



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

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS MODOS DE FALLA PREDOMINANTES
EN PERFILES XL DE ACERO ESTRUCTURAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ROBINSON FRANCISCO GUERRERO MADRID

PROFESOR GUÍA:
RICARDO ANTONIO HERRERA MARDONES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES
RAMÓN MONTECINOS CONCHA

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: ROBINSON FRANCISCO GUERRERO MADRID
FECHA: SEPTIEMBRE 2017
PROF. GUÍA: RICARDO HERRERA MARDONES

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS MODOS DE FALLA PREDOMINANTES EN PERFILES XL DE ACERO ESTRUCTURAL

El presente trabajo de título tiene como objetivo estudiar los modos de falla predominantes en perfiles XL de acero estructural sometidos directamente a cargas monotónicas y cíclicas incrementales, con el fin de comprobar si se cumplen las relaciones entre la curva de pandeo y las relaciones geométricas de esbeltez encontradas en memorias anteriores.

Para ello se llevan a cabo 6 experimentos en el Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, donde se prueban 3 pares de perfiles XL diseñados en base a las normas de la AISC, conformados por ángulos de iguales dimensiones, soldados a placas gusset de iguales características, y con 3 conectores intermedios soldados ubicados en los cuartos de su longitud de pandeo, variando solo esta última medida entre los pares, nombrados como “cortos”, “intermedios” y “largos”. Durante los ensayos se utilizan LVDT’s, inclinómetros y una celda de carga para registrar los desplazamientos de la sección transversal, el cambio de longitud de los especímenes, los movimientos del montaje experimental, y la fuerza de reacción provocada por la riostra.

El resultado esperado era que los perfiles más cortos mostraran un pandeo torsional, que los de longitud intermedia tuvieran un pandeo flexo-torsional, y que los más largos exhibieran un pandeo de flexión pura. Sin embargo, los 6 perfiles XL manifiestan un pandeo de flexión en torno a su eje geométrico vertical, por lo que no se cumple la relación entre su esbeltez y el modo de falla encontrada en los estudios numéricos de elementos finitos. No obstante, hay que mencionar que los experimentos se diferenciaban de los modelos en las restricciones de desplazamiento y giro del conector central y en la esbeltez local de los ángulos.

Por otro lado, todos los especímenes muestran una rótula plástica ubicada en el ala horizontal de un ángulo, entre el conector central y uno extremo, que separa la riostra en 2 tramos y permite la libre rotación de ambas partes en los desplazamientos a compresión, donde se propaga paulatinamente una grieta por fatiga de material, es decir, sin falla frágil, siendo este mecanismo el que produce la mayor disipación de energía. Además, la deformación fuera del plano durante la compresión es tan grande que se produce la fluencia del material en las fibras traccionadas por flexión, en el ángulo opuesto de la formación de la rótula, que luego se manifiesta como un pandeo en aquel punto al momento de enderezar el perfil.

Finalmente, 4 de los perfiles superan la capacidad esperada a compresión, mientras que los perfiles cortos solo sobrepasan la nominal calculada con la fluencia experimental del acero componente. Asimismo, ningún espécimen fue capaz de superar la capacidad nominal a tracción dada por la fluencia del estudio de materiales.

A mis padres, con mucho cariño.

Agradecimientos

Quisiera comenzar este trabajo agradeciendo a todas las personas que lo hicieron posible y que estuvieron presentes durante su desarrollo, así como también a todos los que hicieron que mi paso por la Universidad de Chile fuera de las mejores etapas de mi vida.

Primero que nada, agradecer al profesor Ricardo Herrera por confiarme esta investigación experimental, y por toda la ayuda y buena disposición que siempre tuvo durante cada parte del trabajo. Asimismo, agradecer a los profesores Juan Felipe Beltrán y Ramón Montecinos por aceptar ser parte de mi comisión y brindarme ayuda las veces que se los solicité, y a todos los profesores que fueron parte de mi formación profesional.

También quiero agradecer a las personas que me ayudaron en el difícil trabajo de laboratorio: al profesor Pedro Soto por estar controlando el actuador durante la realización de los ensayos, y a Víctor y los técnicos del IDIEM que me prestaron su ayuda para la preparación de los mismos. Además, a Eduardo Nuñez por los consejos que me daba, siempre con una muy buena disposición.

Quiero agradecer también a los Doggers, los amigos que conozco desde que éramos unos niños en el colegio, y con los cuales he vivido infinidad de cosas, y por qué sé que siempre estarán ahí y que puedo contar con ellos para lo que sea.

Gracias a los de la sección 4, por el gran grupo que se armó desde el primer día y durante los primeros años en la facultad, y por hacer más amigable e inolvidable la nueva experiencia que estábamos viviendo.

Muchas gracias a los Civiles, por todo lo vivido durante la especialidad y por hacer aquellos años los mejores de mi paso por la Chile. Tengo muchos recuerdos muy bonitos, desde los momentos de ocio y diversión hasta los momentos de estudio con pizza. Sin ustedes no podría haber llegado a este punto.

Gracias además a los Estructurals, por todo el aprendizaje que nos damos mutuamente en torno a la especialización que escogimos, siempre con la cuota de humor sin sentido.

También quiero darle las gracias a mi polola, Nati, por estar presente durante gran parte de la realización de este trabajo y por subirme el ánimo cuando me frustraba.

Quiero agradecer a mi familia: a mis tías por cuidarme toda la vida y ayudarme en cualquier cosa que necesite, y a mis hermanas Cata y Maca por apoyarme, aguantarme y enseñarme cosas desde pequeño, y por saber que siempre van a estar para mí sin importar lo que pase.

Por último, pero más importante, quiero agradecer a mis padres, Mónica y Robinson, por habérmelo dado absolutamente todo en mi vida mediante su amor y su sacrificio. Todo lo que he logrado ser hasta ahora es debido a ellos y por eso voy a estar eternamente agradecido.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 DEFINICIÓN DE UN PERFIL XL:	1
1.2 MOTIVACIÓN:	2
1.3 OBJETIVOS:	3
1.3.1 OBJETIVO GENERAL:	3
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	3
1.4 ALCANCES:	4
2. ANTECEDENTES	5
2.1 NORMAS:	5
2.1.1 NCH2369. OF 2003:	5
2.1.2 ANSI / AISC 360-16:	6
2.1.3 ANSI / AISC 341-16:	8
2.2 ESTUDIOS ANALÍTICOS, NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES:	10
2.2.1 MOLINA, 2014:	10
2.2.2 CLAVERIE, 2016 / CLAVERIE & HERRERA, 2017:	10
2.2.3 BEULAH GNANA ANANTHI, VISHUVARDHAN, & SAMUEL KNIGHT, 2015:	14
2.2.4 GURU AGASTHEESH & SENTHIL SELVAN, 2016:	15
2.2.5 VISHNUVARDHAN & SAMUEL KNIGHT, 2008:	15
2.2.6 HAIFENG, XUMING, & JUNKE, 2016:	16
2.2.7 WOLMARANS & KRIGE, 1991:	18
2.2.8 TEMPLE, SCHEPERS, & KENNEDY, 1986:	18
2.3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:	19
3. DISEÑO DE PERFILES	20
3.1 SELECCIÓN DE MATERIALES:	20
3.2 LIMITACIONES DEL DISEÑO:	21
3.3 VERIFICACIÓN DE PERFILES XL:	22
3.3.1 LÍMITES DE ESBELTEZ:	22
3.3.2 RESISTENCIA A LOS DISTINTOS MODOS DE FALLA:	23
3.3.3 CONEXIONES:	23
4. METODOLOGÍA	25
4.1 MONTAJE EXPERIMENTAL:	25
4.1.1 ANCLAJE DEL ACTUADOR HIDRÁULICO:	26
4.1.2 UNIÓN RIOSTRA – ACTUADOR:	27
4.1.3 APOYO DESLIZANTE:	28
4.1.4 APOYO SIMPLE:	31
4.2 INSTRUMENTACIÓN:	33
4.2.1 DESPLAZAMIENTO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL:	34
4.2.2 GIRO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL:	36
4.2.3 CAMBIO DE LONGITUD DEL PERFIL XL:	37
4.2.4 MOVIMIENTO DEL APOYO SIMPLE:	39
4.2.5 DESPLAZAMIENTO APLICADO Y REACCIÓN DEL PERFIL XL:	40
4.2.6 CALIBRACIONES:	40
4.3 PREPARACIÓN Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYO:	43

5. ENSAYOS DE MATERIALES	45
5.1 FABRICACIÓN Y ENSAYO DE PROBETAS:	45
5.2 RESULTADOS:	46
5.2.1 PROBETAS DE ÁNGULO:	46
5.2.2 PROBETAS DE PLACAS:	47
6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
6.1 TRABAJO DE DATOS:	48
6.1.1 DESPLAZAMIENTO DEL ACTUADOR:	48
6.1.2 ENERGÍA DISIPADA:	48
6.1.3 DEFORMACIÓN INELÁSTICA ACUMULADA:	49
6.2 PERFILES INTERMEDIOS:	49
6.2.1 MONOTÓNICO:	49
6.2.2 CÍCLICO:	53
6.3 PERFILES LARGOS:	59
6.3.1 MONOTÓNICO:	59
6.3.2 CÍCLICO:	63
6.4 PERFILES CORTOS:	67
6.4.1 MONOTÓNICO:	67
6.4.2 CÍCLICO:	71
6.5 RESUMEN:	74
7. CONCLUSIONES	78
7.1 RESULTADOS DE LOS PERFILES XL:	78
7.2 RECOMENDACIONES PARA EXPERIMENTOS:	79
7.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:	80
BIBLIOGRAFÍA	81
ANEXOS	83
A. CURVAS DE ENSAYO DE MATERIALES:	83
I. PROBETAS DE ÁNGULO:	83
II. PROBETAS DE PLACA:	86
B. REGISTRO DE DATOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO:	88
I. INTERMEDIO MONOTÓNICO:	88
II. INTERMEDIO CÍCLICO:	91
III. LARGO MONOTÓNICO:	94
IV. LARGO CÍCLICO:	97
V. CORTO MONOTÓNICO:	100
VI. CORTO CÍCLICO:	103
C. GRÁFICOS EXTRA DE RESULTADOS:	106
I. INTERMEDIO MONOTÓNICO:	106
II. INTERMEDIO CÍCLICO:	107
III. LARGO MONOTÓNICO:	109
IV. LARGO CÍCLICO:	110
V. CORTO MONOTÓNICO:	112
VI. CORTO CÍCLICO:	113

D. MEMORIAS DE CÁLCULO:	115
I. PERFIL XL CORTO:	115
II. PERFIL XL INTERMEDIO:	120
III. PERFIL XL LARGO:	125
E. PLANO DE FABRICACIÓN DE PERFILES:	130
F. EQUIVALENCIA DE UNIDADES SI	131

Índice de Tablas

TABLA 2.1: RESTRICCIONES DE DESPLAZAMIENTOS DE LOS MODELOS DE CLAVERIE (2016). R=RESTRINGIDO, F=LIBRE.	11
TABLA 2.2: RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE ESBELTEZ DE LOS PERFILES XL Y SU MODO DE FALLA, OBTENIDO POR CLAVERIE (2016).	12
TABLA 3.1: PROPIEDADES DE LOS ACEROS QUE CONFORMAN LOS DISTINTOS ELEMENTOS DE LOS PERFILES XL.	20
TABLA 3.2: PERNOS, TUERCAS Y GOLILLAS PARA LA CONEXIÓN DE LOS EXTREMOS DE LA RIOSTRA.	20
TABLA 3.3: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ELECTRODO DE SOLDADURA.	21
TABLA 3.4: CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS PERFILES XL EN ESTUDIO.	22
TABLA 3.5: VERIFICACIÓN DE LOS LÍMITES DE ESBELTEZ DE LOS PERFILES EN ESTUDIO (“SI” = CUMPLE CON EL LÍMITE; “NO” = NO CUMPLE CON EL LÍMITE).	22
TABLA 3.6: RESISTENCIA DE LOS PERFILES XL A CADA MODO DE FALLA EN BASE A LAS DISPOSICIONES DE LA ANSI / AISC 360-16.	23
TABLA 4.1: CONSTANTES DE PROPORCIONALIDAD DE LOS LVDT.	41
TABLA 4.2: CONSTANTES DE PROPORCIONALIDAD DE LOS INCLINÓMETROS.	41
TABLA 4.3: ORDEN Y FECHAS DE LOS ENSAYOS DE LOS PERFILES XL.	44
TABLA 5.1: RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN PARA LAS PROBETAS DE ÁNGULO.	47
TABLA 5.2: RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN PARA LAS PROBETAS DE PLACA.	47
TABLA 6.1: RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS QUE SE OBSERVAN DURANTE EL PANDEO DE LOS PERFILES XL.	75
TABLA 6.2: RESUMEN DE LA CAPACIDAD EXPERIMENTAL DE LOS PERFILES XL Y SU COMPARACIÓN CON EL CÁLCULO (TABLA 3.6) (VERDE = PERFIL CUMPLE CAPACIDAD CALCULADA; NARANJO = PERFIL NO CUMPLE CAPACIDAD CALCULADA).	76
TABLA 6.3: RESUMEN DE LA DEFORMACIÓN INELÁSTICA ACUMULADA Y EL MÁXIMO GIRO DE LOS PERFILES XL.	76

Índice de Figuras

FIGURA 1.1: VISTA ISOMÉTRICA DE UN PERFIL XL CON 3 PLACAS INTERCONECTORAS SOLDADAS Y CON UNA CONEXIÓN SOLDADA.....	1
FIGURA 1.2: SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN PERFIL XL.....	2
FIGURA 1.3: FALLAS DE PERFILES XL PRODUCTO DEL TERREMOTO DEL MAULE DE 2010: (A) PANDEO LOCAL; (B) FALLA DE CONEXIÓN POR PANDEO TORSIONAL; (MONTECINOS ET AL., 2012).	3
FIGURA 2.1: ÁNGULO LAMINADO PARA LAS DEFINICIONES DE LA NCH2369. OF 2003.....	5
FIGURA 2.2: REQUERIMIENTO DE DISTANCIA RIOSTRA-GUSSET PARA LOGRAR PANDEO FUERA DEL PLANO (AISC, 2016A).....	9
FIGURA 2.3: GEOMETRÍA DE LOS CONECTORES INTERMEDIOS Y DE LA PLACA GUSSET DEL PERFIL XL (CLAVERIE, 2016).....	11
FIGURA 2.4: PUNTOS DE RESTRICCIÓN DE DESPLAZAMIENTOS UTILIZADOS POR CLAVERIE (2016).....	11
FIGURA 2.5: PROTOCOLO DE DESPLAZAMIENTOS UTILIZADO POR CLAVERIE (2016).....	12
FIGURA 2.6: ZONA DE FORMACIÓN DE LA RÓTULA PLÁSTICA EN MODELOS. (A) RIOSTRAS CON 3 PLANCHAS; (B) RIOSTRAS CON 7 PLANCHAS. ESCALA DE COLORES INDICA NIVEL DE DEFORMACIÓN (CLAVERIE, 2016).....	13
FIGURA 2.7: SECCIÓN TRANSVERSAL UTILIZADA EN EL TRABAJO DE BEULAH GNANA ANANTHI ET AL. (2015).....	14
FIGURA 2.8: FALLA POR PANDEO TORSIONAL EN EL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE BEULAH GNANA ANANTHI ET AL. (2015).	14
FIGURA 2.9: PANDEO TORSIONAL DE UN PERFIL XL CON CONEXIÓN APERNADA (VISHNUVARDHAN & SAMUEL KNIGHT, 2008).	16
FIGURA 2.10: CONFIGURACIÓN RECOMENDADA DE CONECTORES INTERMEDIOS EN PERFILES XL (WOLMARANS & KRIGE, 1991).	18
FIGURA 3.1: PERFILES XL LISTOS PARA EL DESPACHO.	24
FIGURA 4.1: ACTUADOR HIDRÁULICO DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL.	25
FIGURA 4.2: MODELO 3D DEL MONTAJE EXPERIMENTAL. LA PERSONA SE UBICA AL NORTE DE LA RIOSTRA Y SIRVE COMO REFERENCIA DE TAMAÑO.	26
FIGURA 4.3: PIEZAS DE ANCLAJE DEL ACTUADOR HIDRÁULICO AL MURO DE REACCIÓN: (A) MODELO 3D DE PIEZA ANCLADA AL MURO MEDIANTE BARRAS TENSADAS, CONECTOR “HEMBRA”; (B) MODELO 3D DE PIEZA QUE VA APERNADA AL ACTUADOR, CONECTOR “MACHO”; (C) PIEZAS REALES UNIDAS ENTRE SÍ MEDIANTE EL PASADOR, CON EL ACTUADOR APERNADO Y ANCLADO AL MURO, SIN TENSAR.	26
FIGURA 4.4: SISTEMA DE TENSADO PARA LAS BARRAS DE ANCLAJE DEL MURO.....	27
FIGURA 4.5: PIEZAS PARA UNIR EL ACTUADOR A LA RIOSTRA: CONECTOR “HEMBRA” PARA LA CABEZA DEL ACTUADOR (A) MODELO 3D (B) REAL; DOBLE T PARA ANCLAR LA RIOSTRA (C) MODELO 3D (D) REAL.	28
FIGURA 4.6: PIEZAS QUE COMPONEN EL APOYO DESLIZANTE: (A) COLUMNA DE ANCLAJE; (B) VIGA PARA RESTRINGIR MOVIMIENTOS VERTICALES; (C) VIGA PARA RESTRINGIR MOVIMIENTOS HORIZONTALES.....	29
FIGURA 4.7: APOYO DESLIZANTE DEL ENSAYO: (A) ENSAMBLADO; (B) (C) MODIFICADO.....	30
FIGURA 4.8: SISTEMA DE TENSADO PARA LAS BARRAS DE ANCLAJE DEL APOYO DESLIZANTE.....	31
FIGURA 4.9: APOYO SIMPLE DEL ENSAYO.	32
FIGURA 4.10: SISTEMA DE TENSADO PARA LAS BARRAS DEL APOYO SIMPLE EN SU POSICIÓN PARA LAS RIOSTRAS MÁS LARGAS.	32
FIGURA 4.11: INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN: (A) LVDT’S; (B) INCLINÓMETRO.....	33
FIGURA 4.12: SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS. NO SE PUEDE APRECIAR LA CAJA CONECTORA DEBIDO A QUE SE ENCUENTRA DETRÁS DEL PC DE ADQUISICIÓN.	34
FIGURA 4.13: CONFIGURACIÓN Y SOPORTE DE LOS LVDT HORIZONTAL Y VERTICAL EN EL ENSAYO MONOTÓNICO DE LA RIOSTRA INTERMEDIA (VISTA DESDE EL NORTE DEL PERFIL). NOTAR QUE LOS INCLINÓMETROS NO ESTÁN EN SU POSICIÓN DE MEDICIÓN.	35
FIGURA 4.14: CAMBIO DE SOPORTE PARA PERMITIR ROTACIÓN DEL LVDT EN EL ENSAYO CÍCLICO DE LA RIOSTRA INTERMEDIA (VISTA DESDE EL NORTE DEL PERFIL).....	35
FIGURA 4.15: POSICIÓN ALEJADA DE LOS LVDT VERTICAL Y HORIZONTAL PARA LOS ENSAYOS MONOTÓNICO Y CÍCLICO DE LAS RIOSTRAS LARGA Y CORTA (VISTA DESDE EL SUROESTE DEL PERFIL).	36
FIGURA 4.16: PRIMERA CONFIGURACIÓN DE INCLINÓMETROS (VISTA DESDE EL SUR DE LA RIOSTRA).	37
FIGURA 4.17: CONFIGURACIÓN DE INCLINÓMETROS PARA EL ENSAYO CÍCLICO DEL PERFIL CORTO (VISTA DESDE EL NORTE DE LA RIOSTRA).	37
FIGURA 4.18: SISTEMA DE SOPORTE Y MONTAJE DEL LVDT SUPERIOR PARA MEDIR DEFORMACIÓN LONGITUDINAL DEL PERFIL XL (VISTA DESDE EL SUR DE LA RIOSTRA).....	38
FIGURA 4.19: SISTEMA DE SOPORTE Y MONTAJE DEL LVDT INFERIOR PARA MEDIR DEFORMACIÓN LONGITUDINAL DEL PERFIL XL (VISTA DESDE EL NORTE DE LA RIOSTRA).	38
FIGURA 4.20: ÁNGULO DE ALUMINIO DE SOPORTE PARA EL CABLE DE LOS LVDT’S LONGITUDINALES.	39
FIGURA 4.21: LVDT’S PARA MEDIR EL MOVIMIENTO DEL APOYO SIMPLE DEL ENSAYO (VISTA DESDE EL NORESTE DE LA RIOSTRA).	39

FIGURA 4.22: MONTAJE PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS LVDT'S E INCLINÓMETROS.	40
FIGURA 4.23: SIGNOS PARA LOS DATOS DE LOS LVDT'S E INCLINÓMETROS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PERFIL.....	42
FIGURA 4.24: SIGNOS PARA LOS DATOS DE LOS LVDT'S LONGITUDINALES DEL PERFIL.	42
FIGURA 4.25: SIGNOS PARA LOS DATOS DE LOS LVDT'S DEL LAPOYO SIMPLE.	43
FIGURA 4.26: PROTOCOLO DE DESPLAZAMIENTOS NORMALIZADO (PARA UN DESPLAZAMIENTO DE FLUENCIA DE 1 [MM]).....	44
FIGURA 5.1: DIMENSIONES DE LA PROBETA DE ÁNGULO (PLACA) PARA EL ENSAYO DE TENSIÓN EN BASE A LA ASTM A370 - 17.	45
FIGURA 5.2: PROBETA DE ÁNGULO Y TRAMO ORIGINAL UTILIZADO PARA LA FABRICACIÓN.	45
FIGURA 5.3: ENSAYO DE TRACCIÓN DE MATERIALES: (A) PROBETA MONTADA EN LA MÁQUINA UNIVERSAL; (B) EXTENSÓMETRO DE LA PROBETA.	46
FIGURA 5.4: PROBETAS FRACTURADAS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN.	47
FIGURA 6.1: PERFIL XL INTERMEDIO MONOTÓNICO LISTO PARA SER ENSAYADO.	50
FIGURA 6.2: PANDEO GLOBAL DEL PERFIL INTERMEDIO MONOTÓNICO.	50
FIGURA 6.3: PANDEO LOCAL DEL PERFIL INTERMEDIO MONOTÓNICO.	50
FIGURA 6.4: FALLA DE LA SOLDADURA DEL PERFIL INTERMEDIO MONOTÓNICO.	51
FIGURA 6.5: HISTÉRESIS DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO MONOTÓNICO.	52
FIGURA 6.6: HISTÉRESIS DEL LVDT LONGITUDINAL INFERIOR PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO MONOTÓNICO.....	52
FIGURA 6.7: ENERGÍA DISIPADA DEL PERFIL XL INTERMEDIO MONOTÓNICO.	53
FIGURA 6.8: PRIMER PANDEO DEL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO: (A) GLOBAL; (B) LOCAL.	54
FIGURA 6.9: DEFORMACIÓN DE LAS PLACAS GUSSET DEL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO: (A) PLACA CERCANA A LA RÓTULA (OESTE); (B) PLACA CONTRARIA A LA RÓTULA (ESTE).	55
FIGURA 6.10: DEFORMACIÓN EN LA RÓTULA PLÁSTICA DEL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.....	56
FIGURA 6.11: FRACTURA DEL ALA HORIZONTAL DEL ÁNGULO SUPERIOR EN EL PUNTO DE LA RÓTULA PLÁSTICA DEL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.	56
FIGURA 6.12: UBICACIÓN RELATIVA DE LA RÓTULA PLÁSTICA Y EL PANDEO EN TRACCIÓN DEL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.....	57
FIGURA 6.13: PANDEO EN TRACCIÓN DEL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO. NOTAR QUE EL PERFIL SE ENCUENTRA PRÁCTICAMENTE RECTO.	57
FIGURA 6.14: HISTÉRESIS DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.	58
FIGURA 6.15: HISTÉRESIS DEL LVDT LONGITUDINAL SUPERIOR PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.	58
FIGURA 6.16: ENERGÍA DISIPADA DEL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.....	59
FIGURA 6.17: PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO LISTO PARA SER ENSAYADO.....	60
FIGURA 6.18: RÓTULA PLÁSTICA DEL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO.	60
FIGURA 6.19: PANDEO GLOBAL DEL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO: (A) VISTA DESDE EL ESTE; (B) VISTA DESDE EL OESTE.	61
FIGURA 6.20: GRIETAS EN LA RÓTULA PLÁSTICA (VISTA INFERIOR) AL FINAL DEL ENSAYO DEL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO.....	61
FIGURA 6.21: HISTÉRESIS DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO.	62
FIGURA 6.22: HISTÉRESIS DEL LVDT LONGITUDINAL INFERIOR PARA EL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO.	62
FIGURA 6.23: ENERGÍA DISIPADA DEL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO.	63
FIGURA 6.24: PANDEO DEL PERFIL XL LARGO CÍCLICO: (A) GLOBAL; (B) LOCAL.	64
FIGURA 6.25: FRACTURA DEL ALA DEL ÁNGULO SUPERIOR DEL PERFIL XL LARGO CÍCLICO.	64
FIGURA 6.26: PANDEO EN TRACCIÓN DEL PERFIL XL LARGO CÍCLICO.	65
FIGURA 6.27: HISTÉRESIS DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL LARGO CÍCLICO.	65
FIGURA 6.28: HISTÉRESIS DEL LVDT LONGITUDINAL SUPERIOR PARA EL PERFIL XL LARGO CÍCLICO.....	66
FIGURA 6.29: ENERGÍA DISIPADA DEL PERFIL XL LARGO CÍCLICO.	66
FIGURA 6.30: PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO LISTO PARA SER ENSAYADO.....	67
FIGURA 6.31: PANDEO DEL PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO: (A) GLOBAL; (B) LOCAL.	68
FIGURA 6.32: PANDEO EN TRACCIÓN DEL PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO.	68
FIGURA 6.33: HISTÉRESIS DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO.....	69
FIGURA 6.34: HISTÉRESIS DEL LVDT LONGITUDINAL SUPERIOR PARA EL PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO.	69
FIGURA 6.35: ENERGÍA DISIPADA DEL PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO.	70
FIGURA 6.36: PANDEO DEL PERFIL XL CORTO CÍCLICO: (A) GLOBAL; (B) LOCAL.....	71
FIGURA 6.37: PANDEO EN TRACCIÓN DEL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.	72
FIGURA 6.38: UBICACIÓN RELATIVA DE LA RÓTULA PLÁSTICA Y EL PANDEO EN TRACCIÓN DEL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.	72
FIGURA 6.39: DESGARRAMIENTO DEL ALA HORIZONTAL DEL ÁNGULO SUPERIOR DEL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.	72
FIGURA 6.40: HISTÉRESIS DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.	73
FIGURA 6.41: HISTÉRESIS DEL LVDT LONGITUDINAL SUPERIOR PARA EL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.....	73

FIGURA 6.42: ENERGÍA DISIPADA DEL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.	74
FIGURA 6.43: PERFILES XL ENSAYADOS: EL DE LA IZQUIERDA EN CADA PAR CORRESPONDE AL ESPÉCIMEN CÍCLICO.	77
FIGURA ANEXA 1: CURVA DE TENSIÓN VS. DEFORMACIÓN DE LA PROBETA DE ÁNGULO A1 CON LOS DATOS DE DESPLAZAMIENTO DE LA MÁQUINA.	83
FIGURA ANEXA 2: CURVA DE TENSIÓN VS. DEFORMACIÓN DE LA PROBETA DE ÁNGULO A1 CON LOS DATOS DE DESPLAZAMIENTO DEL EXTENSÓMETRO.	83
FIGURA ANEXA 3: CURVA DE TENSIÓN VS. DEFORMACIÓN DE LA PROBETA DE ÁNGULO A2 CON LOS DATOS DE DESPLAZAMIENTO DE LA MÁQUINA.	84
FIGURA ANEXA 4: CURVA DE TENSIÓN VS. DEFORMACIÓN DE LA PROBETA DE ÁNGULO A2 CON LOS DATOS DE DESPLAZAMIENTO DEL EXTENSÓMETRO.	84
FIGURA ANEXA 5: CURVA DE TENSIÓN VS. DEFORMACIÓN DE LA PROBETA DE ÁNGULO A3 CON LOS DATOS DE DESPLAZAMIENTO DE LA MÁQUINA.	85
FIGURA ANEXA 6: CURVA DE TENSIÓN VS. DEFORMACIÓN DE LA PROBETA DE ÁNGULO A3 CON LOS DATOS DE DESPLAZAMIENTO DEL EXTENSÓMETRO.	85
FIGURA ANEXA 7: CURVA DE TENSIÓN VS. DEFORMACIÓN DE LA PROBETA DE PLACA P1 CON LOS DATOS DE DESPLAZAMIENTO DE LA MÁQUINA.	86
FIGURA ANEXA 8: CURVA DE TENSIÓN VS. DEFORMACIÓN DE LA PROBETA DE PLACA P1 CON LOS DATOS DE DESPLAZAMIENTO DEL EXTENSÓMETRO.	86
FIGURA ANEXA 9: CURVA DE TENSIÓN VS. DEFORMACIÓN DE LA PROBETA DE PLACA P2 CON LOS DATOS DE DESPLAZAMIENTO DE LA MÁQUINA.	87
FIGURA ANEXA 10: CURVA DE TENSIÓN VS. DEFORMACIÓN DE LA PROBETA DE PLACA P2 CON LOS DATOS DE DESPLAZAMIENTO DEL EXTENSÓMETRO.	87
FIGURA ANEXA 11: REGISTRO DE LOS LVDT'S HORIZONTAL Y VERTICAL PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO MONOTÓNICO.	88
FIGURA ANEXA 12: REGISTRO DE LOS INCLINÓMETROS PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO MONOTÓNICO.	88
FIGURA ANEXA 13: REGISTRO DE LOS LVDT'S LONGITUDINALES DEL PERFIL XL INTERMEDIO MONOTÓNICO.	89
FIGURA ANEXA 14: REGISTRO DE LOS LVDT'S DEL APOYO SIMPLE PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO MONOTÓNICO.	89
FIGURA ANEXA 15: REGISTRO DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO MONOTÓNICO.	90
FIGURA ANEXA 16: REGISTRO DE LA CELDA DE CARGA PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO MONOTÓNICO.	90
FIGURA ANEXA 17: REGISTRO DE LOS LVDT'S HORIZONTAL Y VERTICAL PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.	91
FIGURA ANEXA 18: REGISTRO DE LOS INCLINÓMETROS PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.	91
FIGURA ANEXA 19: REGISTRO DE LOS LVDT'S LONGITUDINALES PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.	92
FIGURA ANEXA 20: REGISTRO DE LOS LVDT'S DEL APOYO SIMPLE PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.	92
FIGURA ANEXA 21: REGISTRO DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.	93
FIGURA ANEXA 22: REGISTRO DE LA CELDA DE CARGA PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.	93
FIGURA ANEXA 23: REGISTRO DE LOS LVDT'S HORIZONTAL Y VERTICAL PARA EL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO.	94
FIGURA ANEXA 24: REGISTRO DE LOS INCLINÓMETROS PARA EL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO.	94
FIGURA ANEXA 25: REGISTRO DE LOS LVDT'S LONGITUDINALES PARA EL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO.	95
FIGURA ANEXA 26: REGISTRO DE LOS LVDT'S DEL APOYO SIMPLE PARA EL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO.	95
FIGURA ANEXA 27: REGISTRO DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO.	96
FIGURA ANEXA 28: REGISTRO DE LA CELDA DE CARGA PARA EL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO.	96
FIGURA ANEXA 29: REGISTRO DE LOS LVDT'S HORIZONTAL Y VERTICAL PARA EL PERFIL XL LARGO CÍCLICO.	97
FIGURA ANEXA 30: REGISTRO DE LOS INCLINÓMETROS PARA EL PERFIL XL LARGO CÍCLICO.	97
FIGURA ANEXA 31: REGISTRO DE LOS LVDT'S LONGITUDINALES PARA EL PERFIL XL LARGO CÍCLICO.	98
FIGURA ANEXA 32: REGISTRO DE LOS LVDT'S DEL APOYO SIMPLE PARA EL PERFIL XL LARGO CÍCLICO.	98
FIGURA ANEXA 33: REGISTRO DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL LARGO CÍCLICO.	99
FIGURA ANEXA 34: REGISTRO DE LA CELDA DE CARGA PARA EL PERFIL XL LARGO CÍCLICO.	99
FIGURA ANEXA 35: REGISTRO DE LOS LVDT'S HORIZONTAL Y VERTICAL PARA EL PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO.	100
FIGURA ANEXA 36: REGISTRO DE LOS INCLINÓMETROS PARA EL PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO.	100
FIGURA ANEXA 37: REGISTRO DE LOS LVDT'S LONGITUDINALES PARA EL PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO.	101
FIGURA ANEXA 38: REGISTRO DE LOS LVDT'S DEL APOYO SIMPLE PARA EL PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO.	101
FIGURA ANEXA 39: REGISTRO DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO.	102
FIGURA ANEXA 40: REGISTRO DE LA CELDA DE CARGA PARA EL PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO.	102
FIGURA ANEXA 41: REGISTRO DE LOS LVDT'S HORIZONTAL Y VERTICAL PARA EL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.	103

FIGURA ANEXA 42: REGISTRO DE INCLINÓMETROS PARA EL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.	103
FIGURA ANEXA 43: REGISTRO DE LOS LVDT'S LONGITUDINALES PARA EL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.	104
FIGURA ANEXA 44: REGISTRO DE LOS LVDT'S DEL APOYO SIMPLE PARA EL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.	104
FIGURA ANEXA 45: REGISTRO DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.	105
FIGURA ANEXA 46: REGISTRO DE LA CELDA DE CARGA PARA EL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.	105
FIGURA ANEXA 47: HISTÉRESIS DEL LVDT VERTICAL PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO MONOTÓNICO.	106
FIGURA ANEXA 48: HISTÉRESIS DEL LVDT HORIZONTAL PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO MONOTÓNICO.	106
FIGURA ANEXA 49: MODIFICACIÓN DE LA HISTÉRESIS DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO MONOTÓNICO.	107
FIGURA ANEXA 50: HISTÉRESIS DEL LVDT VERTICAL PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.	107
FIGURA ANEXA 51: HISTÉRESIS DEL LVDT HORIZONTAL PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.	108
FIGURA ANEXA 52: MODIFICACIÓN DE LA HISTÉRESIS DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL INTERMEDIO CÍCLICO.	108
FIGURA ANEXA 53: HISTÉRESIS DEL LVDT VERTICAL PARA EL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO.	109
FIGURA ANEXA 54: HISTÉRESIS DEL LVDT HORIZONTAL PARA EL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO.	109
FIGURA ANEXA 55: MODIFICACIÓN DE LA HISTÉRESIS DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL LARGO MONOTÓNICO.	110
FIGURA ANEXA 56: HISTÉRESIS DEL LVDT VERTICAL PARA EL PERFIL XL LARGO CÍCLICO.	110
FIGURA ANEXA 57: HISTÉRESIS DEL LVDT HORIZONTAL PARA EL PERFIL XL LARGO CÍCLICO.	111
FIGURA ANEXA 58: MODIFICACIÓN DE LA HISTÉRESIS DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL LARGO CÍCLICO.	111
FIGURA ANEXA 59: HISTÉRESIS DEL LVDT VERTICAL PARA EL PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO.	112
FIGURA ANEXA 60: HISTÉRESIS DEL LVDT HORIZONTAL PARA EL PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO.	112
FIGURA ANEXA 61: MODIFICACIÓN DE LA HISTÉRESIS DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL CORTO MONOTÓNICO.	113
FIGURA ANEXA 62: HISTÉRESIS DEL LVDT VERTICAL PARA EL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.	113
FIGURA ANEXA 63: HISTÉRESIS DEL LVDT HORIZONTAL PARA EL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.	114
FIGURA ANEXA 64: MODIFICACIÓN DE LA HISTÉRESIS DEL LVDT DEL ACTUADOR PARA EL PERFIL XL CORTO CÍCLICO.	114

Símbolos

A_e	Área efectiva de la sección.
A_g	Área transversal total de la sección.
C_e	Capacidad esperada a compresión del perfil XL.
C_F	Resistencia del perfil XL al pandeo flexional.
C_{FT}	Resistencia del perfil XL al pandeo flexo-torsional.
C_L	Resistencia del perfil XL al pandeo local.
C_w	Constante de alabeo del perfil XL.
E	Módulo de Young del acero.
E_{Act}	Energía disipada a partir de las medidas modificadas del LVDT del actuador.
E_{Rios}	Energía disipada a partir de las medidas de un LVDT longitudinal de la riostra.
F_{cr}	Tensión crítica de pandeo.
F_{cre}	Tensión crítica de pandeo esperada.
F_e	Tensión de pandeo global elástico de Euler.
F_{el}	Tensión de pandeo local elástico de Euler.
F_u	Tensión de rotura del acero.
F_y	Tensión de fluencia del acero.
G	Módulo de corte del acero.
H	Altura del perfil XL.
I_b	Inercia del conector intermedio respecto al eje V.
I_{ch}	Inercia de un ángulo respecto al eje V.
$I_{u,v}$	Inercia de la sección XL respecto a su eje U o V.
J	Rigidez torsional del perfil XL.
K	Factor de largo efectivo de pandeo en el eje correspondiente.
K_i	Factor de pandeo para la longitud entre conectores intermedios (0,86 para XL).
L	Largo real del elemento.
M_e	Capacidad a flexión del perfil XL.
M_p	Momento plástico del perfil XL.
$N_{u,v,t}$	Carga crítica de pandeo para ejes U, V o torsión.
N_{vb}	Carga crítica de pandeo del eje V, para XL de conectores gruesos.
N_{vp}	Carga crítica de pandeo del eje V, para XL de conectores delgados.
P_n	Resistencia a la compresión del perfil XL.

R_t	Razón entre tensión de rotura esperada y rotura mínima especificada.
R_y	Razón entre tensión de fluencia esperada y fluencia mínima especificada.
T_e	Capacidad esperada a tracción del perfil XL.
T_R	Resistencia del perfil XL a la rotura del área neta efectiva.
T_Y	Resistencia del perfil XL a la fluencia del área bruta.
a	Separación longitudinal de los conectores intermedios (desde sus centros de gravedad).
b	Ancho de las alas del ángulo.
b_e	Ancho efectivo de las alas del ángulo.
$c_{1,2}$	Factores de ajuste para ancho efectivo por imperfección.
d'	Distancia entre los centros de gravedad de los ángulos del perfil XL.
r	Radio de giro del perfil XL en el eje correspondiente.
r_i	Menor radio de giro de un ángulo.
s_{vb}	Rigidez al corte de un perfil XL con conectores gruesos.
s_{vp}	Rigidez al corte de un perfil XL con conectores delgados.
t	Espesor de las alas del ángulo.
t_g	Espesor de la placa gusset.
Δ_{acum}	Deformación inelástica acumulada por la riostra durante el ensayo.
Δ_2	Desplazamiento del perfil XL producto de sus esfuerzos de corte.
δ_{Act}	Desplazamiento medido por LVDT del actuador.
δ_{ActR}	Desplazamiento corregido del LVDT del actuador.
δ'_{ActR}	Desplazamiento modificado del LVDT del actuador.
δ_{ALong}	Desplazamiento medido por el LVDT longitudinal del apoyo simple.
δ_L	Desplazamiento medido por un LVDT longitudinal de la riostra.
δ_y	Desplazamiento de fluencia del perfil XL.
ε_y	Deformación de fluencia del perfil XL.
λ_G	Esbeltez global del perfil XL.
$\lambda_{G/L}$	Razón entre la esbeltez global y local del perfil XL.
λ_L	Esbeltez local de los ángulos del perfil XL.
λ_r	Límite de esbeltez local.
λ_u	Esbeltez del perfil XL en torno al eje U-U.
λ_v	Esbeltez del perfil XL en torno al eje V-V.
$\lambda_{x,y}$	Esbeltez del perfil XL en torno al eje X-X e Y-Y.

1. Introducción

1.1 Definición de un perfil XL:

Un perfil XL (Figura 1.1) es un elemento estructural de acero utilizado comúnmente en Chile como arriostramiento para controlar los desplazamientos laterales de un marco. Se compone de 3 partes: dos ángulos de iguales dimensiones; placas de acero intermedias para conectarlos entre sí, que pueden estar soldadas o apernadas; y un sistema de conexión en los extremos, que puede ser mediante soldadura o pernos.

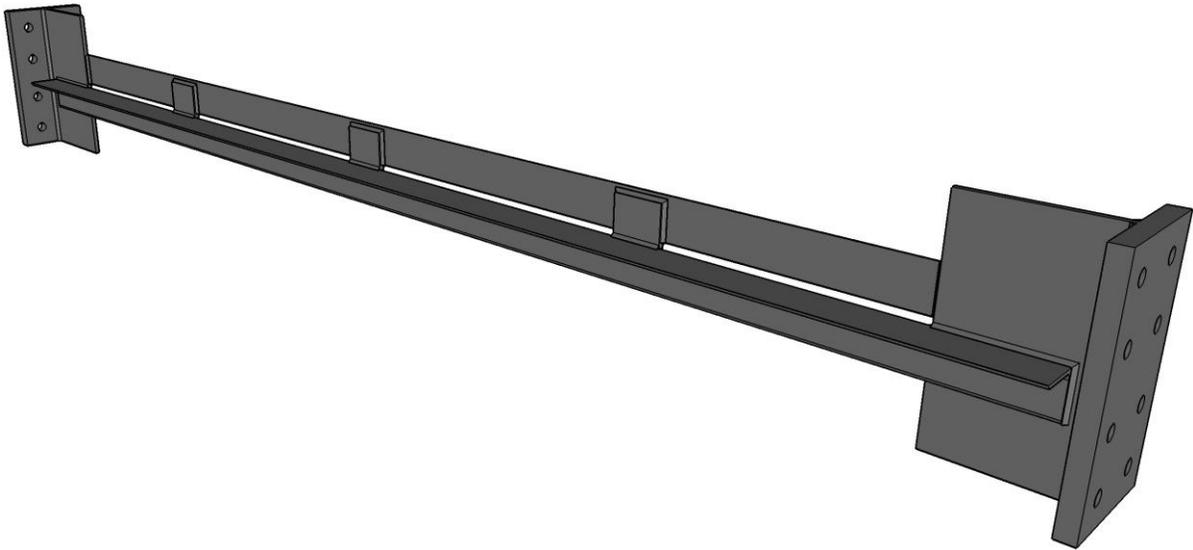


Figura 1.1: Vista isométrica de un perfil XL con 3 placas interconectoras soldadas y con una conexión soldada.

En la Figura 1.2 se puede ver la sección transversal que se obtiene al construir este tipo de arriostramiento, además de las letras que se utilizan para denotar sus dimensiones y ejes geométricos principales.

Según el Manual de Diseño de Ángulos Estructurales (Vergara del Pozo, 2004), se nombran de la siguiente forma: “XL (2 veces la dimensión del ala de los ángulos componentes $\approx H$ [cm]) x (peso por metro lineal [kgf/m])”; por ejemplo, si se usan ángulos con alas de 80 [mm] de ancho y de 10 [mm] de espesor, el perfil XL se denotaría como:

XL 16 x 23,7

Para facilitar la comprensión, en el presente informe se utiliza una notación más intuitiva: “XL (2 veces la dimensión del ala de los ángulos componentes $\approx H$ [mm]) x (espesor de los ángulos componentes [mm])”; quedando así el ejemplo anterior de la siguiente forma:

XL 160 x 10

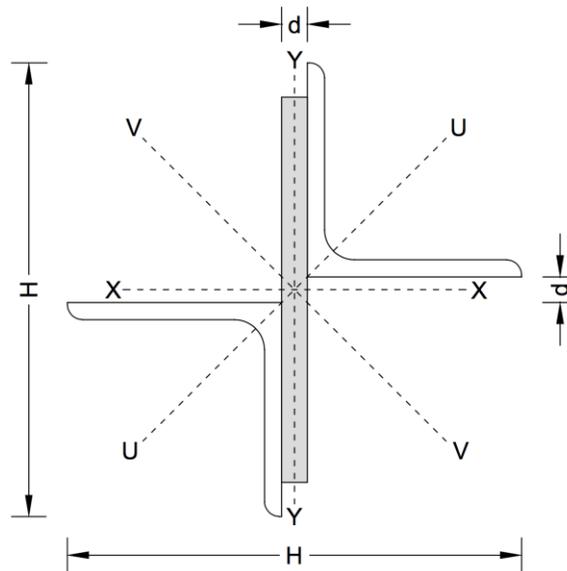


Figura 1.2: Sección transversal de un perfil XL.

1.2 Motivación:

Como Chile es un país con una gran actividad sísmica, es fundamental que las estructuras emplazadas en su territorio sean diseñadas para que tengan un buen desempeño frente a este tipo de solicitaciones. Con respecto a construcciones que son destinadas para vivienda u oficina, el requisito es que no se produzca el colapso estructural, mientras que, para construcciones hechas para la actividad industrial, se busca que los daños causados por el terremoto afecten la producción en el menor grado posible, siendo el ideal que las actividades continúen con normalidad de forma inmediata.

En la gran mayoría de los sectores industriales se utilizan equipos que deben permanecer fijos para que se pueda lograr el objetivo anterior. Entonces, los sistemas estructurales más utilizados son los marcos de acero con arriostramientos. Estos últimos elementos, que se utilizan para restringir los movimientos laterales, pueden estar compuestos por una diversidad de perfiles, siendo los ángulos en configuración vértice-vértice (XL) habituales en la práctica chilena.

Después del terremoto del 27 de febrero de 2010 se observaron diversas fallas en las diagonales de perfiles XL, principalmente por pandeos locales y torsionales, además de la rotura de sus conexiones con el marco (Montecinos, Herrera, Verdugo, & Beltrán, 2012) (Figura 1.3). Esto es sumamente peligroso, ya que, si el daño es muy grave, se puede comprometer la estabilidad global de la estructura, además de que el desempeño de esta última podría verse notablemente disminuido frente a las réplicas. Producto de ello, disminuyó la utilización de estos perfiles como arriostramiento de naves industriales, a pesar de las grandes ventajas no estructurales que poseen, tales como la sencillez en su montaje y conexiones, así como también el fácil acceso para mantenimiento, entre otras.



Figura 1.3: Fallas de perfiles XL producto del terremoto del Maule de 2010: (A) Pandeo local; (B) Falla de conexión por pandeo torsional; (Montecinos et al., 2012).

A partir de esto, en el Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile se comenzaron a realizar estudios numéricos de los modos de falla predominantes en los perfiles XL de acero estructural, con el fin de obtener criterios de selección geométrica, para así mejorar el desempeño de los arriostramientos en futuras obras industriales. El resultado de aquello fueron dos memorias para optar el título de ingeniero civil, donde en una se estudiaba el comportamiento frente a cargas monotónicas crecientes (Molina, 2014), mientras que en la otra, se analizaban frente a sollicitaciones cíclicas incrementales (Claverie, 2016). Ambas tienen como conclusión principal una serie de relaciones entre los parámetros de esbeltez de las diagonales y el modo de falla que presentan, por lo que se hace necesario corroborar aquellos resultados mediante estudios experimentales, siendo ésta la razón para comenzar con el presente trabajo.

1.3 Objetivos:

1.3.1 Objetivo general:

Identificar de manera experimental los modos de falla que presentan los perfiles XL, comúnmente utilizados en Chile como arriostramientos de marcos para estructuras industriales, frente a distintas sollicitaciones (carga monotónica y cíclica incremental).

1.3.2 Objetivos específicos:

- Establecer una relación entre los parámetros de esbeltez de los perfiles y el modo de falla predominante.
- Verificar los resultados obtenidos analíticamente en los estudios de Molina (2014) y Claverie (2016).
- Encontrar tendencias que ligen la ductilidad del perfil y su modo de falla.

1.4 Alcances:

Debido a que en los estudios analíticos se modelan los arriostramientos de manera aislada, los ensayos se realizan bajo las mismas condiciones, es decir, los perfiles son cargados directamente, y no forman parte de un marco estructural, como es la situación en la industria. Esto es sumamente importante, ya que la idea principal es validar los criterios de selección de ángulos que se encuentran en los trabajos anteriores, y no se está buscando representar la situación sísmica de la realidad. Por otro lado, los resultados experimentales que se obtienen son válidos solo para el tipo de acero estructural que se utiliza para conformar las probetas, así como también, solo son representativos de ángulos en configuración XL. Dicho esto, el presente trabajo se organiza de la siguiente manera:

- **Capítulo 1: Introducción:** en este capítulo se muestra la motivación del presente trabajo, además de establecer los objetivos del estudio y dar una descripción de la organización del informe.
- **Capítulo 2: Antecedentes:** en esta sección se muestran las normas cuyas disposiciones son utilizadas para el diseño de los especímenes a ensayar, además de una revisión bibliográfica respecto a los estudios analíticos, numéricos y experimentales en torno a los perfiles XL para mostrar los márgenes investigativos existentes y proponer la línea de investigación
- **Capítulo 3: Diseño de perfiles:** en este capítulo se describe el proceso iterativo de diseño, dando las características de los materiales que se escogen, las limitaciones dadas por el montaje experimental, y la verificación mediante memorias de cálculo (en anexos) de los límites de esbeltez y capacidades de riostras y conexiones según las disposiciones de las normas.
- **Capítulo 4: Metodología:** en esta sección se describe cada parte del montaje experimental que se utiliza para el ensayo de los perfiles XL, así como también la instrumentación que se emplea en función de las variables que se quieren estudiar, además del procedimiento de preparación de los experimentos.
- **Capítulo 5: Ensayos de materiales:** en este capítulo se describen las características y el procedimiento de ensayo, en base a las normas ASTM, que se utiliza para determinar las propiedades mecánicas del acero que compone cada parte de las riostras a experimentar, además de la exposición de los valores que se obtienen.
- **Capítulo 6: Presentación y análisis de resultados:** en esta sección se presentan los resultados de cada uno de los 6 ensayos de perfiles XL, describiendo los efectos que se observan durante los experimentos, acompañados de varias imágenes, además de los gráficos de histéresis y disipación de energía respectivos, junto con tablas resumen de resultados.
- **Capítulo 7: Conclusiones:** en este capítulo se muestran las conclusiones finales que se obtienen a partir del presente trabajo, además de dar recomendaciones para futuros ensayos y proponer nuevas líneas de investigación.

2. Antecedentes

2.1 Normas:

2.1.1 NCh2369. Of 2003:

Esta norma establece las bases y criterios a la hora de diseñar una estructura o instalación destinada a la actividad industrial en Chile, las cuales son hechas mayoritariamente de acero. Para el presente trabajo, lo más importante de este documento es la sección 8, donde se dan las “Disposiciones especiales para estructuras de acero”.

Con respecto al material de construcción, en el numeral 8.2.1 se exige que en el ensayo de tracción se tenga una meseta pronunciada de ductilidad, con una fluencia inferior a 0,85 veces la resistencia última y menor a 450 [MPa], así como también que las probetas de 50 [mm] muestren una elongación del 20%. Además, en el 8.2.2 se establece que se deben usar aceros conforme a las normas ASTM o NCh, o en su defecto, materiales con especificaciones equivalentes aprobados por los profesionales del proyecto.

En la sección 8.3.3 se dice que la esbeltez global de los elementos de sistemas sismo-resistentes que trabajan en compresión no deben superar el siguiente límite para que presenten un pandeo inelástico al momento de su falla:

$$\lambda_G = \frac{KL}{r} \leq 1,5\pi \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.1)$$

Por otro lado, en el mismo numeral nombrado en el párrafo anterior, se hace referencia a la Tabla 8.1 de la norma, donde se establecen los límites de esbeltez local para distintos tipos de perfiles según su sollicitación, los cuales no deben ser sobrepasados. En particular, para perfiles XL conformados por ángulos laminados (Figura 2.1) que están trabajando a compresión se tiene que:

$$\lambda_L = \frac{b}{t} \leq 0,45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.2)$$

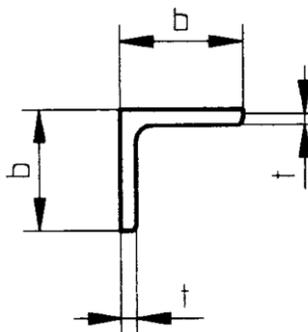


Figura 2.1: Ángulo laminado para las definiciones de la NCh2369. Of 2003.

2.1.2 ANSI / AISC 360-16:

Esta norma establece los estándares estadounidenses que deben cumplir los edificios de acero bajo solicitaciones estáticas. Para el presente trabajo, lo más importante de este documento es el capítulo E, donde se dan las bases para diseñar elementos sometidos a compresión. En la sección E6 se tratan los “elementos armados”, que se refiere a cualquier miembro estructural compuesto por dos perfiles que estén interconectados mediante pernos o soldaduras.

Lo primero que se especifica es que las conexiones de los extremos deben ser apernadas para el no deslizamiento, o bien, soldadas. Luego, para calcular la resistencia a compresión del perfil compuesto, se deben utilizar las secciones E3, E4 y E7 con una esbeltez trasformada. Esta modificación se hace para los ejes en donde el modo de pandeo provoca deformaciones relativas entre los componentes principales, lo que produce esfuerzos de corte en los conectores intermedios. Cuando estos últimos están unidos a los perfiles mediante soldaduras, se debe hacer el siguiente cálculo:

i. Cuando $\frac{a}{r_i} \leq 40$

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \left(\frac{KL}{r}\right)_o \quad (2.3)$$

ii. Cuando $\frac{a}{r_i} > 40$

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_o^2 + \left(\frac{K_i a}{r_i}\right)^2} \quad (2.4)$$

Donde el subíndice m significa “modificada” y el o se refiere a “original” según el eje de pandeo que se esté considerando. El valor K_i varía según el tipo de perfil compuesto que se tenga, y para los XL vale 0,86. Además, con el fin de eliminar el efecto del “pandeo compuesto”, que se refiere al impacto sobre la carga última a compresión que provoca la interacción entre el pandeo global y el pandeo localizado entre conectores, se establece el siguiente requerimiento dimensional:

$$\frac{a}{r_i} \leq \frac{3}{4} \left(\frac{KL}{r}\right)_m \quad (2.5)$$

Una vez realizada la modificación de la esbeltez global, se debe utilizar la sección E3 para calcular la tensión crítica que provoca el pandeo de flexión, mediante las siguientes expresiones:

i. Cuando $\frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$F_{cr} = \left(0,658 \frac{F_y}{F_e}\right) F_y \quad (2.6)$$

ii. Cuando $\frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$F_{cr} = 0,877F_e \quad (2.7)$$

Donde el esfuerzo de pandeo elástico de Euler se calcula como:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (2.8)$$

De la misma manera, se debe utilizar la sección E4 para obtener la tensión crítica que provoca el pandeo torsional o flexo-torsional, empleando las ecuaciones (2.6) o (2.7), pero con un esfuerzo de pandeo elástico calculado en función de las inercias de los ejes principales, cuya expresión matemática es la siguiente:

$$F_e = \left(\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L)^2} + GJ \right) \cdot \frac{1}{I_u + I_v} \quad (2.9)$$

Una vez que se tienen ambas tensiones críticas, se debe utilizar la mínima de ellas para calcular la resistencia a la compresión del perfil, mediante la fórmula:

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (2.10)$$

Por último, en la sección E7 se dan las disposiciones para obtener la resistencia del elemento al pandeo local, si es que este posee miembros esbeltos. En la tabla B4.1a de la norma se dan los límites para los miembros atiesados y no atiesados de distintos perfiles. Con respecto a los ángulos, se establece el mismo valor dado por la NCh2369. Of 2003 (ecuación (2.2)). La resistencia al pandeo local se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_n = F_{cr} A_e \quad (2.11)$$

La tensión crítica de pandeo para este estado límite se calcula con las ecuaciones (2.6) y (2.7), utilizando el menor valor de la carga de Euler dada por la fórmula (2.8) o (2.9). Por otro lado, el término A_e se obtiene como la suma de las áreas efectivas de la sección transversal, basadas en las dimensiones (b_e) efectivas. Definiendo λ_r como el límite de esbeltez local de la norma (ecuación (2.2)), se tiene que:

i. Cuando $\lambda_L \leq \lambda_r \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}}$

$$b_e = b \quad (2.12)$$

ii. Cuando $\lambda_L > \lambda_r \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}}$

$$b_e = b \left(1 - c_1 \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} \right) \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} \quad (2.13)$$

Donde la tensión de pandeo local elástico de Euler se calcula como:

$$F_{el} = \left(c_2 \frac{\lambda_r}{\lambda_L} \right)^2 F_y \quad (2.14)$$

Los factores c_1 y c_2 se obtienen de la tabla E7.1 de la norma, y para perfiles XL valen 0,22 y 1,49 respectivamente (correspondiente al caso “el resto de los elementos” de la tabla).

2.1.3 ANSI / AISC 341-16:

Esta norma establece los estándares estadounidenses que deben cumplir los edificios de acero bajo solicitaciones sísmicas. Para el presente trabajo, lo más importante de este documento es el capítulo F, donde se dan las bases para diseñar marcos arriostrados, y en particular, la sección F2, donde se tratan los llamados “marcos especiales arriostrados concéntricamente” (SCBF por sus siglas en inglés). Este nombre se les da a las estructuras con riostras diagonales conectadas al punto central de la viga, o a la unión de esta última con la columna, cuya configuración implica que todos los elementos estarán sometidos principalmente a esfuerzos axiales frente a una solicitación sísmica, donde la ductilidad estructural vendrá dada por la fluencia y el pandeo de las riostras.

En el numeral F2.5 se listan los requerimientos que deben cumplir las columnas, vigas y arriostramientos de la estructura, los cuales deben ser elementos altamente dúctiles. Cuando se utilizan ángulos para controlar las deformaciones laterales, este requisito se traduce en que la relación ancho / espesor de sus alas no debe superar el siguiente límite (tabla D1.1 de la norma):

$$\lambda_L = \frac{b}{t} \leq 0,32 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} \quad (2.15)$$

Además, se debe cumplir que la esbeltez global de las riostras no supere el valor dado por la ecuación (2.16), y a la vez, cuando se emplean perfiles armados, el espaciamiento de los conectores debe satisfacer la fórmula (2.17).

$$\lambda_G = \frac{KL}{r} \leq 200 \quad (2.16)$$

$$\frac{a}{r_i} \leq \frac{2}{5} \left(\frac{KL}{r} \right)_m \quad (2.17)$$

Por otro lado, en la sección F2.6c se dan las bases para diseñar las conexiones de los arriostramientos. Estas deben ser capaces de resistir, de manera independiente, las siguientes solicitaciones (utilizando LRFD):

- i. En tracción, el menor valor entre la máxima carga que puede desarrollar la riostra y su capacidad esperada de fluencia, dada por:

$$T_e = R_y F_y A_g \quad (2.18)$$

- ii. En compresión, la capacidad esperada de pandeo de la riostra, la cual depende de la tensión crítica de pandeo esperada, F_{cre} , calculada con las fórmulas para F_{cr} de la ANSI / AISC 360-16, pero utilizando $R_y F_y$ en vez de F_y :

$$C_e = \frac{1}{0,877} F_{cre} A_g \leq R_y F_y A_g \quad (2.19)$$

- iii. En flexión, la placa gusset debe ser capaz de confinar las rotaciones inelásticas del elemento, que se producen por la formación de rótulas plásticas en el centro y en los extremos de la riostra, o bien, poseer la suficiente ductilidad para acomodarse a aquellos desplazamientos. Para lograr lo primero, la conexión debe ser capaz de soportar la capacidad esperada del elemento, cuyo valor se calcula, respecto al eje de pandeo, con la siguiente fórmula:

$$M_e = 1,1 R_y M_p \quad (2.20)$$

- iv. Por otro lado, si se prefiere que las rótulas plásticas se formen en las placas gusset en vez de en los extremos de la riostra (la ductilidad referida en el párrafo anterior), se debe tener una distancia no atiesada de al menos dos veces el espesor de la plancha conectora. Esta condición se explica en los comentarios de la norma, y se ilustra en la Figura 2.2.

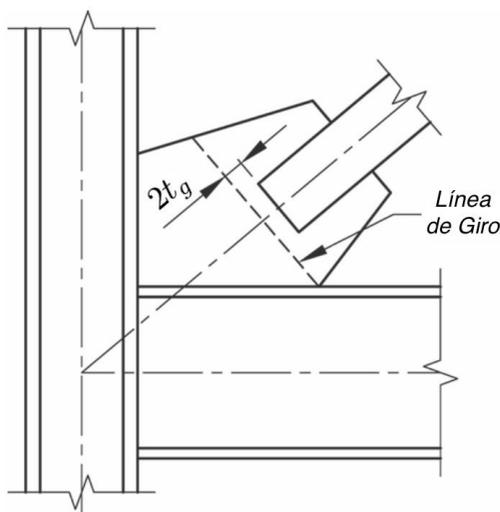


Figura 2.2: Requerimiento de distancia riostra-gusset para lograr pandeo fuera del plano (AISC, 2016a).

2.2 Estudios analíticos, numéricos y experimentales:

2.2.1 Molina, 2014:

Este es el primer trabajo realizado en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile con respecto a los perfiles XL de acero estructural. Se modelaron 180 perfiles XL en el programa de elementos finitos ANSYS, compuestos por ángulos laminados de alas desde 20 [mm] a 200 [mm] de ancho, con espesores de 2 [mm] a 16 [mm], cuyos largos eran de 1,5 [m], 2,5 [m], 5 [m] y 10 [m], con barras delgadas de sección cuadrada como conectores intermedios ubicados en los cuartos del elemento, los cuales fueron sometidos a una carga monotónica incremental. Para analizar sus resultados, Molina (2014) definió el siguiente parámetro:

$$\lambda_{G/L} = \frac{\max(\lambda_u; \lambda_v)}{\lambda_L} \quad (2.21)$$

Se pudo ver una relación entre el valor de $\lambda_{G/L}$ y el modo de falla que presentaron los perfiles. Aquellos cuya razón era de 5,5 o menos experimentaron un pandeo torsional, mientras que los que poseían un mayor valor fallaron con un pandeo de flexión.

2.2.2 Claverie, 2016 / Claverie & Herrera, 2017:

Como continuación al trabajo de Molina (2014), Claverie (2016) modeló 74 perfiles XL en el programa ANSYS, con la diferencia que la selección de los ángulos se hizo en base a la NCh2369. Of 2003, lo que implica que solo se utilizaron ángulos no esbeltos localmente. Así, se tenían perfiles con alas de 20 [mm] a 200 [mm] de ancho, con espesores de 4 [mm] a 16 [mm], cuyos largos eran de 3 [m], 4 [m], 5 [m] y 6 [m], con placas soldadas como conectores intermedios, los cuales eran sometidos a carga monotónica y cíclica incremental.

Para determinar la cantidad y ubicación de las planchas intermedias, se utilizaron las ecuaciones (2.5) y (2.17), despejando la distancia mínima entre conectores (a) para cumplir con cada uno de los requerimientos en toda la gama de perfiles que se iban a estudiar. Se pudo ver que colocando placas en cada cuarto del elemento se satisfacían las disposiciones de la ANSI / AISC 360-16, mientras que, si eran posicionadas en los octavos de la riostra, se cumplía con la exigencia de la ANSI / AISC 341-16. Por lo tanto, se realizaron modelos con ambas configuraciones, es decir, se tenían 37 riostras con 3 placas intermedias, y otras 37 con 7 conectores. En relación a las dimensiones de estos elementos, se siguieron las recomendaciones del Manual de Diseño de Ángulos Estructurales (Vergara del Pozo, 2004), es decir, su altura es idéntica a la del perfil XL, su ancho es 2/3 de esta última medida, y su espesor es el mismo que el de la plancha de conexión.

Con respecto a la geometría de las placas gusset, su altura fue determinada para que se pudiera desarrollar el ancho de Whitmore (1952), mientras que su ancho y espesor fueron basados en el diseño por capacidad de la riostra, descrito en la ANSI / AISC 341-16. Todas las dimensiones detalladas hasta ahora se pueden ver en la Figura 2.3.

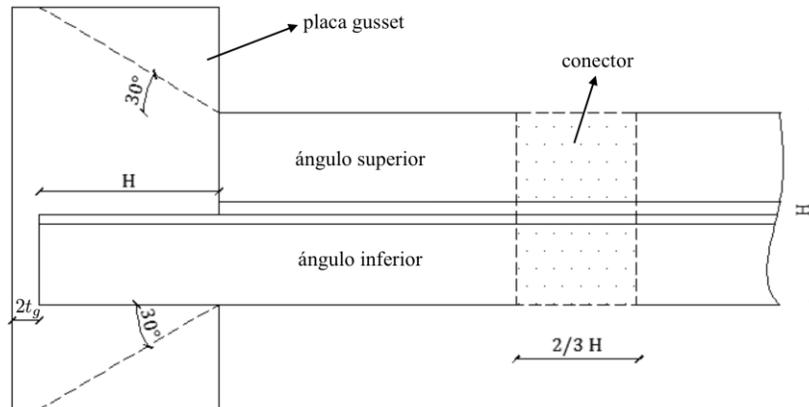


Figura 2.3: Geometría de los conectores intermedios y de la placa gusset del perfil XL (Claverie, 2016).

El material fue modelado con las propiedades del acero ASTM A36, con un módulo de Young bi-lineal con endurecimiento isotrópico de deformaciones, para representar el comportamiento no lineal. En relación a las condiciones de borde, se restringieron casi todos los desplazamientos y giros de los extremos de las placas gusset y del conector central (para simular una configuración de arriostamiento en X), dejando libre solo el desplazamiento longitudinal de este último y de un extremo (Figura 2.4 y Tabla 2.1).

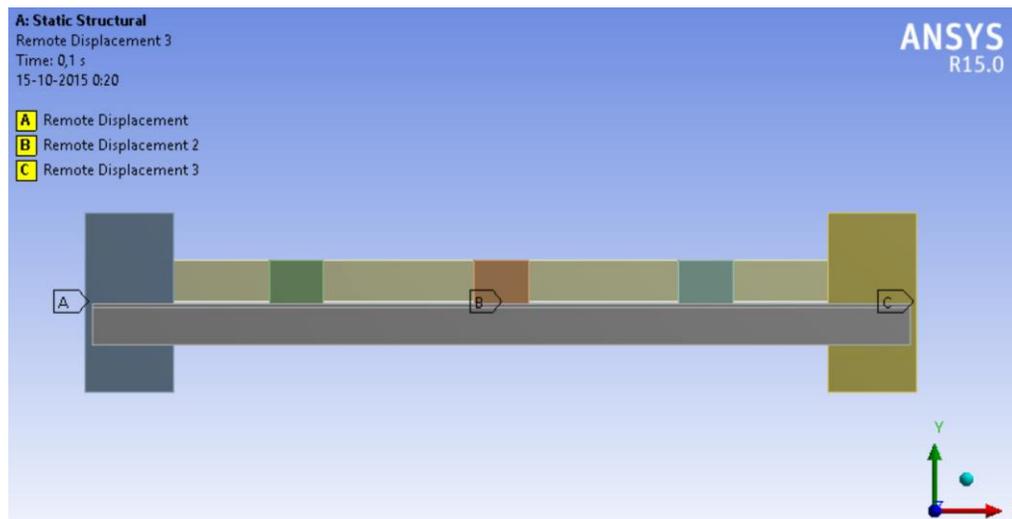


Figura 2.4: Puntos de restricción de desplazamientos utilizados por Claverie (2016).

Tabla 2.1: Restricciones de desplazamientos de los modelos de Claverie (2016). R=restringido, F=libre.

Punto Figura 2.4	Restricción					
	Desp. X	Desp. Y	Desp. Z	Rot. X	Rot. Y	Rot. Z
A	R	R	R	R	R	R
B	F	R	R	R	R	R
C	F	R	R	R	R	R

Luego se llevaron a cabo análisis preliminares con el fin de obtener la carga crítica elástica y el modo de pandeo, para así incorporar una imperfección inicial proporcional en los modelos con carga cíclica, y también para determinar el desplazamiento de fluencia δ_y , en base a los criterios de esfuerzos de Von Mises. Se calculó la razón entre esta última magnitud y el valor teórico ($KL\epsilon_y$) para toda la gama de perfiles utilizados, obteniendo un promedio de 0,99 y una desviación estándar de 0,13. Luego, se construyó un protocolo de solicitaciones de 10 ciclos, con incursiones simétricas en tracción y compresión, de hasta 4 veces el nivel de fluencia (Figura 2.5).

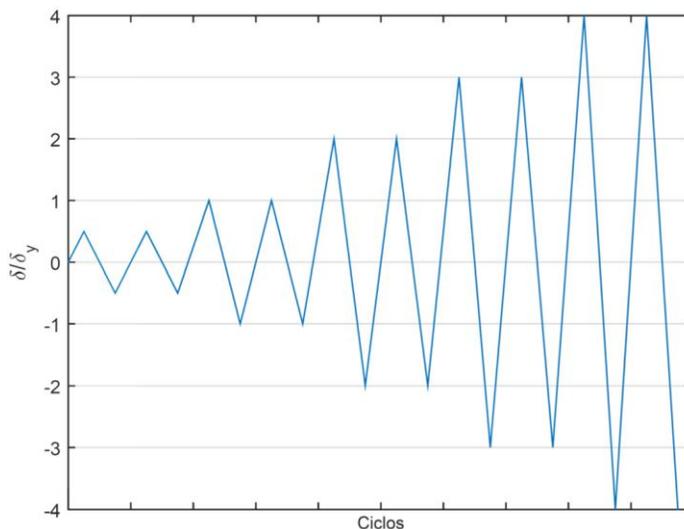


Figura 2.5: Protocolo de desplazamientos utilizado por Claverie (2016).

La conclusión más importante de este trabajo, y que es la razón principal para realizar el presente estudio, es la relación entre los modos de falla de los perfiles XL con su parámetro $\lambda_{G/L}$, la cual era independiente de si se utilizaban 3 o 7 conectores intermedios, y que se puede ver en la Tabla 2.2. Vale decir que el modo de pandeo se identificó mediante un análisis visual de la deformada y de la distribución de tensiones en la riostra.

Tabla 2.2: Relación entre los parámetros de esbeltez de los perfiles XL y su modo de falla, obtenido por Claverie (2016).

Modo de Pandeo	Límites de Esbeltez
Torsional	$\lambda_{G/L} < 6$
Flexo-Torsional	$6 < \lambda_{G/L} < 10$
Flexional	$10 < \lambda_{G/L}$

Otro resultado interesante tiene que ver con las resistencias mostradas por los perfiles. Se estableció como criterio de falla en compresión la fractura del material (a 500 [MPa]), y se pudo observar que la capacidad de las riostras sometidas a carga cíclica era un 11% mayor (en promedio) a cuando eran solicitadas monotónicamente, mientras que este último valor era un 22% superior (en promedio) a los valores nominales obtenidos con las disposiciones de la ANSI / AISC 360-16. Por otro lado, la capacidad a tracción de todos los perfiles fue más grande que la fluencia nominal de su área transversal ($F_y A_g$), en alrededor de un 10% en los más esbeltos, hasta un 30% en los más robustos.

También son importantes las conclusiones en torno a las histéresis que mostraron las riostras, ya que se observó una dependencia entre la forma de estos gráficos y el modo de falla del perfil. Cuando se presentaba un pandeo de flexión, la capacidad a compresión disminuía significativamente con cada ciclo de carga, lo cual es llamando “efecto Bauschinger” (Tremblay, 2002), mientras que en tracción se desarrollaba un poco de “endurecimiento”, alcanzando un valor que se mantenía prácticamente constante en cada ciclo. Para los elementos con falla flexo-torsional, el comportamiento era similar, con la diferencia en que la curva de sollicitación monotónica difería en una mayor medida de la curva cíclica (Claverie (2016) no cuantifica este resultado).

Con respecto a los perfiles que mostraban un pandeo torsional, la degradación de la capacidad a compresión a medida que se avanza en los ciclos de carga es prácticamente nula, y se puede ver una histéresis bastante simétrica con respecto al origen del plano cartesiano, lo que indica una mayor disipación de energía que en los otros dos casos.

Por otro lado, se estudiaron las fuerzas producidas en las placas gusset y en el conector central, donde se pudo ver una dependencia con el modo de falla y con el espaciamiento de las placas. En la conexión, las mayores sollicitaciones se produjeron en su eje longitudinal y en su eje transversal horizontal, llegando a valores mayores que la capacidad nominal de la riostra ($F_y A_g$). Así mismo, las fuerzas en el conector intermedio llegaron hasta un 50% de este último valor.

Por último, se evidenciaron los efectos que provocaba colocar conectores en los octavos de la longitud del perfil, versus la configuración donde se posicionaban solo en los cuartos. Se pudo ver que utilizar una mayor cantidad de placas tenía un efecto “negativo” en varios aspectos: se observaron pandeos locales en perfiles que fallaban por flexo-torsión (a pesar de poseer alas no esbeltas), en la misma ubicación y previos a la formación de las rótulas plásticas en las zonas comprendidas entre conectores, las que, en perfiles con 3 planchas, se situaban en la posición de una de las placas, lo que evitaba la inestabilidad local (Figura 2.6); el plano de pandeo cambió y se produjo en torno al eje Y-Y; se tuvo una disminución de la ductilidad en un 20%; y aumentaron las fuerzas en las placas gusset y en el conector central, llegando a más del doble en este último. De todas formas, se tuvieron algunas ventajas: hubo un aumento de un 10% en la capacidad a compresión en relación a las nominales y la degradación de esta resistencia, a medida que avanzaban los ciclos de carga, fue menor. Con respecto a la capacidad a tracción de la riostra, no se evidenciaron cambios.

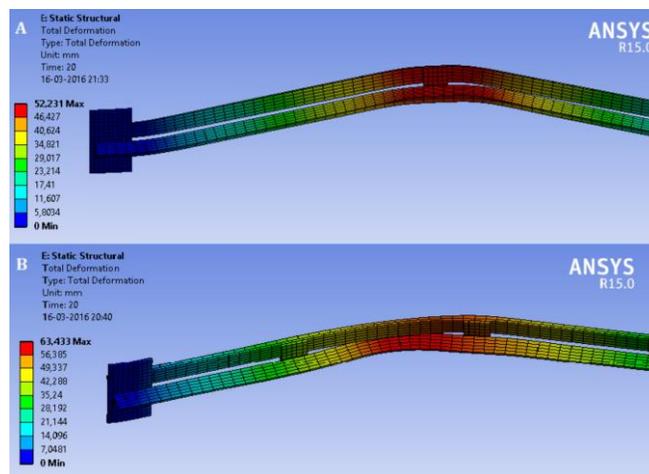


Figura 2.6: Zona de formación de la rótula plástica en modelos. (A) riostras con 3 planchas; (B) riostras con 7 planchas. Escala de colores indica nivel de deformación (Claverie, 2016).

2.2.3 Beulah Gnana Ananthi, Vishuvaradhan, & Samuel Knight, 2015:

En este trabajo se realizaron estudios experimentales y numéricos con el fin de comparar la capacidad a compresión obtenida, con la que se predice a partir de los estándares británicos y norteamericanos. La diferencia es que se utilizaron perfiles de ángulo con alas atiesadas, conformados en frío y sin conectores intermedios (Figura 2.7), mientras que en el presente trabajo se experimentan ángulos sin atiesadores, laminados, y con la presencia de placas soldadas entre ellos.

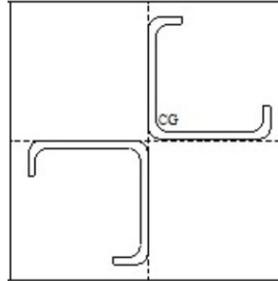


Figura 2.7: Sección transversal utilizada en el trabajo de Beulah Gnana Ananthi et al. (2015).

En las pruebas a compresión monotónica se utilizaron perfiles compuestos por distintos tipos de acero, con alas entre los 35 [mm] y 70 [mm] de ancho, cuyo espesor era de 2 [mm] y 3,15 [mm], sus esbelteces de 15, 20, 25 y 30 y con condiciones de apoyo simple o empotrado. Los modelos de elementos finitos utilizados tenían las mismas geometrías, e incorporaban leyes constitutivas no lineales e imperfecciones iniciales de las probetas basadas en su primer modo de pandeo, al igual que el trabajo de Claverie (2016).

Se encontró que en promedio la norma británica sobreestimaba en un 5% las resistencias a compresión obtenidas experimentalmente (no conservadora), mientras que el código norteamericano las subestimaba en un 5% (conservador). Al igual que el primer caso, el análisis numérico reportó cargas de pandeo mayores a las empíricas.

Por otro lado, y como era de esperar, la relación entre carga y desplazamiento es lineal hasta el pandeo, para luego entrar en una curva decreciente donde se puede ver una gran ductilidad a expensas de pequeñas fuerzas.

Por último, y como conclusión más relevante para el presente trabajo, se pudieron ver dos modos de falla: un pandeo flexo-torsional, y otro torsional, siendo este último el predominante. También se observaron algunos pandeos locales, pero que ocurrieron debido a los pandeos globales. Si bien no se especifica una relación con la esbeltecz, esto marca un precedente al momento de determinar los resultados esperados del presente trabajo.

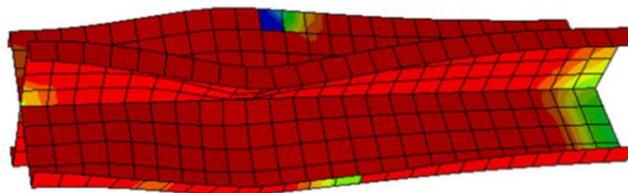


Figura 2.8: Falla por pandeo torsional en el modelo de elementos finitos de Beulah Gnana Ananthi et al. (2015).

2.2.4 Guru Agastheesh & Senthil Selvan, 2016:

En este trabajo se realizaron estudios analíticos, numéricos y experimentales, para encontrar las cargas últimas de pandeo de perfiles XL compuestos por ángulos conformados en frío a partir del mismo tipo de acero, sin conectores intermedios, y con conexiones extremas de esfera, pernos o soldadura. Se utilizaron perfiles de dos dimensiones distintas: 50x50x2 y 60x60x2, dando así un total de 6 especímenes de estudio.

Se realizaron pruebas de compresión monotónica sobre columnas cortas de 50 [mm] de largo. El modelo de elementos finitos tenía la misma geometría, consideraba la no linealidad del material, e incorporaba imperfecciones iniciales. En ambos casos se registraron tanto la carga aplicada como la deformación axial, teniendo además medidores de deformaciones y deflexiones a lo largo de la probeta. Los resultados numéricos y empíricos fueron comparados entre ellos y con los predichos por la teoría de pandeo de Euler.

Se pudo ver que las deflexiones calculadas por fórmula son mayores que las obtenidas experimentalmente, en una magnitud similar entre los dos perfiles de distinta dimensión, pero con la misma condición de apoyo. De la misma manera, los valores obtenidos empíricamente son significativamente mayores que los arrojados por los modelos numéricos.

Por otro lado, las cargas de pandeo calculadas mediante la teoría son en promedio 2,5 veces más grandes que las experimentales, mientras que las analíticas son alrededor del doble que las empíricas. En ambos casos, los cálculos son altamente no conservadores.

Por último, se hacen comparaciones entre las resistencias y deflexiones que presentan las mismas secciones transversales con distintas condiciones de borde, pero esto no es importante para el presente trabajo debido a que en este último se tiene solo un tipo de conexión. Lamentablemente no se hace alguna referencia al modo de falla, pero por las imágenes adjuntas se observan pandeos torsionales en los modelos numéricos.

2.2.5 Vishnuvardhan & Samuel Knight, 2008:

En este trabajo se realizaron estudios experimentales para estudiar los efectos de distintas variables sobre la carga última a compresión de perfiles compuestos por ángulos plegados en frío. El ancho de sus alas variaba entre los 35 [mm] y los 70 [mm], mientras que los espesores eran de 2 [mm] y 3,5 [mm], resultando en esbelteces de 15, 20, 25 y 30. Las conexiones de los extremos de las probetas eran de tres tipos: soldadas directamente a una placa que podía pivotar encima de una esfera (apoyo simple), apernadas a ángulos laminados adheridos a una placa base (empotrado) y soldadas directamente a una placa gusset (semirrígida). Además, se utilizaron diferentes tipos de acero y se construyeron 3 configuraciones distintas: ángulo simple (L), ángulo doble espalda-espalda (TL), y ángulo doble vértice-vértice (XL). Vale decir que estos dos últimos no poseían conectores intermedios.

Se llevaron a cabo 57 experimentos, en los cuales se medía el acortamiento de la columna, los desplazamientos laterales a un cuarto y a la mitad de la altura, y las deformaciones de las alas en esta última posición; todas en función de la carga aplicada. Es importante notar que los “*Strain Gauges*” se colocaron lo más lejos posible del eje neutro para verificar si el pandeo era simétrico o no.

Se obtuvo una diversidad de resultados, tales como que, sin importar el tipo de configuración, la variación de la esbeltez no afecta en gran medida la capacidad a compresión; que este último valor se ve más que duplicado en ángulos dobles con respecto a los simples; que la rigidez inicial de los XL es 2 veces la de los L mientras que la de los TL es 1,5 veces mayor, y un gran etcétera, donde la gran mayoría son más o menos irrelevantes para el presente trabajo.

Las conclusiones más importantes son las que tratan los modos de falla de los tres tipos de sección transversal. Con respecto a los ángulos vértice-vértice, los que tenían conexión soldada experimentaron pandeos de flexión o pandeos locales a la mitad de su altura. Para los que poseían una conexión de rotación libre, se observaron pandeos de flexión o torsionales con falla entre el centro y un tercio del largo de la columna. Por último, los que estaban conectados con pernos mostraron pandeos torsionales (Figura 2.9). Lamentablemente no se menciona una relación entre estos modos de falla y la esbeltez de estos perfiles.



Figura 2.9: Pandeo torsional de un perfil XL con conexión apertada (Vishnuvardhan & Samuel Knight, 2008).

2.2.6 Haifeng, Xuming, & Junke, 2016:

En este trabajo se realizaron procedimientos analíticos para encontrar fórmulas que predijeran la carga crítica de pandeo de perfiles XL en torno a su eje V (notado como eje Y en el documento original). Estas ecuaciones fueron comparadas con resultados de modelos de elementos finitos para determinar su exactitud.

A modo de introducción del estudio, se establecen las expresiones matemáticas conocidas para determinar las cargas críticas de Euler (se cambian las notaciones para que coincidan con las del presente trabajo):

$$N_u = \frac{\pi^2 E I_u}{(KL)^2} \quad (2.22)$$

$$N_v = \frac{\pi^2 E I_v}{(KL)^2} \quad (2.23)$$

$$N_t = \frac{\pi^2 E A_g}{\left(5,07 \frac{b}{t}\right)^2} \quad (2.24)$$

De acuerdo a experimentos y simulaciones numéricas de trabajos anteriores, se ha comprobado que las ecuaciones de pandeo en torno al eje U (2.22) y para torsión (2.24) son bastante exactas. En cambio, cuando se ve la carga última con respecto al eje V, la fórmula (2.23) sobreestima bastante la capacidad real, en especial cuando se trata de perfiles donde los centros de gravedad de los ángulos son muy cercanos (d'). La explicación que se da en el documento, es que está última ecuación no toma en cuenta la flexibilidad al corte, y por ende, la deformación que se produce por estos esfuerzos.

Para llegar a una expresión que determine de mejor manera la carga de Euler, se utiliza una columna simplemente apoyada, sin imperfecciones iniciales, prismática, de material lineal elástico, homogénea, y con carga aplicada en el centro de gravedad de la sección transversal. Se hace la suposición de que la esbeltez local de los ángulos es mayor a 20, de manera que se puedan desprestigiar sus tensiones tangenciales, y que la distancia d' es lo suficientemente grande como para ignorar la rotación del conector. Así, se llega a una ecuación que determina la carga de pandeo en torno al eje V para perfiles XL con conectores gruesos, en función de la rigidez a corte (s_{vb}):

$$N_{vb} = \frac{\pi^2 E I_v}{(KL)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E I_v}{s_{vb} (KL)^2}} \quad (2.25)$$

$$s_{vb} = \frac{24 E I_{ch}}{a^2 \left(1 + \frac{2 I_{ch} d'}{I_b a}\right)} \leq \frac{24 E I_{ch}}{a^2} \quad (2.26)$$

Cuando la relación d'/a se hace más pequeña, la segunda hipótesis del párrafo anterior no es válida. Mediante un largo desarrollo matemático, se llega a la siguiente expresión para la carga de Euler en torno al eje V para perfiles XL con conectores delgados:

$$N_{vp} = \frac{\pi^2 E I_v}{(KL)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E I_v}{s_{vp} (KL)^2}} \quad (2.27)$$

$$s_{vp} = \frac{a}{\Delta_2} \quad (2.28)$$

$$\Delta_2 = \frac{2 A_g I_{ch} d'^3 a^3 + 3 A_g I_b d'^2 a^4 + 48 I_{ch} I_b a^4}{12 A_g E d'^3 I_{ch}^2 + 72 A_g E I_b a d'^2 I_{ch} + 288 E I_b a I_{ch}^2} - \frac{a^3}{3 E I_v} \quad (2.29)$$

Lo interesante de la ecuación (2.27) es que si $d' = 0$, la carga crítica de pandeo puede ser calculada mediante la ecuación (2.23). Por otro lado, si $d' = \infty^+$, esta fuerza puede obtenerse a través de la ecuación (2.25). Se compararon los resultados de estas 3 últimas fórmulas, además de

la (2.24) con los valores obtenidos de los modelos de elementos finitos. Con respecto a la torsión, los números eran prácticamente idénticos, por lo que se concluye que el modelo estaba bien calibrado. En relación al pandeo en torno al eje V, se pudo ver que la ecuación (2.23) sobrestimaba desde un 30% hasta un 136% la carga de pandeo en relación a la del análisis numérico, mientras que la fórmula (2.25) tenía una diferencia entre el -37% y el 6% (subestimaba el valor en general). Por otro lado, la ecuación (2.27) mostró una gran precisión, por lo que puede ser utilizada para estimar de manera teórica las cargas críticas de perfiles XL.

2.2.7 Wolmarans & Krige, 1991:

En este trabajo se realizaron estudios experimentales para estudiar el efecto del número y tamaño de los conectores intermedios en la carga de pandeo de perfiles XL, con el fin de simplificar el proceso de diseño de estos elementos en la práctica sudafricana. Se probaron bajo carga monotónica 5 pares de columnas que se diferenciaban en el número de conectores soldados, cuyas cantidades eran de 1, 3, 5, 7 y 9 placas. Las probetas eran de 3 [m] de largo, compuestas por ángulos con alas de 50 [mm] de ancho y 5 [mm] de espesor, unidos mediante pernos a la placa gusset y con condiciones de apoyo simple.

Los resultados fueron prácticamente idénticos entre los perfiles que tenían 3, 5, 7 y 9 conectores, mientras que los que tenían solo uno mostraron una reducción del 50% en su carga última. Este par tuvo un pandeo en torno al eje V-V, mientras que los otros se flexionaron con respecto al eje U-U. Por lo tanto, no supone ninguna ventaja utilizar más de 3 placas, e incluso se vio una pequeña reducción de los resultados a medida que se aumentaba el número, cuya razón deben ser las tensiones residuales que se provocan por la soldadura excesiva en los ángulos.

Así, se concluye con las siguientes recomendaciones para el diseño de perfiles XL: utilizar 3 conectores, uno ubicado al centro del perfil y orientado de la misma forma que las gusset, y los otros dos posicionados perpendicularmente al anterior y ubicados en los sextos del elemento (Figura 2.10); las placas deben ser cuadradas, de la misma dimensión que las alas de los ángulos y con un espesor de al menos el de las alas de estos últimos; y los conectores deben ser soldados por todos sus bordes, con un filete del mismo tamaño que el espesor de ellos.

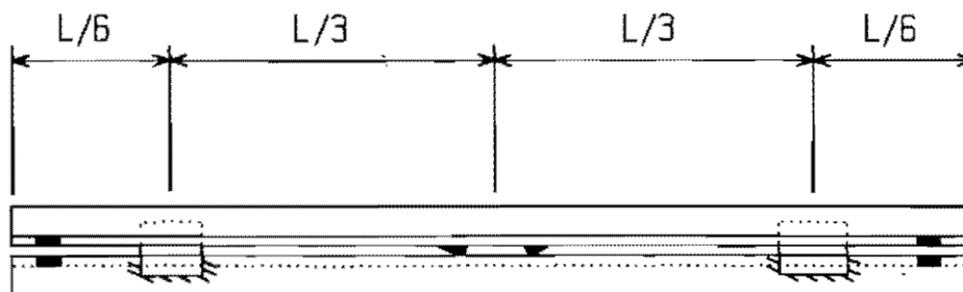


Figura 2.10: Configuración recomendada de conectores intermedios en perfiles XL (Wolmarans & Krige, 1991).

2.2.8 Temple, Schepers, & Kennedy, 1986:

En este trabajo se realizaron estudios analíticos, numéricos y experimentales para determinar el efecto de la configuración y del tipo de conectores intermedios sobre la carga de pandeo de perfiles XL. Se probaron bajo carga monotónica 29 especímenes compuestos por ángulos con alas

de 64 [mm] de ancho y 6 [mm] de espesor, de los cuales 20 eran de 3,05 [m] de largo, 5 de 2,03 [m] y 4 de 1,02 [m], todos con condiciones de apoyo simple y del mismo tipo de acero.

Con respecto a los más largos, la cantidad de conectores iba de 0 a 5, y se utilizaban placas soldadas verticales, placas soldadas horizontales, ángulos soldados, placas con pernos de acero dulce, placas con pernos de alta resistencia e incluso una placa continua soldada a lo largo del perfil. En el caso de los otros largos, se utilizó solo un tipo de placas, cuyo número iba de 0 a 2. Se colocaron medidores en los puntos donde había conectores con el fin de medir los desplazamientos en el eje U-U y en el eje V-V, además de la rotación de la sección. Una vez que se tenía montada la probeta, se medían sus imperfecciones iniciales con el fin de agregar este valor en el modelo de elementos finitos.

En relación a las columnas de 3,05 [m], se pudo ver que las que no tenían conectores, así como también las que poseían solo uno, presentaron un pandeo en torno al eje V-V, mientras que las que tenían 2 o más se flexionaron en torno al eje U-U frente a una fuerza de compresión mayor. Además, para ambos casos la carga última experimental coincidió con la obtenida mediante el análisis numérico, al igual que las curvas de carga-desplazamiento empíricas con las teóricas. También se pudo apreciar que la longitud de los conectores extremos no afecta la carga de pandeo cuando este ocurre en torno al eje U-U, pero sí cuando es en torno al eje V-V. Además, se puede decir con cierto grado de seguridad que el tipo de conector no afectaba ni al eje de pandeo ni a la carga última (no se realizaron suficientes experimentos como para que esto fuera concluyente). Por último, se determinó teóricamente que el perfil con un conector continuo debía tener una carga última de un 5% mayor a sus pares, mientras que en la práctica el aumento es insignificante.

En cuanto a las columnas de 2,03 [m] y de 1,02 [m], se obtuvo un comportamiento similar a las otras, es decir, las que tenían uno o ningún conector fallaron en torno al eje V-V, mientras que las que poseían 2 o más lo hicieron en torno al eje U-U, pero con una carga de pandeo prácticamente idéntica. Un último comentario interesante es que no se observó ninguna falla en los pernos de acero dulce, lo que indica que las fuerzas en el conector no son muy grandes. Así, se termina con la recomendación de utilizar dos conectores a los tercios del perfil, además de los que van en los extremos.

2.3 Línea de investigación:

Como se puede ver a lo largo de la sección 2.2 del presente trabajo, se han realizado bastantes estudios respecto al comportamiento de perfiles XL de acero estructural, para determinar los efectos de sus distintas configuraciones en la carga que son capaces de soportar, y que tan cercanos se encuentran los resultados experimentales con los de modelos teóricos y de elementos finitos.

Sin embargo, prácticamente ninguna de aquellas líneas de investigación se centra en los modos de falla que presentan las riostras, ni se busca relacionar algún parámetro de esbeltez de los elementos con el pandeo que presentan, siendo que en la norma ANSI / AISC 360-16 se diferencian las resistencias nominales según la deformada que presentará el perfil dependiendo de su longitud no atiesada. Es por esto que el presente trabajo es un aporte al estudio de los perfiles XL, que ayudará a tener más claridad al momento de su selección y diseño.

3. Diseño de perfiles

Lo que se expone en esta sección no está ordenado de manera cronológica, y es más bien un resumen del largo proceso iterativo que se realizó para llegar a las dimensiones finales de los especímenes.

3.1 Selección de materiales:

En todo proceso de diseño, lo primero que se debe establecer son los materiales que se utilizarán para construir los elementos. Si bien Claverie (2016) modeló sus perfiles con un acero ASTM A36, la disponibilidad de ángulos de este tipo es un poco limitada en el mercado Chileno. Por ende, se decide utilizar un A270ES según la NCh203.Of 2006, el cual es más común en la oferta, y tiene una composición química prácticamente idéntica a la establecida en la norma ASTM A36/A36M - 14, además de que tienen propiedades mecánicas bastante similares entre ellos. Dado que en la norma Chilena no se detallan factores para obtener los valores de tensión esperados (R_y , R_t) se decide utilizar los correspondientes a los del acero A36, los cuales se especifican en la tabla A3.1 de la ANSI / AISC 341-16.

Con respecto a los pernos, hay que atenerse a las piezas existentes del montaje experimental (ver sección 4.1.2). Por ende, su diámetro debe ser de $\frac{1}{2}$ [in], y sus largos tienen que estar en función del espesor de los elementos a unir, mientras que sus propiedades mecánicas se pueden encontrar en la tabla J3.2 de la ANSI / AISC 360-16. Por último, las soldaduras que se utilizan son las más típicas, en base a las disposiciones de la tabla J2.5 de la norma antes nombrada. El resumen de los materiales escogidos se presenta en la Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3.

Tabla 3.1: Propiedades de los aceros que conforman los distintos elementos de los perfiles XL.

Elemento	Material	F_y [MPa]	R_y [-]	F_u [MPa]	R_t [-]
Ángulos	A270ES	270	1,5	410	1,2
Placa base, gusset y conectores	A36	250	1,5	400	1,2

Tabla 3.2: Pernos, tuercas y golillas para la conexión de los extremos de la riostra.

Elemento	Material	Tipo	Dimensión [in]
Pernos	A325	HEX	
Tuercas	A194	HEX 2H	$\frac{1}{2}$
Golillas	F436	Plana	

Tabla 3.3: Propiedades mecánicas del electrodo de soldadura.

Electrodo	Resistencia [kgf/cm ²]
AWS E70xx	4920

3.2 Limitaciones del diseño:

Al momento de diseñar los perfiles se tienen dos limitantes principales: la fuerza que puede aplicar el actuador hidráulico, la cual corresponde a 100 [tonf], y el patrón de perforaciones de la losa de reacción, lo que implica ciertas longitudes fijas que deben tener las riostras.

Como los perfiles son sometidos a solicitaciones cíclicas, el actuador debe ser capaz de provocar el pandeo y la fluencia de estos. Generalmente, la resistencia a la tracción es mayor que la capacidad a compresión en los elementos de acero, por lo que se utiliza la primera como carga de diseño. Entonces, a partir de la ecuación (2.18) se puede obtener un área transversal máxima, lo cual determina las dimensiones de los ángulos a utilizar:

$$R_y F_y A_g \leq 100 \text{ [tonf]} \quad (3.1)$$

$$A_g \leq \frac{100 \text{ [tonf]}}{1,5 \cdot 270 \text{ [MPa]}} = 24,21 \text{ [cm}^2\text{]} \quad (3.2)$$

A partir del Manual de Diseño de Ángulos Estructurales (Vergara del Pozo, 2004), se puede ver que esto elimina la posibilidad de utilizar toda la gama mayor de ángulos, colocando como cota superior a un XL 160x6.

Con respecto a las longitudes fijas de las riostras, se tiene que el largo libre más pequeño para colocar el elemento es de 1050 [mm], y el resto de las posibilidades son ese valor aumentado en múltiplos de 400 [mm]. Como la longitud del perfil incide directamente en su esbeltez, esta limitante es sumamente importante, debido a que se debe tener un perfil XL en cada uno de los rangos que se muestran en la Tabla 2.2, idealmente en valores intermedios, o numéricamente hablando, con razones alrededor de 4, 8 y 12. Por otro lado, la cantidad de conectores intermedios también influye en el valor de λ_G , por lo que hay que probar distintas combinaciones de este parámetro con los largos disponibles.

Para tener condiciones más parecidas a las de Claverie (2016), se decide utilizar 3 conectores intermedios (ubicados en los cuartos de la luz) y buscar los largos en función de esta cantidad. Mediante una planilla Excel, se prueban las combinaciones posibles, y se ve que solo unos pocos perfiles pueden tener un $\lambda_{G/L}$ alrededor de 4 bajo las condiciones expuestas hasta ahora.

Por otro lado, se ha visto en ensayos anteriores que el montaje experimental que se utiliza no se comporta bien cuando se tienen cargas mayores de 30 [tonf] (ver sección 4.2.4). Si bien se

podrían hacer modificaciones para lograr un mejor desempeño del sistema de ensayo, se opta por la simplicidad y se decide escoger perfiles cuyas resistencias no sobrepasen este valor.

La última decisión que se debe tomar es la forma de abarcar los distintos rangos de $\lambda_{G/L}$. Hay tres opciones: utilizar un largo de riostra fijo e ir cambiando los ángulos componentes; usar ángulos de igual dimensión e ir variando la longitud del perfil; o combinaciones distintas de ambas variables. Finalmente, se escoge la segunda para que la fabricación de los especímenes sea más sencilla para la maestranza. Así, el perfil XL que mejor se adapta a todas las condiciones expuestas es el:

XL 100 x 4

3.3 Verificación de perfiles XL:

La verificación de que los perfiles cumplan con todos los requerimientos normativos, y el hecho de asegurarse de que estos fallen en su sección transversal y no en las conexiones, se realiza a través de planillas de Mathcad que se encuentran en el Anexo D.

3.3.1 Límites de esbeltez:

Como primer paso se deben definir todas las variables, es decir, las características mecánicas de los materiales y las dimensiones y propiedades geométricas de los elementos. Luego se comprueban los límites de esbeltez expuestos en las ecuaciones de la sección 2.1. La Tabla 3.4 muestra las principales características de los especímenes que se ensayan, mientras que la Tabla 3.5 ilustra el cumplimiento de las distintas disposiciones establecidas en las normas de diseño que se consideran.

Tabla 3.4: Características generales de los perfiles XL en estudio.

Nombre del Perfil	Largo de Pandeo [mm]	$\lambda_{x,y}$	λ_u	λ_v	$\lambda_{G/L}$	δ_y [mm]	Peso [kgf]
Corto	984	43,72	51,52	38,69	4,12	2,0	18,63
Intermedio	1784	88,42	101,29	80,34	8,10	3,6	23,52
Largo	2584	128,06	146,71	116,37	11,74	5,2	28,40

Tabla 3.5: Verificación de los límites de esbeltez de los perfiles en estudio (“SI” = cumple con el límite; “NO” = no cumple con el límite).

Esbeltez	Global NCh	Local NCh – 360	Conectores 360	Ductilidad 341	Global 341	Conectores 341
Ecuación	(2.1)	(2.2)	(2.5)	(2.11)	(2.16)	(2.13)
Corto	SI	NO	SI	NO	SI	NO
Intermedio	SI	NO	SI	NO	SI	NO
Largo	NO	NO	SI	NO	SI	NO

3.3.2 Resistencia a los distintos modos de falla:

Mediante las fórmulas descritas en las secciones 2.1.2 y 2.1.3 se calculan las resistencias esperadas y nominales de los perfiles XL, y se identifican los modos de falla que deberían tener según estas normas (notar que las resistencias nominales no tienen el factor de reducción ϕ). Además, se utilizan los resultados del estudio de materiales (Tabla 5.1) para tener una aproximación más real de la capacidad de las riostras.

En la Tabla 3.6 se muestran los resultados, y se destaca el modo de falla predominante en cada una de las categorías. Hay que notar que las resistencias calculadas con el valor de F_y que se obtiene del estudio de materiales son menores a las esperadas, por lo que el factor R_y que se considera inicialmente en los cálculos para el acero A270ES puede no ser el adecuado. Por otro lado, se puede ver que las resistencias al pandeo local son idénticas a la menor entre la capacidad por pandeo de flexión y por flexo-torsión. Esto viene dado por las fórmulas establecidas en la ANSI / AISC 360-16, donde, si bien los ángulos son esbeltos, su razón ancho / espesor no es lo suficiente mayor al límite como para que se tenga una reducción del área efectiva (ecuación (2.12)).

Tabla 3.6: Resistencia de los perfiles XL a cada modo de falla en base a las disposiciones de la ANSI / AISC 360-16.

Perfil	F_y Metal Base	T_Y [tonf]	T_R [tonf]	C_F [tonf]	C_{FT} [tonf]	C_L [tonf]
Corto	Nominal	21,42	28,68	18,40	16,42	16,42
	Medida	25,07	29,45	20,99	18,36	18,36
	Esperada	32,13	34,42	29,17	24,58	24,58
Intermedio	Nominal	21,42	28,68	11,91	16,37	11,91
	Medida	25,07	29,45	12,61	18,30	12,61
	Esperada	32,13	34,42	15,18	24,47	15,18
Largo	Nominal	21,42	28,68	6,38	29,14	6,38
	Medida	25,07	29,45	6,38	29,14	6,38
	Esperada	32,13	34,42	7,28	32,13	7,28

3.3.3 Conexiones:

Dado que durante el diseño no se cuenta con la información de la resistencia medida del material, se utilizan las resistencias esperadas para diseñar los elementos de conexión en base a las fórmulas expuestas en la sección 2.1.3. Se verifica que los 8 pernos resistan la tracción, que las soldaduras sean capaces de resistir las tensiones a las que son sometidas, que el espesor de la placa base sea suficiente para que no ocurra apalancamiento, y que la placa gusset no fluya ni se pandee antes de que lo haga el perfil y que sea capaz de tomar la totalidad de las tensiones de la riostra (ancho de Whitmore, 1952). Con respecto al largo de esta última, se decide utilizar el criterio (iv) del numeral 2.1.3, para que las rótulas plásticas se formen en la conexión y no en los extremos del elemento. Esto implica, que el factor de largo efectivo para el pandeo del perfil (K) equivale a 1,0. El plano de fabricación donde se detallan la dimensiones de las riostras y conexiones se encuentra en el Anexo E, mientras que en la Figura 3.1 se muestran los perfiles construidos.



Figura 3.1: Perfiles XL listos para el despacho.

4. Metodología

4.1 Montaje experimental:

El ensayo de los perfiles XL se lleva a cabo en el muro y losa de reacción ubicados en el Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Para aplicar el desplazamiento protocolar a los especímenes se emplea el actuador hidráulico perteneciente al Departamento (Figura 4.1) que ha sido utilizado para probar diversos sistemas estructurales con fines académicos, el cual tiene una carrera de 500 [mm] que se controla con un LVDT, y una capacidad de carga de 100 [tonf] que se mide con una celda de carga.

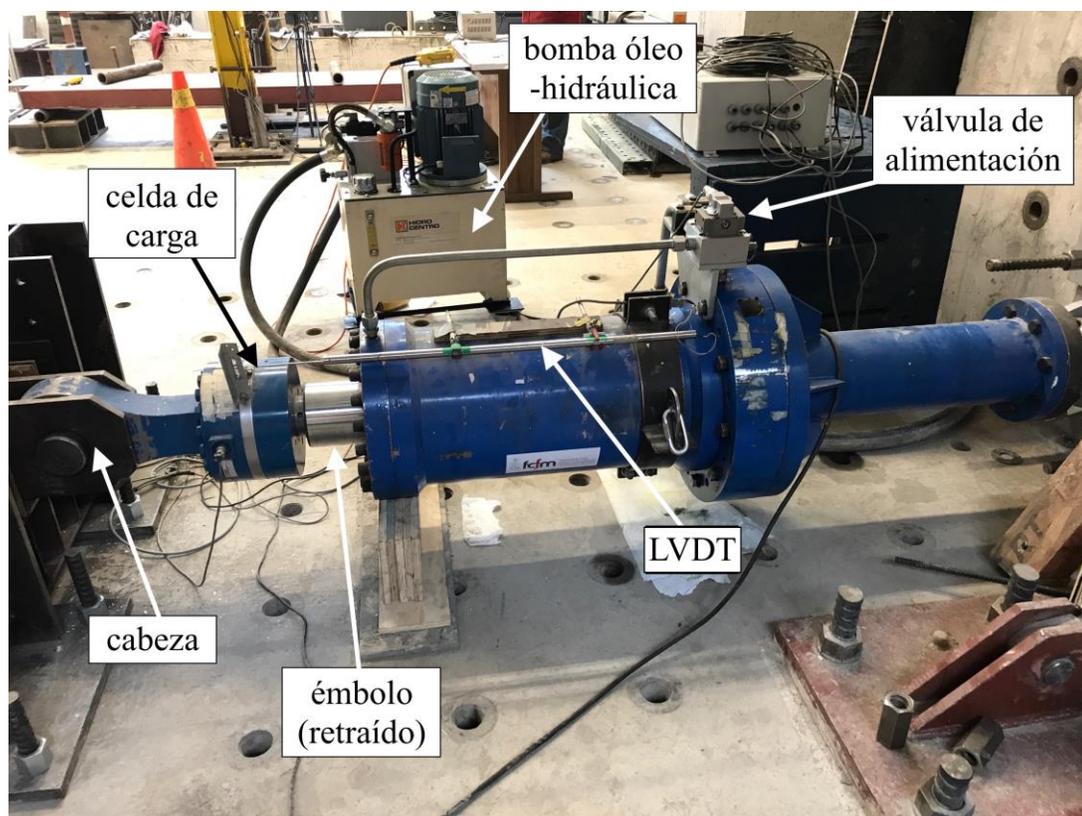


Figura 4.1: Actuador hidráulico del Departamento de Ingeniería Civil.

El montaje experimental del presente trabajo corresponde al diseñado por Espinoza (2015) y utilizado por Escobedo (2016) para el estudio de riostras con pandeo restringido, con algunas modificaciones para adaptarlo a los perfiles XL. Este montaje se compone por 4 partes principales (Figura 4.2): el anclaje del actuador al muro de reacción; las piezas de unión de la cabeza del actuador y la riostra; el apoyo deslizante de la riostra; y el apoyo simple en el otro extremo del espécimen. La nivelación y alineado de todo el sistema es realizado con un taquímetro perteneciente al Departamento de Ingeniería Civil.

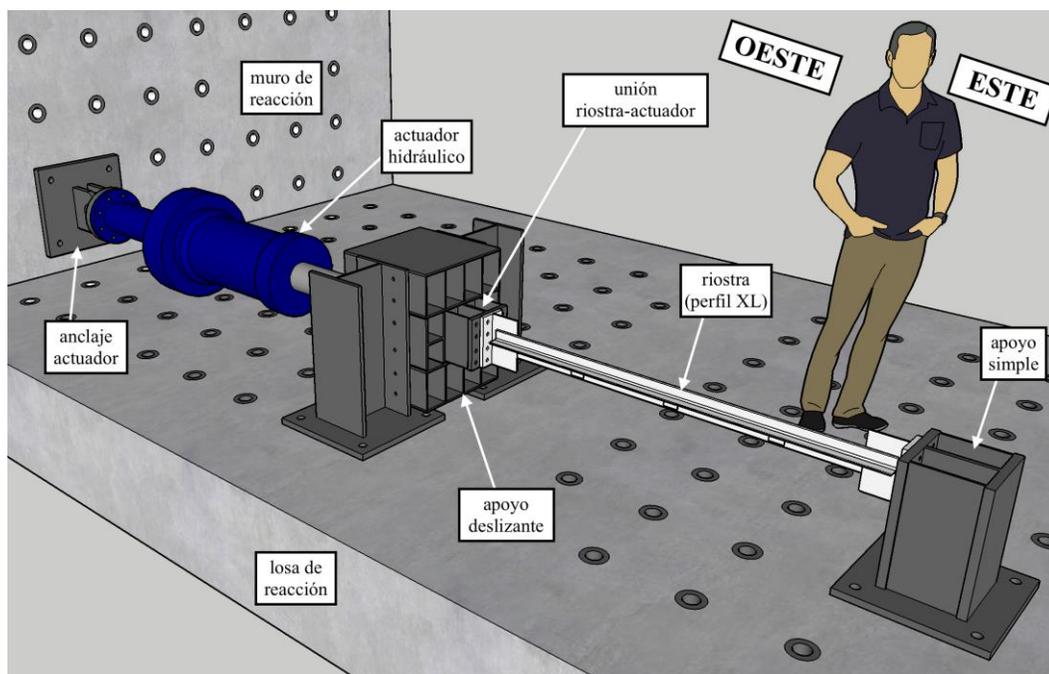


Figura 4.2: Modelo 3D del montaje experimental. La persona se ubica al norte de la riostra y sirve como referencia de tamaño.

4.1.1 Anclaje del actuador hidráulico:

Este es un conjunto de dos piezas (Figura 4.3), las cuales se utilizan para conectar el actuador hidráulico al muro de reacción mediante barras de anclaje. La primera es una placa de 65 [mm] de espesor, con perforaciones de 36 [mm] de diámetro, espaciadas a 400 [mm] en disposición cuadrada. Esta plancha tiene soldadas dos placas redondeadas con una perforación de 102 [mm] de diámetro, que sirve como conector “hembra” para la pieza que va apernada al actuador, las cuales se unen entre ellas mediante un pasador para permitir la rotación.

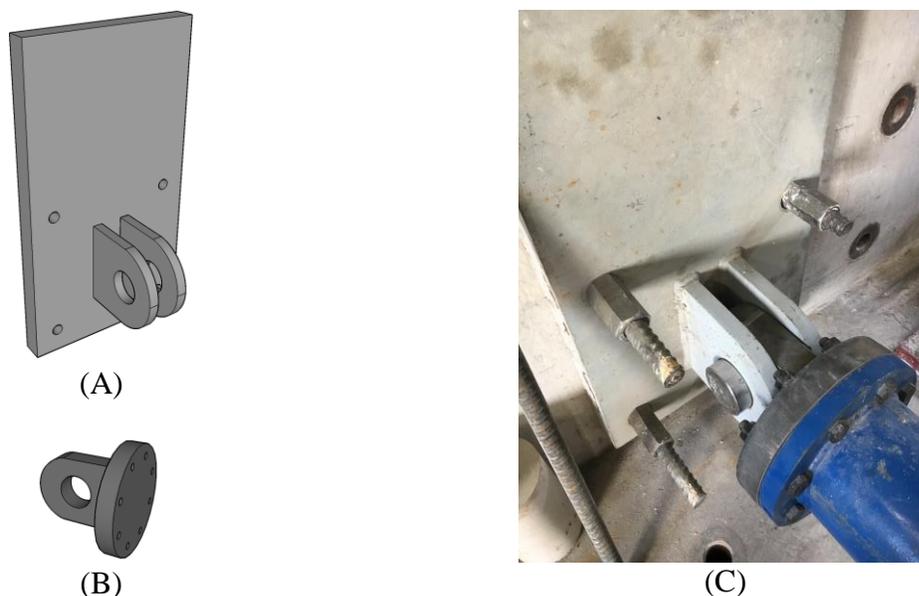


Figura 4.3: Piezas de anclaje del actuador hidráulico al muro de reacción: (A) modelo 3D de pieza anclada al muro mediante barras tensadas, conector “hembra”; (B) modelo 3D de pieza que va apernada al actuador, conector “macho”; (C) piezas reales unidas entre sí mediante el pasador, con el actuador apernado y anclado al muro, sin tensar.

Para evitar que el actuador se separe del muro, es necesario aplicar una tensión a las barras, de manera que estas sirvan como reacción cuando se provoca una fuerza de tracción sobre el perfil XL. Una vez que se tiene colocada la placa con las barras pasadas, se lleva al nivel requerido mediante una transpaleta manual, y se mantiene en esta posición hasta que se tensan los dos anclajes superiores, para luego repetir el procedimiento con los inferiores. La tracción en cada una de las barras es aplicada con un gato hidráulico, y la fuerza que se produce se mide con una celda de carga, llegando a las 23 [tonf] al momento de apretar la tuerca. Para aumentar la superficie de contacto de esta, se utiliza una placa de acero de 20 [mm] de espesor, y con el fin de dejar espacio libre para girarla, se emplea una silla de acero. Además, es necesaria una barra extra como extensión de la de anclaje, para poder atravesar todo el conjunto montado, el cual se acopla en el siguiente orden: placa, tuerca, silla, gato (por dentro tuerca de unión), celda, placa, tuerca. Este se puede ver en la Figura 4.4.

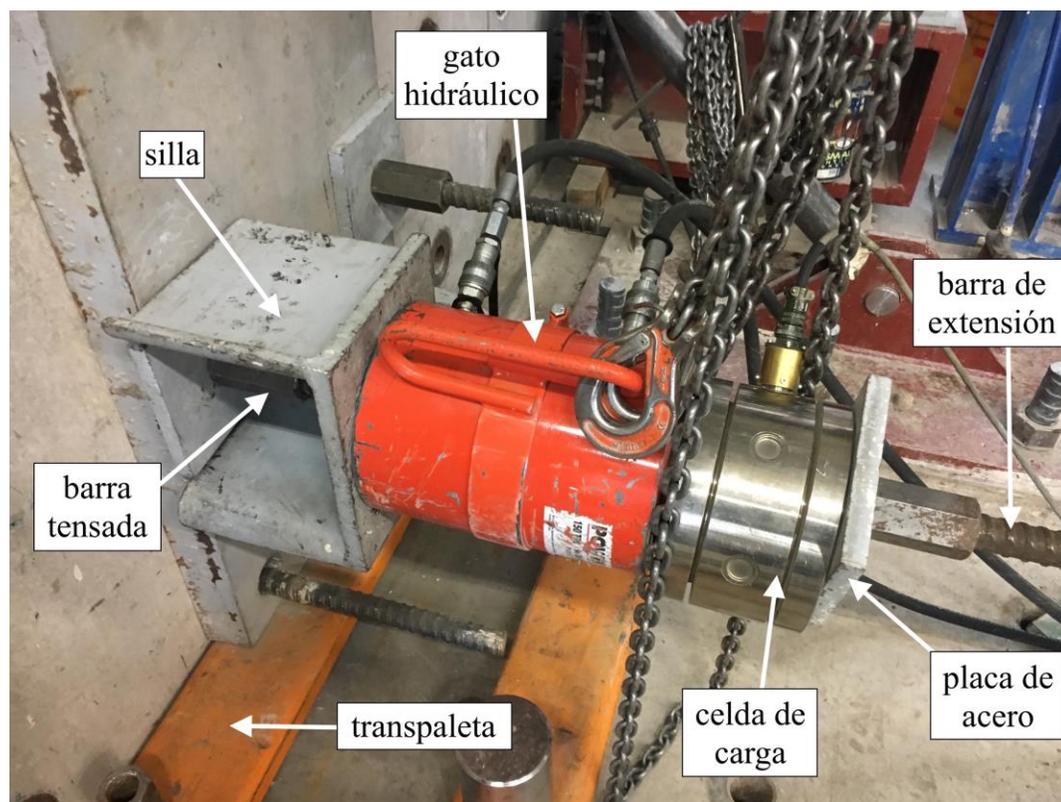


Figura 4.4: Sistema de tensado para las barras de anclaje del muro.

4.1.2 Unión riostra – actuador:

Este conjunto de 2 piezas (Figura 4.5) sirve para transferir la carga axial del actuador hidráulico a la riostra. El elemento que va unido al actuador corresponde a una placa con 8 perforaciones para pernos y que tiene soldada dos piezas, cada una con una perforación de 102 [mm] de diámetro que sirve como conector “hembra” para la cabeza del actuador, que se unen mediante un pasador que permite la rotación. El segundo elemento es un perfil doble T con atiesadores, donde una de sus alas tiene el mismo patrón de perforaciones que la pieza anterior, y la otra, el mismo que la columna de la Figura 4.9 (apoyo simple).

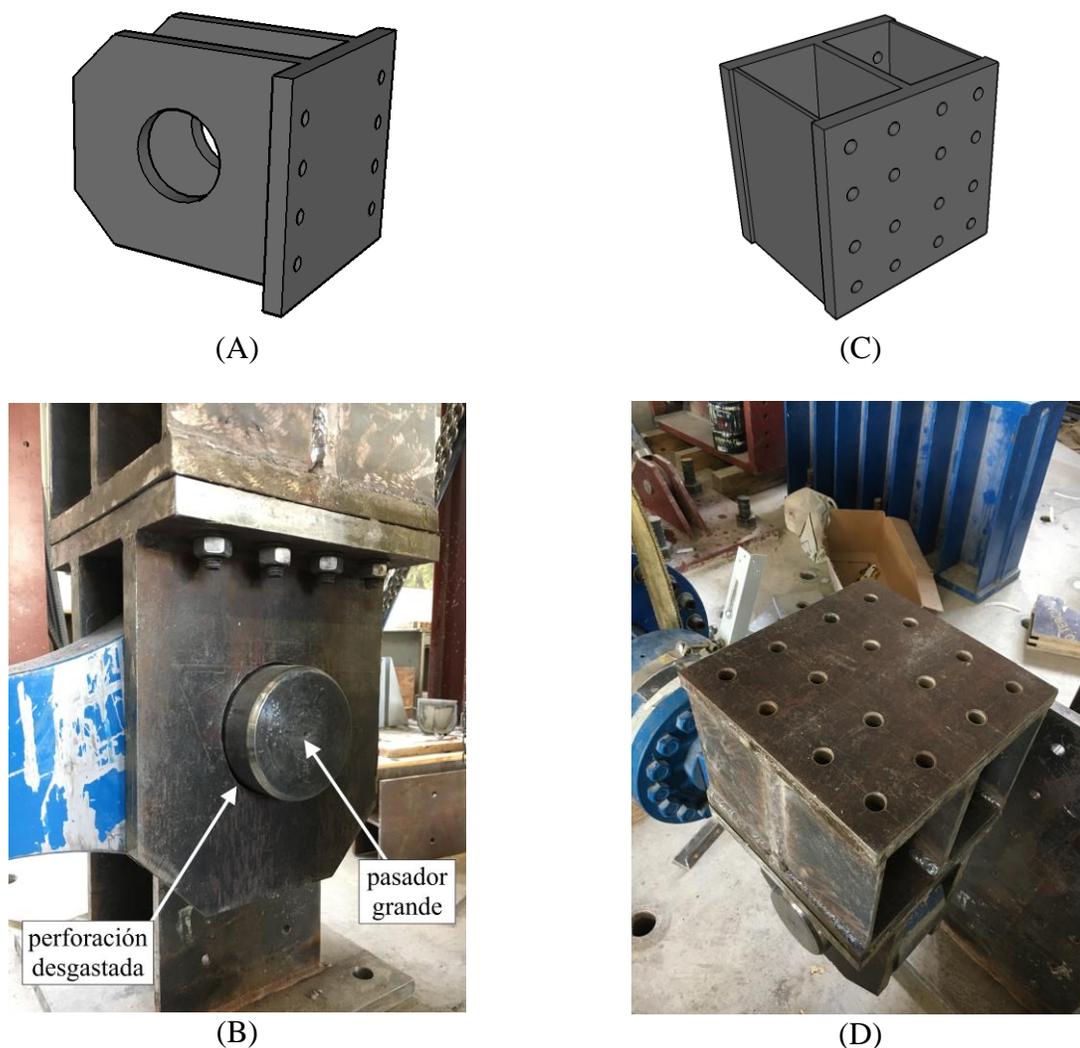


Figura 4.5: Piezas para unir el actuador a la riostra: conector “hembra” para la cabeza del actuador (A) modelo 3D (B) real; doble T para anclar la riostra (C) modelo 3D (D) real.

La pieza que va anclada a la cabeza del actuador tuvo que ser levemente modificada. En el laboratorio hay dos pasadores de acero para unir el actuador a otras partes de los montajes experimentales: uno que va en su parte trasera, y otro que va en la cabeza del pistón, teniendo este último un diámetro levemente mayor que el primero, por lo que no atraviesa la perforación trasera. Para los ensayos anteriores que emplearon este montaje, el actuador iba apernado en su extremo anterior, y para anclar la pieza de la Figura 4.5 a la cabeza del actuador, se utilizó el pasador más pequeño, por lo que no se tuvo problemas. Sin embargo, en el proceso de preparación de las pruebas del presente trabajo, se pudo ver que el cilindro correspondiente al extremo de la riostra (el más grande) no encajaba por la pieza de acero. Es por esto, que la perforación de esta última debió ser desgastada con una galletera eléctrica.

4.1.3 Apoyo deslizante:

Este conjunto de 3 pares de piezas (Figura 4.6), ubicadas al oeste de la riostra, sirve para confinar el movimiento del actuador, de manera que su cabeza solo se desplace longitudinalmente. El primer par corresponde a dos columnas de perfil doble T, soldadas a una placa base de 30 [mm] de espesor que tiene la misma configuración de perforaciones de la pieza en la Figura 4.3A, para

anclarse a la losa de reacción mediante barras de anclaje, y cuya función es sostener los perfiles que confinan los desplazamientos fuera del eje, uniéndose a estos mediante pernos que pasan por las perforaciones que las columnas tienen a lo largo de una de sus alas. La segunda pareja son vigas de perfil doble T con 5 atiesadores a cada lado del alma, donde los 4 ubicados en los extremos tienen las perforaciones para la unión. Por último, se tienen 2 vigas de sección doble T con perforaciones en una de sus alas para anclarse a las columnas.



(A)



(B)



(C)

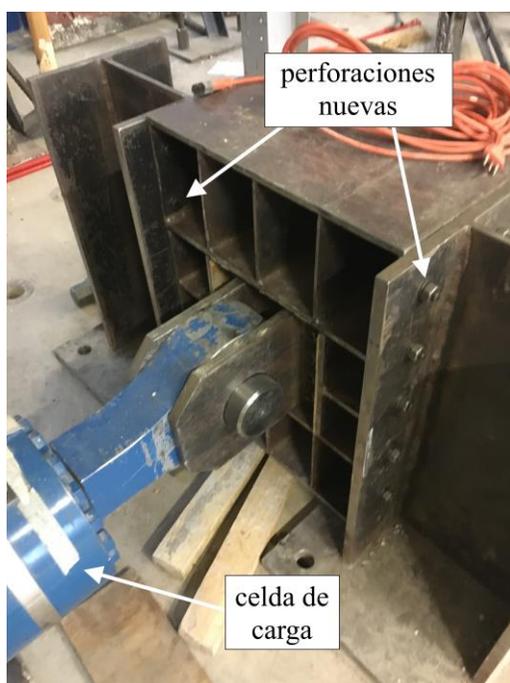
Figura 4.6: Piezas que componen el apoyo deslizante: (A) columna de anclaje; (B) viga para restringir movimientos verticales; (C) viga para restringir movimientos horizontales.

Este conjunto tuvo que ser modificado para adecuarse mejor a las condiciones del ensayo. El largo de los perfiles XL es diseñado con la hipótesis de que el actuador hidráulico está a la mitad de su carrera (250 [mm] hacia afuera), pero no se consideró el hecho de que la celda de carga de este es más grande que el espacio proporcionado por el conjunto anterior para confinar su cabeza. En el proceso de montaje, se pudo ver que solo quedaban 18 [mm] de distancia entre la celda y los bordes de las vigas del apoyo deslizante, lo cual no es un espacio suficiente para lograr el

desplazamiento objetivo de los especímenes más largos, y que deja muy poca holgura para el resto de los ensayos. Se optó por realizar nuevas perforaciones en las vigas, de tal manera que, al unirse a las columnas, estas quedan más alejadas de la celda del actuador. Así, esta parte del montaje tiene dos configuraciones posibles: una centrada y otra desplazada, siendo esta última la que se utiliza para todos los ensayos del presente trabajo. Esta modificación, y el apoyo deslizante ensamblado se pueden ver en la Figura 4.7.



(A)



(B)



(C)

Figura 4.7: Apoyo deslizante del ensayo: (A) ensamblado; (B) (C) modificado.

Seis de las barras de este apoyo son tensadas a 17 [tonf], a excepción de las dos interiores que interfieren con la viga inferior (ver Figura 4.7A), debido a la imposibilidad de girar la tuerca en las perforaciones realizadas en el ala de aquel elemento. Este procedimiento fue similar al de los anclajes del muro, con la diferencia de que no se puede utilizar la silla de acero debido a la pequeña distancia entre las perforaciones de la placa base y las alas de las columnas. Por lo tanto, se opta por utilizar una viga compuesta por dos perfiles canal espalda-espalda unidos por placas de acero, lo cual deja un espacio disponible entre ellos para pasar una barra de extensión. Esta viga se coloca encima de cada una de las columnas junto con dos gatos y la celda de carga, para tensar un par de barras de una sola vez, como se puede ver en la Figura 4.8.

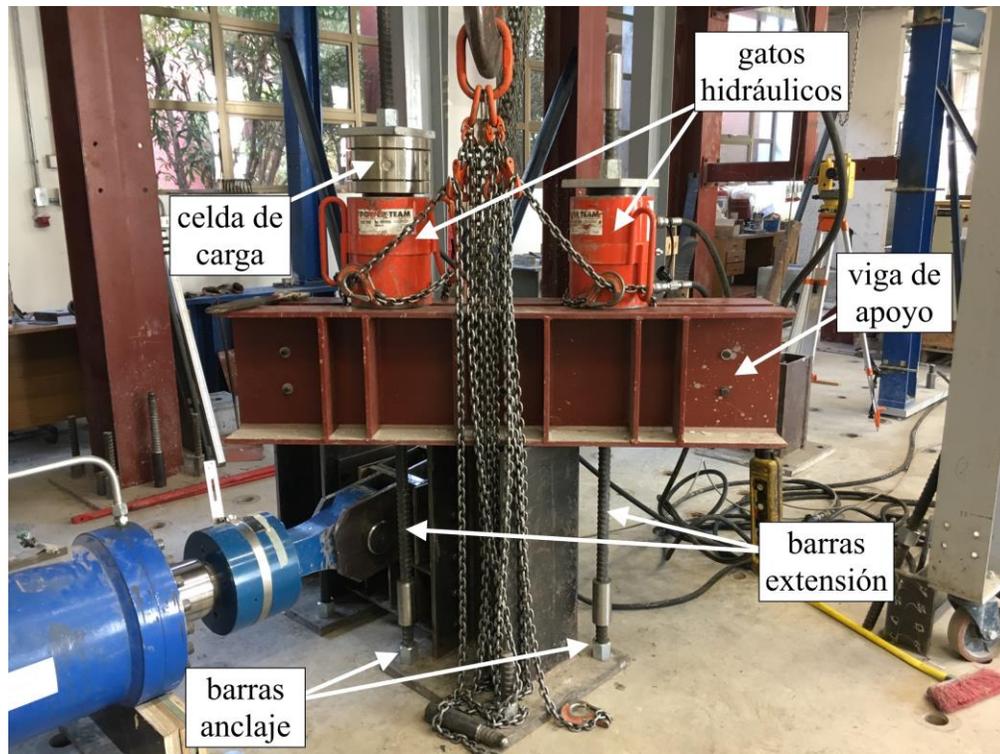


Figura 4.8: Sistema de tensado para las barras de anclaje del apoyo deslizante.

4.1.4 Apoyo simple:

Este apoyo (Figura 4.9), ubicado al este de la riostra, se compone por solo una pieza, que corresponde a una columna de perfil doble T con atiesadores longitudinales para resistir la flexión de mejor manera, soldada a una placa base idéntica a las que poseen las columnas que se muestran en la Figura 4.6A, para ser anclada a la losa de reacción. Este elemento posee un patrón cuadrado de perforaciones para pernos de $\frac{1}{2}$ [in] en una de sus alas, idéntico al de la pieza en la Figura 4.5D, y sirve para restringir el movimiento horizontal, vertical y longitudinal de un extremo de la riostra. A diferencia del resto del montaje, el cual queda fijo para todos los ensayos, este elemento tiene que ser colocado en 3 posiciones distintas para adaptarse a los distintos largos de los especímenes.

Para que las perforaciones del ala de la columna queden al mismo nivel que las de la pieza que une el actuador con la riostra, se utilizan 4 planchas de acero de 20 [mm] (una en cada perforación de la placa base). Cada una de las barras de este apoyo es tensada a 28 [tonf] para evitar el deslizamiento. El sistema empleado, para dos de las posiciones que se utilizan, es exactamente

el mismo que para el apoyo deslizable (Figura 4.8). Para la tercera, es muy similar, con la diferencia de que la viga que sirve de silla no pudo quedar centrada debido a la interferencia de una columna utilizada en otros ensayos. Se tiene que colocar una de las vigas con atiesadores del apoyo deslizable (Figura 4.6B) para darle estabilidad al sistema. Este caso particular se puede ver en la Figura 4.10.



Figura 4.9: Apoyo simple del ensayo.



Figura 4.10: Sistema de tensado para las barras del apoyo simple en su posición para las riostras más largas.

4.2 Instrumentación:

La instrumentación de los ensayos va en función de los parámetros que se desean medir para determinar los modos de falla de los perfiles XL, y de acuerdo a las posibles variaciones y/o equivocaciones que se pueden tener durante las pruebas. Con respecto a lo primero, se desea encontrar el giro y los desplazamientos horizontal y vertical de la sección transversal en el punto medio de la riostra, así como también su cambio de longitud a lo largo del ensayo. En relación a lo segundo, se necesita poseer los posibles desplazamientos del apoyo simple para corregir las medidas proporcionadas por el LVDT controlador del actuador, y que es un aprendizaje de los experimentos llevados por Escobedo (2016) donde ocurrieron deslizamientos a grandes cargas. Así, los instrumentos a utilizar son los siguientes:

- **LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*):** este instrumento (Figura 4.11A) está compuesto por dos partes: un cuerpo cilíndrico hueco y un núcleo cilíndrico con hilo que se introduce en la pieza anterior. Sirve para reportar el desplazamiento relativo entre sus dos partes, lo cual se mide mediante el cambio de voltaje que se produce por aquel movimiento, y que se relaciona con una longitud mediante una constante de proporcionalidad. Con una varilla metálica roscada (vástago) que se introduce en el núcleo y que sirve como extensión es posible medir desplazamientos en cualquier parte del espécimen. En el presente trabajo se utilizan 7 LVDT marca *Macro Sensors* de la serie DC 750, donde 6 tienen un rango de medición total de 2 [in] (± 1 [in] centrados), y uno capaz de medir hasta 20 [in] (± 10 [in] centrados) que se utiliza como controlador del desplazamiento del actuador.
- **Inclinómetro:** este instrumento (Figura 4.11B) es una pequeña caja plástica cilíndrica con perforaciones en dos extremos para poder ser atornillados a alguna superficie. Al igual que los LVDT, mide una variación de voltaje que se genera cuando gira en torno a su eje horizontal, y que puede ser relacionado a un ángulo mediante una constante de proporcionalidad. En el presente trabajo se utilizan 2 inclinómetros marca *Measurement Specialities*, modelo AccuStar CE, los cuales tienen un rango de medición de 120 [°] (± 60 [°] centrados).
- **Celda de Carga:** este instrumento ya se encuentra incorporado al actuador hidráulico y sirve para medir la fuerza de reacción que provoca la riostra cuando se desplaza el émbolo. Al igual que los dos anteriores, se produce una variación de voltaje dentro de ella que se relaciona mediante una constante de proporcionalidad a una carga, con la diferencia de que este valor ya está incorporado al sistema de adquisición, por lo que los datos que se obtienen tienen unidades de [N].



Figura 4.11: Instrumentos de medición: (A) LVDT's; (B) inclinómetro.

Así, se tienen 10 instrumentos de lectura de datos que deben ser conectados al sistema de adquisición (Figura 4.12). Este se compone por un por una caja de conectores DB9 de 31 canales construida por el alumno Fernando Muñoz, a la cual se le conectan los 9 alargadores de los 7 LVDT's y de los 2 inclinómetros. Se tiene un chasis con tarjetas de adquisición, donde se conecta el cable principal de la caja y el canal de lectura de la celda de carga, y del cual sale un cable de red que se conecta a un computador con el programa *cDaqexpre2E* para registrar los datos. Tanto a las tarjetas de adquisición como la caja conectora se les debe suministrar con una fuente de poder. Por último, se tiene una caja metálica con el sistema de control del actuador, que al conectarlo a un computador muestra una interfaz donde se debe colocar un voltaje objetivo y un tiempo en [s], de manera que el émbolo se desplace automáticamente (para más detalle ver la sección 5.3.7 del trabajo de Salas, 2016).

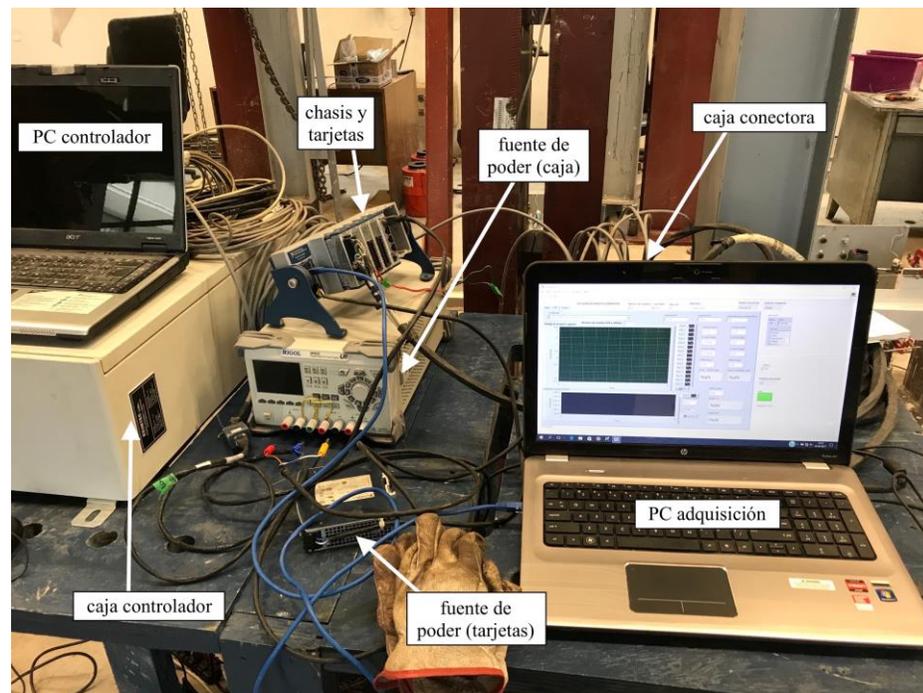


Figura 4.12: Sistema de adquisición de datos. No se puede apreciar la caja conectora debido a que se encuentra detrás del PC de adquisición.

4.2.1 Desplazamiento de la sección transversal:

Para captar el movimiento vertical y horizontal de la sección transversal se utilizan dos LVDT's conectados al canal 1 y 2 de la caja de conectores respectivamente, cuyos vástagos se introducen en un pedazo de corcho pegado con araldite a la plancha intermedia, con el fin de medir en el punto más cercano posible al centro de gravedad. En el primer ensayo los instrumentos son sostenidos con pinzas ancladas a soportes magnéticos, que se adhieren a otras piezas de acero disponibles en el laboratorio (Figura 4.13). Sin embargo, el modo de pandeo de la riostra provoca desplazamientos muy grandes fuera del plano, que podrían ser medidos de mejor manera si el LVDT tuviera la capacidad de rotar. Por ende, para el segundo ensayo se cambia el sistema de apoyo y se utilizan los fabricados por Salas (2016), que consisten en un soporte plástico y un tubo de PVC donde se introduce el instrumento (Figura 4.14). A pesar de esto, se ve que el vástago del LVDT superior se sigue flectando demasiado durante el pandeo del espécimen, por lo que se decide utilizar varillas más largas para los 4 ensayos restantes (Figura 4.15).

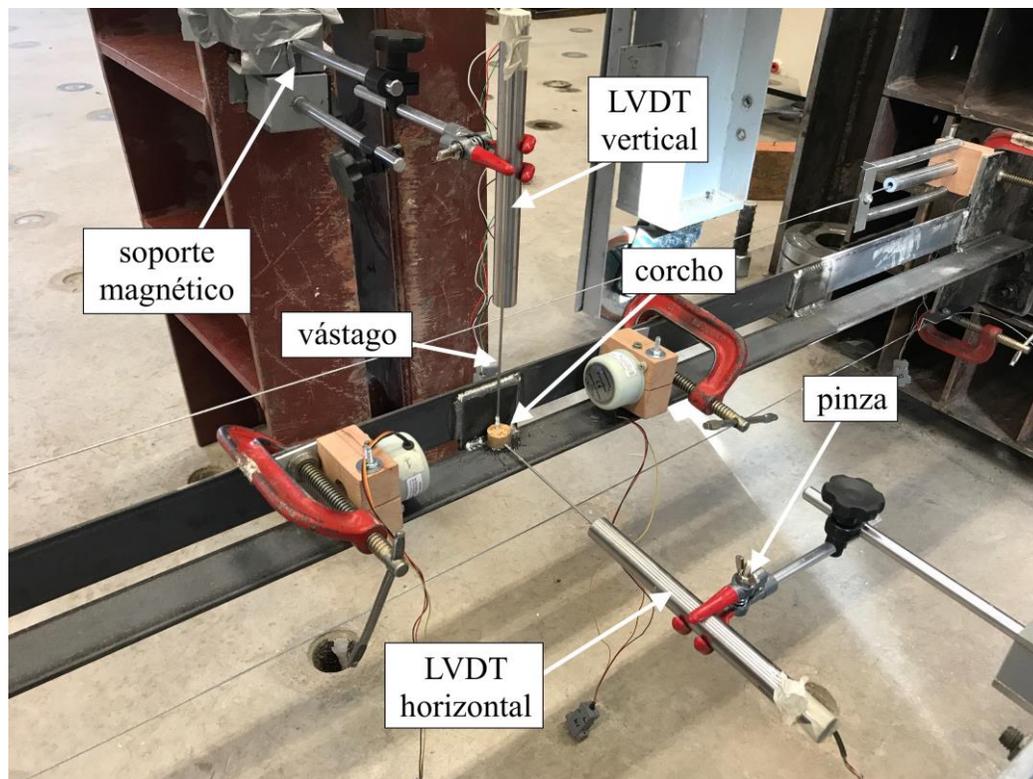


Figura 4.13: Configuración y soporte de los LVDT horizontal y vertical en el ensayo monotónico de la riostra intermedia (vista desde el norte del perfil). Notar que los inclinómetros no están en su posición de medición.



Figura 4.14: Cambio de soporte para permitir rotación del LVDT en el ensayo cíclico de la riostra intermedia (vista desde el norte del perfil).

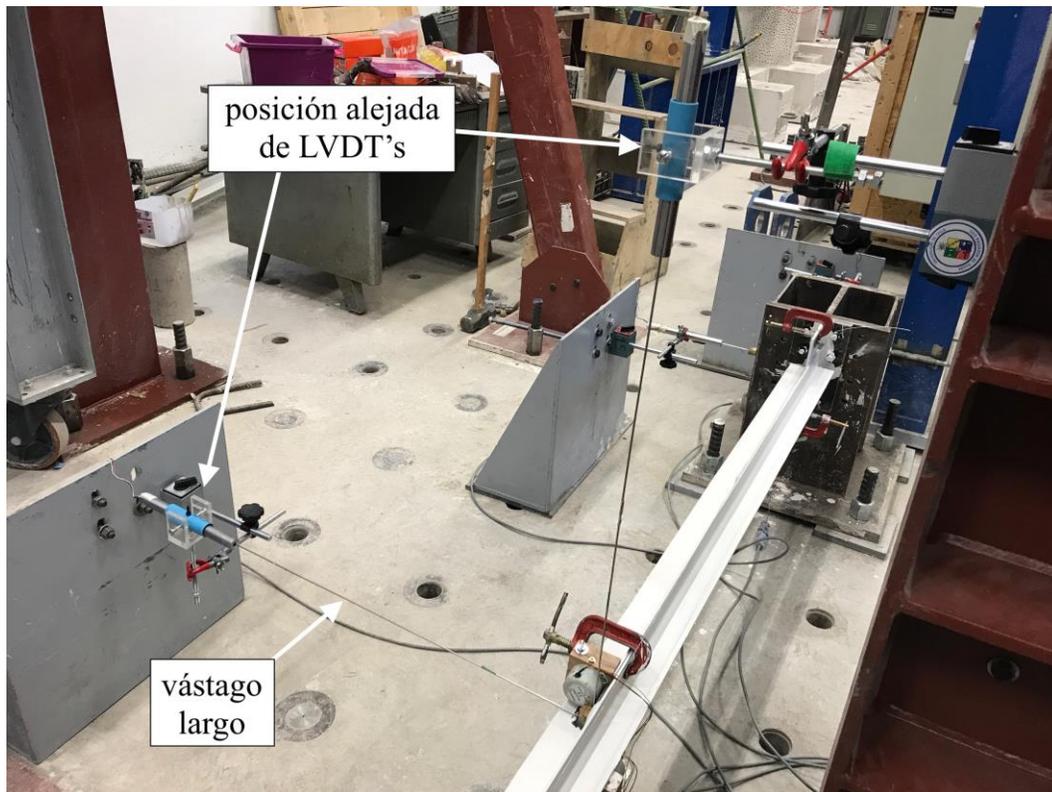


Figura 4.15: Posición alejada de los LVDT vertical y horizontal para los ensayos monotónico y cíclico de las riostras larga y corta (vista desde el suroeste del perfil).

4.2.2 Giro de la sección transversal:

Para medir este movimiento se utilizan dos inclinómetros: uno fijado en el ángulo superior y al este del conector central con su cara apuntando hacia el oeste, y otro anclado en el ángulo inferior al oeste del conector central con su cara apuntando hacia el este; conectados a los canales 3 y 4 de la caja de conectores respectivamente (Figura 4.16). Hay que notar que en estas posiciones se está midiendo el giro a ambos lados de la plancha, y al estar orientados de manera contraria, sus mediciones tienen distinto signo. Por lo tanto, la convención que se utiliza es que el giro es positivo hacia el norte. Los instrumentos se atornillan a un soporte de madera diseñado originalmente para sostener LVDT's, los cuales tienen una placa de aluminio que sirve para fijar su posición mediante una prensa manual. Esta configuración se emplea en 5 ensayos, siendo la excepción el cíclico de la riostra corta, donde los inclinómetros se mueven para quedar anclados directamente al conector central y así no interferir en los pandeos que se generan en el perfil a lo largo del experimento, teniendo la precaución de no cambiar su orientación. Esto implica que el inclinómetro del este queda en el ángulo inferior, y el del oeste pasa al ángulo superior (Figura 4.17).

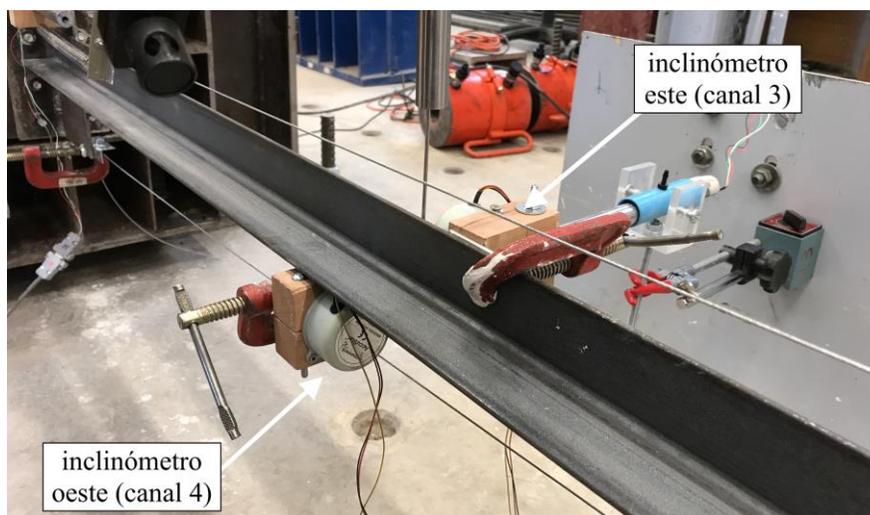


Figura 4.16: Primera configuración de inclinómetros (vista desde el sur de la riostra).

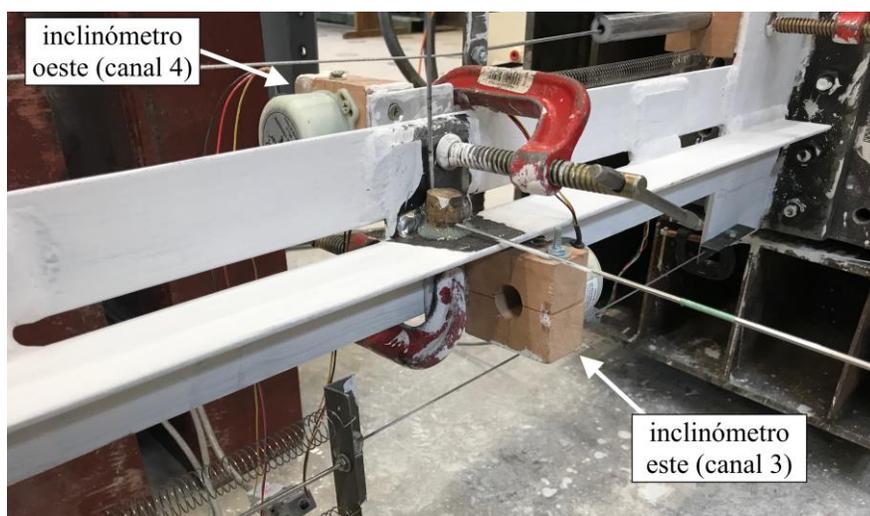


Figura 4.17: Configuración de inclinómetros para el ensayo cíclico del perfil corto (vista desde el norte de la riostra).

4.2.3 Cambio de longitud del perfil XL:

Para medir este desplazamiento se utilizan dos LVDT's colocados en soportes de madera y anclados a las placas gusset mediante prensas manuales. Uno se posiciona en la parte superior de la riostra (Figura 4.18), en la placa oeste por su cara sur, mientras que el otro se ubica en la parte inferior del perfil, en la gusset este por su cara norte (Figura 4.19); conectados a los canales 5 y 6 de la caja de conectores respectivamente. El vástago se une mediante tuercas a un ángulo de aluminio, el cual se sostiene y se acerca al instrumento mediante resortes anclados al soporte de madera y que posee un perno con una perforación en su cuerpo para anclar un cable o un alambre que se sostiene a la gusset contraria mediante el mismo sistema (Figura 4.20). Este punto de conexión se deja suelto hasta el momento de posicionar el núcleo del instrumento en el centro de su cuerpo. Al apretar el perno, tanto los resortes como el cable quedan con una tensión interna, de manera que, si la riostra disminuye su longitud, los primeros provocan que el vástago entre más en el LVDT, mientras que, si el perfil sufre una elongación, el segundo provoca el movimiento contrario del núcleo.

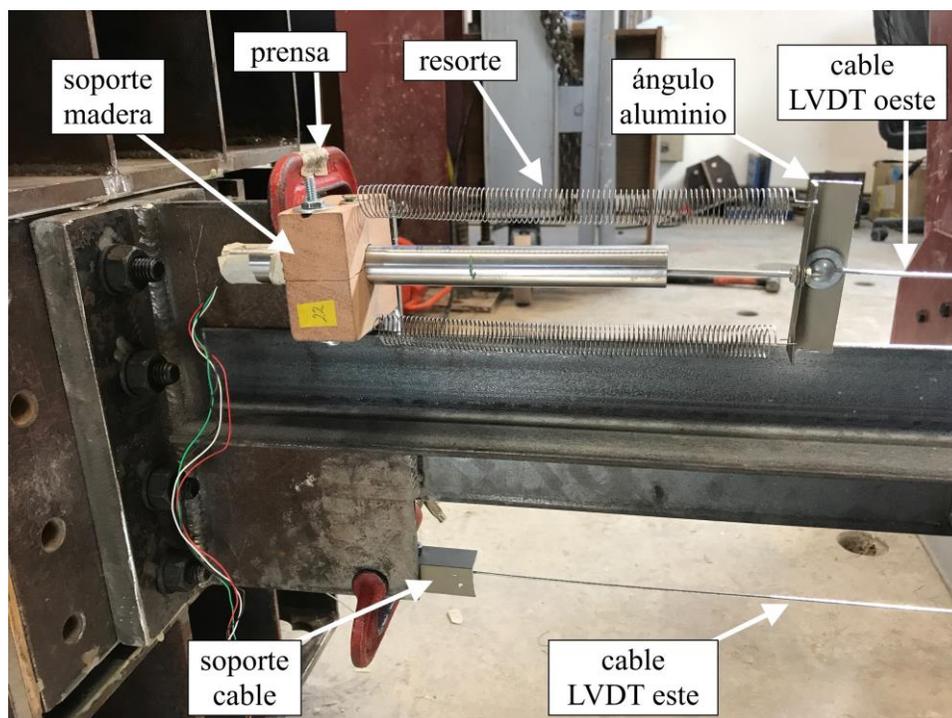


Figura 4.18: Sistema de soporte y montaje del LVDT superior para medir deformación longitudinal del perfil XL (vista desde el sur de la riostra).

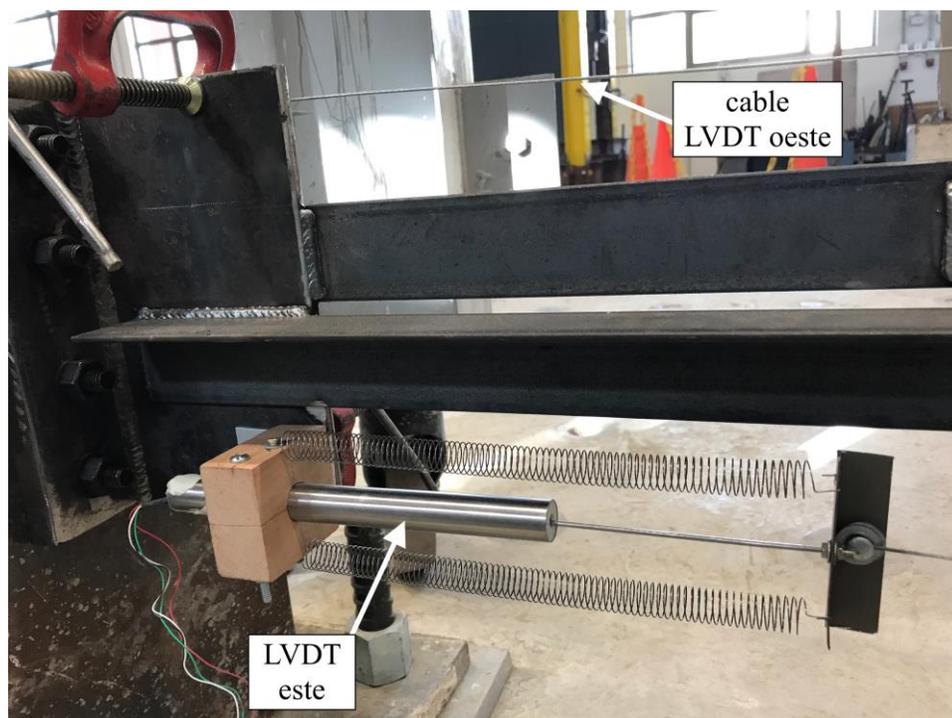


Figura 4.19: Sistema de soporte y montaje del LVDT inferior para medir deformación longitudinal del perfil XL (vista desde el norte de la riostra).



Figura 4.20: Ángulo de aluminio de soporte para el cable de los LVDT's longitudinales.

4.2.4 Movimiento del apoyo simple:

Debido a que en el trabajo de Escobedo (2016) se experimentaron deslizamientos de este apoyo alrededor de las 30 [tonf], se decide colocar dos LVDT's para captar el movimiento de este elemento (Figura 4.21). Uno se coloca al lado contrario de la riostra, aproximadamente al mismo nivel de su centro de gravedad, para medir desplazamientos longitudinales, mientras que el otro se posiciona al costado norte del apoyo, para captar posibles rotaciones de este; conectados a los canales 7 y 8 de la caja de conectores respectivamente. Ambos se sostienen con pinzas ancladas a soportes magnéticos que se adhieren a otras piezas de acero disponibles en el laboratorio, y sus vástagos van introducidos en pedazos de corcho pegados al apoyo con araldite.

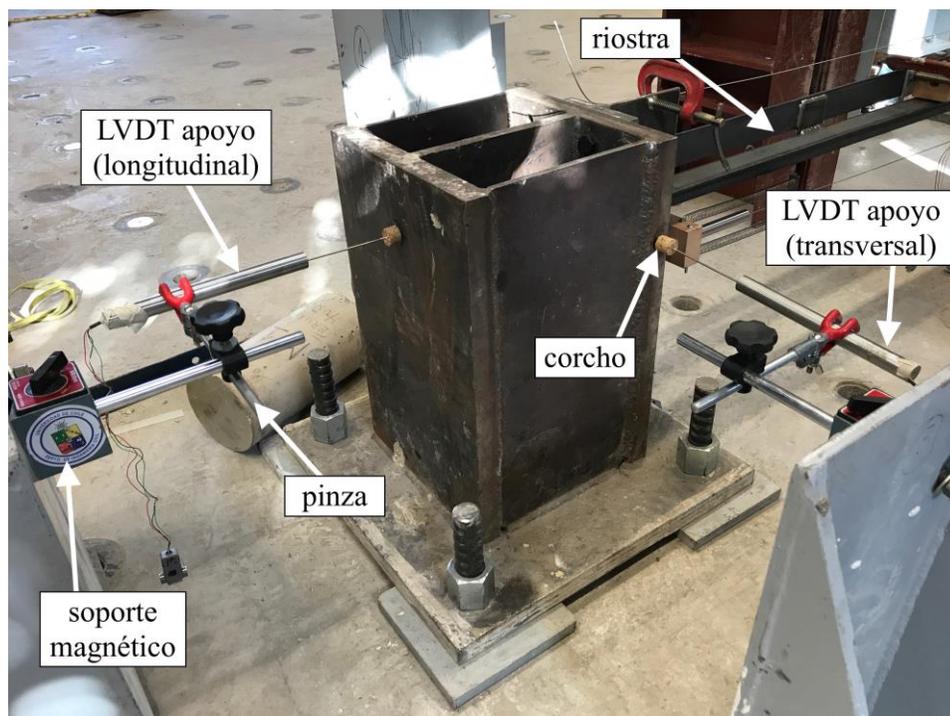


Figura 4.21: LVDT's para medir el movimiento del apoyo simple del ensayo (vista desde el noreste de la riostra).

4.2.5 Desplazamiento aplicado y reacción del perfil XL:

Estos datos se obtienen a partir del actuador hidráulico, el cual tiene incorporados dos instrumentos de medición: un LVDT y una celda de carga. El primero se conecta al controlador, y de este sale un alargador que se conecta al canal 0 de la caja de conectores. Por otro lado, de la celda de carga sale un conector que se comunica directamente a las tarjetas de adquisición en el chasis mediante un cable de red, y por ende, queda registrado como el último canal de datos (9).

4.2.6 Calibraciones:

Si bien todos los LVDT's e inclinómetros poseen una constante de proporcionalidad suministrada por el fabricante, son valores que se calculan bajo condiciones ideales distintas a las del laboratorio. Por ende, es necesario realizar una calibración de estos instrumentos para encontrar como se está relacionando la variación de voltaje con los desplazamientos y giros reales bajo el contexto del ensayo. Esto se lleva a cabo en la sección del Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil ubicada en el primer piso del edificio. Se utilizan las mismas condiciones que se tienen al momento de realizar los ensayos, es decir, se emplean los mismos alargadores, voltajes de poder, vástagos, orden de conexiones, etcétera.

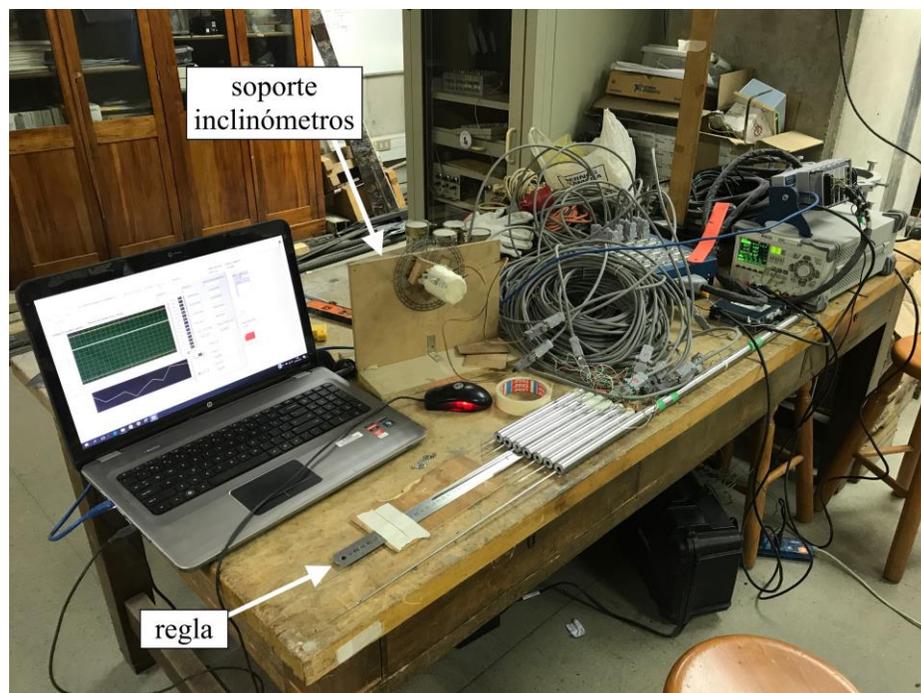


Figura 4.22: Montaje para la calibración de los LVDT's e inclinómetros.

Una vez que se tienen todos los instrumentos conectados, se posicionan todos los LVDT's sobre la mesa uno al lado del otro siguiendo el orden en el que están conectados a la caja, con sus núcleos y vástagos totalmente retraídos (saturados en voltaje negativo), y por debajo de ellos, una regla metálica de 30 [cm] (Figura 4.22). Por otro lado, ambos inclinómetros son colocados en un soporte de madera que posee un transportador con la posibilidad de girar, y en la misma posición relativa entre ellos. Se hace un registro de datos por cada instrumento, procurando desplazar solamente el involucrado en la respectiva calibración. Para los LVDT, se busca la ubicación donde

está casi saturado por el lado negativo, y desde ahí se comienza a mover en tramos de 5 [mm], dejándolo en cada posición alrededor de 10 [s], hasta que se logra saturar por el lado positivo. Así se tiene una “escalera” de datos, donde para cada escalón se toma el promedio de voltaje y se relaciona con un desplazamiento respecto a la ubicación inicial, para luego hacer una regresión lineal que entrega la constante de proporcionalidad buscada. Con los inclinómetros, el procedimiento es exactamente el mismo, con la diferencia en que se giran cada 5 [°]. Los valores que se obtienen se muestran en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2.

Tabla 4.1: Constantes de proporcionalidad de los LVDT.

LVDT	Canal	S.N.	Constante [mm / V]
Actuador	0	86005	28,8072
Vertical	1	6165443	2,6131
Horizontal	2	6165444	2,6076
Longitudinal, Oeste	5	6165447	-2,6426
Longitudinal, Este	6	6165448	-2,7161
Apoyo, Longitudinal	7	6165449	2,5662
Apoyo, Transversal	8	6165446	2,6318

Tabla 4.2: Constantes de proporcionalidad de los inclinómetros.

Inclinómetro	Canal	S.N.	Constante [° / V]
Este	3	D2390168	18,8668
Oeste	4	D2120051	-18,5762

En todas las regresiones se obtuvieron constantes de proporcionalidad positivas, y manualmente se les agregó el signo (-) para que estuvieran acorde a las convenciones típicas. Así, si se hace un corte en el centro de la sección transversal mirándola desde el apoyo simple (este), se tienen los signos de un plano cartesiano: si el perfil se desplaza hacia la derecha (norte), el LVDT horizontal mostrará un valor positivo; si el perfil se mueve hacia arriba, el LVDT vertical reportará un valor positivo; y si la sección gira en el sentido de las agujas del reloj (hacia el norte), ambos inclinómetros expondrán un valor positivo (Figura 4.23).

Por otro lado, cuando la riostra se está comprimiendo, ambos LVDT's longitudinales y el perteneciente al actuador reportarán valores negativos (Figura 4.24). Por último, cuando el apoyo se flecta o desplaza hacia el este (se aleja de la riostra), el LVDT longitudinal mostrará valores positivos, mientras que, si se mueve hacia el sur de la riostra, el LVDT transversal expondrá valores negativos (Figura 4.25).

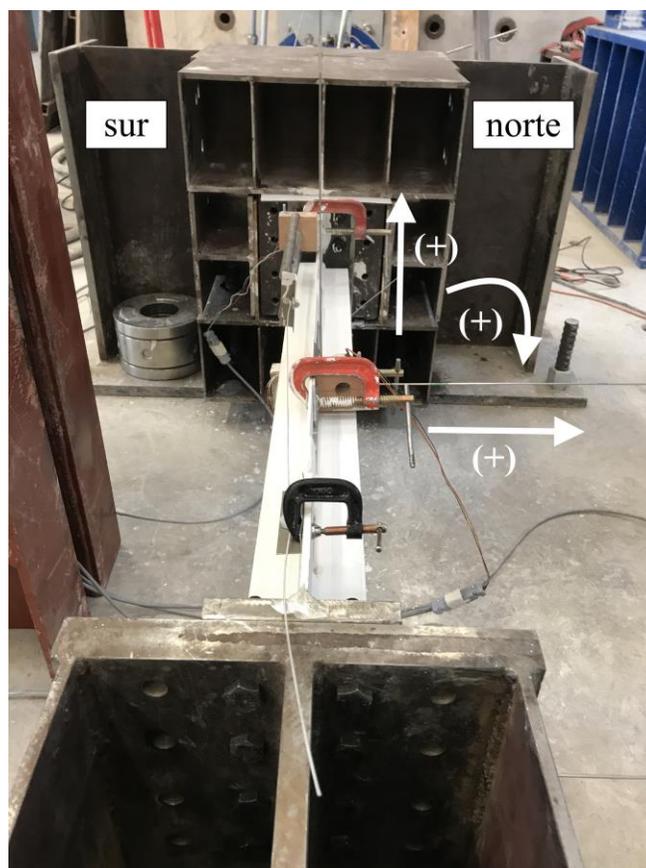


Figura 4.23: Signos para los datos de los LVDT's e inclinómetros de la sección transversal del perfil.

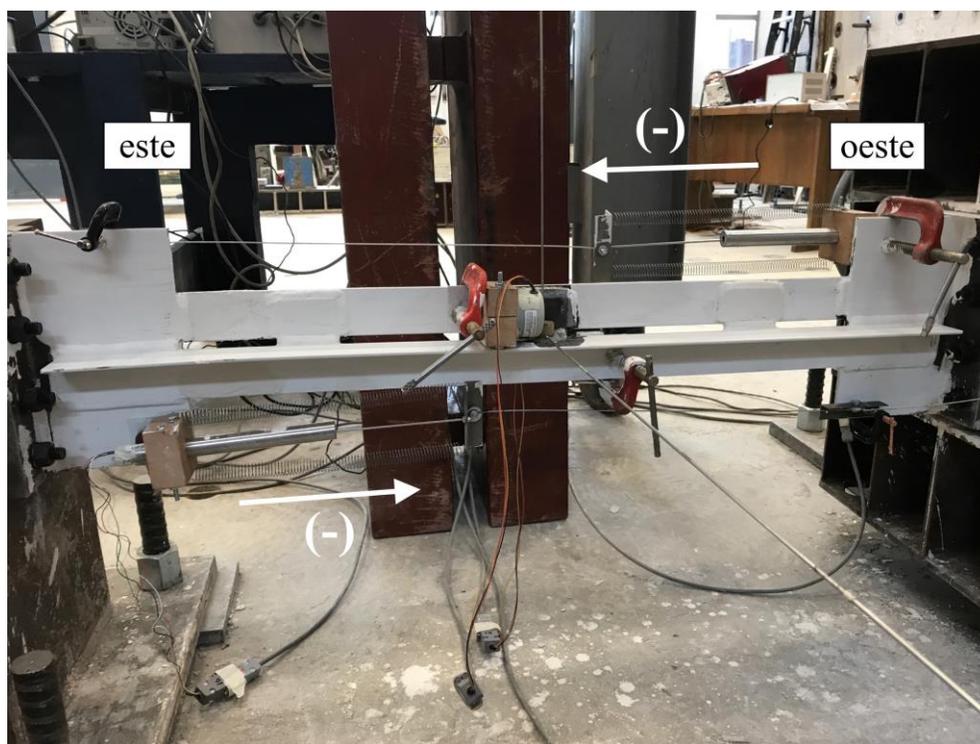


Figura 4.24: Signos para los datos de los LVDT's longitudinales del perfil.



Figura 4.25: Signos para los datos de los LVDT's del lapoyo simple.

4.3 Preparación y procedimiento de ensayo:

Una vez que se tiene listo el montaje experimental, se debe instalar la riostra de la siguiente manera: con el gato totalmente retraído, y con el apoyo deslizante sin la viga superior, se debe girar la pieza de unión riostra - actuador para dejarla en posición vertical. El perfil se levanta y se coloca verticalmente sobre la última pieza nombrada, y se introducen los 8 pernos correspondientes, colocando la tuerca y la golilla en el lado del espécimen. Los pernos se aprietan manualmente con una chicharra, y luego se les da un torque de 150 [lb-ft] (el máximo que da la llave de torque manual), para que el perfil no se separe mientras se le está aplicando una tracción durante el ensayo. Una vez realizado esto, la riostra se coloca en posición horizontal, y se mueve el émbolo del actuador para que el otro extremo llegue al apoyo simple. Cuando se tiene una distancia de aproximadamente 1 a 3 [mm] entre la placa base del perfil y el apoyo, se detiene el movimiento y se introducen los 8 pernos correspondientes. Al apretarlos con la chicharra y luego con la llave de torque (al mismo nivel que su otro extremo) se logra el contacto total de ambas piezas, quedando la riostra con una pequeña pretensión (entre 200 [kgf] a 600 [kgf]).

El paso siguiente es pintar el espécimen con una o dos manos de pintura de cal (para evidenciar de manera visual las deformaciones del elemento), esperar a que se seque, instalar los instrumentos de medición y realizar todas las conexiones pertinentes. Una vez hecho esto, se enciende el sistema de adquisición y se verifica que ambos inclinómetros y todos los LDVT's estén registrando datos, dejando estos últimos en la posición más centrada posible (marcando 0 [V]). Así, se tiene todo listo para comenzar el ensayo.

El protocolo de carga (Figura 4.26) que se establece para las pruebas cíclicas se basa en el utilizado por Claverie (2016) (Figura 2.5) con ciertas modificaciones: se deben hacer dos ciclos por cada múltiplo de la mitad del desplazamiento de fluencia, con un máximo de 4 veces este valor, a una velocidad de 5 [mm/min], partiendo en tracción. Si el perfil no ha fallado hasta ese entonces, se continúan con los ciclos a ese mismo nivel de deformación hasta que ocurra alguna falla.

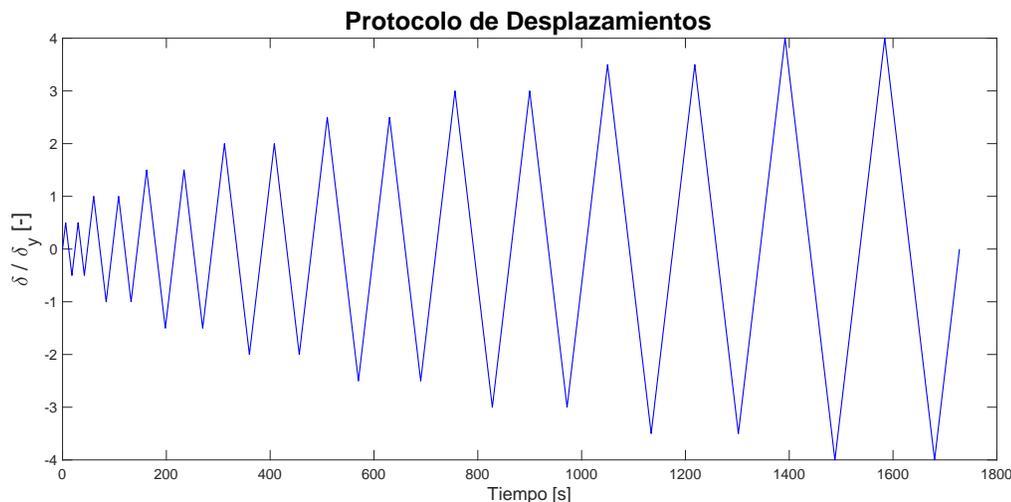


Figura 4.26: Protocolo de desplazamientos normalizado (para un desplazamiento de fluencia de 1 [mm]).

Para los ensayos cíclicos a amplitud constante (monotónicos), se establece que se debe comprimir al perfil hasta el valor máximo del protocolo cíclico, es decir, hasta 4 veces el desplazamiento de fluencia. Luego de esto, se hacen ciclos bajo ese mismo nivel de deformación hasta que ocurra alguna falla del perfil.

Una vez terminado el ensayo, se deja la riostra con carga nula y se detiene el registro de datos, para luego desmontar todos los instrumentos y finalmente remover la riostra, realizando el procedimiento inverso a su instalación. Así, los ensayos se realizan en el orden que se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Orden y fechas de los ensayos de los perfiles XL.

Perfil XL	Ensayo	Fecha
Intermedio	Monotónico	02 / 06 / 2017
	Cíclico	06 / 06 / 2017 12 / 06 / 2017
Largo	Monotónico	16 / 06 / 2017
	Cíclico	19 / 06 / 2017
Corto	Monotónico	21 / 06 / 2017
	Cíclico	27 / 06 / 2017

5. Ensayos de materiales

5.1 Fabricación y ensayo de probetas:

El acero que compone los ángulos, las planchas interconectoras y las placas gusset debe ser sometido a un ensayo de tracción para verificar que cumple con las propiedades mecánicas mínimas nominales. Para ello se siguen las disposiciones establecidas en la norma internacional ASTM A6/A6M - 16a, específicamente en su sección 11 donde se habla sobre las pruebas de tracción. En el numeral 11.5 se dice que las dimensiones de las probetas, tanto para ángulos como para placas, deben estar acorde a la norma ASTM A370 - 17. Por otro lado, en el apartado 11.4 se establece que se deben fabricar 2 cupones por colada para elementos de 10 [mm] o menos. Por último, en la sección 11.3 se establece que las probetas deben ser obtenidas de las alas de los ángulos, y de una esquina de la placa.

A la maestranza se les pide 3 tramos de ángulo de 250 [mm] de largo, y 2 planchas de 140 [mm] por 235 [mm] de la misma colada de la que provienen el resto de las placas. A partir de estas piezas, se fabrican 5 probetas con las dimensiones correspondientes al “*Sheet-Type*” de 12,5 [mm] que aparece en la tabla de la figura 3 de la norma ASTM A370 - 17 (Figura 5.1). Además, en la Figura 5.2 se puede ver una probeta de ángulo y el tramo que se utilizó para su fabricación.

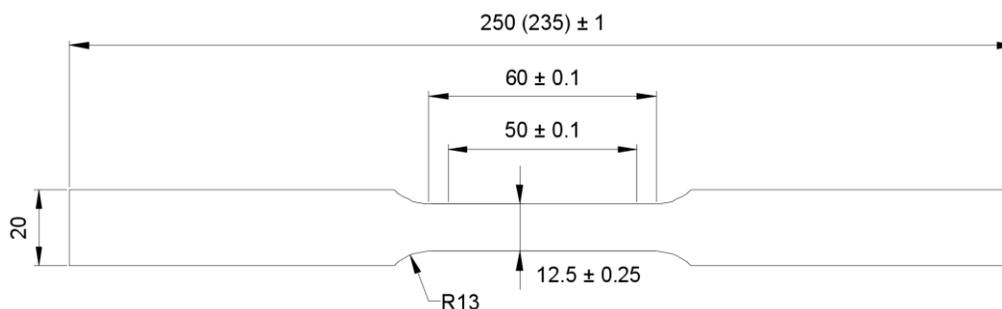


Figura 5.1: Dimensiones de la probeta de ángulo (placa) para el ensayo de tensión en base a la ASTM A370 - 17.



Figura 5.2: Probeta de ángulo y tramo original utilizado para la fabricación.

Las probetas de ángulo son llamadas A1, A2 y A3, mientras que las de placa son nombradas P1 y P2. Todas son ensayadas en la máquina universal del Departamento de Ingeniería Civil, ubicada en el laboratorio de Hidráulica del primer piso del edificio (Figura 5.3). A estas se les aplica una carga de tracción a velocidad constante hasta que ocurre la fractura. La máquina tiene incorporados un sensor de desplazamiento y de carga, mientras que la deformación localizada de la probeta se mide con un extensómetro. Hay que decir que este último no está diseñado para soportar la falla del espécimen, por lo que debe ser removido antes de que ocurra (se ve una caída en la carga cuando se remueve el instrumento).

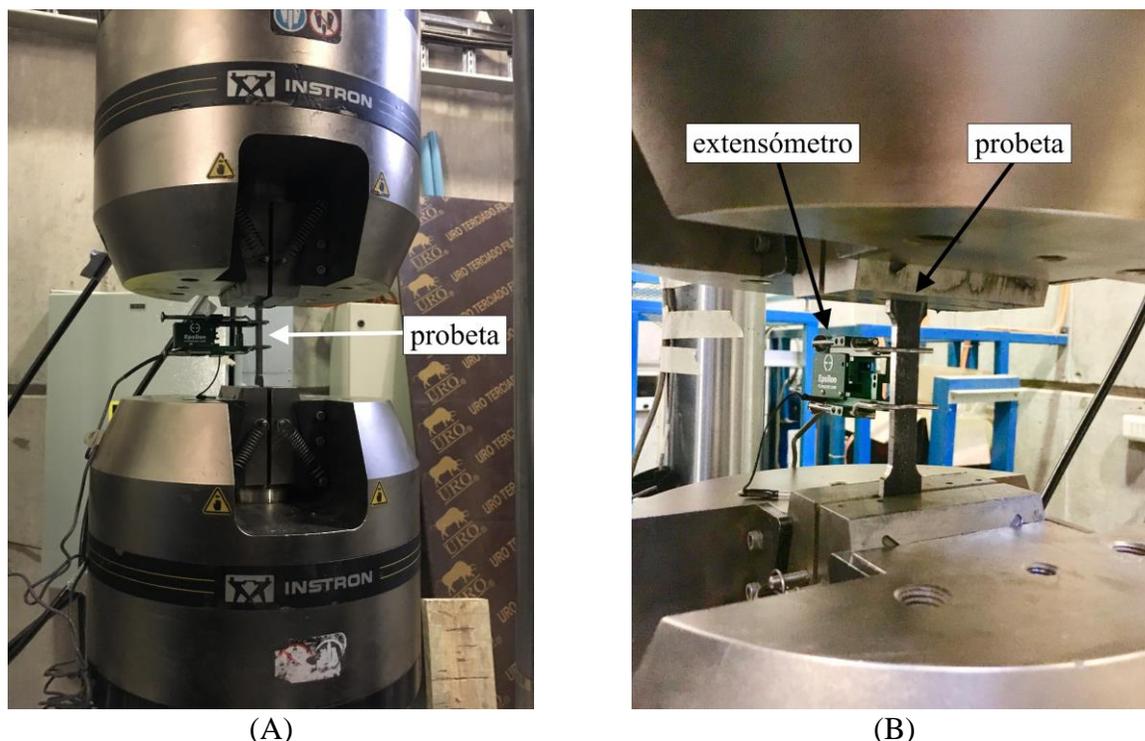


Figura 5.3: Ensayo de tracción de materiales: (A) probeta montada en la máquina universal; (B) extensómetro de la probeta.

5.2 Resultados:

Una vez que se realizan los ensayos, los datos recopilados se utilizan para obtener las propiedades mecánicas del acero según la norma ASTM A370 - 17: el módulo de Young se calcula mediante una regresión lineal en el tramo recto del gráfico tensión vs. deformación (con los datos del extensómetro); el esfuerzo de fluencia se determina con el “*Offset Method*”, descrito en la sección 14.2.1 de la norma, con la misma curva anterior; la tensión de rotura se obtiene buscando el máximo valor en los datos de esfuerzos; y el porcentaje de extensión se calcula mediante el procedimiento establecido en el numeral 14.4, corroborando la medida con la que registra el canal de desplazamiento de la máquina. En la Figura 5.4 se muestran los especímenes fracturados.

5.2.1 Probetas de ángulo:

Los resultados de las propiedades mecánicas del acero que compone los ángulos estructurales utilizados para construir los perfiles XL se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Resultados del ensayo de tracción para las probetas de ángulo.

Probeta	E [MPa]	F_y (0,2% offset) [MPa]	R_y [-]	F_u [MPa]	R_t [-]	Elongación [%]
A1	249296	267	0,99	373	0,91	14
A2	201991	337	1,25	440	1,07	16
A3	218094	344	1,27	449	1,10	15
Promedio	223127	316	1,17	421	1,03	15

Las curvas que se obtienen de los ensayos se muestran en el Anexo A. En la tabla se puede ver que la probeta A1 tiene valores menores de los nominales para un acero A270ES. Hay que notar que al ser este el primer ensayo, se utiliza una velocidad de deformación mayor que en el resto de las pruebas. Este valor se cambia a uno menor ya que dicho espécimen llega demasiado rápido a la fluencia, lo cual podría explicar la diferencia con los resultados de las otras dos probetas; aunque existe la posibilidad de que sea una sección particular de la colada de ángulos.

5.2.2 Probetas de placas:

Los resultados de las propiedades mecánicas del acero que compone las placas gusset y las planchas interconectoras de los perfiles XL se muestran a en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Resultados del ensayo de tracción para las probetas de placa.

Probeta	E [MPa]	F_y (0,2% offset) [MPa]	R_y [-]	F_u [MPa]	R_t [-]	Elongación [%]
A1	204761	360	1,44	482	1,21	14
A2	204587	334	1,34	457	1,14	15
Promedio	204674	347	1,39	470	1,17	15



Figura 5.4: Probetas fracturadas de los ensayos de tracción.

6. Presentación y análisis de resultados

6.1 Trabajo de datos:

Los datos que se obtienen mediante los instrumentos de medición deben ser trabajados para obtener resultados concluyentes del estudio. Lo primero que se debe realizar, es la transformación del voltaje mediante los factores de la sección 4.2.6. Luego de esto, hay que ejecutar las siguientes operaciones:

6.1.1 Desplazamiento del actuador:

Debido a que el apoyo simple se deforma e incluso desliza durante el ensayo, la medida del LVDT del actuador debe ser corregida (obteniendo δ_{ActR}). Dados los signos que se muestran en la Figura 4.25, basta con sumar los datos originales de este instrumento (δ_{Act}) con los del LVDT longitudinal del apoyo simple (δ_{ALong}).

$$\delta_{ActR} = \delta_{Act} + \delta_{ALong} \quad (6.1)$$

Al graficar la histéresis con estos valores corregidos de desplazamiento, se ve una zona en torno al origen del plano cartesiano donde la curva tiene una pendiente pequeña y bastante diferente a la del rango lineal que se ve a cargas mayores. Esto puede ser explicado por la imperfección de la perforación de la pieza que va anclada en la cabeza del actuador (ver sección 4.1.2). Cuando el pistón se mueve, tiene unos milímetros de libertad antes de que comience a empujar esta pieza (y por ende, a la riostra), provocando así que el LVDT del actuador reporte un pequeño desplazamiento sin que la celda de carga registre un aumento de fuerza.

Esto se rectifica mediante una rutina de Matlab, donde se identifican los límites de carga positivo y negativo antes de que comience el tramo lineal, así como también los desplazamientos correspondientes. Con estos valores, se puede modificar la histéresis para que se aproxime más al desplazamiento aplicado realmente a la riostra. La comparación entre los gráficos originales (azul, en función de δ_{ActR}) y modificados (rojo, en función de δ'_{ActR}) se encuentran en el Anexo C.

6.1.2 Energía disipada:

En un gráfico de carga vs. desplazamiento que incurre en el rango inelástico, la energía disipada es el área bajo la curva. En el presente ensayo, se pueden obtener dos valores: uno correspondiente a la histéresis modificada dada por el LVDT del actuador (E_{Act}), y otro por el gráfico análogo correspondiente a la deformación longitudinal de la riostra (E_{Rios}). Vale decir que para este último valor se utilizan las histéresis construidas a partir de las medidas de solo un LVDT longitudinal (δ_L), dependiendo de cuál sea el que entrega una medición más confiable para el ensayo correspondiente. El color de aquel gráfico de carga vs. desplazamiento se corresponde con el del registro de datos en el tiempo que se muestra Anexo B bajo el título “Desplazamiento Longitudinal de la Riostra” según sea el LVDT escogido como el más fidedigno (azul = superior, naranja = inferior).

$$E_{Act} = \int P (\delta'_{ActR}) \quad (6.2)$$

$$E_{Rios} = \int P (\delta_L) \quad (6.3)$$

Los gráficos resultantes son de energía vs. desplazamiento, y muestran cómo va aumentando la energía disipada a medida que pasan los ciclos y si el mayor aporte numérico se obtiene del lado de tracción o compresión.

6.1.3 Deformación inelástica acumulada:

La cantidad de deformación inelástica que la riostra va acumulando en cada ciclo es una medida importante para determinar si un perfil es apto para su uso como arriostramiento. En el numeral K3.4c de la norma ANSI / AISC 341-16 se establece que en los ensayos para pre calificar BRB's se debe llegar a una deformación inelástica acumulada de 200 veces el desplazamiento de fluencia. Este valor se determina con las curvas de histéresis modificadas del LVDT del actuador, mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta_{acum} = \frac{1}{\delta_y} \sum_i \left(\Delta\delta_i - \frac{\Delta P_i}{K_e} \right) \quad (6.4)$$

Donde el primer término de la sumatoria corresponde al desplazamiento total, que se calcula como la diferencia de deformación de dos puntos consecutivos de la histéresis ($\Delta\delta_i$), mientras que la fracción corresponde al desplazamiento inelástico, en función de la variación de carga (ΔP_i) y la rigidez elástica del gráfico (K_e). Este valor se normaliza por el desplazamiento de fluencia (δ_y) correspondiente (Tabla 3.4) para obtener el valor buscado.

6.2 Perfiles intermedios:

6.2.1 Monotónico:

El primer ensayo (Figura 6.1) es el más complicado en términos de cómo realizar el protocolo de desplazamiento, debido a la nula experiencia utilizando el controlador del actuador y a la incertidumbre del modo de falla de la riostra.

Si bien, en estas pruebas se debe comenzar en compresión, por una confusión de signos se aplica una pequeña tracción al principio. Luego de eso, se inicia el movimiento correcto, hasta el punto en que la riostra exhibe una gran deformación fuera del plano (Figura 6.2). Se observa un pandeo predominantemente en torno al eje geométrico vertical (Y) hacia el sur, además de un pandeo local en el ala horizontal del ángulo inferior, aproximadamente en la mitad de la luz entre el conector este y el central (Figura 6.3).

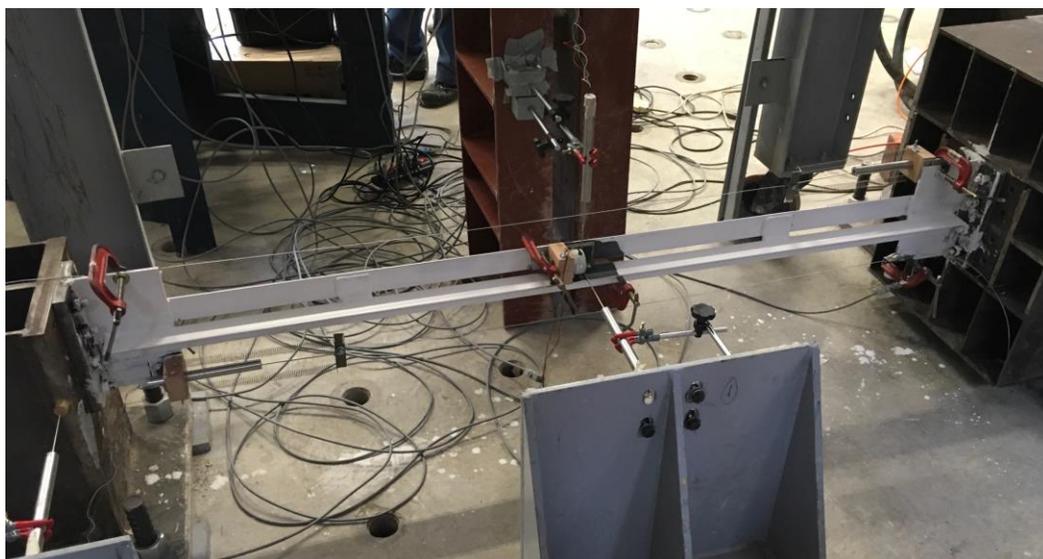


Figura 6.1: Perfil XL intermedio monotónico listo para ser ensayado.

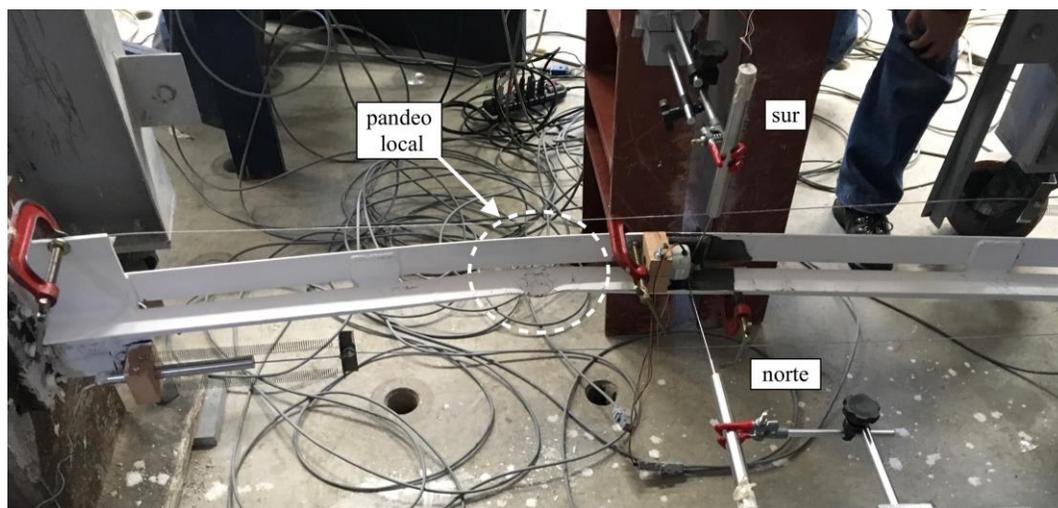


Figura 6.2: Pandeo global del perfil intermedio monotónico.

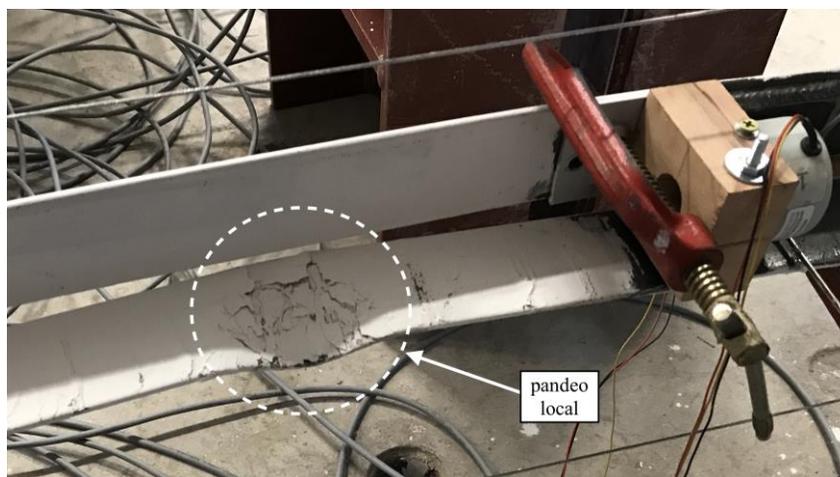


Figura 6.3: Pandeo local del perfil intermedio monotónico.

Se examina el perfil para determinar la posibilidad de realizar ciclos al mismo nivel de deformación. Ya que visualmente no se identifican fracturas en las conexiones, la respuesta es positiva, y se inicia la tracción del perfil, hasta aproximadamente las 20,5 [tonf], donde ocurre una falla acompañada por un sonido fuerte y la caída en el registro de la celda de carga. Al inspeccionar el espécimen, se encuentra un desprendimiento de la soldadura del ángulo inferior y la placa gusset oeste (Figura 6.4), que se califica como una falla frágil dada su ocurrencia repentina.

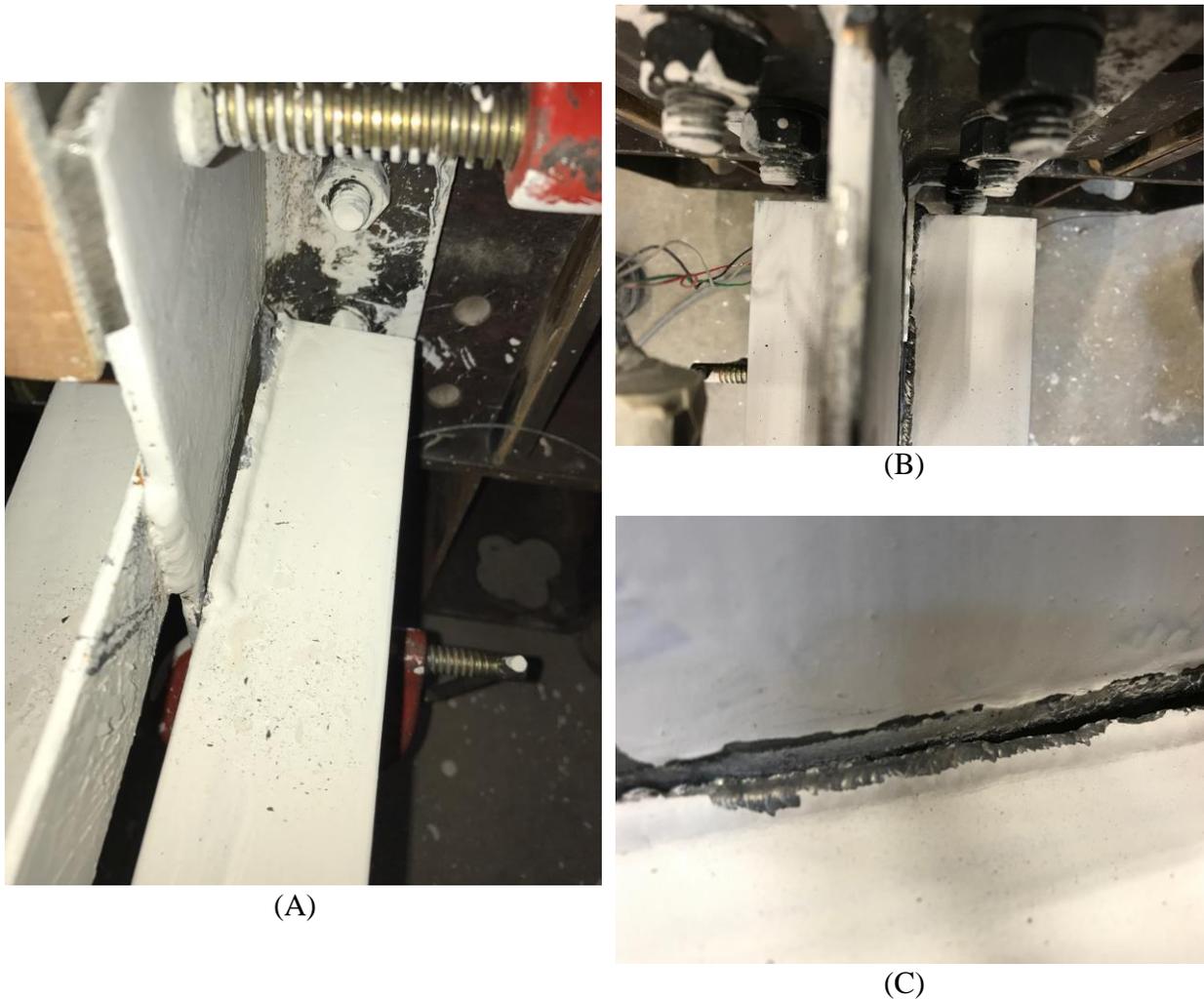


Figura 6.4: Falla de la soldadura del perfil intermedio monotónico.

Esta fractura puede deberse a dos razones: que el espécimen esté mal diseñado, o que la fabricación no se realice de buena manera. Al observar de cerca, se puede ver que el cordón de soldadura está totalmente desprendido de la placa gusset (Figura 6.4A), e incluso se identifica un poco de cal en la zona (Figura 6.4C). Si la fractura fuera por la primera razón, se debería desgarrar la unión, dejando material de soldadura en ambos elementos, y no tendría por qué haber pintura en el plano de contacto. Esto indica claramente que la fabricación no se llevó a cabo de la manera correcta, ya que no hubo una fusión de la placa gusset y el metal de soldadura. Se espera que esto sea un caso particular, y que no sea una conducta recurrente en el resto de los perfiles.

Con respecto a los LVDT longitudinales, se decide utilizar la medida del inferior, debido a que en las fotos posteriores se puede ver que el cable del superior no se mantiene recto en el pandeo, siguiendo la curvatura del perfil, a diferencia de su contraparte. A continuación se muestran las histéresis que se obtienen, utilizando los datos modificados del LVDT del actuador (Figura 6.5) y los del LVDT longitudinal inferior (Figura 6.6), donde se pueden ver las resistencias correspondientes de la Tabla 3.6. Además, se muestran las energías disipadas calculadas de ambos gráficos (Figura 6.7).

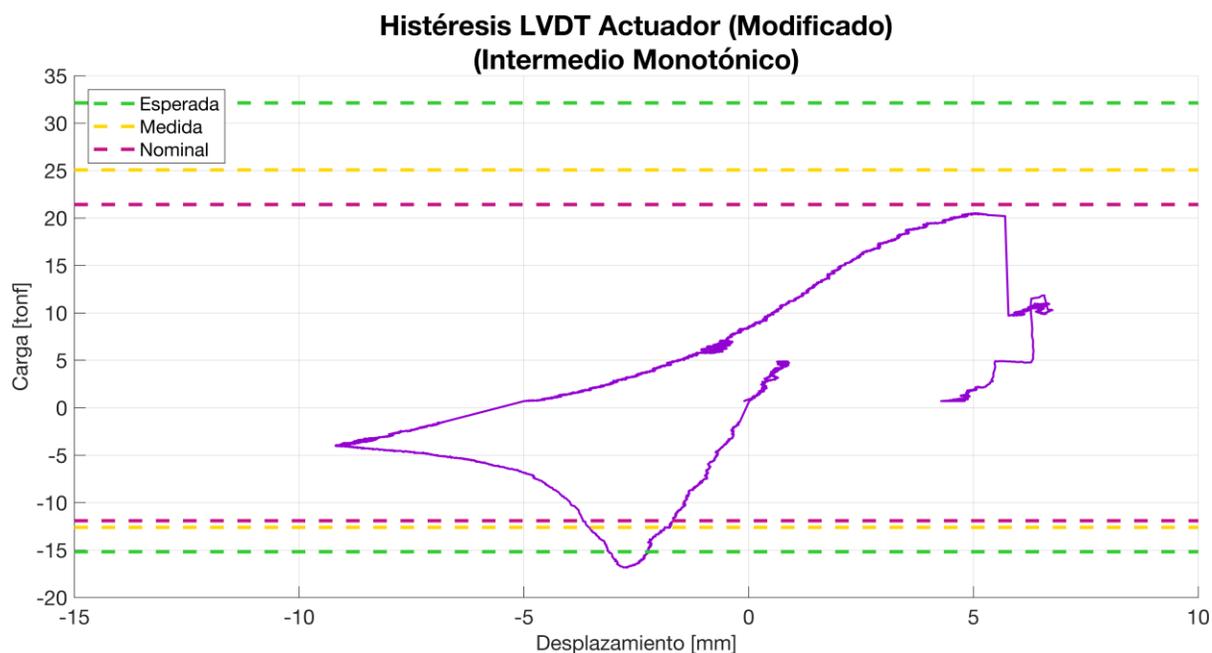


Figura 6.5: Histéresis del LVDT del actuador para el perfil XL intermedio monotónico.

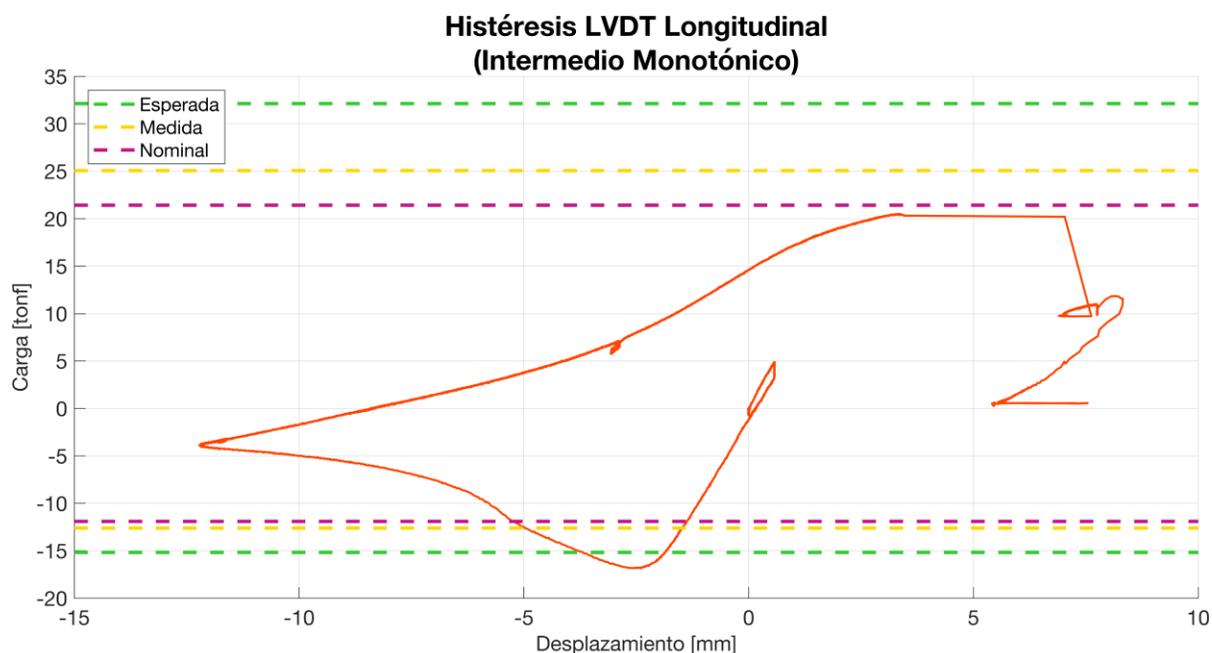


Figura 6.6: Histéresis del LVDT longitudinal inferior para el perfil XL intermedio monotónico.

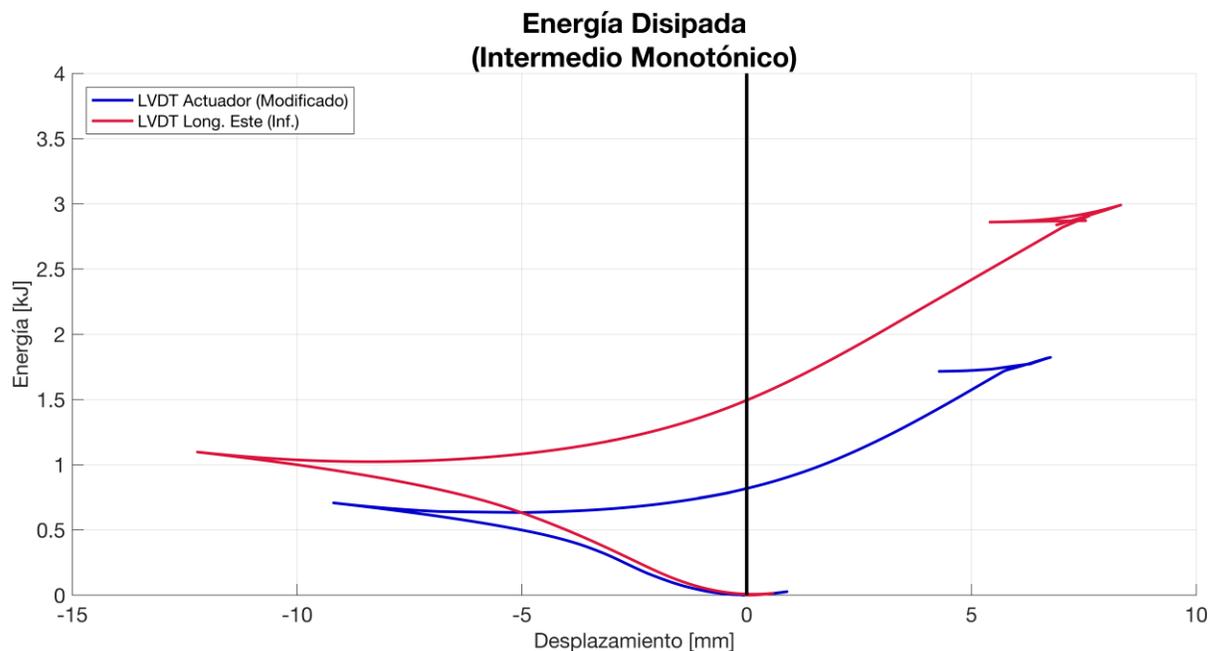


Figura 6.7: Energía disipada del perfil XL intermedio monotónico.

Con respecto a las histéresis, se puede ver que el perfil logra una resistencia a compresión mayor a la esperada. Esto es beneficioso ya que se tiene un factor de seguridad extra en la riostra, pero puede ser contraproducente si las conexiones están diseñadas a capacidad del perfil, lo que podría desencadenar una falla en la unión antes que en la diagonal. Por otro lado, el perfil no es capaz de alcanzar la resistencia nominal a tracción, lo cual es bastante peligroso si se tratara de una estructura real. Ahora bien, hay que recordar que esto se debe a la falla de la soldadura, lo que demuestra la gran importancia de la fabricación. Por otro lado, se logra una deformación acumulada de 54 veces el desplazamiento de fluencia (3,6 [mm], Tabla 3.4).

Los registros en el tiempo de todos los instrumentos se pueden ver en el Anexo B. Con respecto al LVDT horizontal, este se satura debido a las grandes deformaciones fuera del plano. Este hecho también repercute en el LVDT vertical, ya que cuando el perfil se pandea, arrastra el vástago flectándolo, implicando un reporte de deformación mucho mayor al real. Estos dos efectos se ven en todos los ensayos posteriores, por lo que los datos post-pandeo no son muy fidedignos.

En relación a los inclinómetros, se ve que ambos giran en el mismo sentido y en igual magnitud, hasta el momento en que ocurre la inestabilidad y el perfil se desplaza fuera del plano. Se llega hasta un giro de alrededor 4,5 [°], por lo que se podría decir que el pandeo tiene una pequeña componente torsional.

6.2.2 Cíclico:

El primer intento de este ensayo es unos días después del monotónico. En este momento ya se tiene más experiencia y se entiende el funcionamiento del controlador, logrando un funcionamiento más preciso. Se logran hacer con éxito los primeros 2 ciclos a 0,5 veces el desplazamiento de fluencia, pero al comenzar el tercero en tracción, hacia el valor de la deformación de fluencia, el perfil falla de nuevo, mostrando el mismo deslizamiento del cordón de soldadura que se ve en el ensayo monotónico anterior (Figura 6.4). Esto lleva a pensar que todos

los especímenes tienen problemas de fabricación, por lo cual se reclama la garantía a la maestría, solicitándoles que construyan un nuevo perfil de largo intermedio, además de que reparen los otros 4 que aún no han sido probados. Como medida de seguridad adicional, se solicita agregar el cordón de soldadura de la gusset que va por el extremo curvo del ala de los ángulos (el cual no es necesario según el cálculo).

Una vez que son despachados los perfiles, se procede a realizar el ensayo cíclico de la riostra intermedia nuevamente, siendo posible realizar el protocolo en su totalidad. A medida que se aplican deformaciones pequeñas, se ve cómo van apareciendo estrías en la cal, evidenciando la fluencia de los ángulos, en especial cerca de las gusset, además de una leve deformación fuera el plano con un indicio de pandeo local. Luego, cuando se procede a la primera compresión de 1,5 veces la fluencia, ocurre la inestabilidad global del perfil, muy similar al anterior, con la diferencia en que esta vez es hacia el norte (Figura 6.8A). La formación del pandeo local, o en otras palabras, de la rótula plástica, ocurre en la misma zona que en el caso anterior, pero esta vez es aproximadamente a un tercio de la distancia entre los dos conectores correspondientes, en el ala horizontal del ángulo superior, y por el lado oeste del conector intermedio (Figura 6.8B).

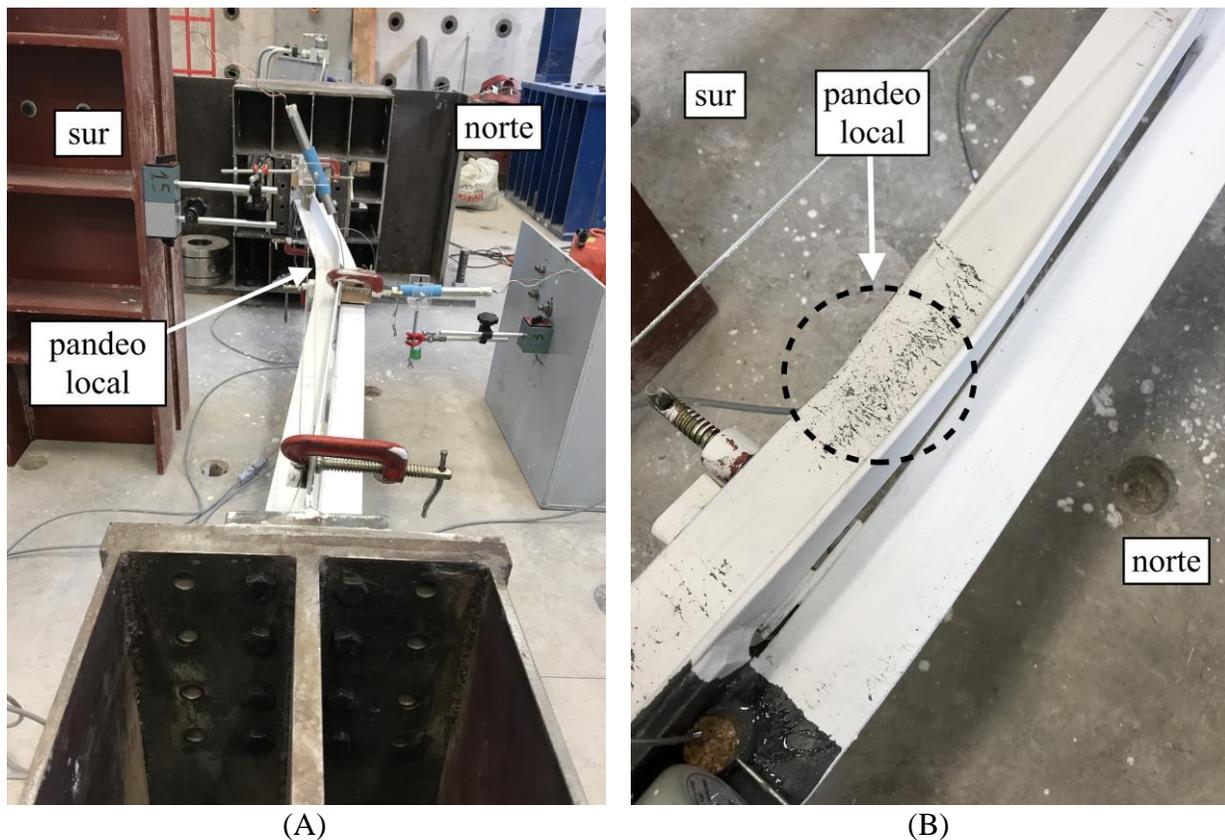


Figura 6.8: Primer pandeo del perfil XL intermedio cíclico: (A) global; (B) local.

A medida que se va avanzando en los ciclos, aparece un desfase de la histéresis, dado por las deformaciones remanentes. En compresión, se puede ver como el perfil se comporta como si estuviera formado por dos bielas unidas en el punto de pandeo local, concentrando toda la deformación fuera del plano en ese punto, quedando prácticamente rectos los tramos del perfil desde ahí hasta las placas gusset, las cuales permiten la rotación libre del espécimen. Vale decir, que la que está por el lado de la rótula, se deforma más que la otra (Figura 6.9).

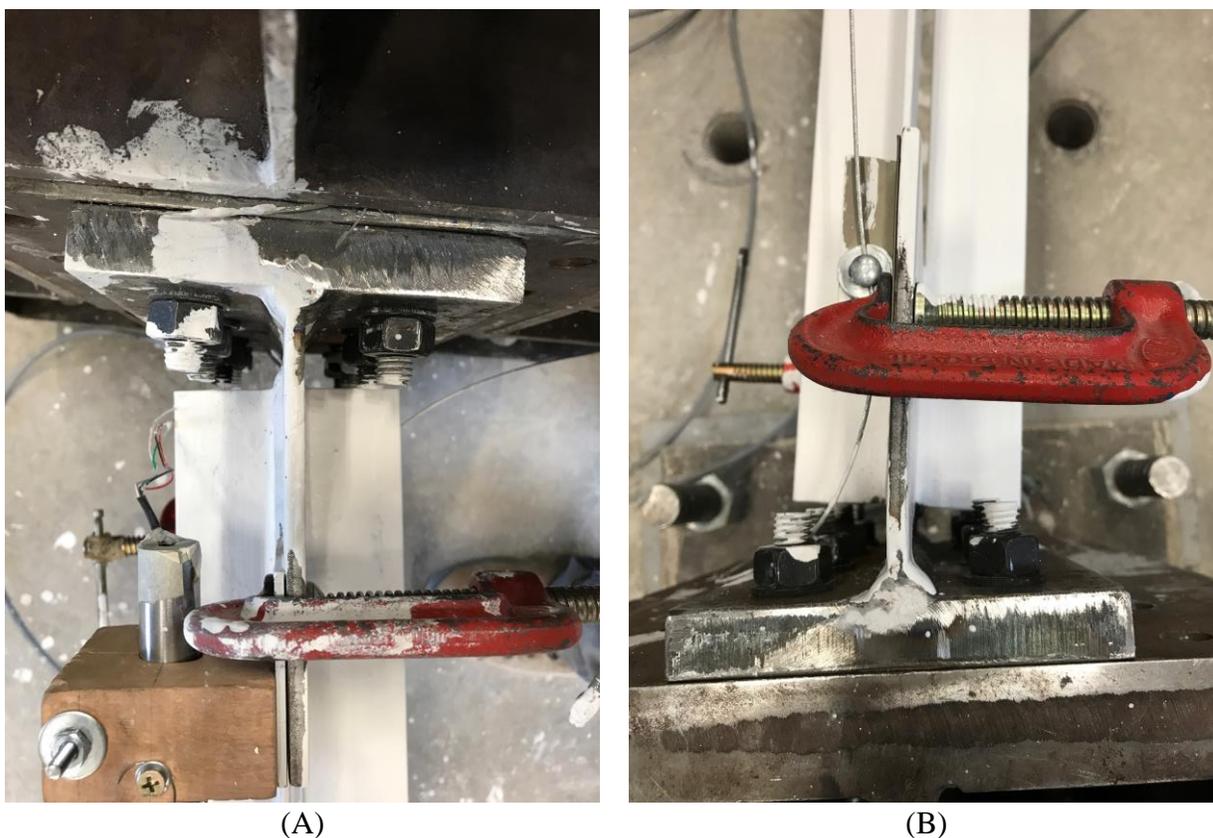


Figura 6.9: Deformación de las placas gusset del perfil XL intermedio cíclico: (A) placa cercana a la rótula (oeste); (B) placa contraria a la rótula (este).

En tracción, el perfil se debe enderezar antes de tomar carga nuevamente. Como las deformaciones fuera del plano van aumentando con cada ciclo, se va haciendo más difícil lograr nuevamente la rectitud original del perfil a los niveles de desplazamiento protocolares, lo que implica una menor rigidez en tracción. Esto es importante, ya que si bien en la histéresis se ve que se llega a cargas menores a medida que se avanza en el ensayo, aparentemente este hecho es la razón, y no porque haya una degradación real de la capacidad a tracción de la riostra.

En cada ciclo de compresión, la deformación de la rótula plástica va aumentando (Figura 6.10), mientras que en las tracciones vuelve su estado recto. Esto implica una fatiga del material, que desemboca en la rotura del ala del ángulo superior (Figura 6.11). En los ciclos siguientes, se puede ver como la grieta se va propagando hacia el vértice, pero en ningún momento se produce una fractura repentina (frágil).

Un fenómeno bastante interesante, es la aparición de un pandeo local durante el desplazamiento protocolar en tracción en el ala horizontal del ángulo inferior en los últimos ciclos (Figura 6.12 y Figura 6.13). Ese fenómeno ocurre debido a las grandes deformaciones fuera del plano, que provocan una flexión de fluencia en este punto del elemento. Luego, cuando el perfil vuelve a su rectitud original, la única forma que tiene el material de aquel sector para acomodarse a su longitud mayor es mediante el pandeo local. Hay que notar que Claverie (2016) no hace mención de algún efecto similar en sus modelos de elementos finitos.



Figura 6.10: Deformación en la rótula plástica del perfil XL intermedio cíclico.

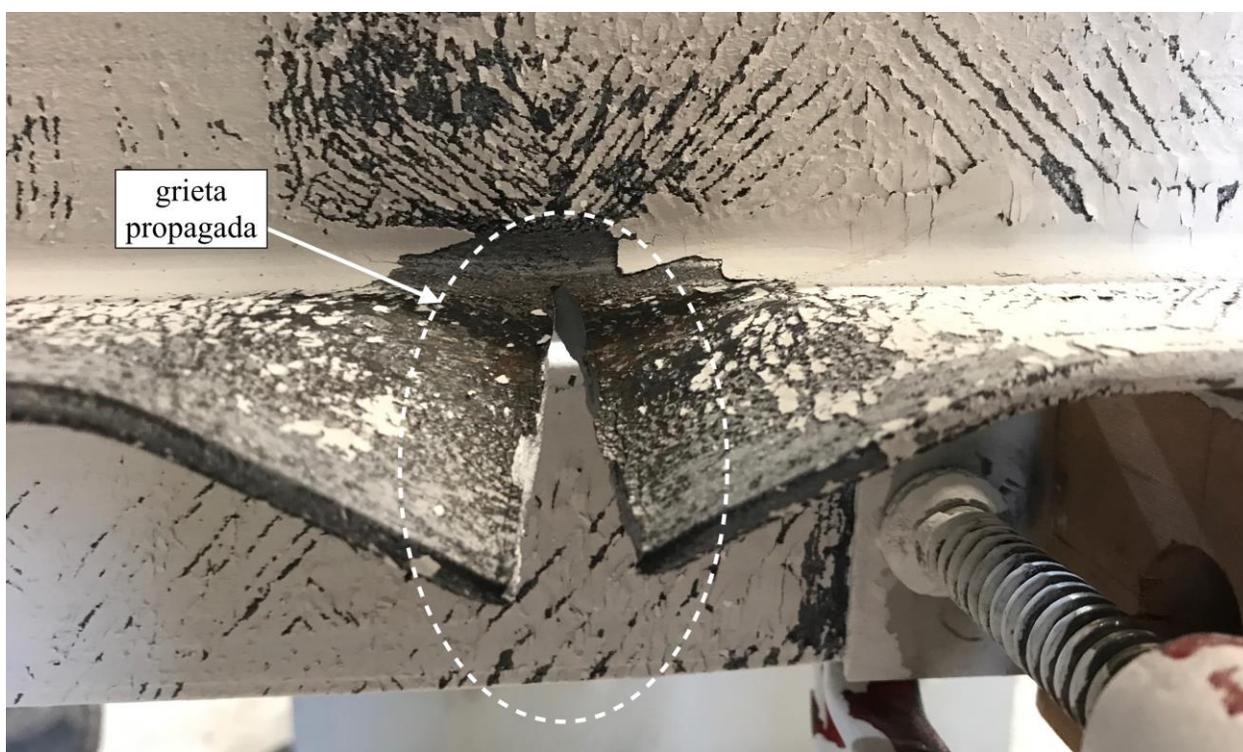


Figura 6.11: Fractura del ala horizontal del ángulo superior en el punto de la rótula plástica del perfil XL intermedio cíclico.

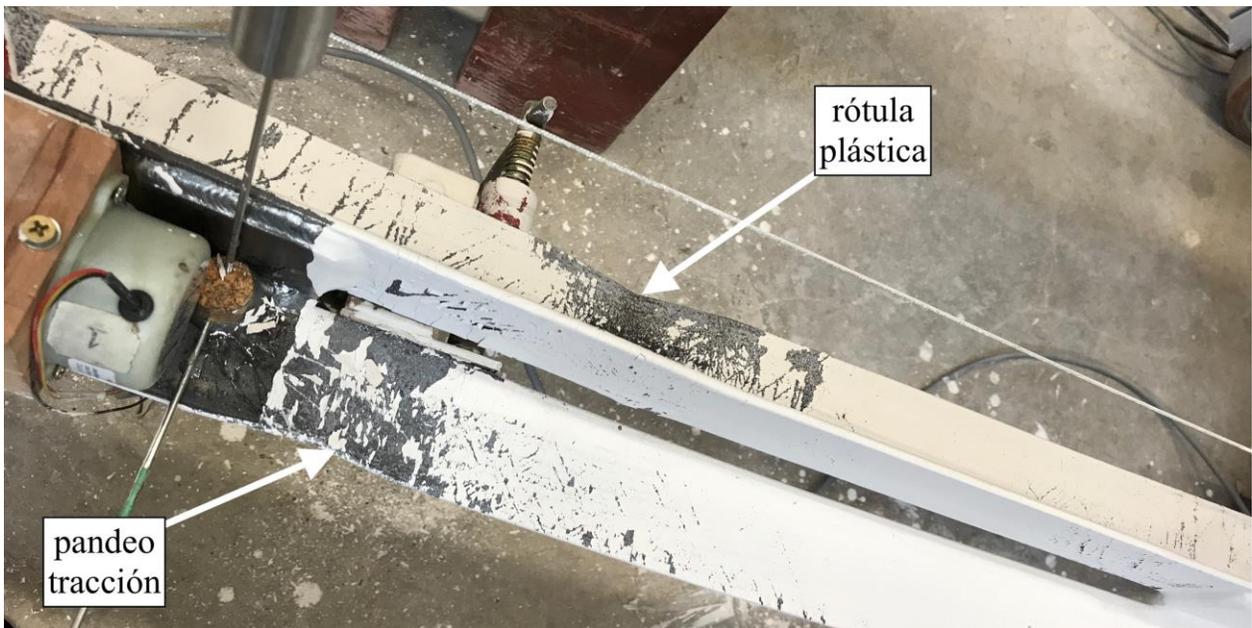


Figura 6.12: Ubicación relativa de la rótula plástica y el pandeo en tracción del perfil XL intermedio cíclico.



Figura 6.13: Pandeo en tracción del perfil XL intermedio cíclico. Notar que el perfil se encuentra prácticamente recto.

Durante el ensayo se tienen dos problemas respecto a los instrumentos de medición. El primero es que el LVDT horizontal no estaba bien anclado al tubo de PVC, por lo que se mueve a medida que el perfil se pandea. Luego de unos ciclos, se opta por removerlo para que no resulte dañado. Además, si bien el LVDT vertical puede girar, el excesivo movimiento fuera del plano altera las medidas. Por otro lado, el cable de conexión del inclinómetro superior empuja al cable de anclaje del LVDT longitudinal inferior cuando el perfil se pandea, provocando que este instrumento reporte una deformación axial menor a la de su contraparte superior.

A continuación se muestran las histéresis que se obtienen, utilizando los datos modificados del LVDT del actuador (Figura 6.14) y los del LVDT longitudinal superior (Figura 6.15), donde se pueden ver las resistencias correspondientes de la Tabla 3.6. Además, se muestran las energías disipadas calculadas de ambos gráficos (Figura 6.16).

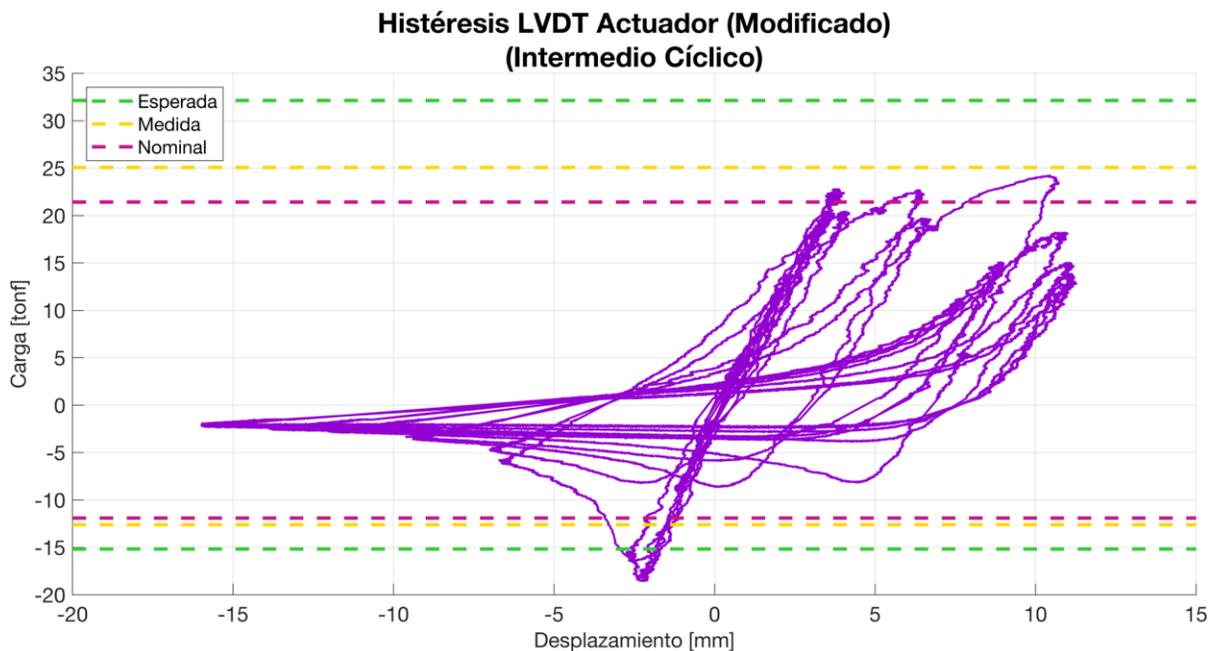


Figura 6.14: Histéresis del LVDT del actuador para el perfil XL intermedio cíclico.

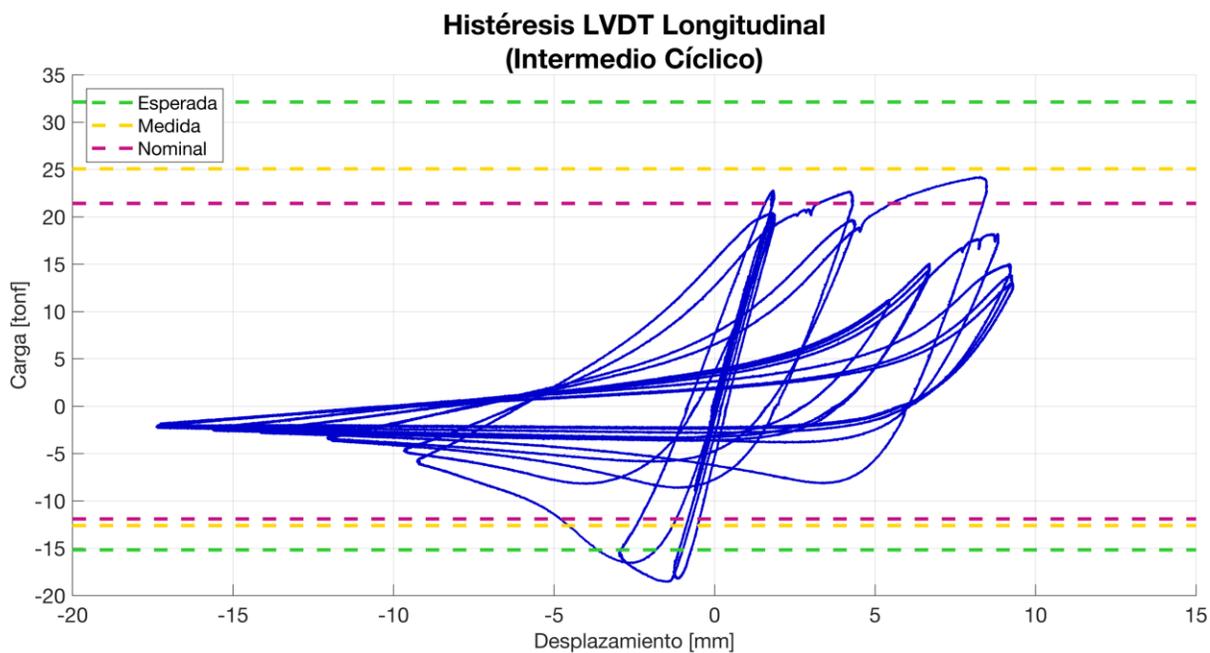


Figura 6.15: Histéresis del LVDT longitudinal superior para el perfil XL intermedio cíclico.

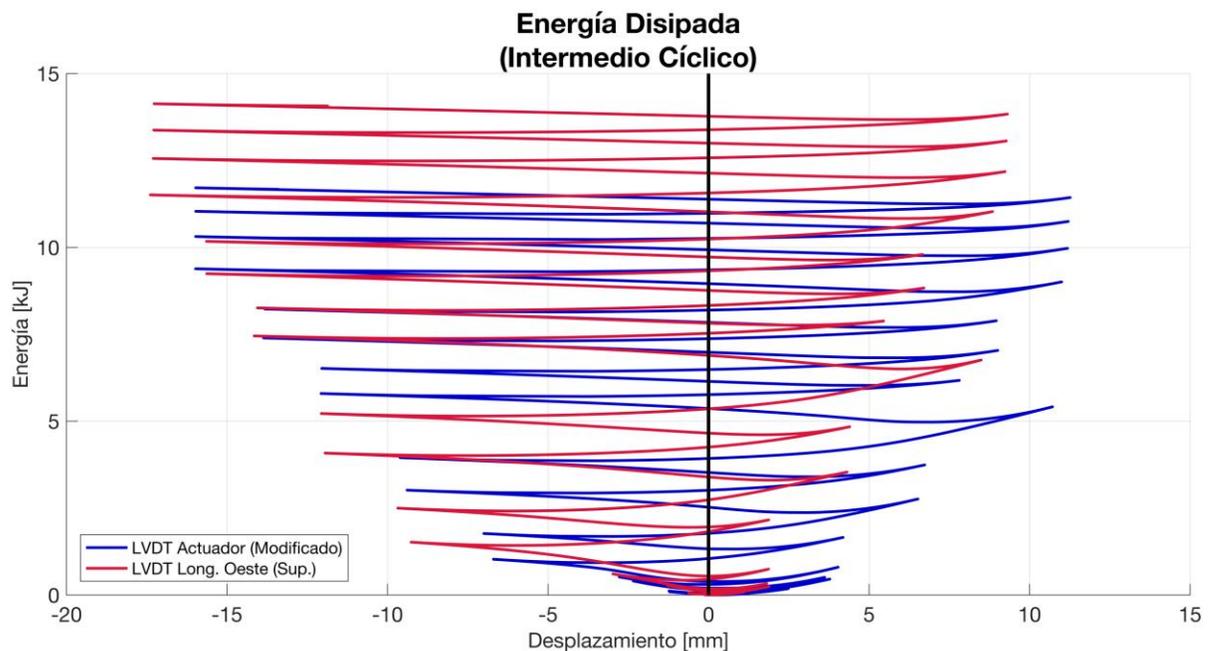


Figura 6.16: Energía disipada del perfil XL intermedio cíclico.

Con respecto a las histéresis, en compresión se tiene el mismo comportamiento que el ensayo monotónico, mientras que en tracción, se puede ver que el perfil logra una resistencia mayor a la nominal, pero menor a la que debería tener según la fluencia que entregan los ensayos de materiales. De todas maneras, se logra una deformación inelástica acumulada de 638 veces el desplazamiento de fluencia (3,6 [mm], Tabla 3.4), bastante superior al solicitado por norma para las BRB. En relación a la energía disipada, se puede ver claramente que las curvas se inclinan hacia el lado de la compresión, indicando que hay mayor disipación de energía en esa parte del ciclo, lo cual se debe a la aparición de la rótula plástica.

Los registros de los instrumentos en función del tiempo se pueden ver en el Anexo B. Con respecto a los LVDT horizontal y vertical, se tiene el mismo comportamiento que en el ensayo anterior, es decir, las deformaciones fuera del plano son tan grandes que saturan al primero, y falsean los datos del segundo. Por otro lado, los inclinómetros registran giros iguales hasta el pandeo. Luego de que este ocurre, el que está más cercano a la rótula (inferior) comienza a registrar mayores oscilaciones, indicando que el lado oeste del perfil gira más que el lado este en cada ciclo. Respecto a las magnitudes, se tienen valores máximos de 6,2 [°], por lo que se puede decir que hay una pequeña componente torsional.

6.3 Perfiles largos:

6.3.1 Monotónico:

El ensayo de este perfil se realiza luego de trasladar el apoyo a la posición correspondiente (Figura 6.17). Los cambios respecto a la instrumentación se detallan en la sección 4.2.



Figura 6.17: Perfil XL largo monotónico listo para ser ensayado.

El perfil se lleva hasta la compresión protocolar y este se pandea de manera similar a los intermedios: en torno al eje geométrico vertical (Y), hacia el sur con un desplazamiento fuera del plano mucho mayor, y con una rótula plástica que se ubica al este del conector intermedio, aproximadamente a un tercio de la distancia entre aquel y la siguiente placa, en el ala horizontal del ángulo inferior (Figura 6.18).



Figura 6.18: Rótula plástica del perfil XL largo monotónico.

Luego de esto, se comienzan a hacer ciclos al mismo nivel de deformación y se puede ver como la rótula permite la rotación de cuerpo rígido de los tramos a ambos lados de esta (Figura 6.19), al igual que en el perfil intermedio cíclico. Al final del ensayo se identifican algunas grietas en el punto de pandeo local (Figura 6.20), por lo que, si se hubiera continuado con las sollicitaciones, se habría propagado la fractura. Por otro lado, no se manifiesta un pandeo en los desplazamientos de tracción, lo que indica que la flexión de la riostra no es capaz de provocar la fluencia en las alas horizontales del ángulo superior en el punto contrario a la rótula.

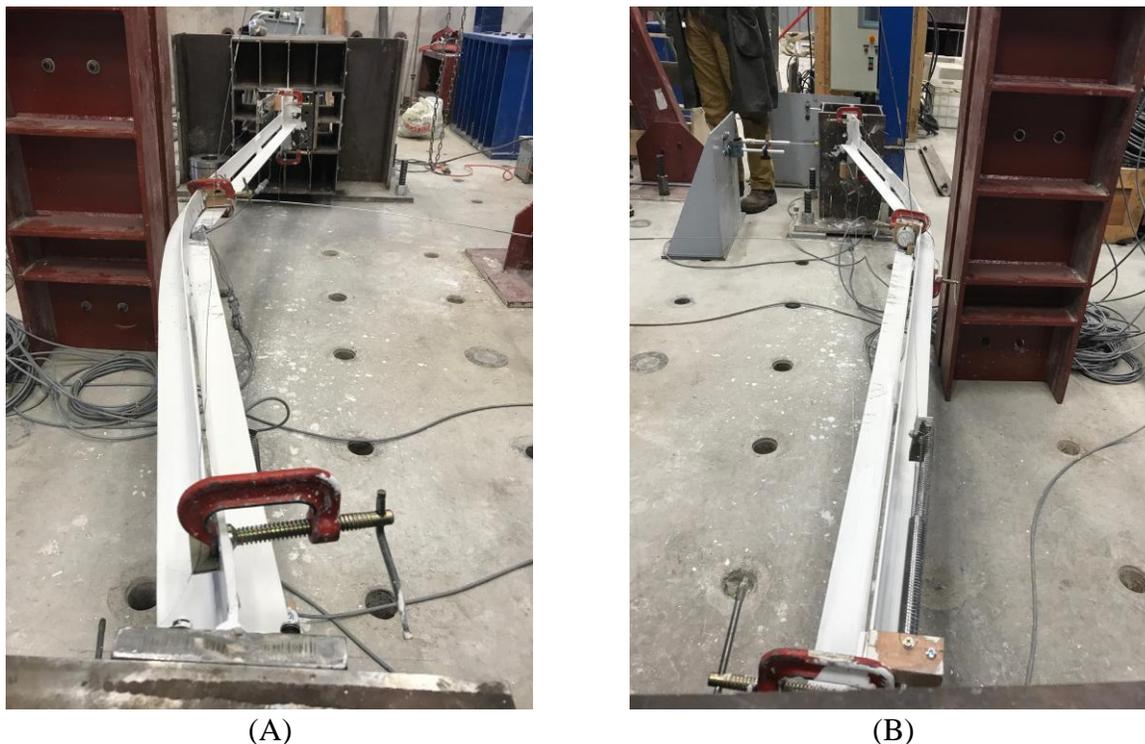


Figura 6.19: Pandeo global del perfil XL largo monotónico: (A) vista desde el este; (B) vista desde el oeste.

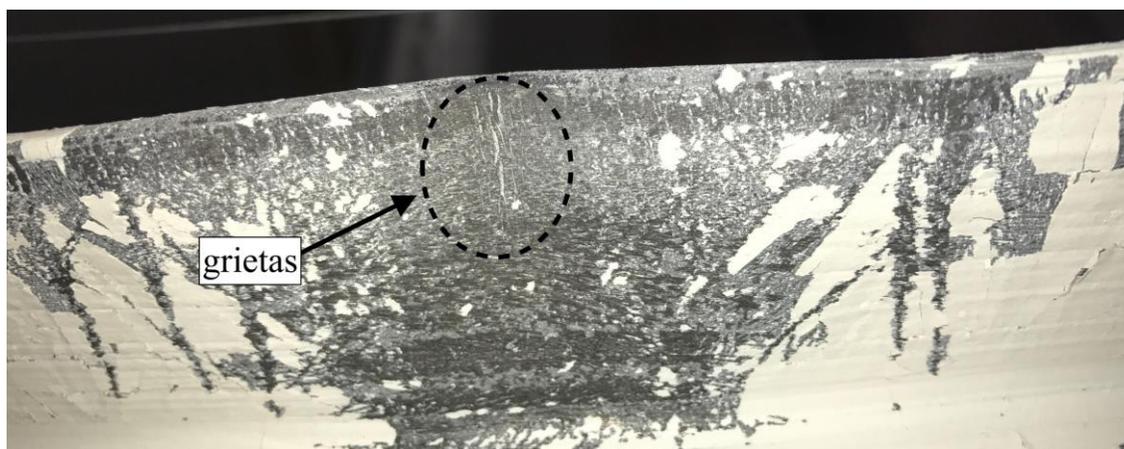


Figura 6.20: Grietas en la rótula plástica (vista inferior) al final del ensayo del perfil XL largo monotónico.

Respecto a la instrumentación, la deformación fuera del plano es tan grande que el núcleo del LVDT horizontal se sale del cuerpo, teniendo que volver a colocarlo a medida que el perfil se

va enderezando, además de que este movimiento falsea los datos del LVDT vertical, aunque en menor medida que los ensayos anteriores debido a la lejanía de su punto de rotación respecto al perfil. Por otro lado, el vástago del último instrumento nombrado, empuja el cable de anclaje del LVDT longitudinal superior durante el pandeo, provocando que este reporte una deformación axial menor a la de su contraparte inferior. A continuación se muestran las histéresis que se obtienen, utilizando los datos modificados del LVDT del actuador (Figura 6.21) y los del LVDT longitudinal inferior (Figura 6.22), donde se pueden ver las resistencias correspondientes de la Tabla 3.6. Además, se muestran las energías disipadas calculadas de ambos gráficos (Figura 6.23).

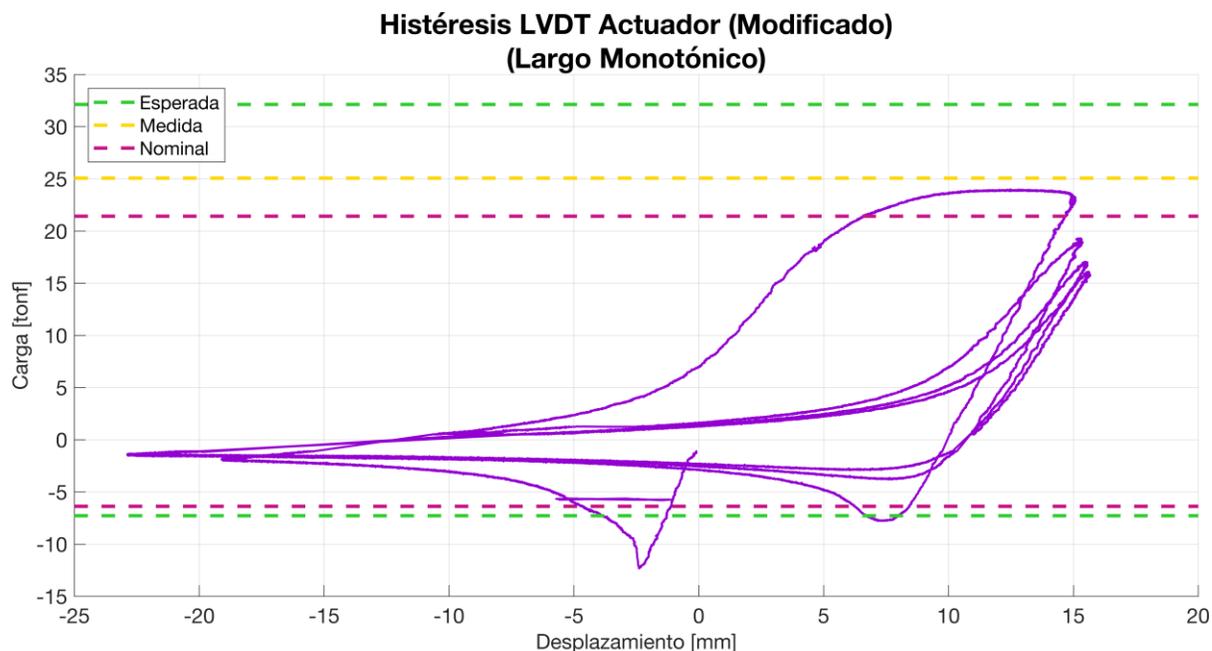


Figura 6.21: Histéresis del LVDT del actuador para el perfil XL largo monotónico.

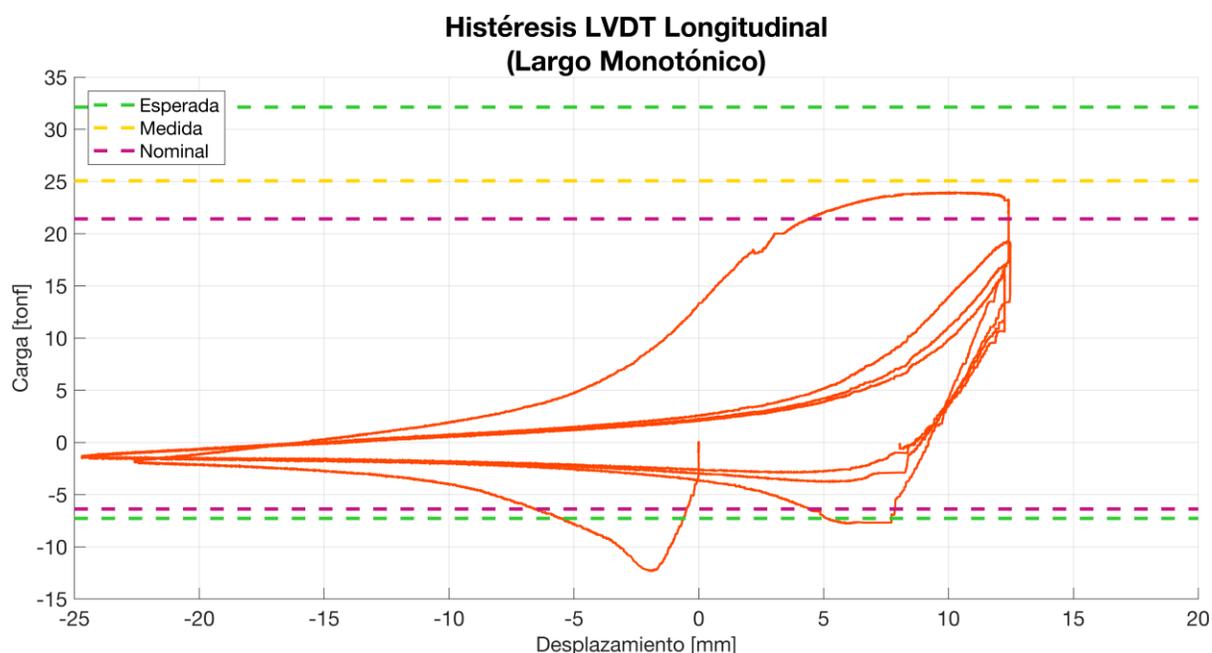


Figura 6.22: Histéresis del LVDT longitudinal inferior para el perfil XL largo monotónico.

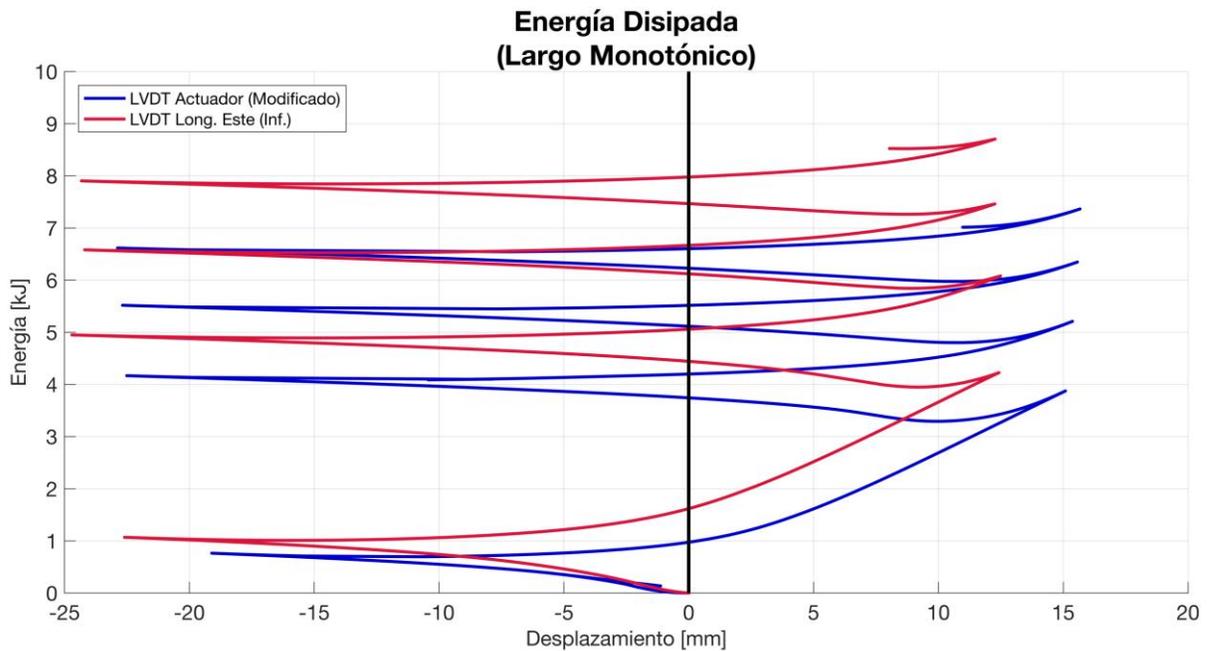


Figura 6.23: Energía disipada del perfil XL largo monotónico.

Con respecto a las histéresis, se puede ver que en compresión el perfil logra una capacidad bastante mayor a la esperada, mientras que en tracción no es capaz de llegar a la predicha utilizando los valores del estudio de materiales. Por otro lado, al igual que en el ensayo del perfil intermedio cíclico, la mayor disipación de energía está en el lado de la compresión, lo que se explica por la formación de la rótula plástica. En este ensayo, el perfil acumula una deformación inelástica de 160 veces el desplazamiento de fluencia (5,2 [mm], Tabla 3.4).

Los registros de los instrumentos en función del tiempo se pueden ver en el Anexo B. Respecto a los inclinómetros, ambos registran el mismo giro hasta el momento del pandeo, y luego de este, el que está más cercano a la rótula (superior) reporta una oscilación mayor. Se llega hasta a unos 3,7 [°] de deformación, indicando que el pandeo tiene una pequeña componente torsional, levemente menor a la de los ensayos de perfiles intermedios.

6.3.2 Cíclico:

El ensayo cíclico se lleva a cabo sin problemas, y se observa un comportamiento similar al del perfil intermedio cíclico y al largo monotónico. A diferencia de los anteriores, el pandeo ocurre en la primera compresión al nivel de la fluencia, pero al igual que los otros, es en torno al eje geométrico vertical (Y) hacia el norte, y con la aparición de la rótula plástica en el ala horizontal del ángulo superior, al este del conector central, aproximadamente un tercio de la luz libre entre placas (Figura 6.24).

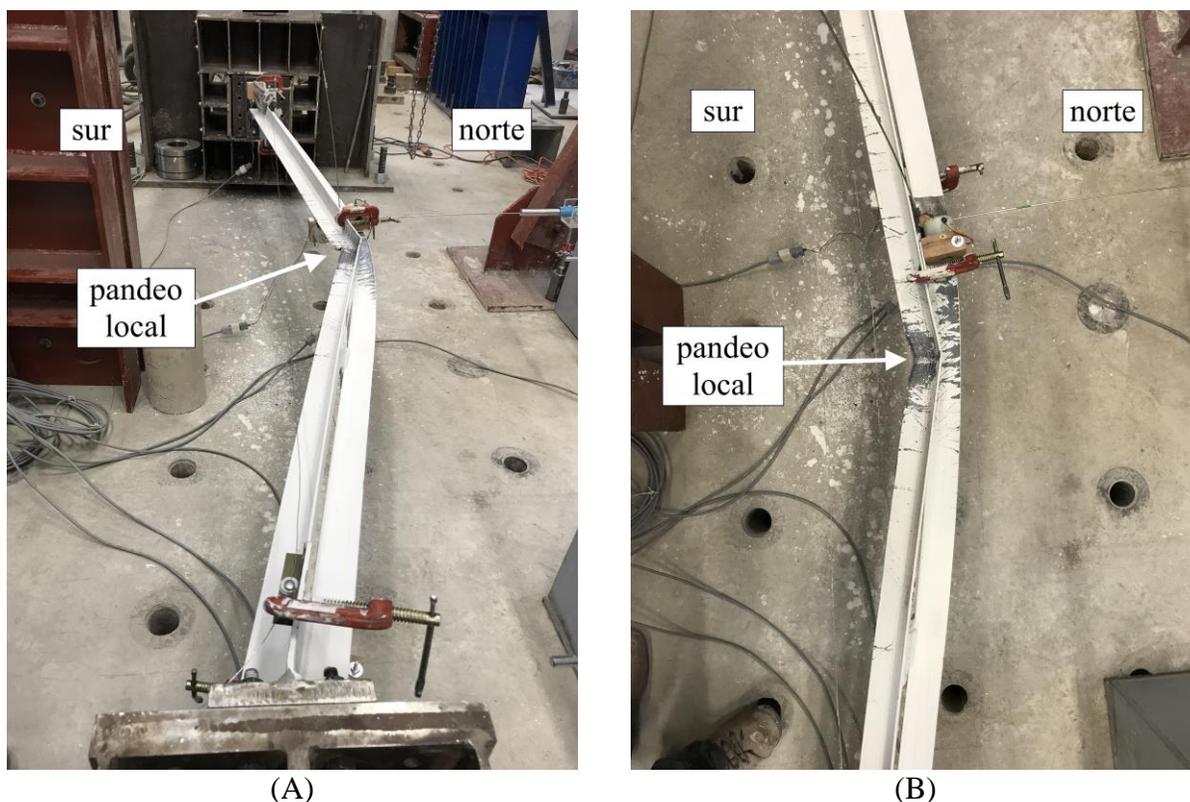


Figura 6.24: Pandeo del perfil XL largo cíclico: (A) global; (B) local.

Al igual que el perfil intermedio, la deformación de la rótula plástica va aumentando con los ciclos, y cada vez se hace más difícil enderezar el perfil en tracción con el mismo nivel de deformación de compresión. A medida que se avanza en el protocolo se va provocando la fatiga del material en el punto del pandeo local, hasta que se produce la fractura, y la grieta comienza su propagación. Al final del ensayo, toda el ala horizontal del ángulo superior está separada (Figura 6.25), y la fractura alcanza el vértice y una pequeña parte del ala vertical.



Figura 6.25: Fractura del ala del ángulo superior del perfil XL largo cíclico.

Por otro lado, en este ensayo si se evidencia un pandeo local en los desplazamientos protocolares de tracción, en la misma posición relativa con respecto a la rótula plástica que se identifica en el perfil intermedio cíclico (Figura 6.12), aunque con una longitud menor (Figura 6.26).



Figura 6.26: Pandeo en tracción del perfil XL largo cíclico.

Durante el experimento, se puede ver que en el pandeo el LVDT longitudinal inferior tiene una desangulación que sigue la curvatura de la riostra, por lo que no se puede confiar en estos datos. A continuación se muestran las histéresis que se obtienen, utilizando los datos modificados del LVDT del actuador (Figura 6.27) y los del LVDT longitudinal superior (Figura 6.28), donde se pueden ver las resistencias correspondientes de la Tabla 3.6. Además, se muestran las energías disipadas calculadas de ambos gráficos (Figura 6.29).

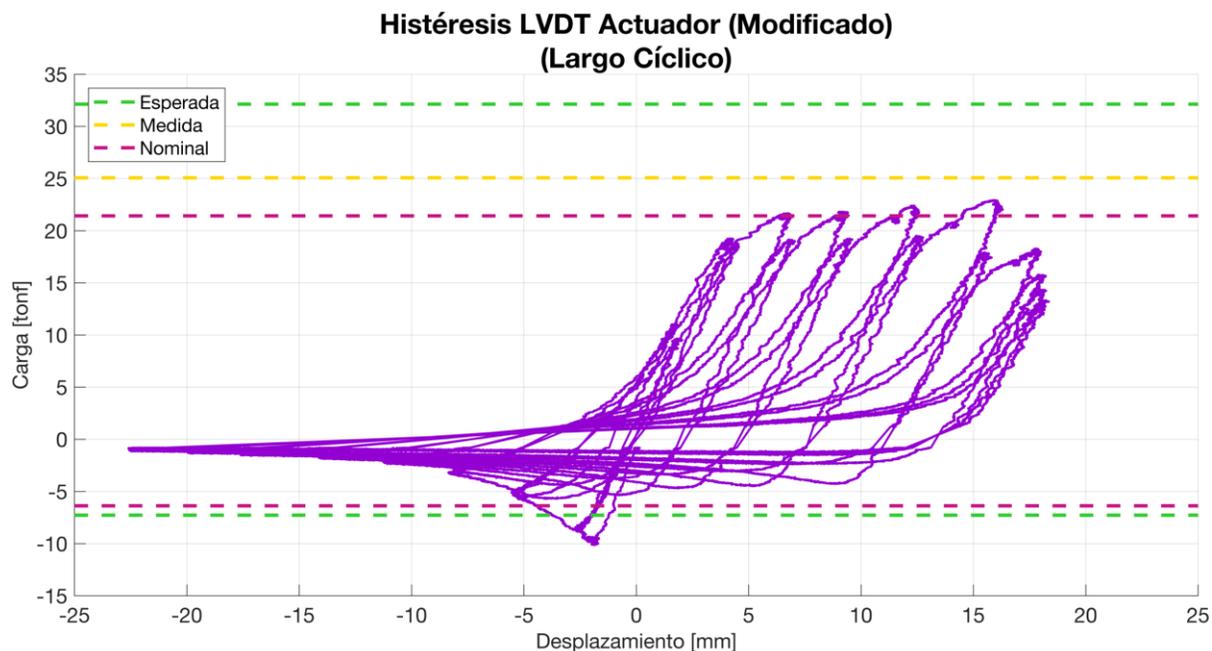


Figura 6.27: Histéresis del LVDT del actuador para el perfil XL largo cíclico.

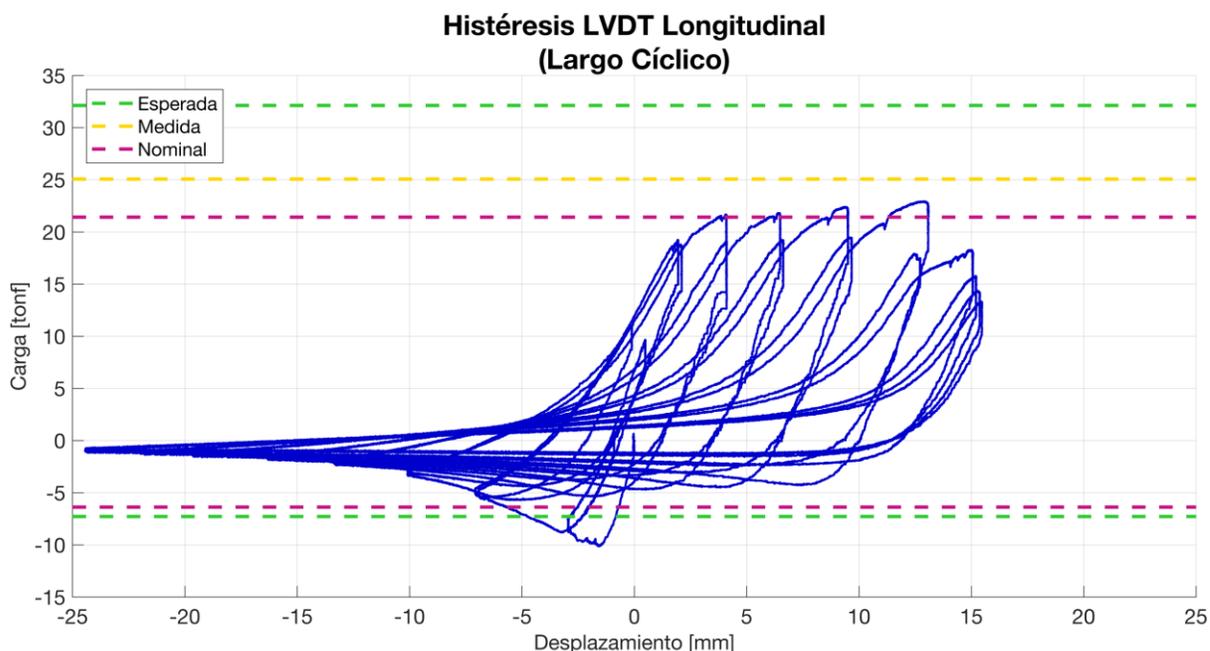


Figura 6.28: Histéresis del LVDT longitudinal superior para el perfil XL largo cíclico.

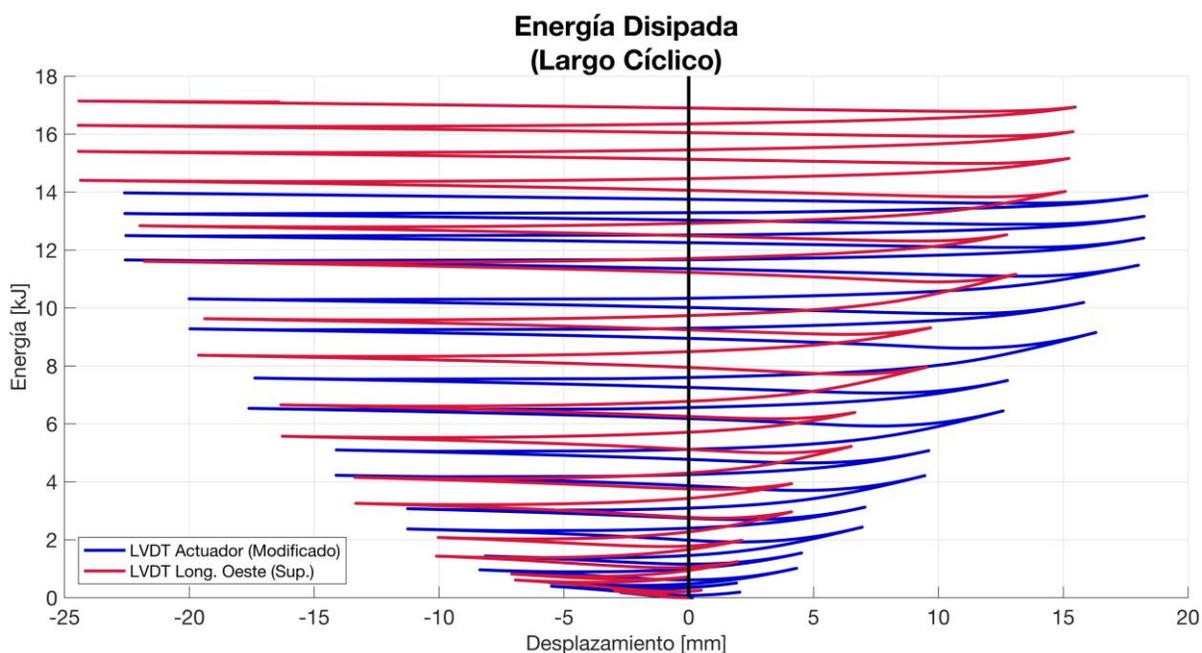


Figura 6.29: Energía disipada del perfil XL largo cíclico.

Con respecto a las histéresis, se puede ver un comportamiento similar al espécimen largo monotónico, es decir, la riostra logra una capacidad superior a la esperada en compresión, mientras que en tracción no sobrepasa la resistencia predicha por los valores de los ensayos de material. Con respecto a la energía disipada, nuevamente se ve una tendencia hacia el lado de la compresión. Esta vez, el perfil logra acumular una deformación inelástica de 688 veces el desplazamiento de fluencia (5,2 [mm], Tabla 3.4), valor similar al del perfil intermedio cíclico.

Los registros en el tiempo de los instrumentos se pueden ver en el Anexo B. Respecto al LVDT horizontal, su núcleo se sale del cuerpo (por su lado anterior) debido a las grandes deformaciones fuera del plano en el pandeo, hecho que también afecta las mediciones del LVDT vertical. Con respecto a los inclinómetros, se ve un giro muy similar entre ellos a lo largo de todo el ensayo, difiriendo levemente a medida que avanzan los ciclos, llegando a máximos de un poco más de $4,0 [^\circ]$, valor cercano al del perfil largo monotónico, pero menor que los de los especímenes de largo intermedio.

6.4 Perfiles cortos:

6.4.1 Monotónico:

El ensayo del perfil monotónico (Figura 6.30) se lleva a cabo sin problemas aplicándole la primera compresión protocolar para luego comenzar con los ciclos de carga al mismo nivel de deformación. El pandeo es bastante similar al de los perfiles anteriores: en torno al eje geométrico vertical (Y) hacia el norte, pero con una deflexión fuera del plano notoriamente menor que la de los 4 perfiles ya ensayados, y con la aparición de pandeo local en el ala horizontal del ángulo superior, al lado este del conector central y muy cercano a este. Una diferencia con respecto a los otros perfiles, es que el pandeo ocurre de manera más repentina, con una deformación local más pronunciada, llegando incluso a afectar el ala vertical del ángulo respectivo (Figura 6.31).

Al igual que en los otros ensayos, la rótula plástica permite la rotación de cuerpo rígido de ambos tramos que separa. A medida que avanzan los ciclos, se va flexionando más el material, siendo posible identificar pequeñas grietas en el punto de pandeo local al final del ensayo, que se habrían propagado de haber continuado con las sollicitaciones. Por otro lado, a diferencia del perfil largo monotónico, si hay aparición de pandeo local durante los desplazamientos finales de tracción, en la misma ubicación relativa a la rótula plástica que en los perfiles anteriores (Figura 6.12), pero con una longitud mayor (Figura 6.32).

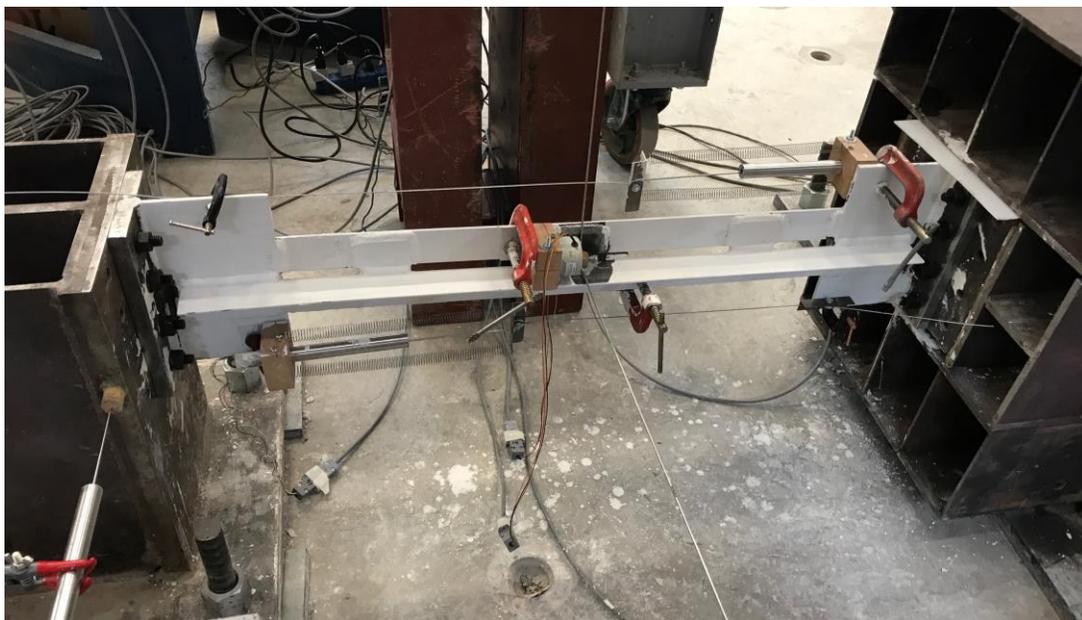


Figura 6.30: Perfil XL corto monotónico listo para ser ensayado.

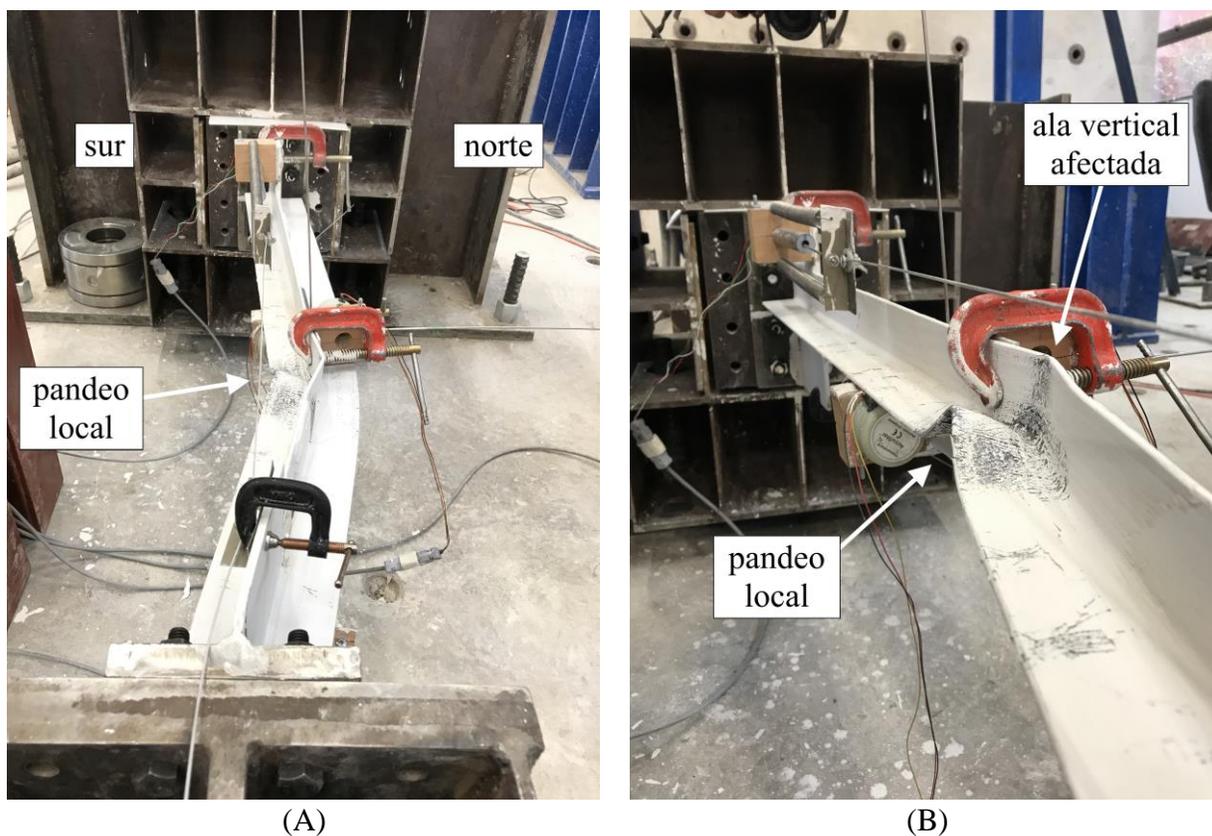


Figura 6.31: Pandeo del perfil XL corto monotónico: (A) global; (B) local.

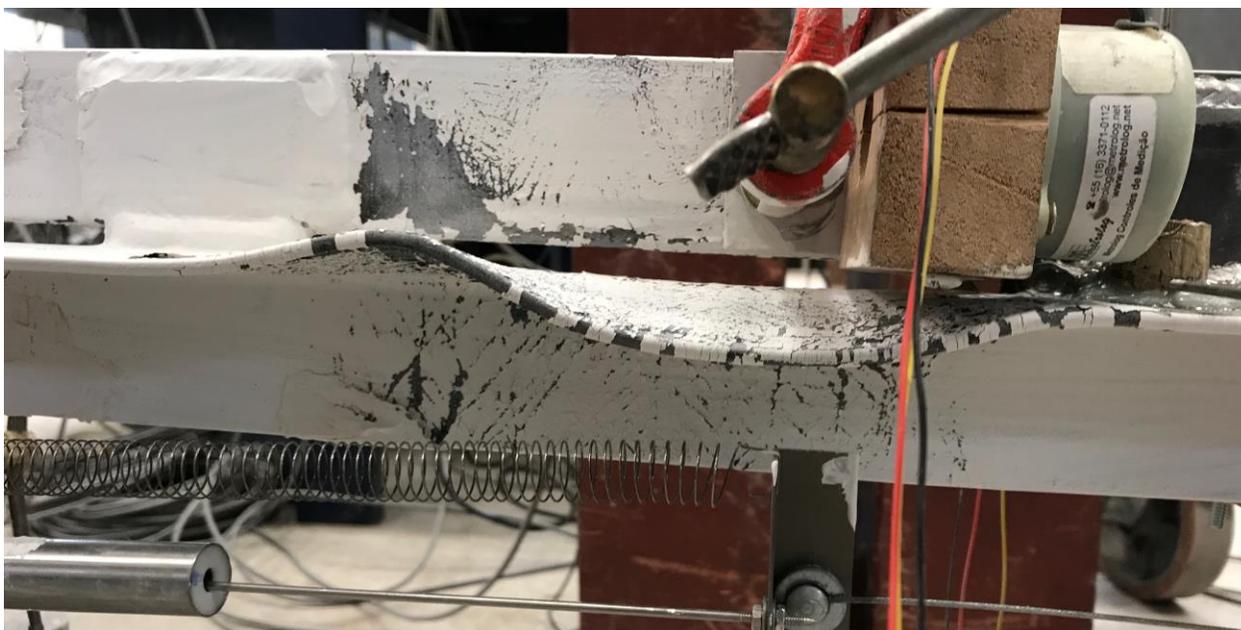


Figura 6.32: Pandeo en tracción del perfil XL corto monotónico.

Durante el ensayo no se identifican problemas respecto a los instrumentos. Sin embargo, las medidas de los LVDT's longitudinales son extrañas y difieren bastante entre ellas. En las imágenes que se toman se puede ver que el cable del inferior tiene una desangulación que sigue la curvatura

de la riostra en el pandeo, por lo que se decide utilizar el registro del superior, a pesar de que se registra muy poca deformación en tracción. A continuación se muestran las histéresis que se obtienen, utilizando los datos modificados del LVDT del actuador (Figura 6.33) y los del LVDT longitudinal superior (Figura 6.34), donde se pueden ver las resistencias correspondientes de la Tabla 3.6. Además, se muestran las energías disipadas calculadas de ambos gráficos (Figura 6.35).

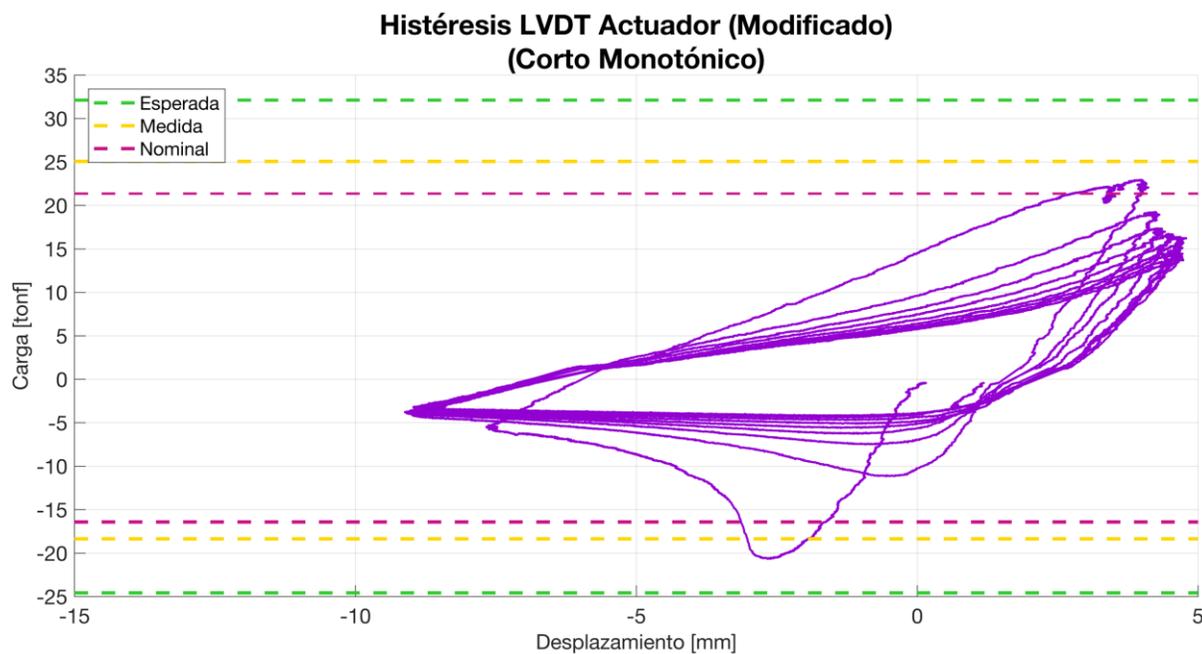


Figura 6.33: Histéresis del LVDT del actuador para el perfil XL corto monotónico.

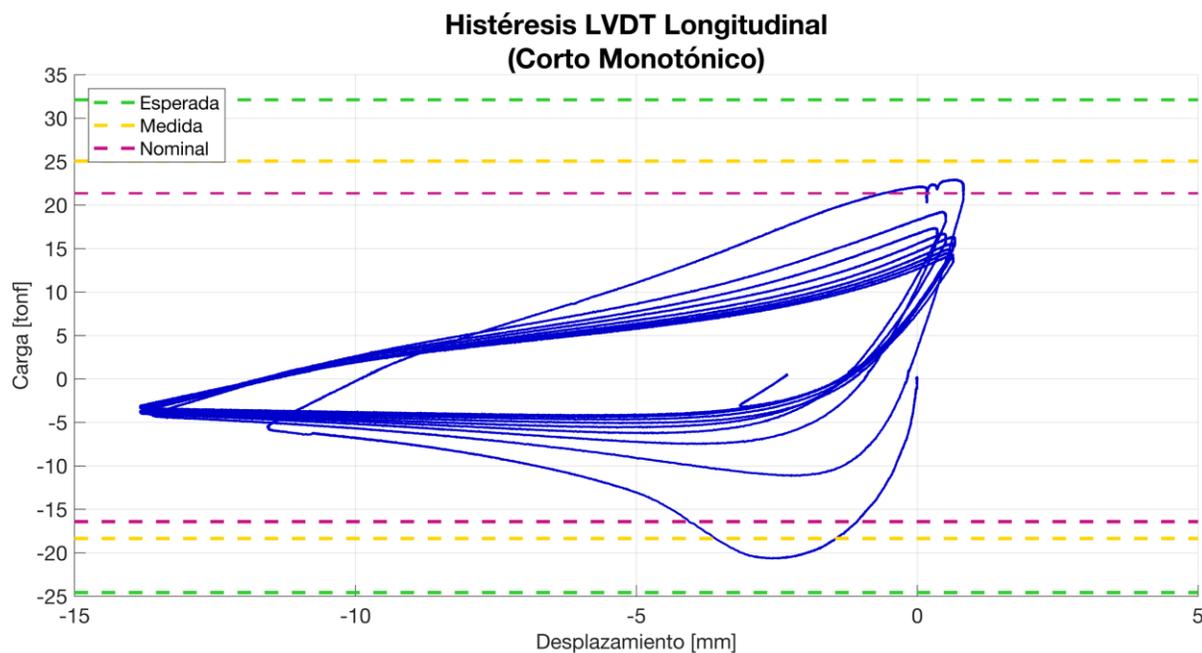


Figura 6.34: Histéresis del LVDT longitudinal superior para el perfil XL corto monotónico.

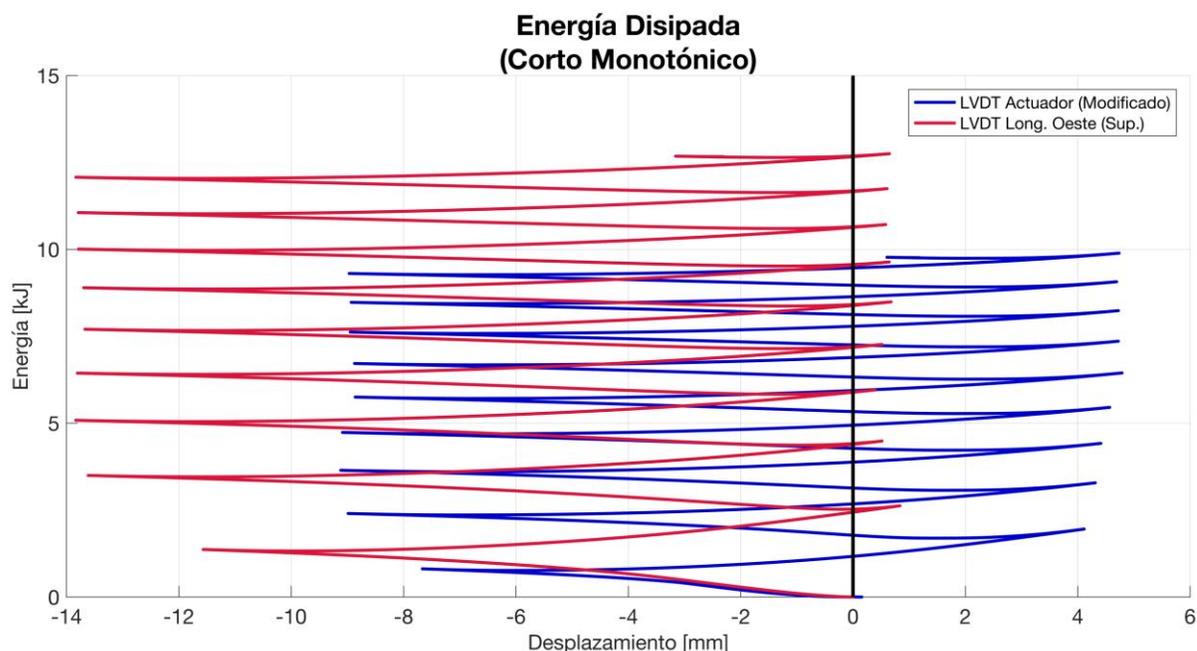


Figura 6.35: Energía disipada del perfil XL corto monotónico.

Con respecto a las histéresis, se observa que, a diferencia de los perfiles intermedio y largo, este no es capaz de sobrepasar la resistencia esperada en compresión, pero sí la que se calcula con los resultados de los ensayos de material. Además, se puede ver una clara degradación de la rigidez a tracción en el gráfico correspondiente al LVDT del actuador. Por otro lado, la deformación inelástica acumulada llega a un valor de 287 veces el desplazamiento de fluencia (2,0 [mm], Tabla 3.4). En relación a la energía disipada, se puede ver que la del LVDT longitudinal superior está muy inclinada hacia la parte de compresión. Esto se debe más que nada a que este instrumento registra poca deformación de tracción por alguna razón que no se identifica. Por otro lado, el LVDT del actuador indica una disipación más simétrica, pero igualmente inclinada hacia la izquierda, lo que se explica por la mayor disipación concentrada en la formación de la rótula plástica.

Los registros de los instrumentos en el tiempo se encuentran en el Anexo B. Con respecto al LVDT horizontal, se siguen teniendo deformaciones fuera del plano que saturan al instrumento, pero al no presenciarse deslizamientos del cuerpo, o salidas del núcleo, son datos mucho más fidedignos en los tramos de registro que los del resto de los perfiles. El hecho de que haya menos deformación por pandeo global, y que el punto de giro del cuerpo del LVDT vertical esté alejado del perfil, implica que las medidas de este son bastante precisas, pudiéndose ver desplazamientos de no más de 4 [mm] hacia abajo, confirmando un pandeo predominante en torno al eje vertical.

Con respecto a los inclinómetros, se observa una curva coincidente hasta el momento del pandeo, para luego exhibir una oscilación similar en magnitud, pero totalmente opuesta. El inclinómetro superior, que se encuentra cercano a la rótula plástica, muestra un giro hacia el sur en el momento del pandeo, mientras que el inferior, más alejado del punto de giro, presenta un giro hacia el norte. Si bien existe esta disyuntiva de signo, la magnitud de la diferencia es bastante pequeña. Los giros máximos están en torno a los 1,5 [°], por lo que se puede decir que la componente torsional en este espécimen es prácticamente nula. Sin embargo, este hecho es motivo para cambiar la ubicación de los inclinómetros, de manera que sus prensas de anclaje no atiesen las alas verticales de los ángulos (ver sección 4.2.2).

6.4.2 Cíclico:

El ensayo cíclico de la riostra corta se ejecuta sin problemas, y no se observa ninguna novedad respecto al resto de los perfiles. Se ven las estrías en la cal que indican la fluencia en ciertas partes del espécimen, en los primeros ciclos de tracción, mientras que hasta la deformación de 2,5 veces la fluencia solo se evidencia un pequeño pandeo identificable por una leve disminución de la carga. Ya en la primera compresión a 3 veces el valor de δ_y , ocurre un pandeo global notorio, en torno al eje geométrico vertical (Y) hacia el norte, y con la formación de la rótula plástica en el ala horizontal del ángulo superior, al oeste del conector central, muy cercano a este (Figura 6.36). Al igual que en el perfil corto monotónico, la deflexión fuera del plano es notoriamente menor que en los perfiles intermedios y largos, mientras que pandeo local es mucho más pronunciado, llegando a afectar el ala vertical del ángulo respectivo.

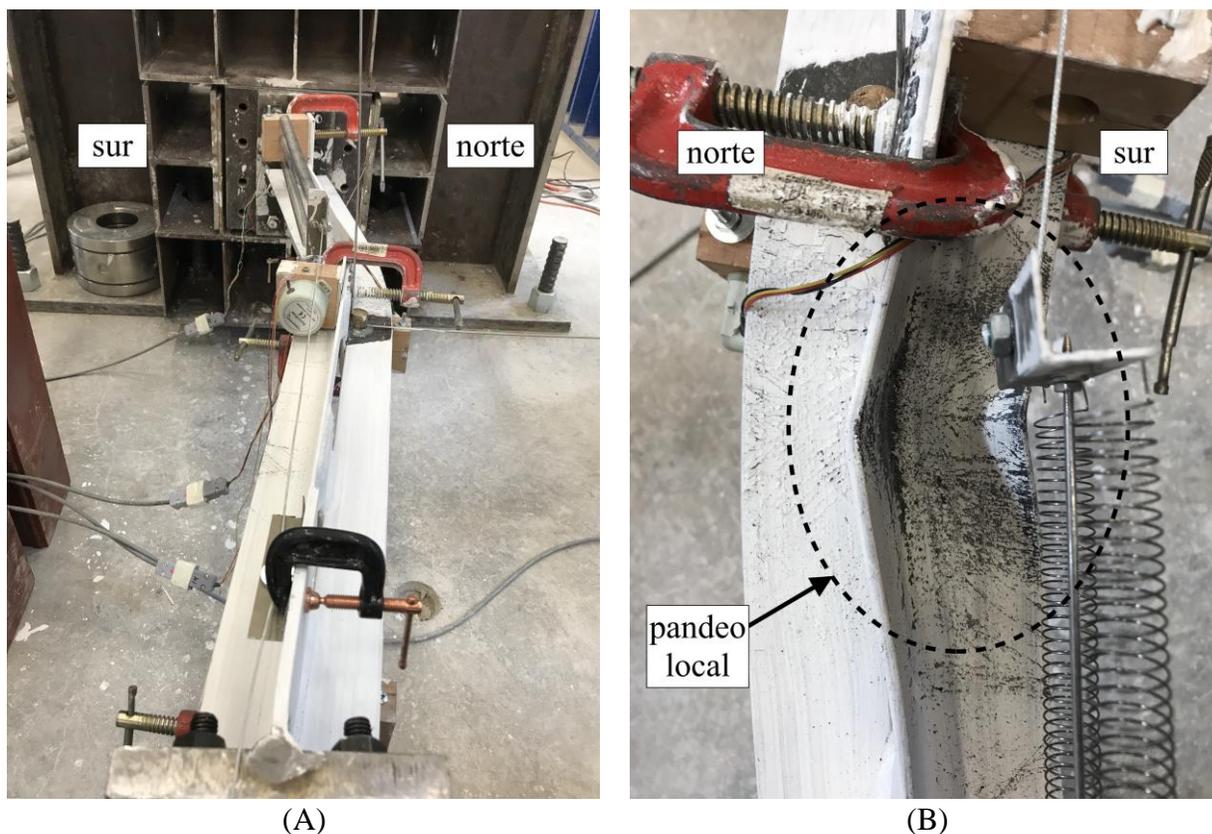


Figura 6.36: Pandeo del perfil XL corto cíclico: (A) global; (B) local.

Por otro lado, a medida que avanzan los ciclos, se provocan grandes flexiones en la parte contraria a la rótula, desembocando en la fluencia de ángulo inferior, y por ende, la aparición del pandeo local cuando el perfil se acomoda en la tracción, en la misma posición relativa con respecto al punto de pandeo local que en el resto de los especímenes (Figura 6.37 y Figura 6.38). Asimismo, el hecho de formar la rótula y luego enderezarla, fatiga el material, hasta que se producen grietas que se propagan a medida que se avanza en el protocolo de desplazamientos, bastante más rápido que en los otros ensayos, y llegando a desgarrar completamente el ala horizontal del ángulo involucrado (Figura 6.39).



Figura 6.37: Pandeo en tracción del perfil XL corto cíclico.

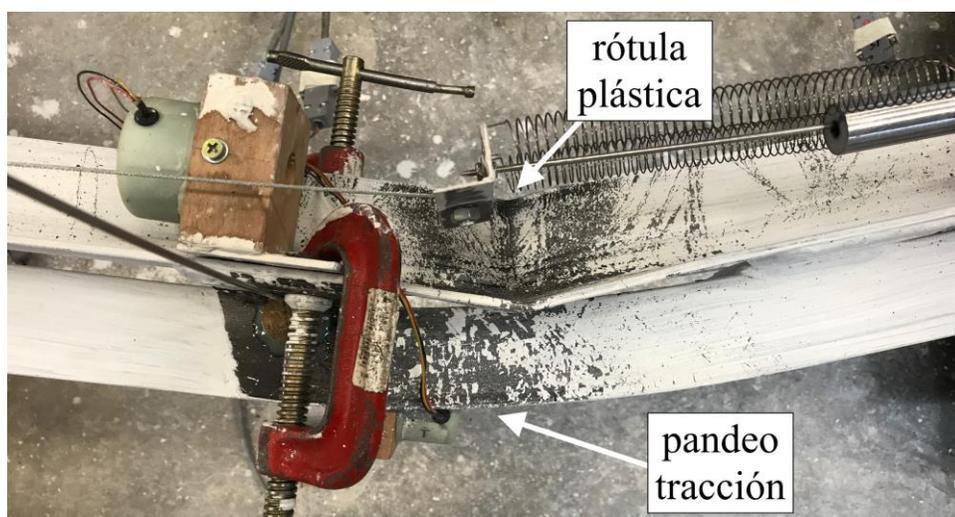


Figura 6.38: Ubicación relativa de la rótula plástica y el pandeo en tracción del perfil XL corto cíclico.



Figura 6.39: Desgarramiento del ala horizontal del ángulo superior del perfil XL corto cíclico.

Al igual que en el ensayo anterior, no se observan interferencias en los instrumentos, salvo la gran desangulación del LVDT longitudinal inferior, lo que hace tener más confianza a las medidas de su contraparte superior. A continuación se muestran las histéresis que se obtienen, utilizando los datos modificados del LVDT del actuador (Figura 6.40) y los del LVDT longitudinal superior (Figura 6.41), donde se pueden ver las resistencias correspondientes de la Tabla 3.6. Además, se muestran las energías disipadas calculadas de ambos gráficos (Figura 6.42).

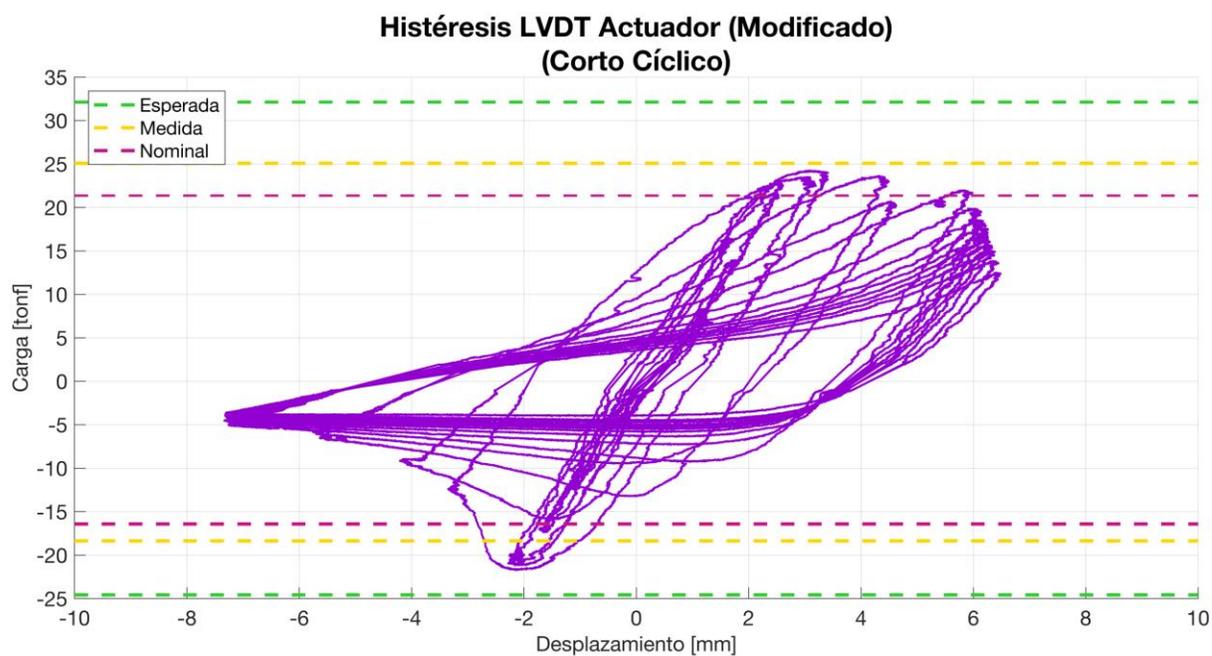


Figura 6.40: Histéresis del LVDT del actuador para el perfil XL corto cíclico.

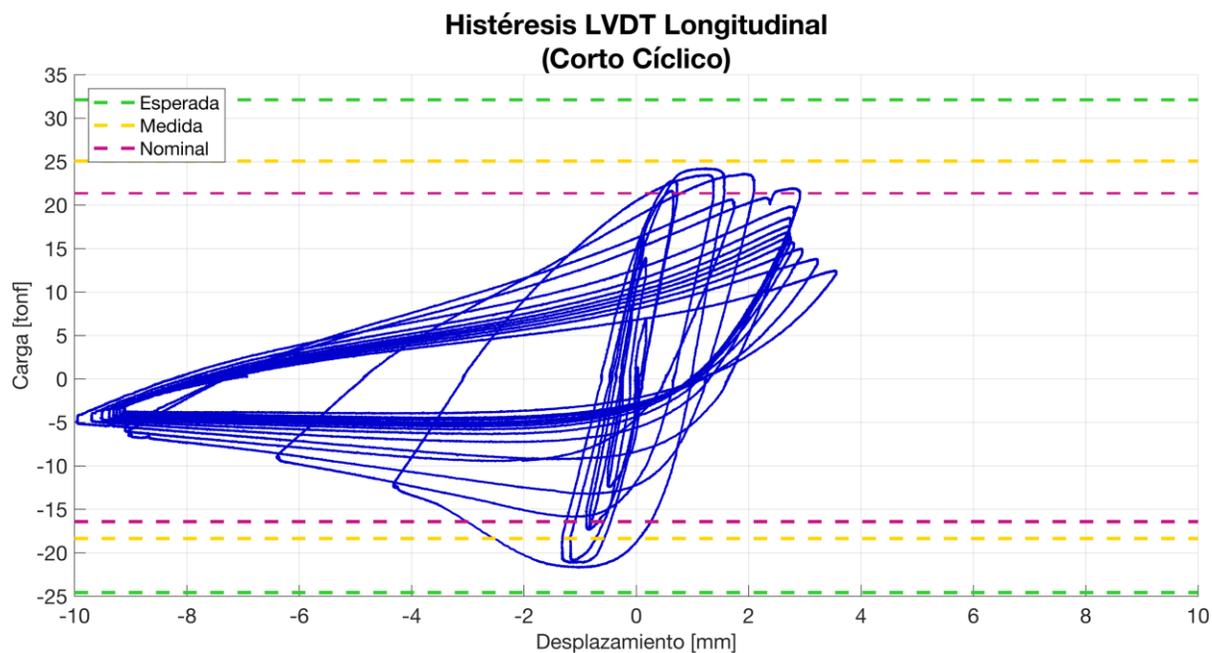


Figura 6.41: Histéresis del LVDT longitudinal superior para el perfil XL corto cíclico.

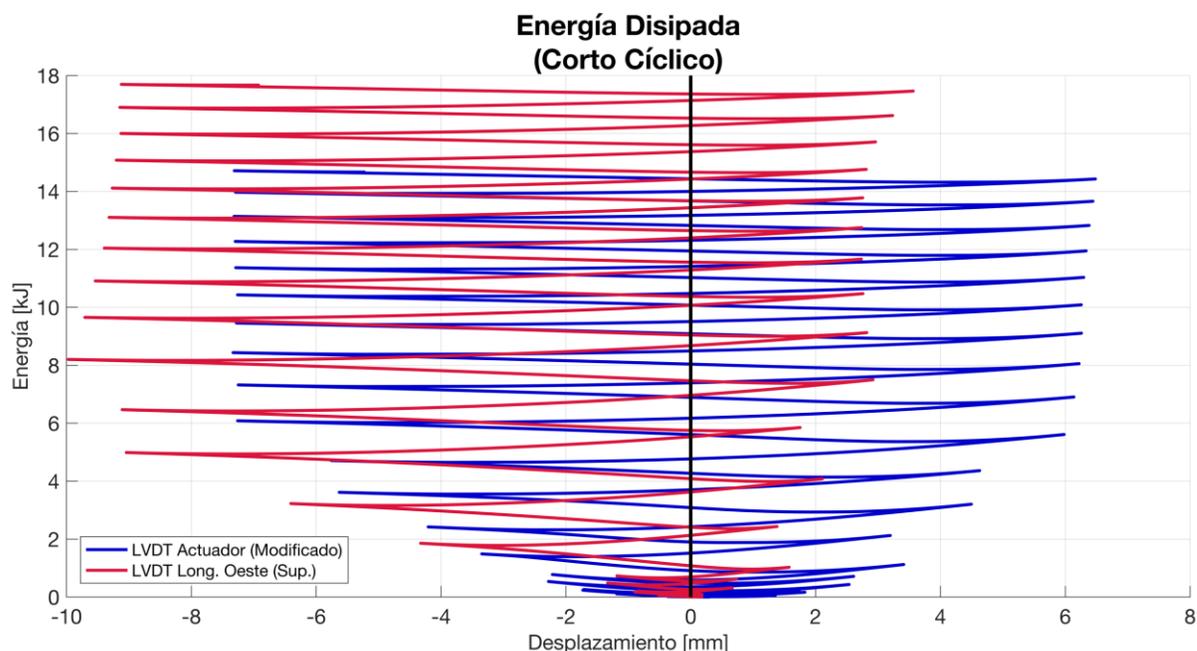


Figura 6.42: Energía disipada del perfil XL corto cíclico.

Con respecto a la histéresis, se observa un comportamiento idéntico al del monotónico, es decir, solo se supera la resistencia a compresión calculada con la fluencia que se obtiene de los ensayos de material, mientras que no se llega al valor análogo en tracción. Además, se puede ver una disminución de la rigidez bajo este último esfuerzo a medida que avanzan los ciclos. Este perfil logra acumular una deformación inelástica de 537 veces su desplazamiento de fluencia (2,0 [mm], Tabla 3.4), valor similar a los otros dos perfiles cíclicos, pero de menor magnitud, siendo que a este espécimen se le aplica una mayor cantidad de ciclos. En relación a la disipación de energía, los gráficos muestran la misma tendencia que el ensayo anterior.

Los registros en el tiempo de los distintos instrumentos se encuentran en el Anexo B. En este ensayo, las medidas del LVDT vertical y horizontal son más fidedignas, aunque igualmente se sobrepasa el punto de saturación en este último. Por otro lado, ambos inclinómetros reportan curvas prácticamente iguales, lo que es esperable debido a su anclaje directo a la placa conectora central. Sin embargo, los valores máximos superan levemente los 2,0 [°], indicando la nula componente torsional en el pandeo de este perfil.

6.5 Resumen:

A continuación se encuentran las tablas que resumen los resultados que se exponen en esta sección: en la Tabla 6.1 se muestran las características del pandeo que manifiesta cada uno de los 6 perfiles XL; en la Tabla 6.2 están las capacidades máximas que logran los especímenes y su razón con las resistencias dadas por el cálculo (Tabla 3.6); y en la Tabla 6.3 se exponen las deformaciones inelásticas acumuladas en función del desplazamiento de fluencia (Tabla 3.4), así como también el máximo giro de la sección transversal. Por último, en la Figura 6.43 se muestran los 6 perfiles XL una vez terminados todos los ensayos, donde se pueden ver las deformaciones remanentes fuera del plano.

Tabla 6.1: Resumen de las características que se observan durante el pandeo de los perfiles XL.

Perfil	Pandeo Global	Pandeo Local (Rótula Plástica)	Pandeo en Tracción	Fractura Ángulo
Intermedio Monotónico	Hacia el sur en torno al eje Y	Hacia abajo en ala horizontal del ángulo inferior entre conector central y el este (mitad de distancia)	NO	NO
Intermedio Cíclico	Hacia el norte en torno al eje Y	Hacia abajo en ala horizontal del ángulo superior entre conector central y el oeste (un tercio de la distancia desde el central)	En ala horizontal del ángulo inferior cercano al punto de pandeo local (longitud intermedia)	En toda el ala horizontal del ángulo superior
Largo Monotónico	Hacia el sur en torno al eje Y	Hacia arriba en el ala horizontal del ángulo inferior entre el conector central y el este (un tercio de la distancia desde el central)	NO	Solo aparición de grietas
Largo Cíclico	Hacia el norte en torno al eje Y	Hacia arriba en el ala horizontal del ángulo superior entre el conector central y el este (un tercio de la distancia desde el central)	En ala horizontal del ángulo inferior cercano al punto de pandeo local (longitud corta)	En toda el ala horizontal del ángulo superior, sobrepasando el vértice y llegando al ala vertical
Corto Monotónico	Hacia el norte en torno al eje Y	Hacia arriba en el ala horizontal del ángulo superior entre el conector central y el este (muy cercano al central) afectando ala vertical	En ala horizontal del ángulo inferior cercano al punto de pandeo local (longitud mayor)	Solo aparición de grietas
Corto Cíclico	Hacia el norte en torno al eje Y	Hacia arriba en el ala horizontal del ángulo superior entre el conector central y el oeste (muy cercano al central) afectando ala vertical	En ala horizontal del ángulo inferior cercano al punto de pandeo local (longitud mayor)	En toda el ala horizontal del ángulo superior

Tabla 6.2: Resumen de la capacidad experimental de los perfiles XL y su comparación con el cálculo (Tabla 3.6) (Verde = perfil cumple capacidad calculada; Naranja = perfil no cumple capacidad calculada).

Perfil	Capacidad a Tracción [tonf]	Capacidad a Compresión [tonf]	Capacidad / Cálculo [%]		
			Tracción	Compresión	
Intermedio Monotónico	20,52	16,85	Nominal	96	141
			Medida	82	134
			Esperada	64	111
Intermedio Cíclico	24,23	18,55	Nominal	113	156
			Medida	97	147
			Esperada	75	122
Largo Monotónico	23,99	12,33	Nominal	112	193
			Medida	96	193
			Esperada	75	169
Largo Cíclico	22,94	10,14	Nominal	107	159
			Medida	92	159
			Esperada	71	139
Corto Monotónico	22,95	20,67	Nominal	107	126
			Medida	92	113
			Esperada	71	84
Corto Cíclico	24,24	21,72	Nominal	113	132
			Medida	97	118
			Esperada	75	88

Tabla 6.3: Resumen de la deformación inelástica acumulada y el máximo giro de los perfiles XL.

Perfil	Desplazamiento de Fluencia [mm]	Deformación Inelástica [veces δ_y]	Máximo Giro [°]
Intermedio Monotónico	3,6	54	4,5
Intermedio Cíclico		638	6,2
Largo Monotónico	5,2	160	3,7
Largo Cíclico		688	4,3
Corto Monotónico	2,0	287	1,5
Corto Cíclico		537	2,2



Figura 6.43: Perfiles XL ensayados: el de la izquierda en cada par corresponde al espécimen cíclico.

7. Conclusiones

7.1 Resultados de los perfiles XL:

En el presente trabajo se estudian los modos de falla de perfiles XL compuestos por ángulos de acero A270ES y placas para conexión de acero A36. Se realizan 3 pares de ensayos, con riostras de igual sección transversal y posición de placas intermedias, donde la variable es el largo de pandeo. Con los resultados que se obtienen de las pruebas, es posible concluir lo siguiente:

- 1) No se cumple la relación encontrada analíticamente por Claverie (2016). Si bien la sección transversal de los perfiles tiene un poco de rotación al momento de desplazarse fuera del plano, no es un valor significativo como para calificar el modo de falla como un pandeo flexo-torsional o torsional. Todos los especímenes mostraron un pandeo de flexión predominante en torno al eje geométrico vertical (Y), y no en torno a su eje principal de mayor esbeltez (U).

Por ende, se puede decir que para perfiles XL con 3 conectores intermedios ubicados en los cuartos de su longitud, la razón entre la esbeltez global y la local no tiene relación con su modo de falla predominante, siendo este el mismo sin importar las dimensiones. Ahora bien, hay que tener en cuenta que no se tienen las mismas condiciones de los modelos de Claverie (2016). La principal diferencia es el hecho de no restringir los desplazamientos fuera del plano ni el giro de la sección transversal en el punto de conexión central. Esto claramente tiene una incidencia directa en la curva de pandeo del elemento, por lo que se deben realizar experimentos replicando aquellas condiciones para poder validar o descartar totalmente su hipótesis.

Por otro lado, en los modelos de elementos finitos realizados por Claverie (2016) se tenían solo perfiles XL conformados por ángulos no esbeltos localmente, a diferencia del presente trabajo. Durante los ensayos se puede observar que el pandeo localizado en el punto de rótula plástica en un ala horizontal aparece prácticamente al instante luego de que se manifiesta el pandeo global. Si los ángulos componentes fueran lo suficientemente robustos, se podría tener un mayor rango de pandeo elástico, lo que incidiría directamente en la curvatura que tomaría el perfil al momento de su falla.

- 2) Los perfiles XL de acero estructural son altamente dúctiles. En todos los ensayos las riostras alcanzan grandes desplazamientos, tanto en su longitud axial como en su movimiento fuera del plano. Si bien, en los ciclos finales comienza la propagación de una grieta en el ala de los ángulos, no se produce una falla repentina (frágil). Además, se puede ver que no hay una degradación de la capacidad a tracción por los ciclos, y solo una disminución del valor por el hecho de perder parte del área transversal.

Estas características son muy deseables en la práctica chilena, ya que se necesitan elementos fusibles en las estructuras que sean capaces de aportar rigidez hasta el último instante del terremoto, e incluso para las réplicas posteriores. Ahora bien, hay que tener claro que el comportamiento aislado puede ser distinto al que tengan los especímenes siendo parte de un marco. El hecho de tener tan poca capacidad a compresión post-pandeo, implica que la riostra a tracción deberá resistir toda la deformación entre piso, lo cual puede provocar su fractura frágil en el lugar de la rótula plástica.

- 3) La resistencia experimental a compresión siempre supera la nominal calculada con la fluencia que se obtiene del estudio de materiales, y en los perfiles intermedios y largos, sobrepasa la esperada. El hecho de que los especímenes cortos no excedan esta última capacidad se podría explicar por la mayor cantidad de soldadura que se tiene en una unidad de longitud, lo que provoca deformaciones remanentes más grandes, que se notan al momento del montaje, y que inciden directamente en la carga de pandeo. En cualquier caso, se tiene un factor de seguridad extra en el diseño, siendo mejor utilizar perfiles con una razón de esbeltez global y local mayor ($\lambda_{G/L}$), aunque puede ser contraproducente si se diseñan las conexiones por capacidad de la riostra, pudiendo desembocar en fallas no deseadas.

Por otro lado, la resistencia a tracción nunca supera el valor calculado a partir de los resultados del estudio de materiales, aunque siempre se alcanza al menos el 90% de este valor. Es probable que la razón de ello sea el hecho de que nunca se logra una tracción del elemento totalmente recto, ya que cuando se aplican desplazamientos protocolares mayores, el perfil ya se ha pandeado y tiene deformaciones remanentes muy grandes; pero también se podría deber a las alteraciones del material que provoca la soldadura de las placas conectoras.

- 4) El hecho de que en el pandeo de los especímenes se concentre en solo un punto de un ángulo que luego de varios ciclos se fractura, es un modo de falla ventajoso para la reparación. Si es que eventualmente los perfiles XL con conectores y conexión apernadas se comportan de manera similar, bastaría con reemplazar solo el ángulo fracturado para tener a la riostra nuevamente operativa. En el caso de placas y conexiones soldadas, la reparación ideal sería reemplazar la diagonal completa.
- 5) En todos los perfiles se ve una mayor cantidad de energía disipada en compresión. Esto es muy importante, ya que es el mecanismo fusible de la estructura para liberar energía cinética aportada por el terremoto. El hecho de saber que la riostra disipa más energía en compresión, ayuda a la toma de decisiones en el proceso de diseño de una obra de acero.
- 6) La rótula plástica y las placas gusset permiten la rotación libre del elemento, manteniendo la rectitud de los tramos a ambos lados del punto de pandeo local. Esto es interesante, ya que permite la modelación de la riostra post pandeo como dos bielas unidas en aproximadamente un tercio de su longitud. Se podrían realizar estudios para determinar estadísticamente el punto de formación de la rótula plástica.
- 7) La inspección de los especímenes post-fabricación es sumamente importante debido a los problemas que se evidenciaron en las soldaduras de sus conexiones y que pueden llegar a significar fallas no deseadas y graves problemas durante un evento sísmico en una estructura real. La maestranza debe ser cuidadosa durante la construcción de los perfiles y asegurar el uso de procedimientos de soldadura especificados en la norma AWS D1.1 / D1.1M (2015).

7.2 Recomendaciones para experimentos:

A lo largo del estudio se encontraron varios problemas, tanto en el montaje como en la instrumentación, que deben ser corregidos para lograr mejores resultados.

- 1) No se deben anclar los LVDT's longitudinales a las placas gusset ya que la gran rotación de estos elementos implica que hay una distorsión en las medidas de los instrumentos. Sería mejor soldar una plancha independiente en la placa base para colocar el LVDT y medir la deformación entre los extremos. Además, hay que tener cuidado de que los cables de extensión longitudinal no se vean afectados por el movimiento fuera del plano de la riostra.
- 2) Hay que corregir la imperfección de la perforación en la pieza que sirve de unión para la cabeza del actuador y la riostra, o bien solicitar la fabricación de una nueva.
- 3) Si bien las medidas del LVDT del actuador se pueden corregir con el instrumento longitudinal del apoyo, lo ideal es que la distorsión de medidas sea solo por la propia flexión de la columna, y no por el deslizamiento de ella. Por ende, se recomienda aplicar una pretensión mayor a las barras de anclaje de este elemento siempre y cuando se mantenga aquel valor en un porcentaje por debajo de su fluencia.
- 4) La medición del desplazamiento de la sección transversal se ve muy afectada por el movimiento fuera del plano. Lo ideal sería utilizar un instrumento que no se sature y que permita la rotación libre en el extremo de anclaje a la riostra.

7.3 Futuras líneas de investigación:

Si bien el estudio aporta nuevos antecedentes con respecto a la relación entre la razón de esbeltez global y local de los perfiles XL y su modo de falla, aún existen incertidumbres en torno al comportamiento de este tipo de elementos. En base a esto, se pueden seguir varias líneas de investigación:

- 1) Ejecutar modelos de elementos finitos de los perfiles que se ensayan en el presente trabajo con el fin de calibrar resultados y determinar las condiciones para lograr un modelo fidedigno a la realidad.
- 2) Estudiar de manera empírica el comportamiento de perfiles aislados con las restricciones de desplazamiento en el conector central utilizadas en los modelos de Claverie (2016).
- 3) Llevar a cabo estudios numéricos o experimentales para determinar el comportamiento de perfiles XL con conectores y conexiones apernadas.
- 4) Estudiar las fuerzas que se provocan en las soldaduras de los ángulos con las placas gusset y sus conectores mediante modelos de elementos finitos.
- 5) Ejecutar experimentos para determinar el comportamiento de perfiles XL siendo parte de un marco estructural.
- 6) Llevar a cabo estudios analíticos para encontrar el punto de formación de la rótula plástica.
- 7) Realizar experimentos o modelos de elementos finitos para ver si existe alguna relación entre la cantidad de conectores y el plano de pandeo.

Bibliografía

- American Institute of Steel Construction. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI / AISC 341-16 (2016). Chicago, Illinois.
- American Institute of Steel Construction. Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/ AISC 360-16 (2016). Chicago, Illinois.
- American Society for Testing Materials International. ASTM A36/A36M - 14, Standard Specification for Carbon Structural Steel (2014). West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing Materials International. ASTM A6/A6M - 16a, Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling (2016). West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing Materials International. ASTM A370 - 17, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products (2017). West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Welding Society. AWS D1.1 / D1.1M: 2015 An American National Standard, Structural Welding Code - Steel (2015). Miami, Florida.
- Beulah Gnana Ananthi, G., Vishuvaradhan, S., & Samuel Knight, G. M. (2015). Experimental and Numerical Investigation on Thin-Walled Single and Starred Angle Sections Under Compression. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(12), 3417–3427.
- Claverie, F. (2016). *Estudio Numérico de los Modos de Falla Predominantes en Perfiles XL de Acero Estructural ante Solicitación Cíclica* (Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil). Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Claverie, F., & Herrera, R. (2017). FAILURE MODES OF STARRED ANGLE BRACES. En *16th World Conference on Earthquake Engineering*. Santiago, Chile.
- Escobedo, F. (2016). *Evaluación Experimental de Arriostamiento con Pandeo Restringido por un Material no Tradicional* (Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil). Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Espinoza, J. (2015). *Diseño de Sistema de Ensayo Cuasiestático Cíclico de Tracción y Compresión para Riostras de Pandeo Restringido* (Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil). Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Guru Agastheesh, M., & Senthil Selvan, S. (2016). Behaviour of Cold Formed Steel Starred Section Subjected to Axial and Eccentric Load Condition. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(23).
- Haifeng, L., Xuming, W., & Junke, H. (2016). Simplified method for Euler buckling load of closely star-battened angle column about Y axis. *Thin-Walled Structures*, 107, 620–626.

- Instituto Nacional de Normalización INN-Chile. NCh2369. Of 2003 - Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales (2003). Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización INN-Chile. NCh203. Of 2006 - Acero para uso estructural - Requisitos (2006). Santiago, Chile.
- Molina, J. (2014). *Modos de Falla Predominantes en Perfiles XL de Acero Estructural* (Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil). Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Montecinos, R., Herrera, R., Verdugo, A., & Beltrán, J. F. (2012). Estructuras Industriales. En M. Casares (Ed.), *Mw=8.8 Terremoto en Chile 27 de Febrero 2010* (1°, pp. 211–239). Santiago, Chile: Editorial Maval.
- Salas, C. (2016). *Estudio Experimental de Conexiones de Momento Usando Perfiles T Soldados* (Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil). Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Temple, M. C., Schepers, J. A., & Kennedy, D. J. L. (1986). Interconnection of starred angle compression members. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 13, 606–619.
- Tremblay, R. (2002). Inelastic seismic response of steel bracing members. *Journal of Constructional Steel Research*, 58(5–8), 665–701.
- Vergara del Pozo, R. (2004). *Manual de Diseño para Angulos Estructurales L-AZA Primera Edición en base a las especificaciones AISC: ASD-1989; LRFD-1999*. (J. Manríquez & C. Rondon, Eds.) (1°). Santiago, Chile: M y M Servicios Gráficos S.A.
- Vishnuvardhan, S., & Samuel Knight, G. M. (2008). Behaviour of cold-formed steel single and compound plain angles in compression. *Advanced Steel Construction*, 4(1), 46–58.
- Whitmore, R. E. (1952). Experimental investigation of stresses in gusset plates. *Engineering Experiment Station, University of Tennessee, Knoxville*, 16.
- Wolmarans, K., & Krige, G. J. (1991). The battening of starred angle struts. *Civil Engineering = Siviele Ingenieurswese*, 33(4), 121–126.

Anexos

A. Curvas de ensayo de materiales:

I. Probetas de ángulo:

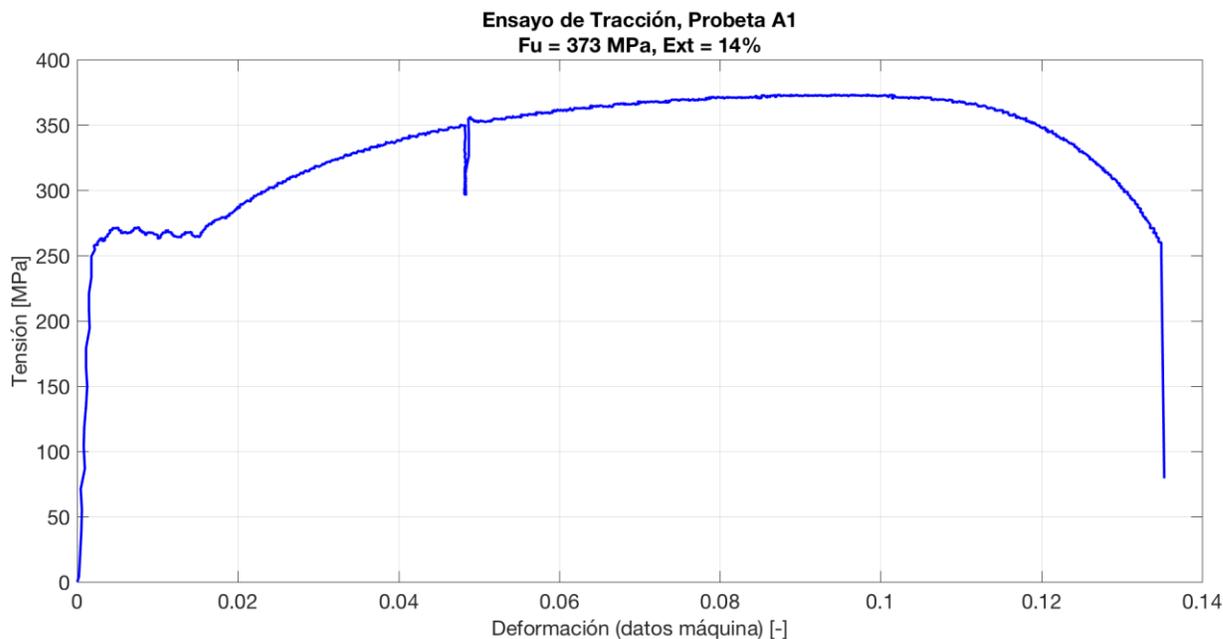


Figura Anexa 1: Curva de tensión vs. deformación de la probeta de ángulo A1 con los datos de desplazamiento de la máquina.

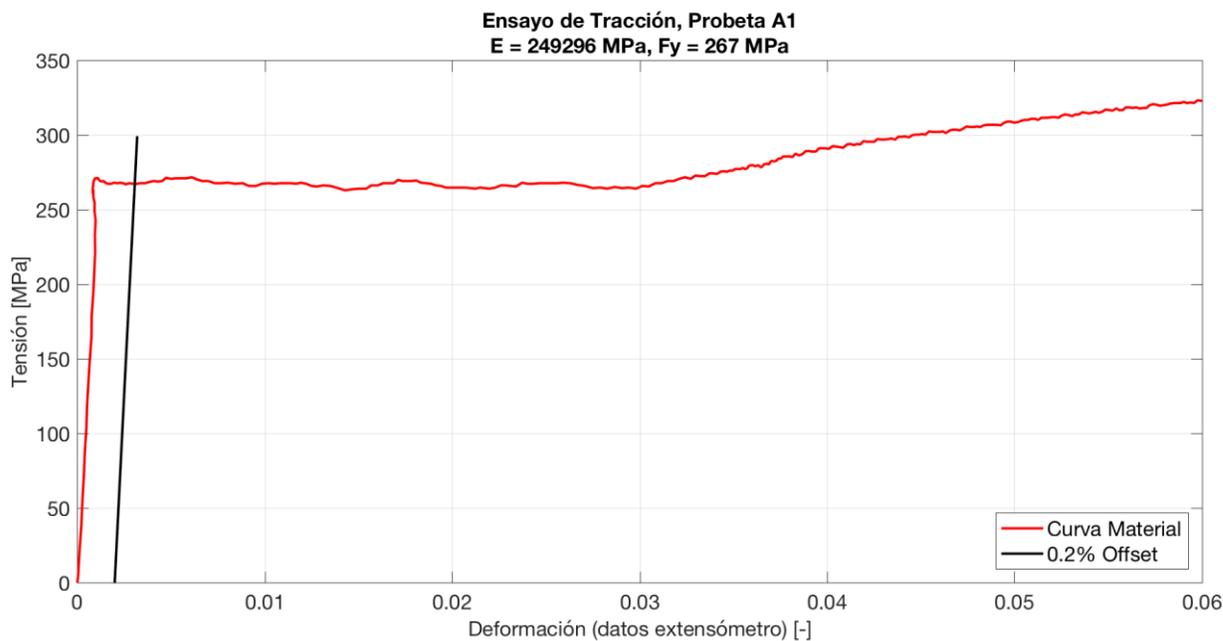


Figura Anexa 2: Curva de tensión vs. deformación de la probeta de ángulo A1 con los datos de desplazamiento del extensómetro.

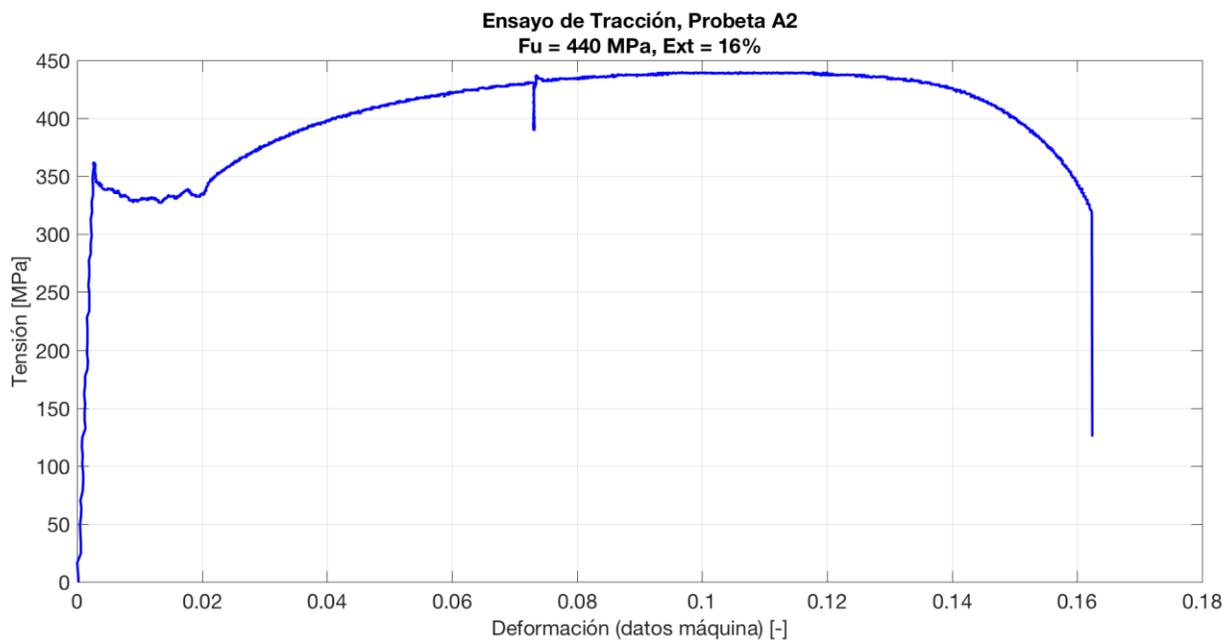


Figura Anexa 3: Curva de tensión vs. deformación de la probeta de ángulo A2 con los datos de desplazamiento de la máquina.

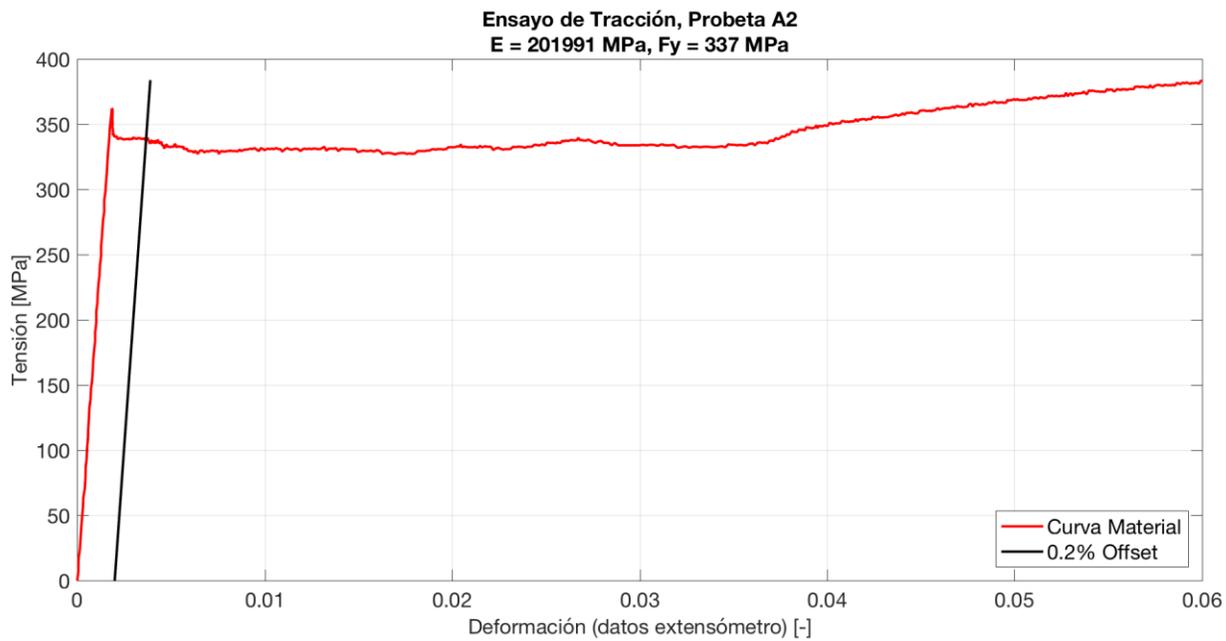


Figura Anexa 4: Curva de tensión vs. deformación de la probeta de ángulo A2 con los datos de desplazamiento del extensómetro.

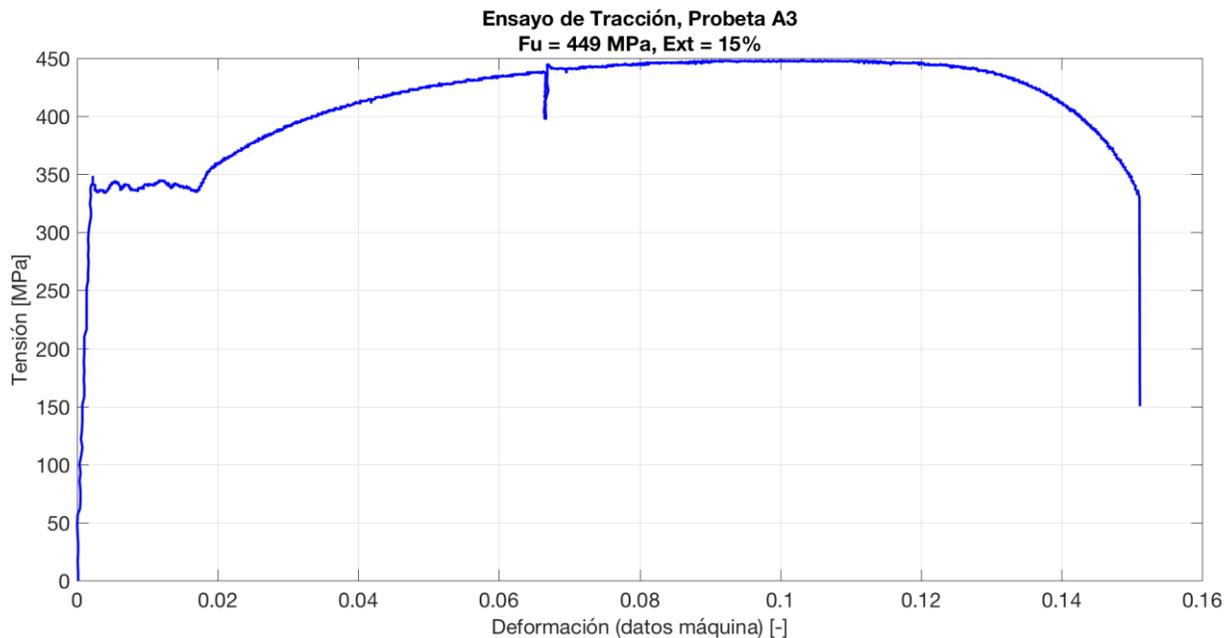


Figura Anexo 5: Curva de tensión vs. deformación de la probeta de ángulo A3 con los datos de desplazamiento de la máquina.

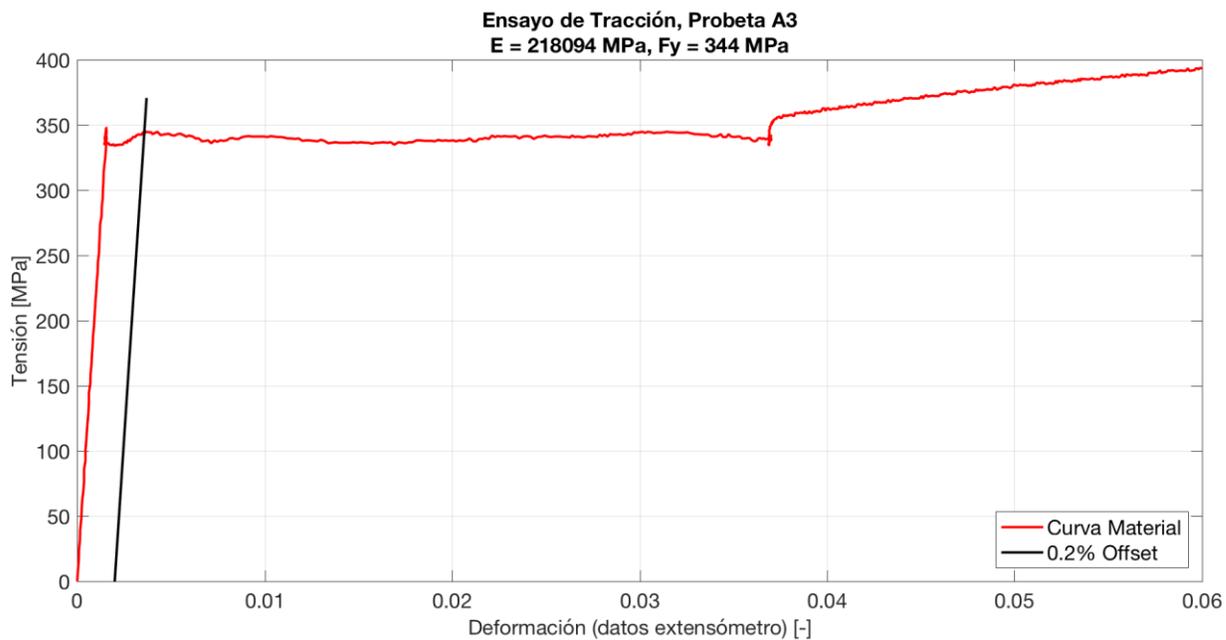


Figura Anexo 6: Curva de tensión vs. deformación de la probeta de ángulo A3 con los datos de desplazamiento del extensómetro.

II. Probetas de placa:

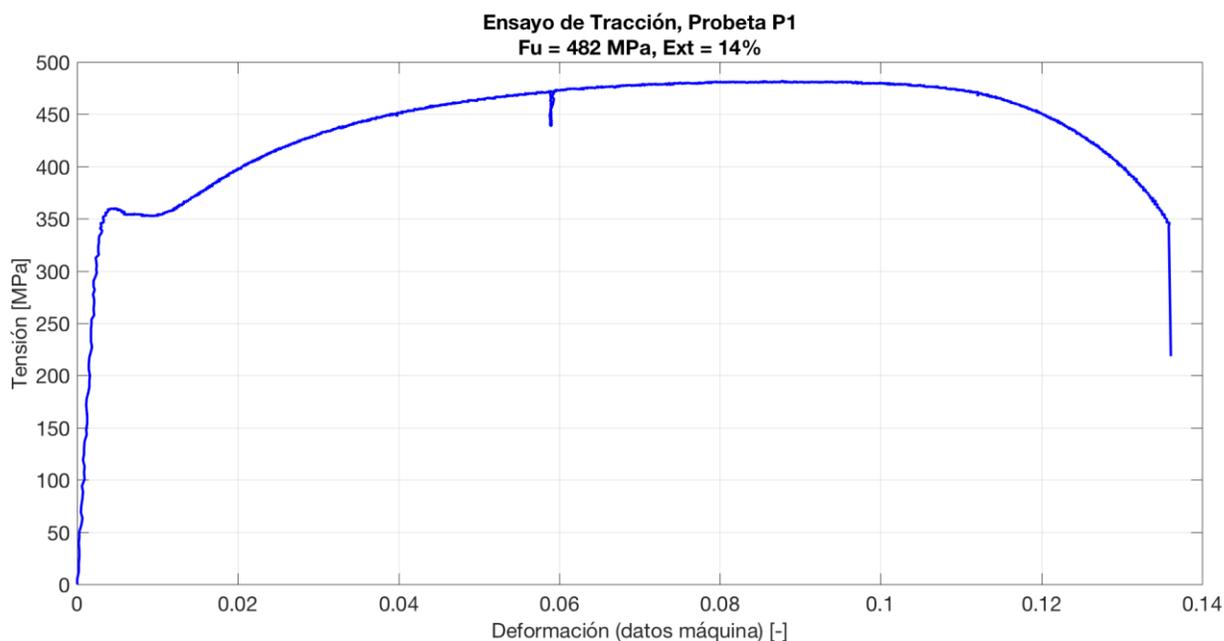


Figura Anexa 7: Curva de tensão vs. deformação de la probeta de placa P1 con los datos de desplazamiento de la máquina.

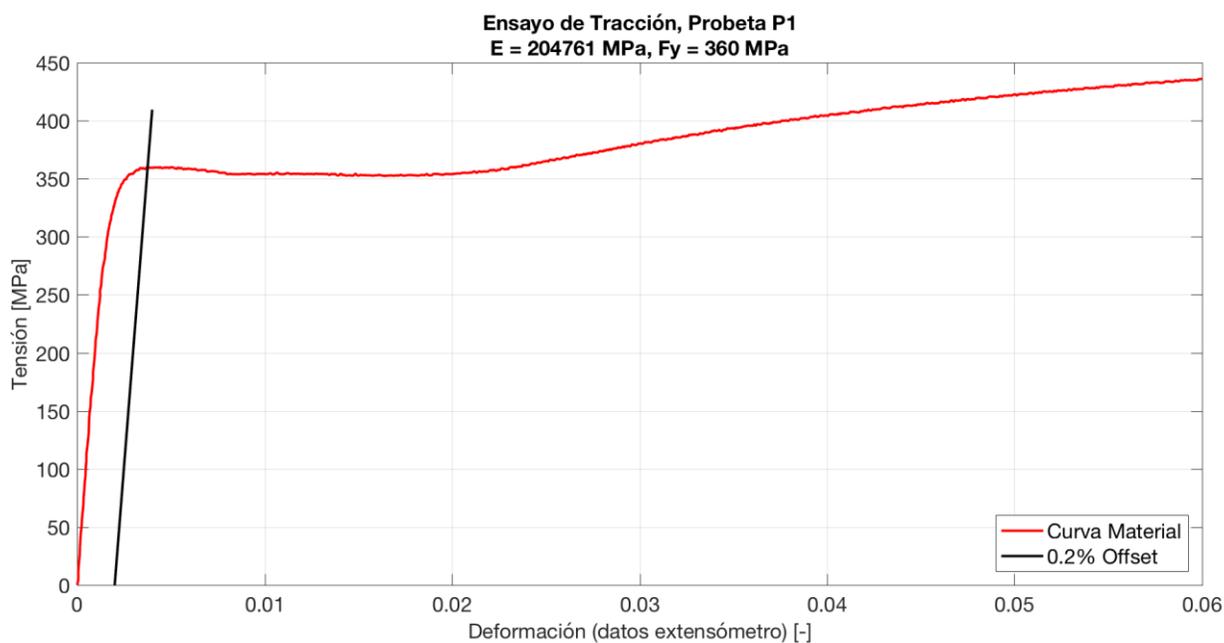


Figura Anexa 8: Curva de tensión vs. deformación de la probeta de placa P1 con los datos de desplazamiento del extensómetro.

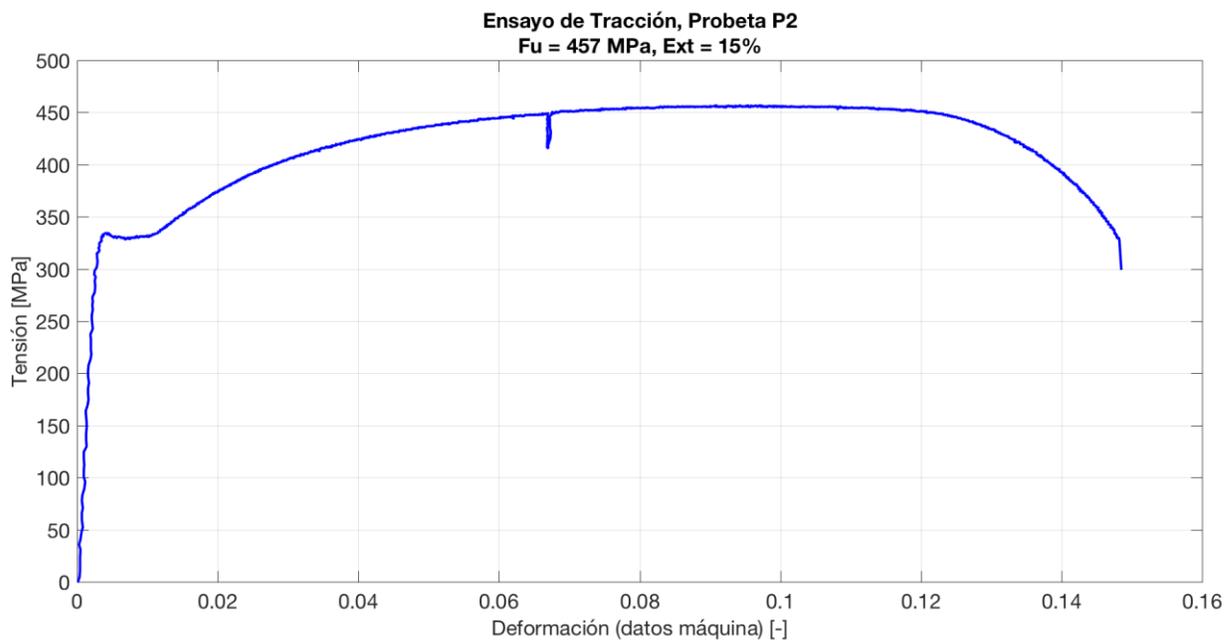


Figura Anexa 9: Curva de tensión vs. deformación de la probeta de placa P2 con los datos de desplazamiento de la máquina.

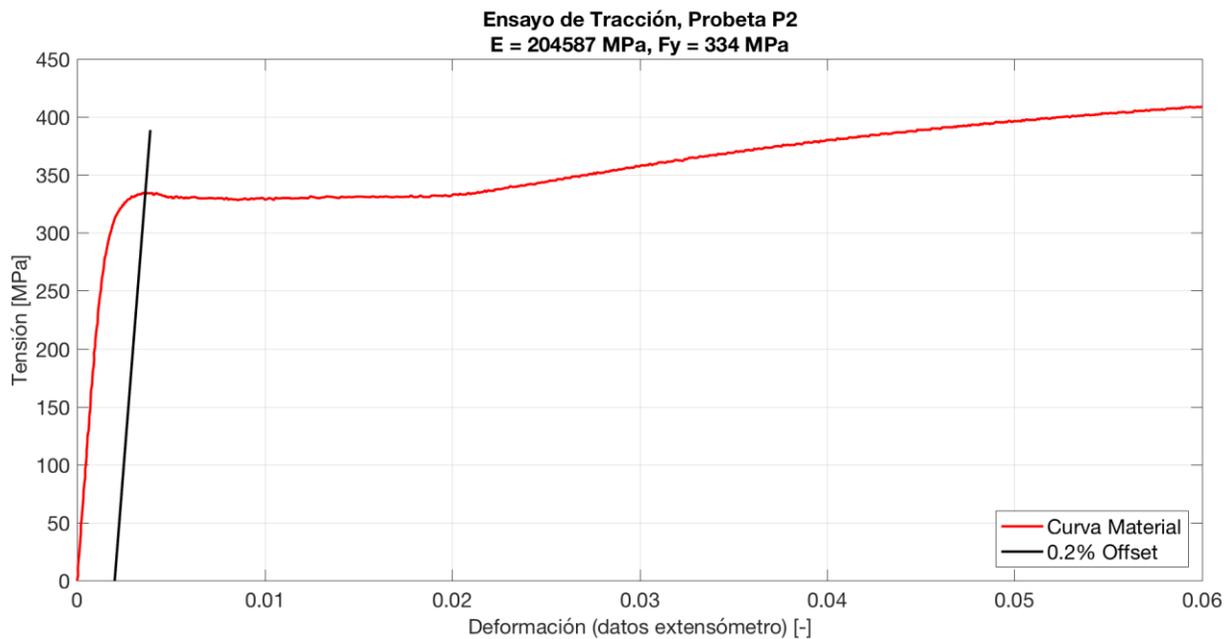


Figura Anexa 10: Curva de tensión vs. deformación de la probeta de placa P2 con los datos de desplazamiento del extensómetro.

B. Registro de datos en función del tiempo:

I. Intermedio Monotónico:

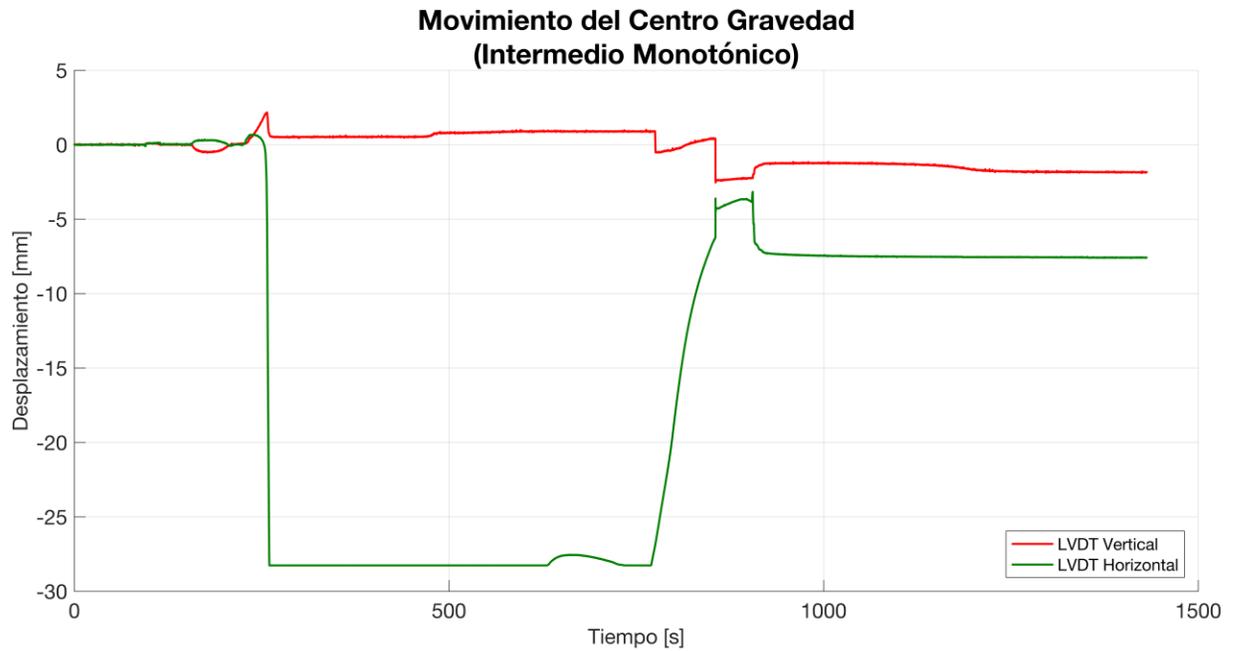


Figura Anexa 11: Registro de los LVDT's horizontal y vertical para el perfil XL intermedio monotónico.

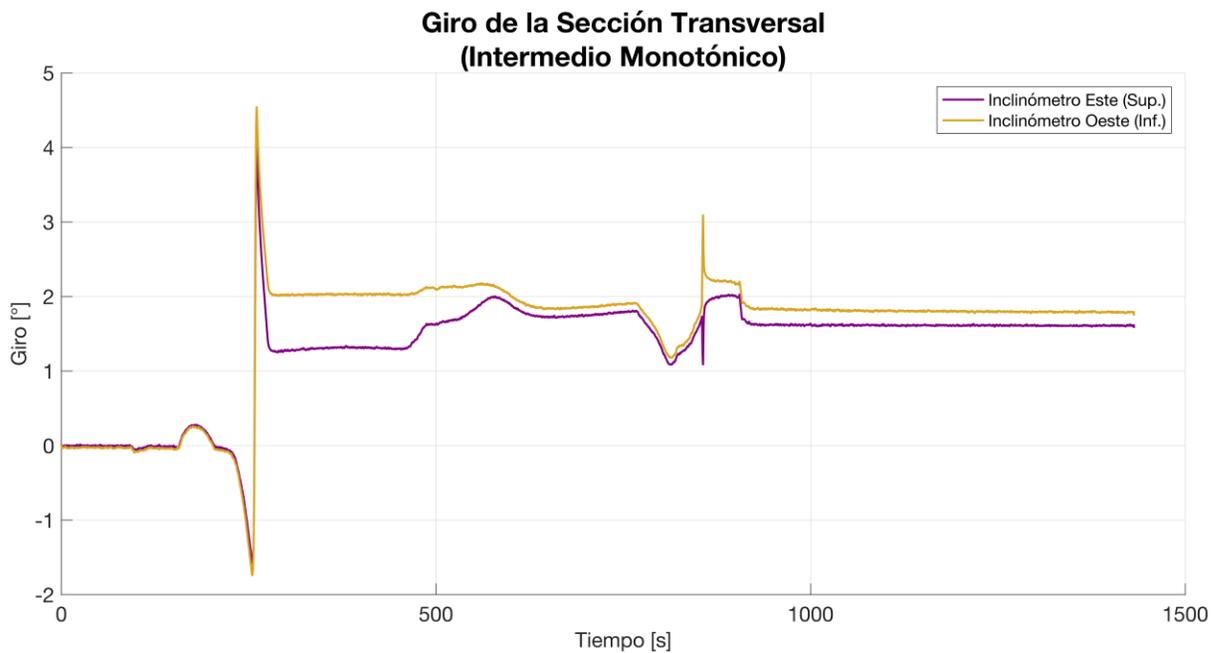


Figura Anexa 12: Registro de los inclinómetros para el perfil XL intermedio monotónico.

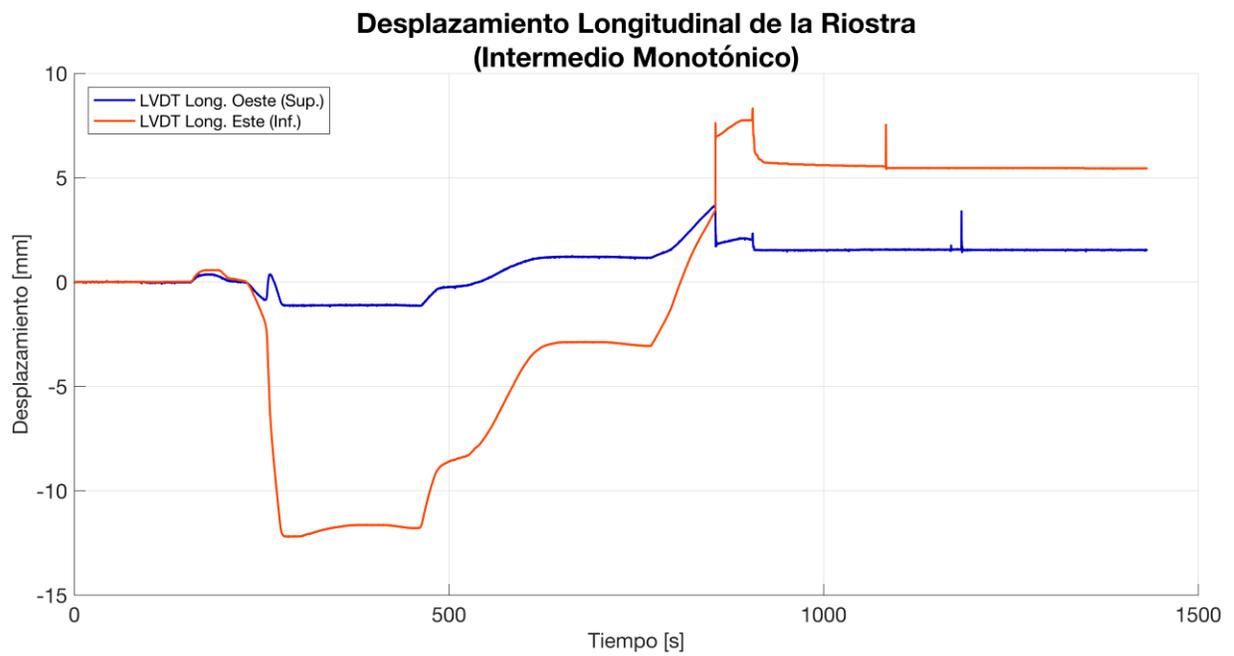


Figura Anexa 13: Registro de los LVDT's longitudinales del perfil XL intermedio monotónico.

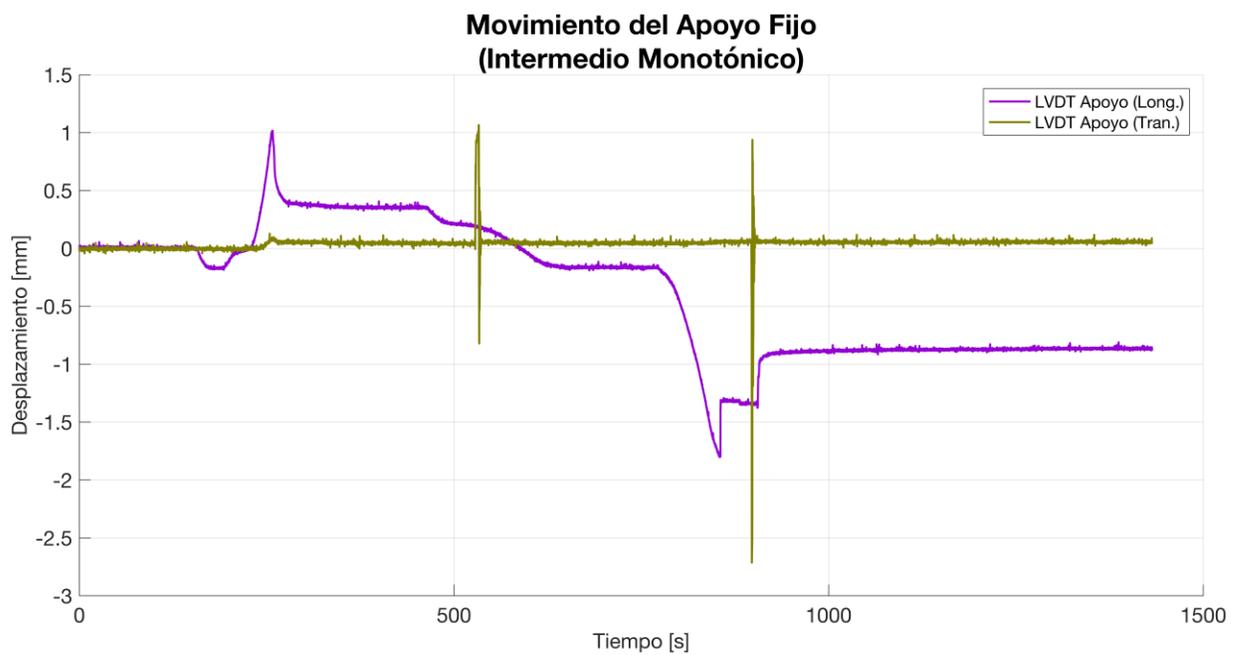


Figura Anexa 14: Registro de los LVDT's del apoyo simple para el perfil XL intermedio monotónico.

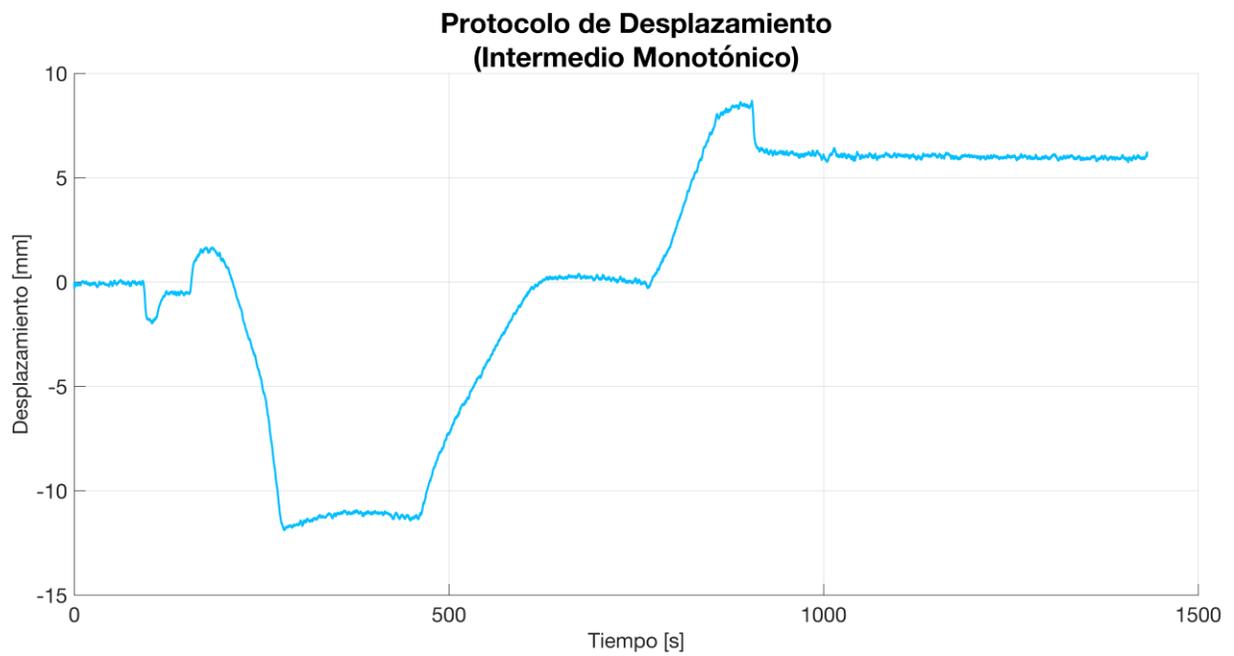


Figura Anexa 15: Registro del LVDT del actuador para el perfil XL intermedio monotónico.

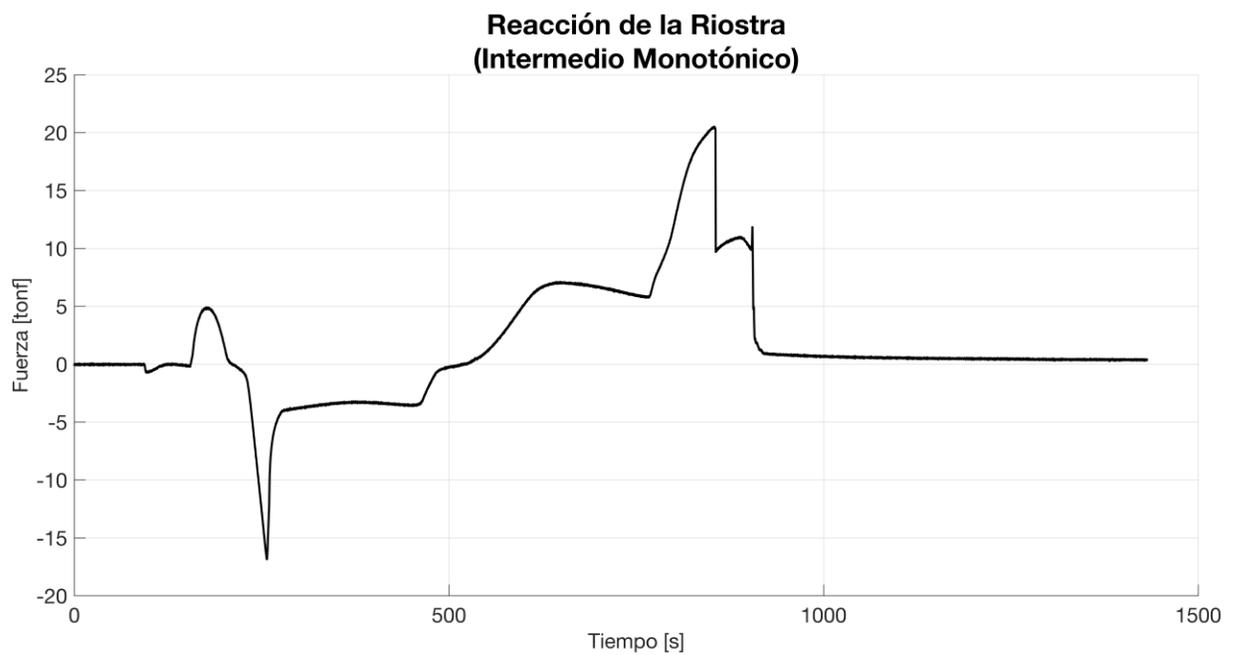


Figura Anexa 16: Registro de la celda de carga para el perfil XL intermedio monotónico.

II. Intermedio Cíclico:

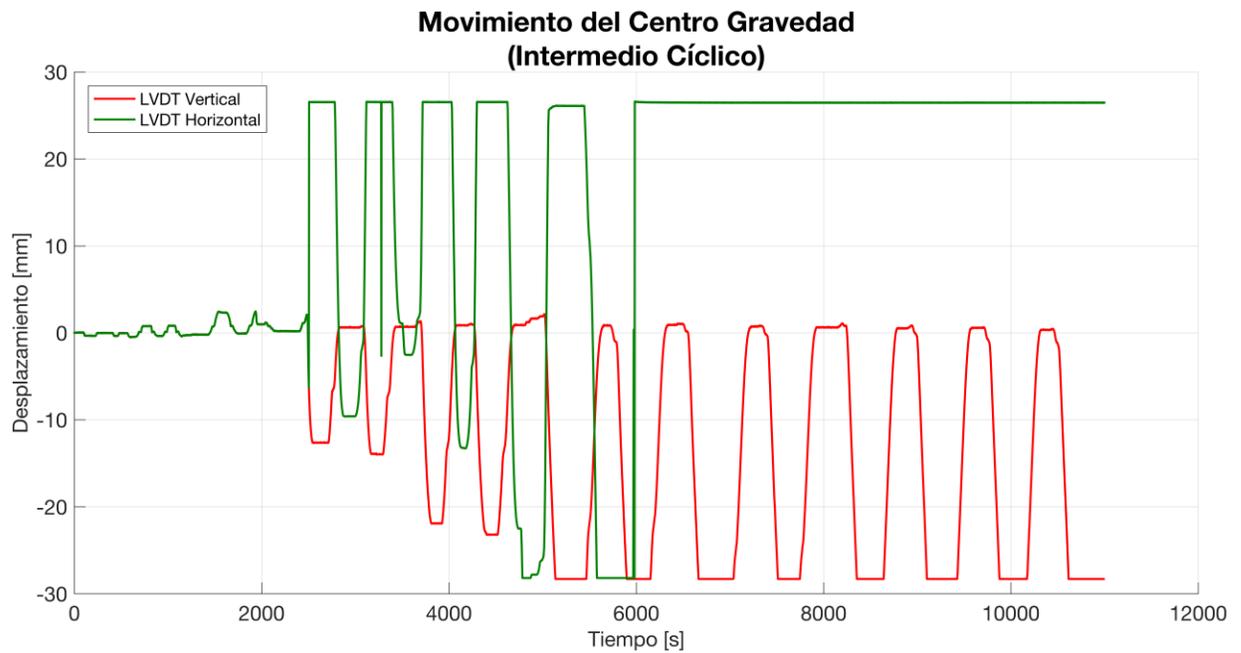


Figura Anexa 17: Registro de los LVDT's horizontal y vertical para el perfil XL intermedio cíclico.

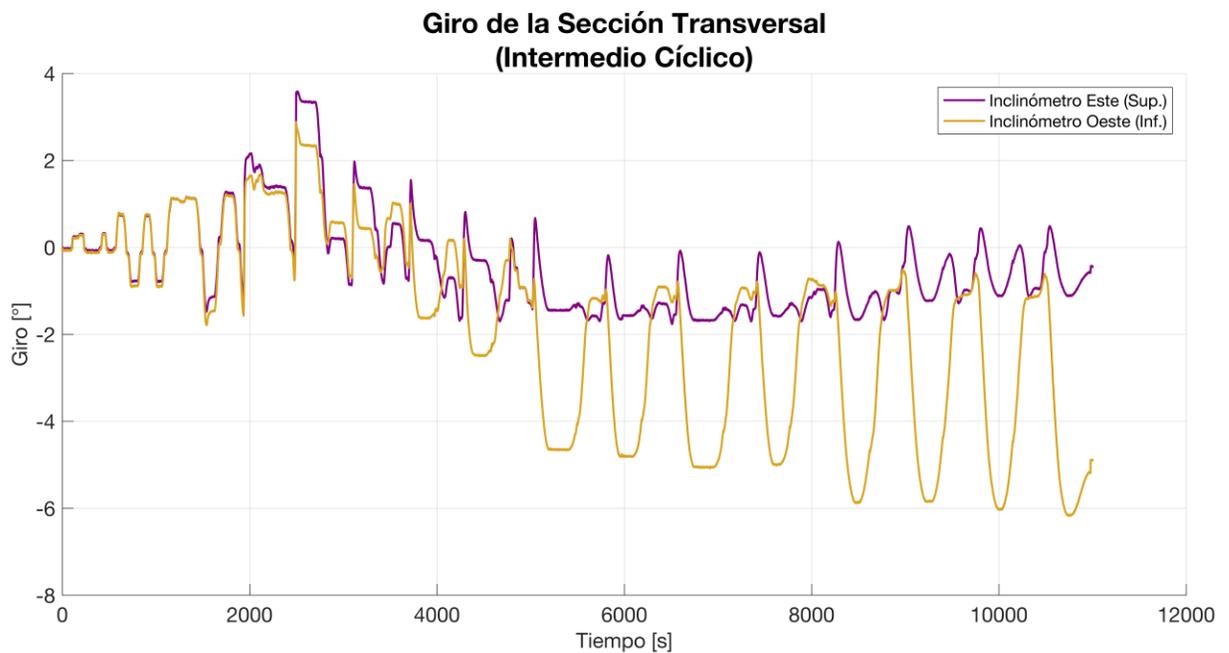


Figura Anexa 18: Registro de los inclinómetros para el perfil XL intermedio cíclico.

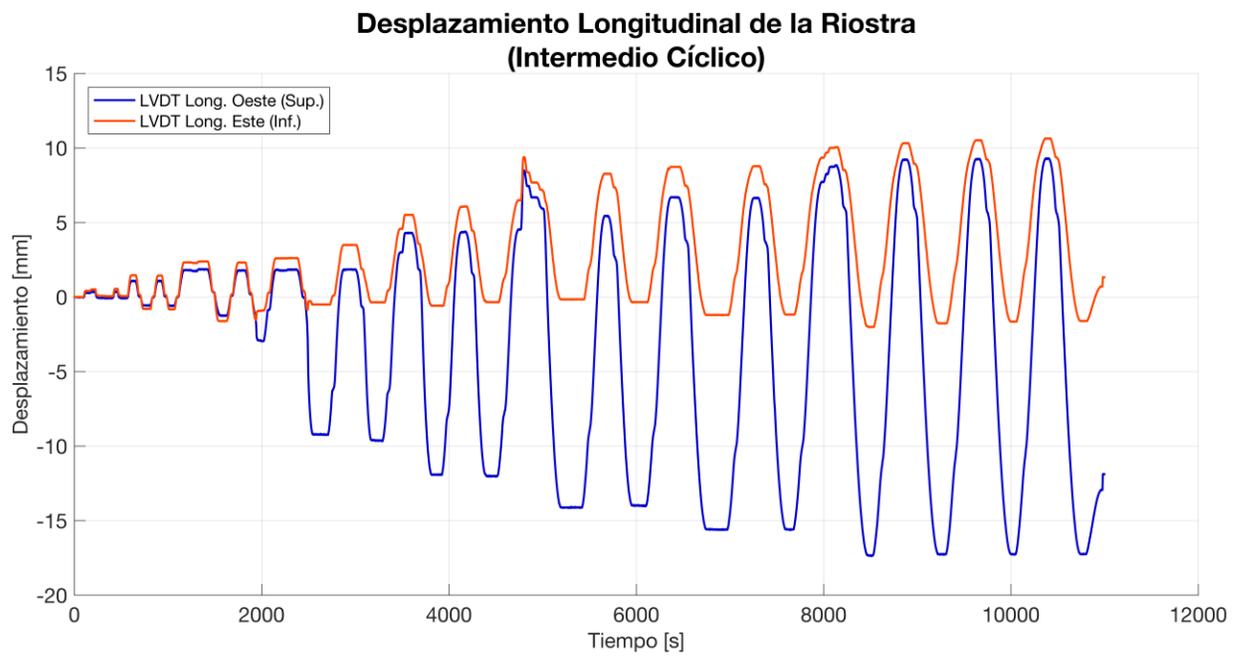


Figura Anexa 19: Registro de los LVDT's longitudinales para el perfil XL intermedio cíclico.

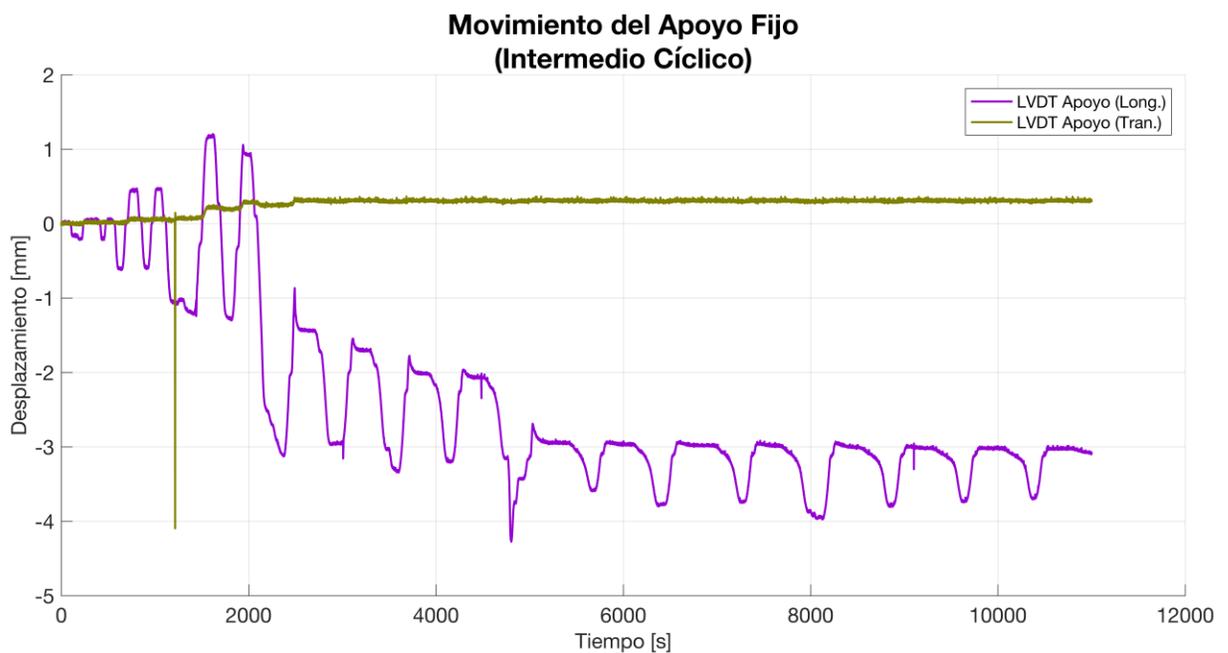


Figura Anexa 20: Registro de los LVDT's del apoyo simple para el perfil XL intermedio cíclico.

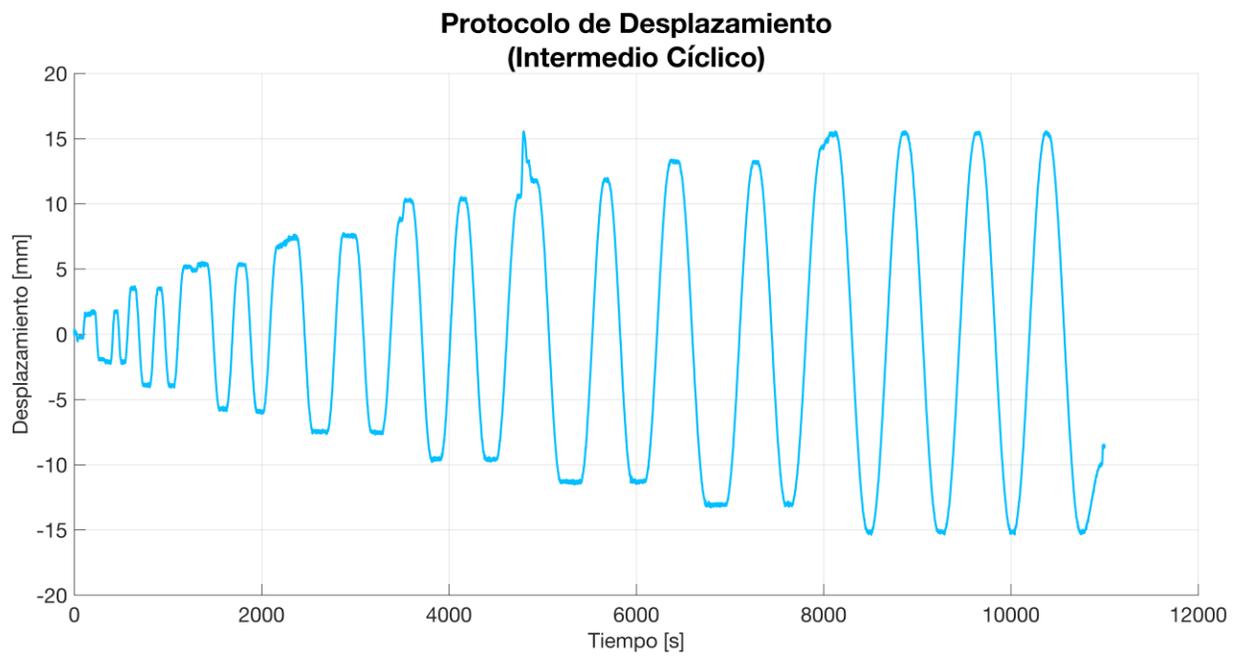


Figura Anexa 21: Registro del LVDT del actuador para el perfil XL intermedio cíclico.

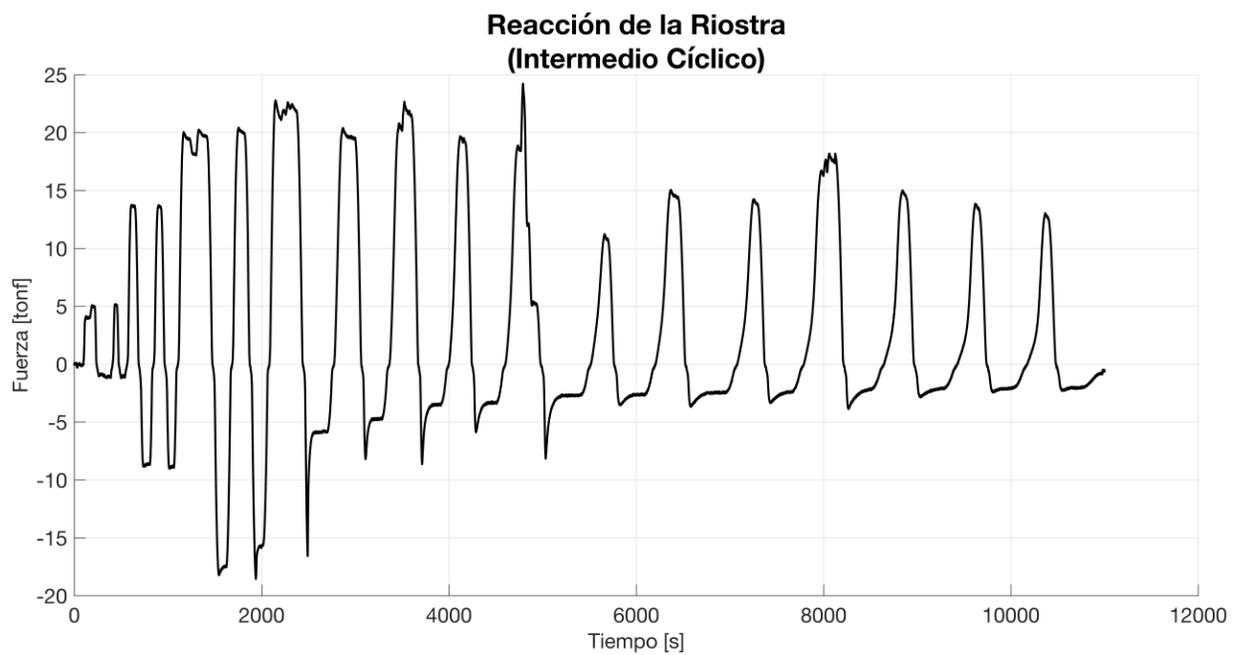


Figura Anexa 22: Registro de la celda de carga para el perfil XL intermedio cíclico.

III. Largo Monotónico:

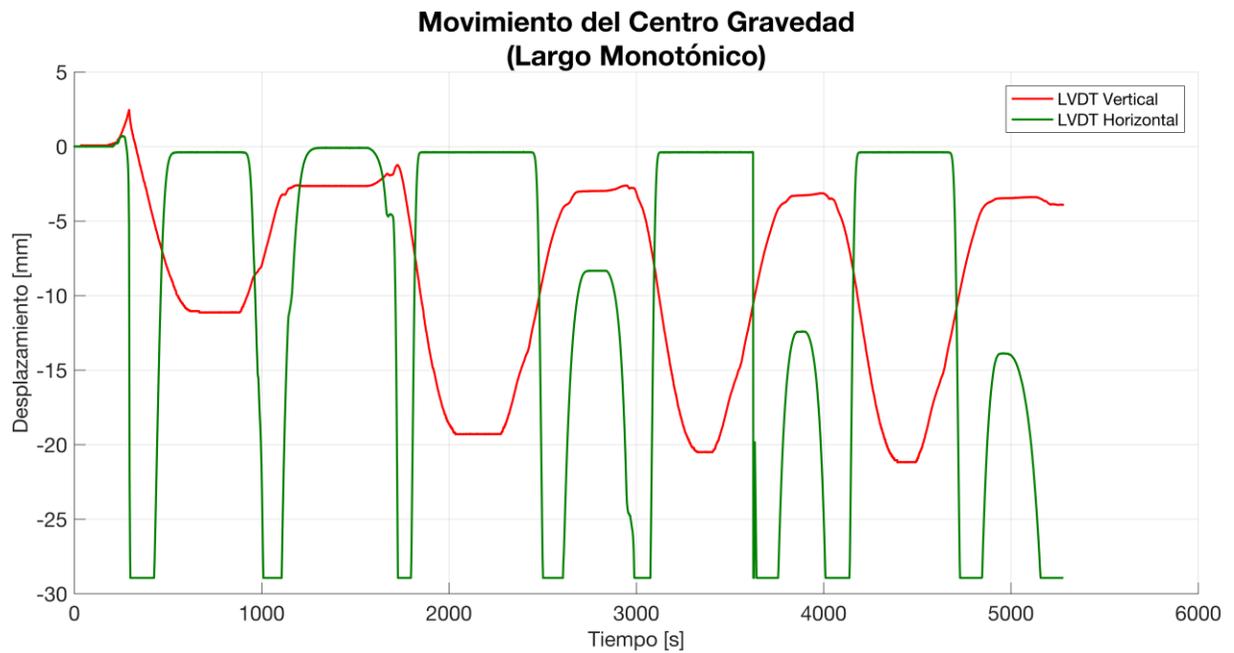


Figura Anexa 23: Registro de los LVDT's horizontal y vertical para el perfil XL largo monotónico.

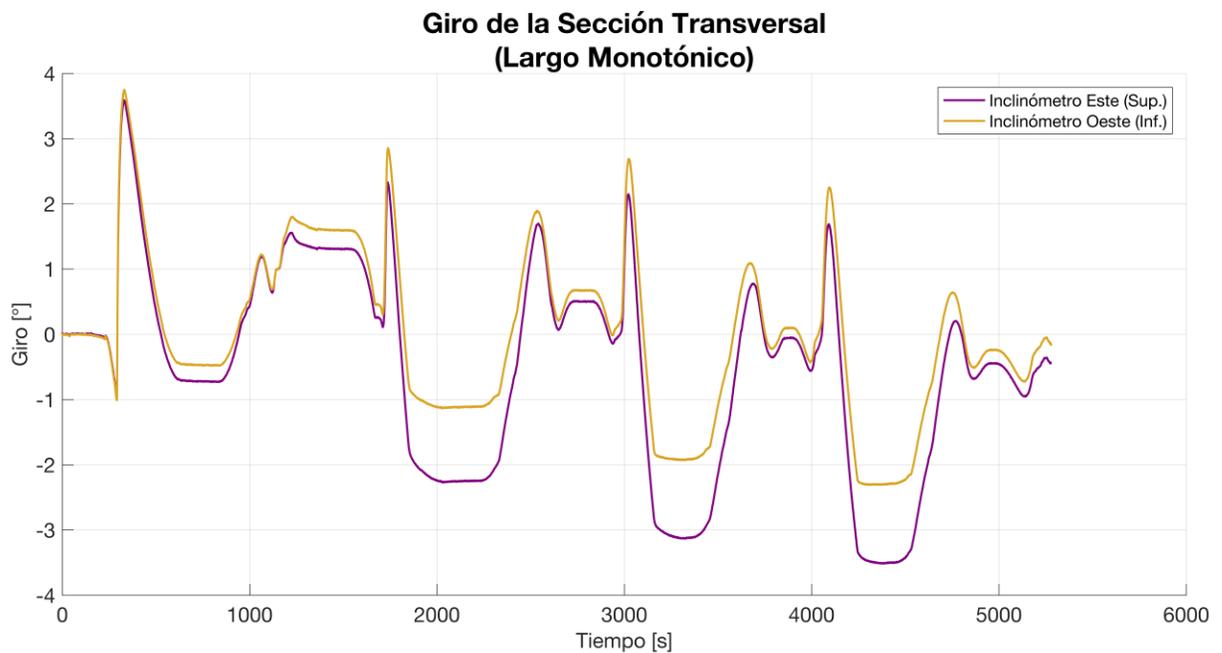


Figura Anexa 24: Registro de los inclinómetros para el perfil XL largo monotónico.

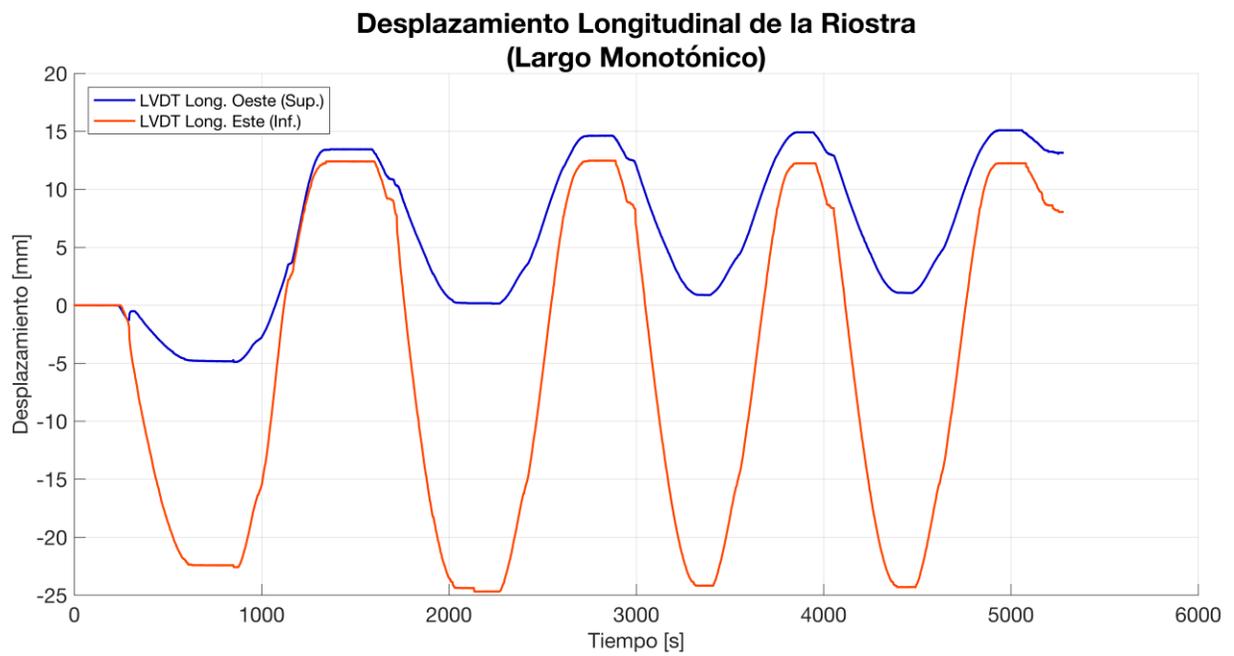


Figura Anexa 25: Registro de los LVDT's longitudinales para el perfil XL largo monotónico.

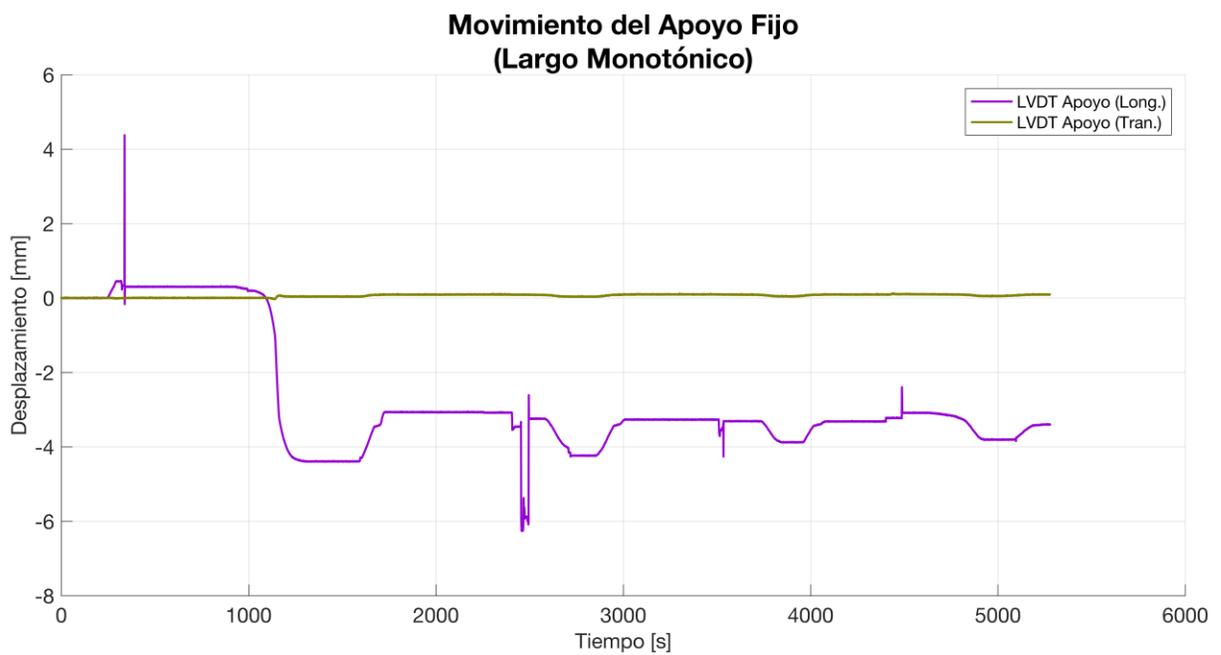


Figura Anexa 26: Registro de los LVDT's del apoyo simple para el perfil XL largo monotónico.

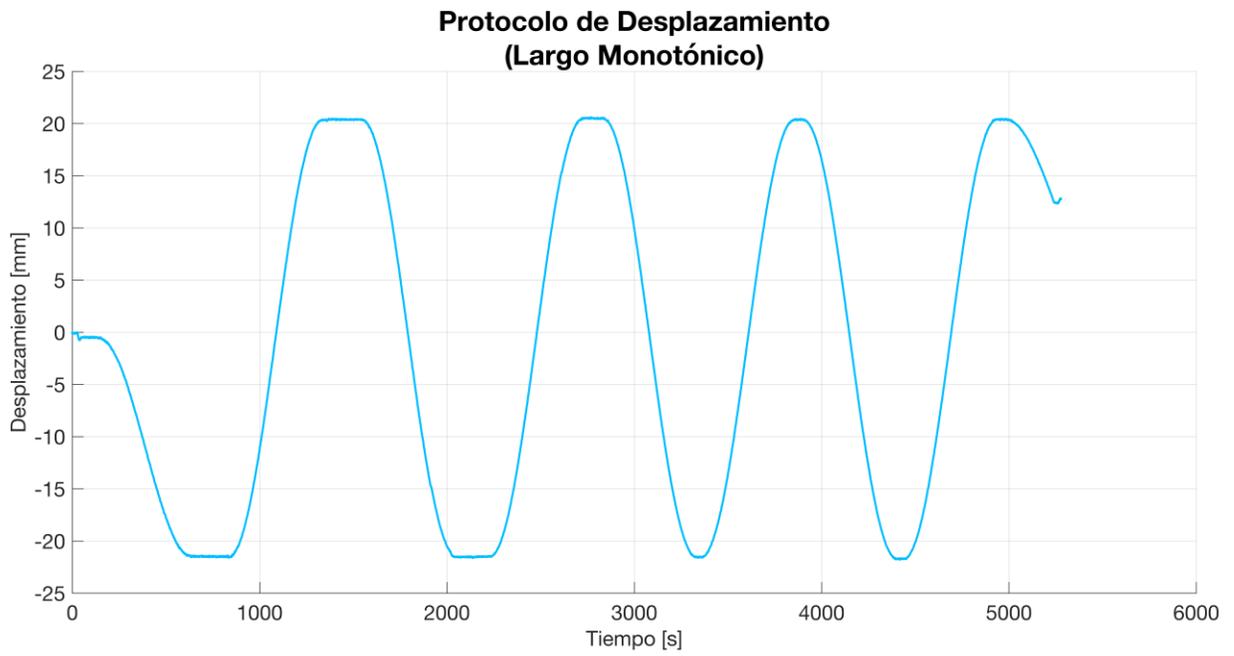


Figura Anexa 27: Registro del LVDT del actuador para el perfil XL largo monotónico.

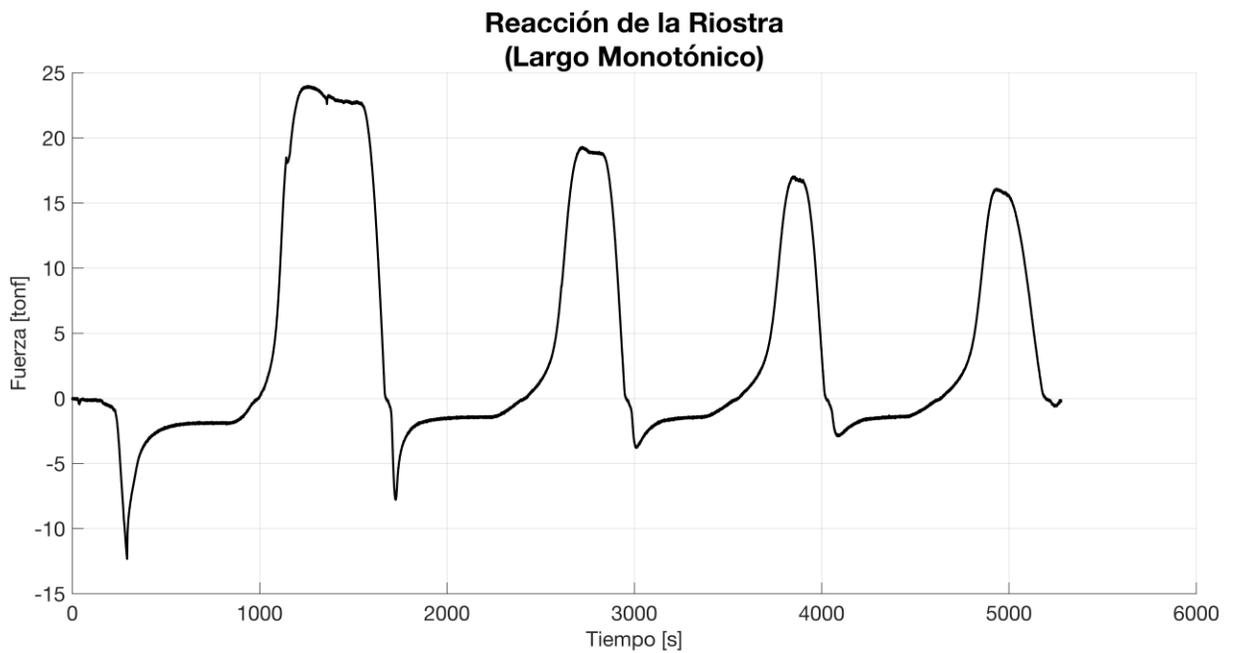


Figura Anexa 28: Registro de la celda de carga para el perfil XL largo monotónico.

IV. Largo Cíclico:

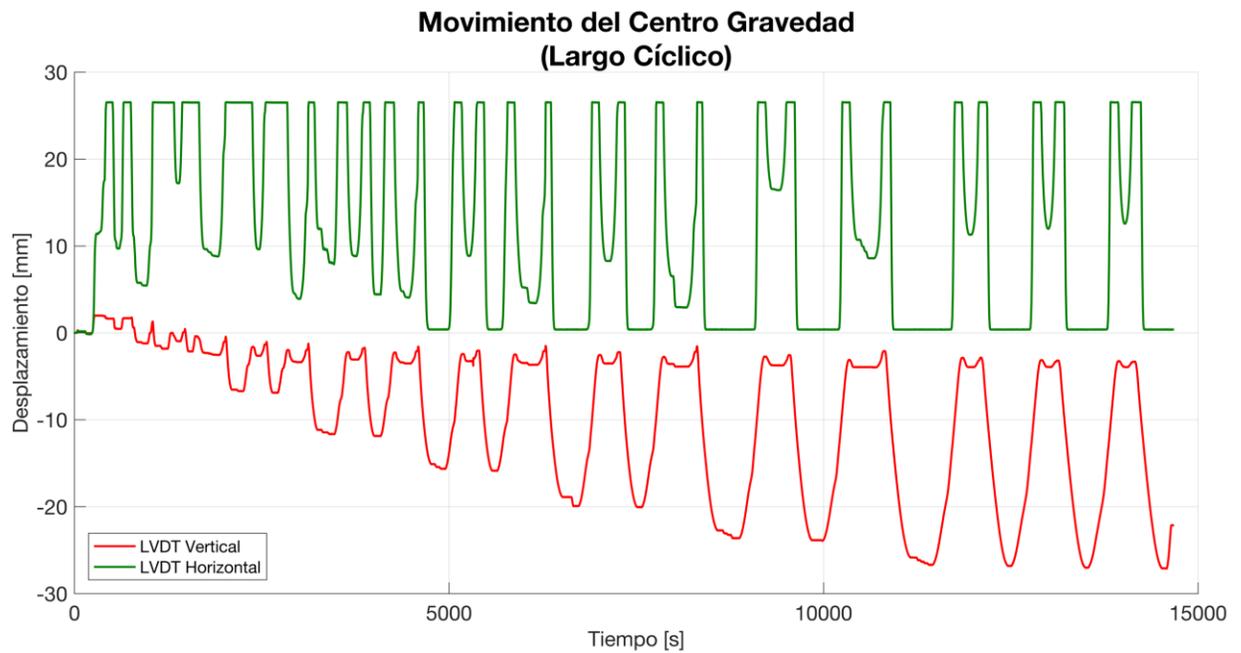


Figura Anexa 29: Registro de los LVDT's horizontal y vertical para el perfil XL largo cíclico.

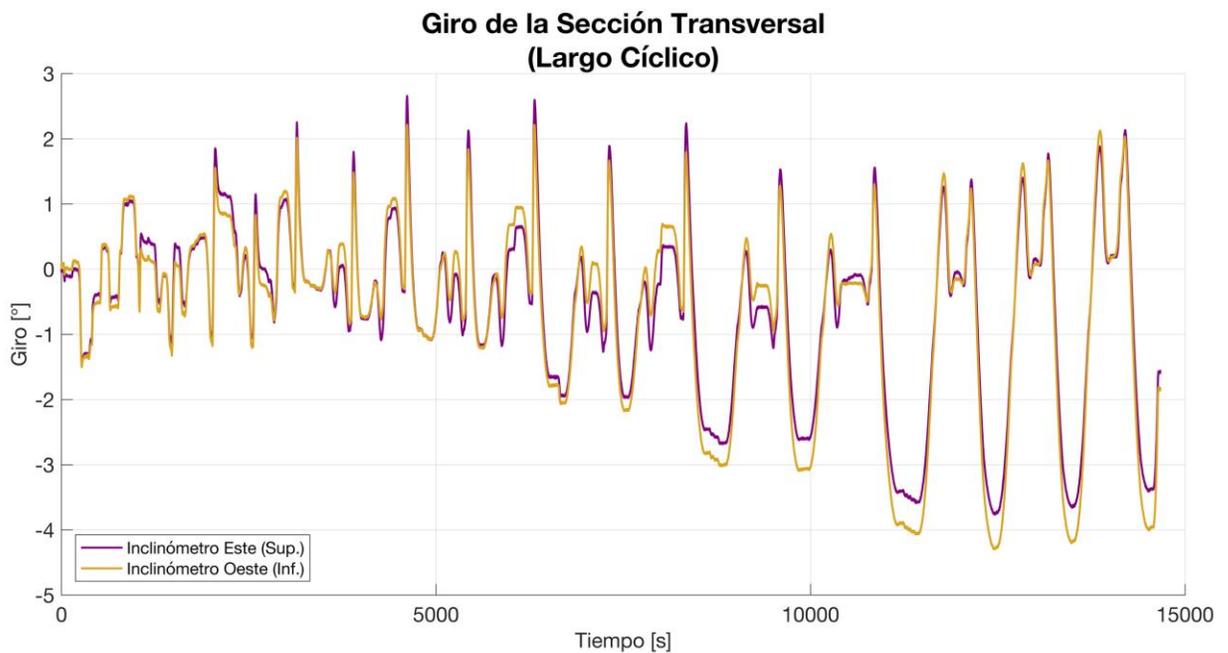


Figura Anexa 30: Registro de los inclinómetros para el perfil XL largo cíclico.

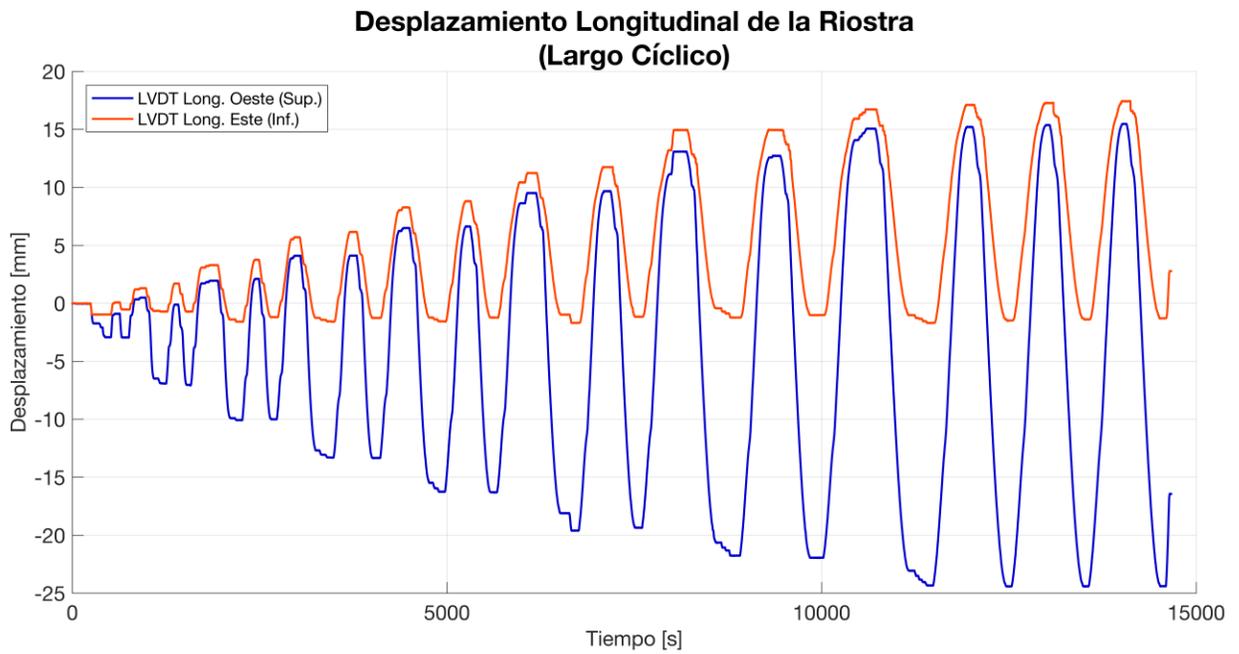


Figura Anexa 31: Registro de los LVDT's longitudinales para el perfil XL largo cíclico.

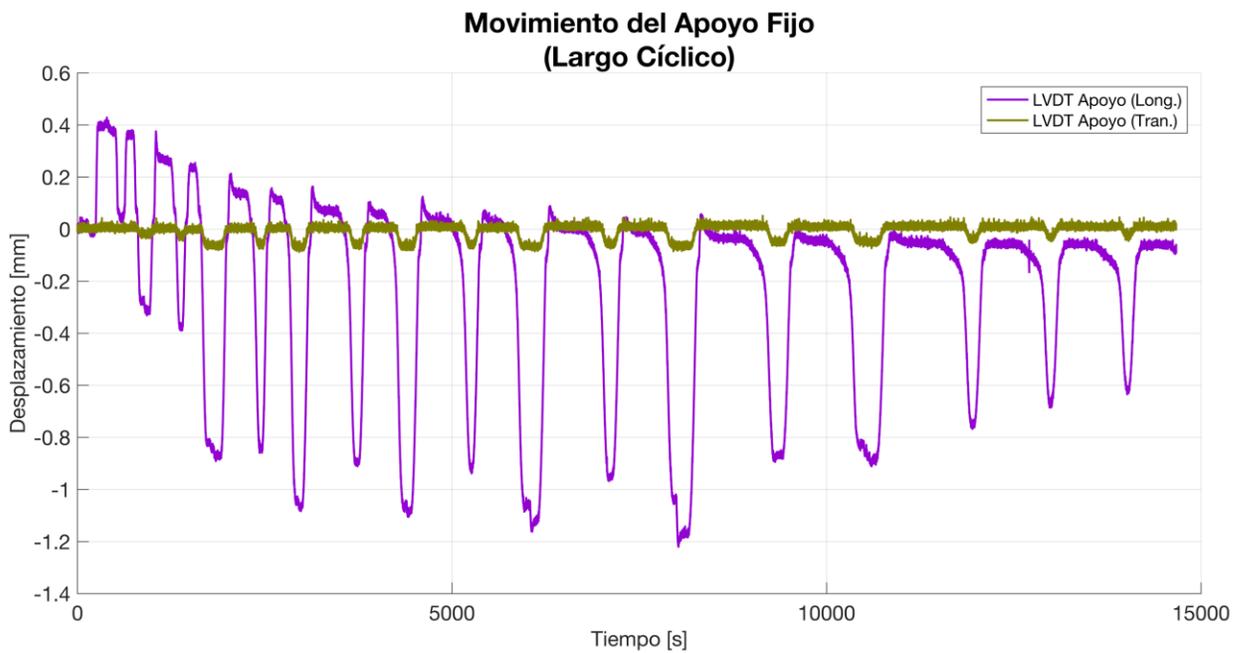


Figura Anexa 32: Registro de los LVDT's del apoyo simple para el perfil XL largo cíclico.

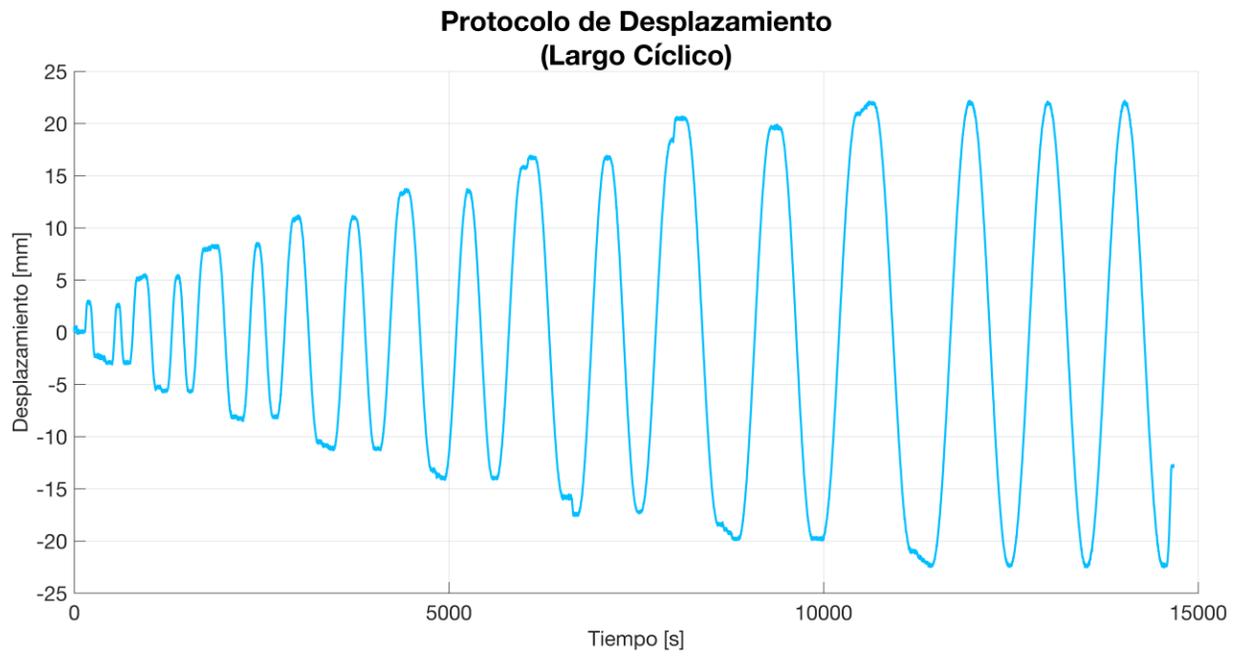


Figura Anexa 33: Registro del LVDT del actuador para el perfil XL largo cíclico.

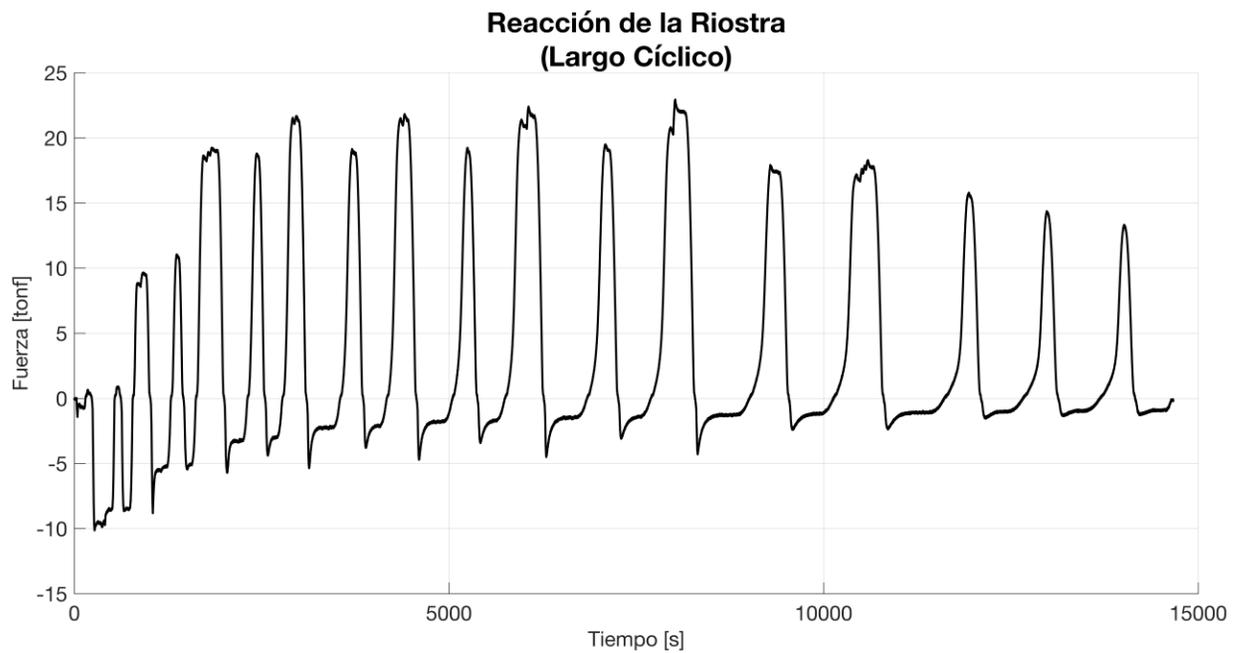


Figura Anexa 34: Registro de la celda de carga para el perfil XL largo cíclico.

V. Corto Monotónico:

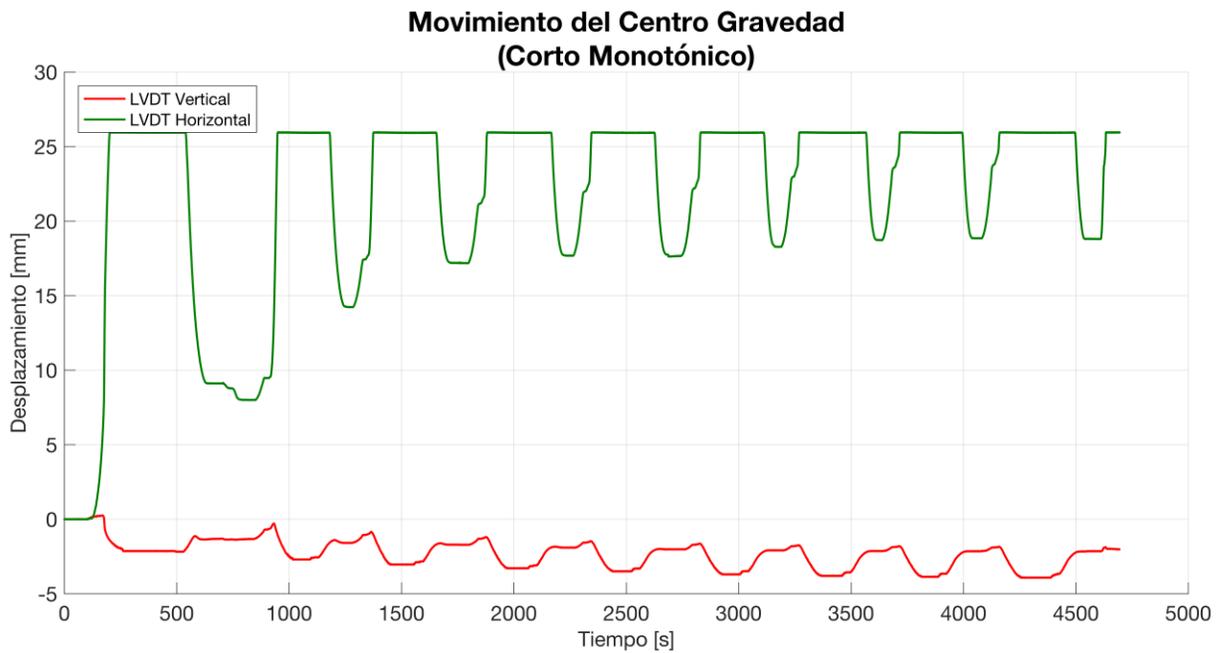


Figura Anexa 35: Registro de los LVDT's horizontal y vertical para el perfil XL corto monotónico.

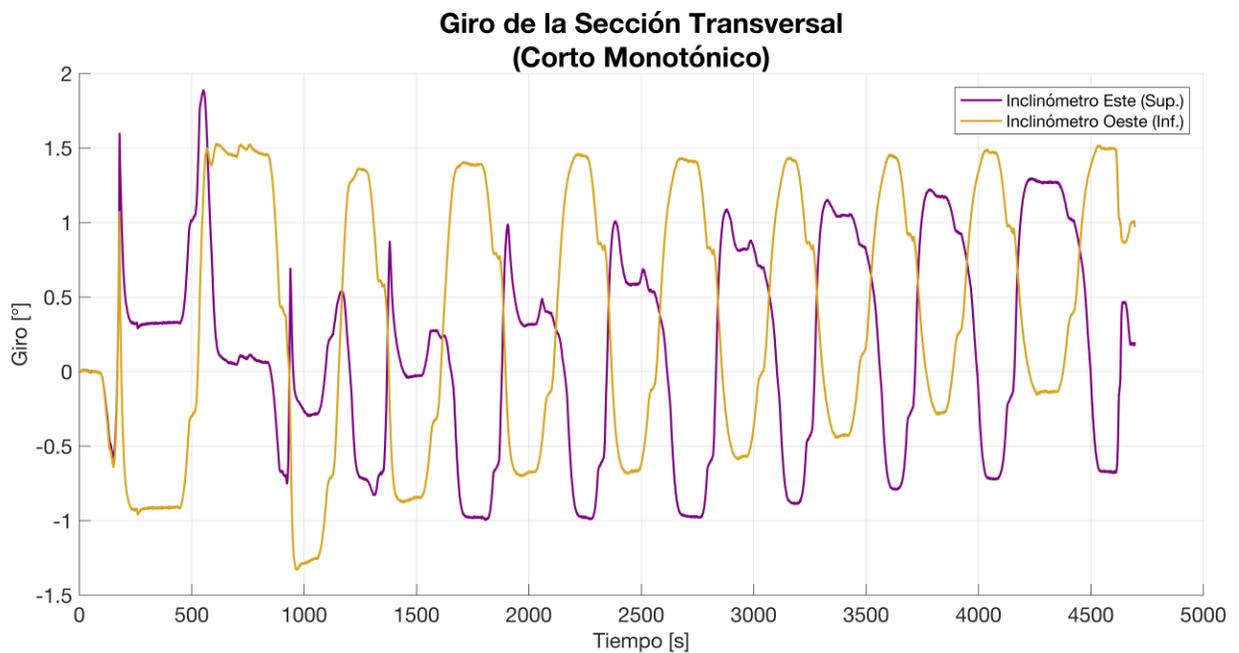


Figura Anexa 36: Registro de los inclinómetros para el perfil XL corto monotónico.

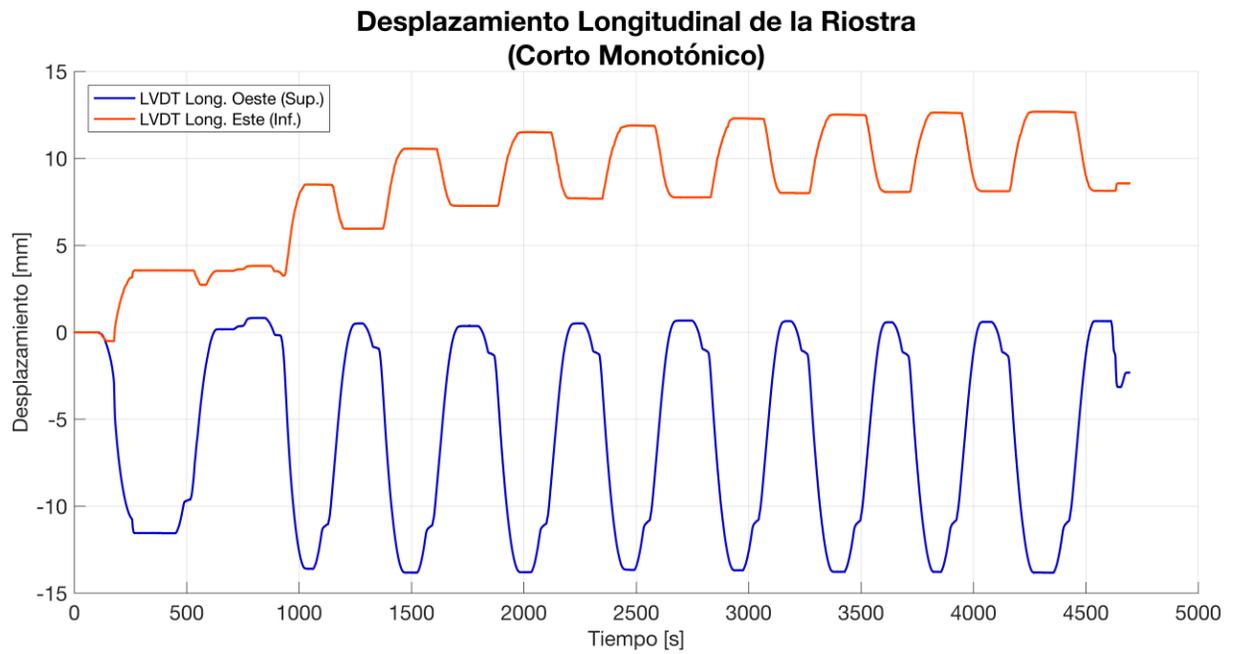


Figura Anexa 37: Registro de los LVDT's longitudinales para el perfil XL corto monotónico.

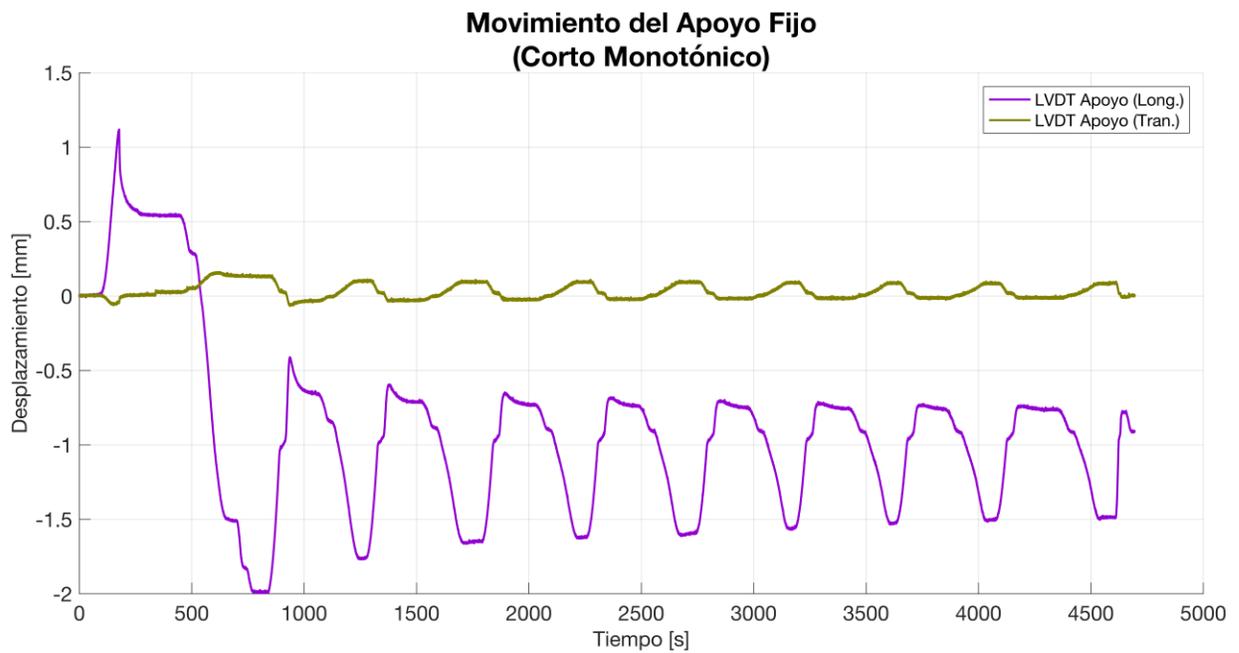


Figura Anexa 38: Registro de los LVDT's del apoyo simple para el perfil XL corto monotónico.

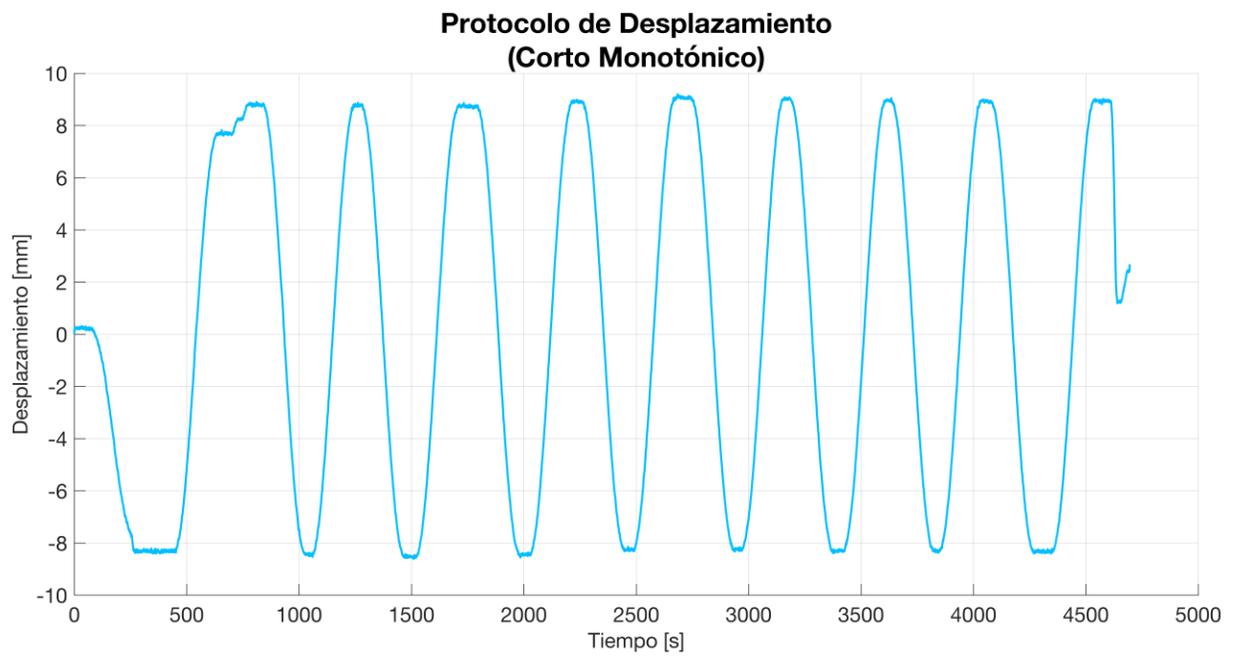


Figura Anexa 39: Registro del LVDT del actuador para el perfil XL corto monotónico.

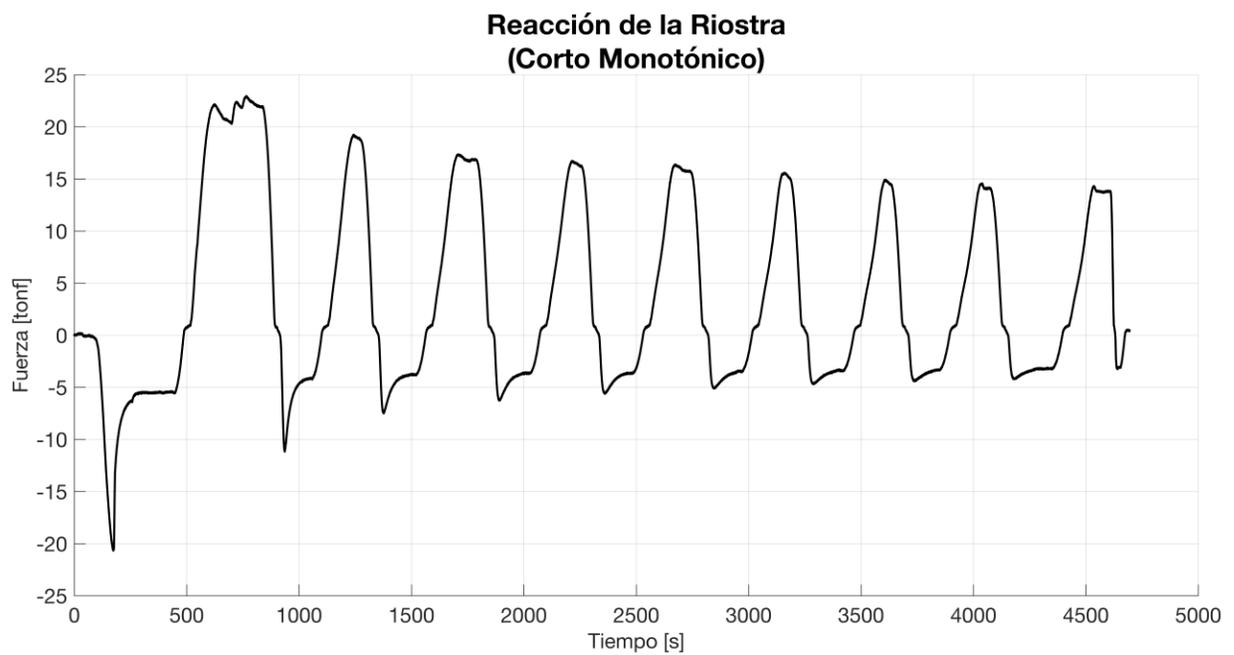


Figura Anexa 40: Registro de la celda de carga para el perfil XL corto monotónico.

VI. Corto Cíclico:

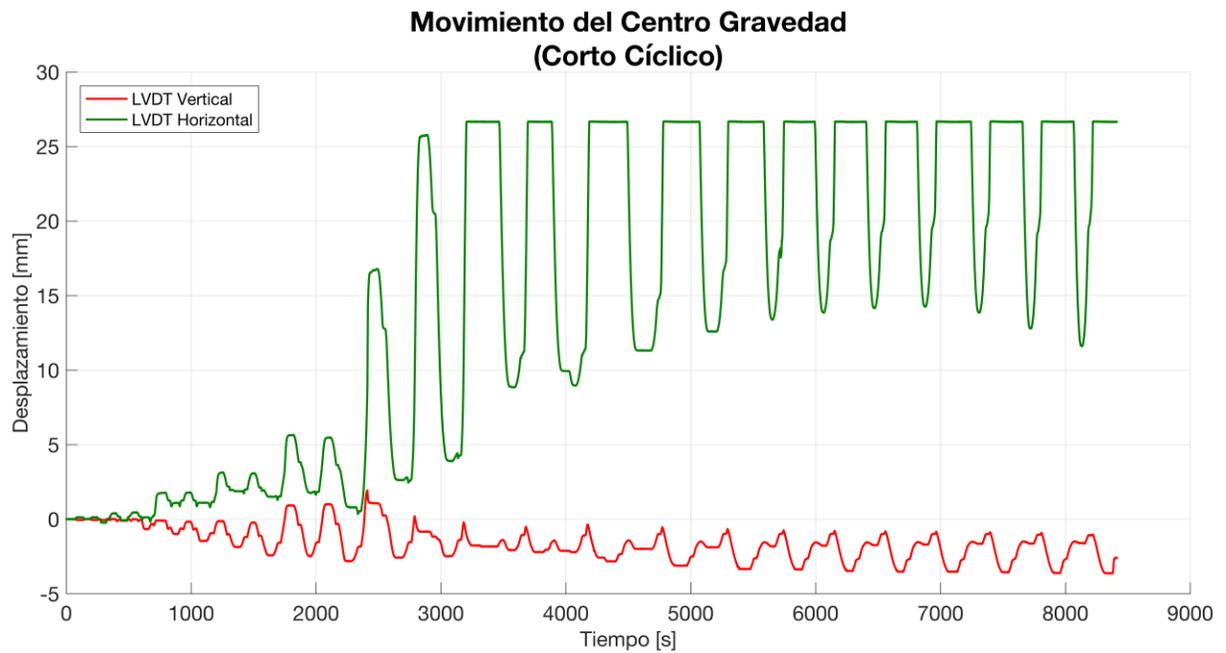


Figura Anexa 41: Registro de los LVDT's horizontal y vertical para el perfil XL corto cíclico.

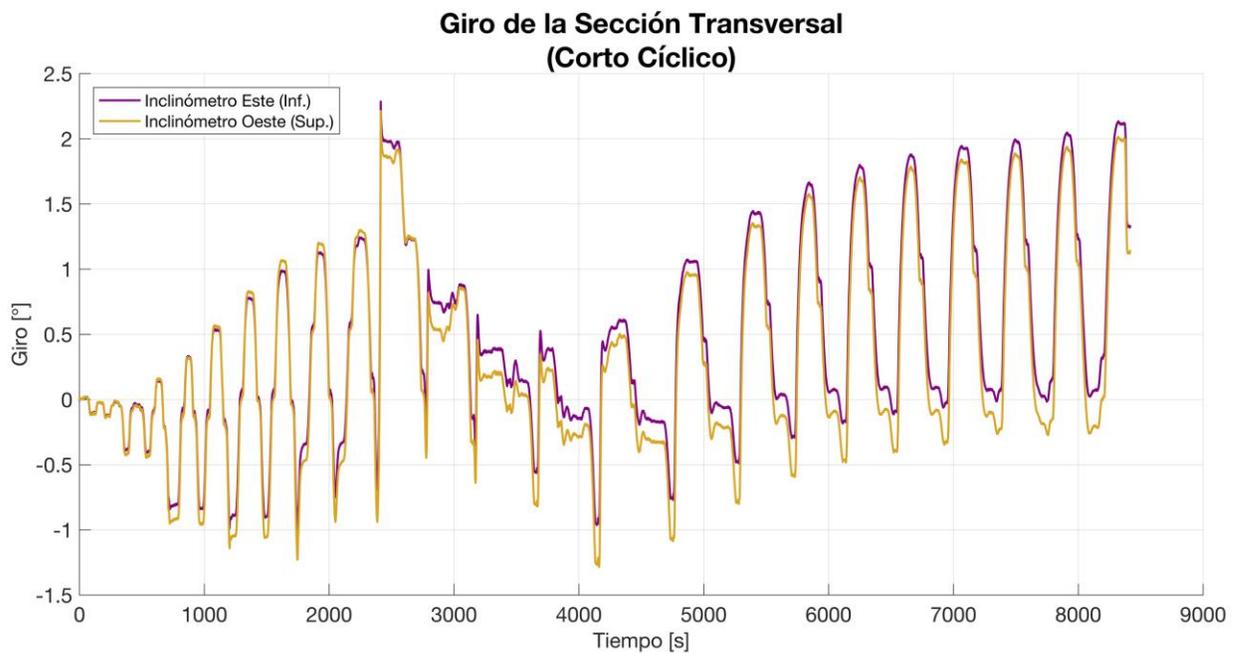


Figura Anexa 42: Registro de inclinómetros para el perfil XL corto cíclico.

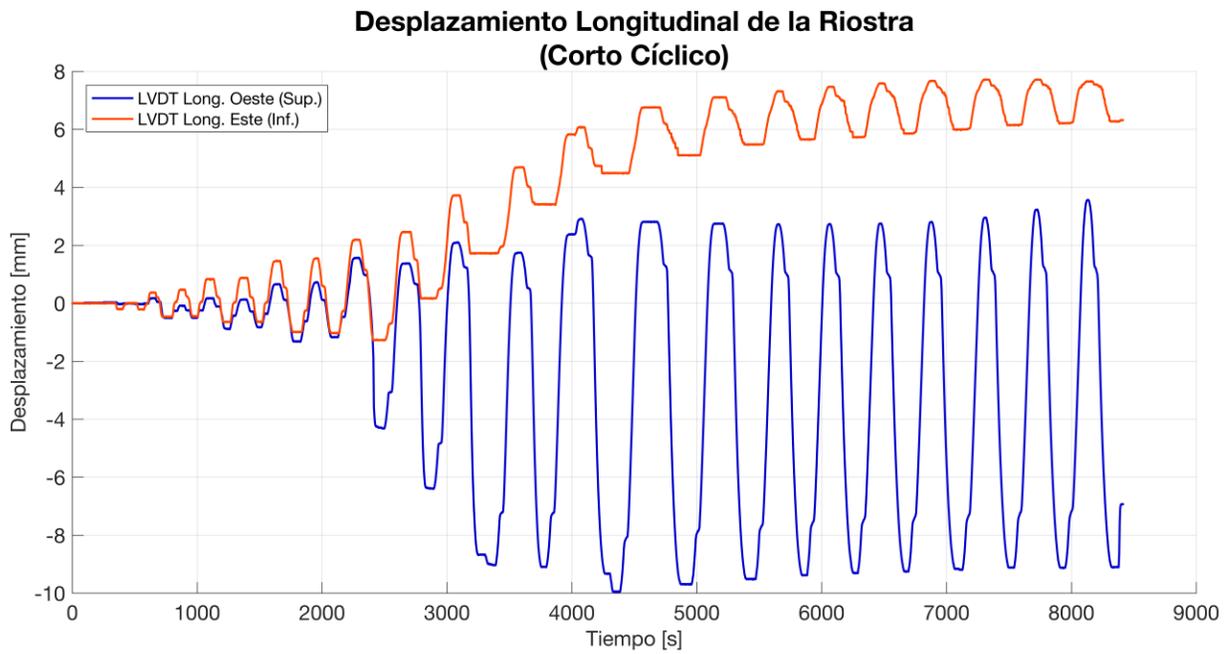


Figura Anexa 43: Registro de los LVDT's longitudinales para el perfil XL corto cíclico.

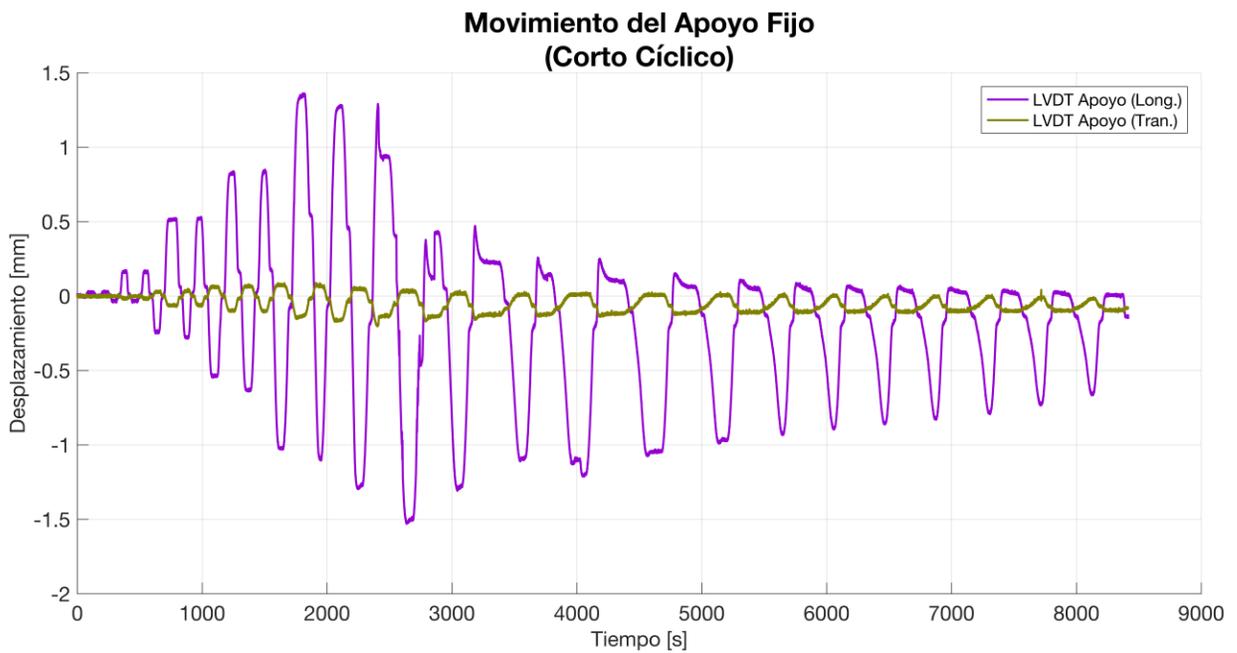


Figura Anexa 44: Registro de los LVDT's del apoyo simple para el perfil XL corto cíclico.

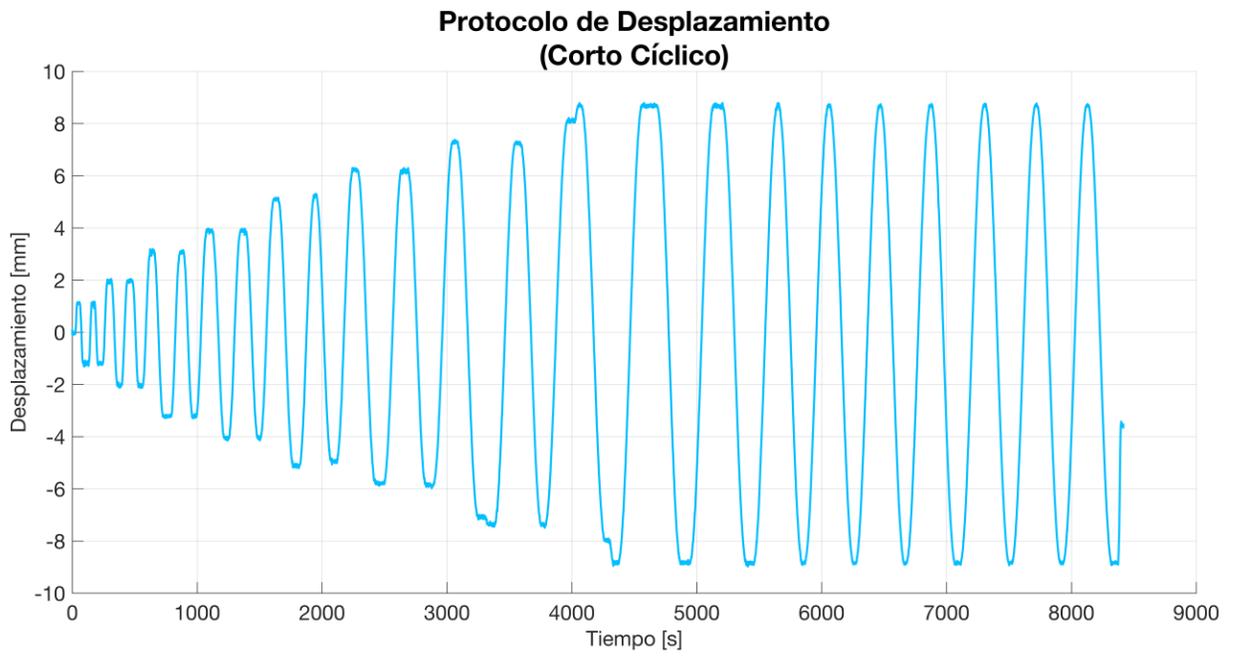


Figura Anexa 45: Registro del LVDT del actuador para el perfil XL corto cíclico.

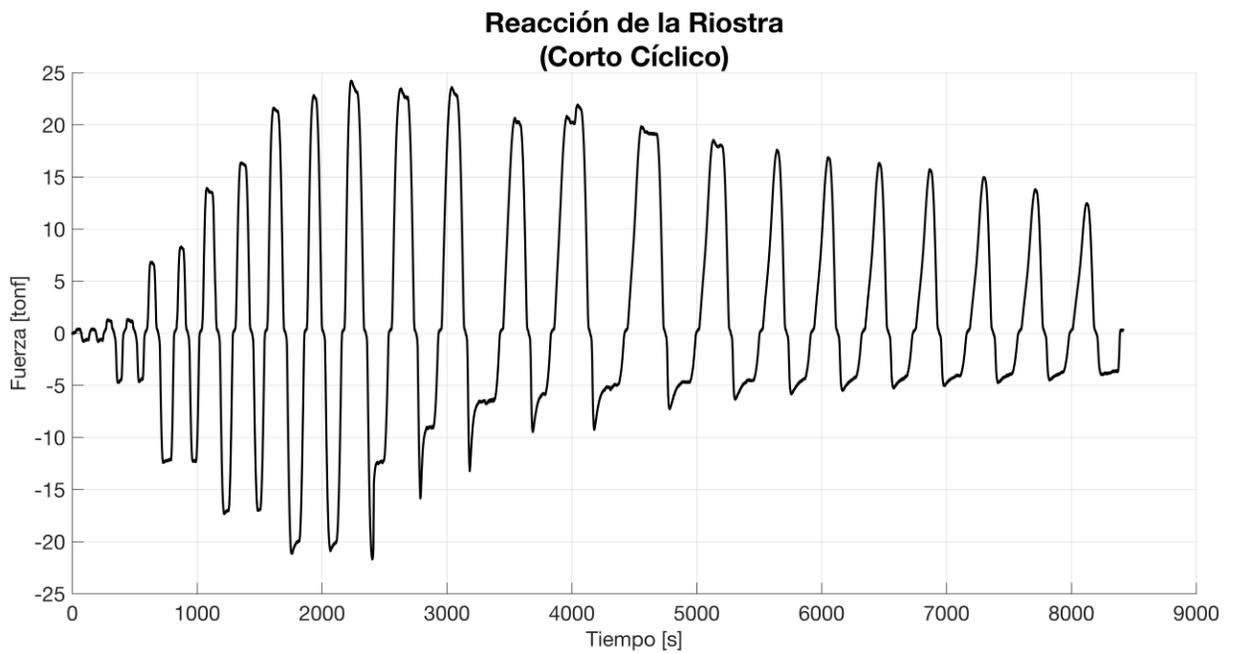


Figura Anexa 46: Registro de la celda de carga para el perfil XL corto cíclico.

C. Gráficos extra de resultados:

I. Intermedio Monotónico:

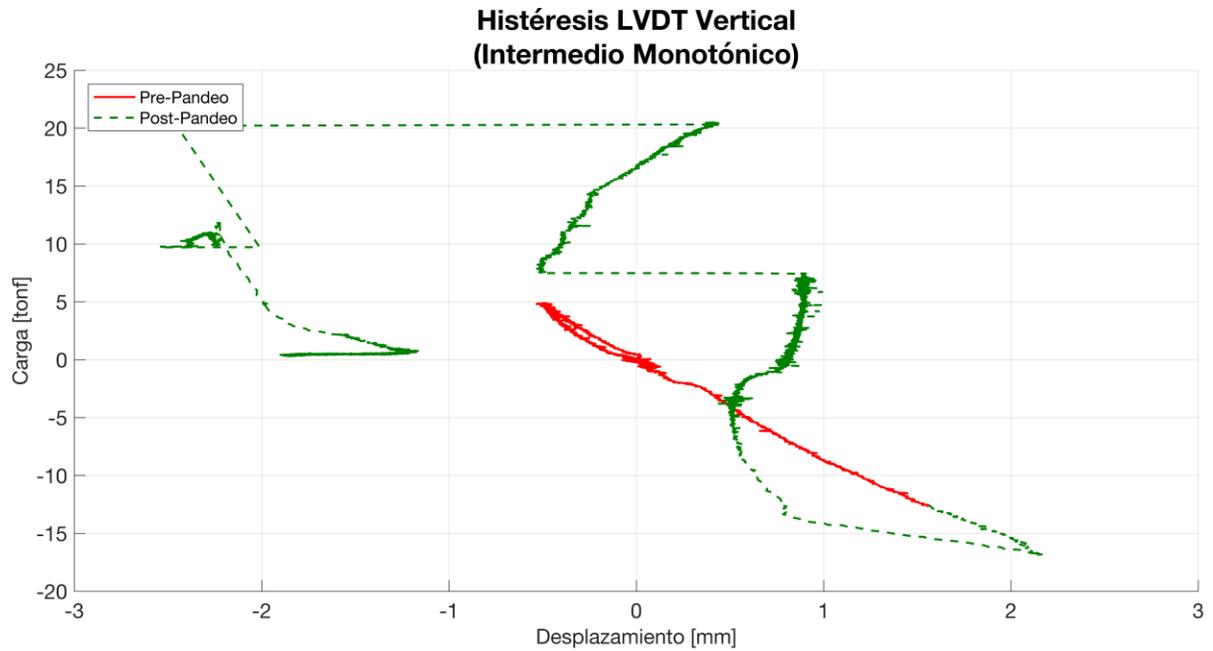


Figura Anexa 47: Histéresis del LVDT vertical para el perfil XL intermedio monotónico.

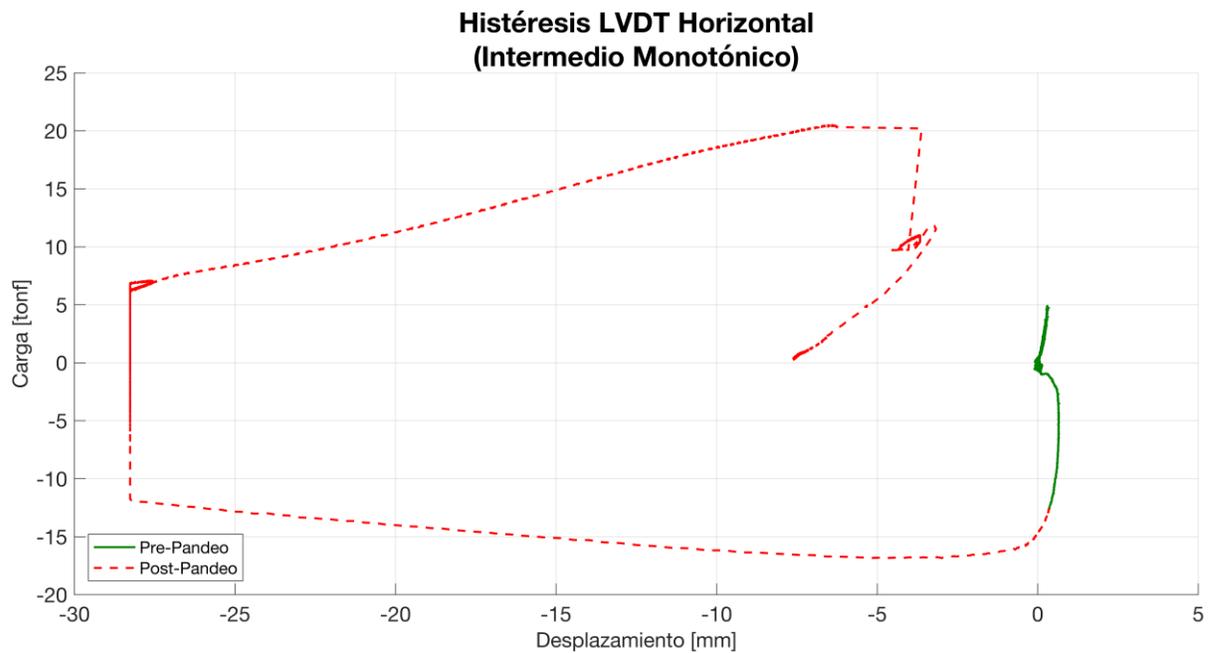


Figura Anexa 48: Histéresis del LVDT horizontal para el perfil XL intermedio monotónico.

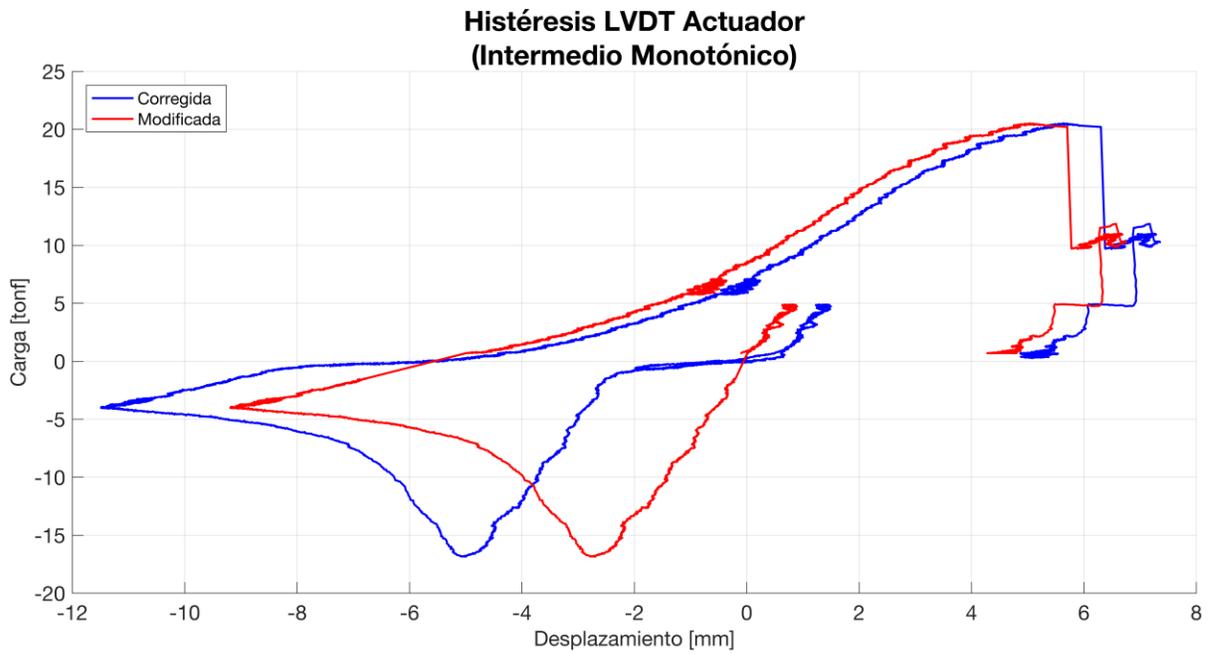


Figura Anexa 49: Modificación de la histéresis del LVDT del actuador para el perfil XL intermedio monotónico.

II. Intermedio Cíclico:

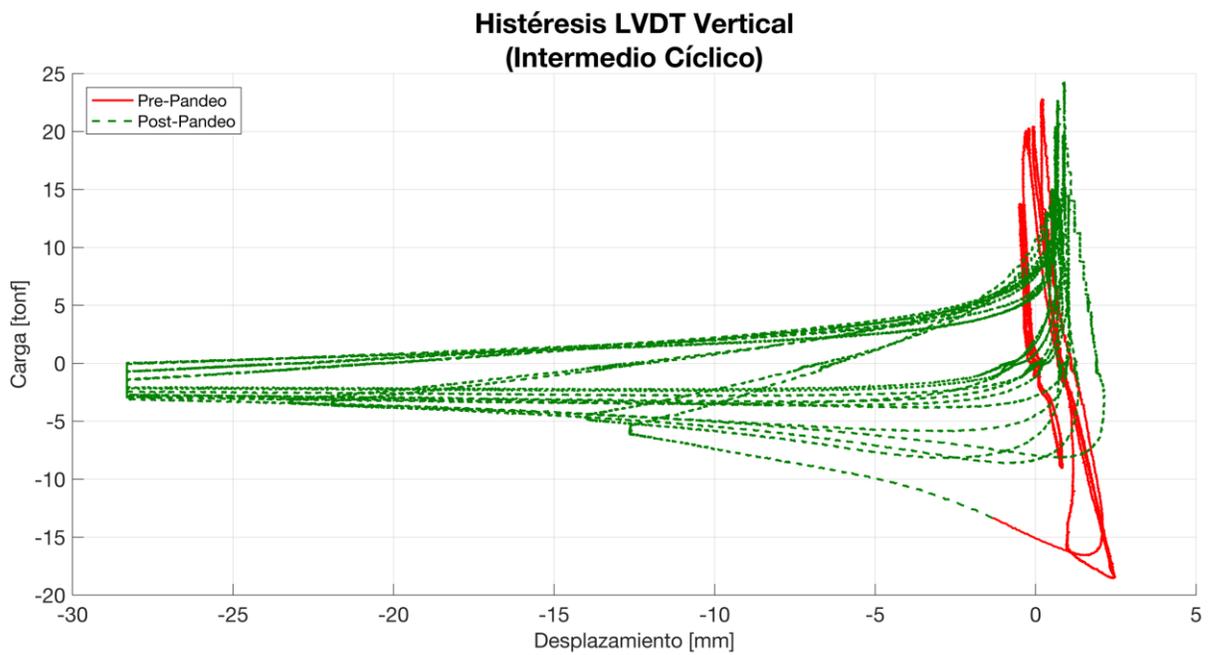


Figura Anexa 50: Histéresis del LVDT vertical para el perfil XL intermedio cíclico.

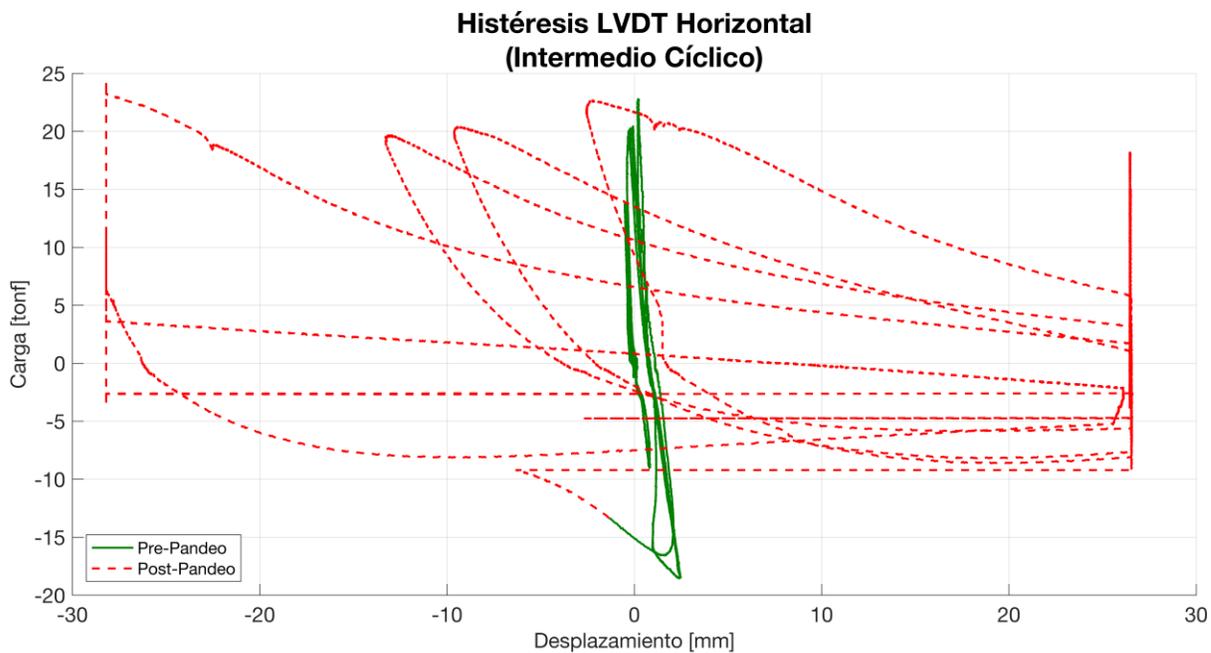


Figura Anexo 51: Histéresis del LVDT horizontal para el perfil XL intermedio cíclico.

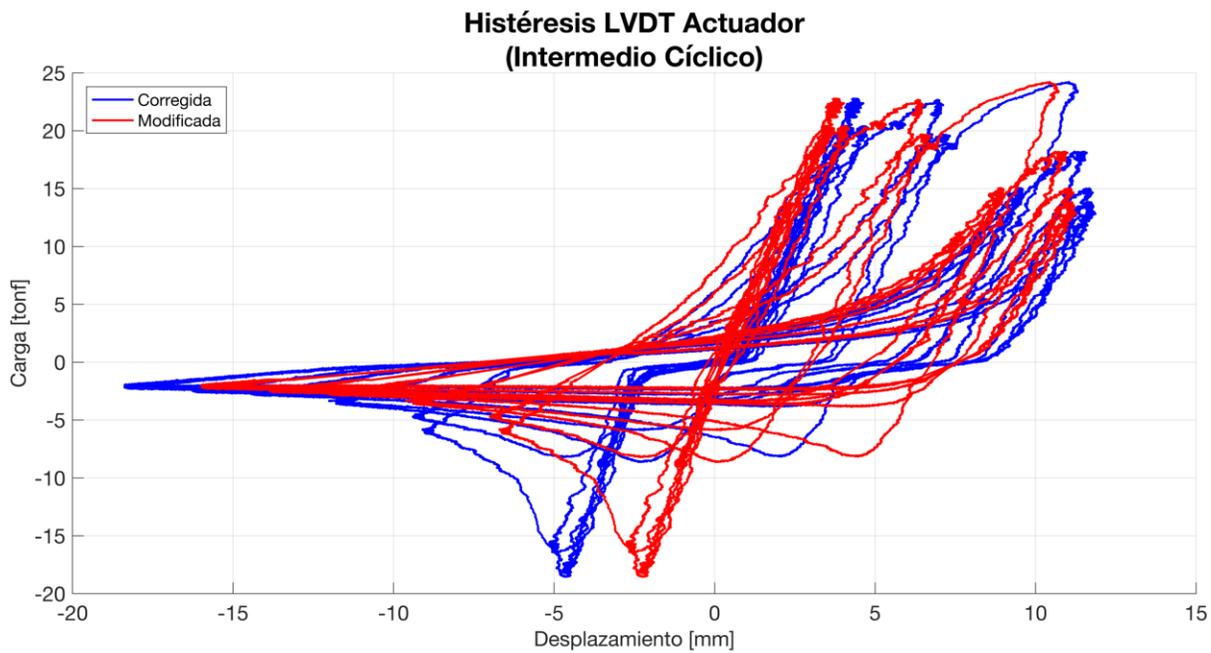


Figura Anexo 52: Modificación de la histéresis del LVDT del actuador para el perfil XL intermedio cíclico.

III. Largo Monotónico:

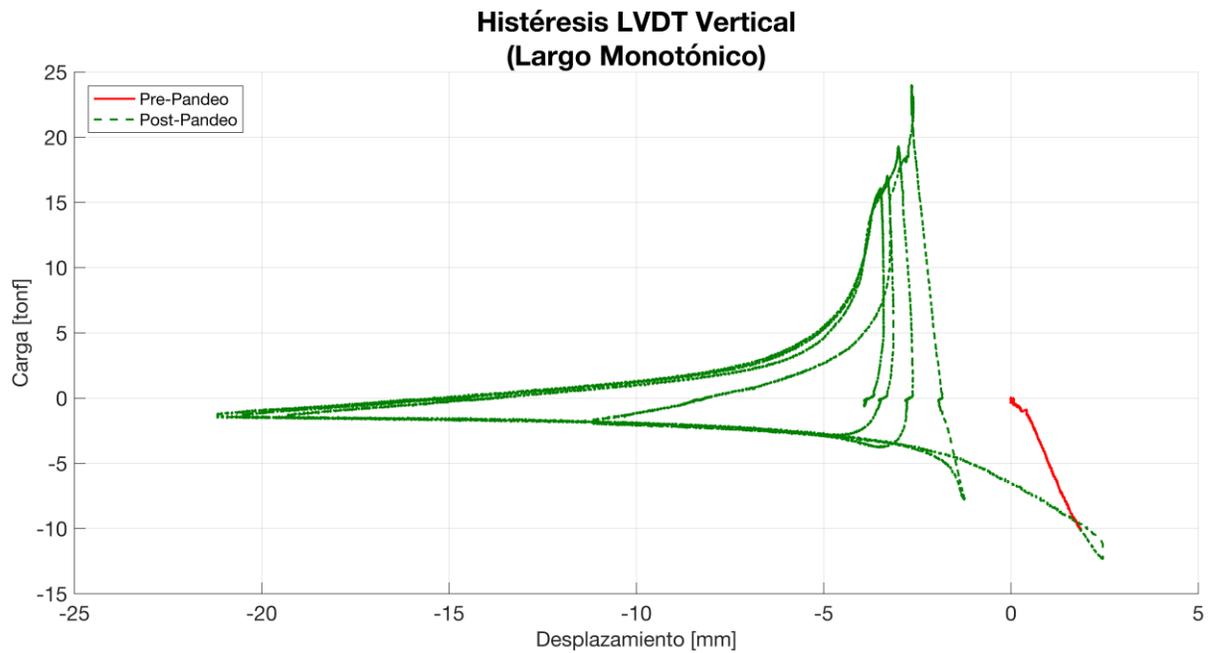


Figura Anexa 53: Histéresis del LVDT vertical para el perfil XL largo monotónico.

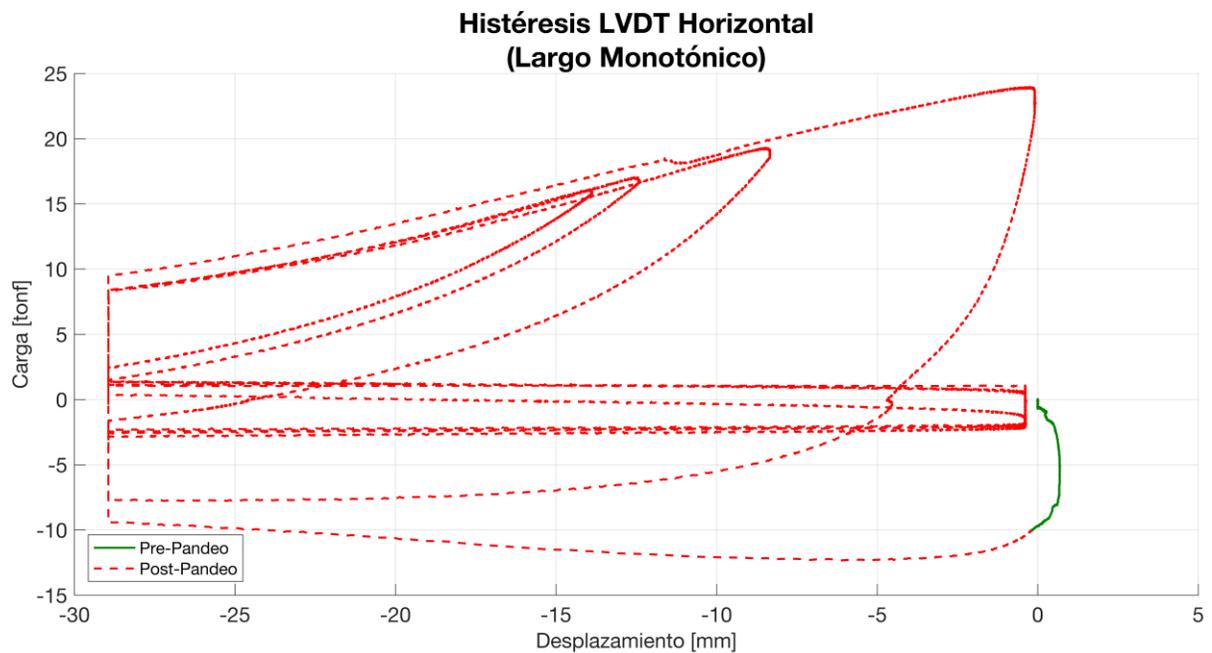


Figura Anexa 54: Histéresis del LVDT horizontal para el perfil XL largo monotónico.

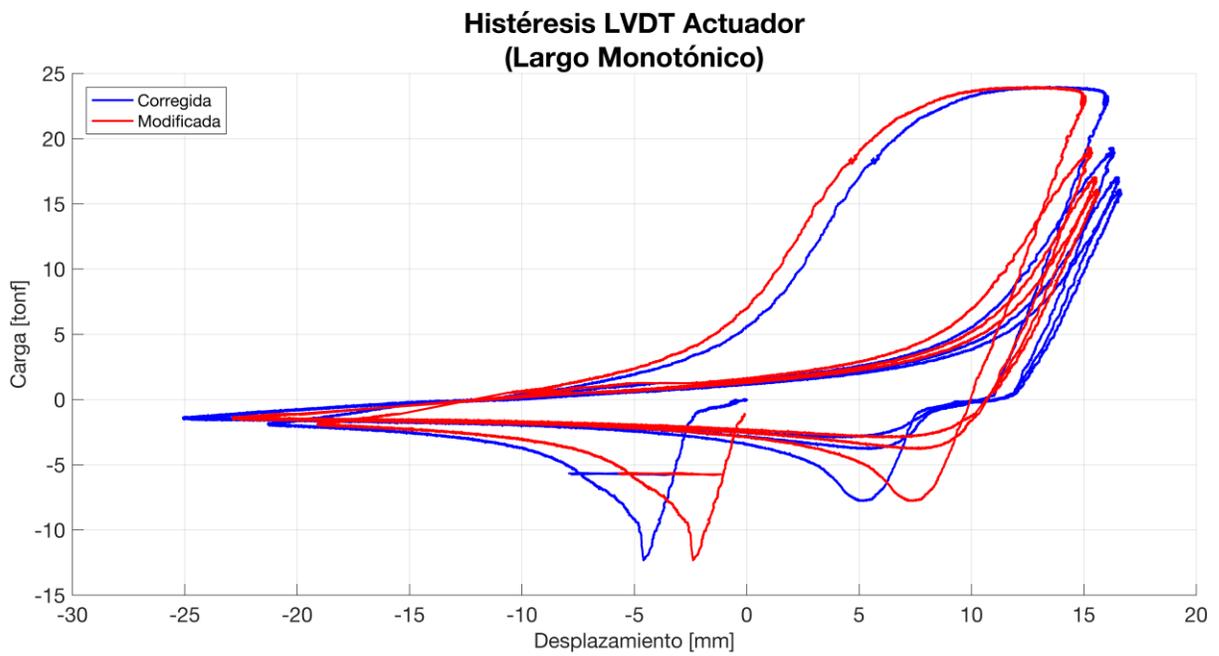


Figura Anexa 55: Modificación de la histéresis del LVDT del actuador para el perfil XL largo monotónico.

IV. Largo Cíclico:

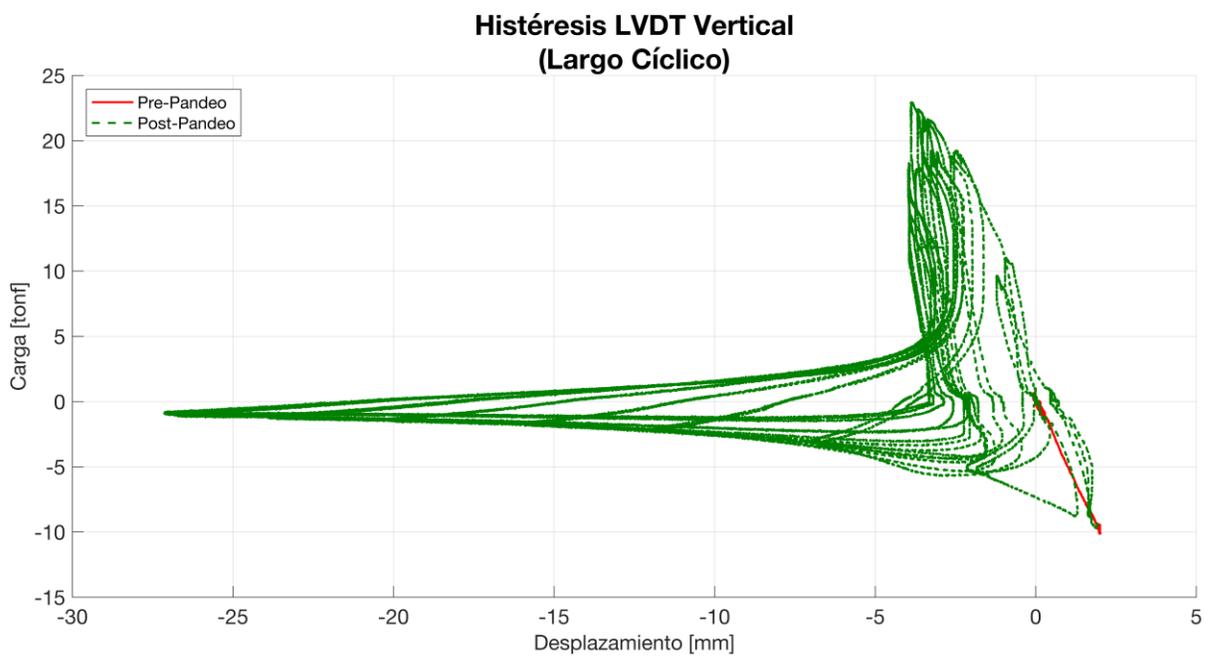


Figura Anexa 56: Histéresis del LVDT vertical para el perfil XL largo cíclico.

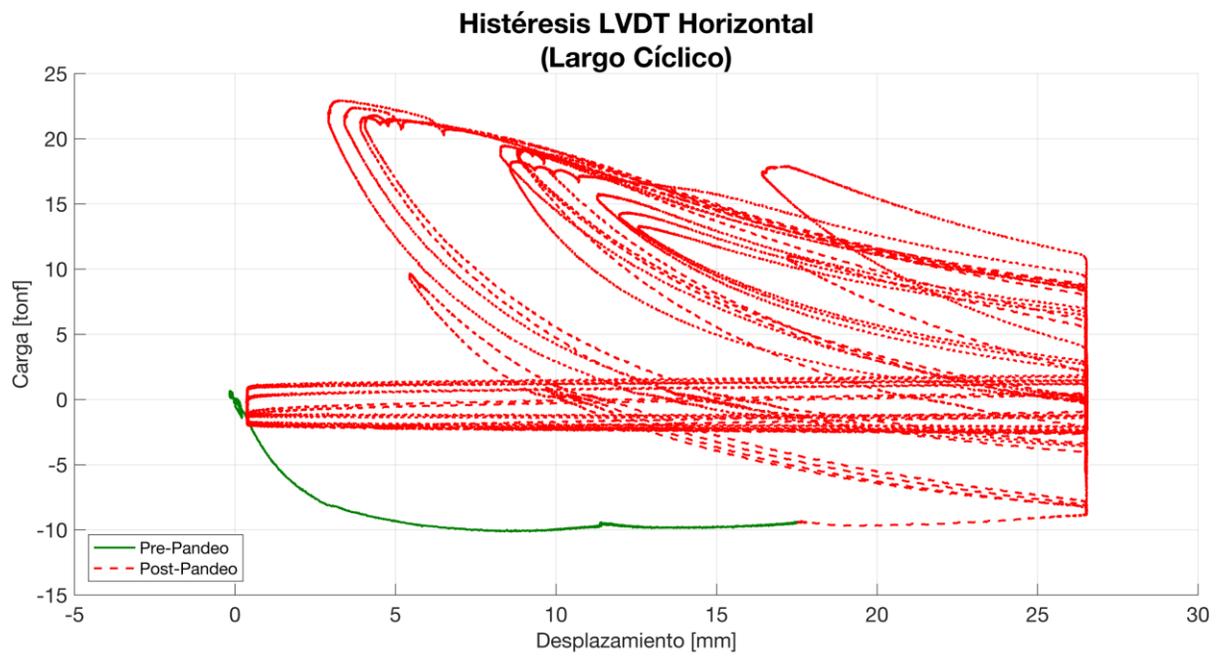


Figura Anexa 57: Histéresis del LVDT horizontal para el perfil XL largo cíclico.

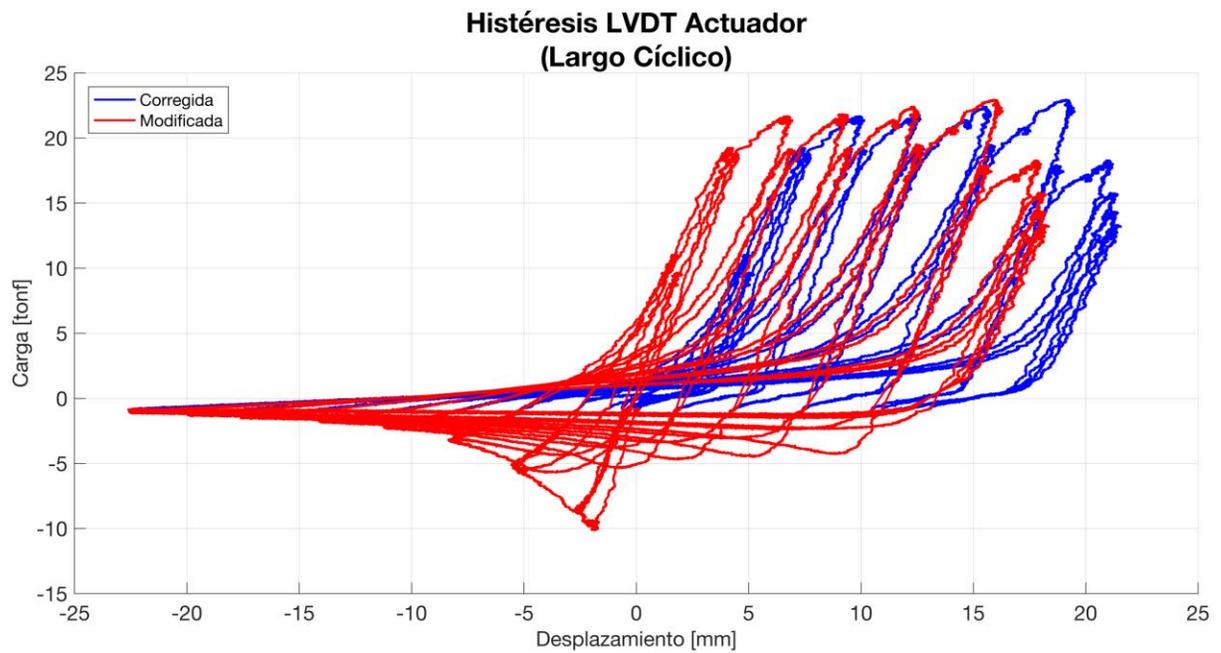


Figura Anexa 58: Modificación de la histéresis del LVDT del actuador para el perfil XL largo cíclico.

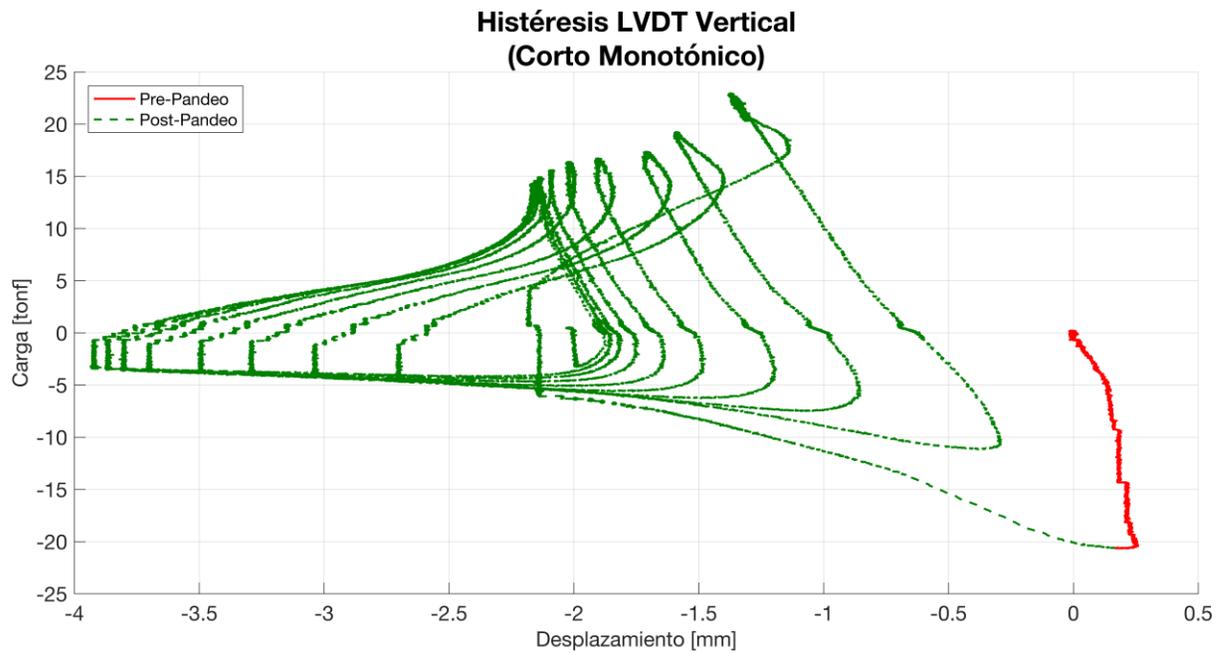
V. Corto Monotónico:

Figura Anexa 59: Histéresis del LVDT vertical para el perfil XL corto monotónico.

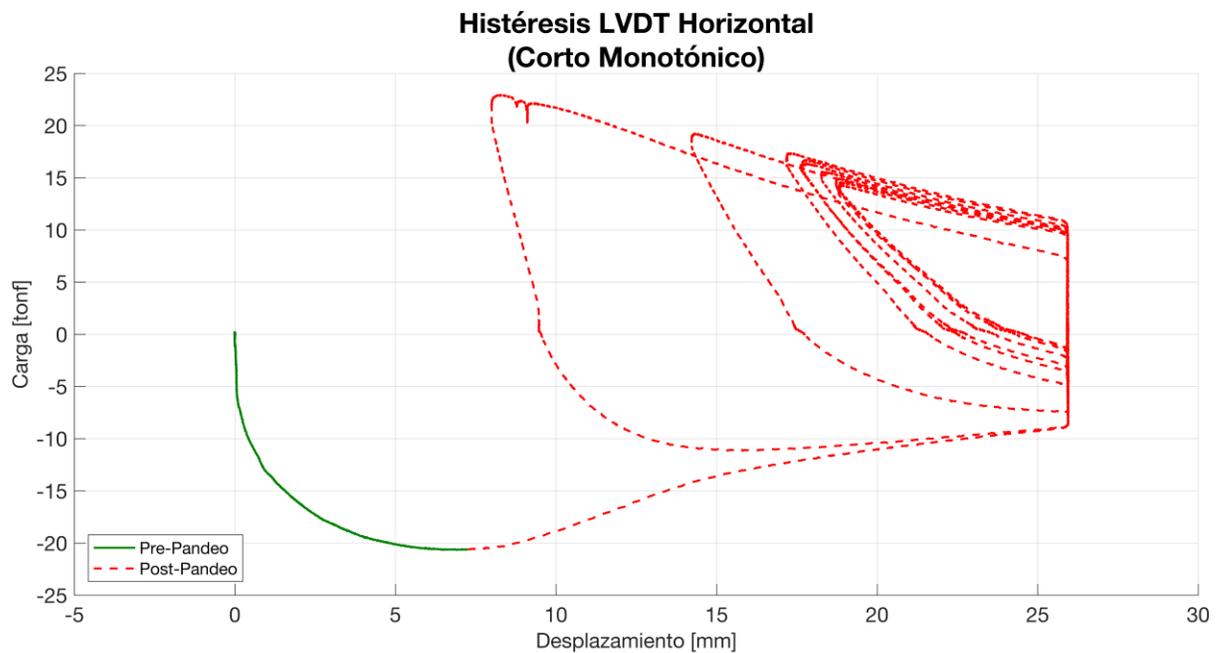


Figura Anexa 60: Histéresis del LVDT horizontal para el perfil XL corto monotónico.

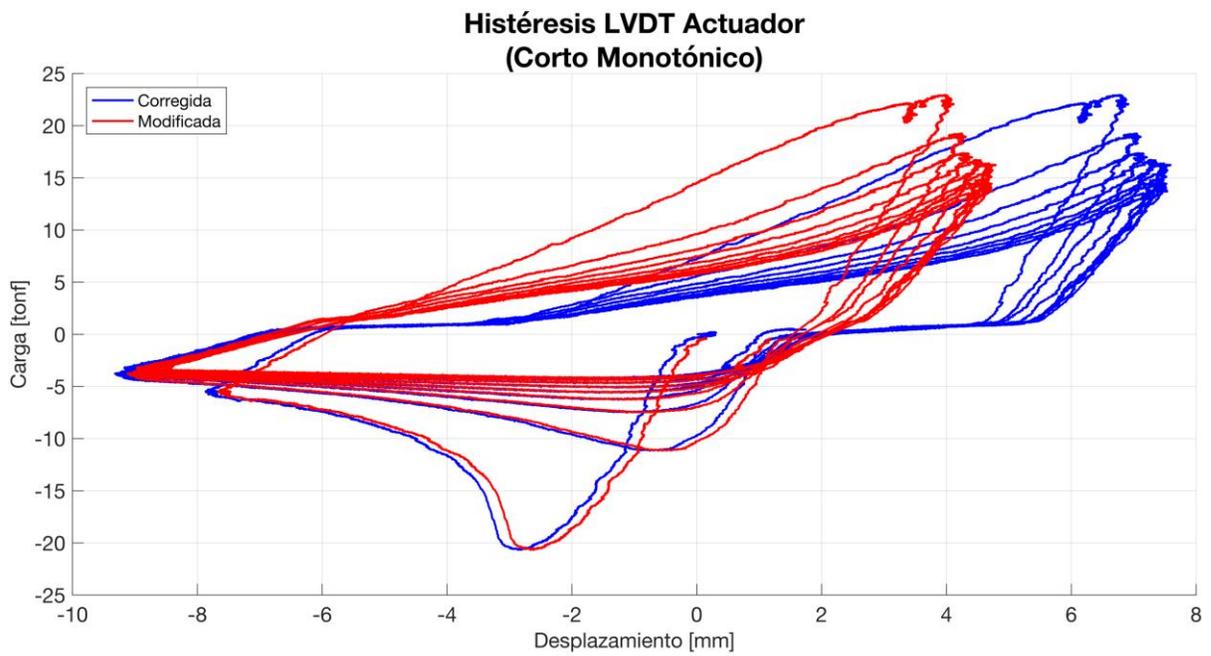


Figura Anexa 61: Modificación de la histéresis del LVDT del actuador para el perfil XL corto monotónico.

VI. Corto Cíclico:

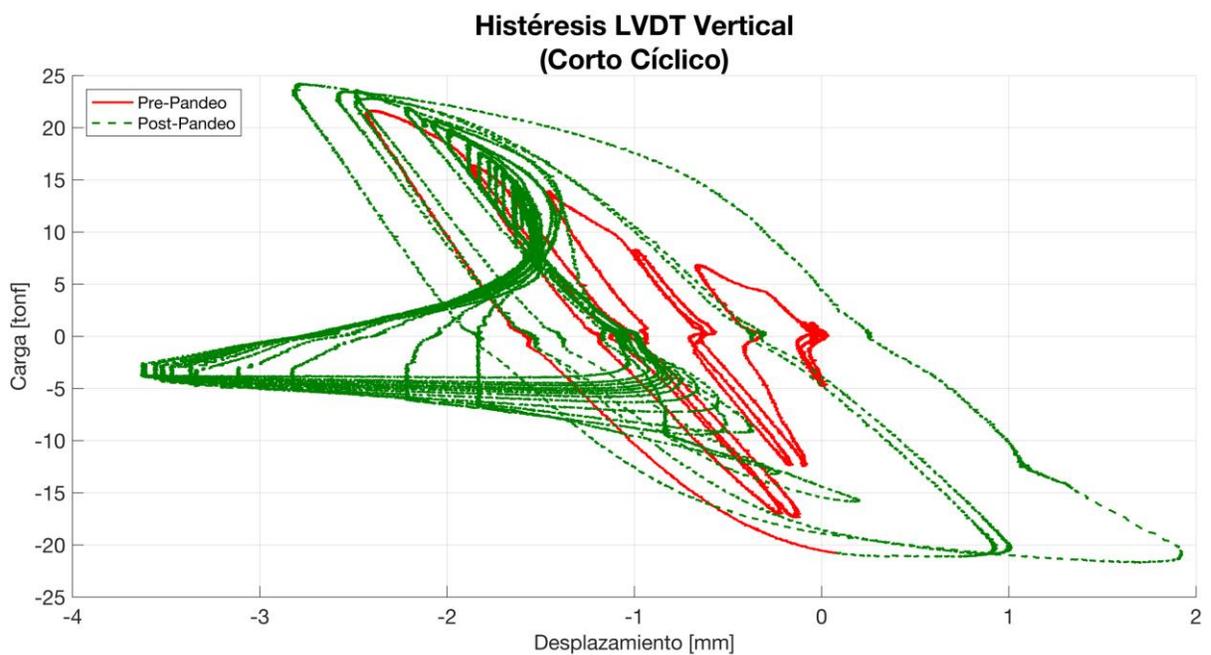


Figura Anexa 62: Histéresis del LVDT vertical para el perfil XL corto cíclico.

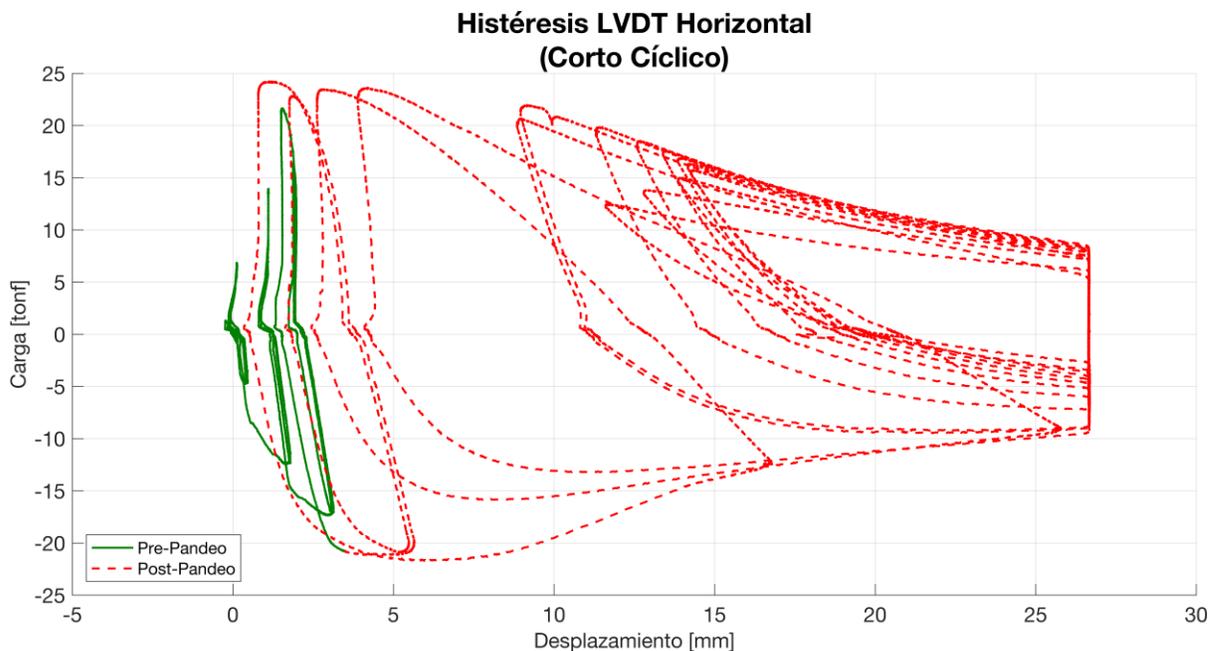


Figura Anexa 63: Histéresis del LVDT horizontal para el perfil XL corto cíclico.

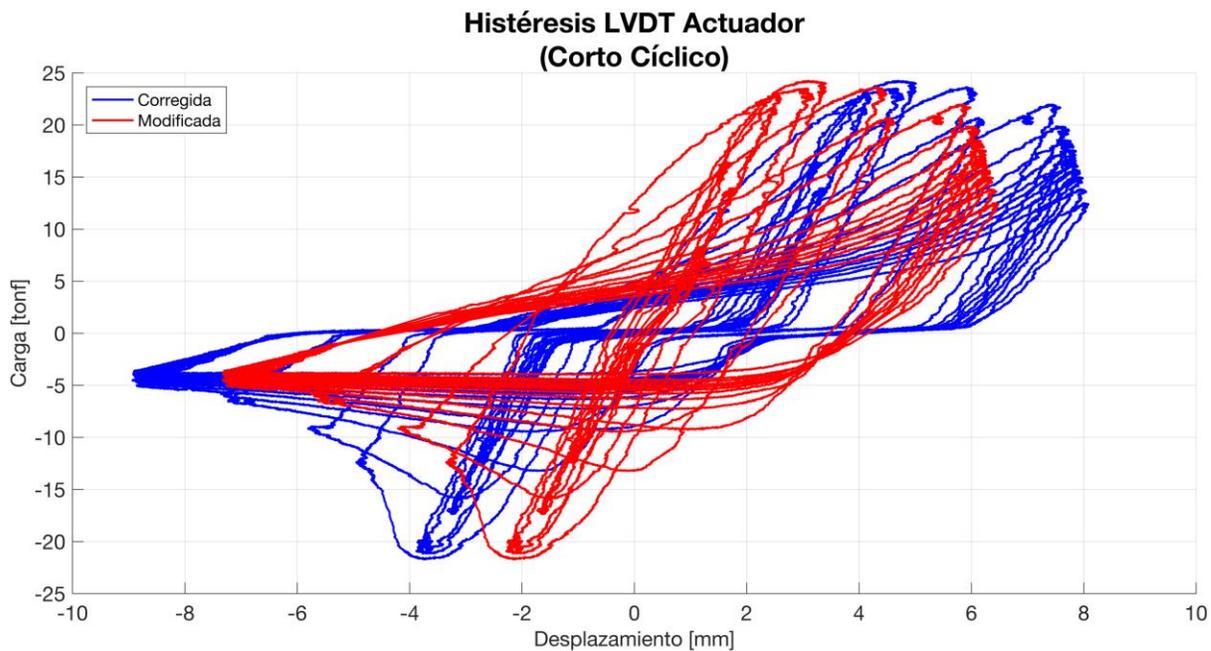


Figura Anexa 64: Modificación de la histéresis del LVDT del actuador para el perfil XL corto cíclico.

D. Memorias de cálculo:

I. Perfil XL Corto:

Propiedades del acero:

$F_y := 270\text{MPa}$ fluencia ángulos $F_{yc} := 250\text{MPa}$ fluencia planchas $F_{ym} := 316\text{MPa}$ fluencia ensayo material ángulos

$F_u := 410\text{MPa}$ rotura ángulos $F_{uc} := 400\text{MPa}$ rotura planchas $F_{um} := 421\text{MPa}$ rotura ensayo material ángulos

$R_y := 1.5$ $R_t := 1.2$ razones tensión esperada / nominal $E := 200000\text{MPa}$ $G_a := 77200\text{MPa}$ módulo de young y corte

Propiedades de los pernos placa base:

$Db := \frac{1}{2}\text{in}$ diámetro de pernos $F_{nt} := 620\text{MPa}$ tracción especificada $N_p := 8$ número de pernos

$Dp := \frac{5}{8}\text{in}$ diámetro perforacion $A_{bp} := \frac{\pi \cdot Db^2}{4}$ área perno placa base $R_{ntp} := 0.75 \cdot F_{nt} \cdot A_{bp}$ resistencia tracción

Parámetros conexiones:

$eg := 6\text{mm}$ espesor placa gusset $h := 240\text{mm}$ altura placa gusset $A_{gg} := eg \cdot h$ área gruesa gusset

$L_{bg} := 25\text{mm}$ largo de pandeo gusset $I_{yg} := \frac{eg^3 \cdot h}{12}$ inercia eje y $r_{yg} := \sqrt{\frac{I_{yg}}{A_{gg}}}$ radio de giro eje y

$l_c := 115\text{mm}$ largo conexión $p := 56\text{mm}$ largo tributario por par de pernos $B := 34\text{mm} - \frac{eg}{2}$ $B' := B - \frac{Db}{2}$

$F_{exx} := 4920 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ resistencia electrodo $F_{ew} := 0.6 F_{exx}$ resistencia efectiva $S_p := 1.5$ plano de corte perpendicular a la sollicitación

Propiedades del ángulo:

$t := 4\text{mm}$ espesor $b := 50\text{mm}$ ancho ala $x_b := 1.36\text{cm}$ centro de gravedad $A_g := 3.89\text{cm}^2$ área transversal

$r_{ua} := 1.91\text{cm}$ radio de giro eje u $I_{ua} := r_{ua}^2 \cdot A_g = 14.191\text{cm}^4$ inercia eje u

$r_{va} := 0.979\text{cm}$ radio de giro eje v $I_{va} := r_{va}^2 \cdot A_g = 3.728\text{cm}^4$ inercia eje v $J_a := \frac{2}{3} \cdot b \cdot t^3 = 0.213\text{cm}^4$ rigidez torsional

$r_{xa} := 1.52\text{cm}$ radio de giro eje x $I_{xa} := r_{xa}^2 \cdot A_g = 8.987\text{cm}^4$ inercia eje x $r_i := \min(r_{va}, r_{ua})$ radio de giro menor

$r_{ya} := 1.52\text{cm}$ radio de giro eje y $I_{ya} := r_{ya}^2 \cdot A_g = 8.987\text{cm}^4$ inercia eje y

Propiedades del perfil compuesto:

$L_b := 984\text{mm}$ largo de pandeo $k := 1$ factor de pandeo $d := eg$ separación ángulos

$\alpha := x_b \cdot \sqrt{2}$ $\beta := d \cdot \sqrt{2} = 0.849\text{cm}$ $A_g := 2A_g = 7.78\text{cm}^2$ área bruta $A_n := A_g = 3.89\text{cm}^2$ área neta

$I_u := 2I_{ua} = 28.382\text{cm}^4$ inercia eje u $r_u := \sqrt{\frac{I_u}{A_g}} = 1.91\text{cm}$ radio de giro eje u

$I_v := 2 \left[I_{va} + A_g \cdot \left(\alpha + \frac{\beta}{2} \right)^2 \right] = 50.334\text{cm}^4$ inercia eje v $r_v := \sqrt{\frac{I_v}{A_g}} = 2.544\text{cm}$ radio de giro eje v

$I_x := 2 \left[I_{xa} + A_g \cdot \left(x_b + \frac{d}{2} \right)^2 \right] = 39.413\text{cm}^4$ inercia eje x $r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A_g}} = 2.251\text{cm}$ radio de giro eje x

$I_y := I_x = 39.413\text{cm}^4$ inercia eje y $r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_g}} = 2.251\text{cm}$ radio de giro eje y

$J_p := 2J_a = 0.427\text{cm}^4$ rigidez torsional $C_w := 2.67\text{cm}^6$ constante de alabeo

Propiedades de los conectores:

$n_c := 3$ número de conectores $a := \frac{L_b}{n_c + 1} = 246 \cdot \text{mm}$ separación

Límites de esbeltez:

$k_i := 0.86$ $\lambda_u := \begin{cases} \frac{k \cdot L_b}{r_u} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq 40 \\ \sqrt{\left(\frac{k \cdot L_b}{r_u}\right)^2 + \left(\frac{k_i \cdot a}{r_i}\right)^2} & \text{otherwise} \end{cases}$ $\lambda_v := \begin{cases} \frac{k \cdot L_b}{r_v} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq 40 \\ \sqrt{\left(\frac{k \cdot L_b}{r_v}\right)^2 + \left(\frac{k_i \cdot a}{r_i}\right)^2} & \text{otherwise} \end{cases}$ $\lambda_u = 51.518$
 $\frac{a}{r_i} = 25.128$ $\lambda_v = 38.686$
 $\lambda_1 := \max(\lambda_u, \lambda_v)$

$\lambda_x := \begin{cases} \frac{k \cdot L_b}{r_x} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq 40 \\ \sqrt{\left(\frac{k \cdot L_b}{r_x}\right)^2 + \left(\frac{k_i \cdot a}{r_i}\right)^2} & \text{otherwise} \end{cases}$ $\lambda_y := \begin{cases} \frac{k \cdot L_b}{r_y} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq 40 \\ \sqrt{\left(\frac{k \cdot L_b}{r_y}\right)^2 + \left(\frac{k_i \cdot a}{r_i}\right)^2} & \text{otherwise} \end{cases}$ $\lambda_x = 43.718$
 $\lambda_y = 43.718$
 $\lambda_2 := \max(\lambda_x, \lambda_y)$

$\lambda := \max(\lambda_1, \lambda_2) = 51.518$ esbeltez gobernante

ESB1 := $\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \lambda \leq 1.5\pi \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$ esbeltez global NCh 2369

ESB2 := $\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{b}{t} \leq 0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"MAL"}$ esbeltez local NCh 2369 / AISC 360-16

ESB3 := $\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq \frac{3}{4} \cdot \lambda \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$ esbeltez entre conectores AISC 360-16

ESB4 := $\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{b}{t} \leq 0.32 \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot F_y}} \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"MAL"}$ esbeltez altamente dúctil AISC 341-16

ESB5 := $\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \lambda \leq 200 \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$ esbeltez global AISC 341-16

ESB6 := $\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq \frac{2}{5} \cdot \lambda \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"MAL"}$ esbeltez entre conectores AISC 341-16

$\lambda_{GL} := \frac{\lambda}{\left(\frac{b}{t}\right)} = 4.121$

Razón Esbeltez Global y Esbeltez Local

1. Resistencia a la tracción:

1.1. Fluencia del área bruta:

$$\delta y := (k \cdot Lb) \cdot \frac{Ry \cdot Fy}{E} = 1.993 \cdot \text{mm} \quad \text{desplazamiento de fluencia}$$

$$\text{Pne1} := Ry \cdot Fy \cdot Ag = 32.13 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pn1} := Fy \cdot Ag = 21.42 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pnm1} := Fym \cdot Ag = 25.07 \cdot \text{tonnef}$$

1.1. Fractura del área neta efectiva:

$$U := 1 - \frac{x_b}{l_c} = 0.882 \quad Ae := U \cdot An = 3.43 \cdot \text{cm}^2$$

$$\text{Pne2} := 2Ae \cdot Rt \cdot Fu = 34.416 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pn2} := 2 \cdot Ae \cdot Fu = 28.68 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pnm2} := 2 \cdot Ae \cdot Fum = 29.45 \cdot \text{tonnef}$$

2. Resistencia a la compresión:

2.1. Pandeo de flexión:

$$Fe := \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} = 743.715 \cdot \text{MPa} \quad Fcre := \begin{cases} \left(\frac{Ry \cdot Fy}{0.658 \cdot Fe} \cdot Ry \cdot Fy \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Ry \cdot Fy}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 322.454 \cdot \text{MPa}$$

$$Fcr := \begin{cases} \left(\frac{Fy}{0.658 \cdot Fe} \cdot Fy \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fy}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 231.938 \cdot \text{MPa} \quad Fcrm := \begin{cases} \left(\frac{Fym}{0.658 \cdot Fe} \cdot Fym \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fym}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 264.516 \cdot \text{MPa}$$

$$Fe1 := Fe$$

$$Fcr1 := Fcr$$

$$\text{Pne3} := \min \left(Ry \cdot Fy \cdot Ag, \frac{1}{0.877} \cdot Fcre \cdot Ag \right) = 29.169 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pn3} := Fcr \cdot Ag = 18.401 \cdot \text{tonnef}$$

$$Fcre1 := Fcre$$

$$Fcrm1 := Fcrm$$

$$\text{Pnm3} := Fcrm \cdot Ag = 20.985 \cdot \text{tonnef}$$

2.2. Pandeo flexotorsional:

$$kz := 1 \quad Feuv := \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot Cw}{(kz \cdot Lb)^2} + Ga \cdot Jp \right] \cdot \frac{1}{Iu + Iv} = 425.364 \cdot \text{MPa} \quad Fexy := \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot Cw}{(kz \cdot Lb)^2} + Ga \cdot Jp \right] \cdot \frac{1}{Ix + Iy} = 424.766 \cdot \text{MPa}$$

$$Fe_{\text{wavy}} := \min(Feuv, Fexy) \quad Fe2 := Fe$$

$$Fcre_{\text{wavy}} := \begin{cases} \left(\frac{Ry \cdot Fy}{0.658 \cdot Fe} \cdot Ry \cdot Fy \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Ry \cdot Fy}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 271.731 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Pne4} := \min \left(Ry \cdot Fy \cdot Ag, \frac{1}{0.877} \cdot Fcre \cdot Ag \right) = 24.581 \cdot \text{tonnef}$$

$$Fcre2 := Fcre$$

$$Fcr_{\text{wavy}} := \begin{cases} \left(\frac{Fy}{0.658 \cdot Fe} \cdot Fy \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fy}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 206.928 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Pn4} := Fcr \cdot Ag = 16.416 \cdot \text{tonnef}$$

$$Fcr2 := Fcr$$

$$Fcrm_{\text{wavy}} := \begin{cases} \left(\frac{Fym}{0.658 \cdot Fe} \cdot Fym \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fym}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 231.45 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Pnm4} := Fcrm \cdot Ag = 18.362 \cdot \text{tonnef}$$

$$Fcrm2 := Fcrm$$

2.3. Pandeo local:

$$\lambda_r := 0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 12.247 \quad PL := \begin{cases} \text{"Perfil No Esbelto"} & \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_r \\ \text{"Perfil Esbelto"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \boxed{PL = \text{"Perfil Esbelto"}} \quad \begin{matrix} c1 := 0.22 \\ c2 := 1.49 \end{matrix}$$

$$F_{cre} := \min(F_{cre1}, F_{cre2}) = 271.731 \cdot \text{MPa} \quad F_{cr} := \min(F_{cr1}, F_{cr2}) = 206.928 \cdot \text{MPa} \quad F_{crm} := \min(F_{crm1}, F_{crm2}) = 231.45 \cdot \text{MPa}$$

$$F_{ele} := \left(c2 \cdot \frac{\lambda_r}{b} \right)^2 \cdot R_y \cdot F_y = 863.175 \cdot \text{MPa} \quad F_{el} := \left(c2 \cdot \frac{\lambda_r}{b} \right)^2 \cdot F_y = 575.45 \cdot \text{MPa} \quad F_{elm} := \left(c2 \cdot \frac{\lambda_r}{b} \right)^2 \cdot F_{ym} = 673.49 \cdot \text{MPa}$$

$$bee := \begin{cases} b & \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_r \cdot \sqrt{\frac{R_y \cdot F_y}{F_{cre}}} \\ b \cdot \left(1 - c1 \cdot \sqrt{\frac{F_{ele}}{F_{cre}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{ele}}{F_{cre}}} & \text{otherwise} \end{cases} = 50 \cdot \text{mm} \quad be := \begin{cases} b & \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_r \cdot \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \\ b \cdot \left(1 - c1 \cdot \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} & \text{otherwise} \end{cases} = 50 \cdot \text{mm}$$

$$A_{ele} := A_g - 4 \cdot (b - bee) \cdot t = 7.78 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{el} := A_g - 4 \cdot (b - be) \cdot t = 7.78 \cdot \text{cm}^2$$

$$\boxed{P_{ne5} := \min\left(R_y \cdot F_y \cdot A_g, \frac{1}{0.877} \cdot F_{cre} \cdot A_{ele}\right) = 24.581 \cdot \text{tonnef}}$$

$$\boxed{P_{n5} := F_{cr} \cdot A_{el} = 16.416 \cdot \text{tonnef}}$$

$$b_{ew} := \begin{cases} b & \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_r \cdot \sqrt{\frac{F_{ym}}{F_{crm}}} \\ b \cdot \left(1 - c1 \cdot \sqrt{\frac{F_{elm}}{F_{crm}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{elm}}{F_{crm}}} & \text{otherwise} \end{cases} = 50 \cdot \text{mm} \quad A_{elw} := A_g - 4 \cdot (b - b_{ew}) \cdot t = 7.78 \cdot \text{cm}^2$$

$$\boxed{P_{nm5} := F_{crm} \cdot A_{elw} = 18.362 \cdot \text{tonnef}}$$

3. Resistencia del perfil compuesto:

$R_{Te} := \min(P_{ne1}, P_{ne2}) = 32.13 \cdot \text{tonnef}$	resistencia esperada a tracción
$R_{Tn} := \min(P_{n1}, P_{n2}) = 21.42 \cdot \text{tonnef}$	resistencia nominal a tracción
$R_{Tm} := \min(P_{nm1}, P_{nm2}) = 25.07 \cdot \text{tonnef}$	resistencia material a tracción
$R_{Ce} := \min(P_{ne3}, P_{ne4}, P_{ne5}) = 24.581 \cdot \text{tonnef}$	resistencia esperada a compresión
$R_{Cn} := \min(P_{n3}, P_{n4}, P_{n5}) = 16.416 \cdot \text{tonnef}$	resistencia nominal a compresión
$R_{Cm} := \min(P_{nm3}, P_{nm4}, P_{nm5}) = 18.362 \cdot \text{tonnef}$	resistencia material a compresión

4. Placa base:

4.1. Apalancamiento:

$$T_r := \frac{R_{ntp}}{0.75} = 8.009 \cdot \text{tonnef} \quad \text{resistencia requerida por perno} \quad \boxed{t_{min} := \sqrt{\frac{4.44 \cdot T_r \cdot B'}{p \cdot R_t \cdot F_{uc}}} = 17.883 \cdot \text{mm}} \quad \text{espesor mínimo para evitar apalancamiento}$$

4.2. Tracción pernos:

$$\boxed{R_{n1} := N_p \cdot R_{ntp} = 48.053 \cdot \text{tonnef}} \quad TP := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } R_{n1} \geq R_{Te} \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$$

5. Placa gusset:

5.1. Fluencia:

$$Rn2 := 0.9Agg \cdot Fyc = 33.039 \text{ tonnef}$$

$$TG := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } Rn2 \geq RTe \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \begin{cases} \text{"OK"} \\ \text{"MAL"} \end{cases}$$

5.2. Pandeo:

$$kpg := 1 \quad \lambda_{yg} := \frac{kpg \cdot Lbg}{ryg} = 14.434 \quad F_{cE} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda_{yg}^2} = 9.475 \times 10^3 \text{ MPa} \quad F_{cr} := \begin{cases} \left(\frac{F_y}{0.658^{F_y/F_e}} \cdot F_y \right) & \text{if } \lambda_y \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ 0.877 \cdot F_e & \text{otherwise} \end{cases} = 266.799 \text{ MPa}$$

$$Rn3 := 0.9F_{cr} \cdot Agg = 35.259 \text{ tonnef}$$

$$CG := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } Rn3 \geq RCc \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \begin{cases} \text{"OK"} \\ \text{"MAL"} \end{cases}$$

5.3. Corte soldadura gusset - placa base:

$$Dwgmin := \frac{Ry \cdot Fyc \cdot eg}{Sp \cdot 0.75 \cdot Few \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 2} \quad \boxed{Dwgmin = 4.885 \text{ mm}} \quad \text{espesor m\u00ednimo electrodo soldadura gusset - placa base}$$

5.4. Corte soldadura gusset - \u00e1ngulo:

$$Dwamin := \frac{Ry \cdot Fy \cdot Aga}{0.75 \cdot Few \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (lc + Sp \cdot b \cdot 2)} \quad \boxed{Dwamin = 3.872 \text{ mm}} \quad \text{espesor m\u00ednimo electrodo soldadura gusset - \u00e1ngulo considerando soldadura vertical y horizontal}$$

6. Conectores intermedios:

6.1. Dimensiones:

Dwc := 4mm	ancho soldadura	hcmin := 2 \cdot b + d - 4 \cdot Dwc = 90-mm	altura m\u00ednima	hc := 90mm	altura
		bcmin := \frac{2}{3} \cdot hc = 60-mm	ancho m\u00ednimo	bc := 60mm	ancho

6.2. Corte soldadura:

$$Dwcmin := \frac{Ry \cdot Fy \cdot Aga}{0.75 \cdot Few \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left(2bc + 2Sp \cdot \frac{hc - d}{2} \right)} \quad \boxed{Dwcmin = 4.171 \text{ mm}} \quad \text{espesor m\u00ednimo electrodo soldadura conector - \u00e1ngulo considerando soldadura vertical y horizontal}$$

7. Cubicaciones:

$$\rho := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{densidad del acero}$$

$$Vp := Ag \cdot (Lb - 20\text{mm}) = 749.992 \cdot \text{cm}^3 \quad \text{volumen perfil} \quad Pp := Vp \cdot \rho = 5.887 \text{ kg} \quad \text{peso perfil}$$

$$Vc := hc \cdot bc \cdot d = 32.4 \cdot \text{cm}^3 \quad \text{volumen conectores} \quad Pc := nc \cdot Vc \cdot \rho = 0.763 \text{ kg} \quad \text{peso conectores}$$

$$Vg := Agg \cdot 140\text{mm} = 201.6 \cdot \text{cm}^3 \quad \text{volumen gusset} \quad Pg := 2 \cdot Vg \cdot \rho = 3.165 \text{ kg} \quad \text{peso gusset}$$

$$Vpb := 18\text{mm} \cdot 130\text{mm} \cdot 240\text{mm} = 561.6 \cdot \text{cm}^3 \quad \text{volumen placa base} \quad Ppb := 2 \cdot Vpb \cdot \rho = 8.817 \text{ kg} \quad \text{peso placa base}$$

$$\boxed{Pt := Pp + Pc + Pg + Ppb = 18.633 \text{ kg}} \quad \text{peso del perfil compuesto}$$

II. Perfil XL Intermedio:

Propiedades del acero:

$F_y := 270\text{MPa}$ fluencia ángulos $F_{yc} := 250\text{MPa}$ fluencia planchas $F_{ym} := 316\text{MPa}$ fluencia ensayo material ángulos
 $F_u := 410\text{MPa}$ rotura ángulos $F_{uc} := 400\text{MPa}$ rotura planchas $F_{um} := 421\text{MPa}$ rotura ensayo material ángulos
 $R_y := 1.5$ $R_t := 1.2$ razones tensión esperada / nominal $E := 200000\text{MPa}$ $G_a := 77200\text{MPa}$ módulo de young y corte

Propiedades de los pernos placa base:

$D_b := \frac{1}{2}\text{in}$ diámetro de pernos $F_{nt} := 620\text{MPa}$ tracción especificada $N_p := 8$ número de pernos
 $D_p := \frac{5}{8}\text{in}$ diámetro perforacion $A_{bp} := \frac{\pi \cdot D_b^2}{4}$ área perno placa base $R_{ntp} := 0.75 \cdot F_{nt} \cdot A_{bp}$ resistencia tracción

Parámetros conexiones:

$e_g := 6\text{mm}$ espesor placa gusset $h := 240\text{mm}$ altura placa gusset $A_{gg} := e_g \cdot h$ área gruesa gusset
 $L_{bg} := 25\text{mm}$ largo de pandeo gusset $I_{yg} := \frac{e_g^3 \cdot h}{12}$ inercia eje y $r_{yg} := \sqrt{\frac{I_{yg}}{A_{gg}}}$ radio de giro eje y
 $l_c := 115\text{mm}$ largo conexión $p := 56\text{mm}$ largo tributario por par de pernos $B := 34\text{mm} - \frac{e_g}{2}$ $B' := B - \frac{D_b}{2}$
 $F_{exx} := 4920 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ resistencia electrodo $F_{ew} := 0.6 F_{exx}$ resistencia efectiva $S_p := 1.5$ plano de corte perpendicular a la sollicitación

Propiedades del ángulo:

$t := 4\text{mm}$ espesor $b := 50\text{mm}$ ancho ala $x_b := 1.36\text{cm}$ centro de gravedad $A_g := 3.89\text{cm}^2$ área transversal
 $r_{ua} := 1.91\text{cm}$ radio de giro eje u $I_{ua} := r_{ua}^2 \cdot A_g = 14.191 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje u
 $r_{va} := 0.979\text{cm}$ radio de giro eje v $I_{va} := r_{va}^2 \cdot A_g = 3.728 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje v $J_a := \frac{2}{3} \cdot b \cdot t^3 = 0.213 \cdot \text{cm}^4$ rigidez torsional
 $r_{xa} := 1.52\text{cm}$ radio de giro eje x $I_{xa} := r_{xa}^2 \cdot A_g = 8.987 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje x $r_i := \min(r_{va}, r_{ua})$ radio de giro menor
 $r_{ya} := 1.52\text{cm}$ radio de giro eje y $I_{ya} := r_{ya}^2 \cdot A_g = 8.987 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje y

Propiedades del perfil compuesto:

$L_b := 1784\text{mm}$ largo de pandeo $k := 1$ factor de pandeo $d := e_g$ separación ángulos
 $\alpha := x_b \cdot \sqrt{2}$ $\beta := d \cdot \sqrt{2} = 0.849 \cdot \text{cm}$ $A_g := 2 A_g = 7.78 \cdot \text{cm}^2$ área bruta $A_n := A_g = 3.89 \cdot \text{cm}^2$ área neta
 $I_u := 2 I_{ua} = 28.382 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje u $r_u := \sqrt{\frac{I_u}{A_g}} = 1.91 \cdot \text{cm}$ radio de giro eje u
 $I_v := 2 \left[I_{va} + A_g \cdot \left(\alpha + \frac{\beta}{2} \right)^2 \right] = 50.334 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje v $r_v := \sqrt{\frac{I_v}{A_g}} = 2.544 \cdot \text{cm}$ radio de giro eje v
 $I_x := 2 \left[I_{xa} + A_g \cdot \left(x_b + \frac{d}{2} \right)^2 \right] = 39.413 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje x $r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A_g}} = 2.251 \cdot \text{cm}$ radio de giro eje x
 $I_y := I_x = 39.413 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje y $r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_g}} = 2.251 \cdot \text{cm}$ radio de giro eje y
 $J_p := 2 J_a = 0.427 \cdot \text{cm}^4$ rigidez torsional $C_w := 2.67 \cdot \text{cm}^6$ constante de alabeo

Propiedades de los conectores:

$$n_c := 3 \quad \text{número de conectores} \quad a := \frac{Lb}{n_c + 1} = 446 \cdot \text{mm} \quad \text{separación}$$

Límites de esbeltez:

$$k_i := 0.86 \quad \lambda_u := \begin{cases} \frac{k \cdot Lb}{r_u} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq 40 \\ \sqrt{\left(\frac{k \cdot Lb}{r_u}\right)^2 + \left(\frac{k_i \cdot a}{r_i}\right)^2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \lambda_v := \begin{cases} \frac{k \cdot Lb}{r_v} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq 40 \\ \sqrt{\left(\frac{k \cdot Lb}{r_v}\right)^2 + \left(\frac{k_i \cdot a}{r_i}\right)^2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \begin{matrix} \lambda_u = 101.287 \\ \lambda_v = 80.339 \\ \lambda_1 := \max(\lambda_u, \lambda_v) \end{matrix}$$

$$\frac{a}{r_i} = 45.557 \quad \lambda_x := \begin{cases} \frac{k \cdot Lb}{r_x} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq 40 \\ \sqrt{\left(\frac{k \cdot Lb}{r_x}\right)^2 + \left(\frac{k_i \cdot a}{r_i}\right)^2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \lambda_y := \begin{cases} \frac{k \cdot Lb}{r_y} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq 40 \\ \sqrt{\left(\frac{k \cdot Lb}{r_y}\right)^2 + \left(\frac{k_i \cdot a}{r_i}\right)^2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \begin{matrix} \lambda_x = 88.416 \\ \lambda_y = 88.416 \\ \lambda_2 := \max(\lambda_x, \lambda_y) \end{matrix}$$

$$\lambda := \max(\lambda_1, \lambda_2) = 101.287 \quad \text{esbeltez gobernante}$$

$$ESB1 := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \lambda \leq 1.5\pi \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"} \quad \text{esbeltez global NCh 2369}$$

$$ESB2 := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{b}{t} \leq 0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"MAL"} \quad \text{esbeltez local NCh 2369 / AISC 360-16}$$

$$ESB3 := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq \frac{3}{4} \cdot \lambda \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"} \quad \text{esbeltez entre conectores AISC 360-16}$$

$$ESB4 := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{b}{t} \leq 0.32 \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot F_y}} \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"MAL"} \quad \text{esbeltez altamente dúctil AISC 341-16}$$

$$ESB5 := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \lambda \leq 200 \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"} \quad \text{esbeltez global AISC 341-16}$$

$$ESB6 := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq \frac{2}{5} \cdot \lambda \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"MAL"} \quad \text{esbeltez entre conectores AISC 341-16}$$

$$\lambda_{GL} := \frac{\lambda}{\left(\frac{b}{t}\right)} = 8.103$$

Razón Esbeltez Global y Esbeltez Local

1. Resistencia a la tracción:

1.1. Fluencia del área bruta:

$$\delta y := (k \cdot Lb) \cdot \frac{Ry \cdot Fy}{E} = 3.613 \cdot \text{mm} \quad \text{desplazamiento de fluencia}$$

$$\text{Pne1} := Ry \cdot Fy \cdot Ag = 32.13 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pn1} := Fy \cdot Ag = 21.42 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pnm1} := Fym \cdot Ag = 25.07 \cdot \text{tonnef}$$

1.1. Fractura del área neta efectiva:

$$U := 1 - \frac{x_b}{l_c} = 0.882 \quad Ae := U \cdot An = 3.43 \cdot \text{cm}^2$$

$$\text{Pne2} := 2Ae \cdot Rt \cdot Fu = 34.416 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pn2} := 2 \cdot Ae \cdot Fu = 28.68 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pnm2} := 2 \cdot Ae \cdot Fum = 29.45 \cdot \text{tonnef}$$

2. Resistencia a la compresión:

2.1. Pandeo de flexión:

$$Fe := \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} = 192.406 \cdot \text{MPa} \quad Fcre := \begin{cases} \left(\frac{Ry \cdot Fy}{0.658 \cdot Fe} \cdot Ry \cdot Fy \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Ry \cdot Fy}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 167.817 \cdot \text{MPa}$$

$$Fcr := \begin{cases} \left(\frac{Fy}{0.658 \cdot Fe} \cdot Fy \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fy}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 150.067 \cdot \text{MPa} \quad Fcrm := \begin{cases} \left(\frac{Fym}{0.658 \cdot Fe} \cdot Fym \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fym}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 158.909 \cdot \text{MPa}$$

$$Fe1 := Fe \quad Fcr1 := Fcr$$

$$\text{Pne3} := \min \left(Ry \cdot Fy \cdot Ag, \frac{1}{0.877} \cdot Fcre \cdot Ag \right) = 15.181 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pn3} := Fcr \cdot Ag = 11.905 \cdot \text{tonnef}$$

$$Fcre1 := Fcre \quad Fcrm1 := Fcrm$$

$$\text{Pnm3} := Fcrm \cdot Ag = 12.607 \cdot \text{tonnef}$$

2.2. Pandeo flexotorsional:

$$kz := 1 \quad Feuv := \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot Cw}{(kz \cdot Lb)^2} + Ga \cdot Jp \right] \cdot \frac{1}{Iu + Iv} = 420.553 \cdot \text{MPa} \quad Fexy := \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot Cw}{(kz \cdot Lb)^2} + Ga \cdot Jp \right] \cdot \frac{1}{Ix + Iy} = 419.961 \cdot \text{MPa}$$

$$Fe_{\text{w}} := \min(Feuv, Fexy) \quad Fe2 := Fe$$

$$Fcre_{\text{w}} := \begin{cases} \left(\frac{Ry \cdot Fy}{0.658 \cdot Fe} \cdot Ry \cdot Fy \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Ry \cdot Fy}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 270.493 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Pne4} := \min \left(Ry \cdot Fy \cdot Ag, \frac{1}{0.877} \cdot Fcre \cdot Ag \right) = 24.469 \cdot \text{tonnef}$$

$$Fcre2 := Fcre$$

$$Fcr_{\text{w}} := \begin{cases} \left(\frac{Fy}{0.658 \cdot Fe} \cdot Fy \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fy}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 206.3 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Pn4} := Fcr \cdot Ag = 16.367 \cdot \text{tonnef}$$

$$Fcr2 := Fcr$$

$$Fcrm_{\text{w}} := \begin{cases} \left(\frac{Fym}{0.658 \cdot Fe} \cdot Fym \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fym}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 230.627 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Pnm4} := Fcrm \cdot Ag = 18.297 \cdot \text{tonnef}$$

$$Fcrm2 := Fcrm$$

2.3. Pandeo local:

$$\lambda_r := 0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 12.247 \quad PL := \begin{cases} \text{"Perfil No Esbelto"} & \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_r \\ \text{"Perfil Esbelto"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \boxed{PL = \text{"Perfil Esbelto"}} \quad \begin{matrix} c1 := 0.22 \\ c2 := 1.49 \end{matrix}$$

$$F_{cre} := \min(F_{cre1}, F_{cre2}) = 167.817 \cdot \text{MPa} \quad F_{cr} := \min(F_{cr1}, F_{cr2}) = 150.067 \cdot \text{MPa} \quad F_{crm} := \min(F_{crm1}, F_{crm2}) = 158.909 \cdot \text{MPa}$$

$$F_{ele} := \left(c2 \cdot \frac{\lambda_r}{b} \right)^2 \cdot R_y \cdot F_y = 863.175 \cdot \text{MPa} \quad F_{el} := \left(c2 \cdot \frac{\lambda_r}{b} \right)^2 \cdot F_y = 575.45 \cdot \text{MPa} \quad F_{elm} := \left(c2 \cdot \frac{\lambda_r}{b} \right)^2 \cdot F_{ym} = 673.49 \cdot \text{MPa}$$

$$bee := \begin{cases} b & \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_r \cdot \sqrt{\frac{R_y \cdot F_y}{F_{cre}}} \\ b \cdot \left(1 - c1 \cdot \sqrt{\frac{F_{ele}}{F_{cre}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{ele}}{F_{cre}}} & \text{otherwise} \end{cases} = 50 \cdot \text{mm} \quad be := \begin{cases} b & \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_r \cdot \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \\ b \cdot \left(1 - c1 \cdot \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} & \text{otherwise} \end{cases} = 50 \cdot \text{mm}$$

$$A_{ele} := A_g - 4 \cdot (b - bee) \cdot t = 7.78 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{el} := A_g - 4 \cdot (b - be) \cdot t = 7.78 \cdot \text{cm}^2$$

$$\boxed{P_{ne5} := \min\left(R_y \cdot F_y \cdot A_g, \frac{1}{0.877} \cdot F_{cre} \cdot A_{ele}\right) = 15.181 \cdot \text{tonnef}}$$

$$\boxed{P_{n5} := F_{cr} \cdot A_{el} = 11.905 \cdot \text{tonnef}}$$

$$b_{ew} := \begin{cases} b & \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_r \cdot \sqrt{\frac{F_{ym}}{F_{crm}}} \\ b \cdot \left(1 - c1 \cdot \sqrt{\frac{F_{elm}}{F_{crm}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{elm}}{F_{crm}}} & \text{otherwise} \end{cases} = 50 \cdot \text{mm}$$

$$A_{elw} := A_g - 4 \cdot (b - b_{ew}) \cdot t = 7.78 \cdot \text{cm}^2$$

$$\boxed{P_{nm5} := F_{crm} \cdot A_{elw} = 12.607 \cdot \text{tonnef}}$$

3. Resistencia del perfil compuesto:

$R_{Te} := \min(P_{ne1}, P_{ne2}) = 32.13 \cdot \text{tonnef}$	resistencia esperada a tracción
$R_{Tn} := \min(P_{n1}, P_{n2}) = 21.42 \cdot \text{tonnef}$	resistencia nominal a tracción
$R_{Tm} := \min(P_{nm1}, P_{nm2}) = 25.07 \cdot \text{tonnef}$	resistencia material a tracción
$R_{Ce} := \min(P_{ne3}, P_{ne4}, P_{ne5}) = 15.181 \cdot \text{tonnef}$	resistencia esperada a compresión
$R_{Cn} := \min(P_{n3}, P_{n4}, P_{n5}) = 11.905 \cdot \text{tonnef}$	resistencia nominal a compresión
$R_{Cm} := \min(P_{nm3}, P_{nm4}, P_{nm5}) = 12.607 \cdot \text{tonnef}$	resistencia material a compresión

4. Placa base:

4.1. Apalancamiento:

$$Tr := \frac{R_{ntp}}{0.75} = 8.009 \cdot \text{tonnef} \quad \text{resistencia requerida por perno} \quad \boxed{t_{min} := \sqrt{\frac{4.44 \cdot Tr \cdot B'}{p \cdot R_t \cdot F_{uc}}} = 17.883 \cdot \text{mm}} \quad \text{espesor mínimo para evitar apalancamiento}$$

4.2. Tracción pernos:

$$\boxed{R_{n1} := N_p \cdot R_{ntp} = 48.053 \cdot \text{tonnef}} \quad TP := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } R_{n1} \geq R_{Te} \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$$

5. Placa gusset:

5.1. Fluencia:

$$Rn2 := 0.9 \cdot Agg \cdot Fyc = 33.039 \text{ tonnef}$$

$$TG := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } Rn2 \geq RTe \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$$

5.2. Pandeo:

$$kpg := 1 \quad \lambda_{yg} := \frac{kpg \cdot Lbg}{ryg} = 14.434 \quad F_{cw} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda_{yg}^2} = 9.475 \times 10^3 \text{ MPa} \quad F_{cr} := \begin{cases} \left(\frac{F_y}{0.658^{F_y/F_e}} \cdot F_y \right) & \text{if } \lambda_y \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ 0.877 \cdot F_e & \text{otherwise} \end{cases} = 266.799 \text{ MPa}$$

$$Rn3 := 0.9 \cdot F_{cr} \cdot Agg = 35.259 \text{ tonnef}$$

$$CG := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } Rn3 \geq RCc \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$$

5.3. Corte soldadura gusset - placa base:

$$Dwgmin := \frac{Ry \cdot Fyc \cdot eg}{Sp \cdot 0.75 \cdot F_{ew} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 2} \quad \text{Dwgmin} = 4.885 \text{ mm} \quad \text{espesor m\u00ednimo electrodo soldadura gusset - placa base}$$

5.4. Corte soldadura gusset - \u00e1ngulo:

$$Dwamin := \frac{Ry \cdot Fy \cdot Aga}{0.75 \cdot F_{ew} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (lc + Sp \cdot b \cdot 2)} \quad \text{Dwamin} = 3.872 \text{ mm} \quad \text{espesor m\u00ednimo electrodo soldadura gusset - \u00e1ngulo considerando soldadura vertical y horizontal}$$

6. Conectores intermedios:

6.1. Dimensiones:

$$Dwc := 4 \text{ mm} \quad \text{ancho soldadura} \quad hcmin := 2 \cdot b + d - 4 \cdot Dwc = 90 \text{ mm} \quad \text{altura m\u00ednima} \quad hc := 90 \text{ mm} \quad \text{altura}$$

$$bcmin := \frac{2}{3} \cdot hc = 60 \text{ mm} \quad \text{ancho m\u00ednimo} \quad bc := 60 \text{ mm} \quad \text{ancho}$$

6.2. Corte soldadura:

$$Dwcmin := \frac{Ry \cdot Fy \cdot Aga}{0.75 \cdot F_{ew} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left(2bc + 2Sp \cdot \frac{hc - d}{2} \right)} \quad \text{Dwcmin} = 4.171 \text{ mm} \quad \text{espesor m\u00ednimo electrodo soldadura conector - \u00e1ngulo considerando soldadura vertical y horizontal}$$

7. Cubicaciones:

$$\rho := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{densidad del acero}$$

$$Vp := Ag \cdot (Lb - 20 \text{ mm}) = 1.372 \times 10^3 \cdot \text{cm}^3 \quad \text{volumen perfil} \quad Pp := Vp \cdot \rho = 10.773 \text{ kg} \quad \text{peso perfil}$$

$$Vc := hc \cdot bc \cdot d = 32.4 \cdot \text{cm}^3 \quad \text{volumen conectores} \quad Pc := nc \cdot Vc \cdot \rho = 0.763 \text{ kg} \quad \text{peso conectores}$$

$$Vg := Agg \cdot 140 \text{ mm} = 201.6 \cdot \text{cm}^3 \quad \text{volumen gusset} \quad Pg := 2 \cdot Vg \cdot \rho = 3.165 \text{ kg} \quad \text{peso gusset}$$

$$Vpb := 18 \text{ mm} \cdot 130 \text{ mm} \cdot 240 \text{ mm} = 561.6 \cdot \text{cm}^3 \quad \text{volumen placa base} \quad Ppb := 2 \cdot Vpb \cdot \rho = 8.817 \text{ kg} \quad \text{peso placa base}$$

$$Pt := Pp + Pc + Pg + Ppb = 23.519 \text{ kg} \quad \text{peso del perfil compuesto}$$

III. Perfil XL Largo:

Propiedades del acero:

$F_y := 270\text{MPa}$ fluencia ángulos $F_{yc} := 250\text{MPa}$ fluencia planchas $F_{ym} := 316\text{MPa}$ fluencia ensayo material ángulos
 $F_u := 410\text{MPa}$ rotura ángulos $F_{uc} := 400\text{MPa}$ rotura planchas $F_{um} := 421\text{MPa}$ rotura ensayo material ángulos
 $R_y := 1.5$ $R_t := 1.2$ razones tensión esperada / nominal $E := 200000\text{MPa}$ $G_a := 77200\text{MPa}$ módulo de young y corte

Propiedades de los pernos placa base:

$D_b := \frac{1}{2}\text{in}$ diámetro de pernos $F_{nt} := 620\text{MPa}$ tracción especificada $N_p := 8$ número de pernos
 $D_p := \frac{5}{8}\text{in}$ diámetro perforacion $A_{bp} := \frac{\pi \cdot D_b^2}{4}$ área perno placa base $R_{ntp} := 0.75 \cdot F_{nt} \cdot A_{bp}$ resistencia tracción

Parámetros conexiones:

$e_g := 6\text{mm}$ espesor placa gusset $h := 240\text{mm}$ altura placa gusset $A_{gg} := e_g \cdot h$ área gruesa gusset
 $L_{bg} := 25\text{mm}$ largo de pandeo gusset $I_{yg} := \frac{e_g^3 \cdot h}{12}$ inercia eje y $r_{yg} := \sqrt{\frac{I_{yg}}{A_{gg}}}$ radio de giro eje y
 $l_c := 115\text{mm}$ largo conexión $p := 56\text{mm}$ largo tributario por par de pernos $B := 34\text{mm} - \frac{e_g}{2}$ $B' := B - \frac{D_b}{2}$
 $F_{exx} := 4920 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ resistencia electrodo $F_{ew} := 0.6 F_{exx}$ resistencia efectiva $S_p := 1.5$ plano de corte perpendicular a la sollicitación

Propiedades del ángulo:

$t := 4\text{mm}$ espesor $b := 50\text{mm}$ ancho ala $x_b := 1.36\text{cm}$ centro de gravedad $A_g := 3.89\text{cm}^2$ área transversal
 $r_{ua} := 1.91\text{cm}$ radio de giro eje u $I_{ua} := r_{ua}^2 \cdot A_g = 14.191 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje u
 $r_{va} := 0.979\text{cm}$ radio de giro eje v $I_{va} := r_{va}^2 \cdot A_g = 3.728 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje v $J_a := \frac{2}{3} \cdot b \cdot t^3 = 0.213 \cdot \text{cm}^4$ rigidez torsional
 $r_{xa} := 1.52\text{cm}$ radio de giro eje x $I_{xa} := r_{xa}^2 \cdot A_g = 8.987 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje x $r_i := \min(r_{va}, r_{ua})$ radio de giro menor
 $r_{ya} := 1.52\text{cm}$ radio de giro eje y $I_{ya} := r_{ya}^2 \cdot A_g = 8.987 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje y

Propiedades del perfil compuesto:

$L_b := 2584\text{mm}$ largo de pandeo $k := 1$ factor de pandeo $d := e_g$ separación ángulos
 $\alpha := x_b \cdot \sqrt{2}$ $\beta := d \cdot \sqrt{2} = 0.849 \cdot \text{cm}$ $A_g := 2 A_g = 7.78 \cdot \text{cm}^2$ área bruta $A_n := A_g = 3.89 \cdot \text{cm}^2$ área neta
 $I_u := 2 I_{ua} = 28.382 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje u $r_u := \sqrt{\frac{I_u}{A_g}} = 1.91 \cdot \text{cm}$ radio de giro eje u
 $I_v := 2 \left[I_{va} + A_g \cdot \left(\alpha + \frac{\beta}{2} \right)^2 \right] = 50.334 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje v $r_v := \sqrt{\frac{I_v}{A_g}} = 2.544 \cdot \text{cm}$ radio de giro eje v
 $I_x := 2 \left[I_{xa} + A_g \cdot \left(x_b + \frac{d}{2} \right)^2 \right] = 39.413 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje x $r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A_g}} = 2.251 \cdot \text{cm}$ radio de giro eje x
 $I_y := I_x = 39.413 \cdot \text{cm}^4$ inercia eje y $r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_g}} = 2.251 \cdot \text{cm}$ radio de giro eje y
 $J_p := 2 J_a = 0.427 \cdot \text{cm}^4$ rigidez torsional $C_w := 2.67 \cdot \text{cm}^6$ constante de alabeo

Propiedades de los conectores:

$n_c := 3$ número de conectores $a := \frac{Lb}{n_c + 1} = 646 \cdot \text{mm}$ separación

Límites de esbeltez:

$k_i := 0.86$	$\lambda_u := \begin{cases} \frac{k \cdot Lb}{r_u} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq 40 \\ \sqrt{\left(\frac{k \cdot Lb}{r_u}\right)^2 + \left(\frac{k_i \cdot a}{r_i}\right)^2} & \text{otherwise} \end{cases}$	$\lambda_v := \begin{cases} \frac{k \cdot Lb}{r_v} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq 40 \\ \sqrt{\left(\frac{k \cdot Lb}{r_v}\right)^2 + \left(\frac{k_i \cdot a}{r_i}\right)^2} & \text{otherwise} \end{cases}$	$\lambda_u = 146.708$
			$\lambda_v = 116.365$
$\frac{a}{r_i} = 65.986$	$\lambda_x := \begin{cases} \frac{k \cdot Lb}{r_x} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq 40 \\ \sqrt{\left(\frac{k \cdot Lb}{r_x}\right)^2 + \left(\frac{k_i \cdot a}{r_i}\right)^2} & \text{otherwise} \end{cases}$	$\lambda_y := \begin{cases} \frac{k \cdot Lb}{r_y} & \text{if } \frac{a}{r_i} \leq 40 \\ \sqrt{\left(\frac{k \cdot Lb}{r_y}\right)^2 + \left(\frac{k_i \cdot a}{r_i}\right)^2} & \text{otherwise} \end{cases}$	$\lambda_1 := \max(\lambda_u, \lambda_v)$
			$\lambda_x = 128.064$
			$\lambda_y = 128.064$
			$\lambda_2 := \max(\lambda_x, \lambda_y)$

$\lambda := \max(\lambda_1, \lambda_2) = 146.708$ esbeltez gobernante

- | | | |
|---------|--|---------------------------------------|
| ESB1 := | "OK" if $\lambda \leq 1.5\pi \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ = "MAL" | esbeltez global NCh 2369 |
| | "MAL" otherwise | |
| ESB2 := | "OK" if $\frac{b}{t} \leq 0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ = "MAL" | esbeltez local NCh 2369 / AISC 360-16 |
| | "MAL" otherwise | |
| ESB3 := | "OK" if $\frac{a}{r_i} \leq \frac{3}{4} \cdot \lambda$ = "OK" | esbeltez entre conectores AISC 360-16 |
| | "MAL" otherwise | |
| ESB4 := | "OK" if $\frac{b}{t} \leq 0.32 \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot F_y}}$ = "MAL" | esbeltez altamente dúctil AISC 341-16 |
| | "MAL" otherwise | |
| ESB5 := | "OK" if $\lambda \leq 200$ = "OK" | esbeltez global AISC 341-16 |
| | "MAL" otherwise | |
| ESB6 := | "OK" if $\frac{a}{r_i} \leq \frac{2}{5} \cdot \lambda$ = "MAL" | esbeltez entre conectores AISC 341-16 |
| | "MAL" otherwise | |

$\lambda_{GL} := \frac{\lambda}{\left(\frac{b}{t}\right)} = 11.737$

Razón Esbeltez Global y Esbeltez Local

1. Resistencia a la tracción:

1.1. Fluencia del área bruta:

$$\delta y := (k \cdot Lb) \cdot \frac{Ry \cdot Fy}{E} = 5.233 \cdot \text{mm} \quad \text{desplazamiento de fluencia}$$

$$\text{Pne1} := Ry \cdot Fy \cdot Ag = 32.13 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pn1} := Fy \cdot Ag = 21.42 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pnm1} := Fym \cdot Ag = 25.07 \cdot \text{tonnef}$$

1.1. Fractura del área neta efectiva:

$$U := 1 - \frac{x_b}{l_c} = 0.882 \quad Ae := U \cdot An = 3.43 \cdot \text{cm}^2$$

$$\text{Pne2} := 2Ae \cdot Rt \cdot Fu = 34.416 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pn2} := 2 \cdot Ae \cdot Fu = 28.68 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pnm2} := 2 \cdot Ae \cdot Fum = 29.45 \cdot \text{tonnef}$$

2. Resistencia a la compresión:

2.1. Pandeo de flexión:

$$Fe := \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} = 91.712 \cdot \text{MPa} \quad Fcre := \begin{cases} \left(\frac{Ry \cdot Fy}{0.658 \cdot Fe} \cdot Ry \cdot Fy \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Ry \cdot Fy}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 80.431 \cdot \text{MPa}$$

$$Fcr := \begin{cases} \left(\frac{Fy}{0.658 \cdot Fe} \cdot Fy \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fy}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 80.431 \cdot \text{MPa} \quad Fcrm := \begin{cases} \left(\frac{Fym}{0.658 \cdot Fe} \cdot Fym \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fym}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 80.431 \cdot \text{MPa}$$

$$Fe1 := Fe \quad Fcr1 := Fcr$$

$$\text{Pne3} := \min \left(Ry \cdot Fy \cdot Ag, \frac{1}{0.877} \cdot Fcre \cdot Ag \right) = 7.276 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Pn3} := Fcr \cdot Ag = 6.381 \cdot \text{tonnef}$$

$$Fcre1 := Fcre \quad Fcrm1 := Fcrm$$

$$\text{Pnm3} := Fcrm \cdot Ag = 6.381 \cdot \text{tonnef}$$

2.2. Pandeo flexotorsional:

$$kz := 1 \quad Feuv := \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot Cw}{(kz \cdot Lb)^2} + Ga \cdot Jp \right] \cdot \frac{1}{Iu + Iv} = 419.452 \cdot \text{MPa} \quad Fexy := \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot Cw}{(kz \cdot Lb)^2} + Ga \cdot Jp \right] \cdot \frac{1}{Ix + Iy} = 418.862 \cdot \text{MPa}$$

$$Fe_{\text{wavy}} := \min(Feuv, Fexy) \quad Fe2 := Fe$$

$$Fcre_{\text{wavy}} := \begin{cases} \left(\frac{Ry \cdot Fy}{0.658 \cdot Fe} \cdot Ry \cdot Fy \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Ry \cdot Fy}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 367.342 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Pne4} := \min \left(Ry \cdot Fy \cdot Ag, \frac{1}{0.877} \cdot Fcre \cdot Ag \right) = 32.13 \cdot \text{tonnef}$$

$$Fcre2 := Fcre$$

$$Fcr_{\text{wavy}} := \begin{cases} \left(\frac{Fy}{0.658 \cdot Fe} \cdot Fy \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fy}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 367.342 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Pn4} := Fcr \cdot Ag = 29.143 \cdot \text{tonnef}$$

$$Fcr2 := Fcr$$

$$Fcrm_{\text{wavy}} := \begin{cases} \left(\frac{Fym}{0.658 \cdot Fe} \cdot Fym \right) & \text{if } \lambda \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fym}} \\ 0.877 \cdot Fe & \text{otherwise} \end{cases} = 367.342 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Pnm4} := Fcrm \cdot Ag = 29.143 \cdot \text{tonnef}$$

$$Fcrm2 := Fcrm$$

2.3. Pandeo local:

$$\lambda_r := 0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 12.247 \quad PL := \begin{cases} \text{"Perfil No Esbelto"} & \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_r \\ \text{"Perfil Esbelto"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \boxed{PL = \text{"Perfil Esbelto"}} \quad \begin{matrix} c1 := 0.22 \\ c2 := 1.49 \end{matrix}$$

$$F_{cre} := \min(F_{cre1}, F_{cre2}) = 80.431 \cdot \text{MPa} \quad F_{cr} := \min(F_{cr1}, F_{cr2}) = 80.431 \cdot \text{MPa} \quad F_{crm} := \min(F_{crm1}, F_{crm2}) = 80.431 \cdot \text{MPa}$$

$$F_{ele} := \left(c2 \cdot \frac{\lambda_r}{b} \right)^2 \cdot R_y \cdot F_y = 863.175 \cdot \text{MPa} \quad F_{el} := \left(c2 \cdot \frac{\lambda_r}{b} \right)^2 \cdot F_y = 575.45 \cdot \text{MPa} \quad F_{elm} := \left(c2 \cdot \frac{\lambda_r}{b} \right)^2 \cdot F_{ym} = 673.49 \cdot \text{MPa}$$

$$bee := \begin{cases} b & \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_r \cdot \sqrt{\frac{R_y \cdot F_y}{F_{cre}}} \\ b \cdot \left(1 - c1 \cdot \sqrt{\frac{F_{ele}}{F_{cre}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{ele}}{F_{cre}}} & \text{otherwise} \end{cases} = 50 \cdot \text{mm} \quad be := \begin{cases} b & \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_r \cdot \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \\ b \cdot \left(1 - c1 \cdot \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} & \text{otherwise} \end{cases} = 50 \cdot \text{mm}$$

$$A_{ele} := A_g - 4 \cdot (b - bee) \cdot t = 7.78 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{el} := A_g - 4 \cdot (b - be) \cdot t = 7.78 \cdot \text{cm}^2$$

$$\boxed{P_{ne5} := \min\left(R_y \cdot F_y \cdot A_g, \frac{1}{0.877} \cdot F_{cre} \cdot A_{ele}\right) = 7.276 \cdot \text{tonnef}}$$

$$\boxed{P_{n5} := F_{cr} \cdot A_{el} = 6.381 \cdot \text{tonnef}}$$

$$\underline{bee} := \begin{cases} b & \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_r \cdot \sqrt{\frac{F_{ym}}{F_{crm}}} \\ b \cdot \left(1 - c1 \cdot \sqrt{\frac{F_{elm}}{F_{crm}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{elm}}{F_{crm}}} & \text{otherwise} \end{cases} = 50 \cdot \text{mm} \quad \underline{A_{el}} := A_g - 4 \cdot (b - be) \cdot t = 7.78 \cdot \text{cm}^2$$

$$\boxed{P_{nm5} := F_{crm} \cdot A_{el} = 6.381 \cdot \text{tonnef}}$$

3. Resistencia del perfil compuesto:

$R_{Te} := \min(P_{ne1}, P_{ne2}) = 32.13 \cdot \text{tonnef}$	resistencia esperada a tracción
$R_{Tn} := \min(P_{n1}, P_{n2}) = 21.42 \cdot \text{tonnef}$	resistencia nominal a tracción
$R_{Tm} := \min(P_{nm1}, P_{nm2}) = 25.07 \cdot \text{tonnef}$	resistencia material a tracción
$R_{Ce} := \min(P_{ne3}, P_{ne4}, P_{ne5}) = 7.276 \cdot \text{tonnef}$	resistencia esperada a compresión
$R_{Cn} := \min(P_{n3}, P_{n4}, P_{n5}) = 6.381 \cdot \text{tonnef}$	resistencia nominal a compresión
$R_{Cm} := \min(P_{nm3}, P_{nm4}, P_{nm5}) = 6.381 \cdot \text{tonnef}$	resistencia material a compresión

4. Placa base:

4.1. Apalancamiento:

$$Tr := \frac{R_{ntp}}{0.75} = 8.009 \cdot \text{tonnef} \quad \text{resistencia requerida por perno} \quad \boxed{t_{min} := \sqrt{\frac{4.44 \cdot Tr \cdot B'}{p \cdot R_t \cdot F_{uc}}} = 17.883 \cdot \text{mm}} \quad \text{espesor mínimo para evitar apalancamiento}$$

4.2. Tracción pernos:

$$\boxed{R_{n1} := N_p \cdot R_{ntp} = 48.053 \cdot \text{tonnef}} \quad TP := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } R_{n1} \geq R_{Te} \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$$

5. Placa gusset:

5.1. Fluencia:

$$Rn2 := 0.9 \text{Agg} \cdot Fyc = 33.039 \text{-tonnef}$$

$$TG := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } Rn2 \geq RTe \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \begin{cases} \text{"OK"} \\ \text{"MAL"} \end{cases}$$

5.2. Pandeo:

$$kpg := 1 \quad \lambda_{yg} := \frac{kpg \cdot Lbg}{ryg} = 14.434 \quad F_{\text{cw}} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda_{yg}^2} = 9.475 \times 10^3 \cdot \text{MPa} \quad F_{\text{cr}} := \begin{cases} \left(\frac{F_y}{0.658 \cdot F_e} \cdot F_y \right) & \text{if } \lambda_y \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ 0.877 \cdot F_e & \text{otherwise} \end{cases} = 266.799 \cdot \text{MPa}$$

$$Rn3 := 0.9 F_{\text{cr}} \cdot \text{Agg} = 35.259 \text{-tonnef}$$

$$CG := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } Rn3 \geq RCc \\ \text{"MAL"} & \text{otherwise} \end{cases} = \begin{cases} \text{"OK"} \\ \text{"MAL"} \end{cases}$$

5.3. Corte soldadura gusset - placa base:

$$Dwgmin := \frac{Ry \cdot Fyc \cdot eg}{Sp \cdot 0.75 \cdot F_{ew} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 2} \quad \text{Dwgmin} = 4.885 \text{-mm} \quad \text{espesor m\u00ednimo electrodo soldadura gusset - placa base}$$

5.4. Corte soldadura gusset - \u00e1ngulo:

$$Dwamin := \frac{Ry \cdot Fy \cdot Aga}{0.75 \cdot F_{ew} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (lc + Sp \cdot b \cdot 2)} \quad \text{Dwamin} = 3.872 \text{-mm} \quad \text{espesor m\u00ednimo electrodo soldadura gusset - \u00e1ngulo considerando soldadura vertical y horizontal}$$

6. Conectores intermedios:

6.1. Dimensiones:

$$Dwc := 4 \text{mm} \quad \text{ancho soldadura} \quad hcmin := 2 \cdot b + d - 4 \cdot Dwc = 90 \text{-mm} \quad \text{altura m\u00ednima} \quad hc := 90 \text{mm} \quad \text{altura}$$

$$bcmin := \frac{2}{3} \cdot hc = 60 \text{-mm} \quad \text{ancho m\u00ednimo} \quad bc := 60 \text{mm} \quad \text{ancho}$$

6.2. Corte soldadura:

$$Dwcmin := \frac{Ry \cdot Fy \cdot Aga}{0.75 \cdot F_{ew} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left(2bc + 2Sp \cdot \frac{hc - d}{2} \right)} \quad \text{Dwcmin} = 4.171 \text{-mm} \quad \text{espesor m\u00ednimo electrodo soldadura conector - \u00e1ngulo considerando soldadura vertical y horizontal}$$

7. Cubicaciones:

$$\rho := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{densidad del acero}$$

$$Vp := Ag \cdot (Lb - 20 \text{mm}) = 1.995 \times 10^3 \cdot \text{cm}^3 \quad \text{volumen perfil} \quad Pp := Vp \cdot \rho = 15.659 \text{kg} \quad \text{peso perfil}$$

$$Vc := hc \cdot bc \cdot d = 32.4 \cdot \text{cm}^3 \quad \text{volumen conectores} \quad Pc := nc \cdot Vc \cdot \rho = 0.763 \text{kg} \quad \text{peso conectores}$$

$$Vg := Agg \cdot 140 \text{mm} = 201.6 \cdot \text{cm}^3 \quad \text{volumen gusset} \quad Pg := 2 \cdot Vg \cdot \rho = 3.165 \text{kg} \quad \text{peso gusset}$$

$$Vpb := 18 \text{mm} \cdot 130 \text{mm} \cdot 240 \text{mm} = 561.6 \cdot \text{cm}^3 \quad \text{volumen placa base} \quad Ppb := 2 \cdot Vpb \cdot \rho = 8.817 \text{kg} \quad \text{peso placa base}$$

$$Pt := Pp + Pc + Pg + Ppb = 28.404 \text{kg} \quad \text{peso del perfil compuesto}$$

E. Plano de fabricación de perfiles:

PLACA GUSSET
Escala 1:5

PL18 130x240
Corte C-C

Vista D-D

RIOSTRA 1
Escala 1:5

RIOSTRA 2
Escala 1:5

RIOSTRA 3
Escala 1:5

Conector Soldado
PL6 90x60
Escala 1:2

Corte A-A
Escala 1:2

Corte B-B
Escala 1:2

Elemento	Unidades	kg/U	kg
Riostra 1	2	18,6	37,3
Riostra 2	2	23,5	47,1
Riostra 3	2	28,4	56,8

Notas:

- Todas las dimensiones en [mm]
- Angulos laminados 50x50x4
- Acero base ASTM A36
- Todas las perforaciones 14 [mm] típicas (pernos de 1/2")
- Todos los conectores soldados de la misma manera al perfil
- Ambas gusset soldadas de la misma forma al perfil
- NO pasar la soldadura por el vértice de los ángulos
- Electrodo de soldadura AWS E70xx

Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Civil

Título de Tesis: Estudios Experimentales de los Modos de Falla Predominantes en Perfiles XL de Acero Estructural

Plano de Fabricación de Perfiles XL y Placa Gusset

Alumno: Robinson Guerrero Madrid
Puntaje: 65,0 G.M.

Fecha: 1 de 1
R.C.M. No. 1569.9138.0879
Ricardo Herrera Maldonado
Fecha: 15 de Marzo 2017

F. Equivalencia de unidades SI

$$1 [tonf] = 1000 [kgf]$$

$$1 [kgf] = 9,8 [N]$$

$$1 [in] = 25,4 [mm]$$

$$1 [lb \cdot ft] = 1,36 [N \cdot m]$$