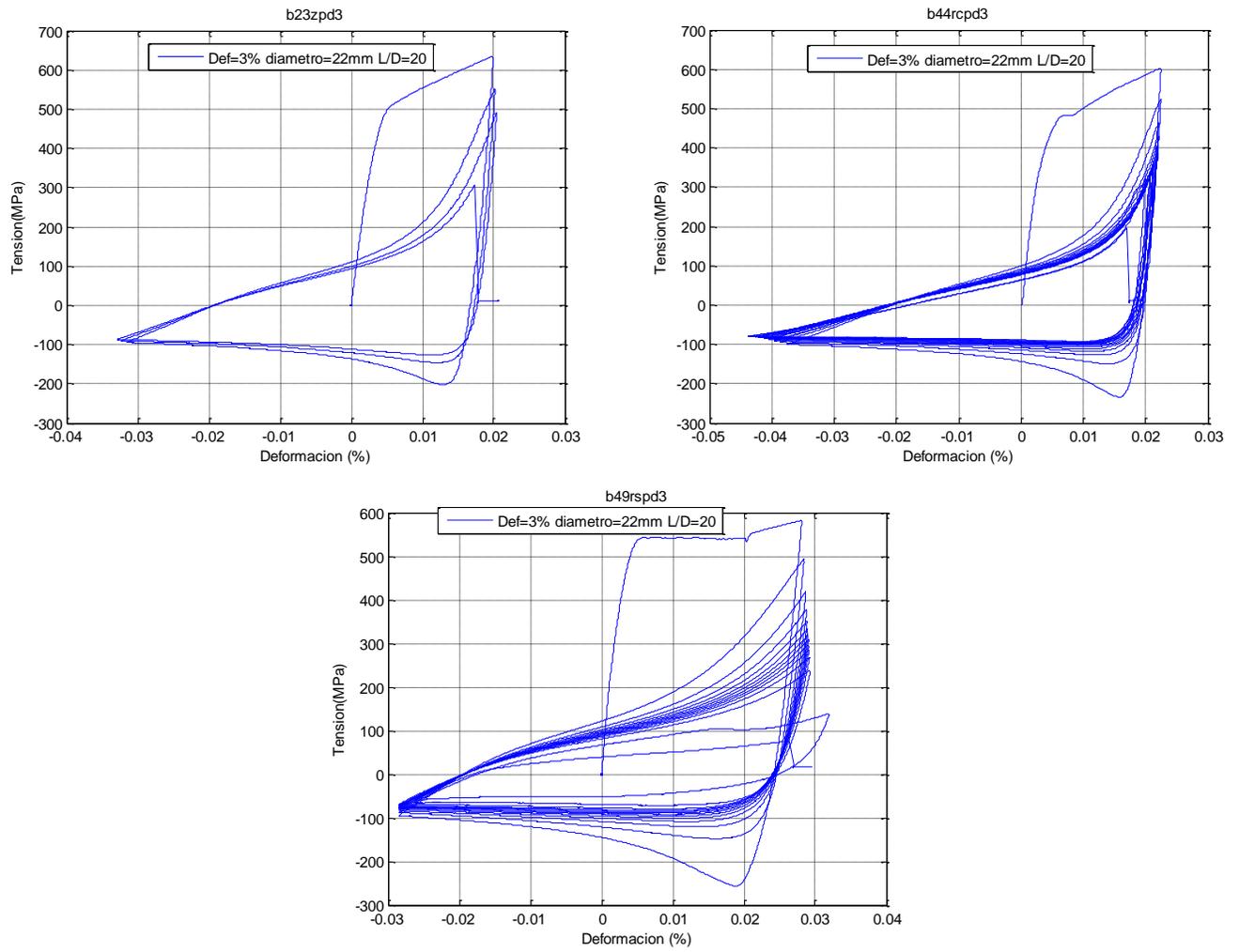


Figura 103: Gráficos tensión vs deformación unitaria b23zpd3, b44rcpd3 y b49rspd3.

BARRAS $\Phi 25$:

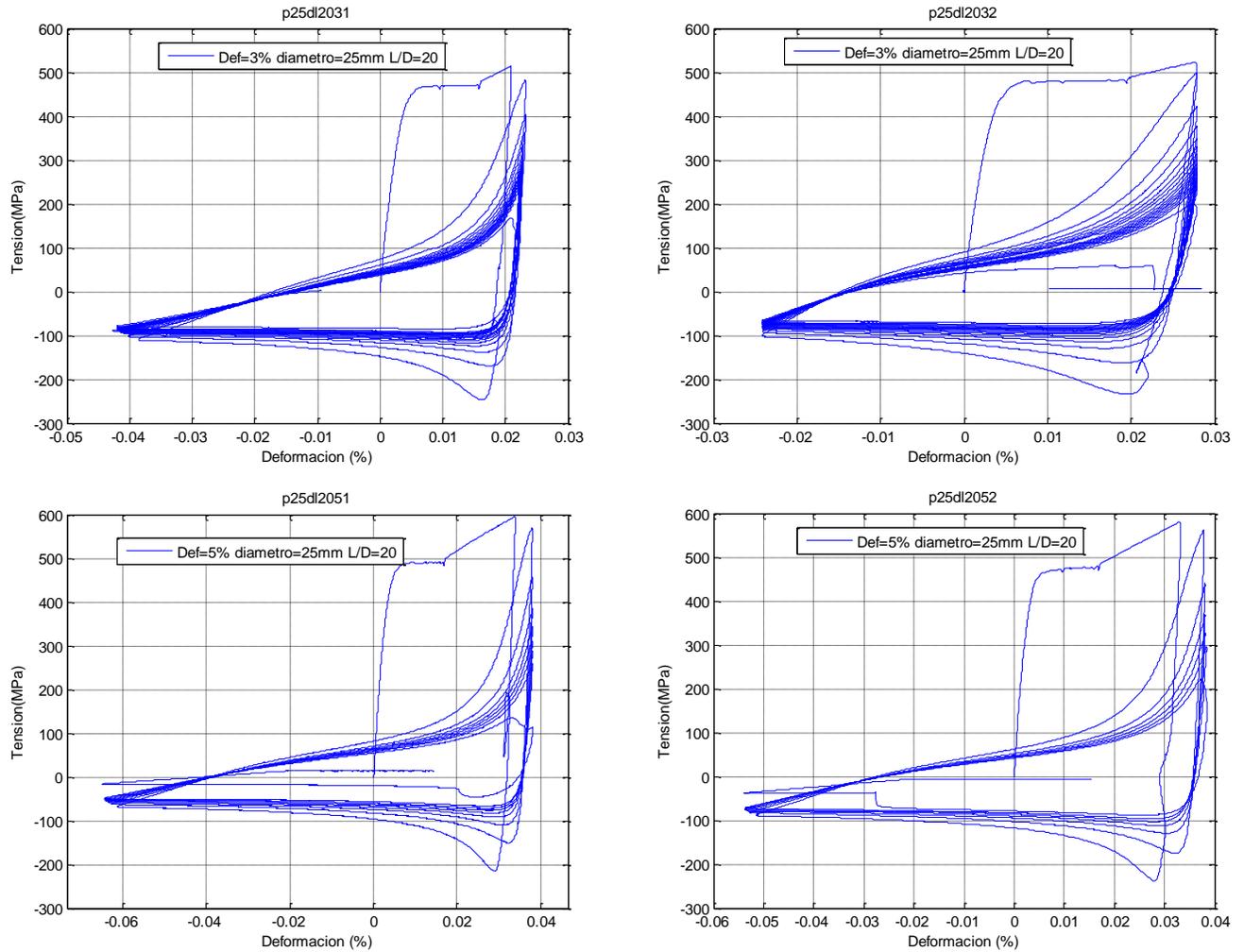


Figura 104: Gráficos tensión vs deformación unitaria p25dl20d31, p25dl20d32, p25dl20d51 y p25dl20d52.

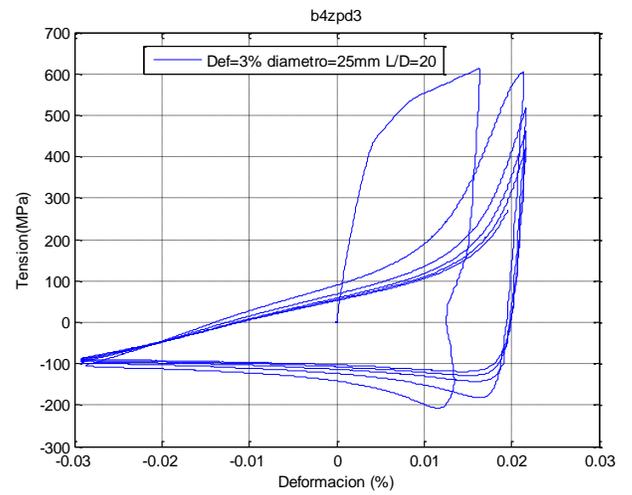
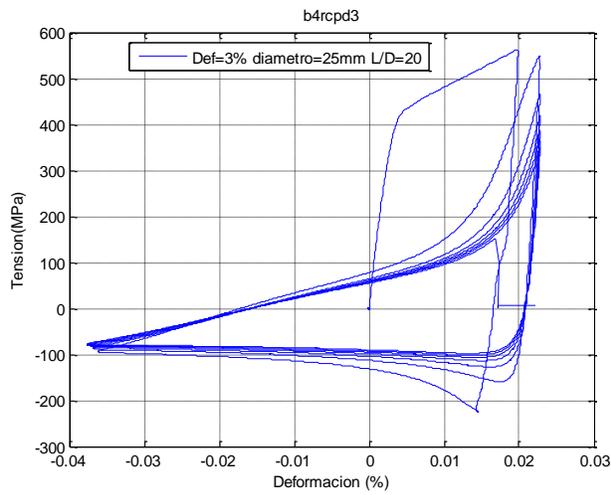
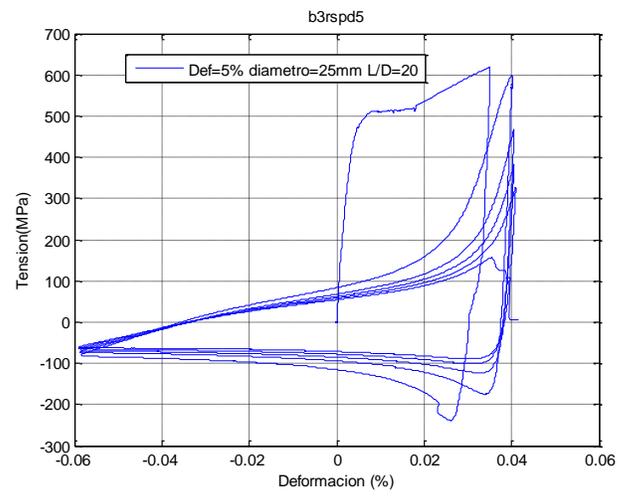
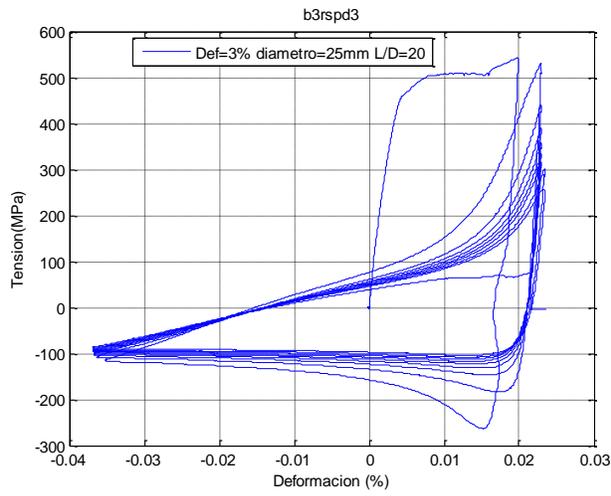


Figura 105: Gráficos tensión vs deformación unitaria b3rspd3, b3rspd5, b4rcpd3 y b4zpd3.

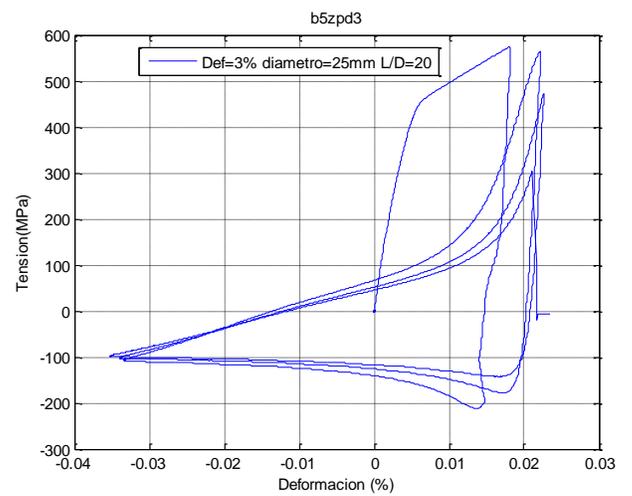
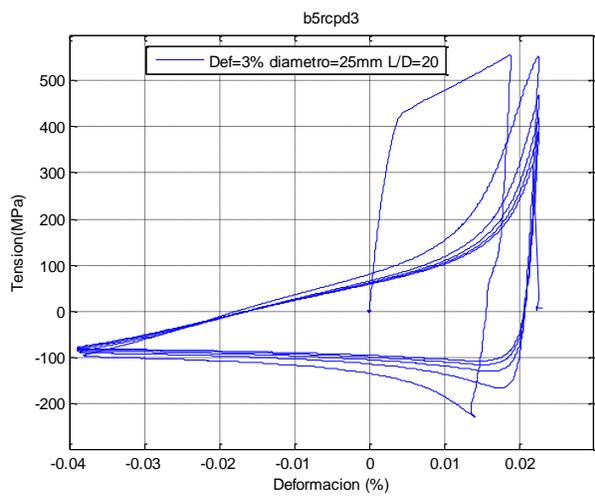


Figura 106: Gráficos tensión vs deformación unitaria b5rcpd3 y b5zpd3.

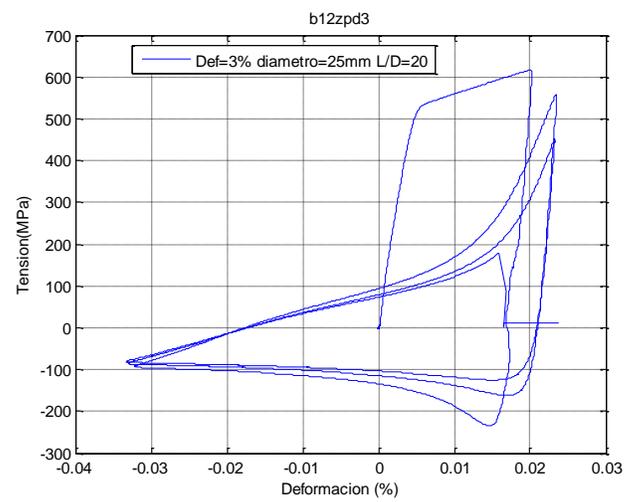
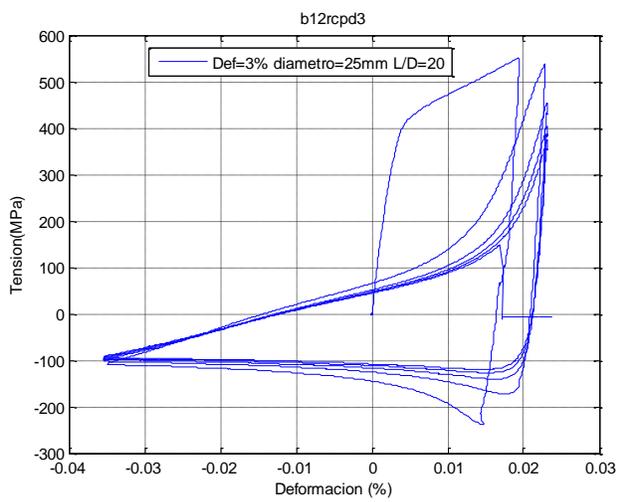
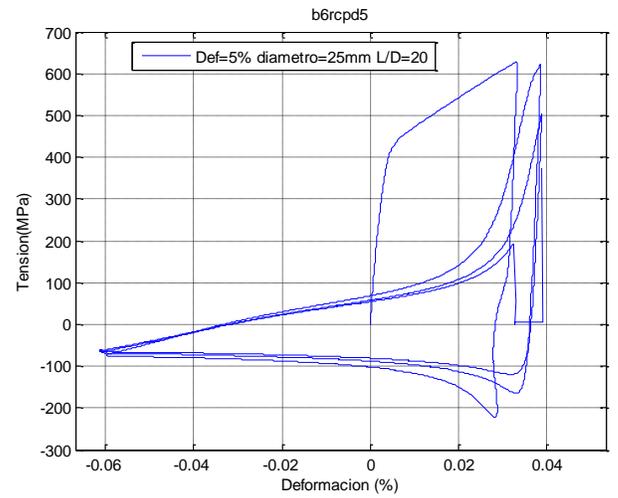
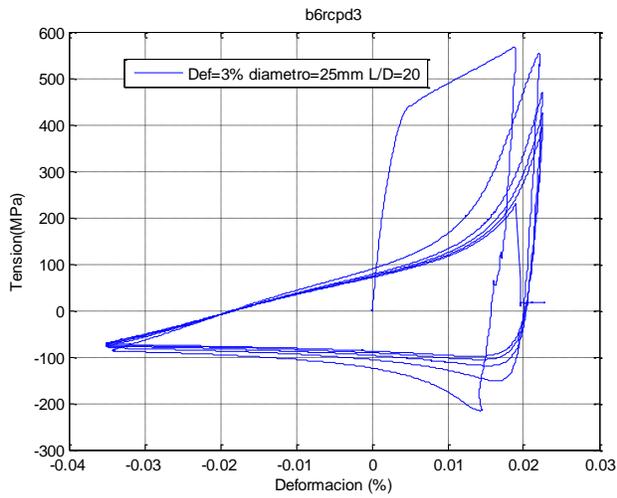


Figura 107: Gráficos tensión vs deformación unitaria b6rcpd3, b6rcpd5, b12rcpd3, b12zpd3.

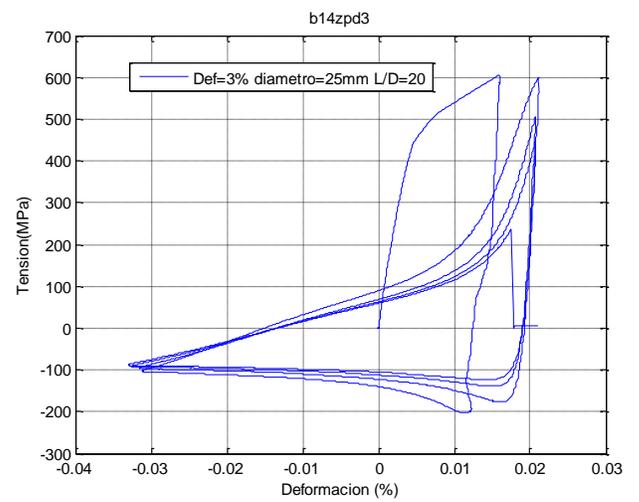
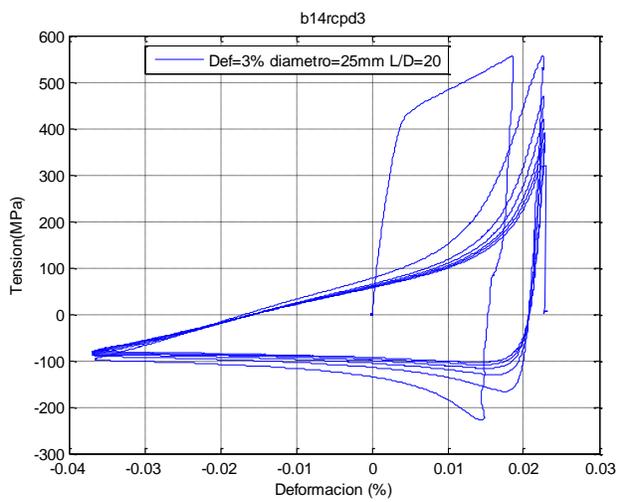


Figura 108: Gráficos tensión vs deformación unitaria b14rcpd3 y b14zpd3.

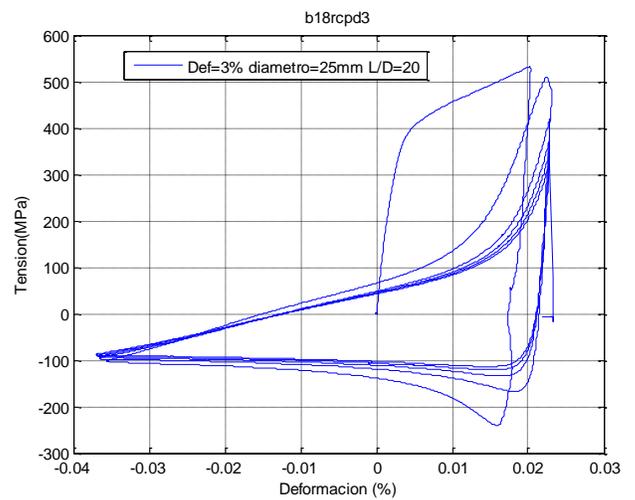
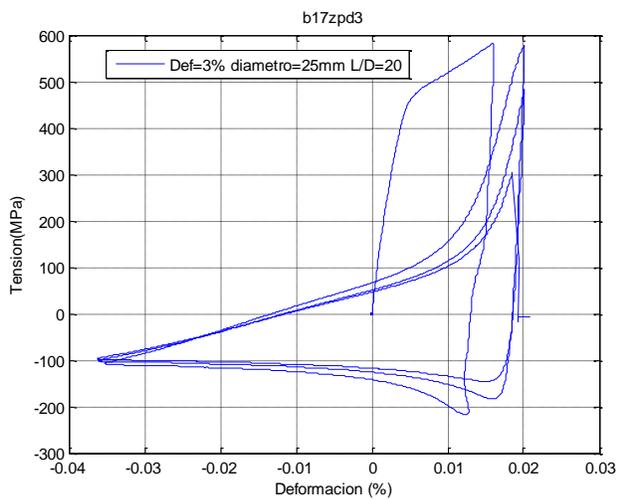
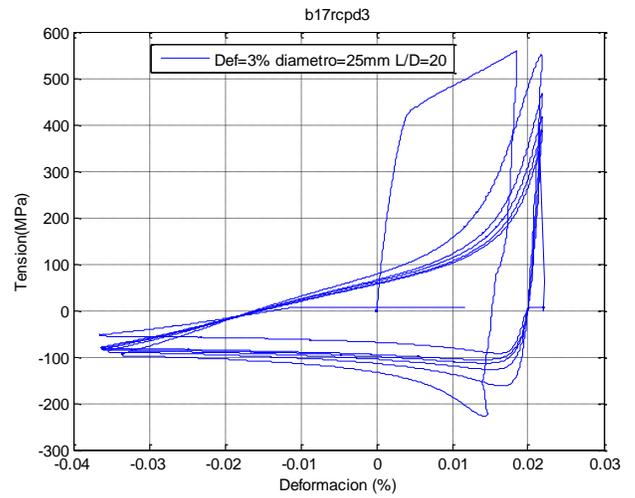
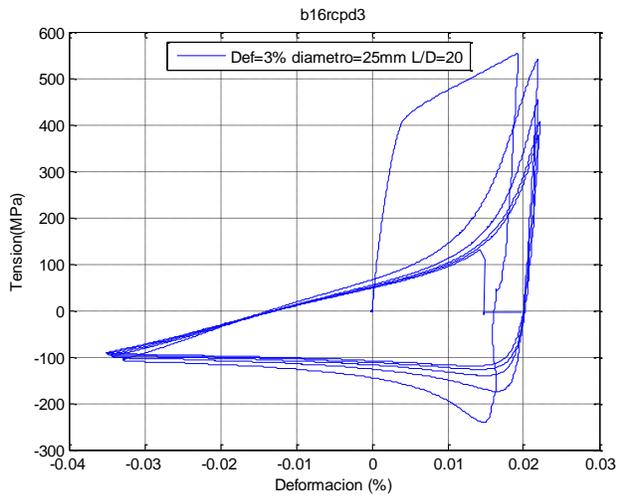


Figura 109: Gráficos tensión vs deformación unitaria b16rcpd3, b17rcpd3, b17zpd3 y b18rcpd3.

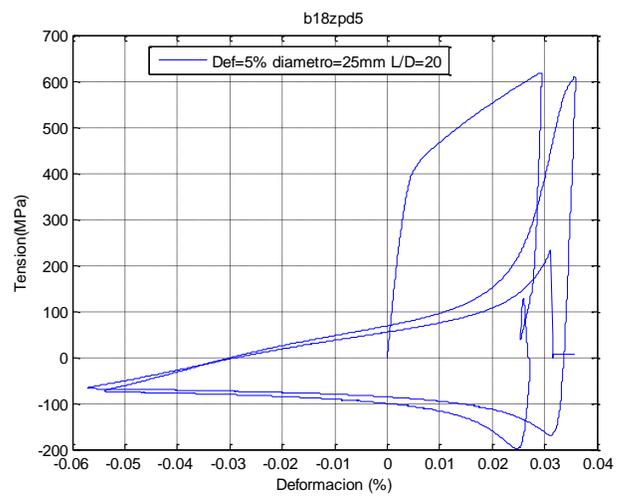
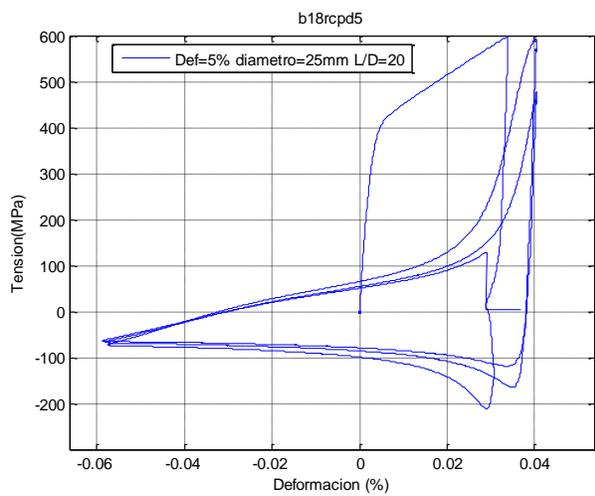


Figura 110: Gráficos tensión vs deformación unitaria b18rcpd5 y b18zpd5.

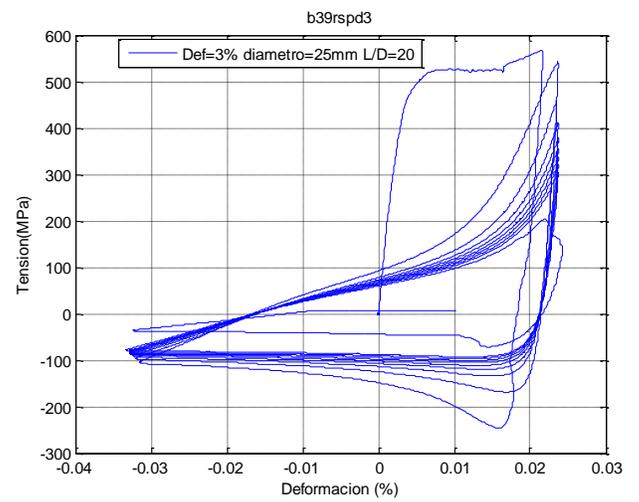
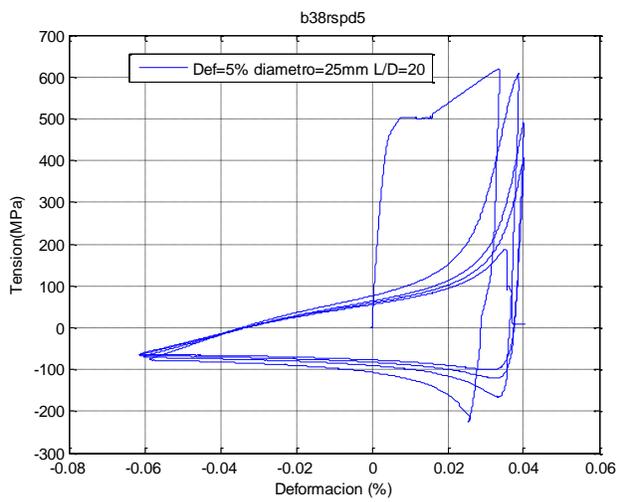
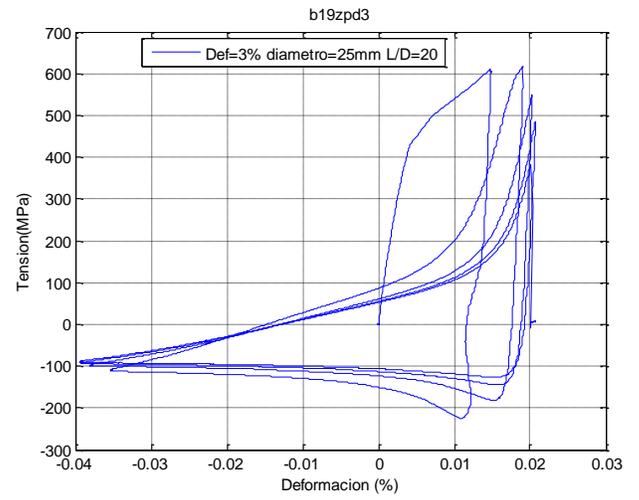
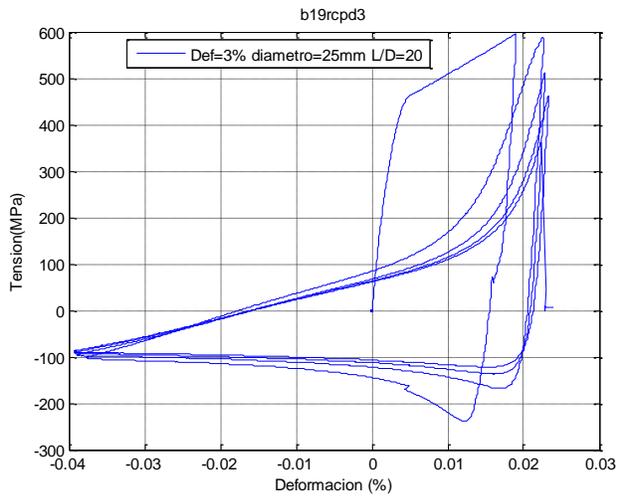


Figura 111: Gráficos tensión vs deformación unitaria b19rcpd3, b19zpd3, b38rspd5 y b39rspd3.