

**Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil**

Longitud efectiva de pandeo en elementos de armaduras de acero

Proyecto de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

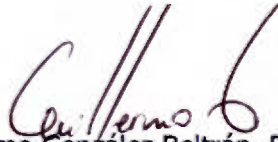
Presenta:

Luis Guillermo Vargas Alas

Director del Proyecto de Graduación:

Ing. Guillermo González Beltrán, Ph.D.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio



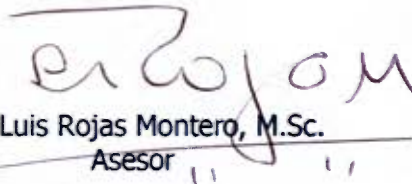
Ing. Guillermo González Beltrán, Ph.D.
Director



Ing. Pío Miranda Jenkins, M.Sc.
Asesor

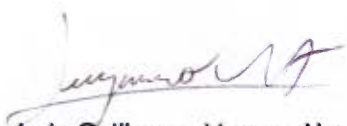


Ing. Francisco Villalobos Ramírez
Asesor



Ing. Luis Rojas Montero, M.Sc.
Asesor

Graduando



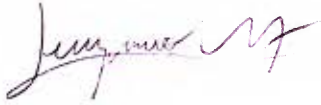
Luis Guillermo Vargas Alas

Derechos de autor

Fecha: 23 de mayo de 2012

El suscrito, Luis Guillermo Vargas Alas, cédula 2-0650-0217, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **A65894**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Longitud efectiva de pandeo en elementos de armaduras de acero**, bajo la Dirección del **Ph.D. Guillermo González Beltrán**, quién en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.



Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Dedicatoria

“Señor, a quien iré si sólo Tú tienes palabras de Vida Eterna” (Evangelio según San Juan 6,68). Jesucristo sea el que reciba toda la honra y la gloria por siempre.

Agradecimientos

Primero a Dios por haber permitido la realización de este proyecto según su voluntad, por los dones que me ha dado y las personas que colocó en el camino.

A mis padres y a mi hermano por el gran esfuerzo que ha significado para ellos llegar a la finalización de mi carrera y por su apoyo incondicional en todo lo que ha implicado la realización de este proyecto.

Al director de este proyecto, Ing. Guillermo González por todo el apoyo que brindó para la realización del mismo. Por depositar su confianza en mí y facilitar todos los aspectos que se necesitaron en el proyecto. Por sus oportunas revisiones y por los consejos en la parte teórica del proyecto.

A mis asesores: Ing. Francisco Villalobos, por todo el apoyo en la fase experimental de este proyecto y sus consejos para realizarlo de la mejor manera. Al Ing. Pío Miranda por todos los consejos en la parte teórica-experimental y por su valioso apoyo cuando fue necesario. Al Ing. Luis Rojas por haber aportado valiosamente en este proyecto, por los consejos y conversaciones de gran interés que se tuvieron con él.

A la Ing. Ana Monge por toda su ayuda en la parte experimental de este proyecto y el apoyo en los momentos que fue necesario. Al Ing. Álvaro Poveda, por haber brindado su criterio en el establecimiento del sistema de carga para los ensayos experimentales y los consejos recibidos. Al Ing. Christopher Quirós, por sus consejos en los aspectos de diseño. A los ingenieros de la Unidad de Puentes del LanammeUCR, Rolando Castillo y María José Rodríguez, por el apoyo brindado en todas las etapas del proyecto y las recomendaciones realizadas.

A los técnicos del laboratorio de Escala Natural y Escala Reducida del LanammeUCR. En especial a Daniel Zamora, Marcos Sandoval, Luis Pablo Blanco y Luis Diego Vargas por su disponibilidad para realizar los trabajos y diligencias necesarios de este proyecto en la fase experimental y la calidad con que realizaron estos trabajos.

Al personal del Taller de Soldadura de la UCR, por los trabajos de excelente calidad que realizaron en los aspectos que se les solicitaron.

A mis tíos: Alonso Vargas y Sergio Vargas por su disponibilidad y la ayuda brindada en la fabricación de los distintos elementos para la realización de las pruebas experimentales. A mi tía Pilar y mis abuelos por el ánimo y la ayuda brindada en lo que mejor ellos saben hacer.

A mis amigos Jimena, Esteban, Laura, Michael, Fau, Jose Paplo, Chino, Dayana, Gaby, Mariela, Lonchi y Sebas. También a mis amigos de la Pastoral Juvenil Huellas de Cristo y del grupo de Jornadas de Jóvenes de Atenas: Isa, María José, Leti, Sandy, Pachi, Jose, Ana Cristina y Susi. Por el apoyo que siempre me han brindado, especialmente en los momentos donde las cosas no salían como se quería. Gracias amigos por sus consejos, por escucharme y darme ánimos.

En fin a todos los que de alguna u otra manera dieron su granito de arena para que este proyecto se llevara a cabo de la mejor manera. Ya sea con su aporte directo y/o con sus palabras de ánimo.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Justificación.....	2
1.1.1. El problema específico	2
1.1.2. Importancia	3
1.1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema.....	4
1.2. Objetivos.....	8
1.2.1. Objetivo general.....	8
1.2.2. Objetivos específicos.....	8
1.3. Delimitación del problema.....	8
1.3.1. Alcance.....	8
1.3.2. Limitaciones.....	10
1.4. Metodología.....	10
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. Armaduras de acero	13
2.2. Longitud efectiva de pandeo	14
2.2.1. Longitud efectiva de pandeo para elementos de armaduras especificada en los códigos y guías de diseño.....	17
2.3. Modelos para determinar la carga crítica de pandeo en la cuerda en compresión de una armadura.....	21
2.3.1. Modelo de la cuerda con fuerza en compresión constante y sin rigideces intermedias.....	22
2.3.2. Modelo de la cuerda con fuerza en compresión constante y con rigideces intermedias.....	23

2.3.3.	Modelo de la cuerda sin rigideces intermedias y con fuerza en compresión variable entre nudos	26
2.3.4.	Modelo de la cuerda con restricciones intermedias y carga variable	28
CAPÍTULO 3.	DISEÑO DE ARMADURAS DE ACERO CON PERFILES FORMADOS EN FRÍO ..	35
3.1.	DISEÑO DE ELEMENTOS EN TENSION	35
3.1.1.	Cedencia en la sección bruta.....	35
3.1.2.	Ruptura en la sección neta lejos de la conexión.....	35
3.1.3.	Ruptura en la sección neta en la conexión	36
3.2.	DETERMINACIÓN DE LA SECCIÓN EFECTIVA.....	36
3.2.1.	Ancho efectivo.....	37
3.3.	DISEÑO DE ELEMENTOS EN COMPRESIÓN.....	40
CAPÍTULO 4.	CAPACIDAD DE LOS ELEMENTOS DE LAS ARMADURAS	43
4.1.	Suposiciones de diseño.....	43
4.2.	Clasificación de la sección transversal	43
4.2.1.	Según AISI S100-2007	43
4.2.2.	Según AISC 360-10.....	44
4.3.	ANÁLISIS y diseño de los elementos de la armadura	44
4.3.1.	Modelo estructural	44
4.3.2.	Elementos verticales	49
4.3.3.	Elementos diagonales.....	50
4.3.4.	Cuerda en tensión.....	51
4.3.5.	Cuerda en compresión	53
4.4.	Conexiones	54
4.4.1.	Conexión soldada	55

4.5.	Carga máxima que se puede aplicar a los especímenes	55
CAPÍTULO 5.	Programa Experimental.....	57
5.1.	Ensayo para la determinación de propiedades del acero en tensión	57
5.1.1.	Generalidades	57
5.1.2.	Parámetros del ensayo.....	58
5.2.	Ensayos en compresión de los elementos representativos de la armadura.....	62
5.2.1.	Generalidades	62
5.2.2.	Ensayo de columna corta	62
5.2.3.	Ensayo de compresión en especímenes representativos de la longitud entre nudos de la armadura	67
5.2.4.	Ensayo de compresión en especímenes representativos de la longitud sin arriostrar de la armadura	69
5.3.	Ensayos sobre los especímenes tipo armadura.....	73
5.3.1.	Generalidades	73
5.3.2.	Parámetros del ensayo.....	74
CAPÍTULO 6.	Resultados Experimentales.....	87
6.1.	Ensayo para la determinación de propiedades del acero en tensión	87
6.2.	Ensayos en compresión de los elementos representativos de la armadura.....	93
6.2.1.	Ensayo de columna corta	93
6.2.2.	Ensayo de compresión en especímenes representativos de la longitud entre nudos de la armadura	98
6.2.3.	Ensayo de compresión en especímenes representativos de la longitud sin arriostrar de la armadura	99
6.3.	Ensayos sobre los especímenes tipo armadura.....	102

6.3.1.	Espécimen C1-1.....	103
6.3.2.	Espécimen C1-2.....	107
6.3.3.	Espécimen C2-1.....	108
6.3.4.	Espécimen C2-2.....	109
6.3.5.	Espécimen C3-1.....	109
6.3.6.	Espécimen C3-2.....	110
6.3.7.	Resumen y comparación de los resultados.....	111
CAPÍTULO 7. Análisis de Resultados.....		117
7.1.	Ensayo para la determinación de propiedades del acero en tensión.....	117
7.2.	Ensayos en compresión de los elementos representativos de la armadura.....	119
7.2.1.	Ensayo de columna corta.....	119
7.2.2.	Ensayo de compresión en especímenes representativos de la longitud entre nudos de la armadura.....	120
7.2.3.	Ensayo de compresión en especímenes representativos de la longitud sin arriostrar de la armadura.....	121
7.3.	Ensayos sobre los especímenes tipo armadura.....	123
7.3.1.	Espécimen C1-1.....	123
7.3.2.	Resto de los especímenes.....	126
CAPÍTULO 8. Conclusiones y recomendaciones.....		133
8.1.	Conclusiones.....	133
8.2.	Recomendaciones.....	136
Bibliografía.....		139

Apéndices.....	143
Apéndice A: Análisis de las armaduras de ensayo	143
Apéndice B: Memoria de cálculo del Diseño de las armaduras.....	144
Apéndice C: Memoria de cálculo de la capacidad local de las conexiones	154
Apéndice D: Especímenes de ensayo tipo armadura.....	166
Apéndice E: Resultados de los ensayos de probetas de acero en tensión	168
Apéndice F: Resultados de los ensayos de compresión en especímenes de columna corta	171
Apéndice G: Resultados del ensayo de compresión en los especímenes representativos de la longitud entre nudos.....	176
Apéndice H: Resultados de las pruebas sobre el espécimen C1-1	179
Apéndice I: Resultados complementarios para los especímenes tipo armadura.....	197
 Anexos.....	 213
Anexo 1. Propiedades geométricas de las secciones de tubo estructural brindadas por el fabricante.....	213

Índice de figuras

Figura 1.1. Esquema del problema a estudiar.....	3
Figura 1.2. Metodología para la elaboración del proyecto.....	12
Figura 2.1. Factor de longitud efectiva	15
Figura 2.2. Nomogramas de Kavanagh.....	17
Figura 2.3. Longitud efectiva de pandeo para elementos de armaduras en Norma SIA-263..	19
Figura 2.4. Modelo para la cuerda superior de la armadura, sin restricciones intermedias en la longitud de pandeo.....	22
Figura 2.5. Modelo de para un elemento con apoyos elásticos.....	23
Figura 2.6. Modelo para la determinación de la carga crítica de pandeo de un elemento con apoyos elásticos.	24
Figura 2.7. Modelo para un elemento en compresión con carga intermedia.	26
Figura 2.8. Notación de las ecuaciones de Shrivastava. Cada punto numerado como 1, 2,..., N representa un nudo de la armadura.	27
Figura 2.9. Modelo de un elemento con carga axial distribuida y apoyado en una fundación elástica con rigidez β	29
Figura 2.10. Variación del factor de longitud efectiva de pandeo con la rigidez del apoyo elástico distribuido uniformemente según los datos de Timoshenko.	31
Figura 2.11. Forma que adoptarían los elementos diagonales y verticales cuando se da el pandeo en la cuerda en compresión.....	32
Figura 3.1. Elementos atiesados en compresión uniforme	38
Figura 3.2. Elementos atiesados sometidos a un gradiente de esfuerzos	39
Figura 4.1. Configuración N° 1 de la armadura de prueba.....	45
Figura 4.2. Configuración N° 2 de la armadura de prueba.....	46
Figura 4.3. Configuración N° 3 de la armadura de prueba.....	46
Figura 4.4. Sección de tubo estructural	48
Figura 4.5. Conexiones típicas en las armaduras.	49
Figura 4.6. Modelo para analizar la armadura como una viga simplemente apoyada.....	52
Figura 5.1. Dimensiones especificadas para los especímenes de ensayo en tensión.....	58
Figura 5.2. Probetas para el ensayo a tensión. De derecha a izquierda: Especímen 1, Especímen 2, Especímen 3.....	59
Figura 5.3. Máquina Universal MTS 810 del LanammeUCR	60

Figura 5.4. Montaje para el ensayo de tensión del material. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral	61
Figura 5.5. Máquina Universal SATEC.....	64
Figura 5.6. Esquema del montaje experimental.....	66
Figura 5.7. Montaje experimental y espécimen típico para el ensayo de columna corta.....	66
Figura 5.8. Montaje experimental y espécimen típico para el ensayo de especímenes representativos de la longitud entre nudos de las armaduras.	68
Figura 5.9. Montaje experimental y espécimen típico para el ensayo de especímenes representativos de la longitud sin arriostrar de las armaduras.	70
Figura 5.10. Base del montaje con pivote para los especímenes de longitud no arriostrada..	71
Figura 5.11. Gato hidráulico utilizado para realizar la carga a los especímenes.....	72
Figura 5.12. Especimen C1-1.....	74
Figura 5.13. Proceso constructivo de las armaduras.	75
Figura 5.14. Fotografía de conexiones típicas en las armaduras.....	76
Figura 5.15. Placas de transmisión de carga. Dimensiones en mm.....	77
Figura 5.16. Montaje N° 1.....	79
Figura 5.17. Montaje N° 2, realizado para cumplir con los requisitos de AISI.....	80
Figura 5.18. Apoyos para montaje	81
Figura 5.19. Sistema de aplicación de carga	82
Figura 5.20. Elementos de transmisión de carga	82
Figura 5.21. Posición de los LVDT y las galgas extensométricas.....	83
Figura 5.22. Detalle de una galga extensométrica.	84
Figura 5.23. Sistemas de control del ensayo	84
Figura 5.24. Gato hidráulico servocontrolado MTS.....	85
Figura 6.1. Gráfico esfuerzo-deformación unitaria, típico. Se muestra el gráfico para el espécimen 2.	88
Figura 6.2. Modo de falla típico de las probetas de acero.	89
Figura 6.3. Medida de la dimensión C_{FINAL}	92
Figura 6.4. Gráfico representativo carga-desplazamiento entre cabezas de la máquina, para el espécimen de columna corta 1.	94
Figura 6.5. Modo de falla típico para los especímenes de columna corta. Se muestra el espécimen 1.	95

Figura 6.6. Método del desplazamiento para determinar el esfuerzo de cedencia	96
Figura 6.7. Falla típica de pared en los especímenes.....	98
Figura 6.8. Pandeo global típico. Especímen 3 después de la falla.....	98
Figura 6.9. Deformación en los especímenes: (1) Especímen 1, post-ensayo. (2) Especímen 2 durante el ensayo. (3) Especímen 2 invertido, post ensayo	101
Figura 6.10. Falla local en el espécimen C1-1, al realizar el ensayo nº 4.....	104
Figura 6.11. Deformación por pandeo en el espécimen C1-1.	105
Figura 6.12. Falla en la soldadura del elemento diagonal central del espécimen C1-1.	105
Figura 6.13. Deformación por pandeo en el espécimen C1-2.	107
Figura 6.14. Deformación por pandeo en el espécimen C2-1.	108
Figura 6.15. Deformación por pandeo en el espécimen C3-1.	110
Figura 6.16. Deformación por pandeo en el espécimen C3-2.	111
Figura 6.17. Comparación entre los gráficos carga aplicada-desplazamiento máximo en el plano para todos los especímenes.....	113
Figura 6.18. Comparación entre los gráficos carga aplicada-desplazamiento fuera del plano para todos los especímenes.....	114

Índice de cuadros

Cuadro 2.1.Comparación entre los valores de longitud efectiva establecidos en las especificaciones de diseño para armaduras de cuerdas paralelas.....	21
Cuadro 2.2. Variación del factor de longitud efectiva de pandeo (K) con la rigidez del apoyo elástico distribuido uniformemente.	31
Cuadro 4.1.Dimensiones generales de las armaduras de prueba.....	45
Cuadro 4.2. Propiedades geométricas de la sección utilizada en las armaduras.....	47
Cuadro 4.3.Demandas y capacidad de los elementos verticales de la armadura	50
Cuadro 4.4.Demandas y capacidad de los elementos diagonales de la armadura	51
Cuadro 4.5.Resultados del análisis para determinar la longitud de pandeo de Timoshenko ..	54
Cuadro 4.6.Resistencia de la cuerda superior de las armaduras.....	54
Cuadro 4.7.Capacidad de las conexiones soldadas.....	55
Cuadro 4.8. Obtención de la carga máxima que se puede aplicar al espécimen según cada estado límite.....	56
Cuadro 5.1. Tolerancia en las dimensiones de los especímenes	58
Cuadro 5.2. Capacidad nominal de los especímenes representativos de la longitud sin arriostrar	72
Cuadro 6.1.Dimensiones de las probetas de acero.....	87
Cuadro 6.2.Resultados obtenidos para los especímenes del ensayo en tensión del acero.	91
Cuadro 6.3. Dimensiones de los especímenes de columna corta	93
Cuadro 6.4. Propiedades geométricas obtenidas para los especímenes	94
Cuadro 6.5.Resumen de los resultados para los especímenes de columna corta.....	97
Cuadro 6.6.Resumen de los resultados para los especímenes representativos de la longitud entre nudos.....	99
Cuadro 6.7.Resumen de los resultados para los especímenes representativos de la longitud sin arriostrar	99
Cuadro 6.8.Resumen de pruebas realizadas sobre el espécimen C1-1	106
Cuadro 6.9. Resumen de resultados para los especímenes tipo armadura	115
Cuadro 6.10. Comparación de los resultados obtenidos para las razones entre las fuerzas elásticas F_A/P , F_B/P y F_A/F_B	116
Cuadro 7.1. Comparación de los resultados obtenidos y los requisitos del CSCR-2010	118

Vargas Alas, Luis Guillermo

Longitud efectiva de pandeo en elementos de armaduras de acero
Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:
L.G. Vargas A., 2012
xx, 142, [71]h; ils. col. – 25 refs.

RESUMEN

Se determina experimentalmente la longitud efectiva de pandeo fuera del plano de las cuerdas en compresión de una armadura de acero con el fin de comprobar si son consistentes con un análisis por pandeo elástico y con lo recomendado en códigos de diseño. En el diseño, si se utiliza la longitud entre nudos puede ser muy poco conservador; la longitud sin restricción lateral es conservadora ya que los elementos diagonales y verticales, unidos a la cuerda, le aportan rigidez y permiten una reducción de la longitud de pandeo. En la cuerda en compresión hay una variación en las fuerzas internas, lo cual, hace cuestionarse cuál fuerza de diseño utilizar, pareciera ser conservador utilizar la fuerza mayor.

Los ensayos experimentales se realizan en un sistema de montaje preparado y probado adecuadamente. Los especímenes de ensayo consisten en una armadura de cuerdas paralelas de tres configuraciones distintas. Las armaduras se diseñan para la falla por pandeo en la cuerda en compresión. Se realizan ensayos de caracterización del material, de las secciones y de los elementos representativos de las armaduras.

La longitud de pandeo obtenida de las armaduras probadas corresponde a un 43% de la longitud sin restricciones laterales, según la ecuación de Euler. La longitud de pandeo establecida por Timoshenko es de un 22% de la longitud no arriostrada. La fuerza de diseño es la mayor que se produce en la cuerda en compresión. Se justifica realizar análisis para determinar la longitud de pandeo en las cuerdas de las armaduras que consideren la variación en las fuerzas internas en la cuerda y el aporte de rigidez de los elementos diagonales y verticales. Los valores de longitud efectiva dados en los códigos de diseño para armaduras de acero son muy conservadores. L.G.V.A.

ESTRUCTURAS; ARMADURAS; ACERO; PANDEO; LONGITUD EFECTIVA.

Ing. Guillermo González Beltrán, Ph.D.
Escuela de Ingeniería Civil

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Las armaduras de acero son estructuras que se utilizan en varias aplicaciones. Se pueden observar en techos, como parte del sistema estructural de naves industriales, en puentes y en otras estructuras. Su versatilidad en aplicaciones, la facilidad del diseño y el bajo costo, que generalmente poseen, hacen que sean atractivas como solución estructural.

La idealización estructural que se realiza en las armaduras hace que su análisis sea relativamente sencillo. Se establece que los ejes centroidales de los elementos se intersecan en un punto y los elementos sólo se deforman axialmente (por ende sólo toman carga axial). Pero al construir la armadura es muy difícil llegar a las condiciones que se modelaron y generalmente se da mayor rigidez a los elementos en sus uniones.

El diseño en compresión de los elementos de las armaduras podría ser conservador, debido a la idealización que se hace de la estructura. La longitud efectiva de pandeo es una de las propiedades que pueden hacer que los resultados sean conservadores. El modelado estructural establece condiciones articuladas en las conexiones de los miembros en el plano de la armadura, que en realidad no se darán. Además, considera longitudes efectivas mayores para los elementos que se pandean fuera del plano (principalmente las cuerdas en compresión). Esto, sin considerar las variaciones de fuerza interna en estos elementos, ni el aporte en rigidez que le dan los miembros conectados a este elemento.

Los métodos de diseño, establecidos en códigos y manuales, son conservadores en el diseño en compresión de los elementos de las armaduras. Principalmente, en los elementos tipo cuerda, que se pandean fuera del plano de la armadura, ya que se considera una longitud de pandeo como la longitud entre restricciones laterales de la armadura. No se considera la rigidez de las uniones con el resto de elementos de la armadura, ni la variación de fuerzas internas en la cuerda. Todos estos documentos coinciden en que se pueden realizar análisis experimentales y analíticos para determinar de una manera más precisa la longitud efectiva de los elementos de las armaduras.

En este proyecto de graduación se realiza un análisis experimental de una armadura de cuerdas paralelas, con diferentes configuraciones de los elementos que la componen. El

estudio se centra en la determinación del pandeo de la cuerda en compresión de una armadura. Además, los resultados se comparan con un modelo de pandeo establecido por Timoshenko.

El resultado principal es la determinación experimental de la longitud efectiva de pandeo. Posteriormente, se efectúa una comparación entre los valores que recomiendan los códigos de diseño para evaluar que tanto varía el resultado experimental con lo propuesto en los códigos para este tipo de armadura. Además, se evalúa la validez del modelo teórico utilizado para predecir las cargas a las cuales se inicia el pandeo.

1.1. JUSTIFICACIÓN

1.1.1. El problema específico

La longitud efectiva de pandeo en miembros estructurales ha demostrado ser un método efectivo en el cálculo de cargas críticas de elementos como columnas y vigas en marcos rígidos. Sin embargo, en elementos de armaduras que están sometidos a compresión, la determinación de la longitud efectiva no está claramente definida en los códigos de diseño actuales.

Por ejemplo, los elementos superiores e inferiores (cuerdas) en una armadura, generalmente son un elemento continuo que puede tener algunas uniones. La existencia de estas uniones depende de las dimensiones de la armadura. Los elementos diagonales y verticales se conectan a las cuerdas. Si la armadura se analiza en dos dimensiones, las longitudes efectivas serían las longitudes de los elementos entre conexiones. Sin embargo, cuando la armadura se analiza en tres dimensiones se debe considerar el pandeo fuera del plano. Lo anterior se minimiza colocando elementos que restringen la translación de algunos nudos de la armadura en la dirección fuera del plano.

El problema radica entonces en cuál longitud efectiva se debe utilizar para las cuerdas en compresión: ¿La longitud total entre restricciones fuera del plano o la longitud entre nudos? Si la respuesta es la primera, entonces se genera otra pregunta: ¿Cuál fuerza de diseño utilizar? Pareciera ser muy conservador utilizar la fuerza de diseño mayor en los elementos

que se encuentran entre las restricciones. Por otro lado, si se utiliza la longitud entre nudos, el resultado podría ser no conservador (ver figura 1.1)

En este proyecto de graduación se realiza una medición experimental de la longitud efectiva de las cuerdas en compresión de una armadura, según lo descrito anteriormente. También se estudia el modo de pandeo y se verifica si los resultados concuerdan con las hipótesis planteadas.

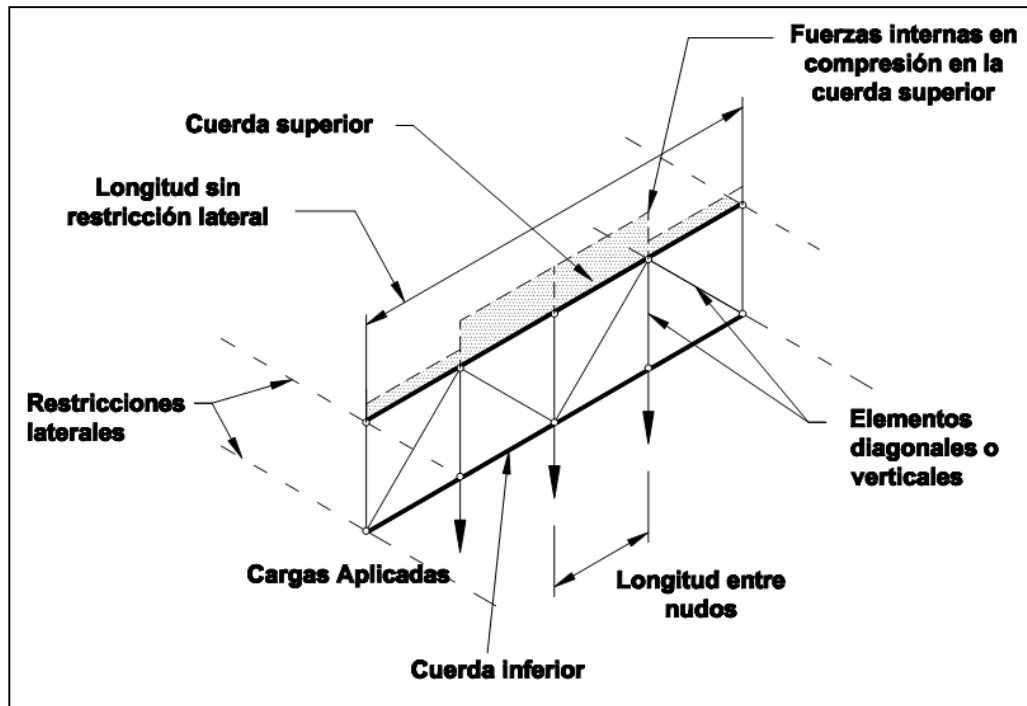


Figura 1.1. Esquema del problema a estudiar.

1.1.2. Importancia

El pandeo ha sido estudiado y discutido a lo largo de la historia. Desde que Leonard Euler planteó su ecuación para pandeo elástico (ver ecuación 2-1) hasta la actualidad, ha sido un fenómeno que requiere ser evitado en las estructuras. La falla por pandeo generalmente es repentina y hace que el elemento pierda su capacidad de tomar carga sin haber llegado a su resistencia última.

En el diseño de los elementos en compresión de armaduras se busca evitar la falla por pandeo. De hecho, en muchas aplicaciones se arriostra bien la armadura para evitar este

modo de falla. Sin embargo, las demandas de formas estructurales a veces no permiten que los elementos en compresión de la armadura se puedan arriostrar. Por tanto, los diseños se deben realizar considerando primordialmente esta falla por estabilidad.

El estudio del pandeo en los miembros en compresión de las armaduras se ha llevado a cabo por varios investigadores. El hecho de que en el modelado se utilicen articulaciones en las uniones de los miembros, ha generado cuestionamientos con respecto a la determinación de la longitud efectiva de estos elementos. Además, cuando las armaduras no están restringidas fuera del plano, se generan dudas con respecto a la forma en que pandean los elementos puesto que no se tiene claro cómo calcular la longitud efectiva.

La importancia de esta investigación radica en que al determinar la longitud efectiva, por medio de un modelo experimental de una armadura, se tiene más información que respalde los modelos teóricos utilizados actualmente. Los valores de longitud efectiva que se obtienen pueden inducir a nuevas investigaciones que produzcan modelos teóricos más refinados para armaduras. Además, con los resultados que se obtuvieron se podrían realizar diseños más seguros y económicos.

Por otro lado, se produce conocimiento acerca del desempeño de los elementos de acero que se utilizan en las armaduras en Costa Rica, puesto que no existen estudios en el país respecto a este tema. Con ello se da pie a un análisis más exhaustivo del desempeño de los materiales, perfiles y métodos constructivos utilizados en las armaduras costarricenses.

1.1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema

En la mayoría de los textos sobre diseño de estructuras se puede encontrar la ecuación de Leonard Euler para la determinación de la carga crítica de pandeo P_{cr} (ver ecuación 2-1). En ella se puede observar que esta carga crítica depende de la rigidez del elemento en flexión (EI , E : módulo de elasticidad e I : momento de inercia alrededor del cual ocurre el pandeo), de la longitud entre apoyos y las condiciones de apoyo que este tenga. Estos dos últimos aspectos son los que determinan la longitud efectiva de pandeo L_e .

En la solución de la ecuación diferencial de la elástica, para diferentes condiciones de apoyo, se obtienen diferentes cargas críticas de pandeo. Las mayores cargas se obtienen para las

condiciones más restrictivas como los empotramientos (Popov, 2001). Para no calcular la solución para cada condición de apoyo se usa la misma fórmula para carga crítica del caso general (apoyos simples en los extremos) pero con longitudes efectivas que dependen de las restricciones en los extremos (ver figura 2.1). Por tanto la longitud efectiva aumenta al disminuir la restricción en el extremo del elemento.

La especificación para el diseño de edificios de acero (AISC, 2010) recomienda el uso de los factores de longitud efectiva teóricos para el cálculo de la carga crítica de pandeo. No obstante, cuando las restricciones no son un apoyo como una articulación o un empotramiento, se considera la rigidez de los elementos en los extremos del miembro analizado. Para encontrar la longitud efectiva se utilizan las ecuaciones que se muestran en el comentario del Apéndice 1 sobre estabilidad (AISC, 2010). Esta metodología se aplica a marcos de edificios y aproxima mejor el valor del factor de longitud efectiva. Sin embargo, su uso está sujeto a varias restricciones como: comportamiento puramente elástico, secciones constantes, juntas rígidas, pandeo simultáneo de columnas, entre otras.

La determinación de la longitud efectiva en armaduras se asume como un caso de una columna articulada en sus extremos (Vinnakota, 2006). Este método ha sido discutido por investigadores como Timoshenko (1963), Shrivastava (1980), Galambos (1998), Dekker y Burdzik (2005) y Dunaiski (2008), debido a que las condiciones de apoyo que se modelan en armaduras (articulaciones) no son las que realmente se tienen.

Una aproximación al uso de la longitud efectiva en los miembros en compresión de armaduras se da en la Norma Suiza SIA 263 (Citada en Dunaiski, 2008) y en la Guía de Criterios de Diseño por Estabilidad (Guía SSRC, Galambos, 2005). En ambas, se establecen recomendaciones para determinar la longitud efectiva en las armaduras. En estos documentos se recomienda realizar estudios con algunos métodos teóricos y experimentales.

Timoshenko (1963), establece métodos matemáticos para la determinación de la carga crítica de pandeo en elementos sometidos a distintas condiciones. Las condiciones a las que se ve sometida la cuerda en compresión de una armadura, como ya se ha recalado, son: fuerzas internas en compresión variables y puntos de rigidez, dados por los elementos verticales y diagonales. Timoshenko (1960), ha desarrollado expresiones para estos

problemas, tratados por separado o de manera conjunta. Muchas de esas expresiones son complejas y de gran dificultad para su solución.

Cómo bien establecen Dekker y Burdzik (2005), el tomar un valor unitario para el factor de longitud efectiva en las cuerdas de armaduras de acero, es conservador en la dirección fuera del plano. Por ello proponen un análisis racional del pandeo de estos elementos para determinar una longitud efectiva que estime mejor la carga crítica. El análisis que estos autores realizan es complejo, pero se basa en conceptos de estática y estabilidad. Por otro lado, la investigación teórica la realizan para probar los criterios que utilizan algunos programas y códigos para determinar las cargas críticas de pandeo. La mayor parte de su análisis, ya ha sido tratado por Timoshenko (1963)

Con respecto al hecho de la variación de cargas en las cuerdas en compresión de armaduras se han realizado estudios como el de Shrivastava (1980) o el de Galambos (1998). El primero realiza un análisis matemático para determinar la carga crítica de pandeo. De su análisis se puede derivar un valor del factor de longitud efectiva de la cuerda. Por otro lado, Galambos establece una ecuación para determinar este factor cuando hay variación de cargas en los elementos. Sin embargo, este caso se utiliza generalmente cuando el elemento se divide en dos partes y por consiguiente se tienen dos cargas distintas. Timoshenko (1963) también había tratado ya este problema, pero de una manera más compleja que Shrivastava (1980).

En Sudáfrica, Wibke Dunaiski (2008) realizó pruebas experimentales. Su investigación está enfocada en el comportamiento de los elementos diagonales y verticales de las armaduras, para establecer si el factor de longitud efectiva se puede reducir a valores menores que la unidad. Además, su estudio se centra en un análisis en el plano de la armadura. Los resultados que obtuvo mostraron que los elementos diagonales y verticales tuvieron fallas fuera del plano de la armadura. Esto fue contrario a lo que el investigador esperaba. Sin embargo, brinda un primer paso para dar validez a un análisis por pandeo fuera del plano de los elementos de las armaduras.

En Costa Rica no se han realizado investigaciones formales con respecto al pandeo de los elementos de armaduras de acero. La mayor parte de los estudios han sido realizados en diferentes países del mundo. Sudáfrica es el país en el que se han desarrollado

investigaciones en los últimos años. Este proyecto de graduación pretende iniciar con la investigación sobre el pandeo en armaduras de acero en Costa Rica.

Un antecedente sobre la posible aplicación de la investigación del pandeo en armaduras es una evaluación estructural realizada por la empresa consultora costarricense Luis Rojas e Ingenieros Asociados S.A. En el informe, presentado en el año 2005, se evalúa la capacidad estructural de los sistemas que conforman un Gimnasio ubicado en Managua, Nicaragua. La estructura consta de columnas de concreto en las cuales se apoyan las armaduras de acero que componen el techo. La discusión surgió cuando en informes anteriores, realizados por otros profesionales, se estableció que las armaduras no soportaban las cargas impuestas. Esto se presentó principalmente en los elementos en compresión de la armadura. Además, se quería realizar un cambio en el uso de la estructura: pasaría de ser un gimnasio a un auditorio.

Los resultados del informe concluyen que las armaduras (y la estructura en general) no son capaces de soportar las cargas a las que habían estado sometidas desde la construcción del edificio. No obstante, surge la duda sobre la longitud de pandeo que se debe tomar en las cuerdas de la armadura. Esto porque los ingenieros, que hicieron los cálculos anteriores, determinaron longitudes de pandeo grandes que redujeron considerablemente la capacidad en compresión. Esto pudo ser debido a la recomendación dada en códigos donde se permite determinar la longitud no arriostrada como la longitud de pandeo. Las longitudes no arriostradas rondaban los 8,0 m. Lo contrario sucedía al tomar la longitud de pandeo como la longitud entre nudos (1,15 m, la séptima parte). En ese caso la capacidad aumentaba considerablemente.

En el informe se presenta un experimento sencillo con elementos de madera a escala para explicar el comportamiento de los elementos en compresión de las armaduras. En ese experimento se demuestra la diferencia entre un elemento individual comprimido y el mismo elemento cuando es parte de la cuerda de una armadura de madera sometida a una carga de compresión similar. Se puede notar así que mientras el elemento individual comprimido pandeo fácilmente, con la misma carga, el mismo elemento, al ser parte de la armadura, no tiene deformación perceptible visualmente.

En este informe se plantea la importancia de realizar un estudio formal que permita determinar con mayor precisión la longitud de pandeo en armaduras. El problema específico se da en el pandeo fuera del plano de la armadura y cuando las restricciones laterales producen claros libres muy grandes.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Determinar experimentalmente la longitud efectiva de pandeo de las cuerdas en compresión de una armadura de acero con el fin de comprobar si son consistentes con la teoría existente.

1.2.2. Objetivos específicos

- Comparar los valores de longitud efectiva para cuerdas de armaduras establecidos en los códigos o manuales de diseño (AISC, AISI, Guía SSRC, entre otros)
- Realizar una estimación del valor de la longitud efectiva para cuerdas a compresión de armaduras utilizando un modelo analítico representativo.
- Determinar la carga a la cual se dará la condición de falla por pandeo.
- Diseñar un modelo experimental que induzca la falla por pandeo en la cuerda en compresión.
- Determinar las propiedades del material y las secciones que se usarán en el modelo.
- Ejecutar la falla del espécimen diseñado.
- Comparar el resultado de longitud efectiva obtenido en las pruebas experimentales con el modelo teórico establecido y las recomendaciones de códigos y manuales de diseño.
-

1.3. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1. Alcance

El estudio se centra en la determinación de la longitud efectiva de la cuerda en compresión, como elemento crítico, de una armadura de acero definida durante la investigación (ver sección 5.3). El análisis de la armadura es tridimensional. Los elementos verticales y diagonales se diseñan de modo que se evite su falla y se induzca la falla por pandeo de la cuerda comprimida.

El análisis de los elementos de la armadura se realizó de acuerdo con los criterios de resistencia última ó LRFD (Siglas en inglés de Diseño por factores de Carga y Resistencia). Las conexiones se diseñan con la misma metodología. El método utilizado se basa principalmente en la especificación AISI S100-2007 y AISC 360-2010. Se realiza un análisis estructural de primer orden.

El análisis para determinar la carga crítica de pandeo debida a los elementos en compresión de la armadura, se fundamenta en un modelo teórico planteado por Timoshenko (1963). Se trabaja con el modelo más representativo de las condiciones a las que está sometida la cuerda en compresión de la armadura. Se utilizan también en los estudios de Dekker y Burdzik (2005), Shrivastava (1980), Galambos (1998) y los resultados de la investigación experimental de Dunaiski (2008).

Se realizan pruebas de tensión al material de la armadura con el fin de determinar las propiedades de esfuerzo de fluencia (F_y), esfuerzo último (F_u) y las deformaciones correspondientes (ϵ_y , ϵ_u). Además, se realizan pruebas en compresión a los elementos para determinar el esfuerzo crítico en compresión (F_c) y la carga crítica de falla de los elementos representativos de la armadura (P_n). Los elementos representan la longitud libre entre nudos y la longitud total de la cuerda comprimida respectivamente. Esto permite realizar una comparación entre los resultados obtenidos.

El espécimen de ensayo consiste en una armadura de acero de cuerdas paralelas con elementos verticales y diagonales (ver figura 1.1). Se utiliza un modelo a escala real. El tamaño del modelo está en función de las posibilidades del laboratorio. Se utiliza esta configuración por el amplio uso en la construcción de edificaciones. Se construyen seis especímenes de ensayo, en tres configuraciones de elementos verticales y diagonales distintas.

En el modelo experimental se utilizan únicamente los perfiles de acero más comunes en la construcción de armaduras en Costa Rica. El tipo de perfil es compacto (AISC 360-10) o de sección totalmente efectiva (AISI S100-2007) para evitar el pandeo local en el elemento en compresión.

Los resultados obtenidos de este análisis son validos para el modo de carga y las configuraciones del espécimen realizadas en el modelo experimental. Sin embargo, cabe la

posibilidad de extender el estudio hacia secciones representativas de armaduras en estructuras reales con investigaciones específicas que se realicen en el futuro.

1.3.2. Limitaciones

Los modelos teóricos que se utilizan para estimar la longitud efectiva están basados en estudios aislados entre sí (Timoshenko, 1963; Shrivastava, 1980 y Dekker y Burdzik, 2005, por ejemplo). Podría ser que la combinación de estos métodos no sea adecuada debido a las suposiciones hechas por cada investigador para desarrollar el método. Se realiza una comparación entre los métodos para determinar si es posible utilizarlos en conjunto para determinar la longitud efectiva de las cuerdas en compresión de la armadura.

1.4. METODOLOGÍA

La metodología a seguir para la elaboración del proyecto propuesto se muestra en la figura 1.2.

El proyecto es de tipo experimental. En un inicio se realiza una recopilación de la información contenida en códigos, normas y guías de diseño sobre la longitud efectiva en cuerdas comprimidas de armaduras de acero. Con esto se obtiene una base de datos para realizar una comparación con los resultados de las pruebas experimentales.

Se realiza un análisis teórico de la configuración de la armadura idónea para realizar las pruebas. Esta configuración logra combinar el efecto de la variación de fuerzas internas en la cuerda en compresión y la conexión con los elementos respectivos. Entonces, por medio de análisis estructurales preliminares, se determina cuál es la mejor configuración y las secciones que se utilizan en los elementos.

En esta misma fase se realiza un diseño que permite la construcción del modelo. Para garantizar un mejor diseño se realizan pruebas al material y las secciones utilizadas. El diseño consiste en una revisión y predicción de carga de falla para lograr el resultado requerido. Además, se obtiene un valor teórico de longitud efectiva fuera del plano y carga crítica de pandeo para la cuerda en compresión. Esto se realiza de acuerdo con los modelos teóricos

que establecen la influencia de la variación de fuerzas internas en el elemento y de los elementos verticales y diagonales que se conectan a la cuerda comprimida.

La fase experimental inicia con la caracterización del material y las secciones. Es decir, la obtención de gráficos esfuerzo-deformación y carga- desplazamiento en el caso de las secciones. Posteriormente, se construye el espécimen de prueba de acuerdo con el diseño realizado. Seguidamente, se determina el montaje idóneo y el planeamiento de la colocación de instrumentos en el espécimen. Luego se define el sistema de carga. Este está en función de las posibilidades del equipo de laboratorio. Finalmente, se procede a la fase de falla del espécimen.

La falla del espécimen se coordina con el laboratorio. Esta se basa en la carga del nudo central de la cuerda en tensión de la armadura para evitar el arriostamiento que pueda generar el sistema de carga en la cuerda en compresión (ver figura 1.1). Es importante realizar las mediciones en la cuerda comprimida para determinar el instante en el cual se produce el pandeo fuera del plano. En este momento, se realiza la medición de carga crítica y de ser posible la medición directa de la longitud de pandeo.

Por último, se realiza un análisis de la información suministrada en el ensayo y se realiza una comparación con la determinación teórica y los parámetros que se recopilaron en la fase inicial.

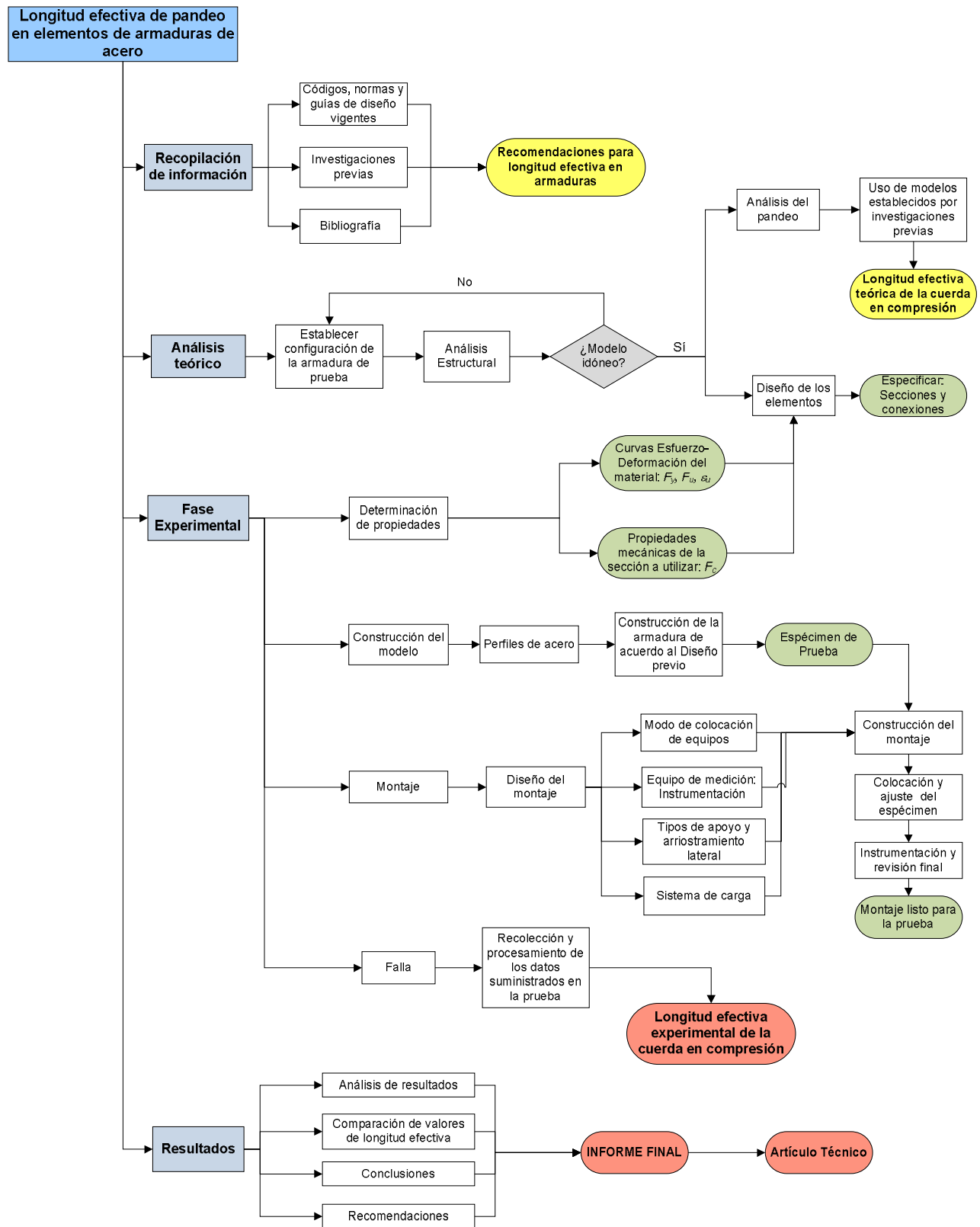


Figura 1.2. Metodología para la elaboración del proyecto.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. ARMADURAS DE ACERO

Una armadura es un conjunto de elementos lineales arreglados en forma de triángulo, o combinación de triángulos, que da lugar a una estructura rígida y plana (Vinnakota, 2006). Las armaduras están compuestas por los siguientes elementos: cuerda superior, cuerda inferior y miembros del alma. Los miembros del alma son los elementos diagonales y verticales que forman el triángulo con las cuerdas. El punto donde se unen los elementos verticales y diagonales con las cuerdas se llama nudo. La longitud libre de la armadura, es decir, que no tiene restricciones fuera del plano, se conoce como claro o longitud sin arriostrar. A la distancia entre dos puntos de unión se conoce como longitud entre nudos.

Las armaduras se construyen de manera que los ejes centroidales de todos sus miembros se intersequen en un punto en común (nudo). Se disponen generalmente de forma que las líneas de acción de las cargas aplicadas y de las reacciones, pasen por los nudos de la armadura.

Usualmente el sistema de apoyo estáticamente determinado de una armadura se define por un apoyo articulado en un extremo y un apoyo de rodillo en el otro. El comportamiento de una armadura de cuerdas paralelas sometida a carga es similar al de una viga I. Se podría considerar que las cuerdas superior e inferior de la armadura soportan el momento flexionante, similar a los patines de la viga I. Los elementos diagonales y verticales soportan las fuerzas cortantes, de manera similar al alma de la viga.

Las armaduras se modelan con las uniones articuladas y sin fricción. Esta suposición hace que los elementos de la armadura solo estén sometidos a tensión o compresión axial. Cuando las armaduras están simplemente apoyadas y sometidas a carga gravitacional, desarrollan fuerzas de compresión en la cuerda superior y fuerzas de tensión en la cuerda inferior. En los elementos diagonales y verticales puede haber tanto tensión como compresión. En caso de que existan cargas de succión por viento, estos efectos se invierten.

En la mayoría de los casos, las armaduras no presentan uniones articuladas. Generalmente están atornilladas o soldadas. Estas uniones en algunos casos se realizan con placas de

unión. El costo de las uniones va en aumento de la siguiente forma: armaduras soldadas, armaduras soldadas con placas, armaduras atornilladas y armaduras atornilladas con placas de unión.

Dado que las armaduras no están articuladas, al recibir carga se introduce flexión en sus elementos. No obstante, generalmente esta flexión es muy pequeña comparada con la carga axial. Esto hace que la suposición de los elementos sometidos sólo a carga axial sea válida.

2.2. LONGITUD EFECTIVA DE PANDEO

Los elementos en compresión largos se rigen por estabilidad. La capacidad estructural de un elemento largo sometido a compresión depende de la geometría de la sección, la rigidez del material (E), la longitud del elemento y las condiciones de apoyo. Estas características hacen que el problema de la determinación de la capacidad estructural de un elemento en compresión sea complejo.

La complejidad del problema aumenta cuando se toma en cuenta, al determinar la capacidad estructural, la influencia de las condiciones de apoyo intermedias existentes. Para reducir esta complejidad se han introducido conceptos como la longitud efectiva de pandeo.

La longitud efectiva de pandeo es una función de las condiciones de extremo del elemento. Así lo ha planteado Leonhard Euler al determinar el valor de longitud efectiva L_e , en la solución de la ecuación diferencial para el pandeo elástico (ecuación 2-1). Las soluciones de esta ecuación han mostrado que la longitud efectiva para condiciones ideales varía según el tipo de apoyos en los extremos del elemento (ver figura 2.1.). Es decir la longitud de pandeo será menor conforme aumentan las restricciones al movimiento tanto en el elemento como en el apoyo. (Popov, 2001)

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad [2-1]$$

Donde:

P_{cr} : carga crítica de pandeo [F]

E : módulo de elasticidad del material [F/L²]

I : momento de inercia alrededor del cual ocurre el pandeo [L⁴]

L_e : longitud efectiva= KL [L]

L : longitud entre apoyos del elemento [L]

K : Factor de longitud efectiva [adimensional]

Como se ha observado en la ecuación, al aumentar la longitud efectiva de pandeo, la carga crítica disminuye. Esto se traduce en una disminución de la capacidad estructural en compresión del elemento. Al aumentar las restricciones intermedias en un elemento se reduce la longitud de pandeo, por ende la carga crítica aumenta.








Valores aproximados del factor de longitud efectiva, K						
La forma pandeada de la columna se presenta en línea de puntos						
Valor teórico de K	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Valor recomendado para diseño cuando se aproximan las condiciones ideales	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
Condiciones de apoyo	 <ul style="list-style-type: none"> Rotación y traslación restringidas Rotación libre y traslación restringida Rotación restringida y traslación libre Rotación y traslación libres 					

Figura 2.1. Factor de longitud efectiva

Fuente AISC, 2010. Modificado por el autor

En la realidad, las condiciones de los apoyos no restringen de la manera modelada a los elementos. Muchas veces, un extremo modelado como articulación puede restringir parcialmente la rotación o un extremo modelado como empotrado puede permitir cierta rotación. Es por esto que en el análisis de estructuras se han utilizado métodos que aproximan las condiciones de extremo. Sin embargo, estos métodos generalmente tienen una cantidad considerable de restricciones en su aplicación. Por ejemplo, se muestran las restricciones para el uso de nomogramas de Kavanagh (1962) (figura 2.2), presentados en la especificación AISC (2010):

1. El comportamiento de los elementos es puramente elástico.
2. Todos los miembros tienen sección constante
3. Todas las juntas son rígidas
4. Cuando el desplazamiento lateral está restringido (elemento arriostrado), las rotaciones en los extremos opuestos de los elementos de apoyo (vigas) son iguales en magnitud, con dirección opuesta y producen flexión en curvatura simple.
5. Cuando el desplazamiento lateral no está restringido (no arriostrado), las rotaciones en los extremos opuestos de los elementos de apoyo son iguales en magnitud y dirección, además producen inversión en la curvatura del elemento.
6. El parámetro de rigidez $L\sqrt{P/EI}$ es igual en todos los elementos en compresión.
7. La restricción en las juntas es distribuida a los elementos, encima y debajo de la junta, en proporción a EI/L , para los elementos analizados que llegan a las juntas.
8. Todos los elementos pandean simultáneamente.
9. En los elementos de apoyo no existe fuerza axial significativa.

Este método se aplica para columnas en marcos estructurales. Existen otros métodos que se pueden utilizar en armaduras. En las secciones siguientes se presentan algunos métodos para determinar la longitud efectiva de pandeo en los elementos de las armaduras. Algunos de los métodos requieren estimar la carga crítica de pandeo para los elementos que conforman la armadura. Por el alcance de esta investigación, se dará especial énfasis a la cuerda en compresión de una armadura de acero. Generalmente, los métodos presentados utilizan criterios de análisis elástico en su desarrollo.

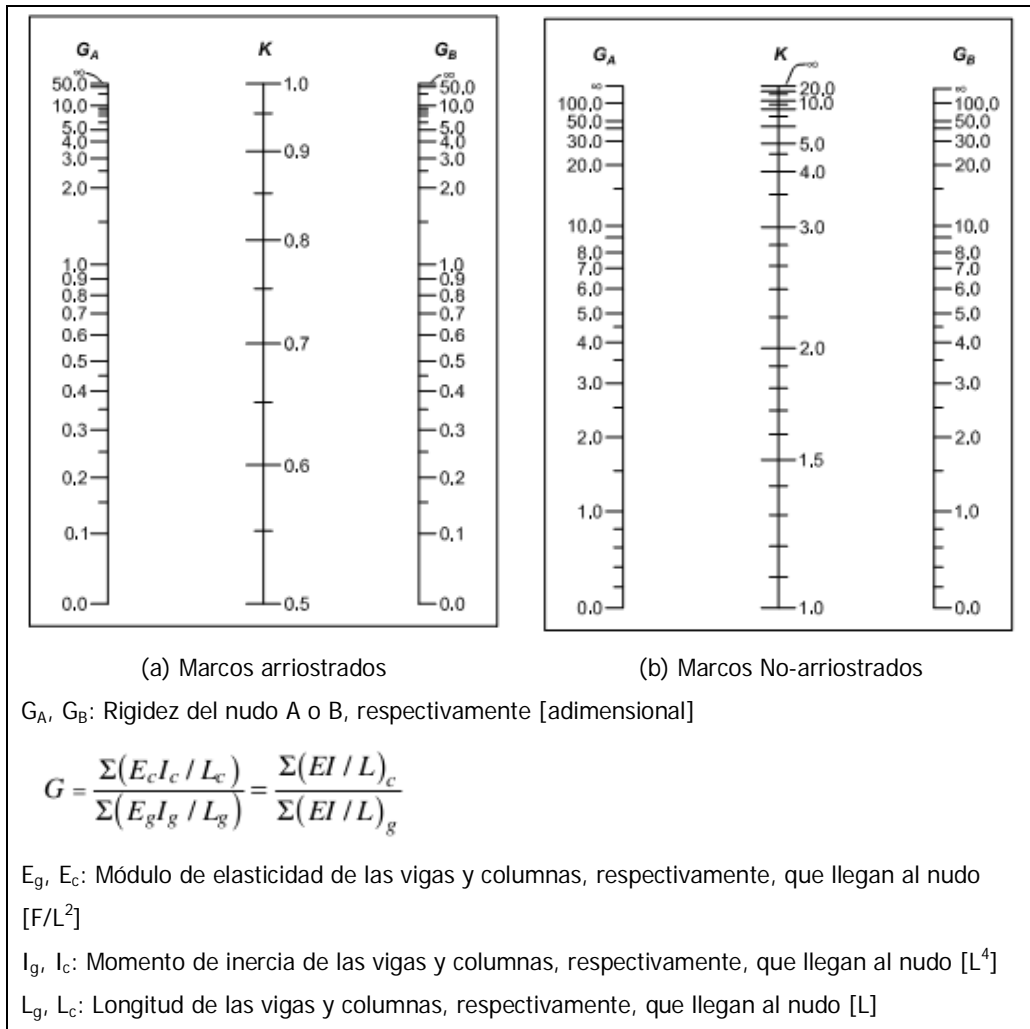


Figura 2.2. Nomogramas de Kavanagh

Fuente AISC, 2010

2.2.1. Longitud efectiva de pandeo para elementos de armaduras especificada en los códigos y guías de diseño

2.2.1.1 Especificación AISC-360 (2010)

Para determinar las cargas de pandeo en los elementos, la especificación de AISC 360, en su edición 2010, establece que se debe realizar un análisis con el método directo. Este consiste en la consideración de las imperfecciones en el modelado de uniones. Con esto se puede obtener la carga crítica de cada elemento sin tener que considerar factores de longitud efectiva ($K=1.0$). No obstante, esta especificación permite la utilización del método de la determinación de la longitud efectiva.

En el manual de AISC, en la 13^{ava} edición (2006), se establece que para los miembros en compresión de las armaduras se utilice un factor de longitud efectiva de $K=1.0$. Este valor considera que los extremos del elemento en análisis se encuentran articulados, tal como se muestra en la figura 2.1. La aplicación del factor de longitud efectiva no hace distinción entre los elementos diagonales, verticales y la cuerda en compresión.

Dunaiski (2008) propone que la relación de esbeltez (KL/r) de los elementos de una armadura de acero se consideren como un elemento armado (Sección E6, AISC 360-10). Con esto se puede tomar en cuenta la rigidez que brinda la unión soldada o apernada en los elementos. Dunaiski (2008) presenta este análisis para los elementos diagonales y verticales. No obstante, este método es correcto siempre y cuando la armadura se comporte como columna armada y no como una viga.

2.2.1.2 Código Europeo: EUROCODE 3: Design of Steel Structures

En la versión de 1993 de este código, a la cual se tuvo acceso, existe un anexo informativo que establece los valores que se deben utilizar como longitud efectiva de pandeo. Se establecen aspectos generales y recomendaciones para elementos con sección en angular y secciones huecas.






La longitud de pandeo de los elementos se establece según la dirección del pandeo y el tipo de miembro en la armadura. El código establece que para la cuerda en compresión, que pandea fuera del plano, se utilice la longitud total sin arriostrar, a menos que se justifique una longitud menor por medio de análisis. Para el pandeo en el plano de la cuerda comprimida, el pandeo fuera del plano de los elementos diagonales y verticales, en compresión, se establece la longitud entre nudos como longitud efectiva. Para los elementos diagonales o verticales en compresión, que pandean en el plano de la armadura, se utiliza un 90% de la longitud entre nudos.

Para secciones transversales huecas, como es el caso de las secciones de los modelos experimentales, se especifica otro valor. La cuerda en compresión tendrá una longitud efectiva de un 90% de la longitud entre elementos de soporte. En el plano, la longitud entre elementos de soporte será la longitud entre nudos. Fuera del plano, será la longitud entre elementos de arriostre lateral, a menos que un análisis justifique una longitud menor. En los

elementos diagonales y verticales se especifica la longitud entre nudos como longitud de pandeo, tanto dentro como fuera del plano.

2.2.1.3 Norma Suiza SIA-263 (2003)

En la investigación de Dunaiski (2008) se mencionan las longitudes de pandeo establecidas en la norma de diseño suiza SIA-263. En la siguiente figura, adaptada de la investigación de Dunaiski, se muestran los valores de longitud efectiva para los diferentes miembros de una armadura.

Miembro	Disposición de los elementos	Longitud de pandeo L_K	
		en el plano	fuera del plano ¹⁾
Cuerdas		$0,9 L$	$1,0 L$
Diagonales	Simple 	$0,8 L$	$1,0 L$
	Doble (a)  (b) 	$0,4 L$	$0,5 L$ ²⁾
	Múltiple 	$1,0 L_m$ ³⁾	$1,5 L_m$ ³⁾
	Forma de K 	$0,9 L$	$1,0 L$ ²⁾
Verticales	Simple y doble (a)	$0,8 L$	$1,0 L$
	Doble (b)	$0,4 L$	$0,5 L$ ²⁾
	Forma de K	$0,4 L$	$0,5 L$ ²⁾

1) L : distancia teórica entre nudos restringidos en la dirección del pandeo
 2) válido sólo para miembros idénticos en tensión y compresión
 3) L_m : dimensión de la malla de la armadura

Figura 2.3. Longitud efectiva de pandeo para elementos de armaduras en Norma SIA-263

Adaptado de: Dunaiski, 2008.

2.2.1.4 Guía de diseño para armaduras de acero con elementos laminados en frío de AISI (1995)

En esta guía de diseño se especifican los valores del factor de longitud efectiva que se deben utilizar en el diseño. Se establece que este factor debe ser determinado por un análisis racional o por medio de pruebas experimentales. Si estos análisis no se realizan se debe utilizar alguna de las siguientes alternativas:

1. Para una cuerda en compresión continua que se utiliza desde el apoyo hasta la cumbrera de la armadura, se utiliza un valor de $K= 0,75$. Para otras aplicaciones donde haya cuerdas en compresión, $K=1,0$.
Los elementos diagonales y verticales se asumen como articulados en sus extremos, por lo que $K=1,0$
2. Para cuerdas o elementos diagonales y verticales, la longitud efectiva puede tomarse como la distancia entre dos puntos de inflexión adyacentes. El factor de longitud efectiva se toma como unitario.

2.2.1.5 Comparación entre los valores especificados para K

Todas las especificaciones de diseño establecen para las armaduras la realización de análisis para determinar la longitud efectiva de pandeo o el factor de longitud efectiva. La comparación se realiza asumiendo que no ha habido análisis detallados para determinar este factor. Las especificaciones de diseño no establecen recomendaciones con respecto a la fuerza de diseño que se debe utilizar, cuando las fuerzas internas en el elemento son variables.

En esta investigación se trabaja con la cuerda en compresión como elemento de análisis. Todas las especificaciones establecen que la longitud sin arriostrar de la cuerda en compresión es la que está dada por la distancia entre puntos de restricción lateral para el pandeo fuera del plano. En el plano, la longitud sin arriostrar es la distancia entre nudos.

El pandeo será más crítico entre mayor sea la longitud entre puntos de arriostre lateral. La longitud sin arriostrar del elemento, según se establece en las especificaciones de diseño, será mayor para el pandeo fuera del plano. En el siguiente cuadro, se muestra una comparación entre los valores especificados para el factor de longitud efectiva de la cuerda en compresión de una armadura de cuerdas paralelas.

Cuadro 2.1. Comparación entre los valores de longitud efectiva establecidos en las especificaciones de diseño para armaduras de cuerdas paralelas

Especificación de diseño	Valor de K para la cuerda en compresión Pandeo fuera del plano
AISC 360-10	1,0
EUROCODE 3 (1993)	0,9
Norma SIA 263 (2003)	1,0
Guía AISI para armaduras de acero con elementos laminados en frío (1995)	1,0

2.3. MODELOS PARA DETERMINAR LA CARGA CRÍTICA DE PANDEO EN LA CUERDA EN COMPRESIÓN DE UNA ARMADURA

En el caso de las armaduras de acero, se ha podido observar que los elementos no están unidos realmente de la manera en que fueron modelados. Esto ha llevado a una serie de análisis que demuestran que una armadura bien construida (los ejes centroidales de los elementos coinciden en el punto donde se modela la articulación) se puede analizar con una longitud efectiva de pandeo, en el plano, igual a la longitud libre del elemento. Los estudios experimentales que se han obtenido (Dunaiski, 2008) pretenden demostrar que esta longitud se puede reducir, debido a las uniones reales en los nudos.

Por otro lado, cuando se analizan los elementos fuera del plano se presenta otra situación. Si las armaduras están arriostradas lateralmente en cada nudo de la cuerda en compresión y la sección de esta cuerda se orienta con su eje fuerte en la dirección fuera del plano, el pandeo en esta dirección no es crítico. Sin embargo, esto sucede muy pocas veces. Generalmente, las cuerdas en compresión están arriostradas en distancias considerables. Entonces el pandeo fuera del plano puede ser crítico en estos elementos. Aún cuando las secciones se orienten en su eje fuerte en la dirección fuera del plano.

Las fuerzas de compresión generalmente son mayores en los elementos de las cuerdas de la armadura. Estos generalmente se construyen como un elemento continuo. Por consiguiente, se puede establecer que el pandeo fuera del plano se producirá como un solo elemento. Conservadoramente, se ha tomado la longitud efectiva como la longitud entre restricciones fuera del plano para analizar el pandeo de las cuerdas en esa dirección (ver 2.2.1). Sin embargo, estas cuerdas podrían estar restringidas por la variación en las fuerzas internas a lo largo de la longitud y por los elementos diagonales y verticales de la armadura que están conectados a ellos. (Timoshenko, 1963; Shrivastava, 1980; Dekker y Burdzik, 2005)

Para determinar el pandeo de la cuerda en compresión, se han realizado varios modelos analíticos que intentan resolver el problema. La mayor parte de modelos determinan la carga crítica de pandeo del sistema, por tanto este parámetro será el que determine la comparación entre un modelo y otro. Para determinar la longitud efectiva en cada caso se puede utilizar la ecuación 2-1 y resolver para L_e .

2.3.1. Modelo de la cuerda con fuerza en compresión constante y sin rigideces intermedias

Con este modelo se considera que la longitud efectiva de pandeo es la longitud entre restricciones laterales de la armadura, la carga crítica está dada por la ecuación de Euler (ecuación 2-1). El modelo considerado es el de un elemento apoyado en articulaciones en sus extremos, con una carga de compresión constante. En la figura 2.4 se muestra el modelo utilizado en este caso:

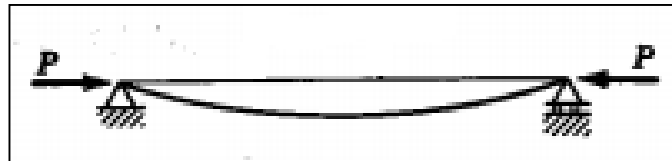


Figura 2.4. Modelo para la cuerda superior de la armadura, sin restricciones intermedias en la longitud de pandeo.

Fuente: Timoshenko, 1963; modificada por el autor

Este modelo es el más conservador. No considera el aporte de los elementos verticales y diagonales, ni la variación de carga axial en el elemento. La resistencia ante el pandeo está dada por la capacidad en compresión de la sección. Además, se utiliza para el diseño la mayor carga que se presente en la cuerda. No se considera la variación de las cargas entre los nudos de la cuerda.

2.3.2. Modelo de la cuerda con fuerza en compresión constante y con rigideces intermedias

Dekker y Burdzik (2005), proponen un modelo para determinar la longitud efectiva de pandeo de la cuerda en compresión de la armadura al considerar el aporte de rigidez de los elementos verticales de la armadura. Ellos no presentan una ecuación para determinar la carga crítica. Los elementos verticales se modelan como resortes de rigidez α , colocados en los puntos de unión de la armadura. La rigidez de los elementos diagonales se puede despreciar, ya que se asume que estos no se deforman cuando se da el pandeo. El modelo se muestra en la figura 2.5.

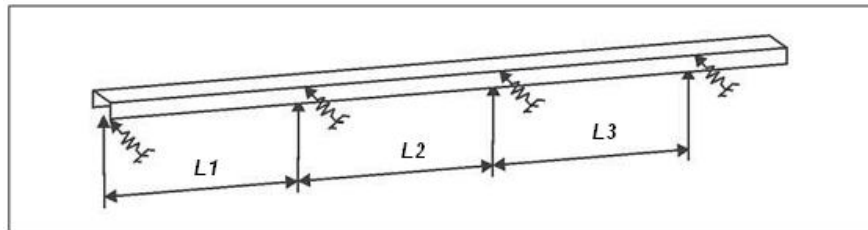


Figura 2.5. Modelo de para un elemento con apoyos elásticos.

Fuente: Dekker y Burdzik, 2005. Modificado por el autor

Timoshenko (1963) plantea un modelo analítico, basado en la teoría elástica, para la determinación de la carga crítica de pandeo de un elemento con restricciones elásticas intermedias. El modelo es similar al que plantean Dekker y Burdzik. La determinación de la carga crítica se realiza a partir de un sistema de ecuaciones, que se deriva del cálculo de las deflexiones en los puntos de apoyo elásticos (uniones de la armadura). Las deflexiones dependen linealmente de las reacciones en los apoyos. El modelo de Timoshenko se muestra en la figura 2.6.

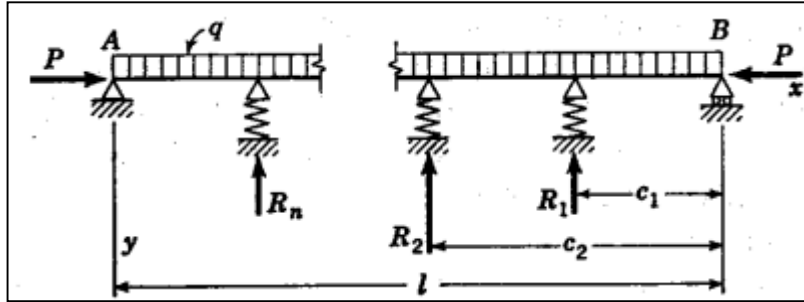


Figura 2.6. Modelo para la determinación de la carga crítica de pandeo de un elemento con apoyos elásticos.

Fuente: Timoshenko, 1963; p 23

En este modelo se considera la deflexión ante una carga transversal uniforme y una carga en compresión constante. La determinación de la deflexión en el soporte m se realiza considerando el efecto de la carga P y de la carga q . Esta deflexión también puede ser calculada con la constante elástica del apoyo, denominada α_m , que representa la rigidez de los elementos verticales. Los elementos diagonales no se toman en cuenta en la rigidez debido a que se considera que cuando se da el pandeo no se deforman.

Estos dos cálculos para la deflexión son equivalentes, por tanto se pueden igualar y así se tendrá una ecuación para el apoyo m . No obstante, la ecuación depende de todas las demás reacciones en los apoyos elásticos. Además si n es el número de apoyos intermedios, se tendrán n ecuaciones para cada reacción.

Considerando la notación dada en la figura 2.8 se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{ql^4}{16EIu^4} \left[\frac{\cos\left(u - \frac{2ux_m}{l}\right)}{\cos u} - 1 \right] - \frac{ql^2}{8EIu^2} x_m(l - x_m) - \frac{\sin(kx_m)}{Pk \sin(kl)} \sum_{i=1}^{i=m} R_i \sin(kc_i) \\ + \frac{x_m}{Pl} \sum_{i=1}^{i=m} R_i c_i - \frac{\sin[k(l - x_m)]}{Pk \sin(kl)} \sum_{i=m+1}^{i=n} R_i \sin[k(l - c_i)] \\ + \frac{l - x_m}{Pl} \sum_{i=m+1}^{i=n} R_i (l - c_i) = \frac{R_m}{\alpha_m} \end{aligned} \quad [2-2]$$

Donde:

$$x_m = l - c_m$$

$$u = \frac{kl}{2}$$

$$k^2 = \frac{P}{EI}$$

P : Fuerza axial de compresión en el elemento [F]

q : Carga transversal uniformemente distribuida en el elemento [F/L]

E : Módulo de elasticidad del material [F/L²]

I : Momento de Inercia de la sección transversal del elemento en la dirección del pandeo [L⁴]

l : Longitud total del elemento [L]

c_m : Longitud desde el extremo a la reacción en estudio m (ver figura 2.6) [L]

c_i : Longitud desde el extremo a la reacción en el punto i (ver figura 2.6) [L]

R_i : Reacción en el punto i [F]

R_m : Reacción en el punto m [F]

α_m : Constante elástica del resorte m [F/L]

A partir de las ecuaciones obtenidas para cada apoyo, se obtendrá un sistema de ecuaciones lineales. Se considera que la carga q es cero para el caso de aplicación en la cuerda de una armadura, con carga en compresión constante y que pandea fuera del plano. Con esto se obtiene un sistema de ecuaciones del tipo $A_m \cdot R_m = 0$. Donde el vector R_m corresponde a las reacciones y la matriz A_m es la matriz de los coeficientes que resultan de aplicar y simplificar la ecuación 2-2.

Cuando se da el pandeo la fuerza en los resortes aumenta conforme aumenta la deformación. Por tanto para llegar a la solución del sistema de ecuaciones la matriz A_m debe ser cero, así como su determinante. Como la matriz A_m depende de P , se puede obtener el valor de la carga crítica P_{cr} , a partir de la ecuación resultante al aplicar el determinante de la matriz.

Esta es la carga P en el momento del pandeo. Por lo tanto, se puede aplicar la ecuación básica de Euler para obtener el valor del factor de longitud efectiva.

2.3.3. Modelo de la cuerda sin rigideces intermedias y con fuerza en compresión variable entre nudos

Cuando se analiza este problema, Timoshenko (1963) establece un procedimiento para resolver el problema. En este caso se establece únicamente para un elemento en compresión bajo una carga axial en su extremo y con una carga axial intermedia. El método requiere de la solución de ecuaciones diferenciales. En el caso de dos fuerzas de compresión, se tienen dos ecuaciones diferenciales por resolver.

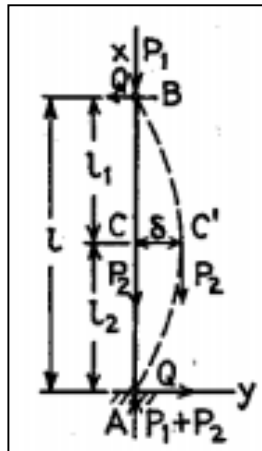


Figura 2.7. Modelo para un elemento en compresión con carga intermedia.

Fuente: Timoshenko, 1963; p 98

Cuando el elemento tiene varias cargas intermedias, el problema se vuelve complejo. Se tendrían que resolver tantas ecuaciones diferenciales como cargas intermedias existan. La solución planteada por Timoshenko es muy laboriosa.

Shrivastava (1980) presenta un análisis matemático, más sencillo que el planteado por Timoshenko, para determinar la carga crítica cuando las fuerzas internas varían a lo largo del elemento. La figura 2.8 presenta el modelo que utiliza este autor para resolver el problema de un elemento comprimido con cargas intermedias. Como se puede observar el modelo es prácticamente el mismo. La ecuación para este modelo en el momento del pandeo es:

$$\left[\left(\sum P_n a_n \right) - \frac{\pi^2 EI}{\lambda l^2} \right] \left[\left(\sum P_n b_n \right) - \frac{4\pi^2 EI}{\lambda l^2} \right] - \left(\sum P_n c_n \right)^2 = 0 \quad [2-3]$$

Donde:

$$a_n = \alpha_n + \left(\frac{1}{2\pi}\right)\sin(2\pi\alpha_n)$$

$$b_n = \alpha_n + \left(\frac{1}{4\pi}\right)\sin(4\pi\alpha_n)$$

$$c_n = \left(\frac{1}{\pi}\right)\sin(\pi\alpha_n) + \left(\frac{1}{3\pi}\right)\sin(3\pi\alpha_n)$$

$$\alpha_n: \text{Factor de longitudes} = \frac{l_n}{l}$$

l_n : Longitud del panel en análisis (ver figura 2.8)

[L]

P_n : Carga axial que genera el mismo efecto de las fuerzas internas en el elemento n de la armadura [F]

l : Longitud total de la cuerda en análisis [L]

EI : Rigidez alrededor del eje donde se da el pandeo [$F L^2$]

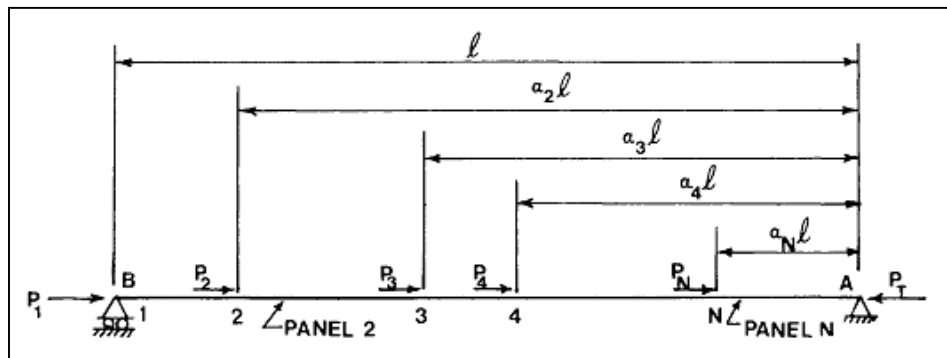


Figura 2.8. Notación de las ecuaciones de Shrivastava. Cada punto numerado como 1, 2,..., N representa un nudo de la armadura.

Fuente: Shrivastava, 1980

A partir de esta ecuación se encuentra el valor de λ , que es el factor de carga de pandeo. Este factor es función de la carga P , que es la carga total aplicada a la armadura. Si las fuerzas internas de la cuerda en compresión dependen linealmente de P , se cumple que la carga crítica es: $P_{cr} = \lambda P$.

En general, se puede analizar lo siguiente:

- Si el valor del factor de carga de pandeo es mayor que 1, las cargas impuestas son menores que las cargas críticas.
- Si se encuentra entre 0 y 1, quiere decir que se dará el pandeo con las cargas impuestas.
- Un valor de 1 indicará que las cargas impuestas son las cargas críticas.
- Un valor negativo indica que el pandeo se dará si se revierten las cargas

Es importante observar, que en este modelo la longitud efectiva de pandeo siempre es la longitud del elemento comprimido. No obstante, debido a la variación en las fuerzas internas del elemento se produce una variación en la carga crítica, con respecto a la carga de Euler. Por medio de algún método de iteración se podría obtener el valor del factor de longitud efectiva (K) para alguna carga P, que genere pandeo en la cuerda. Esto es:

$$\lambda(P) P = \frac{\pi^2 EI}{(K l)^2} \quad [2-4]$$

2.3.4. Modelo de la cuerda con restricciones intermedias y carga variable

Como se ha observado en las secciones anteriores, la determinación de la carga crítica de pandeo en un elemento sometido a las condiciones mostradas es compleja. En el caso de la cuerda en compresión de una armadura se tienen las dos condiciones mostradas en las secciones 2.3.2 y 2.3.3. Los elementos diagonales y verticales brindan una restricción que puede modelarse elásticamente. Además las fuerzas en la cuerda varían en cada sección entre nudos.

El análisis de un elemento sometido a cargas intermedias o fuerzas internas variables sobre apoyos elásticos es aún más laborioso. Si se analiza con los modelos que se han establecido en las secciones 2.3.2 y 2.3.3 se vuelve un procedimiento extenso, conforme se agregan los elementos intermedios (apoyos elásticos y cargas). No obstante, Timoshenko (1963), presenta un caso de aplicación para la cuerda en compresión de una armadura de un puente, cuyos elementos principales son armaduras de cuerdas paralelas a media altura. Estas armaduras se unen entre sí por vigas de piso. Las armaduras de este puente no poseen arriostramiento superior (en la cuerda en compresión), debido a su altura.

En el procedimiento se establece que lo ideal sería aplicar los modelos estudiados en 2.3.2 y 2.3.3. Sin embargo, bajo la suposición de que la forma del pandeo (la curva de medio seno) es mucho mayor que la longitud entre nudos, se puede establecer una simplificación. La simplificación se basa en considerar la cuerda como un elemento en un apoyo elástico uniformemente distribuido y sometido a una carga de compresión que varía linealmente a lo largo del elemento. El modelo se muestra en la figura 2.9.

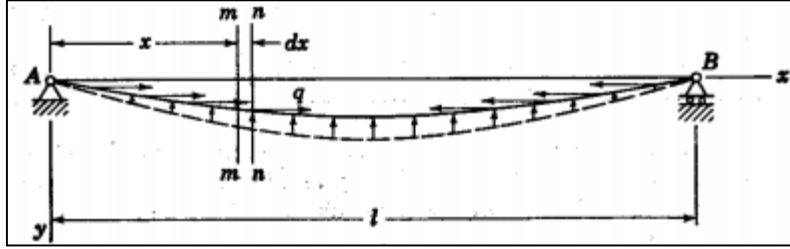


Figura 2.9. Modelo de un elemento con carga axial distribuida y apoyado en una fundación elástica con rigidez β .

Fuente: Timoshenko, 1963.

Para resolver este modelo se utiliza el concepto de las series infinitas. Estas series aproximan la forma del pandeo. La forma en que pandea el elemento mostrado en la figura 2.9 está dada por la ecuación 2-5.

$$y = a_1 \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) + a_2 \sin\left(\frac{2\pi x}{l}\right) + a_3 \sin\left(\frac{3\pi x}{l}\right) + \dots \quad [2-5]$$

La ecuación de la carga aplicada está dada por:

$$q = q_0 \left(1 - \frac{2x}{l}\right) \quad [2-6]$$

Al resolver el problema, aplicando métodos de energía elástica y al realizar algunas simplificaciones matemáticas, se obtiene la expresión para la carga axial en el centro del elemento:

$$\frac{q_0 l}{4} = \frac{\frac{\pi^4 EI}{8l^2} \sum_{n=1}^{\infty} n^4 a_n^2 + \frac{\beta l^2}{8} \sum_{n=1}^{\infty} a_n^2}{\sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 \left(\frac{n^2 \pi^2}{12} - \frac{1}{4}\right) - 4 \sum_n \sum_m a_n a_m \frac{nm(m^2 + n^2)}{(m^2 - n^2)^2}} \quad [2-7]$$

Al derivar la ecuación 2-7, e igualarla a cero, para obtener el valor mínimo de $\frac{q_0 l}{4}$ se obtiene la siguiente expresión:

$$\left[(n^4 + \gamma)\pi^2 - 2\alpha \left(\frac{n^2 \pi^2}{3} - 1\right) \right] a_n + 16\alpha \sum_m a_m \frac{nm(m^2 + n^2)}{(m^2 - n^2)^2} = 0 \quad [2-8]$$

En la cual se ha realizado la siguiente simplificación:

$$\alpha = \frac{\frac{q_0 l}{4}}{\frac{\pi^2 EI}{l^2}} \qquad \gamma = \frac{\beta l^4}{\pi^4 EI}$$

Esta expresión es un sistema de ecuaciones para obtener los coeficientes: a_1, a_2, a_3, \dots . Existen dos grupos de ecuaciones ya que m solo puede ser par o impar. Cuando se da el pandeo, los coeficientes deben ser distintos a cero, y el determinante de los sistemas de ecuaciones debe ser cero. El sistema de ecuaciones para valores impares de m es la forma simétrica del pandeo y el sistema de ecuaciones para valores pares de m es la forma anti-simétrica.

Al realizar la suposición de la forma en que se dará el pandeo y resolver el determinante del sistema de ecuaciones correspondiente se obtiene la siguiente expresión:

$$\left(\frac{q_0 l}{4}\right)_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(Kl)^2} \qquad [2-9]$$

Esta expresión, es la que estableció Euler en su análisis del pandeo elástico. Lo que varía en este caso son los valores de K para una rigidez de apoyo dada. El valor de K representa la longitud de la curva donde se muestra el pandeo con una forma de curva de medio seno. Esto es el factor de longitud efectiva. En el cuadro 2.2 y en la figura 2.10 se muestra la variación del factor de longitud efectiva conforme varía la rigidez del apoyo elástico uniformemente distribuido (fundación elástica).

Cuadro 2.2. Variación del factor de longitud efectiva de pandeo (K) con la rigidez del apoyo elástico distribuido uniformemente.

$\frac{\beta l^4}{16EI}$	K
0	0,696
5	0,524
10	0,443
15	0,396
22,8	0,363
56,5	0,324
100	0,290
162,8	0,259
200	0,246
300	0,225
500	0,204
1000	0,174

Fuente: Timoshenko, 1963. Modificado por el autor.

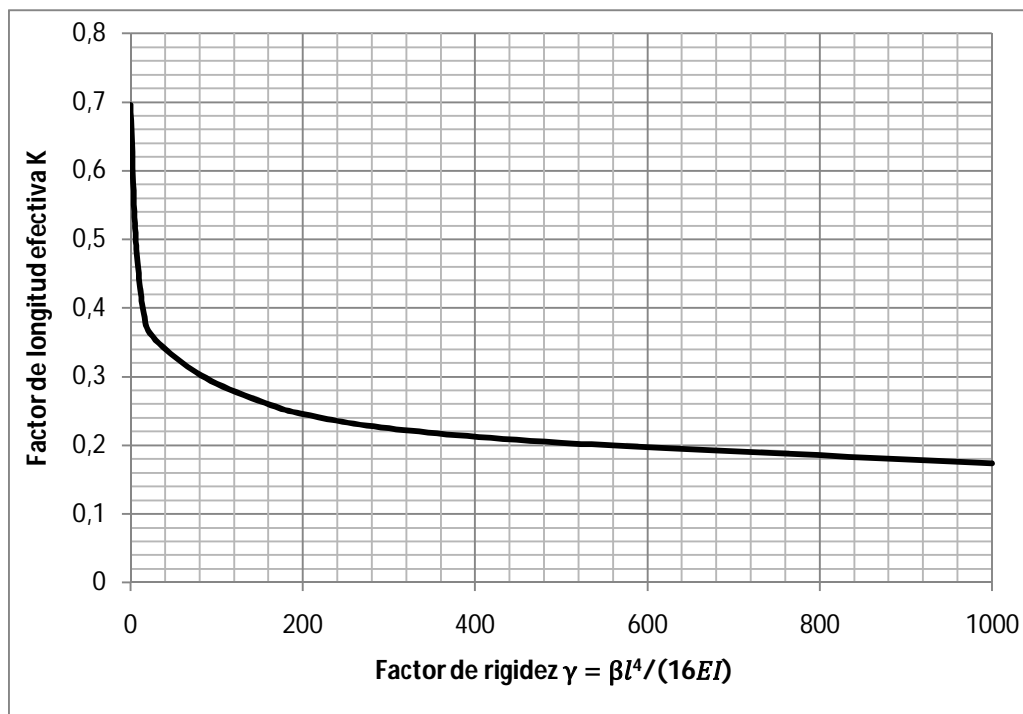


Figura 2.10. Variación del factor de longitud efectiva de pandeo con la rigidez del apoyo elástico distribuido uniformemente según los datos de Timoshenko.

Este modelo se puede aplicar en el análisis del pandeo de la cuerda en compresión de una armadura, bajo las suposiciones realizadas anteriormente. Para resolver el problema se requiere conocer el valor de la rigidez del apoyo elástico y la carga axial uniformemente distribuida.

El valor de la rigidez uniforme de la cuerda se obtiene a partir de la rigidez de los elementos diagonales y verticales. La forma que tomarían los elementos verticales y diagonales se observa en la figura 2.11.

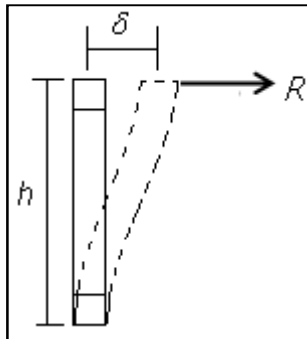


Figura 2.11. Forma que adoptarían los elementos diagonales y verticales cuando se da el pandeo en la cuerda en compresión.

El valor de la deflexión ante una carga R, está dado por:

$$\delta = \frac{RH^3}{3EI_v} + \frac{nRL_d^3}{3EI_d} \quad [2-10]$$

Donde:

H : Peralte de la armadura [L]

I_d : Momento de inercia de la sección de los elementos diagonales [L^4]

I_v : Momento de inercia de la sección de los elementos verticales [L^4]

L_d : Longitud del elemento diagonal [L]

n : Número de diagonales que convergen en la unión

Timoshenko (1963) establece que la rigidez de los elementos diagonales se puede despreciar si están en tensión. Galambos (1998), también se ha planteado el problema de la cuerda en compresión de los puentes tipo Pony. Este autor, establece que si los elementos diagonales están efectivamente unidos a su base, podrán contribuir en la rigidez del apoyo elástico.

Suponiendo que los elementos diagonales si aportan en la rigidez, entonces la rigidez de un nudo es R_o :

$$R_o = \frac{3E[I_v + nI_d(H/L_d)^3]}{h^3} \quad [2-11]$$

El módulo de rigidez equivalente β de la fundación elástica es:

$$\beta = \frac{R_o}{\ell_p} \quad [2-12]$$

Donde ℓ_p es la distancia entre los elementos verticales de la armadura.

De la estática se puede obtener el valor máximo para la carga q , que es el valor de q_o :

$$q_o = \frac{Q}{2H} \quad [2-13]$$

Donde Q es la carga total aplicada y h es el peralte de la armadura.

Con el valor de β y q_o se puede calcular la carga crítica Q en la armadura. A partir del cuadro 2.2 y de la figura 2.10, se puede obtener el factor K para la longitud efectiva. De las ecuaciones 2-9 y 2-13 se puede obtener el valor de la carga Q que producirá el pandeo.

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE ARMADURAS DE ACERO CON PERFILES FORMADOS EN FRÍO

Para este trabajo de graduación se construyeron armaduras de acero con perfiles cuadrados de tubo estructural. Estos perfiles son laminados en frío y se diseñan de acuerdo con la especificación AISI S100-2007. En Costa Rica se utilizan frecuentemente este tipo de elementos. En el Apéndice B se muestra la memoria de cálculo completa del diseño. Solo se consideran los esfuerzos debidos a carga axial.

3.1. DISEÑO DE ELEMENTOS EN TENSION

Según la sección C.2 y el Apéndice A-C.2 de AISI S100-2007, los miembros en tensión se diseñan para los siguientes estados límite:

3.1.1. Cedencia en la sección bruta

$$T_n = A_g F_y \quad [3-1]$$

El factor de reducción es $\phi = 0.90$

Donde:

T_n = Resistencia nominal del miembro cargado en tensión [F]

A_g = Área bruta de la sección transversal [L²]

F_y = Esfuerzo de cedencia de diseño [F/L²]

3.1.2. Ruptura en la sección neta lejos de la conexión

$$T_n = A_n F_u \quad [3-2]$$

El factor de reducción es $\phi = 0.75$

Donde:

A_n = Área neta de la sección transversal [L^2]

F_u = Esfuerzo último en tensión [F/L^2]

3.1.3. Ruptura en la sección neta en la conexión

Este estado límite depende del tipo de conexión. En los especímenes utilizados en este trabajo se realizaron conexiones soldadas. Con esto aplica la sección E2.7 de AISI S100-2007

$$P_n = A_e F_u \quad [3-3]$$

El factor de reducción es $\phi = 0.6$

Donde:

$A_e = AU$, área efectiva de la sección [L^2]

Si la carga se transmite solamente por soldaduras transversales:

$A =$ Área conectada directamente [L^2]

$U = 1.0$

Si la carga se transmite solamente por soldaduras longitudinales o por soldaduras longitudinales combinadas con soldaduras transversales:

$A = A_g$

$U = 1.0$, para miembros donde la carga se transmite directamente a toda la sección transversal

3.2. DETERMINACIÓN DE LA SECCIÓN EFECTIVA

Cuando se diseñan elementos de acero laminado en frío se debe considerar el pandeo local. Estos perfiles generalmente tienen perfiles delgados en comparación con sus dimensiones

(ancho o altura). La relación entre las dimensiones y el espesor define si el elemento puede fallar por pandeo local.

La falla por pandeo local puede ocurrir antes de que se produzca la fluencia del elemento debido a esfuerzos de compresión pura o de compresión debida a la flexión. El pandeo local se da en las partes planas de la sección (Rodríguez Hernández, 2010). Cuando los elementos poseen secciones atiesadas o secciones rigidizadas en sus extremos pueden soportar carga adicional después del pandeo. Esto se debe a una redistribución de esfuerzos. (Villar, 2011)

La especificación AISI S100-2007 utiliza el concepto de anchos efectivos para considerar el pandeo local en los elementos doblados en frío. Esto se refiere a desprestigiar una sección del elemento en donde es más probable que se presente el pandeo. El ancho de la sección recta se define como la longitud del elemento sin considerar los radios de doblado.

3.2.1. Ancho efectivo

Para la determinación del ancho efectivo se debe establecer si la sección es atiesada o no. Los elementos atiesados son aquellos que tienen ambos bordes paralelos a la dirección de la carga restringidos por un elemento atiesador (patín, alma u otro). Los elementos sin atiesar son aquellos que solamente tienen un borde paralelo a la dirección del esfuerzo restringido (Rodríguez Hernández, 2010).

En este trabajo de graduación se utilizaron elementos de sección tubular, por ello se muestra únicamente el método para calcular la sección efectiva en elementos atiesados. Este método se aplica para dos casos:

3.2.1.1 Compresión uniforme

Si los esfuerzos de compresión se distribuyen uniformemente en la sección, se tiene que el ancho efectivo es (figura 3.1):

$$\begin{aligned} b &= w \quad \text{si } \lambda \leq 0.673 \\ b &= \rho w \quad \text{si } \lambda > 0.673 \end{aligned} \quad [3-4]$$

En donde:

w = ancho del elemento en la sección recta [L]

ρ = factor de reducción local (ver ecuación 3-5)

b = ancho efectivo del elemento [L]

λ = factor de esbeltez

Con:

$$\rho = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right) \left(\frac{1}{\lambda}\right) \leq 1.0 \quad [3-5]$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} \quad [3-6]$$

En la cual:

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w}\right)^2 \quad [3-7]$$

En donde:

t = espesor del elemento [L]

μ = módulo de Poisson

k = coeficiente de pandeo

f = esfuerzo en compresión del elemento calculado como F_n (ver sección 3.3) [F/L²]

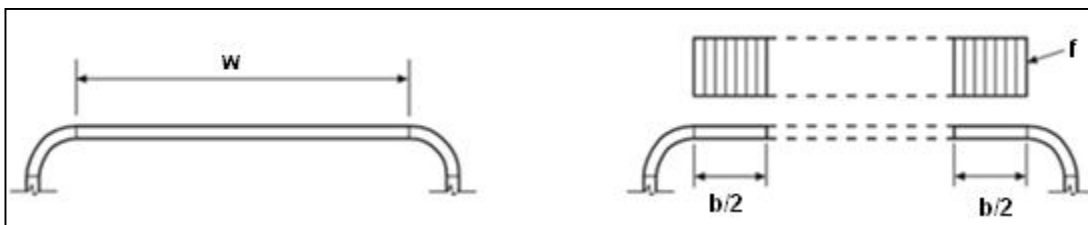


Figura 3.1. Elementos atiesados en compresión uniforme

(Fuente AISI, 2007)

3.2.1.2 Gradiente de esfuerzos

Si el elemento posee un gradiente de esfuerzos (flexión), el ancho efectivo se calcula como se muestra a continuación. La figura 3.2 muestra la notación utilizada. La simbología es la siguiente:

- b_1 y b_2 = Anchos efectivos [L]
- b_e = Ancho efectivo determinado de acuerdo con la sección 3.2.1.1 de este trabajo, con $f = f_1$ y k determinado como se mostrará a continuación. [L]
- b_o = Ancho de borde a borde del ala en compresión [L]
- f_1, f_2 = Esfuerzos que se muestran en la figura 3.2 calculados con base a la sección efectiva [F/L^2]
- h_o = Altura de borde a borde del alma [L]

$$\Psi = \left| \frac{f_2}{f_1} \right| \quad [3-8]$$

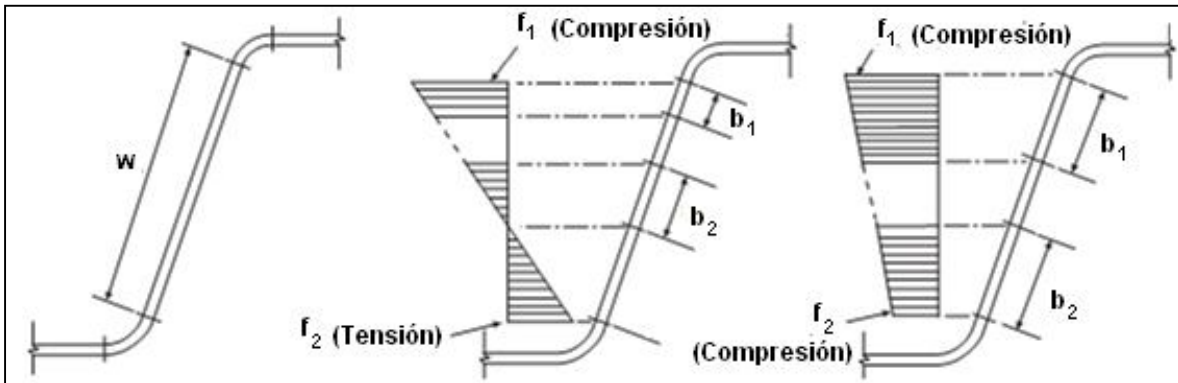


Figura 3.2. Elementos atiesados sometidos a un gradiente de esfuerzos

(Fuente AISI, 2007)

a) Si f_1 está en compresión y f_2 en tensión

$$k = 4 + 2(1 + \Psi)^3 + 2(1 + \Psi) \quad [3-9]$$

Para $h_o/b_o \leq 4$

$$b_1 = \frac{b_e}{3 + \Psi} \quad [3-10]$$

$$b_2 = \frac{b_e}{2} \text{ cuando } \Psi > 0.236 \quad [3-11]$$

$$b_2 = b_e - b_1 \text{ cuando } \Psi \leq 0.236$$

Además $b_1 + b_2$ no debe ser mayor que la porción en compresión del alma calculada con base en la sección efectiva.

Para $h_o/b_o > 4$

$$b_1 = \frac{b_e}{3 + \Psi} \quad [3-12]$$

$$b_2 = \frac{b_e}{1 + \Psi} - b_1 \quad [3-13]$$

b) Si f_1 y f_2 están en compresión

$$k = 4 + 2(1 - \Psi)^3 + 2(1 - \Psi) \quad [3-14]$$

$$b_1 = \frac{b_e}{3 - \Psi} \quad [3-15]$$

$$b_2 = b_e - b_1 \quad [3-16]$$

3.3. DISEÑO DE ELEMENTOS EN COMPRESIÓN

Los elementos cargados en compresión están sometidos a la falla por estabilidad o pandeo. Rodríguez Hernández (2010), presenta los siguientes estados límites para determinar la resistencia en compresión de un elemento:

1. Pandeo flexionante respecto a un eje principal
2. Pandeo torsional, en el cual el elemento gira alrededor de su eje longitudinal
3. Pandeo flexo – torsional, donde se da el giro alrededor el eje longitudinal y la flexión simultáneamente
4. Pandeo local, en el cual fallan la sección transversal debido a la esbeltez de las paredes que la componen

La resistencia nominal en compresión axial se calcula de la siguiente manera:

$$P_n = A_e F_n \quad [3-17]$$

El factor de reducción es $\phi = 0.85$

Donde:

A_e = Área de la sección efectiva, calculada de acuerdo a la sección 3.2 [L²]

F_n se calcula de la siguiente manera:

Si $\lambda_c \leq 1.5$

$$F_n = (0.658 \lambda_c^2) F_y \quad [3-18]$$

Si $\lambda_c > 1.5$

$$F_n = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] F_y \quad [3-19]$$

Donde:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \quad [3-20]$$

F_e = El menor de los esfuerzos elásticos de pandeo flexionante, torsional y flexo-torsional. [F/L²]

Para el caso de elementos con simetría doble, cerrados y que no estén sometidos a torsión o flexo-torsión se tiene que:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} \quad [3-21]$$

En donde:

E = Módulo de elasticidad del acero [F/L²]

K = Factor de longitud efectiva de pandeo [adimensional]

L = Longitud sin arriostrar ó longitud entre apoyos del elemento [L]

r = Radio de giro de la sección sin reducir, alrededor del eje en el que se da el pandeo [L]

Generalmente, para los elementos de las armaduras se considera un factor de longitud efectiva de pandeo de $K=1,0$. Esto se deriva de la suposición de los nudos articulados. En el diseño de los elementos diagonales y verticales de las armaduras se utiliza un factor de $K=0,8$ según lo establecido por Dunaiski (2005). Para la cuerda superior de la armadura se realiza un análisis como el que se muestra en el capítulo 2.

CAPÍTULO 4. CAPACIDAD DE LOS ELEMENTOS DE LAS ARMADURAS

Para el diseño de cada uno de los elementos de los especímenes se utiliza el manual de AISI S100-2007 y los criterios del diseño LRFD. Como en este caso se llevan las armaduras a la capacidad máxima, se muestra la resistencia nominal de cada elemento y la reducción por el factor de resistencia. En el Apéndice B se muestra la memoria de cálculo del diseño de los elementos.

4.1. SUPOSICIONES DE DISEÑO

Para el cálculo de la capacidad de los elementos de la armadura se utilizan las propiedades del material obtenidas de los resultados experimentales. Esto se debe a las variaciones en las propiedades mecánicas del material de los tubos de acero laminados en frío fabricados en Costa Rica, observadas en estudios anteriores (Villar, 2011; Rodríguez Hernández, 2010). Los valores de diseño que se utilizan se redondean para mayor claridad. En este caso se utilizará un esfuerzo de cedencia $F_y = 385 \text{ MPa}$ y una resistencia a la tensión (ruptura) de $F_u = 410 \text{ MPa}$.

En el análisis de las armaduras se consideran despreciables los esfuerzos debidos al peso propio en los elementos. Además, se considera que los esfuerzos en flexión son muy pequeños. Esto implica que el análisis se puede realizar como una armadura simple, con esfuerzos axiales en sus elementos.

4.2. CLASIFICACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

4.2.1. Según AISI S100-2007

Según los cálculos presentados en el Apéndice B, la sección es totalmente efectiva para compresión pura. Es decir, se utiliza toda la sección en los cálculos por compresión.

4.2.2. Según AISC 360-10

La sección utilizada en los elementos está definida en la sección 5.3. La sección transversal es cuadrada con un ancho nominal de 50 mm y un espesor de 3,17 mm. Según el cuadro 4.2 la relación b/t para los tubos cuadrados es de 9,77.

Al comparar este valor con el correspondiente de la tabla B4.1 de AISC 360-05 se tiene que:

- Para sección no esbelta (sometida a compresión únicamente) $b/t \leq 1,40 \sqrt{\left(\frac{E}{F_y}\right)} = 1,40 \sqrt{(200\ 000/385)} = 31,9$. Con esto: $b/t = 9,77 < 31,9$, por lo tanto la sección es no esbelta. (Fila 12 Tabla B4.1, AISC 360-05)
- Para sección compacta (flexión): $b/t \leq 1,12 \sqrt{\left(\frac{E}{F_y}\right)} = 1,12 \sqrt{(200\ 000/385)} = 25,5$. Con esto: $b/t = 9,77 < 25,5$, por lo tanto la sección se clasifica como compacta. (Tabla B4.1, AISC 360-10)

4.3. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE LA ARMADURA

4.3.1. Modelo estructural

4.3.1.1 Dimensiones y configuraciones

Las dimensiones generales son las mismas para los especímenes, aunque la configuración de elementos diagonales sea distinta. En el siguiente cuadro se muestra las dimensiones generales de las armaduras de prueba.

Cuadro 4.1. Dimensiones generales de las armaduras de prueba

Longitud libre entre apoyos (L) ⁽¹⁾	3000 mm
Peralte de la armadura (H) ⁽¹⁾	500 mm
Longitud entre nudos (ℓ_p)	500 mm
Relación L/H	6
Relación ℓ_p /H	1
Relación del peralte de la sección (W) con la longitud del pánel y/o el peralte de la armadura (W/H ó W/ ℓ_p)	1:10
Peralte de la sección a utilizar (W)	50,0 mm (2,00 pulg)

⁽¹⁾ Dimensiones de centro a centro

Las armaduras no están necesariamente a escala, con respecto a una estructura real. Sin embargo, se podrían relacionar las dimensiones a una escala 1:1, al considerar que pueden representar una armadura con longitud libre entre apoyos de 3,00 m y peralte de 0,50 m, con secciones de 50,0 mm (2,00 pulg).

a) Configuración 1 (C1)

En esta armadura los elementos diagonales están dispuestos en una dirección. Están dispuestos en forma antisimétrica con la línea de centro de la armadura. Esta es una de las configuraciones más utilizadas en la construcción. Al aplicar una carga vertical hacia abajo en el nudo central, las fuerzas axiales en la cuerda superior e inferior varían hasta alcanzar un máximo y luego disminuyen. Las fuerzas internas en los elementos verticales y diagonales tienen una respuesta antisimétrica. La figura 4.1 muestra esta configuración.

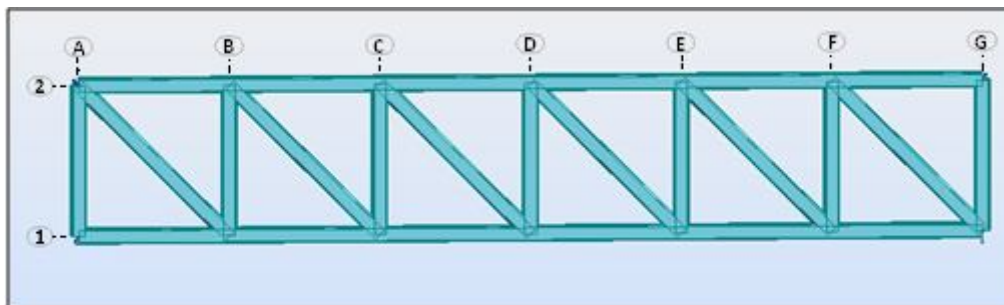


Figura 4.1. Configuración N° 1 de la armadura de prueba.

b) Configuración 2 (C2)

Se utiliza una configuración tipo Pratt. Ésta es una armadura con los elementos diagonales dispuestos hacia la misma dirección y tienen simetría con la línea de centro de la armadura. Las fuerzas axiales, en compresión de la cuerda superior y en tensión de la cuerda inferior, varían al aplicar una carga vertical hacia abajo en el nudo central. Estas fuerzas aumentan hacia el centro. Los elementos verticales se encuentran en compresión y los diagonales en tensión. La figura 4.2 muestra esta configuración.

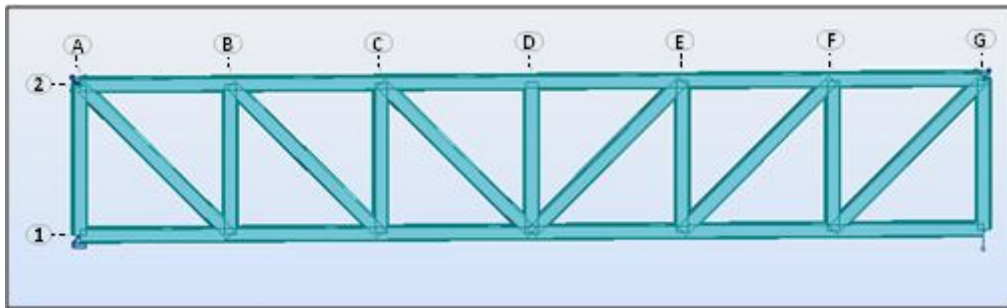


Figura 4.2. Configuración N° 2 de la armadura de prueba.

c) Configuración 3 (C3)

Se utiliza una configuración tipo Warren. En esta armadura los elementos diagonales están dispuestos de manera intercalada. La disposición de estos elementos es simétrica con la línea de centro de la armadura. Esta configuración también es muy utilizada. Al aplicar una carga vertical hacia abajo en el centro las fuerzas axiales en la cuerda superior e inferior son casi constantes. En la figura 4.3 se presenta la configuración descrita.

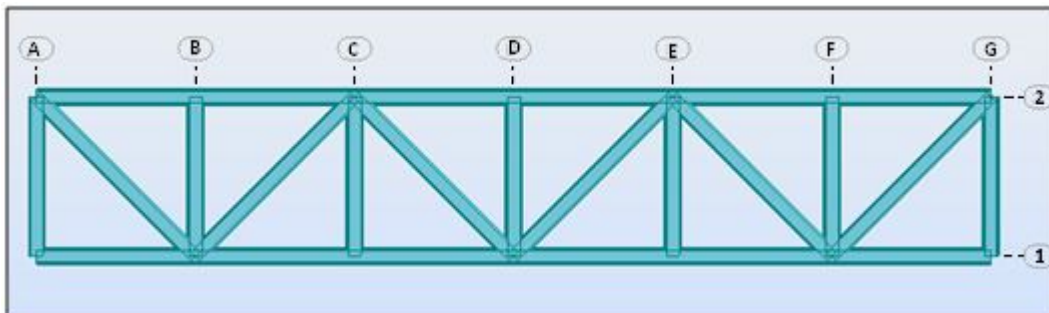


Figura 4.3. Configuración N° 3 de la armadura de prueba.

4.3.1.2 Secciones transversales de los elementos de las armaduras

La sección que se utiliza en estas pruebas debe asegurar su resistencia ante otros modos de falla distintos al pandeo. Es preferible que la sección posea un comportamiento similar en las dos direcciones de análisis (dentro del plano y fuera del mismo). En otras palabras, se prefiere que la sección posea las mismas propiedades geométricas en ambas direcciones de análisis.

La sección debe asegurar su resistencia ante pandeo local de placas. Esto se comprueba con las disposiciones dadas en 3.2. La sección debe ser totalmente efectiva y con suficiente holgura en su relación ancho/espesor. Preferiblemente debe calificar como compacta, según las disposiciones dadas en AISC 360 – 2010.

Con estas disposiciones, se elige la sección de tubo estructural cuadrado de 50 mm (2 pulgadas) de peralte. El espesor de pared es de 3,17 mm (1/8 de pulgada). Con esto se garantiza que la sección cumpla con lo establecido anteriormente.

Cuadro 4.2. Propiedades geométricas de la sección utilizada en las armaduras

Ancho nominal externo de la sección (d)	50,0 mm
Espesor de la sección (nominal) (t)	3,17 mm
Área (A_g)	550,6 mm ²
Peso Unitario de la sección (w_u)	47,4 N/m (4,83 kg/m)
Momento de Inercia ($I_x = I_y = I_g$)	191 500 mm ⁴
Radio de giro ($r_x = r_y = r$)	18,6 mm
Módulo de Sección Elástico ($S_x = S_y = S$)	7 660 mm ³
Radio interno de la sección (nominal) ($R_{int} = 2t$)	6,34 mm
Relación $b/t = [W - 2(R_{int} + t)]/t$ (esbeltez)	9,77

Fuente: METALCO.

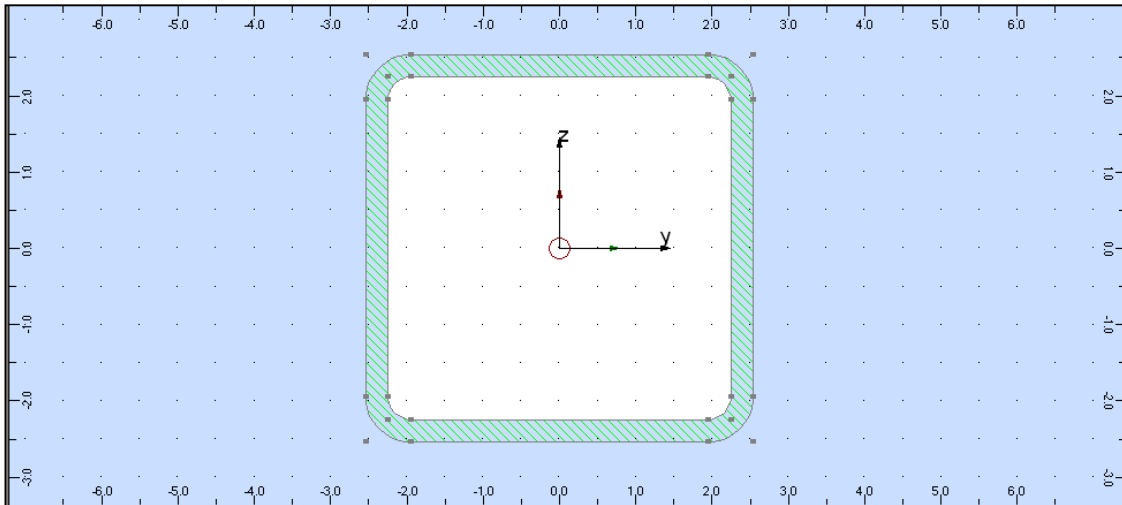


Figura 4.4. Sección de tubo estructural

4.3.1.3 Conexiones entre elementos de las armaduras

Las conexiones entre los elementos de las armaduras son soldadas. Este tipo de conexión permite la transmisión no sólo de esfuerzos axiales, sino también de esfuerzos de flexión y cortante. No obstante, para reducir los esfuerzos de flexión y cortante, se unen los elementos de modo que los ejes centroidales de cada componente se intersequen un único punto.

De esta manera, para realizar la conexión, se cortan los extremos de los tubos diagonales a 45°. En los extremos se forman ángulos de 90°. De esta forma, los ejes centroidales coinciden en un punto con el del elemento vertical y la cuerda correspondientes. En la figura 4.5 se muestra un ejemplo de cada tipo de conexión. Estas conexiones pueden estar tanto en la parte superior como en la inferior, según la configuración utilizada.

Se utilizó el manual AISC 360-10 (capítulo K) para la revisión del cumplimiento de requisitos para conexiones con tubo estructural cuadrado. Se debe garantizar que la resistencia para cualquiera de los modos de falla establecidos para cada tipo de conexión sea mucho mayor que la resistencia en compresión (pandeo) de la cuerda.

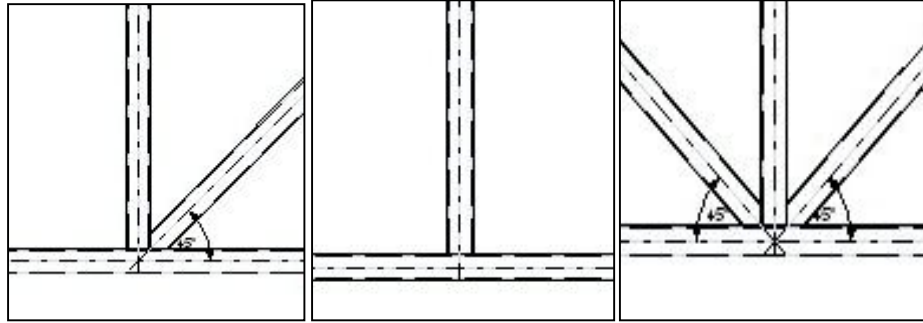


Figura 4.5. Conexiones típicas en las armaduras.

El electrodo utilizado en las conexiones de las armaduras corresponde al E6013. Según la nomenclatura utilizada para denominar estos electrodos, los dos primeros dígitos designan la capacidad del acero del electrodo en ksi. La resistencia nominal de esta soldadura es de 420 MPa (60 ksi). El tercer dígito representa la posición en que se debe soldar. Un 1 implica que se puede soldar en cualquier posición (plana, horizontal, vertical, sobre la cabeza). El cuarto dígito indica si el electrodo se puede usar con corriente directa o alterna y los compuestos de los que está hecho el material. Un 3 indica que se puede utilizar tanto corriente alterna como directa y que el material de recubrimiento está compuesto de titanio y potasio, con un contenido de polvo de hierro de entre 0% y 10%. (Villar, 2011)

4.3.2. Elementos verticales

La demanda de carga en los elementos depende de la configuración. En la configuración 1, la mitad de los elementos está en tensión y la mitad en compresión. En la configuración 2, todos los elementos están en compresión. En la configuración 3, los elementos extremos están en compresión y los elementos intermedios tienen carga nula.

En el Apéndice A se muestra el análisis realizado a cada configuración de armaduras. El cuadro 4.3 muestra las demandas en función de la carga aplicada al centro (P) para cada configuración. Además muestra la capacidad en tensión y compresión.

Cuadro 4.3. Demandas y capacidad de los elementos verticales de la armadura

Carga máxima en elementos verticales (valor absoluto)	0,5 P
Factor de longitud efectiva utilizado (K)	1,0 (fuera del plano) 0,8 (en el plano)
Longitud de elemento (L_v)	0,50 m
Radio de giro ($r_z = r_y$)	18,6 mm
Razón de esbeltez que controla (fuera del plano) KL_v/r	26,9
Resistencia nominal en compresión P_{nc}	200 kN (20,4 tonf)
Resistencia nominal en tensión P_{nt}	130 kN (13,3 tonf)
Resistencia en compresión de los elementos verticales ϕP_{nc} $\phi = 0,85$	176 kN (18,0 tonf)
Resistencia en tensión de los elementos verticales ϕP_{nt} $\phi = 0,60$ (Estado límite de ruptura cerca de la conexión)	78,0 kN (7,95 tonf)

4.3.3. Elementos diagonales

En el caso de los elementos diagonales, la carga aplicada al centro también producirá fuerzas de tensión o compresión de acuerdo con la configuración. El valor absoluto de la fuerza en los elementos siempre es el mismo independientemente de la configuración. En la configuración 1 la mitad de los elementos están en tensión y la mitad en compresión. En la configuración 2, los elementos diagonales siempre están en tensión. En la configuración 3 sucederá lo mismo que en la 2, pero los elementos intercalan tensión – compresión.

El cuadro 4.4 muestra las demandas en función de la carga aplicada al centro (P) para cada configuración. Además muestra la capacidad en tensión y compresión.

Cuadro 4.4. Demandas y capacidad de los elementos diagonales de la armadura

Carga en los elementos diagonales (valor absoluto)	0,707 P
Factor de longitud efectiva utilizado (K)	0,8 (en el plano) 1,0 (fuera del plano)
Longitud de elemento (L_d)	707 mm
Radio de giro ($r_z = r_y$)	18,6 mm
Razón de esbeltez que controla (Fuera del plano) KL_d/r	38,0
Resistencia nominal en compresión P_{nc}	188 kN (19,2 tonf)
Resistencia nominal en tensión P_{nt}	184 kN (18,7 tonf)
Resistencia en compresión de los elementos diagonales $\phi_c P_{nc}$, $\phi_c = 0,85$	160 kN (16,3 tonf)
Resistencia en tensión de los elementos diagonales $\phi_t P_{nt}$, $\phi_t = 0,60$ (Estado límite de ruptura cerca de la conexión)	110 kN (11,25 tonf)

4.3.4. Cuerda en tensión

En los ensayos experimentales la cuerda en tensión es la superior. En este elemento también se presentan esfuerzos de flexión. A partir de un análisis con el programa *Robot Structural Analysis 2009* se obtienen esfuerzos en flexión muy pequeños, en comparación con los esfuerzos en tensión.

Se utilizó un criterio, basado en análisis estáticos aproximados, para justificar el hecho de desprestigiar los esfuerzos de flexión en los especímenes. A continuación se presenta el criterio utilizado para comparar los esfuerzos:

Se considera a la armadura como una viga simplemente apoyada, con una carga puntual en el centro. El momento máximo se dará en el punto central de la armadura (viga). Si las condiciones son ideales, el momento máximo se obtiene a partir del par de fuerzas que se generan de la carga axial interna en la cuerda en compresión y la cuerda en tensión. En la figura 4.6 se muestra el modelo descrito.

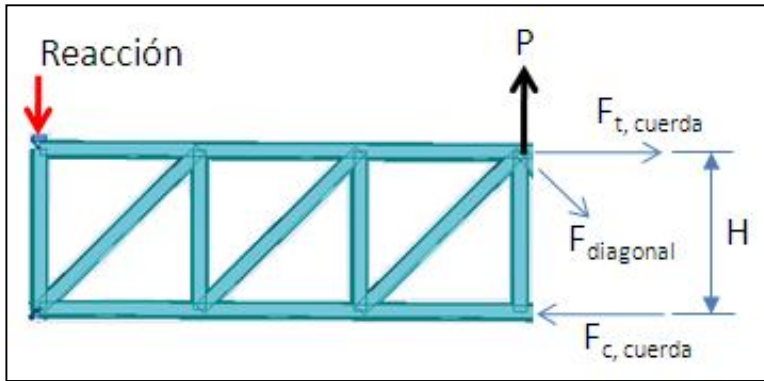


Figura 4.6. Modelo para analizar la armadura como una viga simplemente apoyada

Para considerar los esfuerzos de flexión en las cuerdas, el momento máximo en la cuerda, debido a las soldaduras en las uniones y a las excentricidades, debe ser mayor que 10 % de la carga axial de la cuerda en el punto de análisis multiplicada por el peralte de la armadura. El momento máximo en la cuerda se obtiene a partir del análisis en el programa de cómputo. La carga axial se obtiene a partir del análisis por nudos. Esto es:

$$\frac{M_{m\acute{a}x}}{P_{m\acute{a}x}H} \geq 0,10$$

Del análisis de cada configuración se obtienen los siguientes resultados, con $H=0,50$ m:

Configuración 1: $M_{m\acute{a}x} = 0,0086 P_a$ [kN – m], $P_{m\acute{a}x} = 1,0 P_a$ [kN]

$$\frac{M_{m\acute{a}x}}{P_{m\acute{a}x}H} = \frac{0,0086 P_a}{(1,0 P_a)(0,50)} = 0,02 < 0,10$$

Configuración 2: $M_{m\acute{a}x} = 0,00993 P_a$ [kN – m], $P_{m\acute{a}x} = 1,5 P_a$ [kN]

$$\frac{M_{m\acute{a}x}}{P_{m\acute{a}x}H} = \frac{0,00993 P_a}{(1,5 P_a)(0,50)} = 0,013 < 0,10$$

Configuración 3: $M_{m\acute{a}x} = 0,0070 P_a$ [kN – m], $P_{m\acute{a}x} = 1,0 P_a$ [kN]

$$\frac{M_{m\acute{a}x}}{P_{m\acute{a}x}H} = \frac{0,0070 P_a}{(1,0 P_a)(0,50)} = 0,0093 < 0,10$$

Por lo tanto, no se toman en cuenta los esfuerzos de flexión en la cuerda inferior

En la cuerda inferior la resistencia en tensión es $\phi P_n = 169 \text{ kN}$ (17,3 tonf). Rige el estado límite de ruptura en el área neta, lejos de la conexión ($\phi = 0,75$)

4.3.5. Cuerda en compresión

Para la cuerda en compresión se realizó un análisis similar al de la cuerda en tensión para obtener un criterio para desprestigiar los esfuerzos de flexión. A continuación se presenta el criterio:

Configuración 1: $M_{m\acute{a}x} = 0,0069 P_a \text{ [kN - m]}$, $P_{m\acute{a}x} = 1,5 P_a \text{ [kN]}$

$$\frac{M_{m\acute{a}x}}{P_{m\acute{a}x} H} = \frac{0,0069 P_a}{(1,5 P_a)(0,50)} = 0,0092 < 0,10$$

Configuración 2: $M_{m\acute{a}x} = 0,0069 P_a \text{ [kN - m]}$, $P_{m\acute{a}x} = 1,5 P_a \text{ [kN]}$

$$\frac{M_{m\acute{a}x}}{P_{m\acute{a}x} H} = \frac{0,0069 P_a}{(1,5 P_a)(0,50)} = 0,0092 < 0,10$$

Configuración 3: $M_{m\acute{a}x} = 0,00705 P_a \text{ [kN - m]}$, $P_{m\acute{a}x} = 1,5 P_a \text{ [kN]}$

$$\frac{M_{m\acute{a}x}}{P_{m\acute{a}x} H} = \frac{0,00705 P_a}{(1,5 P_a)(0,50)} = 0,0094 < 0,10$$

Por lo tanto, no se toman en cuenta los esfuerzos de flexión en la cuerda superior.

Como se ha discutido en el planteamiento de este proyecto, la longitud de pandeo de la cuerda en compresión de una armadura de acero no está bien definida. Si se utiliza la longitud entre nudos se puede ser poco conservador. Si se utiliza toda la longitud entre restricciones laterales se es conservador.

Se utilizó el análisis planteado por Timoshenko (1963), que se describe en la sección 2.3.4. Este análisis permite obtener la longitud efectiva de pandeo para la cuerda en compresión de una armadura. El cálculo detallado se muestra en el Apéndice B. Se puede comprobar que los resultados de la rigidez equivalente β es similar para los tres tipos de especímenes, por lo tanto se utiliza un valor promedio. Los resultados principales para los especímenes de ensayo son:

Cuadro 4.5. Resultados del análisis para determinar la longitud de pandeo de Timoshenko

Rigidez de las uniones, C_o (Ecuación 2-11)	1244 kN/m
Rigidez equivalente de la fundación rígida β (Ecuación 2-12)	2488 kN/m ²
Factor de rigidez $\beta L^4/(16EI)$	329
Factor de longitud efectiva según Timoshenko	0,222
Fuerza de compresión distribuida q_0 (Ecuación 2-8)	0,001 P [kN/m]

Cuadro 4.6. Resistencia de la cuerda superior de las armaduras

Longitud del elemento (L_c)	3,00 m
Factor de longitud efectiva utilizado (K)	0,222
Radio de giro (r)	18,6 mm
Razón de esbeltez $K L_c / r$	35,8
Resistencia nominal en compresión P_n	191 kN (19,5 tonf)
Resistencia en compresión de la cuerda $\phi_c P_n$ $\phi_c = 0,85$	162 kN (16,5 tonf)

4.4. CONEXIONES

Los elementos de la armadura son tubos cuadrados de 50 mm de ancho. Las conexiones de tubo estructural requieren una revisión de capacidad local. Esta revisión se realiza de acuerdo con el capítulo K de la especificación de AISC 360. Como se muestra en la figura 4.5, existen tres tipos de conexión. Estas se identifican de derecha a izquierda como I, II y III, además se adiciona un tipo de conexión (IV) que es la de los extremos del espécimen.

La capacidad local de cada una de las conexiones es de $\phi P_n = 182$ kN. En todos los casos rige el mismo estado límite. La memoria de cálculo se muestra en el Apéndice C.

4.4.1. Conexión soldada

La soldadura en las conexiones se calculó según las disposiciones de la especificación AISI S100-2007. Además, se utilizaron los criterios dados por la Sociedad Americana de Soldadores (AWS, por sus siglas en inglés), en el Código de Soldadura Estructural en acero (D1.1).

La soldadura se realizó en las caras frontales del espécimen. Es decir las soldaduras están en el plano de la armadura (ver figura 5.18). El cálculo de la resistencia de las soldaduras está en el Apéndice B. La resistencia de las conexiones es:

Cuadro 4.7. Capacidad de las conexiones soldadas

ϕR_n Conexión elementos verticales, $\phi = 0,9$	110 kN
ϕR_n Conexión elementos diagonales, $\phi = 0,9$	155 kN
$\phi R_n/L_w$ Soldadura en las conexiones, $\phi = 0,8$	1,05 kN/mm

4.5. CARGA MÁXIMA QUE SE PUEDE APLICAR A LOS ESPÉCIMENES

La carga máxima se aplica en el nudo central de las armaduras. A partir del análisis por nudos se obtiene la relación entre las fuerzas internas en cada elemento y la carga aplicada ($P_{MAX}/P_{aplicada}$). La carga máxima en los elementos se da cuando $P_{MAX} = P_n$. Se realiza un análisis donde se supone que cada elemento ha llegado a la falla, según el estado límite que rige el diseño del elemento. A partir de la capacidad de los elementos, por medio de la relación entre fuerza interna y carga aplicada, se obtiene la carga que produciría el estado límite de falla de cada elemento. La carga de falla será la menor carga del análisis.

En el cuadro 4.8 se muestran los resultados del análisis. Como ejemplo se muestra el cálculo para la cuerda en compresión:

$$P_n = 191 \text{ kN}$$

$$\frac{P_{MAX}}{P_{aplicada}} = 1,5$$

$$P_{aplicada} = \frac{191 \text{ kN}}{1,5} = 127 \text{ kN}$$

Cuadro 4.8. Obtención de la carga máxima que se puede aplicar al espécimen según cada estado límite

Estado límite de falla	Resistencia de los elementos		Relación teórica ⁽¹⁾ $P_n/P_{aplicada}$	Carga que se aplicaría $P_{aplicada}$ (kN) ⁽²⁾
	ϕP_n (kN)	P_n (kN)		
Tensión	---	---	---	---
Verticales: Ruptura cerca de la conexión $\phi=0,60$	78,0	130	0,50	260
Diagonales: Ruptura cerca de la conexión $\phi=0,60$	110	184	0,707	260
Cuerda: Ruptura lejos de la conexión, $\phi=0,75$	169	226	1,50	151
Compresión $\phi=0,85$	---	---	---	---
Verticales	170	200	0,50	400
Diagonales	160	188	0,707	266
Cuerda	162	191	1,50	127 - Rige
Conexión soldada $\phi=0,90$	---	---	---	---
Verticales	105	131	0,50	262
Diagonales	148	185	0,707	262

(1) Relación obtenida del análisis de la estructura. Para las cuerdas se muestra la relación entre la fuerza axial máxima en la cuerda y la carga aplicada en el nudo central de la armadura.

(2) Carga máxima que se podría aplicar a la armadura si la falla se diera por el estado límite mostrado. Esta carga se aplica en el nudo central de la cuerda en tensión de la armadura.

Rige la resistencia en compresión en la cuerda

CAPÍTULO 5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DEL ACERO EN TENSIÓN

5.1.1. Generalidades

En Costa Rica muchas veces es difícil conocer la procedencia de los materiales. Según el catálogo de METALCO, el esfuerzo de fluencia del acero para los tubos estructurales es de 227 MPa (33 ksi), basado en la sección A7.2 de AISI. El esfuerzo último mínimo es de 310 MPa. De acuerdo con algunos proyectos de graduación anteriores, en los que se ha trabajado con tubos estructurales, el esfuerzo de fluencia es mucho mayor. Según las especificaciones en la página de internet de METALCO, los aceros para tubería estructural deben estar conformes con las normas japonesas JIS (JIS-G3132-SPHT-2)

Las pruebas en tensión se realizan para caracterizar el material que se utiliza en los especímenes de ensayo. Con esto, se evitan conjeturas con respecto a la calidad del acero que se utiliza en los especímenes de las pruebas experimentales. En una investigación científica como esta, es necesario caracterizar los materiales.

Este ensayo consiste en determinar las propiedades mecánicas del acero en tensión. Las propiedades que se determinan con este ensayo son: esfuerzo de cedencia (F_y), esfuerzo último o resistencia a la tensión (F_u), la deformación unitaria en la cedencia (ϵ_y), la deformación unitaria última del material (ϵ_u) y el módulo de Elasticidad (E). Con estos valores se puede determinar una curva esfuerzo-deformación característica para el acero de los tubos estructurales, los cuales fueron utilizados en la construcción de los especímenes de ensayo.

El ensayo en tensión de acero está establecido por la norma ASTM A370. Este ensayo permite determinar las propiedades mecánicas, descritas anteriormente, por medio de especímenes normalizados. Estos especímenes son extraídos de los elementos típicos utilizados en los especímenes de ensayo de acuerdo con la sección F3.2 de AISI S100-2007.

Posteriormente, los especímenes se ensayan de acuerdo con los requisitos de carga que establece la especificación ASTM A 370. Las especificaciones del ensayo se describen más adelante. Esta prueba se realiza en una máquina universal.

5.1.2. Parámetros del ensayo

5.1.2.1 Tipos de especímenes

Las dimensiones requeridas para los especímenes se muestran en la figura 5.1 Cada espécimen se extrae de un tubo diferente, en la parte plana de la sección, para evitar las zonas cercanas a las esquinas (estas zonas podrían tener esfuerzos residuales debido al proceso de fabricación del tubo). La orientación del espécimen con respecto al tubo es longitudinal. Cada espécimen debe ser fabricado con las tolerancias brindadas en la norma ASTM A370 para especímenes tubulares. Estas tolerancias se muestran en el cuadro 5.1.

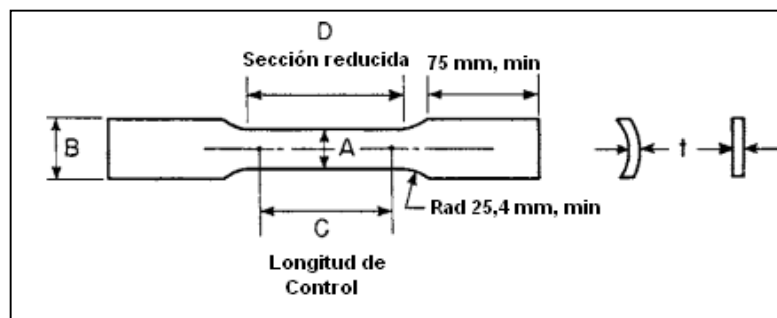


Figura 5.1. Dimensiones especificadas para los especímenes de ensayo en tensión

Fuente: Adaptación de ASTM A370

Cuadro 5.1. Tolerancia en las dimensiones de los especímenes

Espécimen Tipo	Dimensiones (mm)			
	A	B	C	D
1	12,70 ± 0,38	17,5 aprox.	50,0 ± 0,13	57,15 min
2	19,05 ± 0,79	25,4 aprox.	50,0 ± 0,13	57,15 min
			100,0 ± 0,13	114,3 min
3	25,40 ± 1,58	38,1 aprox.	50,0 ± 0,13	57,15 min
			100,0 ± 0,13	114,3 min
4	38,10 ± 3,18	50,8 aprox.	50,0 ± 0,25	57,15 min
			100,0 ± 0,38	114,3 min
			200,0 ± 0,50	228,6 min

1. El área de la sección transversal puede ser calculada como la multiplicación entre A y t .
2. La dimensión t es el espesor del espécimen de prueba brindado.

(Fuente: Adaptación de ASTM A370)

Los especímenes se elaboraron en el LanammeUCR. En la sección 6.1 se muestran las dimensiones de los especímenes. Estos especímenes cumplen con lo especificado para el espécimen tipo 1. En la figura 5.2 se muestran los especímenes elaborados. Las flechas indican las marcas realizadas a los especímenes para la medición de la elongación después de la falla.



Figura 5.2. Probetas para el ensayo a tensión. De derecha a izquierda: Espécimen 1, Espécimen 2, Espécimen 3.

5.1.2.2 Montaje experimental

La prueba se realiza en la Máquina Universal MTS 810 del LanammeUCR. Esta se muestra en la figura 5.3. Tiene una capacidad máxima de 250 kN y una separación máxima entre

cabezas de 950 mm. La máquina permite realizar ensayos en tensión y compresión. Posee mordazas intercambiables, según el tipo de ensayo que se realice.



Figura 5.3. Máquina Universal MTS 810 del LanammeUCR

En el montaje también se utiliza un extensómetro, para medir de la deformación unitaria de los especímenes. Se coloca en la longitud de control. Puede medir deformaciones unitarias hasta de 50%. Este instrumento se utiliza hasta sobrepasar un poco el rango inelástico de cada espécimen. En ese momento se retira del montaje para protegerlo ante la posibilidad de una falla súbita por tensión.

El ensayo consiste en la aplicación de carga axial en tensión. El montaje realizado se muestra en la figura 5.4.

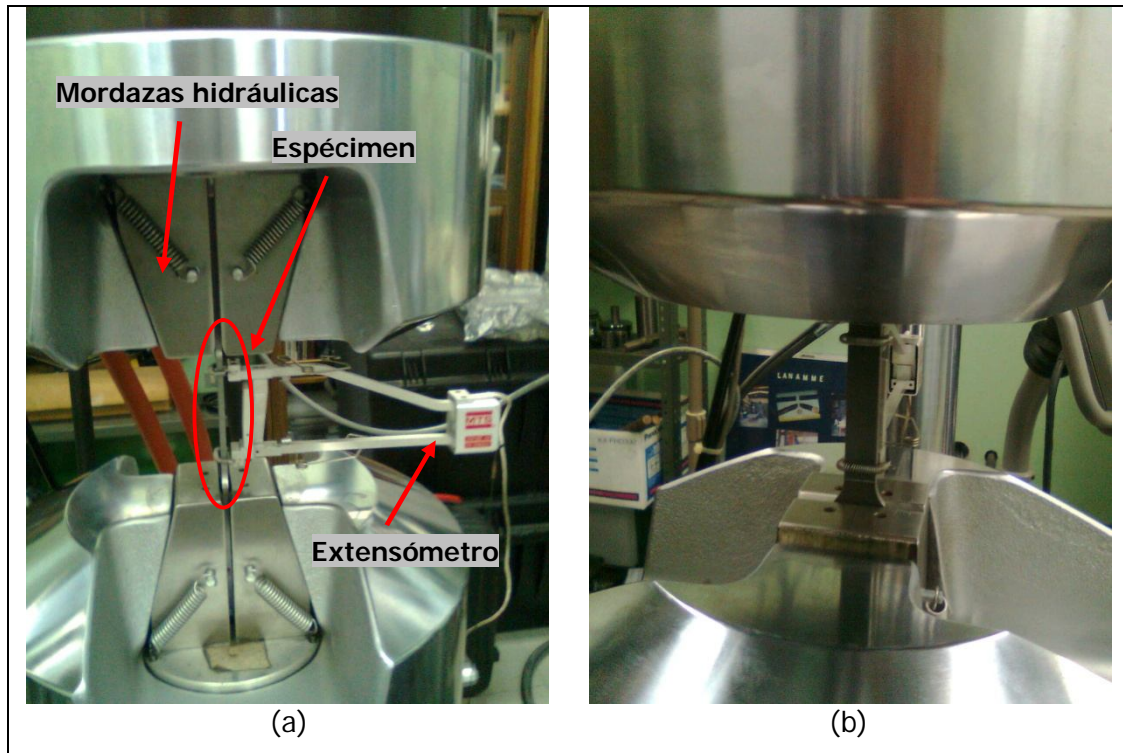


Figura 5.4. Montaje para el ensayo de tensión del material. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral

5.1.2.3 Protocolo de carga

El ensayo de tensión del material, consiste en la aplicación de carga axial a los especímenes mostrados en la figura 5.2. El espécimen se alinea en la máquina universal y se sujeta en los extremos con las mordazas hidráulicas. El ensayo se realiza hasta sobrepasar el rango elástico del material. En ese momento se retira el extensómetro para protegerlo de una falla súbita en tensión. El ensayo continúa hasta que el material falla.

La velocidad de carga debe ser alguna adecuada antes de alcanzar la mitad del punto de fluencia del material. Al alcanzar este punto y hasta la cedencia, si la máquina puede registrar velocidad de carga, esta no debe exceder 690 MPa/min. Si la máquina no permite registrar la velocidad de carga, se debe mantener una velocidad menor o igual que 0,0625 mm/min por mm de sección reducida.

Después de alcanzar el punto de cedencia, para determinar la resistencia a la tracción del material, la velocidad de carga no debe exceder 0,50 mm/min por mm de sección reducida. En cualquier caso la velocidad mínima para realizar el ensayo no debe ser menor que 1/10 de las velocidades máximas especificadas.

5.2. ENSAYOS EN COMPRESIÓN DE LOS ELEMENTOS REPRESENTATIVOS DE LA ARMADURA

5.2.1. Generalidades

Los ensayos en compresión se realizan para determinar el área efectiva en compresión de la sección transversal y la capacidad en compresión de los elementos representativos de las armaduras de ensayo. Los especímenes representativos de los elementos de las armaduras son: especímenes con la longitud igual a la longitud entre nudos (500 mm) y especímenes con la longitud igual a la longitud sin arriostrar (3000 mm). Estos ensayos se realizan con el fin de comparar la capacidad calculada para los elementos en el análisis estructural y la brindada en los ensayos realizados a las armaduras.

Los ensayos en compresión se realizan de acuerdo con la especificación AISI para acero laminado en frío de 1996 (AISI S902). El procedimiento de ensayo se denomina: "Método de ensayo de columna corta para la determinación del área efectiva en columnas de acero laminado en frío".

Este ensayo se realiza para determinar si la sección transversal de una columna es totalmente efectiva en compresión. La especificación busca eliminar los efectos de esbeltez en el espécimen de ensayo, para considerar únicamente los efectos del pandeo local y de los esfuerzos residuales en la sección. No obstante, se realiza una extensión de este procedimiento para determinar la capacidad de los elementos con longitudes mayores a las especificadas, que son representativos de los elementos de las armaduras.

5.2.2. Ensayo de columna corta

5.2.2.1 Tipos de especímenes

Se utiliza el espécimen estandarizado del procedimiento para columna corta de AISI. Este espécimen debe asegurar que se eliminen los efectos de pandeo global. Por esto, la longitud del espécimen no debe exceder veinte veces el radio de giro mínimo, r , de la sección transversal A . Excepto cuando es necesario cumplir con el criterio de longitud mínima. El criterio de longitud mínima establece que la longitud del espécimen no debe ser menor que

tres veces el ancho nominal mayor de la sección transversal, W , siempre y cuando el espécimen no tenga agujeros en su sección.

Los especímenes tienen un radio de giro, r , de 18,6 mm y un ancho nominal, W , de 50 mm. De acuerdo con lo anterior la longitud requerida de los especímenes debe ser:

$$3 W \leq L \leq 20 r \Rightarrow 3 (50 \text{ mm}) \leq L \leq 20 (18,6 \text{ mm}) \Rightarrow 150 \text{ mm} \leq L \leq 372 \text{ mm}$$

Debido a este resultado, se utilizan especímenes de 200 mm de longitud en el ensayo.

Además, los extremos de los especímenes deben cortarse cuidadosamente para que queden planos (planicidad de 0,0508 mm). Si se asegura la planicidad no es necesario soldar el espécimen a las placas de extremo. Si no se asegura la planicidad, se debe soldar el espécimen a las placas de manera que se asegure que no quede ningún espacio entre las placas y el extremo del espécimen.

La planicidad de los especímenes se aseguró con la utilización del equipo de medición de planicidad del LanammeUCR. Sin embargo, para asegurar el contacto del espécimen con las placas, se soldaron los especímenes con puntos en los extremos y se aseguró que cumplieran con la planicidad límite.

Antes de realizar las pruebas a los especímenes de columna corta, se deben realizar pruebas en tensión para determinar el esfuerzo de cedencia del material (F_y). Los especímenes de tensión deben ser cortados longitudinalmente, de la cara más ancha del tubo laminado en frío de donde fueron tomados los especímenes de columna corta. Esto se cumple con las pruebas descritas en 0.

Las placas de borde deben ser al menos de 12,7 mm y deben tener una planicidad de más 0,00508 mm. Es necesario destacar que el LanammeUCR no posee instrumentos para determinar la planicidad con esta precisión. Por tanto se justifica la soldadura entre el espécimen y la placa.

Es necesario realizar la prueba a tres especímenes de columna corta. El espécimen de ensayo típico se muestra en la figura 5.7. Se trabajó con las dimensiones nominales de la sección transversal. Estas dimensiones se muestran en el cuadro 4.2.

5.2.2.2 Montaje experimental

Para la realización del ensayo se utilizó la máquina universal SATEC del LanammeUCR. Esta máquina posee una capacidad máxima de carga de 890 kN y una capacidad máxima de desplazamiento entre cabezas de 900 mm. En la figura 5.5 se muestra la máquina universal.



Figura 5.5. Máquina Universal SATEC.

Lo esencial en el montaje de esta prueba es que el espécimen esté alineado verticalmente, para asegurar que la carga aplicada está uniformemente distribuida sobre los extremos del espécimen. Además, se debe asegurar que el espécimen esté centrado en el eje de la máquina de prueba.

Como ya se mencionó, se deben utilizar placas en los extremos para transferir de manera uniforme la carga de prueba. Además, se debe colocar una capa de 12,7 mm de pasta de

cemento de fraguado rápido, entre las cabezas de la máquina y las placas de extremo del espécimen. Esto se realiza para facilitar el alineamiento entre las cabezas de la máquina y el espécimen.

En la figura 5.6 se muestra un esquema de las partes del montaje y en la figura 5.7 se muestra una foto del montaje típico.

5.2.2.3 Protocolo de carga

Se puede aplicar una precarga al espécimen para evitar la expansión del mortero de nivelación. En el ensayo se aplicó una precarga de 40 MPa, que equivale a aproximadamente un 10% del esfuerzo de cedencia del material, obtenido de los ensayos en tensión. Los especímenes tienen un área de sección transversal de 550,6 mm². Por lo tanto, la precarga es de 22 kN.

Los incrementos de carga no deben exceder el 10% de la carga última de prueba estimada. La velocidad de carga máxima entre incrementos de carga no debe exceder lo que corresponde a una razón de esfuerzo de 21 MPa del área transversal por minuto. Esto corresponde a una razón de incremento de carga de 11,5 kN/min para el espécimen estudiado.

Como el espécimen es una columna corta se pueden despreciar los efectos de esbeltez, por lo que:

$$P_n = F_y A_g \quad [5-1]$$

La carga última esperada para los especímenes de columna corta es de:

$$P_n = F_y A_g = (385 \text{ MPa})(550,6 \text{ mm}^2)(1 \times 10^{-3}) = 212 \text{ kN}$$

Si se utiliza el procedimiento dado en la sección 3.3 para calcular la capacidad en compresión, la carga última sin factorizar será de 216 kN, esto lleva a que la capacidad es de 212 MPa, según el análisis anterior. Los especímenes tienen una razón de esbeltez $KL/r = 11,0$. Asumiendo apoyos simples en los extremos ($K=1,0$).

El ensayo se realiza hasta que el espécimen alcanza el esfuerzo de cedencia. Es decir, la carga última esperada.

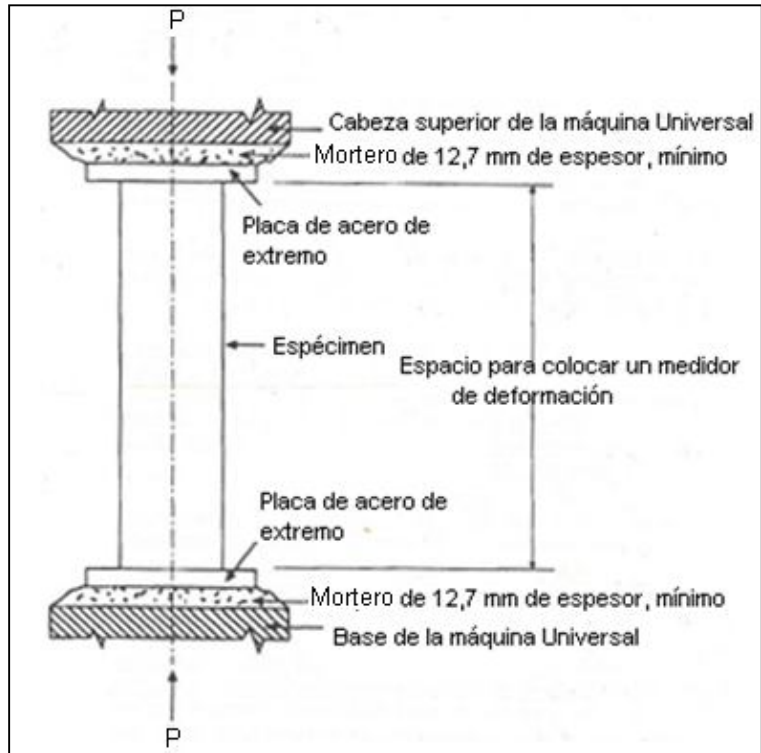


Figura 5.6. Esquema del montaje experimental

Adaptada de AISI S100-2007

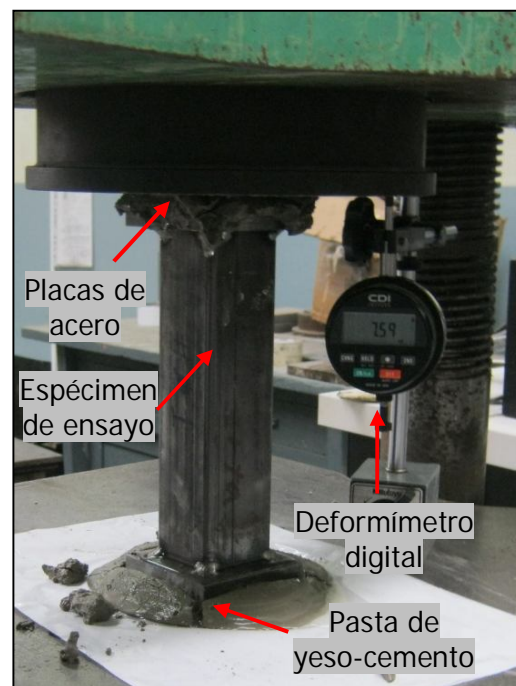


Figura 5.7. Montaje experimental y espécimen típico para el ensayo de columna corta.

5.2.3. Ensayo de compresión en especímenes representativos de la longitud entre nudos de la armadura

5.2.3.1 Tipos de especímenes

La longitud entre nudos de las armaduras ensayadas es de 500 mm, por lo que la longitud de los especímenes para la prueba en compresión individual es la misma que la longitud entre nudos.

Se asume que las condiciones de apoyo son rígidas. No hay rotación en los extremos, debido a la cabeza fija de la máquina. El factor de longitud efectiva es de $K=0,50$. Entonces, la razón de esbeltez de los especímenes es de: $KL/r = (0,50)(500)/(18,6) = 13,4$. Al utilizar el análisis descrito en el capítulo 3, se puede observar que el espécimen pandea en el rango inelástico.

A los especímenes se les colocan las mismas placas de extremo que se utilizaron en los especímenes de columna corta. Estas placas fueron soldadas por medio de puntos de soldadura para dar un contacto uniforme entre la placa y el extremo del espécimen. Además, con esto se asegura una correcta distribución de la carga aplicada en la sección transversal.

En la figura 5.8 se muestra el espécimen típico.

5.2.3.2 Montaje experimental

El montaje experimental de la prueba para los especímenes es similar al mostrado en la sección 5.2.2. En la figura 5.8 se muestra el montaje experimental utilizado para estos especímenes.

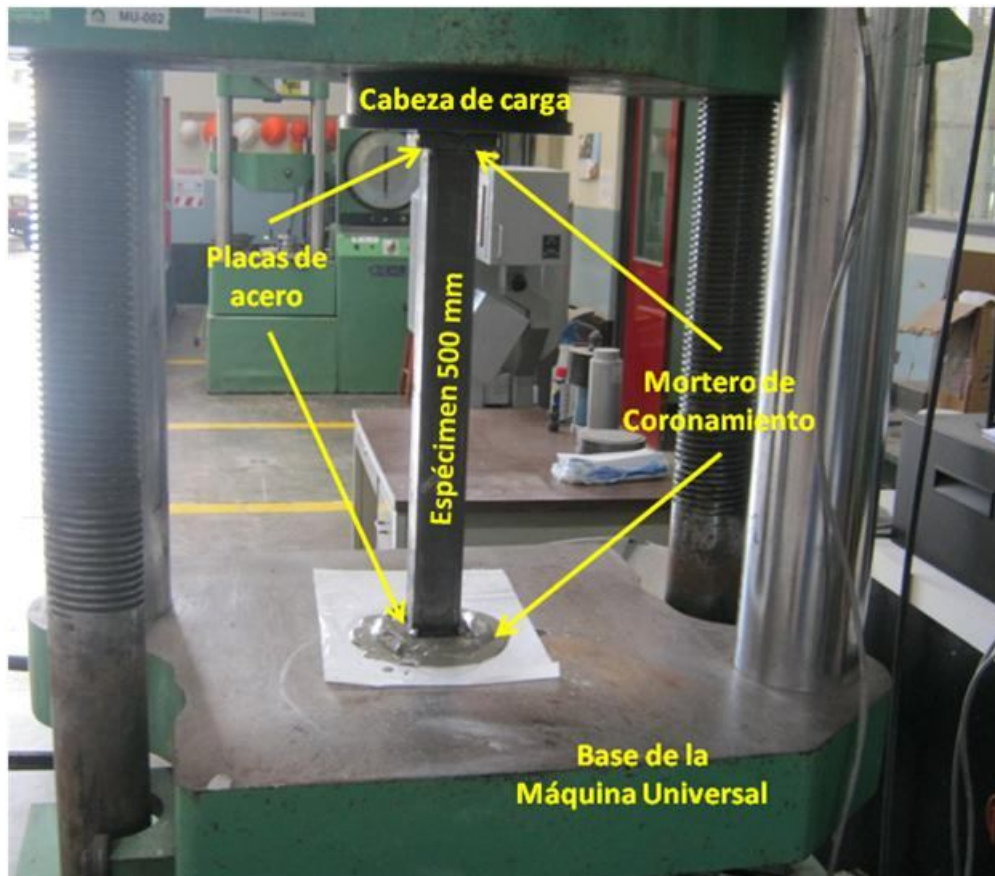


Figura 5.8. Montaje experimental y espécimen típico para el ensayo de especímenes representativos de la longitud entre nudos de las armaduras.

5.2.3.3 Protocolo de carga

Se utiliza el mismo protocolo de carga que se utilizó para los especímenes de columna corta. Esto aplica debido a que los especímenes pandean en el rango inelástico.

Se deben dar consideraciones de seguridad al darse el pandeo del elemento ya que el modo de falla es inestable, en comparación con la falla de los especímenes de columna corta. Es por esto que el ensayo debe detenerse cuando se produzca la falla del espécimen. El criterio para detener el ensayo fue cuando la máquina universal no registraba aumento en la carga sobre el espécimen.

Si se sigue el procedimiento mostrado en la sección 3.3, la carga máxima esperada sin factorizar para estos especímenes es de 215 kN. Esto significa que la falla se dará por cedencia en 212 kN.

5.2.4. Ensayo de compresión en especímenes representativos de la longitud sin arriostrar de la armadura

5.2.4.1 Tipos de especímenes

La longitud sin arriostrar de las armaduras de ensayo es de 3000 mm. El espécimen de ensayo para el ensayo en compresión es de la misma longitud. Se utilizaron dos especímenes para realizar el ensayo.

El primer espécimen fue soldado con puntos a las placas de extremo. No se colocaron cabezas esféricas, ni pivotes para los apoyos. Esto no representa las condiciones de apoyo de la longitud no arriostrada. Sin embargo se realizó, para seguir las especificaciones dadas en la norma de ensayo AISI.

Para el segundo espécimen se utilizó una cabeza de carga esférica en la parte superior y se fabricó una base con un pivote. Esta base permite la rotación del espécimen en su parte inferior. La cabeza esférica permite la rotación en la parte superior. Esta condición permite representar las condiciones en que se encuentran la cuerda en compresión en las armaduras.

5.2.4.2 Montaje experimental

El ensayo se realizó en el sistema de piso de reacción del LanammeUCR. Se utilizó para la carga del espécimen un gato hidráulico de 1000 kN de capacidad. Controlado por una bomba hidráulica automática.

El montaje se realizó inicialmente de la misma forma utilizada para los especímenes de columna corta. Se utilizaron dos placas en los extremos del espécimen para distribuir la carga en la sección transversal. Estas placas se soldaron por medio de puntos a los extremos del espécimen. Esto provocó que no se emulara la condición no arriostrada, donde se tiene un elemento entre dos apoyos articulados.

En el segundo espécimen se varió el montaje. Se realizó un ajuste a la placa inferior para dar libertad de rotación al espécimen. Esto se logró con una barra que sirvió de pivote. En la parte superior se colocó una cabeza esférica con una distancia de 200 mm entre la base de la cabeza y el punto de rotación. Además, en la parte superior se colocó una placa de 19 mm de espesor, sobre el espécimen. Es importante considerar que estos elementos generan un aumento en la longitud de pandeo.



Figura 5.9. Montaje experimental y espécimen típico para el ensayo de especímenes representativos de la longitud sin arriostrar de las armaduras.

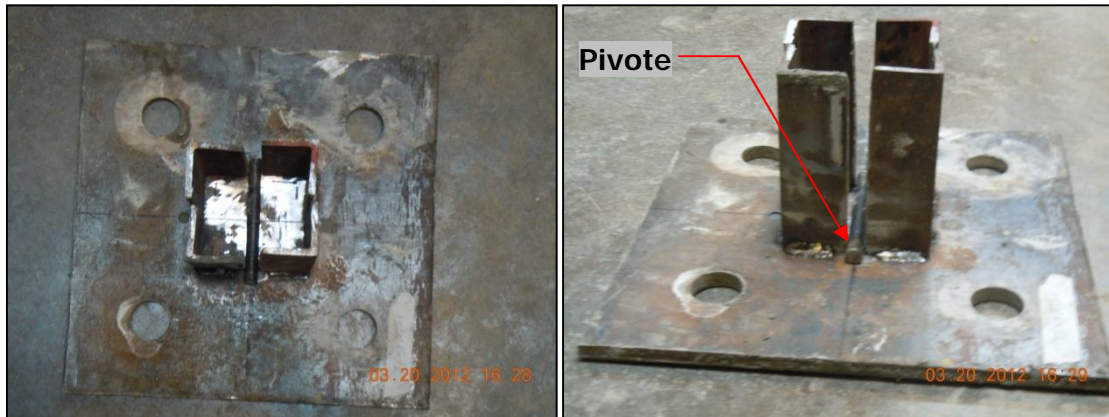


Figura 5.10. Base del montaje con pivote para los especímenes de longitud no arriostrada.

Al espécimen se le soldaron las placas en los extremos. La placa superior permite colocar la cabeza esférica. A la placa inferior fue necesario realizarle un bisel que permite que el pivote se ajuste. Este segundo montaje es inestable cuando el espécimen no tiene carga. Es necesario aplicar una precarga al espécimen para evitar esta inestabilidad.

En la figura 5.9 se muestra el montaje experimental utilizado para el ensayo en compresión. En la figura 5.10 se muestra el apoyo inferior que se utilizó en el ensayo.

5.2.4.3 Protocolo de carga

El espécimen tiene en su parte superior una placa y algunos objetos que le proporcionan carga axial debido a su peso propio. El peso de estos elementos se registró antes de realizar el ensayo. Después de realizar el montaje del espécimen se aplica una precarga.

El ensayo experimental se llevó a cabo de dos maneras distintas por las condiciones de montaje de cada espécimen. En el espécimen 1, después de aplicar la precarga, se inicia el ensayo. En el espécimen 2, la precarga se aplica hasta que el espécimen se pueda mantener en su lugar por sí solo (en el caso del montaje con apoyos de pivote). Después de esto se ejecuta el ensayo a una velocidad constante de 50 N/s, de manera que el ensayo se pueda observar de manera segura. Al alcanzar la falla, no se debe retirar el pistón del gato de su posición hasta asegurarse de la estabilidad del montaje.

El equipo que se utiliza para el ensayo de compresión se muestra en la figura 5.11.



Figura 5.11. Gato hidráulico utilizado para realizar la carga a los especímenes

La carga máxima de ensayo esperada se calcula con el procedimiento mostrado en la sección 3.3. Para el primer espécimen se tiene una longitud de 3000 mm entre apoyos, y se utilizó un factor de longitud efectiva de 0,5. Para el segundo espécimen, al considerar las dimensiones de la cabeza esférica, de las placas de extremo y del pivote, se tiene una longitud entre apoyos de 3257 mm. Para el segundo espécimen, se utilizó un factor de longitud efectiva de 1,0. En estos cálculos se utilizó el esfuerzo de cedencia (F_y) como 400 MPa y el módulo de elasticidad como 200 000 MPa.

En el siguiente cuadro se muestran los resultados para la capacidad en compresión de estos especímenes:

Cuadro 5.2. Capacidad nominal de los especímenes representativos de la longitud sin arriostrar

Espécimen N°	Longitud entre apoyos L (mm)	Factor de longitud efectiva K	Razón de esbeltez KL/r	λ_c	Tipo de pandeo	Capacidad en compresión P_n (kN)
1	3000	0,50	82,4	1,17	Inelástico	127,5
2	3257	1,00	179,0	2,55	Elástico	30,6

5.3. ENSAYOS SOBRE LOS ESPECÍMENES TIPO ARMADURA

5.3.1. Generalidades

Estas pruebas experimentales son el objeto de estudio de este trabajo de graduación. Los ensayos se realizan para determinar la carga crítica de la estructura, cuando el modo de falla del espécimen es por pandeo fuera del plano de la cuerda en compresión de la armadura. Con estas pruebas experimentales, se busca dar respuesta a las interrogantes que plantea este proyecto: ¿Cuál es la longitud efectiva que se debe utilizar para las cuerdas en compresión? ¿Cuál es la fuerza de diseño que se debe utilizar en la cuerda en compresión de una armadura de acero?

La norma AISI (1995) plantea una guía con directrices que se deben seguir al realizar ensayos a escala natural en especímenes tipo armadura. Estos ensayos se realizan para corroborar la resistencia ante las cargas de diseño. También para determinar la capacidad de carga última y el método o mecanismo de falla.

Algunos aspectos de importancia que establece esta guía para el ensayo de armaduras a escala natural son:

- La prueba sobre las armaduras puede ser en un espécimen individual o a un sistema basado en un par de armaduras.
- El montaje debe ser diseñado para una resistencia y rigidez adecuadas, de manera que sea el espécimen el que se esté probando y no el montaje.
- El ensayo sobre las armaduras se debe realizar en forma vertical, invertida u horizontal.
- Los apoyos para las armaduras deben tener la resistencia y rigidez para resistir las deformaciones durante el ensayo. Además, deben dar un espacio libre inferior suficiente entre el suelo y el espécimen o entre el espécimen y el marco de carga. Con esto se facilita la carga del espécimen y la instrumentación, permite acomodar los desplazamientos del espécimen durante el ensayo y da espacio para realizar las observaciones requeridas.
- Cuando se coloca arriostramiento lateral, se debe asegurar que este no interfiera en el desplazamiento en el plano de la armadura.

- En los dispositivos de carga se deben evitar las excentricidades en la carga de los especímenes a menos que sea requerido.

Además de estas recomendaciones para el ensayo, se propone una amplia gama de posibles dispositivos para la medición de la carga, la deflexión y las deformaciones en los elementos. Entre los dispositivos que se permiten utilizar están: celdas de carga, transductores lineales de desplazamiento (LVDT) y galgas extensométricas eléctricas.

Todas estas disposiciones fueron tomadas en cuenta para la realización de los ensayos. No obstante, fue necesario realizar pruebas preliminares al montaje propuesto. Esto se debió a la posibilidad de falla de los elementos del montaje. Se utilizó la armadura C1-1 como prueba para corroborar la resistencia del montaje propuesto.

5.3.2. Parámetros del ensayo

5.3.2.1 Tipos de especímenes

Para cada configuración de elementos, (ver 4.3.1.1) se construyeron dos especímenes. En total, se ensayaron seis especímenes en tres configuraciones distintas. Cada espécimen se nombró de la siguiente manera: Configuración y número de espécimen. Así por ejemplo, para el segundo espécimen de la configuración tres, la nomenclatura es C3-2.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo del tipo de espécimen de ensayo. Se muestra el espécimen C1-1. En el Apéndice D se observa la vista antes de realizar el ensayo para cada espécimen.

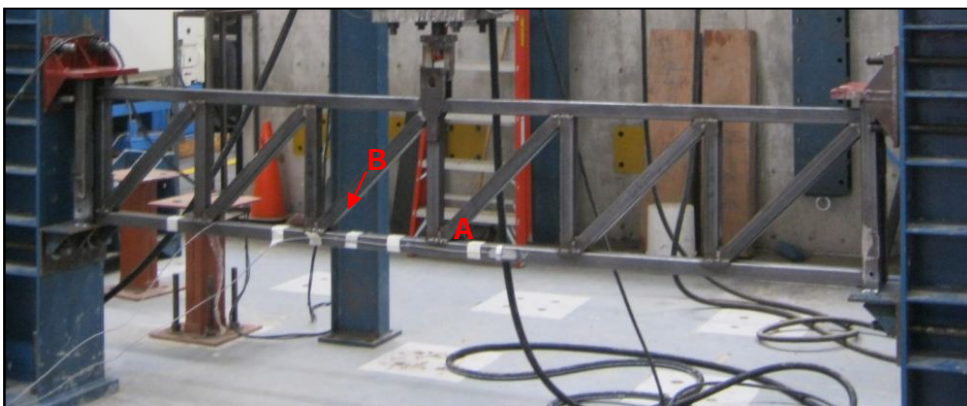


Figura 5.12. Especímen C1-1

5.3.2.2 Proceso constructivo

La construcción de los especímenes tipo armadura se realizó en el LanammeUCR. El primer paso para la construcción de los especímenes consistió en el corte del material. El corte se realizó según se describió en el capítulo 4.

Una vez cortadas las piezas, se colocaron en el lugar donde debían quedar respecto a las cuerdas. Se verificó que estuvieran alineadas y que los ángulos entre los elementos fueran los correctos. Posteriormente, se unieron con puntos de soldadura para fijar las piezas en su sitio. Al estar unidas, se limpiaron las zonas donde se colocaron los puntos de soldadura y se procedió a completar los cordones de soldadura. En las conexiones de los elementos, se soldó únicamente en el plano frontal y posterior de las armaduras. (Ver figures 5.13 y 5.14)

El proceso de soldadura utilizado es el llamado de arco de corriente, SMAW por sus siglas en inglés (*shield metal arc welding*). Este proceso deja residuos en las zonas de la soldadura llamados escoria. Esta escoria permite el enfriamiento uniforme de la soldadura. Cuando la soldadura se enfría, se remueve la escoria.



Figura 5.13. Proceso constructivo de las armaduras.

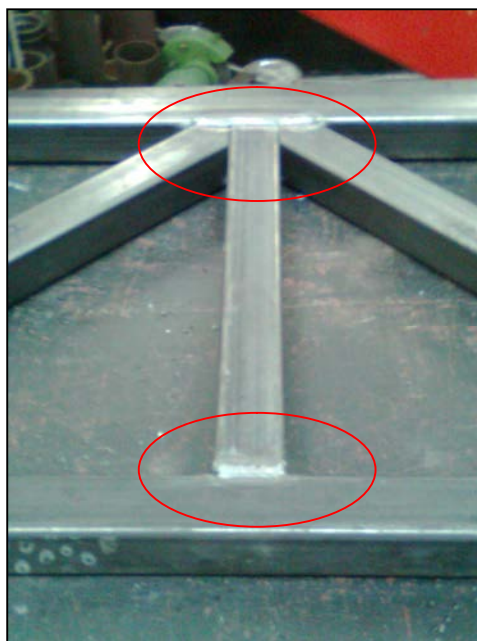


Figura 5.14. Fotografía de conexiones típicas en las armaduras.

Las soldaduras son más susceptibles a la corrosión. Posterior a la soldadura de las conexiones de los especímenes, se aplicó aceite en las soldaduras para evitar la corrosión en estas zonas.

Al tener listos los especímenes, se fabricaron las placas de transmisión de carga. Estas placas se cortaron según las dimensiones dadas en la figura 5.15. Los cortes se realizaron en el taller de soldadura de la UCR. Posteriormente, se realizaron los agujeros en las placas para colocar un perno, que permitiera que el gancho de carga que se colocó en el gato se uniera al espécimen. Después de realizar los agujeros, se soldaron las placas al espécimen. La soldadura se realizó en las secciones planas de los tubos que conforman la armadura. Estos trabajos también se realizaron en el LanammeUCR.

Además de los especímenes, se diseñaron y construyeron los apoyos superiores del montaje. Estos apoyos se muestran en la figura 5.18. Para la construcción de estos apoyos se pidieron al proveedor de acero las placas cortadas a la medida. Además se realizó el corte de los refuerzos rigidizadores.

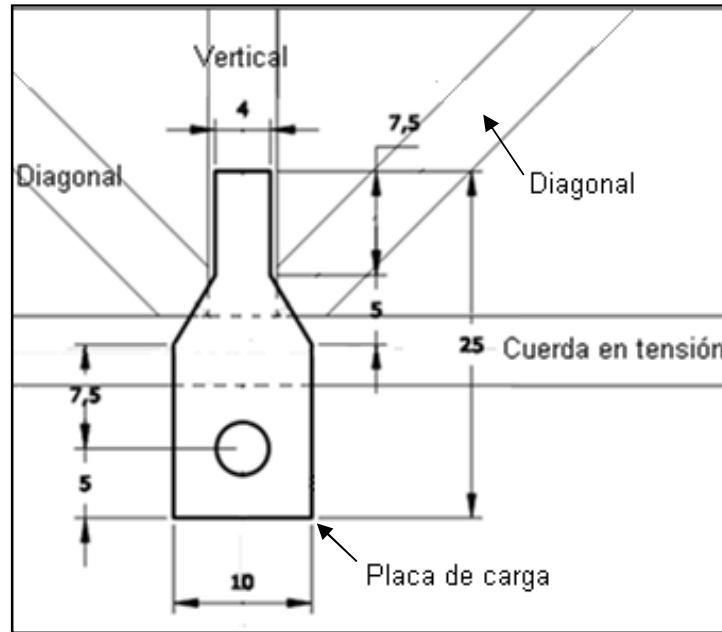


Figura 5.15. Placas de transmisión de carga. Dimensiones en mm

Otro trabajo realizado fue la fabricación del gancho de carga mostrado en la figura 5.20. Este gancho fue realizado por un taller calificado en corte y soldadura, según las dimensiones que se requerían. La pieza principal del gancho se cortó a un ancho mayor que el requerido. Esto requirió que se debiera gastar la parte superior del gancho para que se ajustara a las dimensiones requeridas.

5.3.2.3 Montaje experimental

Los aspectos utilizados para el diseño del montaje experimental se basan en criterios para dar estabilidad al espécimen durante la prueba. Se requiere que el espécimen no tenga inestabilidad en el plano ni fuera del mismo. Por otra parte, se debe garantizar que los elementos de los especímenes no sufran falla local en los puntos de apoyo del montaje.

Como bien se establece en la guía de AISI, los elementos del montaje deben tener la suficiente rigidez y resistencia para realizar las pruebas. Con ello se garantiza que se están probando los especímenes y no el montaje. Es importante tomar estas consideraciones, principalmente, en los apoyos principales de la armadura y en el sistema de aplicación de carga a los especímenes.

Inicialmente se realizó el montaje que se presenta en la figura 5.16. Este montaje presentó problemas debido a que depende de la resistencia y rigidez de muchos elementos intermedios. En las pruebas iniciales que se realizaron se comprobó que muchos elementos del montaje no brindaban la resistencia requerida, y fallaban antes que el espécimen. Los problemas no solo radicaban en la resistencia y rigidez de los elementos, sino que por las dimensiones requeridas para el montaje no era posible realizarlo con los elementos propuestos inicialmente.

Fue por lo anterior que se decidió cambiar el montaje por el que se muestra en la figura 5.17. Este montaje tiene elementos más rígidos que permiten cumplir con el requisito dado en AISI: los elementos del montaje deben ser más resistentes y rígidos que el espécimen. Se pudo demostrar con las pruebas que este montaje era el idóneo.

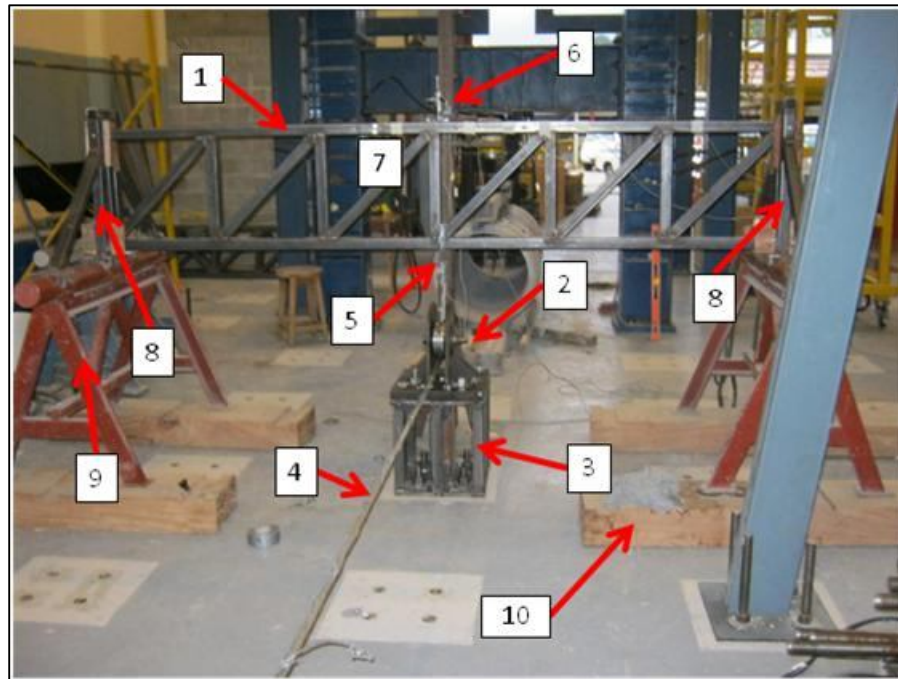
A continuación se presenta una descripción de los elementos que se utilizaron en el montaje que se observa en la figura 5.17:

a) Apoyos inferiores

Funcionan como arriostre para la cuerda en compresión. A manera de diafragma, resisten los esfuerzos que se puedan generar en el momento del pandeo. Permiten colocar de manera segura el espécimen y dan estabilidad lateral durante el ensayo.

Debido a las dimensiones estandarizadas de las columnas rígidas, los especímenes tenían un espacio entre el apoyo superior y la cuerda en tensión. Los apoyos inferiores permiten apoyar temporalmente el espécimen, mientras se ajusta el gancho de carga para ajustar al espécimen en su lugar e iniciar el proceso de carga.

En la figura 5.18 se muestran los apoyos inferiores del montaje.



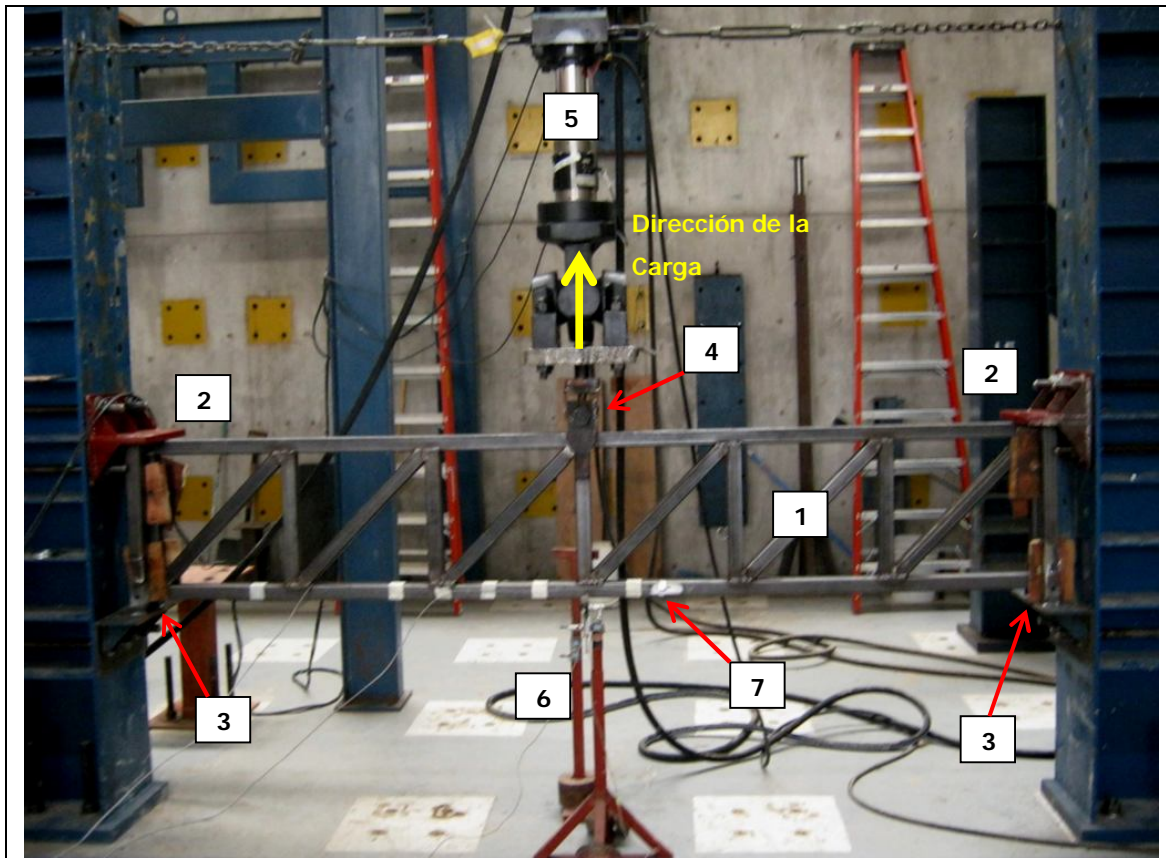
- 1 Espécimen
- 2 Polea para transmitir la carga del cable al espécimen
- 3 Pedestal para nivelar el cable (ver detalle en Apéndice H)
- 4 Cable de carga trenzado (6 cables de 1/4"[6,35 mm])
- 5 Unión cable de carga-espécimen (ver detalle en Apéndice H)
- 6 Medición de desplazamientos
- 7 Galga extensométrica
- 8 Sistema de arriostre lateral en extremos
- 9 Apoyos rígidos
- 10 Elementos de madera para aumentar distancia entre espécimen y polea

Figura 5.16. Montaje N° 1.

b) Apoyos superiores

Los apoyos superiores se diseñaron para soportar una carga última de 10 toneladas. El punto de aplicación de carga se muestra en la figura 5.18. El apoyo debe mantener su rigidez durante la realización del ensayo, por tanto se debe revisar el estado límite de servicio. Los apoyos superiores se fijan a la columna rígida mediante pernos. Es necesario revisar que los pernos se hayan ajustado correctamente. De lo contrario, se podrían provocar deformaciones no contempladas en el diseño.

Al haber colocado el perno de carga, para unir el gancho de carga con el espécimen, se debe subir la estructura hasta que haga contacto con los apoyos. Se debe asegurar que el espécimen esté alineado y que la carga se aplique en el centro del perno.



1. Espécimen.
2. Apoyos principales.
3. Apoyos inferiores para facilitar montaje y elementos de arrioste.
4. Sistema de aplicación de carga
5. Gato Hidráulico Servocontrolado
6. LVDT para medir deformación en el plano y fuera del plano.
7. Galgas en elementos críticos. Galga A (frente), Galga B (Posterior)

Figura 5.17. Montaje N° 2, realizado para cumplir con los requisitos de AISI.

c) Elementos para estabilidad lateral

Estos elementos fueron soldados al apoyo inferior. Brindan estabilidad lateral a la armadura. Se colocaron trozos de madera para brindar mayor soporte lateral a las armaduras durante el ensayo. Estos elementos deben permitir la rotación en los puntos de apoyo.

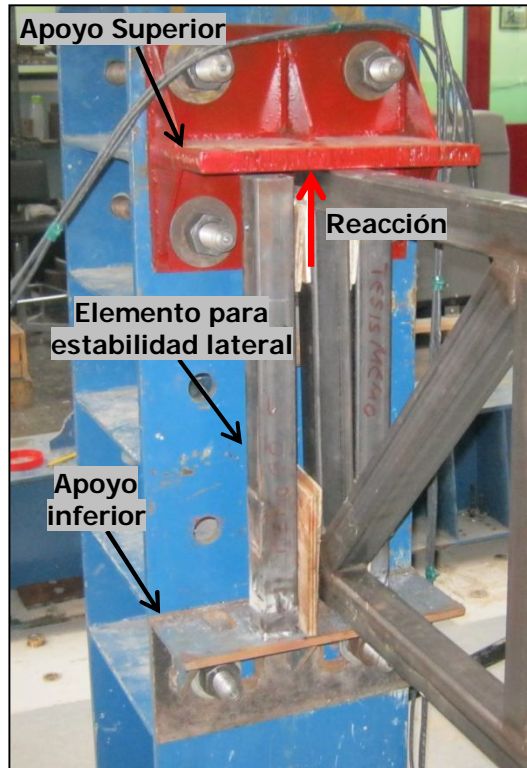


Figura 5.18. Apoyos para montaje

d) Sistema de aplicación de cargas

El sistema de aplicación de carga debe ser capaz de transmitir los esfuerzos a la armadura de manera uniforme. La transmisión de carga se debe dar desde el gato hidráulico, hasta el espécimen de manera uniforme. Para lograr esta transmisión de carga se debe dar la suficiente rigidez a los elementos de transmisión de carga.

El sistema de carga consta de varios elementos. En la figura 5.19 se muestran las partes del sistema de aplicación de carga. Las placas de transmisión, unidas al espécimen en la cuerda en tensión, permiten que la carga se aplique en la línea de centro del espécimen. El gancho de carga permite la transmisión de carga, desde el gato hidráulico, hasta las placas. El gancho y las placas se unen por medio de un perno, diseñado para resistir la carga máxima esperada. El gancho de carga se une al gato hidráulico servocontrolado por medio de un tornillo y una placa rígida. Todos estos elementos se diseñaron para resistir una carga máxima de 200 kN (20 tonf).

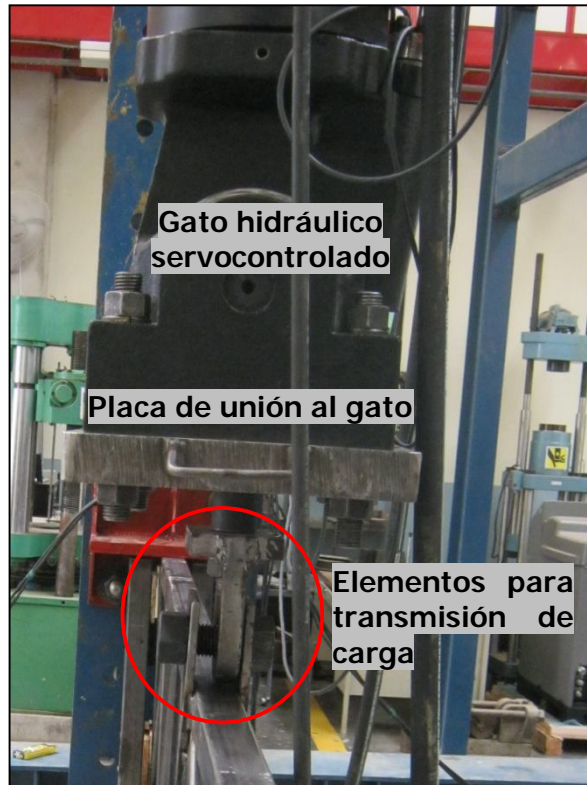


Figura 5.19. Sistema de aplicación de carga

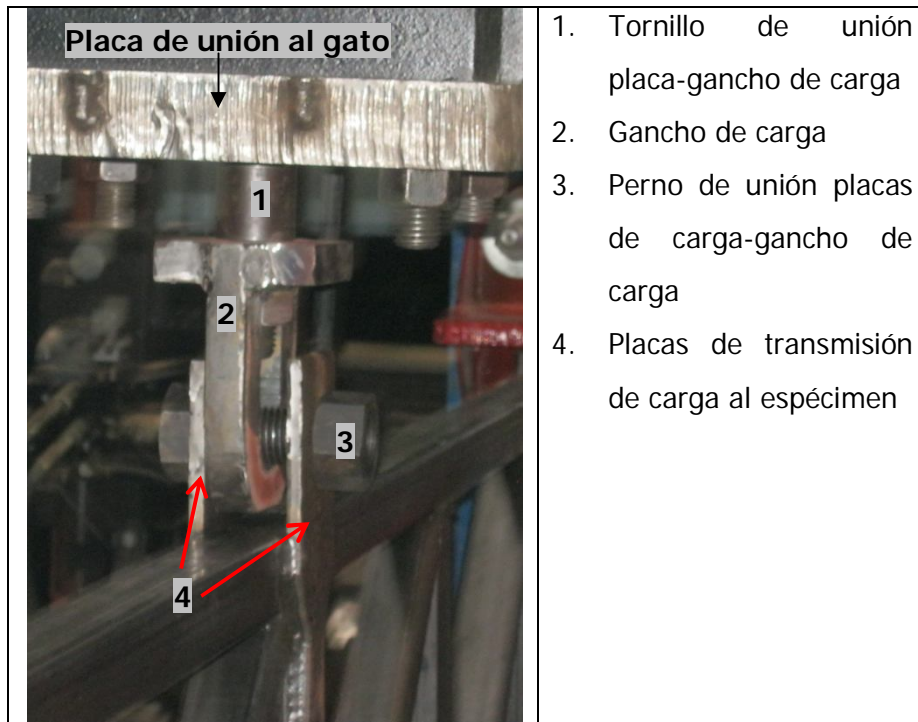


Figura 5.20. Elementos de transmisión de carga

e) Colocación de aparatos de medición

Los aparatos de medición se colocaron para controlar el ensayo. Se colocaron dos transductores lineales de desplazamiento (LVDT). Uno para medir el desplazamiento en el plano de carga y el otro fuera del plano. El LVDT en el plano mide la deflexión que se produce al cargar el espécimen. El LVDT fuera del plano registra la deformación del espécimen cuando se está produciendo pandeo en la cuerda en compresión. El LVDT dentro del plano tiene una capacidad de desplazamiento de 50 mm. El LVDT fuera del plano tiene una capacidad de desplazamiento de 100 mm.

Además de los medidores de desplazamiento, se colocaron galgas extensométricas en los elementos que reciben mayor fuerza interna. Las galgas miden la deformación lineal en el elemento. Con este dato se puede obtener la fuerza en el elemento en el rango elástico.

Estas galgas tienen un factor de ajuste de lectura (Gage Factor) de $2,11 \pm 0,5\%$ a $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. En las pruebas se utilizó un gage factor de 2,0, obtenido por medio de resistencias de calibración. Este valor difiere de la tolerancia dada por el fabricante debido a la caída de voltaje que se da por la longitud de los cables utilizados. La resistencia eléctrica de la galgas es de $350 \pm 0,3\% \Omega$.

En la figura 5.17 se muestra la ubicación de estos elementos de medición. En las siguientes figuras se muestra un detalle de cada uno de estos elementos. Además, se muestran los sistemas de control del ensayo, donde los datos son capturados.

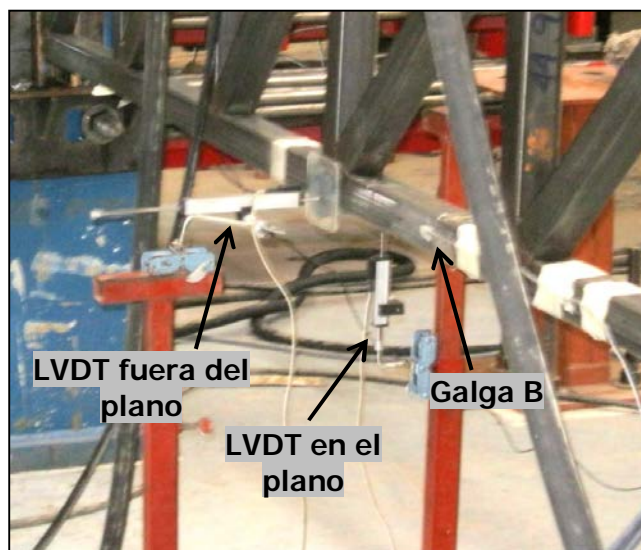


Figura 5.21. Posición de los LVDT y las galgas extensométricas

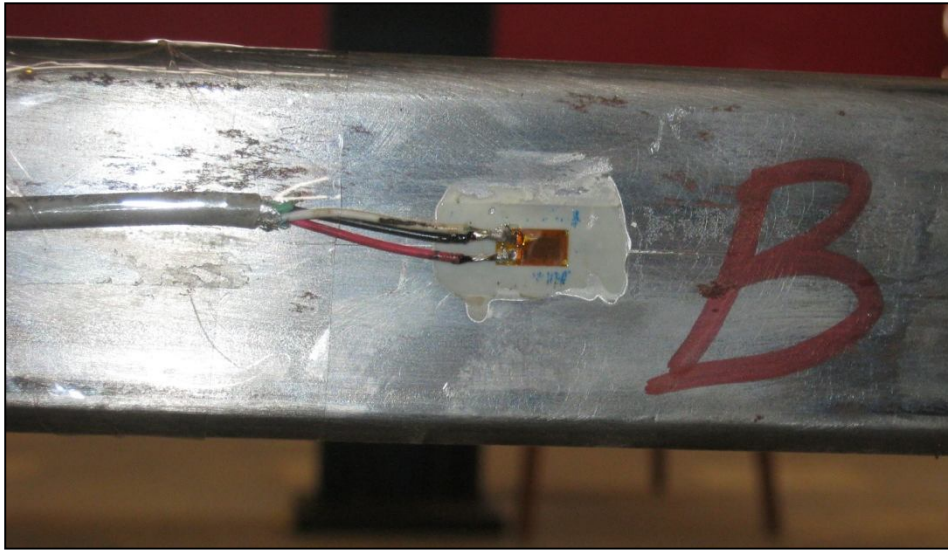


Figura 5.22. Detalle de una galga extensométrica.



Figura 5.23. Sistemas de control del ensayo

5.3.2.4 Protocolo de carga

Para realizar la carga a los especímenes se utiliza un gato hidráulico servocontrolado marca MTS con capacidad para 500 kN de fuerza. Tiene además capacidad de desplazamiento de 500 mm. En la figura se muestra el dispositivo utilizado.



Figura 5.24. Gato hidráulico servocontrolado MTS

Al montar el espécimen se debe unir el gancho de carga y el espécimen. Posteriormente, se sube el espécimen a la posición de falla. Se le aplica una precarga 1 kN como mínimo antes de iniciar el ensayo, para determinar que el espécimen se haya acomodado bien. Se verifica que el sistema de carga esté alineado. Se toman las observaciones y medidas respecto a excentricidades en la carga en el punto de aplicación.

Se aplica una velocidad de carga uniforme de 6,0 kN/min. Esta velocidad se mantiene hasta los 30 kN. Este valor de carga es el que se obtiene al diseñar la armadura según las disposiciones dadas en los códigos. Esta velocidad permite controlar el espécimen por fuerza en el rango elástico y permitiría detener el ensayo de manera segura en caso de una falla elástica.

Después de llegar al valor de 30 kN, el ensayo se controla por desplazamientos. La velocidad de ensayo es de 15 mm/min. Esto se debe a que después del valor de diseño dado en códigos, el espécimen puede alcanzar deformaciones inelásticas. Al alcanzar estas deformaciones, el controlador ya no registraría un incremento en la carga pero el espécimen se seguirá deformando.

La velocidad de deformación, determinada para la segunda fase del ensayo, permite un registro de datos adecuado, además evita que el espécimen tenga cargas sostenidas durante un tiempo prolongado. Si se permiten las cargas sostenidas el espécimen puede tener un acomodo ante esas cargas y el registro de desplazamientos y deformaciones unitarias puede verse afectado.

El ensayo se detiene cuando se pierde un 20% de la carga máxima alcanzada o si se nota una deformación excesiva en el espécimen que pueda representar un riesgo para la seguridad de los presentes en el ensayo y para el equipo.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se muestran los resultados experimentales de los ensayos experimentales realizados en este proyecto de investigación. En cada sección se muestra una descripción de la nomenclatura utilizada en cada ensayo.

6.1. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DEL ACERO EN TENSIÓN

Este ensayo se realizó en probetas de acero. Estas probetas se muestran en la figura 5.2. Las dimensiones requeridas para el ensayo de probetas de acero se muestran en el cuadro 6.1. La nomenclatura para las dimensiones requeridas se estableció en la figura 5.1.

Cuadro 6.1. Dimensiones de las probetas de acero

ESPÉCIMEN N°	1	2	3	Unidades
C	50,00	49,99	50,00	mm
A	12,65	12,52	12,64	mm
t	3,16	3,16	3,27	mm
D	59,97	60,08	59,99	mm
B	20,04	19,99	20,02	mm
L _{agarre mordazas}	75,27	75,09	75,10	mm
L _{total}	228,18	228,02	227,79	mm
Área	39,92	39,55	41,33	mm ²

Con los valores obtenidos durante el ensayo para carga y deformación unitaria, y con las dimensiones mostradas en el cuadro 6.1, se obtuvieron los gráficos esfuerzo-deformación para cada uno de los especímenes. En esta sección se muestra un gráfico esfuerzo-deformación representativo de los resultados. En el Apéndice E se muestran tanto los gráficos esfuerzo-deformación obtenidos con el extensómetro así como los gráficos esfuerzo-deformación entre cabezas de la máquina de ensayo (deformación aparente), para mostrar el comportamiento de cada espécimen en la falla.

Para el espécimen 1, no se muestran el gráfico esfuerzo-deformación real debido a que no se toman mediciones con el extensómetro. Esto se debe a que primero se debe determinar el comportamiento del espécimen para proteger el equipo.

En general, la falla de los especímenes fue dúctil. Toda la energía se disipó como deformación. La falla no fue súbita. En el espécimen 3, el extensómetro se mantuvo durante más tiempo en la toma de datos. Esto se debió a que ya se había observado el tipo de falla de los especímenes.

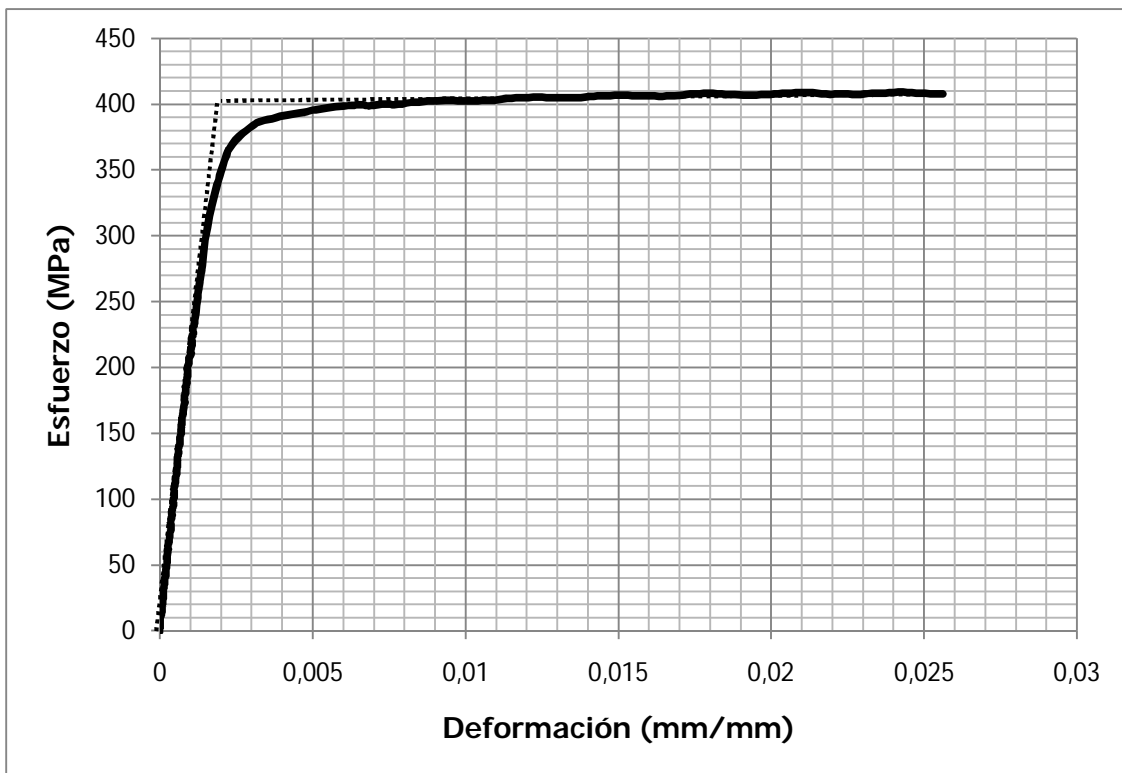


Figura 6.1. Gráfico esfuerzo-deformación unitaria, típico. Se muestra el gráfico para el espécimen 2.



Figura 6.2. Modo de falla típico de las probetas de acero.

El cálculo de esfuerzos se realizó de la siguiente manera:

$$Esfuerzo = \frac{Fuerza}{Área} \quad [6-1]$$

La fuerza es la que registra la máquina de ensayo. El Área se refiere a la sección reducida del espécimen: $Área = A t$.

La deformación aparente se calcula como:

$$\varepsilon_{APARENTE} = \frac{\Delta_{máquina}}{L_{total} - 2L_{agarre\ mordazas}} \quad [6-2]$$

Donde:

$\Delta_{máquina}$: es el desplazamiento entre cabezas registrado en la máquina universal.

Los gráficos esfuerzos-deformación de los especímenes son prácticamente bilineales. Después de la zona de transición de la parte lineal-elástica, el gráfico crece casi linealmente hasta la falla, con una pendiente pequeña. No obstante, el punto de cedencia no está bien definido.

Por ello no se puede aplicar el "Método del diagrama autográfico" de la norma ASTM A370. Este método establece que si el gráfico esfuerzo-deformación tiene una discontinuidad o "rodilla" bien marcada y que haya sido obtenido mediante una unidad de adquisición de datos, el esfuerzo de fluencia será tomado como la ordenada correspondiente a la parte superior horizontal de la "rodilla".

Como este método no se puede utilizar ya que no está bien definida la parte superior de la "rodilla" del gráfico, se utiliza el "Método de extensión total bajo carga". Este método establece que se debe colocar un extensómetro adecuado y cuando la carga produce una deformación determinada, esta carga se transforma a esfuerzo. Este valor se toma como el esfuerzo de cedencia. Tanto en la norma ASTM A370 como en la AISI S100-2007 (Sección F), se establece que para aceros con un punto de fluencia especificado, menor a 550 MPa, el valor de deformación unitaria de cedencia puede ser tomado como 0,005.

El valor de esfuerzo de cedencia se obtuvo como la ordenada de la curva esfuerzo-deformación real de cada espécimen, para el valor de deformación unitaria de 0,005. Fue necesario interpolar entre los datos. Para la obtención del esfuerzo de cedencia del espécimen 1, se utilizó el gráfico esfuerzo-deformación aparente.

También se obtuvo el módulo de elasticidad del acero. Por medio de la pendiente de la recta de mejor ajuste, que pasa por el origen, de la parte elástica del gráfico esfuerzo-deformación real. Para el espécimen 1 no se obtuvo este dato, debido a que la deformación unitaria es aparente.

Además de la deformación de cedencia, el esfuerzo de cedencia y el módulo de elasticidad, se obtuvo la deformación última aparente de los especímenes. Esta deformación se obtuvo como la deformación máxima obtenida en el gráfico esfuerzo-deformación aparente. Este valor es informativo, ya que no necesariamente corresponde a la deformación última real, pero, da una idea bastante cercana del valor real. Como se verá seguidamente, se compara con la deformación última medida físicamente (al unir las piezas fracturadas).

En el cuadro 6.2 se resumen los resultados obtenidos para cada espécimen. Los valores teóricos son los que se especifican en la ficha técnica del fabricante.

Cuadro 6.2. Resultados obtenidos para los especímenes del ensayo en tensión del acero.

ESPECÍMEN Nº	ESFUERZO DE CEDENCIA (1)	ESFUERZO ÚLTIMO	DEFORMACIÓN ÚLTIMA (2)	DEFORMACIÓN ÚLTIMA (3)	MÓDULO DE ELASTICIDAD
	F _y (MPa)	F _u (MPa)	ε _u (mm/mm)	ε _u (mm/mm)	E (MPa)
1	394	435	0,251	0,374	(4)
2	395	412	0,242	0,356	221 709
3	368	389	0,265	0,380	195 216
PROMEDIO	386	412	0,253	0,370	208 463
Coef. Variación	4,0%	5,6%	4,7%	3,5%	9,0%
TEÓRICO	227	310	-	-	200 000

- (1) El esfuerzo de cedencia se obtiene por el método de extensión total bajo carga en la deformación unitaria de 0,005 mm/mm. Esta deformación corresponde a ε_y.
- (2) Esta deformación última es la deformación máxima obtenida de los gráficos esfuerzo-deformación unitaria aparente. Para este nivel de deformación unitaria, la aparente es similar a la real.
- (3) Esta deformación se obtuvo al unir el espécimen después de la fractura y medir la longitud de control C. Esto se realiza siempre y cuando el espécimen se haya fracturado dentro de la longitud de control.
- (4) Dado que no se tiene un gráfico esfuerzo-deformación real para este espécimen, el resultado de módulo de elasticidad pierde sentido si se expresan en términos de la deformación aparente. No así el esfuerzo de cedencia.

Para obtener la elongación o deformación última del espécimen físicamente se requiere medir la longitud de control después de la falla (ver figura 6.3). La dimensión C_{INICIAL} se refiere a la longitud de control (C) antes de realizar el ensayo. La dimensión C_{FINAL} es la longitud de control después de haber realizado el ensayo y medida al unir las partes del espécimen fracturado. Esto se realiza siempre y cuando el espécimen se haya fracturado dentro de la sección de control. Todos los especímenes se fracturaron dentro de la longitud de control. Los resultados se muestran en el cuadro 6.2. En el Apéndice E se muestra el cuadro con los datos requeridos para el cálculo de la elongación.

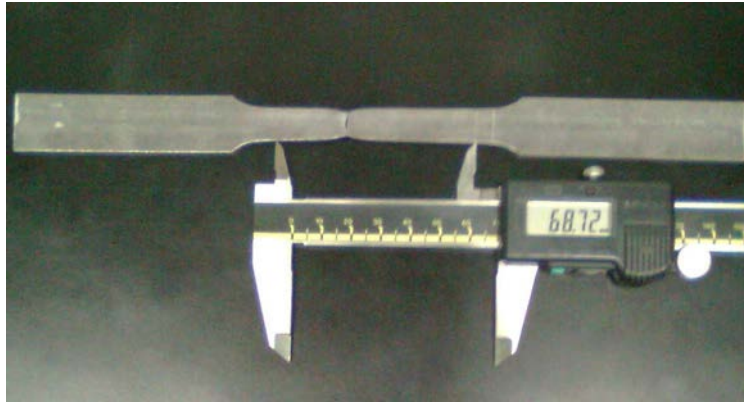


Figura 6.3. Medida de la dimensión C_{FINAL}

La elongación se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Elongación} = \frac{C_{FINAL} - C_{INICIAL}}{C_{INICIAL}} \times 100\% \quad [6-3]$$

Además de los cálculos mostrados se puede observar que se da un coeficiente de variación. Este coeficiente permite verificar la uniformidad de los resultados. Se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Coeficiente de Variación} = \frac{\text{Desviación Estándar}}{\text{Promedio}} \times 100\% \quad [6-4]$$

6.2. ENSAYOS EN COMPRESIÓN DE LOS ELEMENTOS REPRESENTATIVOS DE LA ARMADURA

Estos ensayos muestran la capacidad en compresión de los elementos representativos de las armaduras. El ensayo de columna corta, permite verificar la efectividad de la sección transversal. Los otros ensayos permiten comparar los resultados analíticos y los experimentales de las armaduras, con la capacidad mostrada por estos elementos representativos.

6.2.1. Ensayo de columna corta

Este ensayo se realizó en especímenes con la sección completa de los que se utilizaron en la construcción de las armaduras. La longitud de los especímenes se definió en el capítulo 5, según lo establecido en la norma para ensayo de especímenes de columna corta de AISI. La longitud nominal de los especímenes es de 200 mm.

Con las propiedades geométricas nominales de la sección transversal y redondeando el valor del esfuerzo de cedencia a 385 MPa, se obtiene la carga teórica de falla. En el artículo 5.2.2.3, se muestra el cálculo correspondiente. La carga teórica de falla es de 212 kN.

En los cuadros 6.3 y 6.4 se muestran las propiedades geométricas obtenidas para los especímenes de columna corta. En los cálculos para el área y el momento de inercia, se tomaron en cuenta los radios de esquina de la sección transversal.

Cuadro 6.3. Dimensiones de los especímenes de columna corta

Especímen N°	Espesor, t (mm)					Ancho Externo, b (mm)			R _{interno} =2 t (mm)
	A	B	C	D	Promedio Especímen	A	B	Promedio Especímen	
1	3,15	3,18	3,17	3,19	3,17	51,33	51,19	51,28	6,34
	3,16	3,15	3,18	3,16		51,27	51,32		
2	3,16	3,16	3,18	3,20	3,17	51,19	51,61	51,44	6,34
	3,19	3,16	3,14	3,18		51,18	51,77		
3	3,15	3,19	3,11	3,17	3,16	51,22	51,26	51,26	6,32
	3,18	3,16	3,17	3,16		51,32	51,23		
Promedio General	3,17				-----	51,32		-----	-----

Cuadro 6.4. Propiedades geométricas obtenidas para los especímenes

Especimen N°	Área, A (mm ²)	Momento de Inercia, I (mm ⁴)	Radio de giro, r (mm ⁴)
1	567	186 242	18,1
2	569	188 334	18,2
3	565	185 738	18,1
Promedio General	567	186 771	18,2

A continuación se muestran un gráfico representativo esfuerzo-deformación aparente. Los gráficos para cada espécimen se encuentran en el Apéndice F. Se colocó un deformímetro para medir el desplazamiento en el espécimen, pero por las dimensiones de las placas de extremo no fue posible medir directamente el acortamiento en el espécimen. Este se medía desde la cabeza superior. Al corroborar los datos obtenidos con el deformímetro, se observó que corresponden a los mismos datos registrados por la máquina de ensayo. Por esta razón, únicamente se muestran las curvas carga desplazamiento entre cabezas de la máquina.

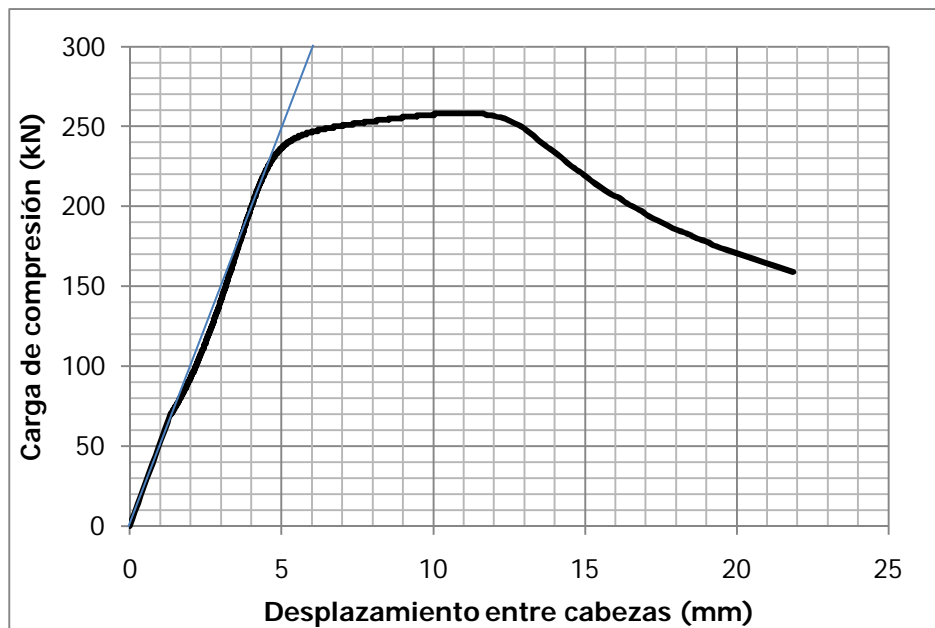


Figura 6.4. Gráfico representativo carga-desplazamiento entre cabezas de la máquina, para el espécimen de columna corta 1.

El esfuerzo de compresión se obtiene al dividir la carga entre el área del espécimen que se muestra en el cuadro 6.4. Para obtener la deformación última aparente se deben realizar también algunos cálculos. La deformación aparente se calculó como se muestra a continuación:

$$\varepsilon_{APARENTE} = \frac{\Delta_{máquina}}{L_{especimen} + 2 t_{placas} + 2 \cdot coronamiento} \quad [6-5]$$

El espesor de las placas (t_{placas}) es de 12,7 mm. El coronamiento está especificado en 12,7 mm como mínimo. La longitud inicial del espécimen ($L_{especimen}$) está especificada en el cuadro 6.6.

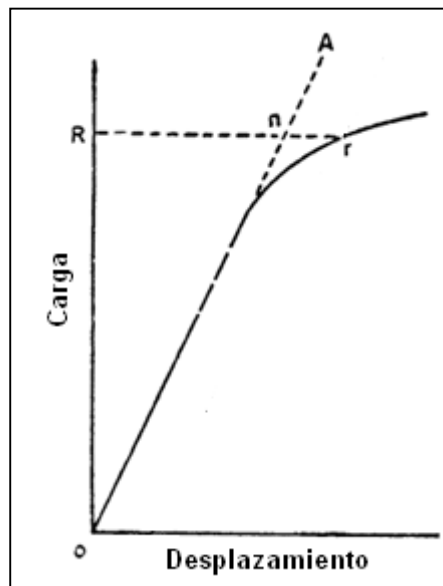
La falla de los especímenes se produjo después de la cedencia del material en compresión. El modo de falla es un pandeo local de las paredes del elemento, después de la cedencia del material. Este modo de falla se conoce como aplastamiento. En la siguiente figura se muestra el modo de falla típico.



Figura 6.5. Modo de falla típico para los especímenes de columna corta. Se muestra el espécimen 1.

El esfuerzo de cedencia se obtiene a partir de los gráficos carga-desplazamiento entre cabezas. La carga de cedencia se obtiene según el método mostrado en la figura 6.6. Primero se traza una línea "oA", correspondiente a la sección lineal elástica del elemento. La carga de cedencia se define como aquella en la cual la distancia "nr" equivale a un 5% de diferencia entre las ordenadas de la gráfica carga-desplazamiento respecto a las ordenadas de la línea "oA". El esfuerzo se obtiene al dividir la carga de cedencia entre el área correspondiente del espécimen.

También se obtuvo la deformación última del material. Esta deformación se tomó como aquella que se da después de la falla cuando el espécimen ha tenido una disminución de 20% con respecto a la carga máxima.



$nr =$ Distancia tal que $nr/n=5\%$

Figura 6.6. Método del desplazamiento para determinar el esfuerzo de cedencia

Adaptado de ASTM A370

Cuadro 6.5. Resumen de los resultados para los especímenes de columna corta

Especímen N°	Área (mm ²)	Carga de cedencia (kN)	Carga Máxima (kN)	Esfuerzo de cedencia F _y (MPa) ⁽¹⁾	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación Aparente Última ε _u ap ⁽²⁾ (mm/mm)
1	566	240	258	424	455	0,0643
2	569	241	267	423	469	0,0622
3	565	232	259	410	458	0,0602
Promedio	567	238	261	419	461	0,062
Coefficiente de variación	0,34%	2,1%	1,9%	1,8%	1,6%	3,3%

(1) El esfuerzo de cedencia se obtuvo por un método gráfico. Se define como la carga que se obtiene cuando la gráfica fuerza-desplazamiento se desfasa un 5% de la parte elástica dividido por el área correspondiente.

(2) Las deformaciones mostradas son aparentes. No representan la deformación real del espécimen, pero en condiciones últimas dan muy buen acercamiento. La deformación última se obtiene cuando la carga ha decaído en un 20% de la carga máxima.

El resultado principal de estos ensayos es la determinación del área efectiva de la sección transversal del elemento (A_{eu}). Ésta área se calcula al alcanzar la carga última, con el esfuerzo de cedencia obtenido mediante las pruebas de probetas en tensión. El cálculo se realiza como se muestra a continuación:

$$A_{eu} = \frac{P_{ua}}{F_{ya}} \quad [6-6]$$

Donde:

P_{ua} : Carga última promedio de una unidad experimental (tres especímenes)

F_{ya} : Esfuerzo de cedencia promedio obtenido de las pruebas de tensión de probetas

El esfuerzo de cedencia promedio, tomado del cuadro 6.2, es $F_{ya} = 386 \text{ MPa}$. La carga última promedio es de 261 kN. Con esto el área efectiva es de:

$$A_{eu} = \frac{P_{ua}}{F_{ya}} = \frac{261 \times 10^3 \text{ N}}{386 \text{ MPa}} = 676 \text{ mm}^2 > \text{Area nominal} = 550,6 \text{ mm}^2$$

6.2.2. Ensayo de compresión en especímenes representativos de la longitud entre nudos de la armadura

Este ensayo se realizó para determinar la capacidad de un elemento representativo de la longitud entre nudos de la armadura. En el Apéndice G, se muestran los gráficos carga-desplazamiento entre cabezas de la máquina de ensayo, para cada espécimen. La forma del gráfico es similar a la de los especímenes de columna corta.

El modo de falla de los especímenes es una combinación entre el pandeo global y el pandeo local de la sección. Esta falla es inelástica. Después de la falla el espécimen mantiene una deformación permanente. En las figuras 6.7 y 6.8 se muestran el modo de falla típico de los especímenes.



Figura 6.7. Falla típica de pared en los especímenes.



Figura 6.8. Pandeo global típico. Especimen 3 después de la falla.

Cuadro 6.6. Resumen de los resultados para los especímenes representativos de la longitud entre nudos

Especímen	Área (mm ²)	Carga Máxima (kN)	Esfuerzo Máximo (MPa)
1	567	240	423
2	567	241	426
3	567	241	426
Promedio	-	241	425
Coefficiente de variación	-	0,41%	0,41%

6.2.3. Ensayo de compresión en especímenes representativos de la longitud sin arriostrar de la armadura

Se realizaron dos ensayos con diferentes condiciones de montaje para los especímenes representativos de la longitud sin arriostrar de la armadura. El primer espécimen de ensayo presenta una condición de empotramiento en los apoyos. El segundo presenta una condición articulada en los apoyos.

En estos ensayos no se realizaron mediciones de desplazamiento pues únicamente se necesita determinar la carga de compresión axial máxima.

Cuadro 6.7. Resumen de los resultados para los especímenes representativos de la longitud sin arriostrar

Especímen N°	1	2
Longitud entre apoyos, L (mm)	3000	3257
Capacidad en compresión teórica, P _n (kN)	127,48	30,65
Factor de longitud efectiva utilizado, K _{teórico}	0,50	1,00
Carga máxima del ensayo en compresión, P _u (kN)	116,4	73,07
Diferencia teórico-experimental	8,70%	138,41%
Factor de longitud efectiva obtenido, K _{ensayo}	0,55	0,66
Tipo de pandeo	Inelástico	Elástico

En el cuadro anterior se muestran las cargas obtenidas para el ensayo. Estas cargas se comparan con la capacidad en compresión teórica. Esta capacidad teórica se calcula con las disposiciones del capítulo 3.

El factor de longitud efectiva obtenido para el ensayo se calculó a partir de las ecuaciones presentadas en 3.3. Para obtener el factor de longitud efectiva se determina el tipo de pandeo que se dio en el elemento (elástico o inelástico). Seguido a esto se elige la ecuación de capacidad correspondiente (ecuaciones 3-18 y 3-19) y se calcula el factor λ_c . Posteriormente, se corrobora el supuesto del tipo de pandeo (límite de 1,5), se obtiene el valor de F_e y de allí el valor de K . Si el supuesto para λ_c no se cumple se debe iterar hasta encontrar el valor correcto de K .

El espécimen 1 falló de manera inelástica. Esto se demuestra con la deformación permanente que se puede observar en el espécimen después de la falla. En el espécimen 2 no se observa una deformación permanente considerable, después de la falla. En las figura 6.9 se muestra el modo de falla de cada espécimen.

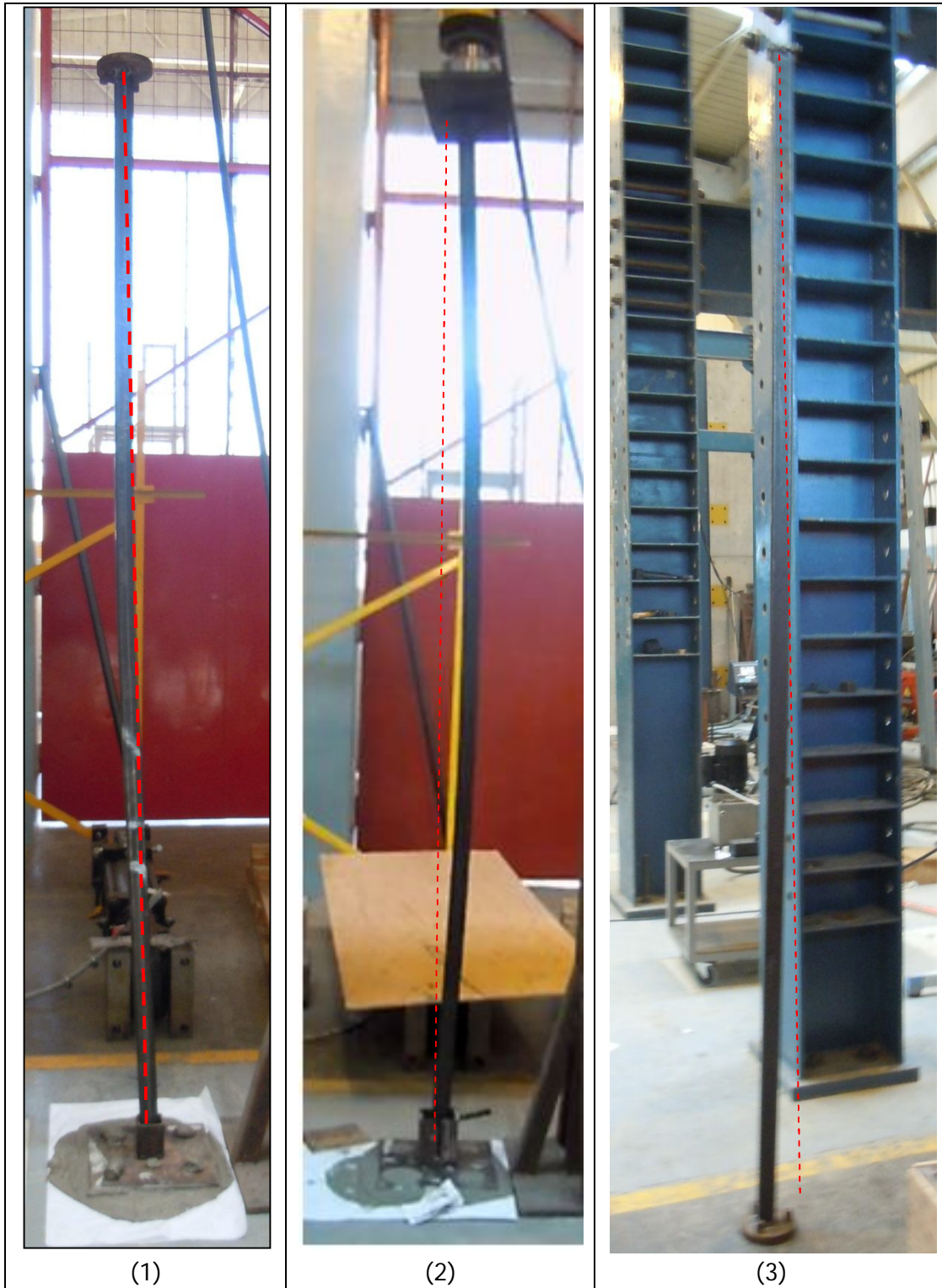


Figura 6.9. Deformación en los especímenes: (1) Especímen 1, post-ensayo. (2) Especímen 2 durante el ensayo. (3) Especímen 2 invertido, post ensayo

6.3. ENSAYOS SOBRE LOS ESPECÍMENES TIPO ARMADURA

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos a las armaduras de acero. La metodología utilizada y los aspectos de relevancia para la realización de estos ensayos se describieron en la sección 5.3. La nomenclatura utilizada para nombrar los especímenes se muestra en la sección 5.3.2.1. Las siguientes definiciones permitirán una mejor comprensión de los resultados experimentales:

- Carga Aplicada (P): La carga aplicada es la fuerza que produce el gato hidráulico servo-controlado y que se transmite al espécimen por medio de los dispositivos de transmisión de carga. Esta carga está aplicada en el eje central de la armadura. La armadura se puede considerar una estructura bidimensional, por lo que esta fuerza se registra en el mismo plano de la armadura.
- Desplazamiento máximo en el plano de carga: Se refiere al desplazamiento registrado por el LVDT, que se colocó de forma vertical, en el punto central del espécimen tipo armadura. En este punto se da el desplazamiento máximo. Este desplazamiento se encuentra en el mismo plano de la armadura.
- Desplazamiento fuera del plano: Este es el desplazamiento en la dirección ortogonal al plano de la armadura. Se mide en el punto central de la cuerda en compresión de la armadura, en el nudo donde se unen los elementos con esfuerzos de compresión mayores.
- Deformación en la galga, ϵ : Es la deformación registrada en la galga correspondiente.
- Fuerza elástica en el elemento: Es la fuerza de compresión que se obtiene como una medición indirecta, a partir de la deformación obtenida en las galgas extensométricas. La fuerza calculada es válida mientras el elemento se encuentre dentro del rango lineal-elástico. En los ensayos en tensión del material, se definió el límite lineal-elástico como la deformación unitaria de 0,005. La fuerza elástica en el elemento se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_{ELÁSTICA} = \epsilon A_g E \quad [6-7]$$

Donde:

ϵ : Deformación en la galga

A_g : Área de la sección transversal del elemento con galga

E : Módulo de elasticidad del material = 200 000 MPa

La fuerza elástica puede estar calculada en el elemento con la deformación en la galga A o en la galga B. Estas fuerzas se designan como F_A y F_B , según corresponda.

Dentro de los resultados, se incluyen los gráficos de las razones entre las fuerzas en los elementos con galga (F_A/F_B , F_A/P , F_B/P) con respecto a la deformación en la galga correspondiente. . Para la razón F_A/F_B , se presenta el gráfico de esta razón contra la deformación en cada una de las galgas. Las razones F/P están graficadas con respecto a la deformación en la galga respectiva de donde se obtuvo la fuerza elástica. El gráfico se presenta hasta una deformación unitaria de 2000μ debido a que con esto se garantiza que se presentan los resultados dentro del rango elástico. Esta deformación es menor a la de cedencia (5000μ). Estos gráficos se encuentran en el Apéndice I.

La convención de signos de los ensayos toma como referencia la figura 5.17. Con esto se tiene:

- Carga Aplicada: Es positiva cuando el gato hidráulico se contrae.
- Desplazamiento máximo en el plano de carga: Es positivo hacia arriba.
- Desplazamiento fuera del plano: Es positivo hacia el frente. Saliendo del plano de la figura 5.17.
- Deformación en la galga: Positivo en compresión
- Fuerza elástica en el elemento: Es positiva en compresión.

A continuación se presentan los resultados para cada espécimen.

6.3.1. Especimen C1-1

El espécimen C1-1 fue sometido a varias pruebas. Esto se debió a que el montaje inicial no brindaba la resistencia y rigidez requeridas para ensayar el espécimen. En total se realizaron cinco intentos de ensayo en el espécimen C1-1.

En el ensayo N° 4, se produjo una falla local en el punto de aplicación de carga (ver figura 6.10) La forma de aplicar la carga en el montaje inicial es distinta a la que se utilizó en el montaje definitivo. La carga se aplicaba directamente en los elementos del espécimen. Esto produjo que la pared del elemento diagonal, que se ubica en el centro del espécimen, fallara.

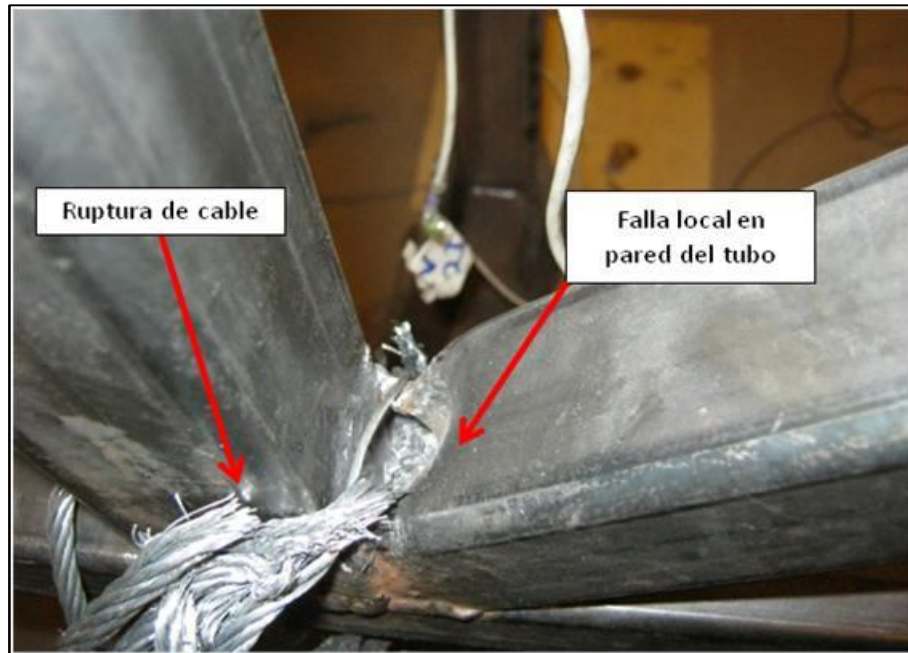


Figura 6.10. Falla local en el espécimen C1-1, al realizar el ensayo n° 4.

En el Apéndice H se muestran los resultados de cada uno de los ensayos realizados al espécimen C1-1. El cuadro 6.8 muestra el resumen de estos resultados. Al realizar el ensayo N° 5, la galga A estaba dañada. En el Apéndice H sólo se presenta la relación entre la fuerza elástica del elemento en la galga B y la fuerza aplicada para la prueba N° 5.

El espécimen C1-1 falló ante una carga máxima de 127 kN en la prueba 5. La falla se produjo en la soldadura de la unión del elemento diagonal, que ya había fallado por pandeo local en la prueba 4. Antes de que se produjera esta falla, el espécimen ya había alcanzado deformaciones inelásticas por pandeo. En la figura 6.11 se presenta la deformación por pandeo en el espécimen y en la figura 6.12 se presenta la falla en la unión del elemento diagonal central del espécimen.



Figura 6.11. Deformación por pandeo en el espécimen C1-1.



Figura 6.12. Falla en la soldadura del elemento diagonal central del espécimen C1-1.

La deformación por pandeo en el espécimen se registró en un gráfico posición-deformación. Este gráfico permite observar la forma de pandeo en el espécimen y determinar la longitud efectiva de pandeo de la cuerda en compresión del espécimen. Este gráfico se muestra en el Apéndice H.

Cuadro 6.8. Resumen de pruebas realizadas sobre el espécimen C1-1

N° DE PRUEBA	MONTAJE	CRITERIO PARA DETENER EL ENSAYO	CARGA MÁXIMA ALCANZADA (KN)	OBSERVACIONES
1	1, sin los elementos de madera mostrados en la figura 5.16. Con una trenza de tres cables de 6,35 mm de diámetro.	El protocolo de carga planteado estaba controlado por el desplazamiento del gato. No se tomó en cuenta las deformaciones en los elementos intermedios del montaje (cable, eslabones y otros). Por lo que el ensayo se detuvo antes de alcanzar la falla.	63,4	Se colocaron eslabones para unir el cable con el gancho de unión del gato. La placa de unión al gato hidráulico cedió.
2	1 (figura 5.16)	Se produjo una falla por desgarre en la gaza de unión cable-eslabones	91,1	Antes del ensayo, se cambió la placa del gato.
3	1, con un ajuste en la gaza del cable y más eslabones en la unión cable-gato debido al acortamiento en el cable	Se produjo una falla en uno de los eslabones que se colocaron.	78,3	Después de la falla del eslabón, se observó que el pedestal para la polea estaba deformado en su placa inferior.
4	1, con un nuevo pedestal y un ajuste en la unión cable-especimen	Falló la pared del elemento donde se aplicó la carga con el cable. Esto produjo un corte en el cable de carga	88,0	Se detuvieron las pruebas, para evaluar el montaje
5	2 (figura 5.17)	Falla en la soldadura de la unión, directamente debajo de donde se produjo la falla en el ensayo 4	127	Se realizó un montaje distinto. El espécimen presentó deformación fuera del plano antes de fallar la soldadura.

6.3.2. Espécimen C1-2

Los ensayos realizados a partir del espécimen C1-2 se obtuvieron utilizando el montaje definitivo. Las pruebas experimentales se realizaron hasta que la carga aplicada en el espécimen disminuía más de un 20% y cuando se observaba deformación fuera del plano por pandeo. Los LVDT se retiraban cuando se observaba que podrían correr riesgo.

En este espécimen se alcanzó una carga máxima de 163,14 kN. Los gráficos carga-desplazamiento (dentro y fuera del plano) para el espécimen C1-2 y el resto de los especímenes se muestran en las figuras 6.17 y 6.18. Los gráficos individuales para este espécimen se muestran en el Apéndice I

Las galgas extensométricas del espécimen C1-2 se mantuvieron hasta el final del ensayo. No obstante, se puede observar que la galga A posee deformación excesiva, lo cual indica que la galga se pudo haber despegado durante la prueba experimental. Los resultados de las galgas se muestran hasta donde se alcanzó la carga máxima en el espécimen. No se realizó la medición de la deformación permanente en los elementos. Los gráficos con los resultados de las galgas se pueden encontrar en el Apéndice I.

El espécimen C1-2, tuvo una falla por pandeo en la cuerda en compresión. Este modo de falla se muestra en la figura 6.13. Además, en el Apéndice I se puede encontrar un gráfico con la forma de pandeo del espécimen post-ensayo.



Figura 6.13. Deformación por pandeo en el espécimen C1-2.

6.3.3. Espécimen C2-1

En este espécimen el ensayo se condujo de manera similar a como sucedió con el espécimen C1-2. El ensayo se detuvo cuando la carga disminuyó en un 20% de la carga máxima y el espécimen presentó deformación por pandeo fuera del plano. La carga máxima que se alcanzó fue de 150,93 kN.

Los resultados de deformación en las galgas, para este espécimen, se muestran hasta el punto donde se alcanzó la carga máxima. No fue posible registrar la deformación permanente en los elementos. Estos resultados están en el Apéndice I.

En el Apéndice I también se presentan los gráficos carga-desplazamiento (dentro y fuera del plano). La comparación entre los gráficos para este y los otros especímenes se muestra en las figuras 6.17 y 6.18.



Figura 6.14. Deformación por pandeo en el espécimen C2-1.

6.3.4. Espécimen C2-2

Este espécimen presentó un comportamiento similar a los anteriores. El ensayo se detuvo cuando la carga empezó a disminuir en un 20% y el espécimen presentó deformación por pandeo fuera del plano. La carga máxima que se alcanzó fue de 153,18 kN.

Los resultados de las galgas se muestran hasta el dato correspondiente con la carga máxima alcanzada. La galga A se despegó al alcanzar 650 μ . Al final del ensayo la galga B tuvo una deformación permanente de 1557 μ . Estos resultados se encuentran en el Apéndice I

No fue posible registrar la deformación por pandeo en la falla. Los resultados de los gráficos carga-desplazamiento se muestran en el Apéndice I. Se muestra una comparación de estos resultados en las figuras 6.19 y 6.18.

6.3.5. Espécimen C3-1

La prueba experimental en el espécimen C3-1 tuvo un comportamiento similar a las pruebas realizadas en los otros especímenes. La falla también se dio por pandeo de la cuerda en compresión. La carga máxima que se alcanzó en el ensayo fue de 152,10 kN. Los gráficos carga-desplazamiento se muestran en el Apéndice I. En las figuras 6.17 y 6.18 se muestran la comparación entre los gráficos carga-desplazamiento de los especímenes.

No se pudo determinar la deformación permanente en los elementos. Las galgas del espécimen C3-1, no se mantuvieron pegadas hasta el final de la prueba experimental.

La falla en el espécimen fue por pandeo en la cuerda en compresión. La deformación en la falla, se muestra en la figura 6.15.



Figura 6.15. Deformación por pandeo en el espécimen C3-1.

6.3.6. Especimen C3-2

El comportamiento del espécimen C3-2, durante la prueba experimental, fue similar al de los otros especímenes. La carga máxima que se obtuvo fue de: 146,44 kN. Los gráficos carga-desplazamiento para este espécimen se muestran en el Apéndice I. En las figuras 6.17 y 6.18 se muestran la comparación entre los gráficos carga-desplazamiento de los especímenes de ensayo.

En el Apéndice I se muestran los resultados de la deformación en las galgas. Estas galgas se mantuvieron hasta el final del ensayo. Se registraron deformaciones permanentes en los elementos al descargar el espécimen. En la galga A: 1933 μ . En la galga B: 1763 μ .

El espécimen falló por pandeo en la cuerda en compresión. La deformación por pandeo se muestra en la figura 6.16.



Figura 6.16. Deformación por pandeo en el espécimen C3-2.

6.3.7. Resumen y comparación de los resultados

En esta sección se realiza la comparación entre los resultados obtenidos para los especímenes tipo armadura. En la figura 6.17 se muestra la comparación entre las gráficas carga-desplazamiento en el plano entre todos los especímenes. También, en la figura 6.18 se muestra la comparación entre las gráficas carga-desplazamiento fuera del plano.

En las gráficas de comparación entre la carga aplicada-desplazamiento se muestran también los resultados para las pruebas del espécimen C1-1. Esto se hace con el fin de comparar el avance de estas pruebas respecto a las pruebas sobre el resto de los especímenes.

En el cuadro 6.9 se resumen los resultados experimentales obtenidos para cada espécimen. Se muestran los resultados de la prueba 5 en el espécimen C1-1. Estos resultados no son representativos ya que el espécimen se dañó durante las pruebas previas.

Se calcula la longitud efectiva por medio de la ecuación de Euler (ecuación 2-1). Es importante recordar que la ecuación de Euler es válida en el rango elástico. Se puede observar que los especímenes tuvieron deformaciones permanentes, por lo que se verifica la falla inelástica de los elementos. No obstante, a partir de los gráficos carga-desplazamiento en el plano se observa que la gráfica de la estructura se mantiene elástica hasta la falla. De allí que se utilice la ecuación de Euler para calcular la longitud efectiva.

La longitud de pandeo experimental se obtiene de la siguiente manera:

1. Se considera que la carga crítica es la carga mayor que se da en el espécimen. Esto es $P_{cr} = 1,5 P_{\text{aplicada máxima}}$
2. Con esto la longitud de pandeo se obtiene de la ecuación 2-1, tal como se muestra a continuación:

$$L_e = \pi \sqrt{\frac{EI}{P_{cr}}} \quad [6-8]$$

En el Apéndice I se muestran gráficos de la forma de pandeo de los especímenes después del ensayo. Esto es la deformación permanente en los especímenes. De estos gráficos se podría obtener una longitud de pandeo post-ensayo. Sin embargo, ésta longitud de pandeo no corresponde a la que se da en la carga crítica en la cuerda en compresión. Por esto, estos gráficos se muestran a manera de información sobre la deformación post-pandeo de una armadura.

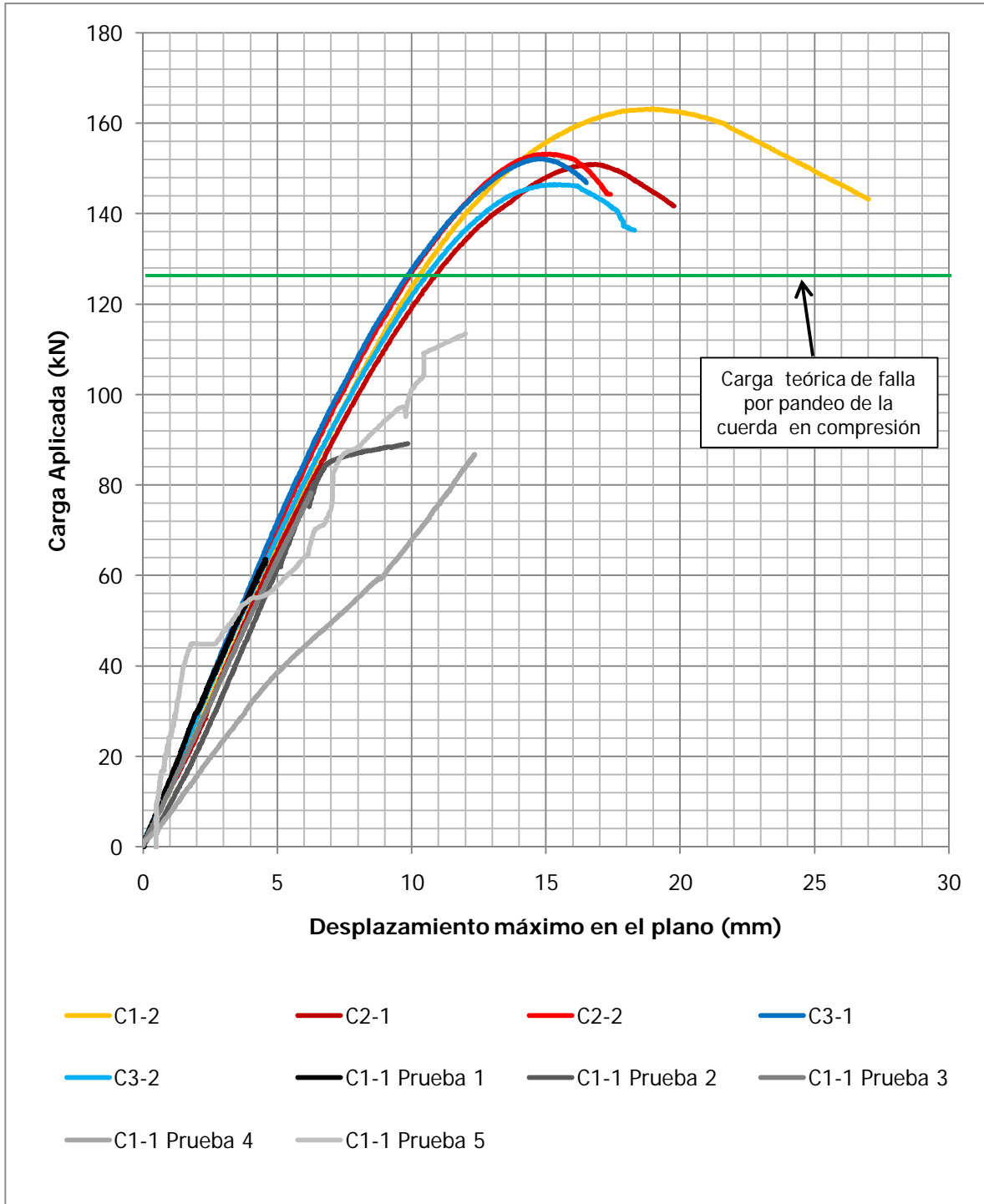


Figura 6.17. Comparación entre los gráficos carga aplicada-desplazamiento máximo en el plano para todos los especímenes.

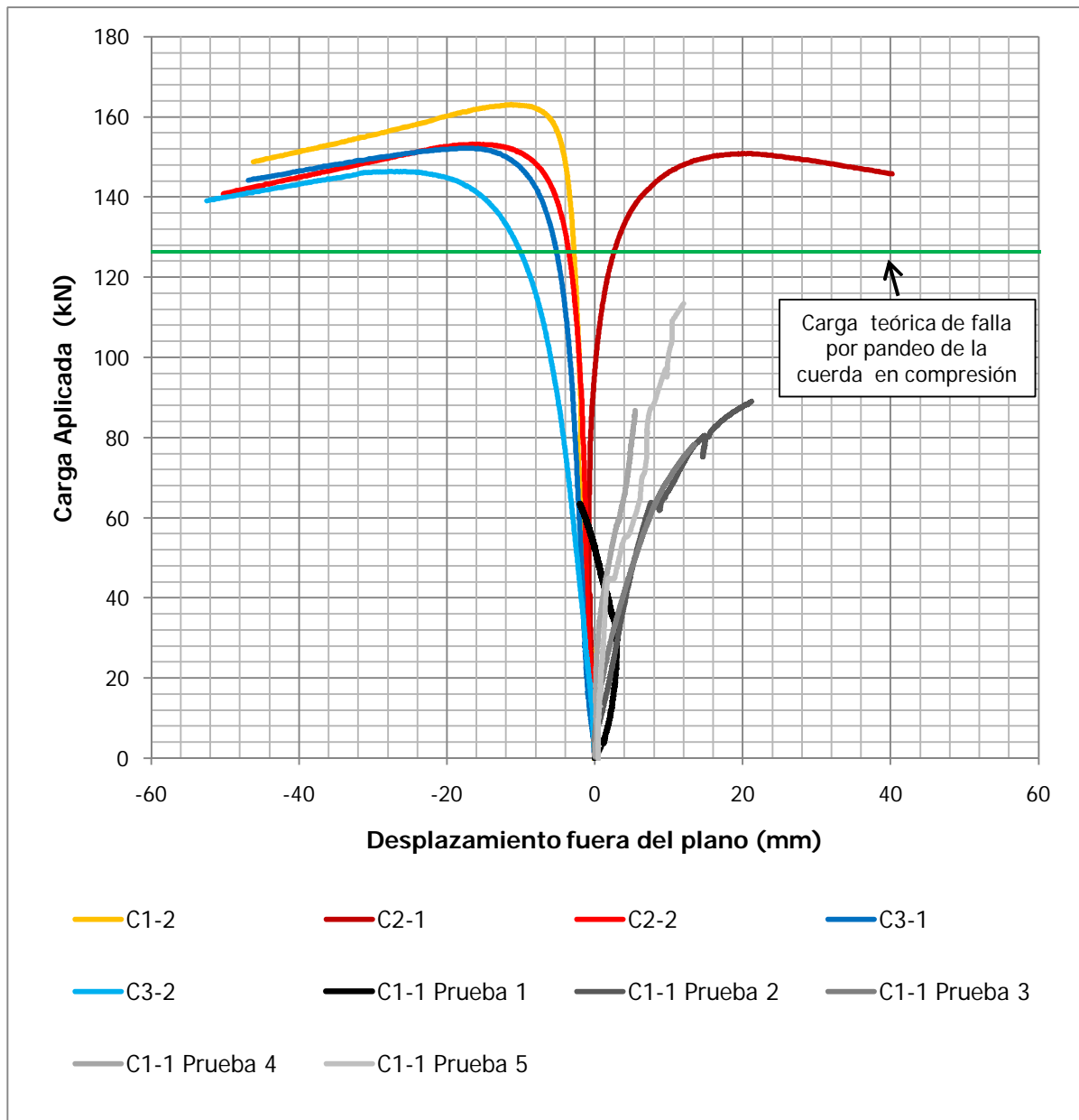


Figura 6.18. Comparación entre los gráficos carga aplicada-desplazamiento fuera del plano para todos los especímenes.

Cuadro 6.9. Resumen de resultados para los especímenes tipo armadura

Especímen		C1-1	C1-2	C2-1	C2-2	C3-1	C3-2
Carga máxima alcanzada en el ensayo	P_{máx exp} (kN)	127	163	151	153	152	146
Longitud de pandeo experimental (Euler)	L_{e Euler}⁽¹⁾	1410	1243	1292	1283	1287	1312
Factor de longitud efectiva experimental (Euler)	K_{exp} (mm)⁽²⁾	0,47	0,41	0,43	0,43	0,43	0,44
Razón K_{expr} / K_{Timoshenko}⁽³⁾		2,12	1,87	1,94	1,93	1,93	1,97
Razón P_{máx exp} / P_{máx}⁽⁴⁾		1,00	1,28	1,19	1,21	1,20	1,15

(1) Esta longitud de pandeo se calcula a partir de la carga máxima obtenida para cada espécimen.

Si se tiene que $P_{cr} = 1,5 P_{máx}$. Entonces de la ecuación 2-1 se tiene que: $L_{e Euler} = \sqrt{(\pi^2 EI) / P_{cr}}$.
 $E = 200\,000$ MPa e I es nominal y está definido en el cuadro 4.2 como $191\,500$ mm⁴.

(2) $K_{expr} = L_{e Euler} / L_{tot}$; $L_{tot} = 3000$ mm en todos los especímenes

(3) El valor de del factor de longitud efectiva de Timoshenko es de 0,222

(4) El valor de $P_{máx}$ teórico es de 127 kN, según el cuadro 4.8.

En el cuadro 6.10 se muestran los resultados experimentales de la fuerza promedio que se registra en las galgas, en relación con la fuerza aplicada al espécimen. También se muestra la relación entre la fuerza en las galgas. Las galgas se colocaron en los elementos más esforzados de la cuerda en compresión de los especímenes. Esto permite verificar si los elementos más esforzados alcanzan la plastificación y verificar los esfuerzos del análisis durante el ensayo.

Cuadro 6.10. Comparación de los resultados obtenidos para las razones entre las fuerzas elásticas F_A/P , F_B/P y F_A/F_B .

Especimen	Relación entre las fuerzas elásticas			Deformación en la galga al alcanzar la carga última de ensayo ⁽²⁾	
	F_A/P ⁽¹⁾	F_B/P ⁽¹⁾	F_A/F_B ⁽¹⁾	Galga A (μ)	Galga B (μ)
C1-2	1,4	0,9	1,6	12 682	1 482
Teórico	1,5	1,0	1,5		
C2-1	Varía entre 1,4 y 1,8	Varía entre 1,4 y 1,9	1,0	2 704	4 285
C2-2	1,55	Varía entre 1,2 y 1,8	1,2	⁽³⁾	2 777
C3-1	Varía entre 1,4 y 1,9	Varía entre 1,2 y 1,8	1,08	5 690	3 643
C3-2	Varía entre 1,5 y 2,1	Varía entre 1,2 y 1,8	1,2	4 613	2 886
Teórico C2 y C3	1,5	1,5	1,0	---	---

(1) Valores obtenidos de las gráficas correspondientes del Apéndice I. Se muestran los valores más representativos que se pudieron obtener de las gráficas.

(2) Deformación en compresión. $1\mu=1$

(3) No se obtuvo medición debido a que la galga perdió adherencia en los 400 μ , y dejó de registrar deformaciones válidas.

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DEL ACERO EN TENSIÓN

Los resultados para las propiedades del acero en tensión, brindaron información muy importante para el diseño de los especímenes tipo armadura. El resultado principal de estos ensayos es el esfuerzo de cedencia. En el cuadro 6.2 se presenta el resultado para el esfuerzo de cedencia.

Los esfuerzos de diseño, especificados para este material por el fabricante, fueron superados considerablemente. Como se muestra en el cuadro 6.2, el esfuerzo de cedencia mínimo especificado para diseño es de 227 MPa. Cada espécimen superó este valor considerablemente. En promedio este valor se superó en un 76%. De manera similar, el esfuerzo último se especifica como 310 MPa. Este valor también fue superado por cada espécimen. En promedio la resistencia en tensión del material se superó en un 33%.

Esta variación no generaría problemas en el diseño de estructuras por carga gravitacional. Los valores especificados son conservadores. Sin embargo, al determinar la capacidad para ensayos experimentales de alguna estructura, es necesario tener un valor más preciso de esta propiedad ya que el montaje siempre se debe diseñar para una resistencia mayor a la del espécimen y no siempre se pueden realizar pruebas en tensión del material.

Además de lo anterior, es necesario tomar en cuenta estos resultados para los estudios del diseño sismoresistente. Si bien es cierto, el tema del diseño sismoresistente está fuera del alcance de este proyecto, los resultados obtenidos en los ensayos de tensión son de importancia para el diseño por capacidad de elementos de acero. Además, al ubicarse este proyecto en el ámbito costarricense, es necesario mencionar estos resultados.

Según el fabricante, los elementos de tubería de acero están fabricados según la norma JIS G3132 SPHT-2. Para elementos fabricados con este tipo de acero, el Código Sísmico de Costa Rica, en su versión 2010 (CSCR-2010), establece una razón R_y de 1,6. La razón R_y es el cociente entre el esfuerzo de cedencia esperado y el valor mínimo especificado. En los ensayos se obtuvo una razón R_y promedio de 1,7.

En el cuadro 7.1 se muestran los resultados correspondientes a R_y y otros requisitos establecidos en el CSCR-2010.

Cuadro 7.1. Comparación de los resultados obtenidos y los requisitos del CSCR-2010

ESPÉCIMEN Nº	R_y	R_t	F_u / F_y
1	1,74	1,40	1,10
2	1,74	1,33	1,04
3	1,62	1,25	1,06
PROMEDIO	1,70	1,33	1,07
Coefficiente de Variación	4,0%	5,6%	3,0%
CSCR-2010	1,6	1,3	1,08

Las variables utilizadas en el cuadro anterior se definen a continuación: R_t se refiere a la razón entre el esfuerzo último esperado y el esfuerzo último especificado. F_u / F_y es la razón entre el esfuerzo de cedencia y la resistencia a la tensión del acero.

De los gráficos esfuerzo-deformación para los especímenes 2 y 3, se puede obtener un ajuste bilineal. En los gráficos, las líneas discontinuas muestran este ajuste. Como se puede observar en ambos gráficos, las líneas correspondientes a la porción elástica y a la porción inelástica se intersecan en el punto correspondiente a una deformación unitaria de 0,002. Este valor se utiliza como el punto donde se produce la transición del rango elástico al inelástico en la deformación registrada por las galgas extensométricas. Sin embargo, la determinación de F_y se realiza con una deformación unitaria de 0,005, según está especificado en ASTM A370. En los gráficos de las galgas extensométricas se utiliza el valor de 0,002 como límite para garantizar que los elementos están en el rango elástico.

El módulo de elasticidad del material posee un coeficiente de variación mayor que el de los esfuerzos del material (cedencia y último). El módulo de elasticidad se calcula a partir de los gráficos esfuerzo-deformación con extensómetro para las probetas de acero en la sección comprendida entre el origen del gráfico y el esfuerzo de 200 MPa. La variación mayor que se da en esta propiedad se debe a que únicamente se utilizan dos datos para calcular el

promedio. El módulo de elasticidad no se calculó para el espécimen 1 debido a que el éste se utilizó para determinar el modo de falla de las probetas y proteger el equipo.

Además, se puede observar que en todas las propiedades el espécimen 3 presenta resultados menores. Esto se puede deber a que la sección donde se extrajo la probeta de acero posee mayores esfuerzos residuales que afectan los resultados de los ensayos o que la probeta se movió relativamente respecto al extensómetro al inicio del ensayo. Como el módulo de elasticidad es independiente de los esfuerzos residuales la variación se puede deber a un movimiento relativo al inicio del ensayo.

7.2. ENSAYOS EN COMPRESIÓN DE LOS ELEMENTOS REPRESENTATIVOS DE LA ARMADURA

7.2.1. Ensayo de columna corta

De los cálculos realizados para las propiedades geométricas de los elementos, se puede observar que se da una diferencia de un 3% con las propiedades nominales de la sección. Estas propiedades se muestran en el cuadro 4.2. Las variaciones son pequeñas y permiten la utilización de las propiedades nominales en el cálculo de la capacidad de los elementos.

En el ensayo de especímenes de columna corta no fue posible medir las deformaciones directas por compresión. Sin embargo, se determina la deformación aparente de los elementos (entre cabezas de la máquina). Esto permite obtener el esfuerzo de cedencia por compresión para los especímenes. El módulo de Elasticidad y la deformación de cedencia no son datos confiables, debido al hecho de las deformaciones aparentes.

En los gráficos mostrados en el Apéndice E para los especímenes de columna corta se muestra un comportamiento elástico bien definido. Se realizó un ajuste a las gráficas para eliminar el efecto del mortero de nivelación. Este mortero se expande o comprime a una razón mayor que el espécimen, lo cual, afecta los datos iniciales de desplazamiento.

A partir de cierta deformación, se presenta un comportamiento inelástico hasta la falla. Se puede observar, si las gráficas se pudieran aproximar con líneas rectas, que el comportamiento sería bilineal. Tal como sucedió en las pruebas de tensión con probetas.

No obstante, los resultados de resistencia en compresión de la sección completa del elemento son distintos a los de las probetas de acero en tensión. El esfuerzo último en la falla es mayor que la resistencia en tensión. Este esfuerzo máximo también es mayor que el esfuerzo de cedencia obtenido en los ensayos de tensión.

El aumento en la resistencia puede darse por dos razones. La primera es que el material tenga una resistencia mayor en compresión que en tensión. La segunda es que los esfuerzos de fabricación del elemento confinen el material lateralmente, lo que provocará una resistencia axial mayor en compresión. Se requieren más ensayos para corroborar estas posibles causas del aumento en los esfuerzos máximos de compresión. Sin embargo, la causa que tiene más sentido es la segunda, debido a las propiedades isotrópicas del acero.

Las deformaciones últimas en el espécimen al decaer la carga máxima en un 20%, son muy similares entre los especímenes. Esto brinda una buena comparación entre los especímenes ya que la variación entre los valores es de un 3%.

El área efectiva de la sección transversal se calculó con el procedimiento establecido en la norma AISI, para especímenes de columna corta. Esta área efectiva es mayor que el área nominal del elemento y que el área calculada. Esto indica que la sección transversal es efectiva en su totalidad. Lo cual implica, que en los cálculos de la capacidad en compresión de los elementos se debe utilizar toda el área de la sección transversal. No se debe reducir la sección por consideraciones de pandeo local, tal como se había determinado analíticamente.

7.2.2. Ensayo de compresión en especímenes representativos de la longitud entre nudos de la armadura

En estos especímenes no fue posible realizar las mediciones de desplazamiento del espécimen. Por ello se muestran los gráficos en el apéndice F con el desplazamiento entre cabezas de la máquina de ensayo. Estos gráficos se ven afectados por la contracción que puede tener el mortero de coronamiento. Esta contracción se refleja en los datos de desplazamiento y en la forma del gráfico. Esto justifica que se realice un ajuste de la parte inicial de las gráficas para eliminar los efectos del mortero de nivelación.

La forma de los gráficos es similar a la que se obtuvo en los ensayos de columna corta. Sin embargo, el modo de falla es distinto al que se dio en los especímenes de columna corta. Este modo de falla fue una combinación entre la esbeltez del elemento y el aplastamiento de la sección, después de alcanzar la cedencia.

Por otra parte, se puede observar que la carga máxima obtenida para estos especímenes es de 241 kN. Esta carga es mayor a la esperada según los análisis por pandeo. Esta carga fue calculada en 5.2.3.3 según las disposiciones de 3.3.

Es importante destacar que las condiciones de apoyo, se asemejan más a un empotramiento que a una articulación. Se utiliza un valor del factor de longitud efectiva de $K=0,5$ (condición empotrada). La carga máxima con esto es de 212 kN. Esto es un 13,7 % menor a la carga máxima obtenida en el ensayo. Generalmente, la carga máxima experimental siempre es mayor que la carga teórica (P_n).

La longitud de pandeo para los cálculos, se puede verificar en el modo de falla de los especímenes. Se puede observar a partir de las figura de la falla típica y de las figuras del Apéndice G que la longitud de pandeo del elemento es casi $0,5 L$, tal como se plantea en la teoría.

El aumento en el esfuerzo máximo alcanzado por el elemento con respecto al esfuerzo de cedencia se debe también al confinamiento de la sección transversal por los esfuerzos de fabricación. Es importante la realización de un estudio para corroborar estos supuestos.

7.2.3. Ensayo de compresión en especímenes representativos de la longitud sin arriostrar de la armadura

El resultado principal de los especímenes representativos de la longitud sin arriostrar, es la carga máxima en compresión alcanzada. Esta carga fue calculada con los modelos propuestos en la especificación AISI S-100-2007. Estos modelos están basados en pruebas experimentales.

En el espécimen 1, se puede observar una falla por pandeo en el rango inelástico. Esto se evidencia con la deformación permanente que mantuvo el espécimen después de la prueba. Del cuadro 6.8 se puede observar que el factor de longitud efectiva de pandeo, obtenido a partir de la carga máxima de ensayo, es ligeramente mayor que el asumido. Esto indica que

el espécimen tuvo un comportamiento similar al teórico en este caso. En el comportamiento teórico se puede observar que el espécimen falla en el rango inelástico. (Ver cuadro 5.2)

El espécimen 2, recuperó considerablemente la deformación que tuvo durante la prueba. Según la teoría, este espécimen falla en el rango elástico. Por lo cual, al descargarlo debía volver a su forma original.

Como se puede observar en la figura 6.9 este espécimen tuvo una deformación permanente. Al realizar los cálculos para obtener el factor de longitud efectiva de pandeo, se obtiene que el factor límite $\lambda_c = 1,65$. Esto es muy cercano al límite de 1,5 establecido en AISI S100-2007. Esto implica que el espécimen pudo encontrarse en una zona de transición, entre el rango elástico y el rango inelástico.

Por otro lado, la carga máxima que se obtuvo para el espécimen 2, superó en más de un 100% la carga calculada. Esto se debió a que el espécimen superó la capacidad de rotación en el pivote. Entonces la placa de extremo del espécimen se apoyó sobre la placa inferior del apoyo. Como el espécimen estaba soldado a la placa de extremo, se produjo un aumento en la rigidez de los apoyos, lo que provoca una resistencia mayor ante el pandeo.

La condición final del espécimen se puede asumir como una articulación en el apoyo superior (cabeza esférica) y un empotramiento en el extremo inferior. Según la figura 2.1 el factor de longitud efectiva para estas condiciones es de 0,7. El cual, es similar al factor obtenido a partir de la carga de ensayo de 0,66.

Como se describió al inicio de esta sección, las ecuaciones para determinar la capacidad en compresión de un elemento laminado en frío han sido obtenidas a partir de estudios experimentales. Por lo que los cálculos para la longitud no arriostrada con un factor de longitud efectiva de 1,0 se pueden realizar de manera confiable aunque no se haya podido obtener el resultado experimental debido a la falla funcional del montaje. Las pruebas se realizaron únicamente para corroborar estos resultados teóricos.

A partir de estas pruebas se logró obtener el resultado de la capacidad de un elemento empotrado en sus extremos. Esta capacidad se puede comparar con los resultados obtenidos para la capacidad de la cuerda en compresión de una armadura de acero. Aunque en los códigos se especifique la condición articulada en los extremos.

7.3. ENSAYOS SOBRE LOS ESPECÍMENES TIPO ARMADURA

Las pruebas realizadas a los especímenes tipo armadura permitieron obtener los resultados esperados. Con excepción del espécimen C1-1, el modo de falla de todos los especímenes fue similar (ver figuras 6.17 y 6.18). Cada espécimen se cargó a una velocidad uniforme hasta alcanzar la carga máxima. En ese punto los especímenes empezaron a registrar deformaciones plásticas, con su respectiva disminución en la carga. En cada espécimen se presentó deformación fuera del plano de la armadura, que inició en la cuerda en compresión (inferior).

A continuación se presenta el análisis de los resultados de los ensayos realizados a las armaduras. El análisis se presenta por espécimen. Sin embargo, para el espécimen C1-2 y los especímenes tipo C2 y C3, se presenta un análisis general. Esto se debe a la similitud en los resultados obtenidos. A pesar de esto, se hace énfasis en los aspectos que lo ameriten para cada espécimen.

7.3.1. Especimen C1-1

Con el espécimen C1-1 se presentó una situación especial. Este espécimen tuvo que ser utilizado como prueba para el montaje experimental realizado. En total se realizaron cuatro pruebas antes de descartar el montaje inicial. La cantidad de variables de este montaje ofrecía una gran complejidad en el control del ensayo. (Ver cuadro 6.8).

Durante las pruebas N° 1, 2 y 3, el espécimen C1-1 no tuvo falla alguna. En todos los casos las fallas se dieron por falta de capacidad en el montaje. Estos problemas se resolvían y en poco tiempo se retomaban las pruebas. No obstante, en cada prueba surgía un problema nuevo. En la prueba N° 4, se produjo la falla local en la pared del elemento diagonal central, justo en el punto de aplicación de carga. Esto se debió al modo de cargar el espécimen. La carga se aplicaba por medio de un cable unido, mediante una gaza, a los elementos que convergían en el nudo central de la armadura. (Ver figura 6.10)

Esta falla determinó un cambio en la concepción del ensayo. En un inicio, se determinó la forma de cargar el espécimen por medio de las placas. Después, se propuso el cambio total en el montaje. Al final se demostró que este montaje era el idóneo para las pruebas.

7.3.1.1 Gráficos carga-desplazamiento

En los gráficos carga-desplazamiento en el plano de las primeras pruebas (Apéndice H) se puede observar que el espécimen llevaba una tendencia lineal. La primera prueba se realizó con una velocidad de carga muy baja, por lo que el espécimen podía sostener por más tiempo algunas deformaciones que no se dan si la carga se aplica de forma más rápida. En los gráficos para las pruebas de la 1 a la 4, se puede observar como cada cambio en el montaje afecta el comportamiento de la gráfica. En la figura H.31 se muestra una comparación entre las gráficas que demuestra la situación descrita.

El gráfico carga-desplazamiento en el plano para la prueba 5, muestra que ya existía un daño considerable en el espécimen. La gráfica presenta un crecimiento muy irregular, hasta el punto donde el LVDT perdió el punto de lectura. En este espécimen no se colocaron láminas de acrílico en los puntos de lectura de los LVDT, al ser una prueba del montaje.

Los gráficos carga-desplazamiento fuera del plano para el espécimen C1-1 muestran un comportamiento similar, a partir de la prueba 2. En la prueba 1, el espécimen podía acomodar mejor las deformaciones, por la velocidad de carga baja que poseía. Por ello muestra una forma muy distinta. En la prueba 5, como se estableció anteriormente, el espécimen ya presentaba daños considerables y esto se refleja en la inestabilidad de la gráfica.

En los gráficos carga-desplazamiento fuera del plano para la prueba 2, se observa un desplazamiento de hasta 20 mm, en niveles de carga bajos, según lo que se alcanzó en la prueba 5. Esto se debe a la excentricidad que generaba el cable al cargar el espécimen. Lo cual podía generar esfuerzos laterales que ayudaban en la deformación fuera del plano del elemento.

7.3.1.2 Gráficos de las galgas

En los gráficos de la carga aplicada contra la deformación en las galgas del Apéndice H se puede observar el nivel de deformación alcanzado en cada elemento instrumentado. Los elementos instrumentados corresponden a los que están más esforzados según el análisis de la armadura. Por medio de la deformación en las galgas se puede determinar si el elemento alcanzó la cedencia en la falla o no. El límite de cedencia se estableció para este material en una deformación unitaria de 0,005 ó 5000 μ , a partir de las pruebas de tensión.

La galga A se dañó a partir de la prueba 2. En la prueba 5 no registró datos. En el rango elástico esta galga podía ser utilizada para calcular la fuerza en el elemento. Esta fuerza sería de $1,0 P$, donde P es la carga aplicada.

La galga B se mantuvo durante las cinco pruebas. En la prueba 1 los datos no fueron válidos debido a que se presentaba un ajuste de deformación en la galga por la baja velocidad del ensayo. A partir de la prueba 2 se puede observar que la galga B posee el comportamiento esperado. En la prueba 5 se observa que la deformación en la galga B, alcanzó y sobrepasó la deformación de cedencia. Después de esto la galga se dañó.

Al comparar la fuerza elástica con la carga aplicada se puede observar la relación entre estas. La fuerza elástica se calculó en el elemento a partir de la deformación registrada en la galga B. Según el análisis la relación fuerza elástica en B-carga aplicada debe ser de 1,5. En el gráfico donde se muestra la relación de los datos obtenidos, se puede observar que generalmente se converge a una relación cercana a este valor. De las gráficas se puede obtener una aproximación de esta razón: 1,65. Lo cual es cercano a la relación teórica.

7.3.1.3 Modo de falla

La falla de este espécimen se produjo en la soldadura de una de las uniones (ver figura 6.12). No obstante, se produjo deformación fuera del plano en la cuerda superior antes de darse la falla en la soldadura (ver figuras 6.11 y H.26). La falla en la soldadura se produjo en la unión del elemento que había sufrido la falla local en la prueba 4. Esto indica que el espécimen tenía un daño considerable en esta zona.

La forma del pandeo post-ensayo, que se muestra en la figura H.29, verifica la existencia de deformaciones inelásticas en el elemento. La ecuación que se muestra en el gráfico es con fines informativos. Esta ecuación es una serie de aproximación para la forma del espécimen después del ensayo. La longitud de pandeo se puede obtener como la longitud entre los puntos de inflexión de la curva. Sin embargo, esta longitud de pandeo no es real porque se mide cuando el espécimen está descargado. Por ello es que se utiliza la ecuación de Euler (ecuación 2-1) para calcular la longitud efectiva de pandeo. Se obtiene un factor $K=0,47$.

En este espécimen se obtuvo una longitud de pandeo mayor, pero es importante recordar que la falla no fue por pandeo propiamente dicha. La carga máxima alcanzada se dio cuando falló la soldadura.

Lo anterior se debe a los ciclos de carga y descarga que sufrió este espécimen. Algunos elementos pudieron haber cedido o haber empezado a entrar en el rango inelástico. Esto produce que la rigidez en los elementos disminuya y por ende la longitud de pandeo aumente.

7.3.1.4 Carga máxima

Según el cuadro 4.8, la carga máxima sobre el espécimen debía ser de 127 kN. No obstante, a pesar de la falla descrita anteriormente, el espécimen C1-1 alcanzó una carga máxima de 127 kN. Esto exactamente más lo esperado, lo cual indica que la carga máxima es igual al valor teórico. Sin embargo, la falla en este espécimen no fue por pandeo.

Se puede observar que este espécimen registró la menor carga entre los demás. Esto corresponde al daño que se había producido en la armadura en las pruebas previas. Los resultados para este espécimen en la prueba 5 no son representativos, por el daño que presentó esta armadura.

7.3.2. Resto de los especímenes

7.3.2.1 Gráficos carga desplazamiento

Se puede observar cómo los gráficos carga-desplazamiento en el plano tienen un comportamiento similar en los especímenes C1-2, los tipo C2 y C3. Esto se corrobora al comparar todas las gráficas como en la figura 6.17. La carga aplicada disminuye después de alcanzar la carga máxima de falla. Después de esto, se realizó una pausa en el ensayo para retirar los LVDT. En esta pausa se puede observar que los LVDT siguen tomando datos antes de quitarlos, lo cual indica la inestabilidad del espécimen. El ensayo se detuvo cuando la carga decayó en un 20%.

En los gráficos carga-desplazamiento fuera del plano se muestra claramente el punto donde se alcanza el pandeo (figura 6.18). Este punto es cuando la gráfica forma una curva bien marcada. Cambia de una pendiente pronunciada a una pendiente menor. Es en ese punto donde la carga aplicada al espécimen empieza a disminuir, lo cual es un indicador de la falla. Este LVDT fuera del plano es el que demuestra que la falla de los especímenes se produjo por pandeo en la cuerda en compresión.

La dirección hacia la cual se da el pandeo es indiferente. Depende de las imperfecciones de fábrica de los elementos y los esfuerzos residuales de la construcción de los especímenes. Podría existir una relación entre la excentricidad en el gancho de carga y el desfase en los agujeros de las placas de carga y la dirección del pandeo. Esto se discutirá en la sección del modo de falla.

Teóricamente se esperaría que los las gráficas carga-desplazamiento fuera del plano se mantuvieran en cero hasta el punto donde se da el pandeo. Allí empezarían a tomar la deformación fuera del plano. Esto no sucede en los gráficos carga-desplazamiento fuera del plano. Esto se debe a las excentricidades que se dan en la carga del espécimen y por los defectos de fabricación de las armaduras.

A partir de la figura 6.18, se puede observar que el espécimen C1-2 tuvo un comportamiento donde se establece claramente el punto del pandeo. La deformación fuera del plano en este espécimen fue menor que en el resto de los especímenes al alcanzar la carga máxima. En la sección de modo de falla se discutirá con más detalle.

7.3.2.2 Gráficos de las galgas

Como se explicó en el análisis de los resultados para el espécimen C1-1. Los gráficos carga-deformación en la galga, sirven para determinar si los elementos más esforzados presentan cedencia en la falla. Los gráficos de las galgas se muestran en el Apéndice I.

Todos los especímenes alcanzaron sobrepasaron la deformación de 2000μ , establecido como límite donde inicia la transición entre la parte elástica y la parte inelástica, lo cual indica que los especímenes pueden tener deformaciones permanentes. En el espécimen C1-2, solo el elemento con la galga A alcanzó la cedencia. Este es el elemento más esforzado ($F=1,5 P$). Se puede notar como la deformación en la galga A, correspondiente a este espécimen, alcanza la cedencia y continúa deformándose plásticamente. En el resto de especímenes los dos elementos centrales no alcanzaron la deformación de cedencia de 5000μ . Esto no se pudo comprobar con el espécimen C2-2, debido a que la galga A se despegó al alcanzar las 650μ . No obstante los elementos presentaron deformaciones inelásticas al final de las pruebas.

En algunos especímenes se logró determinar la deformación permanente en los elementos instrumentados después de la falla. Esto es un indicador de que los elementos alcanzaron la

cedencia. Es importante recalcar que la deformación permanente en los elementos debe ser menor que la de cedencia. En todos los casos donde se pudo registrar la deformación permanente se dio esta condición.

La relación entre las fuerzas elásticas en los elementos con galga se muestra en las gráficas correspondientes para cada elemento. La fuerza elástica se calcula por medio de la ley de Hooke, la cual aplica solo en el rango elástico. Los valores de estas razones deberían ser constantes a lo largo de la deformación elástica de los elementos. El hecho de que las relaciones no se mantengan constantes se debe a los errores de medición asociados con las fluctuaciones internas de las galgas. En el cuadro 6.10 se muestra el resultado más común observado, o el que se mantenga constante en el gráfico.

Los resultados para las razones F_A/F_B y F_A/P del espécimen C2-2 se obtuvieron de la porción del gráfico que se pudo obtener durante las pruebas. Es importante recordar que en este espécimen la galga A se despegó a partir de los 650 μ .

En el espécimen C3-2 se muestra un desfase entre las gráficas para la galga A y la galga B. Esto se puede deber a esfuerzos introducidos por la excentricidad en la carga del espécimen. Sin embargo, en el gráfico de la razón entre las fuerzas F_A/F_B , es prácticamente constante. El valor de esta razón es aproximadamente de 1,2. (Ver figura 1.20 y cuadro 6.10).

En el cuadro 6.11 se puede determinar el rango en el que varía la diferencia entre las razones teóricas y las razones experimentales. Este rango comprende entre un 0% y un 20% para la razón F_A/F_B . Para la razón F_A/P comprende entre un 3,3% y un 40% y para la razón F_B/P comprende entre un 10% y un 26,7%.

Si bien es cierto, estos porcentajes de diferencia son altos, los resultados pueden validarse con los modelos teóricos. No hay que olvidar que la teoría supone un comportamiento lineal-elástico, que en realidad sólo se asemeja. Los materiales no necesariamente se comportan linealmente. Además, las galgas pueden tener variaciones en la medición, ya que son susceptibles a la temperatura ambiente y otros factores externos.

7.3.2.3 Modo de falla

Los especímenes tuvieron un modo de falla similar. El modo de falla fue por pandeo fuera del plano de la armadura en la cuerda inferior. En las figuras 6.13, 6.14, 6.15 y 6.16, para los especímenes C1-2, C2-1, C3-1 y C3-2, respectivamente, se demuestra que la forma del pandeo es similar. Para el espécimen C2-2 sólo se muestra la figura de la forma del pandeo en el Apéndice I.

Sin embargo, al analizar los gráficos y figuras del Apéndice I de la deformación permanente en los especímenes se pueden ver diferencias. La forma en general es la misma en los especímenes, con excepción de C1-2, pero algunos alcanzaron mayor deformación que otros. El espécimen C1-2 tiene una forma de pandeo muy distinta a los otros.

Los especímenes C2-1 y C2-2 son lineales hacia sus extremos y presentan una forma curva en sus elementos centrales. Los especímenes C3-1 y C3-2 presentan esta misma forma. Al espécimen C2-1 se le intentó aplicar más carga después del pandeo, lo que produjo una mayor deformación.

La dirección en que se dio el pandeo pudo verse afectada por la forma de cargar al espécimen. En algunos casos, el gancho de carga se acercaba a una de las placas. Esto se debía a imperfecciones constructivas en el espécimen, a que los elementos tenían deformación de fábrica o durante el pandeo en el ensayo. Este acercamiento a una de las placas provoca que la carga no sea uniforme en ambas caras del espécimen. Lo que podría propiciar el pandeo hacia una dirección.

El gancho de carga se intentó colocar centrado desde el inicio. Pero en ocasiones no era posible, por las razones mencionadas. Para esto también contribuyó el desfase, que podría haber, entre los centros de los agujeros de las placas de transmisión de carga. Generalmente la excentricidad del gancho se daba hacia la dirección negativa. Sólo en el espécimen C1-2 se inició la prueba con el gancho centrado.

No se puede asegurar si la excentricidad del gancho influye en la dirección hacia la cual se da el pandeo. En los especímenes C2-2, C3-1 y C3-2, se presentó la situación del gancho ubicado con una excentricidad hacia la dirección negativa y el pandeo se produjo hacia esta misma dirección. No obstante, en el espécimen C2-1 se inició el ensayo con el gancho de carga excéntrico hacia la dirección negativa y el pandeo se produjo en la dirección opuesta.

Con el análisis de Euler, el factor de longitud efectiva de pandeo es en promedio de 0,43 para los especímenes C2 y C3. Para el espécimen C1-2, el factor de longitud efectiva de Euler es de 0,41. El factor de longitud de pandeo según el método de Timoshenko es de 0,222. La diferencia se da en que el análisis de Timoshenko distribuye la carga con una variación lineal y la rigidez que aportan los elementos unidos a la cuerda en toda la longitud del elemento. El resultado experimental traslada la rigidez intermedia a los apoyos y establece una carga de pandeo para el elemento.

Este factor de longitud efectiva es menor a lo que se recomienda para la condición empotrada en los extremos ($K=0,5$). Se justifica con el hecho de que se está analizando la cuerda en compresión de una armadura. La cual se puede separar en elementos con longitud igual a la longitud entre nudos. Si se analiza la cuerda en compresión de la armadura en elementos de longitud igual a la longitud entre nudos el factor de longitud efectiva máximo que se podría utilizar para los elementos más esforzados sería de $K=2,0$. Sin embargo, se puede observar que en el pandeo, la cuerda en compresión interviene como un solo elemento. Es decir, la deformación se da a lo largo de toda la cuerda. Por eso, es más recomendable utilizar los factores de 0,43 ó 0,41.

Se puede observar que el pandeo más crítico se produce en la longitud entre nudos del elemento más esforzado. Pero esta condición se hace visible después de que la cuerda se ha deformado fuera del plano. Lo ideal sería realizar la medición por pandeo cuando se alcanza la carga máxima de falla, pero esto es peligroso. Se pudo observar que la deformación por pandeo es una combinación de la inestabilidad de los elementos más esforzados y de la deformación de la cuerda como un solo elemento.

La excepción de este análisis es el espécimen C1-2. Donde la forma característica de pandeo se produjo en el elemento más esforzado (instrumentado con la galga A). Este elemento presentó un pandeo en toda la cuerda. Empero, las mayores deformaciones se produjeron en el elemento más esforzado dentro de la longitud entre nudos.

Según los gráficos carga-desplazamiento, el espécimen C1-2 fue el que alcanzó la mayor carga de falla y mayor deformación en el plano. Fuera del plano este espécimen no presentó deformaciones considerables hasta alcanzar la carga máxima. Esta condición se puede deber a que para la cuerda en compresión de la configuración C1 existe una variación de la fuerza

interna en cada longitud entre nudos. Esta variación pudo darle mayor estabilidad al elemento. Sumado a que todos los nudos tienen la misma cantidad de elementos.

El resto de especímenes tuvieron un comportamiento similar en la falla. Los especímenes prácticamente alcanzaron la misma carga en un desplazamiento en el plano similar. Las fuerzas internas de la cuerda en las configuraciones C2 y C3 se mantienen más constantes en algunas secciones y tienen un comportamiento simétrico. Además en algunos nudos de la cuerda en compresión no tienen unidos diagonales a ellos. Esto puede hacer que la estabilidad sea menor que en el espécimen C1-2. El espécimen C3-2 presentó la menor carga de falla y un desfase mayor respecto a la posición de equilibrio. Esto se puede deber a excentricidades en la construcción del espécimen y en la aplicación de la carga.

Con estos resultados se puede obtener la siguiente conclusión: El pandeo en la cuerda en compresión continua de estas armaduras inicia en la sección entre nudos más esforzada. Está influenciada por la rigidez de toda la cuerda y de los elementos diagonales y verticales que se unen en los nudos. Cuando pandeo la sección entre nudos más esforzada pandeo toda la cuerda. La sección más esforzada puede presentar deformaciones inelásticas y el resto de la cuerda puede deformarse como elementos rígidos vinculados por articulaciones al elemento más esforzado y al apoyo. Una variación mayor en los esfuerzos internos de la cuerda en compresión brinda mayor estabilidad en la cuerda.

7.3.2.4 Carga máxima

Del cuadro 4.8 se tiene que la carga máxima esperada es de 127 kN, después de aplicar el análisis de Timoshenko. No obstante, en el cuadro 6.9 se muestra que las cargas máximas alcanzadas por cada espécimen superan esta capacidad. Para el espécimen C1-2 se obtuvo una carga de 163 kN, lo cual es un 28% mayor. El resto de los especímenes se alcanzaron cargas similares entre ellos. En promedio esta carga es de 151 kN, lo que supera en un 19 % la carga esperada.

Este aumento en la carga máxima se debe a la variación en las propiedades de los materiales y las secciones. Además, en la armadura los elementos actúan como un sistema conjunto que podría aumentar la capacidad con respecto a un análisis por elementos. La variación en las fuerzas internas en las cuerdas también produce un aumento en la estabilidad del

elemento respecto a la suposición realizada de que la capacidad nominal de la cuerda es 1,5 veces la carga aplicada.

Por lo tanto, se considera que el porcentaje de diferencia entre la carga teórica y la carga aplicada está dentro del rango aceptable debido a las suposiciones realizadas para el análisis de las armaduras y la incertidumbre en la construcción de los especímenes.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

- Los especímenes tuvieron un comportamiento similar ante la carga aplicada. Si se descarta el espécimen C1-1 por no ser representativo, conforme aumenta la carga, el desplazamiento en el plano de la armadura aumentará hasta alcanzar la falla. Después de esto la carga disminuye y el desplazamiento sigue en aumento.
- El comportamiento con respecto al desplazamiento fuera del plano fue similar entre los especímenes. El desplazamiento y la carga crecen hasta que se empieza a dar el pandeo. Se da una transición entre esta parte y la parte final. En la parte final la carga empieza a decrecer mientras que el desplazamiento crece a una razón mayor.
- El pandeo de la cuerda en compresión de las armaduras de acero ensayadas inicia dentro de la longitud entre nudos que define los elementos más esforzados. La cuerda padea como un solo elemento, pero con mayor deformación en los elementos más esforzados.
- La longitud efectiva de pandeo para estos especímenes se establece, en promedio, como un 43% de la longitud sin restricciones laterales de las armaduras. Esta longitud de pandeo se determina por medio de la ecuación de Euler.
- La carga máxima que se obtuvo en los especímenes de ensayo es mayor que la carga de diseño. En general la carga supera en un 19% la carga de diseño de 127 kN.
- Los resultados de las galgas demostraron que el análisis por nudos de una armadura, al considerar las uniones articuladas, es válido. Las fuerzas internas que se obtuvieron en los elementos instrumentados son similares a las del análisis estructural por nudos.
- La longitud de pandeo de la cuerda en compresión de una armadura se puede determinar a partir de un análisis detallado. Este análisis involucra la rigidez que aportan los elementos verticales y diagonales y la variación en las fuerzas internas del elemento.

- El análisis de Timoshenko es poco conservador al considerar la longitud de pandeo. Considera una distribución uniforme de la rigidez y una variación de esfuerzos internos por carga distribuida en compresión. Lo cual, es distinto a la variación real de las fuerzas internas en la cuerda en compresión. Esta variación se asemeja más a colocar cargas puntuales en los nudos de la armadura. La rigidez también se aplica en cada nudo.
- Los códigos de diseño son muy conservadores en el establecimiento de la longitud efectiva de pandeo de las cuerdas en compresión de las armaduras de acero. La longitud de pandeo que se establece en los códigos es la distancia sin arriostrar. Para estos especímenes, el análisis por pandeo de Timoshenko brinda un valor de 0,22 y los resultados obtenidos de 0,43 de la distancia sin arriostrar.
- Los elementos de acero laminados en frío están especificados con la norma JIS-G3132-SPHT-2. Los valores mínimos de esfuerzo de cedencia y esfuerzo último que se especifican son menores a los reales. El valor de R_y obtenido para este material es de 1,7. El valor de la ductilidad del material F_u/F_y que se obtuvo es de 1,07. Estos valores son similares a los que se establecen en el CSCR-2010 para este material. ($R_y=1,6$ y $F_u/F_y=1,08$). Además, este resultado corrobora los resultados de investigaciones anteriores al respecto.
- El gráfico esfuerzo-deformación del acero para los elementos laminados en frío, que se utilizaron en las armaduras, tiene una forma bilineal. Lo cual permite aproximar teóricamente el comportamiento de este acero por medio de dos líneas rectas.
- El esfuerzo máximo en compresión puede ser mayor que el esfuerzo de cedencia y el esfuerzo último del material en tensión para los elementos laminados en frío. El gráfico esfuerzo-deformación en tensión para el acero preparado en probetas es diferente al gráfico esfuerzo-deformación en compresión para un elemento de sección transversal completa. Esto se puede deber a los esfuerzos residuales de fabricación de las secciones formadas en frío.
- En las pruebas de compresión de especímenes de columna intermedia y de especímenes de columna esbelta, los resultados se afectan por las condiciones de apoyo.

- Las propiedades geométricas de la sección transversal de los elementos pueden ser mayores que las que se establecen en los catálogos del fabricante. Esto afecta los cálculos de la resistencia de los elementos.
- El montaje experimental idóneo es aquel que muestre suficiente resistencia y rigidez, ante las cargas que se generan desde el ensayo experimental. Un elemento con poca rigidez, tendrá deformaciones que afectan los resultados experimentales.
- La mejor manera de cargar a los especímenes, en el ensayo mostrado, es haciéndolo directamente. Un sistema de carga con muchos elementos intermedios, es difícil de controlar y no permite realizar mediciones certeras. Si se utilizan muchos elementos intermedios en el sistema de carga, se corre el riesgo de que se produzcan fallas en estos elementos. Lo cual es un problema de seguridad, puede dañar los especímenes de ensayo y afectar la validez de los resultados experimentales.
- Las placas de transmisión de carga, que se soldaron a las armaduras, permitieron cargar de manera uniforme a los especímenes. Estas placas evitaron la falla local en los elementos de las armaduras. Las placas fueron diseñadas para no producir fallas locales en los elementos directamente unidos.
- Una soldadura adecuada de los elementos de la armadura permite obtener los resultados esperados. En este ensayo se realizó una correcta soldadura entre los elementos por parte de una persona calificada, lo cual permitió que los especímenes no fallaran en las uniones antes de fallar por pandeo.
- La rigidez de los elementos verticales y diagonales afecta la resistencia de la cuerda en compresión de una armadura de acero de cuerdas paralelas. Se pudo observar cómo, tanto los elementos verticales, como los diagonales se deformaron para albergar el pandeo de la cuerda en compresión. También se observó la manera en que la cuerda en tensión sufrió deformaciones al darse el pandeo. En los análisis por pandeo de Timoshenko (1963) no se consideró el aporte de la cuerda en tensión.
- Esta resistencia también está afectada por la variación en los esfuerzos internos de compresión, que se dan en la cuerda. Se puede observar que la armadura con la configuración que produce una mayor variación en las fuerzas internas de la cuerda

en compresión (C1) presentó tuvo menor desplazamiento fuera del plano y alcanzó mayor carga.

- La configuración C1 no es la más utilizada para el tipo de carga que se aplicó en los ensayos debido a que presenta una forma asimétrica en la distribución de fuerzas internas. Sin embargo, por esta distribución asimétrica de fuerzas y las rigidez uniforme en cada nudo (a cada nudo llega un elemento vertical y uno diagonal), se mostró un mejor comportamiento en el pandeo.
- La hipótesis planteada en este trabajo de investigación fue comprobada. La longitud efectiva de pandeo es menor que la longitud no arriostrada de la armadura. La fuerza que se debe utilizar para el diseño es la fuerza máxima que se da en la cuerda en compresión.

8.2. RECOMENDACIONES

- Si hay incertidumbres en la determinación de la carga máxima que podría alcanzar el ensayo, es necesario utilizar factores de seguridad conservadores en el diseño de los elementos del montaje. Se deben utilizar factores de seguridad tan altos como 2,0. Con esto se asegura que se ensayarán los especímenes y no el montaje. Además, se brinda seguridad a los presentes durante las pruebas.
- Se recomienda reevaluar el montaje realizado para estas pruebas experimentales en futuros ensayos. Se podrían mejorar las condiciones de apoyo, la forma de cargar a los especímenes y el arriostramiento lateral. Se podrían colocar mejores sistemas para dar la estabilidad lateral, como colocar hules en lugar de madera.
- En próximas investigaciones, es necesario que se verifique que no existan excentricidades en aplicación de la carga. La excentricidad, aunque sea mínima, podría sesgar los resultados experimentales.
- Es importante realizar una investigación con respecto a las propiedades mecánicas del acero utilizado en los elementos de tubos estructurales laminados en frío. Se debería caracterizar los materiales tanto en tensión como en compresión. En tensión se deben

utilizar probetas. En compresión, se utilizarían los elementos de sección completa. Esto se debe a la variabilidad que se observó en las propiedades obtenidas para el material utilizado y a la diferencia en la resistencia en tensión y en compresión.

- Cuando se trabaje con galgas en elementos de acero, es importante determinar antes el límite de deformación de cedencia. Si este límite no se determina puede que los cálculos realizados a partir de la deformación en las galgas no sean válidos.
- En el diseño de armaduras de acero, se debería realizar algún análisis adecuado para determinar la longitud efectiva de pandeo. En especial, cuando se trata del diseño de las cuerdas en compresión. En el análisis, se debe introducir también la rigidez que aporta la cuerda en tensión.
- Se recomienda reanalizar los supuestos realizados por Timoshenko para determinar la longitud efectiva de pandeo en la cuerda en compresión de una armadura con el método de la fundación elástica con carga distribuida. Se podría utilizar un método que permita utilizar una carga en compresión equivalente sobre la cuerda. Esta carga equivalente debe considerar la variación de las fuerzas internas.
- En próximas investigaciones que se realicen sobre este tema, se recomienda realizar un análisis de segundo orden de las armaduras en un programa adecuado. De esta manera, se obtendrán cargas más cercanas a las que se darán en el ensayo experimental. Esto es útil para diseñar el montaje experimental. El análisis estático se puede realizar para estimar las cargas que se introducirán al programa inicialmente.
- Se recomienda realizar estos ensayos en elementos representativos de alguna estructura real. Podría ser de un puente tipo cercha de media altura, de una cercha de techo (de cuerdas paralelas o inclinadas) o de alguna armadura que sea parte de una edificación. Se podría variar el montaje para aplicar las cargas de una manera más representativa. Si fuera necesario, el ensayo se debe realizar a escala reducida para ajustarse a las dimensiones del montaje. Con esto, se puede obtener la longitud de pandeo experimental para configuraciones distintas.

- Se deben realizar más pruebas experimentales en armaduras de cuerdas paralelas con diferentes longitudes sin arriostrar, para determinar si los factores especificados en los códigos de diseño son tan conservadores como se determinó en estas pruebas.
- El montaje para la prueba en compresión en un elemento esbelto debe mejorarse. Se deben establecer muy bien las condiciones de apoyo del elemento y darle la estabilidad necesaria antes y después del ensayo. Esto último es una consideración de seguridad. Por ejemplo, si se quiere realizar el ensayo con un factor de longitud efectiva de pandeo unitario, es necesario realizar cambios al montaje propuesto. Se debe estimar la capacidad de rotación del pivote del apoyo y verificar si el elemento puede superar esta capacidad y lubricar las superficies en contacto para disminuir la fricción. Además, se puede colocar un material que permita mantener el espécimen en su sitio, pero que no restrinja la rotación del mismo (puede ser hule).
- Se recomienda realizar este mismo ensayo, con las variantes recomendadas, para obtener resultados que permitan demostrar que los factores de longitud efectiva para armaduras de acero, establecidos en los códigos y normas de diseño, son conservadores.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Institute of Steel Construction. (2005). *Steel Construction Manual* (13^{va} ed.). Estados Unidos de América: AISC.
2. American Institute of Steel Construction. (2010). *Specification for Structural Steel Buildings. (ANSI/AISC 360-10)*. Estados Unidos de América: AISC.
3. American Iron and Steel Institute (2007) *Commentary on North American Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members. (AISI S100-2007-C)*. Estados Unidos de América: AISI.
4. American Iron and Steel Institute (1995). *Design Guide for Cold-Formed Steel Trusses*. Extraído el 20 de agosto, 2010 de:
[http://course.jnu.edu.cn/cxgc/gang/guifan/Design%20guide%20for%20cold-formed%20steel%20trusses\(usa\).pdf](http://course.jnu.edu.cn/cxgc/gang/guifan/Design%20guide%20for%20cold-formed%20steel%20trusses(usa).pdf)
5. American Iron and Steel Institute (2007) *North American Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members. (AISI S100-2007)*. Estados Unidos de América: AISI.
6. American Iron and Steel Institute (1996) *Test Procedures for use with the 1996 AISI Cold-Formed Steel Specification. Stub-Column Test Method for Effective Area of Cold-Formed Steel Columns*. Estados Unidos de América: AISI. Pp VIII-14 a VIII-27
7. American Standard for Testing and Materials.(2008) *Standard Specification for Carbon Structural Steel (ASTM A36)*. Estados Unidos de América, ASTM Internacional.
8. American Standard for Testing and Materials.(2008) *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products (ASTM A370)*. Estados Unidos de América, ASTM Internacional.
9. American Welding Society (AWS) (2010). *Structural Welding Code – Steel. (22^{ava} Edición)*. Estados Unidos de América:AWS.
10. Autodesk®. *Robot Structural Analysis 2009*®. Licencia Estudiantil de la Universidad de Costa Rica. 2012

11. Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2011) *Código Sísmico de Costa Rica 2010*. Cuarta edición. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago.
12. Dekker, N. & Burdzik W. (2005). A rational approach to obtaining effective lengths of compression members in framed structures [Versión Electrónica]. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 47(3), 14-19. Extraído el 15 de septiembre, 2010 de: http://www.saice.org.za/Portals/0/pdf/journal/vol47-3-2005/vol47_n3_b.pdf
13. Dumonteil, P. (1999). Historical note on K-Factor Equations [Versión Electrónica]. *AISC Engineering Journal*, 102-103.
14. Dumonteil, P. (1992). Simple Equations for Effective Length Factors [Versión Electrónica]. *AISC Engineering Journal*, 111-115.
15. Dunaiski, W. (2008). Investigation into effective lengths of web compression elements in parallel chord trusses. Tesis presentada en cumplimiento parcial de los requisitos para obtener el grado de Master of Science en Ingeniería, Universidad Stellenbosch, Sudáfrica. [Versión Electrónica] Extraído el 20 de agosto, 2010 de: <https://scholar.sun.ac.za/bitstream/handle/10019.1/2410/Dunaiski,%20WI.pdf?sequence=2>
16. European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.(BS-EN1993-1-1:2005)* Reino Unido: British Standards.
17. Galambos, T. (1998). *Guide to stability design criteria for metal structures* (5^{ta} ed.). Estados Unidos de América: John Wiley & Sons, Inc.
18. Luis Rojas e Ingenieros Asociados, S.A. (2005) *Revision de Informes de la Evaluacion Estructural del Gimnasio del Colegio Americano de Managua Nicaragua*. Informe Técnico. San José, Costa Rica: Luis Rojas e Ingenieros Asociados S.A. Documento digital en formato .doc. Suministrado por Ing. Luis Rojas Montero.

19. Miranda, P. (2010). *Presentaciones del curso IC-1012 Estructuras Metálicas*. Segundo Semestre de 2010. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
20. PTC. *MathCad® Prime 1®*. Licencia del LanammeUCR. 2012
21. Rodríguez Hernández, J. (2010). *Evaluación teórica experimental del pandeo local en columnas cortas de sección tubular cuadrada y rectangular fabricados en Costa Rica*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
22. Shrivastava, S. (1980). Elastic Buckling of a Column Under Varying Axial Force [Versión Electrónica]. *AISC Engineering Journal*, 19-21.
23. Timoshenko, S. (1963). *Theory of elastic stability* (2^{da} ed.). Singapur: McGraw-Hill Book Co. International Student Edition.
24. Villar Vega, Mabé. (2011). *Comportamiento estructural de marcos de acero de pared delgada con uniones reforzadas mediante placas bajo carga cíclica*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
25. Vinnakota, S. (2006). *Estructuras de acero: Comportamiento y LRFD*. México: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.

APÉNDICES

APÉNDICE A: ANÁLISIS DE LAS ARMADURAS DE ENSAYO

Para el análisis de las armaduras de ensayo se aplicó un carga de magnitud P , verticalmente hacia arriba, en el nudo central de la armadura de la cuerda superior. Los resultados para las fuerzas internas se muestran a continuación:

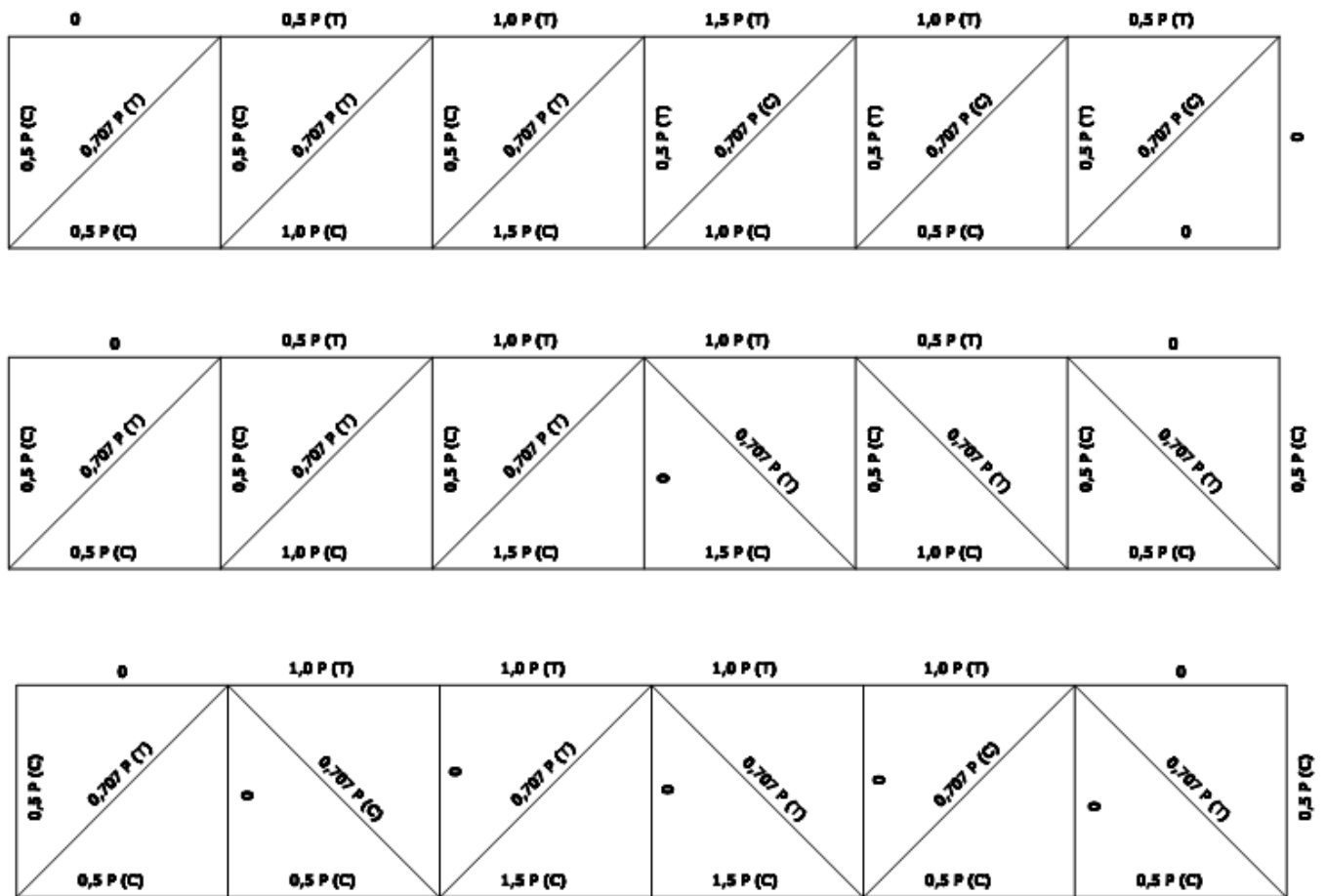


Figura A.1. Análisis de las armaduras de ensayo

APÉNDICE B: MEMORIA DE CÁLCULO DEL DISEÑO DE LAS ARMADURAS

Memoria de Cálculo

Capacidad de las armaduras de prueba

1. Aspectos Generales

- Se utilizará una sección cuadrada de tubo estructural de 50 mm x 50 mm x 3.17 mm (Ver Figura MC1)
- Los diseños se realizan según la norma AISI S100 - 2007 para elementos doblados en frío
- Los valores de esfuerzo de fluencia y esfuerzo último se obtuvieron a partir del ensayo ASTM A370.
- El análisis de las armaduras se realiza sin considerar esfuerzos de flexión en los elementos. Por lo tanto sólo se calcula la capacidad en tensión y en compresión de los elementos.
- Se dará un énfasis en la capacidad en compresión de los elementos de las armaduras. En especial en la cuerda en compresión. Se hará un análisis para determinar la longitud efectiva de pandeo de la cuerda.

2. Propiedades geométricas de la sección

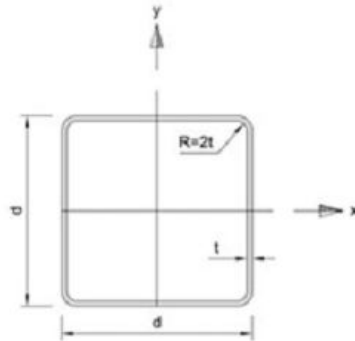


Figura MC1. Sección típica de tubería estructural cuadrada.

Fuente: METALCO, 2011

Área:	$A_g := 550.6 \text{ mm}^2$	Ancho/Peralte:	$d := 50 \text{ mm}$
Momento de Inercia de área:	$I_g := 191500 \text{ mm}^4$	Espesor:	$t := 3.17 \text{ mm}$
Radio de giro:	$r_g := 18.6 \text{ mm}$	Radio Interno:	$R_{int} := 2 t$ $R_{int} = 6.34 \text{ mm}$

(Valores tomados de las especificaciones de METALCO)

3. Propiedades del material

Esfuerzo de fluencia: $F_y := 385 \text{ MPa}$

Módulo de Elasticidad: $E := 200 \text{ GPa}$

Esfuerzo último: $F_u := 410 \text{ MPa}$

Módulo de Poisson: $\mu := 0.3$

4. Determinación de la sección efectiva

4.1 Ancho de la sección recta: $w := d - 2 (R_{int} + t) = 30.98 \text{ mm}$

4.2. Esfuerzo crítico F_{cr} :

$k := 4$ (Coeficiente de pandeo)

$$F_{cr} := k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2$$

$F_{cr} = 7570 \text{ MPa}$

4.3. Esfuerzo de compresión del elemento f_c

Se debe calcular la resistencia en compresión con la sección bruta para la determinación de este esfuerzo.

Conservadoramente se utilizará un valor de longitud efectiva de pandeo (KL) igual a la longitud del elemento (L). Esta longitud se tomará como 500 mm.

$L := 500 \text{ mm}$

$K := 1.0$

$$F_e := \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K \cdot L}{r_g} \right)^2} = 2732 \text{ MPa}$$

$$\lambda_c := \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} = 0.375$$

$F_n := \text{if } \lambda_c \leq 1.5 \quad = 363 \text{ MPa}$

$$\left\| \left\| \left\| \begin{array}{l} (0.658^{\lambda_c^2}) \cdot F_y \\ \text{if } \lambda_c > 1.5 \\ \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) \cdot F_y \end{array} \right. \right. \right\|$$

Por lo tanto:

$$f := F_n = 363 \text{ MPa}$$

4.4 Cálculo de la sección efectiva:

$$\lambda := \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = 0.219$$

$$\rho := \left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right) \left(\frac{1}{\lambda}\right) = -0.022$$

$$b := \begin{cases} \text{if } \lambda \leq 0.673 \\ \quad \quad \quad w \\ \text{if } \lambda > 0.673 \\ \quad \quad \quad \rho \cdot w \end{cases} = 30.98 \text{ mm}$$

∴ La sección transversal es totalmente efectiva

5. Capacidad en tensión de los elementos

5.1. Cedencia en el área bruta

$$T_{n1} := A_g \cdot F_y = 212 \text{ kN} \quad T_{n1} = 21.6 \text{ tonnef}$$

$$\phi_{t1} := 0.9$$

$$\phi_{t1} \cdot T_{n1} = 191 \text{ kN} \quad \phi_{t1} \cdot T_{n1} = 19.5 \text{ tonnef}$$

5.2. Ruptura en el área neta lejos de la conexión

$$A_n := A_g$$

$$T_{n2} := A_n \cdot F_u = 226 \text{ kN} \quad T_{n2} = 23.0 \text{ tonnef}$$

$$\phi_{t2} := 0.75$$

$$\phi_{t2} \cdot T_{n2} = 169 \text{ kN} \quad \phi_{t2} \cdot T_{n2} = 17.3 \text{ tonnef}$$

5.3. Ruptura en el área neta en la conexión

5.3.1. Elementos Verticales en tensión

$$A_{n2} := 2 \cdot d \cdot t \qquad U := 1.0 \qquad A_{e1} := U \cdot A_{n2} = 317 \text{ mm}^2$$

$$T_{n3.1} := A_{e1} \cdot F_u = 130 \text{ kN} \qquad T_{n3.1} = 13.3 \text{ tonnef}$$

$$\phi_{t3} := 0.60$$

$$\phi_{t3} \cdot T_{n3.1} = 78 \text{ kN} \qquad \phi_{t3} \cdot T_{n3.1} = 7.95 \text{ tonnef}$$

5.3.2. Elementos Diagonales en tensión

$$A_{n3} := 2 \cdot (d \cdot \sqrt{2}) \cdot t \qquad U = 1 \qquad A_{e2} := U \cdot A_{n3} = 448 \text{ mm}^2$$

$$T_{n3.2} := A_{e2} \cdot F_u = 184 \text{ kN} \qquad T_{n3.2} = 18.7 \text{ tonnef}$$

$$\phi_{t3} = 0.6$$

$$\phi_{t3} \cdot T_{n3.2} = 110 \text{ kN} \qquad \phi_{t3} \cdot T_{n3.2} = 11.2 \text{ tonnef}$$

5.3.3. Cuerda en tensión

La cuerda en tensión es un elemento continuo. Esto no existen conexiones que soporten directamente la tensión. Por ello, en este caso rige el estado límite ruptura lejos de la conexión

6. Capacidad en compresión de los elementos

6.1. Elementos verticales

Se considerará un factor de longitud efectiva en el plano de $K=0.8$ y fuera del plano de $K=1.0$ (Dunaiski, 2008)

$$L_v := 500 \text{ mm} \qquad K_{vp} := 0.8 \qquad K_{vfp} := 1.0$$

Razón de esbeltez:

$$\lambda_{vfp} := \frac{K_{vfp} \cdot L_v}{r_g} = 26.9 \qquad \lambda_{vp} := \frac{K_{vp} \cdot L_v}{r_g} = 21.5$$

$$\lambda_v := \max(\lambda_{vfp}, \lambda_{vp}) = 26.9$$

Esfuerzo de Euler:

$$F_{ev} := \frac{\pi^2 E}{(\lambda_v)^2} = 2732 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{cv} := \sqrt{\frac{F_y}{F_{ev}}} = 0.375$$

$$F_{nv} := \begin{cases} \text{if } \lambda_{cv} \leq 1.5 & = 363 \text{ MPa} \\ \left(0.658^{\lambda_{cv}^2}\right) \cdot F_y & \\ \text{if } \lambda_{cv} > 1.5 & \\ \left(\frac{0.877}{\lambda_{cv}^2}\right) \cdot F_y & \end{cases}$$

La sección es totalmente efectiva, por tanto: $A_{gv} := A_g = 550.6 \text{ mm}^2$

$$P_{nv} := F_{nv} \cdot A_{gv} = 200 \text{ kN}$$

$$P_{nv} = 20.4 \text{ tonnef}$$

$$\phi_c := 0.85$$

$$\phi_c \cdot P_{nv} = 170 \text{ kN}$$

$$\phi_c \cdot P_{nv} = 17.3 \text{ tonnef}$$

6.2. Elementos diagonales

Se considerará un factor de longitud efectiva de $K=0.8$ en el plano y $K=1.0$ fuera del plano (Dunaiski, 2008)

$$L_d := 500 \text{ mm} \cdot \sqrt{2} = 707 \text{ mm}$$

$$K_{dfp} := 1.0$$

$$K_{dp} := 0.8$$

Razón de esbeltez:

$$\lambda_{dfp} := \frac{K_{dfp} \cdot L_d}{r_g} = 38.0$$

$$\lambda_{dp} := \frac{K_{dp} \cdot L_d}{r_g} = 30.4$$

$$\lambda_d := \max(\lambda_{dfp}, \lambda_{dp}) = 38.0$$

Esfuerzo de Euler:

$$F_{ed} := \frac{\pi^2 E}{(\lambda_d)^2} = 1366 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{cd} := \sqrt{\frac{F_y}{F_{ed}}} = 0.531$$

$$F_{nd} := \begin{cases} \text{if } \lambda_{cd} \leq 1.5 & = 342 \text{ MPa} \\ \left(0.658^{\lambda_{cd}^2} \right) \cdot F_y & \\ \text{if } \lambda_{cd} > 1.5 & \\ \left(\frac{0.877}{\lambda_{cd}^2} \right) \cdot F_y & \end{cases}$$

La sección es totalmente efectiva: $A_{gd} := A_g = 550.6 \text{ mm}^2$

$$P_{nd} := F_{nd} \cdot A_{gd} = 188 \text{ kN}$$

$$P_{nd} = 19.2 \text{ tonnef}$$

$$\phi_c := 0.85$$

$$\phi_c \cdot P_{nd} = 160 \text{ kN}$$

$$\phi_c \cdot P_{nd} = 16.3 \text{ tonnef}$$

6.3. Cuerda en compresión

Para el pandeo en el plano se utilizará un factor de longitud efectiva $K = 0.9$ (Dunaiski, 2008). La longitud entre apoyos en el plano es de 500 mm

Se realizará un análisis para determinar la longitud de pandeo fuera del plano de la cuerda en compresión. De este análisis se obtendrá el factor de longitud efectiva de pandeo. La longitud entre apoyos fuera del plano es de 3000 mm

6.3.1. Análisis para determinar la longitud efectiva de pandeo fuera del plano

Se utiliza el análisis mostrado por Timoshenko (1963). Este análisis se describe en la sección 2.3.4

Se debe calcular la rigidez del nudo. Se considerará que en el nudo llegan un elemento vertical y uno diagonal. Esto no sucede en todas las configuraciones, ni en todos los nudos. En algunas, al nudo llegan un elemento vertical y dos diagonales. En otros llega solamente un elemento diagonal. Se asumirá que de esta manera se están tomando en cuenta estas diferencias que se dan entre nudos.

$$I_v := I_g = 191500 \text{ mm}^4$$

$$I_d := I_g = 191500 \text{ mm}^4$$

$$h := L_v = 500 \text{ mm}$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$L_d = 707.107 \text{ mm}$$

$$c := 500 \text{ mm}$$

$$L_{cfp} := 3000 \text{ mm}$$

La rigidez en el nudo es:

$$C_0 := \frac{3 \cdot E \cdot \left(I_v + I_d \cdot \left(\frac{h}{L_d} \right)^3 \right)}{h^3}$$

$$C_0 = 1244 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

La rigidez equivalente de la fundación rígida es:

$$\beta := \frac{C_0}{c}$$

$$\beta = 2488 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

El factor de Timoshenko para la rigidez:

$$f_{Tim} := \frac{\beta \cdot L_{cfp}^4}{16 \cdot E \cdot I_g} = 329$$

Al interpolar en el cuadro 2.2 se obtiene el siguiente valor del factor de longitud efectiva para el pandeo fuera del plano de la cuerda en compresión:

$$K_{cfp} := 0.222$$

6.3.2. Cálculo de la capacidad del elemento

Con este valor se puede calcular la resistencia en compresión de la cuerda de la armadura:

$$L_{cp} := 500 \text{ mm}$$

$$K_{cp} := 0.9$$

$$L_{cfp} = 3000 \text{ mm}$$

$$K_{cfp} = 0.222$$

Razón de esbeltez:

$$\lambda_{cfp} := \frac{K_{cfp} \cdot L_{cfp}}{r_g} = 35.8$$

$$\lambda_{cp} := \frac{K_{cp} \cdot L_{cp}}{r_g} = 24.2$$

$$\lambda_c := \max(\lambda_{cfp}, \lambda_{cp}) = 35.8$$

Esfuerzo de Euler:

$$F_{ec} := \frac{\pi^2 E}{(\lambda_c)^2} = 1540 \text{ MPa}$$

$$F_y = 385 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{cc} := \sqrt{\frac{F_y}{F_{ec}}} = 0.5$$

$$F_{nc} := \begin{cases} \text{if } \lambda_{cc} \leq 1.5 & = 347 \text{ MPa} \\ \left(0.658^{\lambda_{cc}^2}\right) \cdot F_y & \\ \text{if } \lambda_{cc} > 1.5 & \\ \left(\frac{0.877}{\lambda_{cc}^2}\right) \cdot F_y & \end{cases}$$

La sección es totalmente efectiva $\therefore A_{gc} := A_g = 550.6 \text{ mm}^2$

$$P_{nc} := F_{nc} \cdot A_{gc} = 191 \text{ kN}$$

$$P_{nc} = 19.5 \text{ tonnef}$$

$$\phi_c := 0.85$$

$$\phi_c \cdot P_{nc} = 162 \text{ kN}$$

$$\phi_c \cdot P_{nc} = 16.5 \text{ tonnef}$$

7. Capacidad de las conexiones soldadas

En las armaduras se tienen dos tipos de conexiones: (1) La de los elementos verticales a las cuerdas y (2) la de los elementos diagonales. Estas conexiones se muestran en la figura MC2. En la figura MC3 se muestra el tipo de soldadura típica de la conexión.

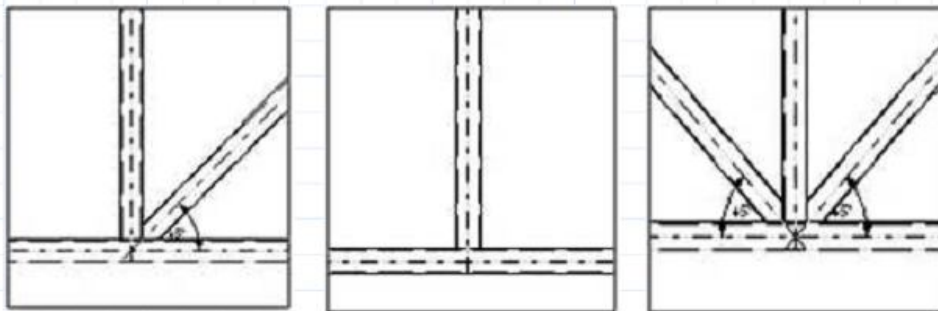


Figura MC2. Conexiones entre elementos (geometría)

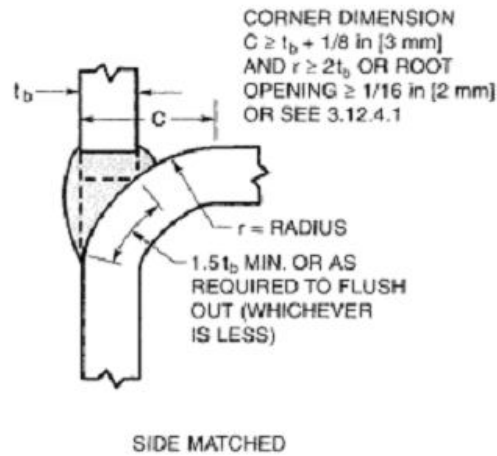


Figura MC3. Tipo de soldadura típica en las conexiones

Fuente: AWS D1.1.

A partir de la figura MC3 se tiene que la garganta efectiva de soldadura es igual al menos al espesor de la sección de tubo estructural:

$$t_w := t = 3.17 \text{ mm}$$

Los elementos verticales tienen una longitud de soldadura de : $L_{wv} := 100 \text{ mm}$

Los elementos diagonales tienen una longitud de soldadura de:

$$L_{wd} := 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot (50 \text{ mm})}{\sqrt{2}} \right) = 141 \text{ mm}$$

La resistencia de la soldadura es:

$$F_{EXX} := 60 \text{ ksi}$$

$$F_{EXX} = 414 \text{ MPa}$$

Según AISI S-100-2007 en la sección E2.1 se tiene:

Cuando los elementos verticales están en compresión o tensión, normales al eje de la soldadura:

$$R_{nv} := L_{wv} \cdot t_w \cdot F_y = 122 \text{ kN}$$

$$R_{nv} = 12.4 \text{ tonnef}$$

$$\phi_{wv} := 0.9$$

$$\phi_{wv} \cdot R_{nv} = 110 \text{ kN}$$

$$\phi_{wv} \cdot R_{nv} = 11.2 \text{ tonnef}$$

Cuando los elementos diagonales estan en compresión o tensión, normales al eje de la soldadura:

$$R_{nd} := L_{wd} \cdot t_w \cdot F_y = 173 \text{ kN}$$

$$R_{nd} = 17.6 \text{ tonnef}$$

$$\phi_{wd} := 0.9$$

$$\phi_{wd} \cdot R_{nd} = 155 \text{ kN}$$

$$\phi_{wd} \cdot R_{nd} = 15.8 \text{ tonnef}$$

Para la resistencia de la soldadura en tensión ó compresión se tiene:

$$Q_w := F_{EXX} \cdot t_w = 1.31 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

$$Q_w = 1.34 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}}$$

$$\phi_w := 0.80$$

Verticales: $R_{nwv} := Q_w \cdot L_{wv} = 131 \text{ kN}$

$$R_{nwv} = 13.4 \text{ tonnef}$$

$$\phi_w \cdot R_{nwv} = 105 \text{ kN}$$

$$\phi_w \cdot R_{nwv} = 10.7 \text{ tonnef}$$

Diagonales: $R_{nwd} := Q_w \cdot L_{wd} = 185 \text{ kN}$

$$R_{nwd} = 18.9 \text{ tonnef}$$

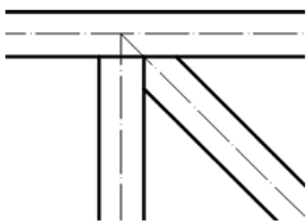
$$\phi_w \cdot R_{nwd} = 148 \text{ kN}$$

$$\phi_w \cdot R_{nwd} = 15.1 \text{ tonnef}$$

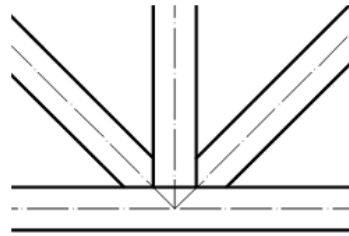
APÉNDICE C: MEMORIA DE CÁLCULO DE LA CAPACIDAD LOCAL DE LAS CONEXIONES

Capacidad Local en Conexiones con Tubos Estructurales

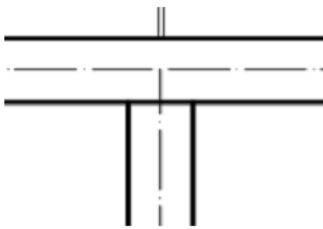
Tubos de 50 mm x 50 mm x 3,17 mm



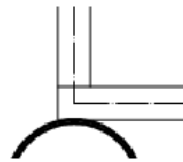
Conexión Tipo I
Conexión Tipo K - Traslapada



Conexión Tipo II
Conexión tipo X



Conexión Tipo III
Conexión Tipo T



Conexión Tipo IV
Conexión Tipo T

Figura C.1. Nomenclatura y tipos de conexiones

Limites de aplicación

Ángulo $\theta_d := \frac{\pi}{4}$ $\theta_d = 45^\circ$

$$\text{Angulo} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \theta_d \geq \frac{\pi}{6} \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \theta_d \geq 30^\circ$$

Angulo = "OK"

Donde:

θ_d . = ángulo entre elementos diagonales y la cuerda (radianes)

Excentricidad $e_x := 0\text{mm}$ $H_c := 50\text{mm}$

$$\frac{e_x}{H_c} = 0$$

$$\text{Excentricidad} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } -0.55 \leq \frac{e_x}{H_c} \leq 0.25 \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Excentricidad = "OK"

Donde:

e_x = Excentricidad de la conexión

H_c = Peralte de la sección de la cuerda

Esbeltz de la pared de la cuerda

$t_c := 3.17\text{mm}$ $B_c := 50\text{mm}$

$$\frac{B_c}{t_c} = 15.773$$

$$\text{Esb}_{\text{cuerda}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{B_c}{t_c} \leq 35 \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Esb_{cuerda} = "OK"

Dónde:

t_c = espesor de la cuerda

B_c = Ancho de la sección de la cuerda

Esbeltz elementos verticales y diagonales

$B_b := B_c$ $H_b := H_c$ $t_b := t_c$ $E_1 := 200000\text{MPa}$ $F_{yb} := 400\text{MPa}$

$$\frac{B_c}{t_c} = 15.773$$

$$\frac{H_c}{t_c} = 15.773$$

$$\frac{B_b}{t_b} = 15.773$$

$$\frac{H_b}{t_b} = 15.773$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } \frac{B_c}{t_c} \leq 30 \\ \text{"NO CUMPLE"} \text{ otherwise} \end{array} \right. = \text{"OK"} \quad \text{Para conexiones K-Traslapadas}$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } \frac{H_c}{t_c} \leq 35 \\ \text{"NO CUMPLE"} \text{ otherwise} \end{array} \right. = \text{"OK"} \quad \text{Para conexiones K-Traslapadas}$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } \frac{B_b}{t_b} \leq 35 \wedge \frac{B_b}{t_b} \leq 1.25 \sqrt{\frac{E_i}{F_{yb}}} \wedge \frac{B_b}{t_b} \leq 1.1 \sqrt{\frac{E_i}{F_{yb}}} \\ \text{"NO CUMPLE"} \text{ otherwise} \end{array} \right. = \text{"OK"} \quad \begin{array}{l} \text{Para Cuerda en} \\ \text{tensión} \\ \\ \text{Para cuerda en} \\ \text{compresión en} \\ \text{conexiones K,T, Y y X} \\ \text{con espaciamiento} \\ \\ \text{Para compresión en la} \\ \text{cuerda en conexiones} \\ \text{K traslapadas} \end{array}$$

$$1.25 \sqrt{\frac{E_i}{F_{yb}}} = 27.951 \qquad 1.1 \sqrt{\frac{E_i}{F_{yb}}} = 24.597$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } \frac{H_b}{t_b} \leq 35 \wedge \frac{H_b}{t_b} \leq 1.25 \sqrt{\frac{E_i}{F_{yb}}} \wedge \frac{H_b}{t_b} \leq 1.1 \sqrt{\frac{E_i}{F_{yb}}} \\ \text{"NO CUMPLE"} \text{ otherwise} \end{array} \right. = \text{"OK"}$$

Dónde:

B_b, H_b, t_b = ancho, peralte y espesor de la sección de los elementos diagonales y/o verticales

E_i = módulo de Elasticidad del acero

F_{yb} = Esfuerzo de cedencia del acero de los elementos verticales y diagonales
= Esfuerzo de cedencia del acero de las cuerdas

Razón de ancho

$$\frac{B_b}{B_c} = 1 \quad \frac{H_b}{B_c} = 1$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } \frac{B_b}{B_c} \geq 0.25 \wedge \frac{H_b}{B_c} \geq 0.25 \\ \text{"NO CUMPLE"} \text{ otherwise} \end{array} \right. = \text{"OK"} \quad \text{Para conexiones T, Y y K-traslapadas}$$

Razón de aspecto

$$\frac{H_b}{B_b} = 1 \quad \frac{H_c}{B_c} = 1$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } 0.5 \leq \frac{H_b}{B_b} \leq 2 \wedge 0.5 \leq \frac{H_c}{B_c} \leq 2 = \text{"OK"} \\ \text{"NO CUMPLE"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Traslape en conexiones K - traslapadas

$$l_{ov} := 3.54 \text{ cm} \quad l_p := 7.07 \text{ cm}$$

$$O_v := \frac{l_{ov}}{l_p} = 0.501$$

Para conexiones K-traslapadas

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } 0.25 \leq O_v \leq 1 = \text{"OK"} \\ \text{"NO CUMPLE"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Donde:

l_{ov} = Longitud de traslape medida de la cara de la conexión en la cuerda y debajo de los dos diagonales y/o verticales

l_p = longitud proyectada de traslape del elemento traslapado medido en la cuerda

O_v = Razón de traslape

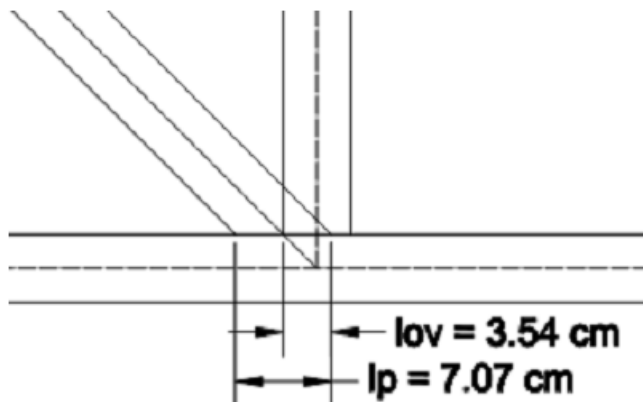


Figura C.2. Longitudes de traslape

Relación de ancho entre elementos diagonales y verticales

$$REL_{\text{anchos}} := 1$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } REL_{\text{anchos}} \geq 0.75 \\ \text{"NO CUMPLE"} \text{ otherwise} \end{array} \right. = \blacksquare \quad \text{Para conexiones K-traslapadas}$$

Donde:

$$REL_{\text{anchos}} = \text{Relación entre el ancho de cada uno de los dos elementos (verticales y/o diagonales) de la conexión} = B_{bi} / B_{bj}$$

Relación de espesores

$$REL_{\text{espesores}} := 1$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } REL_{\text{espesores}} \leq 1 \\ \text{"NO CUMPLE"} \text{ otherwise} \end{array} \right. = \text{"OK"} \quad \text{Para conexiones K-traslapadas}$$

Donde:

$$REL_{\text{espesores}} = \text{Relación entre el espesor de cada uno de los dos elementos (verticales y/o diagonales) de la conexión} = t_{bi} / t_{bj}$$

Resistencia del material

$$F_{y,m} := F_{yb} = 58.015 \text{ ksi}$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } F_{y,m} \leq 52 \text{ ksi} \\ \text{"NO CUMPLE"} \text{ otherwise} \end{array} \right. = \text{"NO CUMPLE"}$$

Donde

$$F_{y,m} = \text{esfuerzo de cedencia del acero de los elementos}$$

Ductilidad

$$F_{u.m} := 410\text{MPa}$$

$$\frac{F_{y.m}}{F_{u.m}} = 0.976$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \quad \text{if } \frac{F_{y.m}}{F_{u.m}} \leq 0.8 \\ \text{"NO CUMPLE"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right. = \text{"NO CUMPLE"}$$

Donde

$F_{u.m}$ = esfuerzo de ruptura del material

Conexión Tipo I: Conexión Tipo K - Traslapada

$$O_v = 0.501$$

Tabla K2.2

$$F_{ybi} := 400\text{MPa}$$

$$F_{ybj} := F_{ybi}$$

$$t_{bi} := t_b = 3.17\text{-mm}$$

$$t_{bj} := t_b = 3.17\text{-mm}$$

$$A_{bi} := 5.506\text{cm}^2$$

$$H_{bi} := H_b = 5\text{-cm}$$

$$A_{bj} := A_{bi} = 5.506\text{-cm}^2$$

$$H_{bj} := H_b = 5\text{-cm}$$

$$B_{bi} := B_b = 5\text{-cm}$$

$$F_y := 400\text{MPa}$$

Donde

A_{bi}, A_{bj} = Área de la sección transversal de los elementos diagonales y/o verticales

F_{ybi}, F_{ybj} = Esfuerzos de cedencia de los elementos diagonales y/o verticales

F_y = Esfuerzo de cedencia del material en general, de la cuerda

$$b_{eoi} := \min \left[\left[\frac{10}{\left(\frac{B_c}{t_c} \right)} \right], \left[\frac{F_y \cdot (t_c)}{F_{ybi} \cdot t_{bi}} \right] \cdot B_{bi}, B_{bi} \right] = 3.17 \cdot \text{cm} \quad \text{Eq. K2 - 20}$$

$$b_{eov} := \min \left[\left[\frac{10}{\left(\frac{B_c}{t_c} \right)} \right], \left[\frac{F_y \cdot (t_c)}{F_{ybi} \cdot t_{bi}} \right] \cdot B_{bi}, B_{bi} \right] = 3.17 \cdot \text{cm} \quad \text{Eq. K2 - 21}$$

$$P_{ni} := F_{ybi} \cdot t_{bi} \cdot (2H_{bi} - 4 \cdot t_{bi} + b_{eoi} + b_{eov}) = 191.113 \cdot \text{kN} \quad \text{Eq. K2 - 18}$$

$$P_{nj} := P_{ni} \cdot \left(\frac{F_{ybj} \cdot A_{bj}}{F_{ybi} \cdot A_{bi}} \right) = 191.113 \cdot \text{kN}$$

$$P_{nI} := P_{ni} = 191.113 \cdot \text{kN} \quad \phi_I := 0.95$$

$$\phi_I \cdot P_{nI} = 181.557 \cdot \text{kN}$$

Donde

ϕ_I = factor de resistencia para las conexiones K-traslapadas

b_{eoi}, b_{eov} = anchos efectivos de traslape de las paredes de los miembros diagonales y/o verticales a través de la cuerda

P_{ni}, P_{nj} = Resistencia nominal de los elementos diagonales y/o verticales de la conexión K - traslapada

P_{nI} = Resistencia nominal de la conexión

Resistencia de la Conexión Tipo I

$$\phi_I \cdot P_{nI} = 181.557 \cdot \text{kN}$$

Conexión Tipo II: Conexión Tipo X

$$\beta := \frac{B_b}{B_c} = 1 = \text{razón de ancho entre las diagonales y/o verticales y la cuerda}$$

Estados límite

1. Estado límite de plastificación de las paredes de la cuerda cuando $\beta \leq 0.85$

→ No aplica

2. Estado límite de punzonamiento

$$\gamma := \frac{B_c}{2 \cdot t_c} = 7.886 = \text{Razón de esbeltez de la cuerda}$$

$$\frac{B_c}{t_c} = 15.773$$

$$1 - \frac{1}{\gamma} = 0.873$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"Aplica"} \quad \text{if } 0.85 < \beta \leq 1 - \frac{1}{\gamma} \wedge \frac{B_c}{t_c} < 10 = \text{"No Aplica"} \\ \text{"No Aplica"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$$

3. Estado Límite de cedencia local en las paredes laterales de la cuerda para $\beta = 1.0$

$$k := 3 \cdot (t_c) = 9.51 \cdot \text{mm} = \text{radio externo de la esquina de la sección } \geq 1.5 \text{ t}$$

$$\theta_d = 0.785 = \text{ángulo entre la cuerda y las diagonales definido anteriormente, } 45^\circ$$

$$l_b := \frac{(H_b)}{\sin(\theta_d)} = 70.711 \cdot \text{mm}$$

$$P_{n.3.II} := \left(\frac{1}{\sin(\theta_d)} \right) \cdot 2 \cdot F_y \cdot (t_c) \cdot (5 \cdot k + l_b) = 424.135 \cdot \text{kN} \quad \text{Eq K2-9}$$

P_{n3II} = Resistencia nominal de los elementos de la conexión para el estado límite 3 de la conexión tipo II

$\phi_{3,II} := 1.0$ = factor de resistencia para el estado límite 3.

$$\phi_{3,II} \cdot P_{n,3,II} = 424.135 \cdot \text{kN}$$

4. Estado límite: Falla en las paredes de la cuerda

$Q_f := 1.0$ = Factor para el estado de falla en las paredes de la cuerda (ver tabla k2.2 AISC 360-10)

$E := 200000 \text{MPa}$ = módulo de elasticidad del acero en unidades mostradas

$$P_{n,4,II} := \left(\frac{1}{\sin(\theta_d)} \right) \cdot \left[\frac{48 \cdot (t_c)^3}{(H_c) - 3 \cdot (t_c)} \right] \cdot \sqrt{E \cdot F_y} \cdot Q_f = 477.674 \cdot \text{kN} \quad \text{Eq K2-10}$$

P_{n4II} = Resistencia nominal de los elementos de la conexión para el estado límite 4 de la conexión tipo II

$\phi_{4,II} := 0.9$ = factor de resistencia para el estado límite 4.

$$\phi_{4,II} \cdot P_{n,4,II} = 429.906 \cdot \text{kN}$$

5. Estado límite: Cedencia Local de los elementos diagonales y verticales para $\beta > 0.85$

$$b_{eoi5II} := \min \left[\left[\frac{10}{\left(\frac{B_c}{t_c} \right)} \right], \left[\frac{F_y \cdot (t_c)}{F_{ybi} \cdot (t_b)} \right] \cdot (B_b), (B_b) \right] = 3.17 \cdot \text{cm}$$

b_{eoi5II} = Ancho efectivo para el estado límite 5 y la conexión tipo II

$$P_{n,5,II} := F_{ybi} \cdot (t_b) [2 \cdot (H_b) + 2 \cdot b_{eoi} - 4 \cdot (t_b)] = 191.113 \cdot \text{kN}$$

P_{n5II} = Resistencia nominal de los elementos de la conexión para el estado límite 5 de la conexión tipo II

$\phi_{5,II} := 0.95$ = factor de resistencia para el estado límite 5.

$$\phi_{5,II} \cdot P_{n,5,II} = 181.557 \cdot \text{kN}$$

6. Estado límite: Cortante en las paredes de la cuerda. Para conexiones tipo X con $\theta < 90^\circ$ y en donde se ha creado un espaciamento proyectado.

No hay espaciamento proyectado \rightarrow No aplica

Resistencia de la Conexión Tipo II

$$\phi_{II} P_{nII} := \min(\phi_{3,II} \cdot P_{n,3,II}, \phi_{4,II} \cdot P_{n,4,II}, \phi_{5,II} \cdot P_{n,5,II}) = 181.557 \cdot \text{kN}$$

Conexión Tipo III y IV: Conexión Tipo T

Aplican los estados límite del 1 al 5 descritos anteriormente con $\theta = 90^\circ$

$$\beta := \frac{B_b}{B_c} = 1$$

1. Estado límite de plastificación de las paredes de la cuerda cuando $\beta \leq 0.85$

\rightarrow No aplica

2. Estado límite de punzonamiento

$$\gamma := \frac{B_c}{2 \cdot t_c} = 7.886 \qquad \frac{B_c}{t_c} = 15.773$$

$$1 - \frac{1}{\gamma} = 0.873$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"Aplica"} \text{ if } 0.85 < \beta \leq 1 - \frac{1}{\gamma} \wedge \frac{B_c}{t_c} < 10 = \text{"No Aplica"} \\ \text{"No Aplica"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

3. Estado Límite de cedencia local en las paredes laterales de la cuerda para $\beta = 1.0$

$$k := 3 \cdot (t_c) = 9.51 \cdot \text{mm}$$

$$\theta_v := \frac{\pi}{2} = \text{ángulo de los elementos verticales respecto a la cuerda}$$

$$l_b := \frac{(H_b)}{\sin(\theta_v)} = 50 \cdot \text{mm}$$

$$P_{n.3.III} := \left(\frac{1}{\sin(\theta_v)} \right) \cdot 2 \cdot F_y(t_c) \cdot (5 \cdot k + l_b) = 299.909 \cdot \text{kN}$$

$$\phi_{3.III} := 1.0$$

$$\phi_{3.III} \cdot P_{n.3.III} = 299.909 \cdot \text{kN}$$

4. Estado límite: Falla en las paredes de la cuerda

$$Q_f := 1.0 \quad E = 2 \times 10^5 \cdot \text{MPa}$$

$$P_{n.4.III} := \left(\frac{1}{\sin(\theta_v)} \right) \cdot \left[\frac{48 \cdot (t_c)^3}{(H_c) - 3 \cdot (t_c)} \right] \cdot \sqrt{E \cdot F_y} \cdot Q_f = 337.766 \cdot \text{kN}$$

$$\phi_{4.III} := 0.9$$

$$\phi_{4.III} \cdot P_{n.4.III} = 303.99 \cdot \text{kN}$$

5. Estado límite: Cedencia Local de los elementos diagonales y verticales para $\beta > 0.85$

$$b_{eoi} := \min \left[\left[\frac{10}{\left(\frac{B_c}{t_c} \right)} \right], \left[\frac{F_y(t_c)}{F_{yb}(t_b)} \right] \cdot (B_b), (B_b) \right] = 3.17 \cdot \text{cm}$$

$$P_{n.5.III} := F_{yb}(t_b) [2 \cdot (H_b) + 2 \cdot b_{eoi} - 4 \cdot (t_b)] = 191.113 \cdot \text{kN}$$

$$\phi_{5.III} := 0.95$$

$$\phi_{5.III} \cdot P_{n.5.III} = 181.557 \cdot \text{kN}$$

6. Estado límite: Cortante en las paredes de la cuerda. Para conexiones tipo X con $\theta < 90^\circ$ y en donde se ha creado un espaciamento proyectado.

No hay espaciamento proyectado \rightarrow No aplica

La conexión tipo IV es del mismo tipo que la III

Resistencia de la Conexión Tipo III y IV

$$\phi_{III} P_{nIII} := \min(\phi_{3.III} P_{n.3.III}, \phi_{4.II} P_{n.4.III}, \phi_{5.III} P_{n.5.III}) = 181.557 \cdot \text{kN}$$

APÉNDICE D: ESPECÍMENES DE ENSAYO TIPO ARMADURA

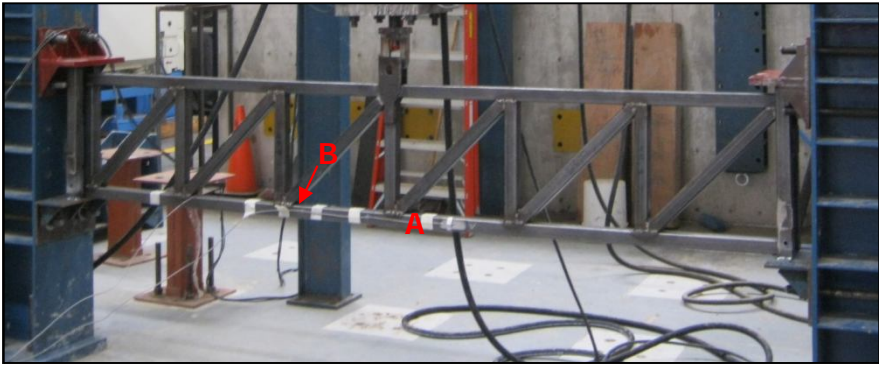


Figura D.1. Espécimen C1-1

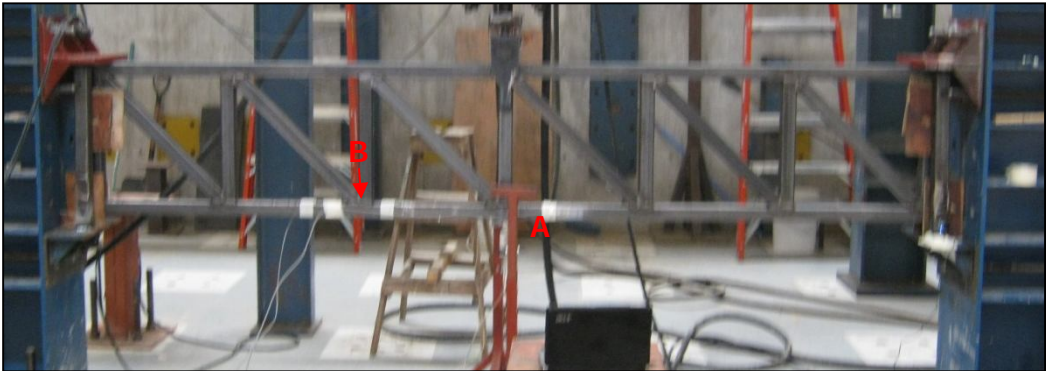


Figura D.2. Espécimen C1-2



Figura D.3. Espécimen C2-1

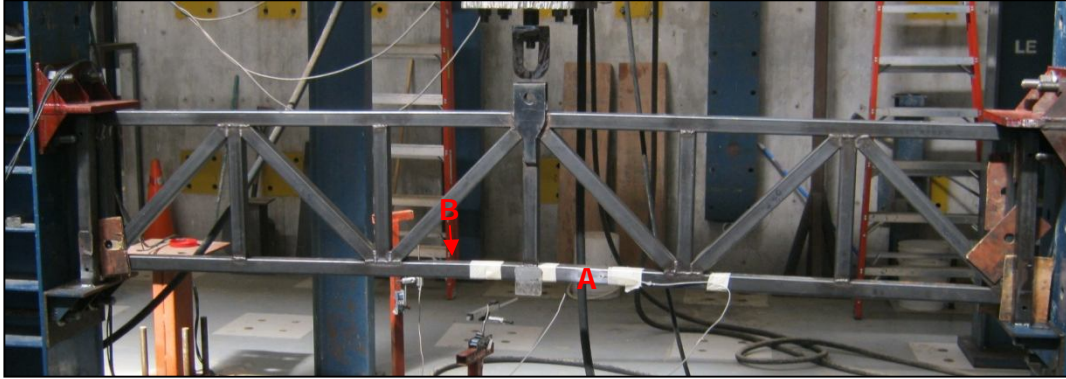


Figura D.4. Espécimen C2-2

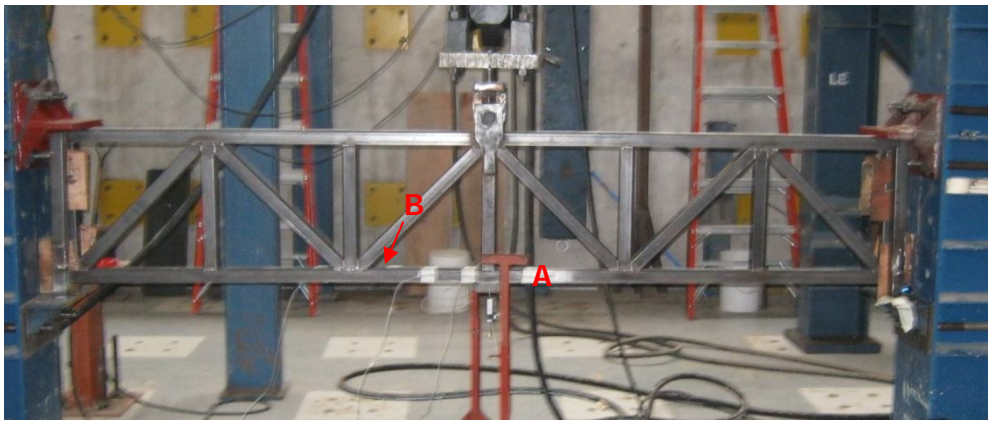


Figura D.5. Espécimen C3-1

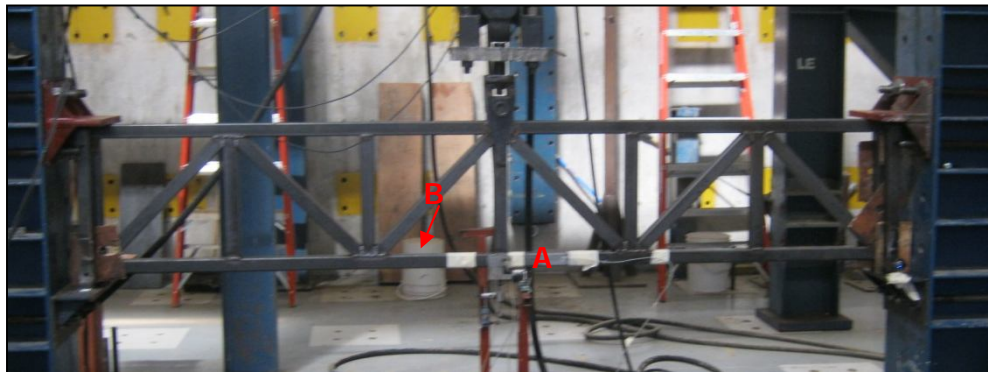


Figura D.6. Espécimen C3-2

APÉNDICE E: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PROBETAS DE ACERO EN TENSIÓN

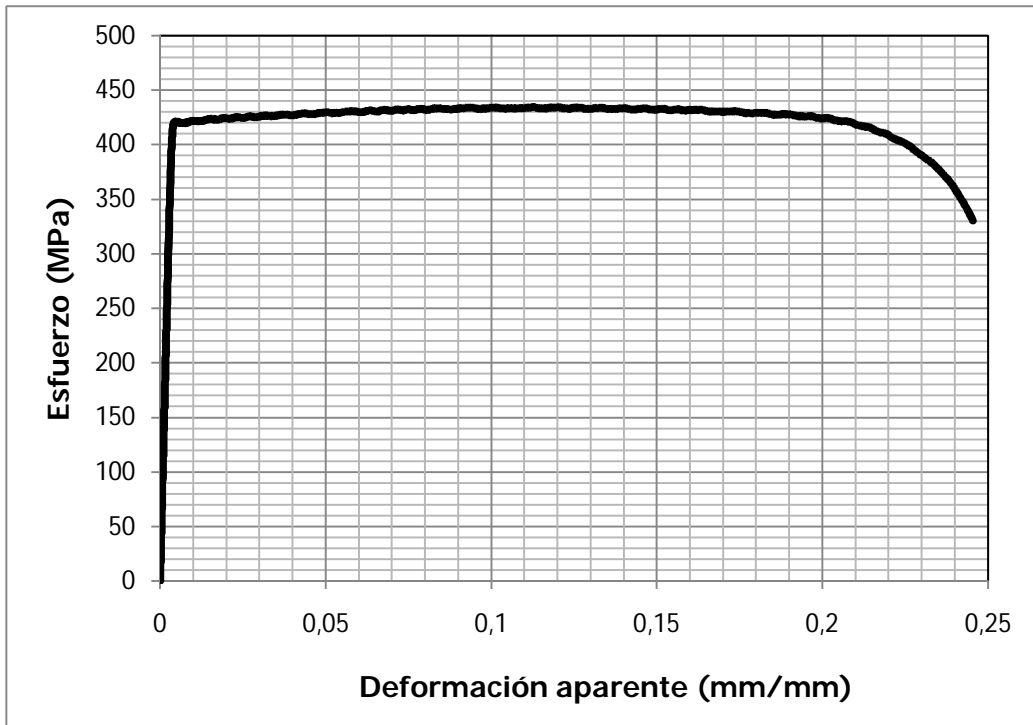


Figura E.1. Gráfico esfuerzo-deformación aparente para el espécimen 1.

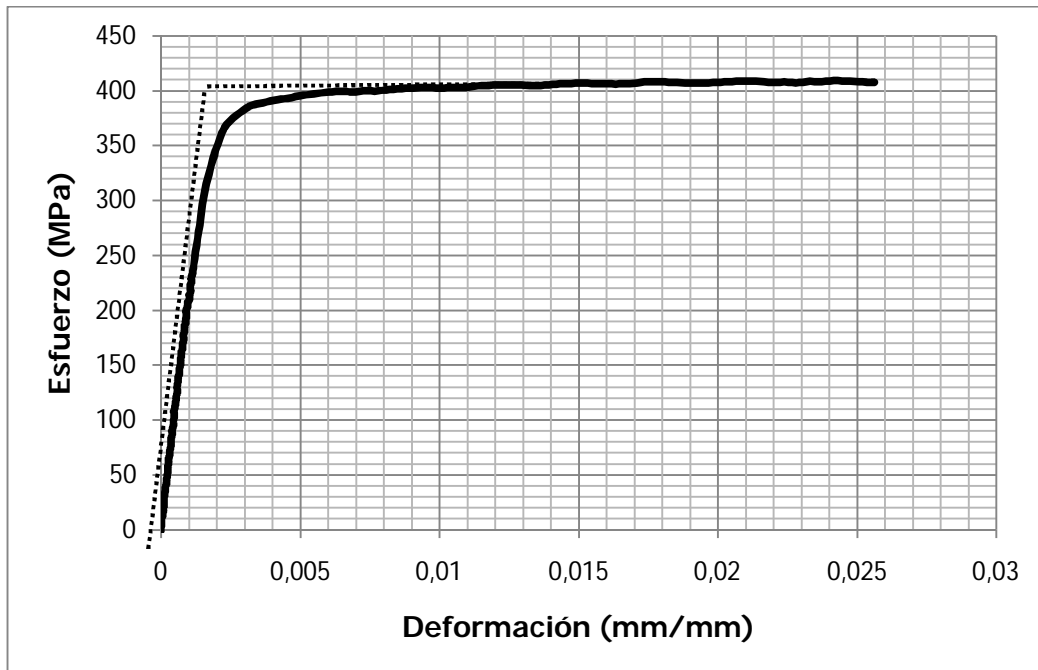


Figura E.2. Gráfico esfuerzo-deformación real para el espécimen 2.

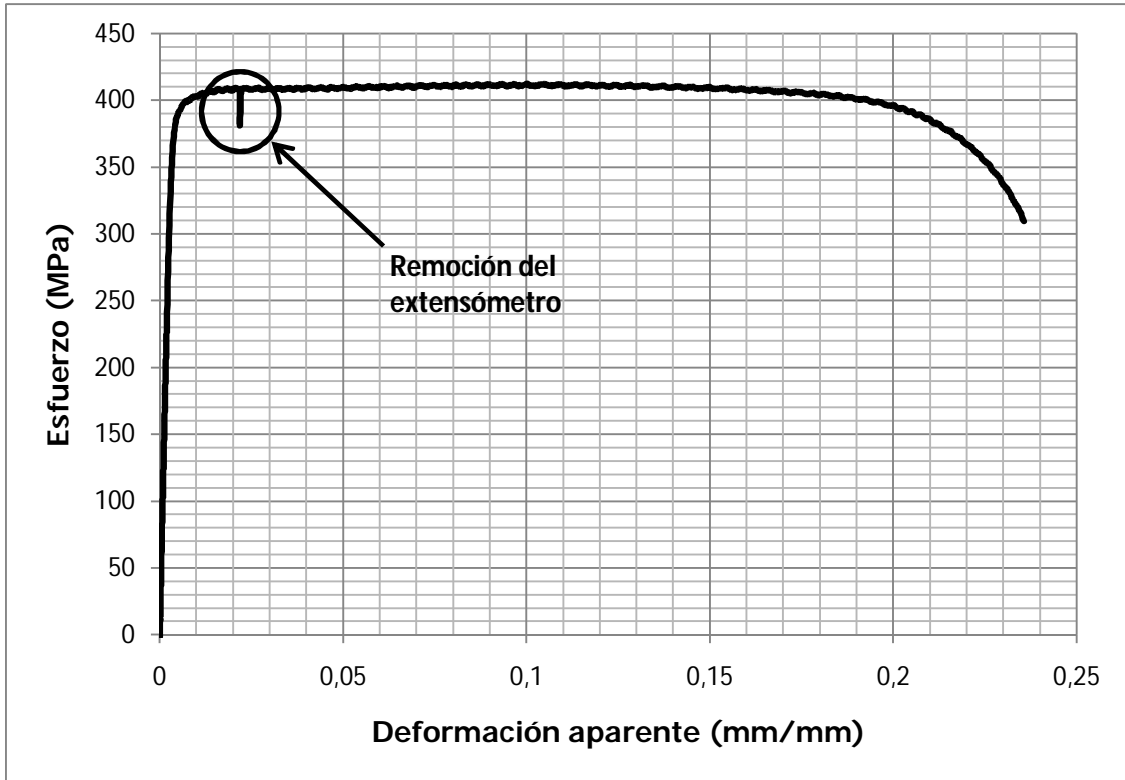


Figura E.3. Gráfico esfuerzo-deformación aparente para el espécimen 2.

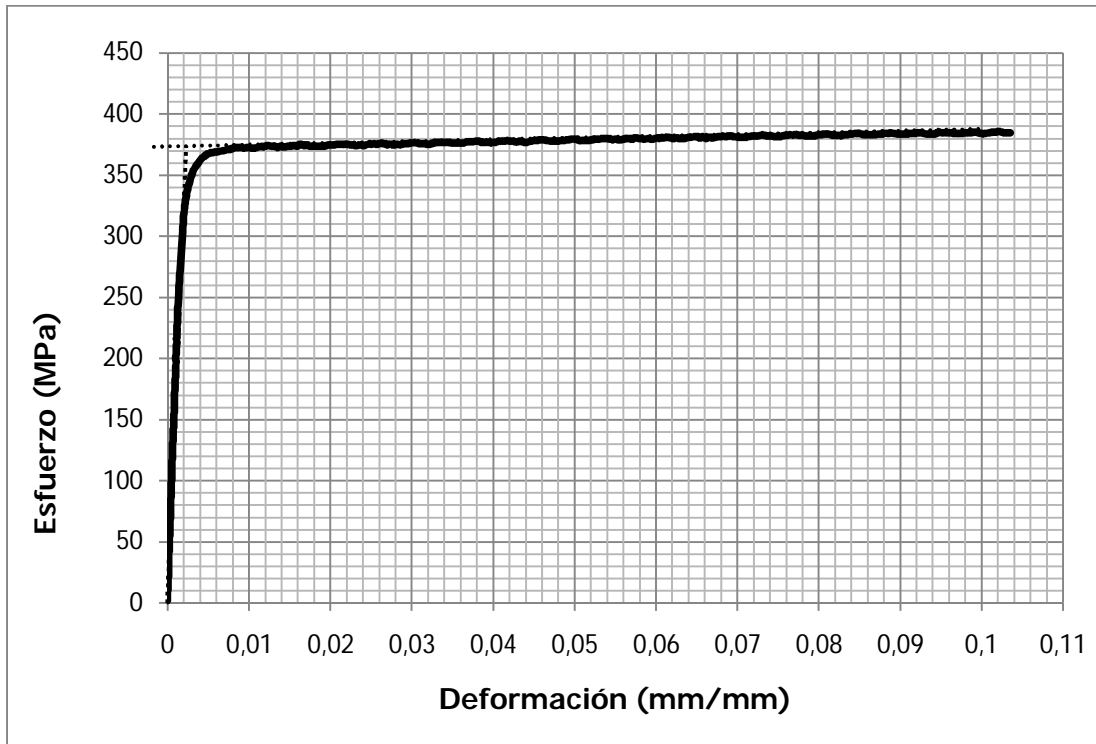


Figura E.4. Gráfico esfuerzo-deformación real para el espécimen 3.

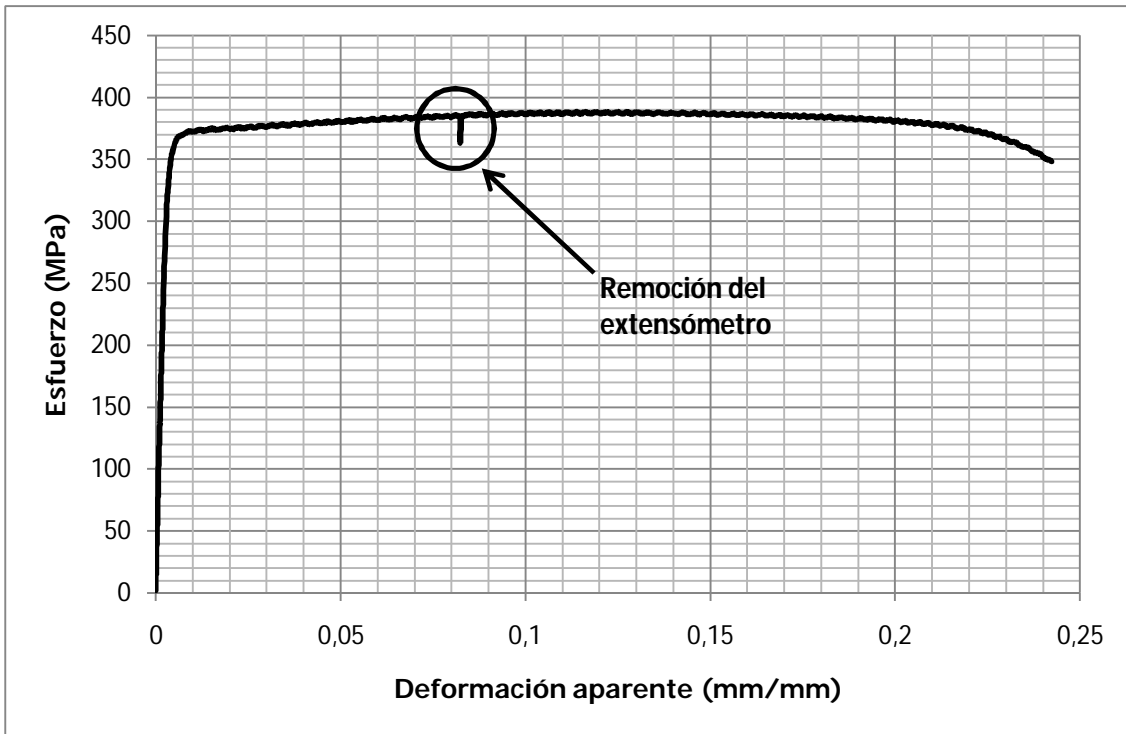


Figura E.5. Gráfico esfuerzo-deformación aparente para el espécimen 3.

Cuadro E.1. Elongación de los especímenes

ESPÉCIMEN N°	1	2	3	Unidades
$C_{INICIAL}$	50,00	49,99	50,00	mm
C_{FINAL}	68,72	67,78	69,01	mm
% Elongación	37,44%	35,58%	38,03%	%
Promedio	37,02%			%
Coefficiente de variación	3,46%			-

APÉNDICE F: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE COLUMNA CORTA

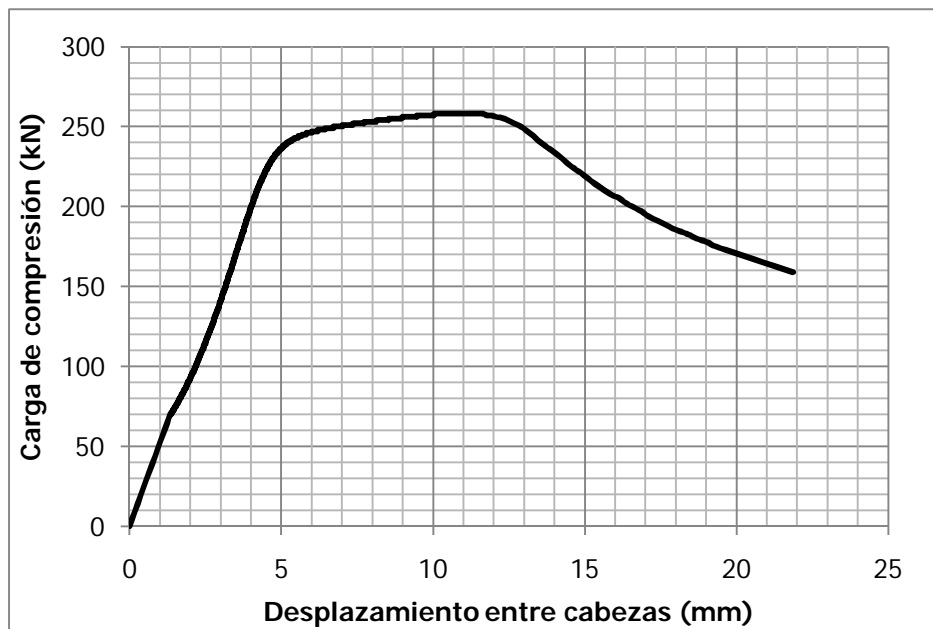


Figura F.1. Gráfico carga-desplazamiento entre cabezas de la máquina de ensayo, para el espécimen de columna corta 1.

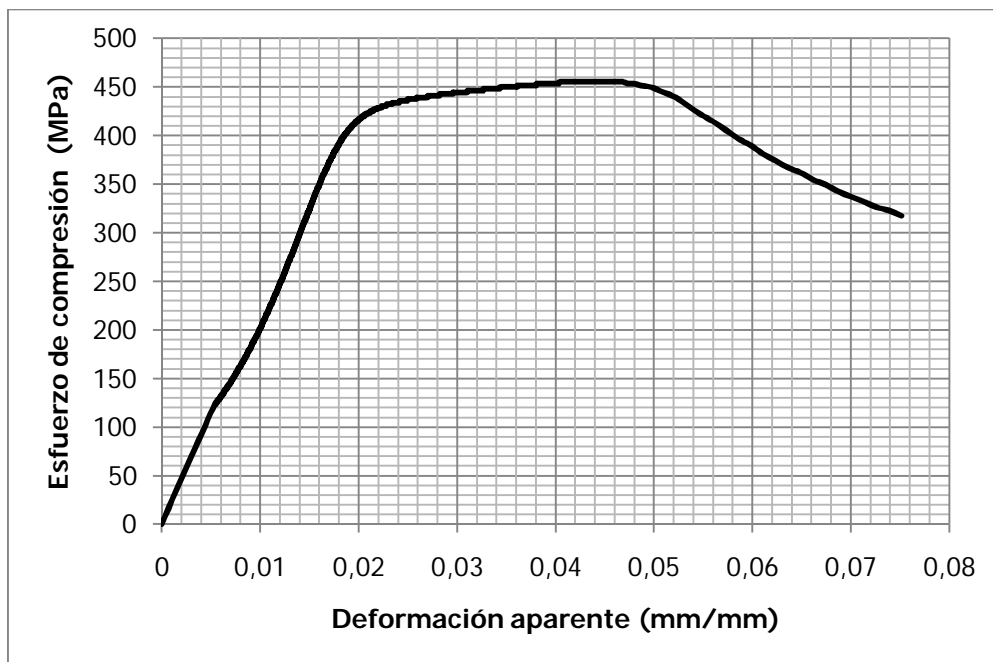


Figura F.2. Gráfico esfuerzo-deformación aparente, para el espécimen de columna corta 1.

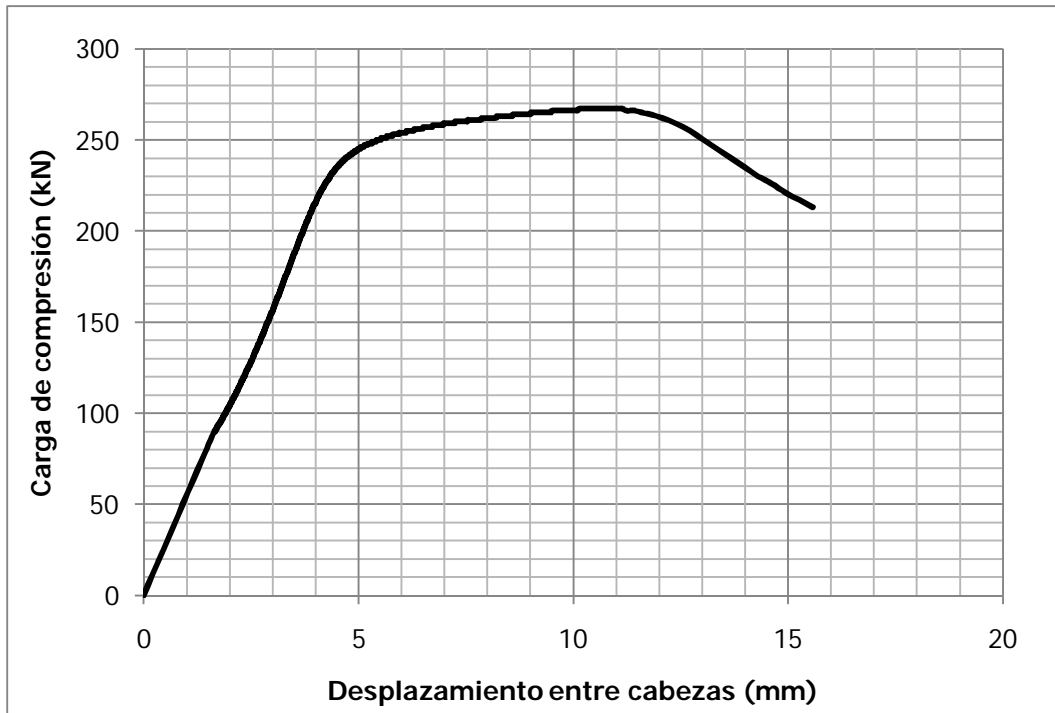


Figura F.3. Gráfico carga-desplazamiento entre cabezas de la máquina de ensayo, para el espécimen de columna corta 2.

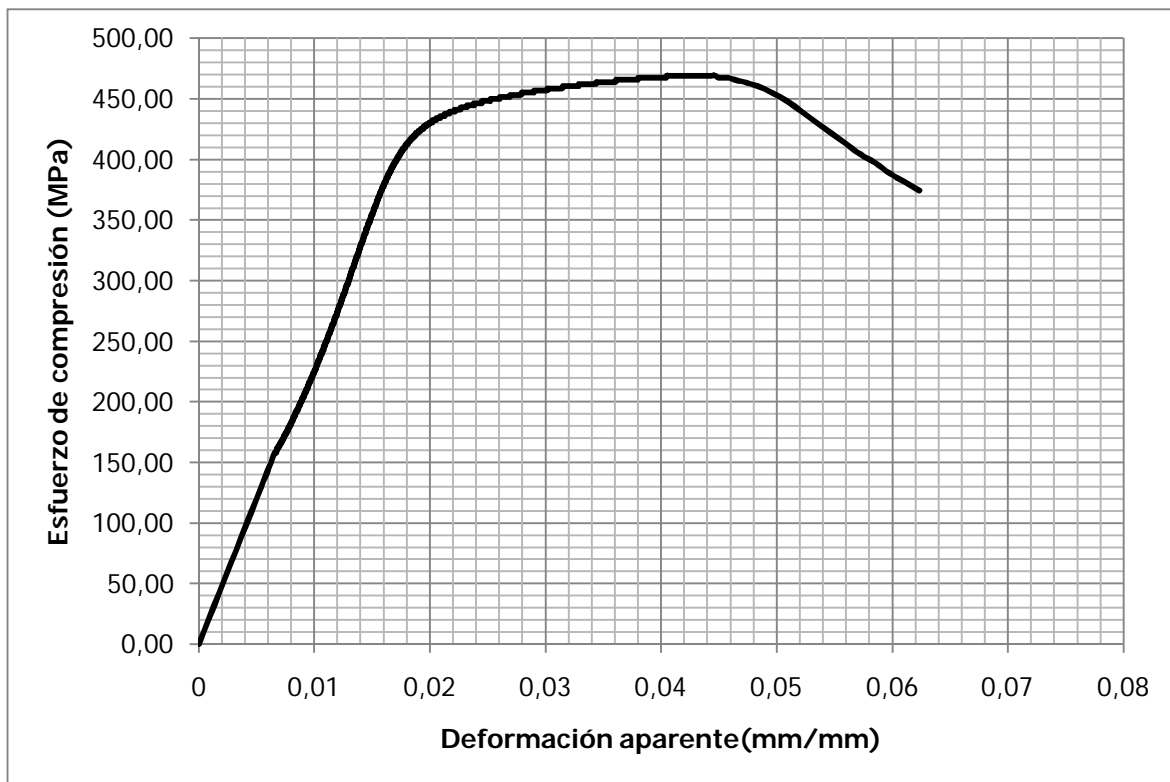


Figura F.4. Gráfico esfuerzo-deformación aparente, para el espécimen de columna corta 2.

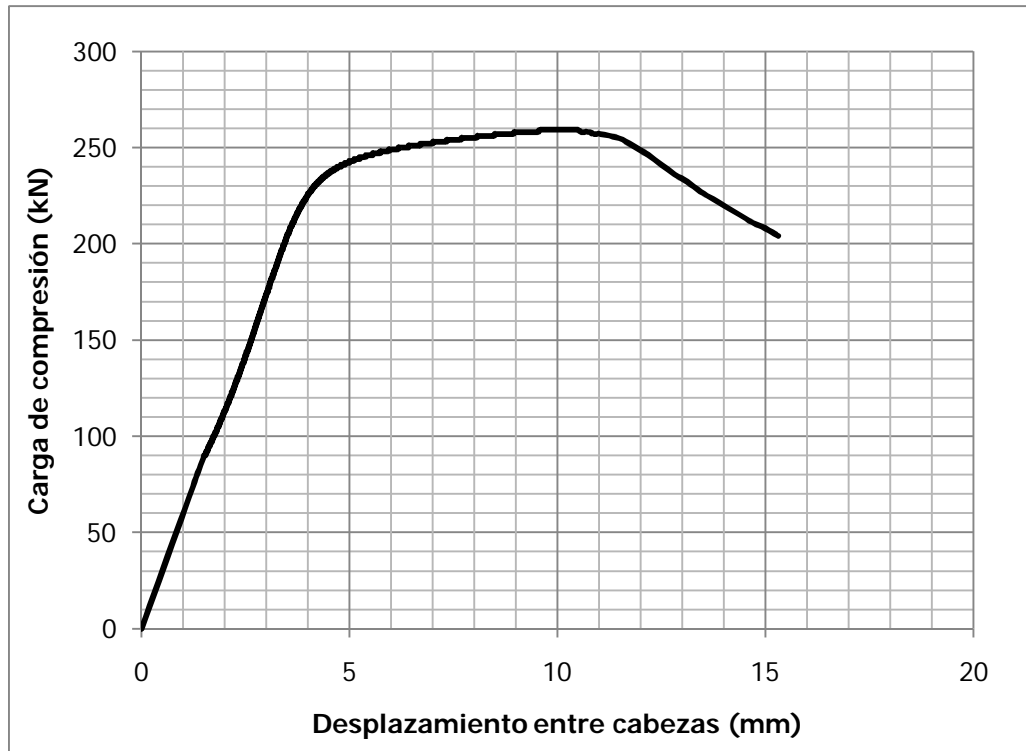


Figura F.5. Gráfico carga-desplazamiento entre cabezas de la máquina de ensayo, para el espécimen de columna corta 3.



Figura F.6. Gráfico esfuerzo-deformación aparente, para el espécimen de columna corta 3.



Figura F.7. Modo de falla del espécimen 1.



Figura F.8. Modo de falla del espécimen 2.



Figura F.9. Modo de falla del espécimen 3.

APÉNDICE G: RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN EN LOS ESPECÍMENES REPRESENTATIVOS DE LA LONGITUD ENTRE NUDOS

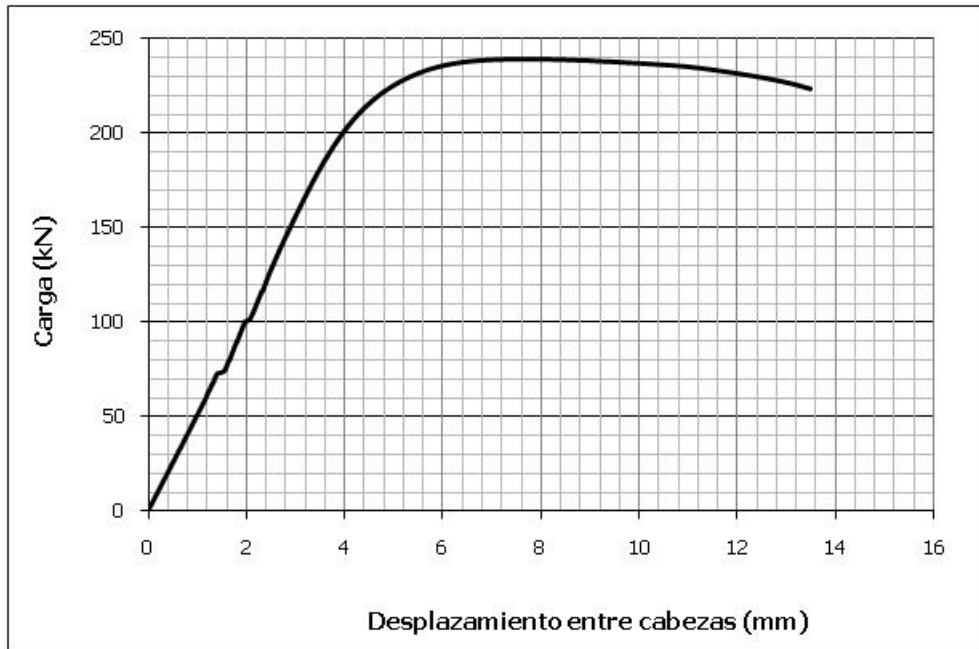


Figura G.1. Gráfico carga-desplazamiento entre cabezas de la máquina de ensayo, para el espécimen 1 de 500 mm.



Figura G.2. Especimen 1 después de la falla.

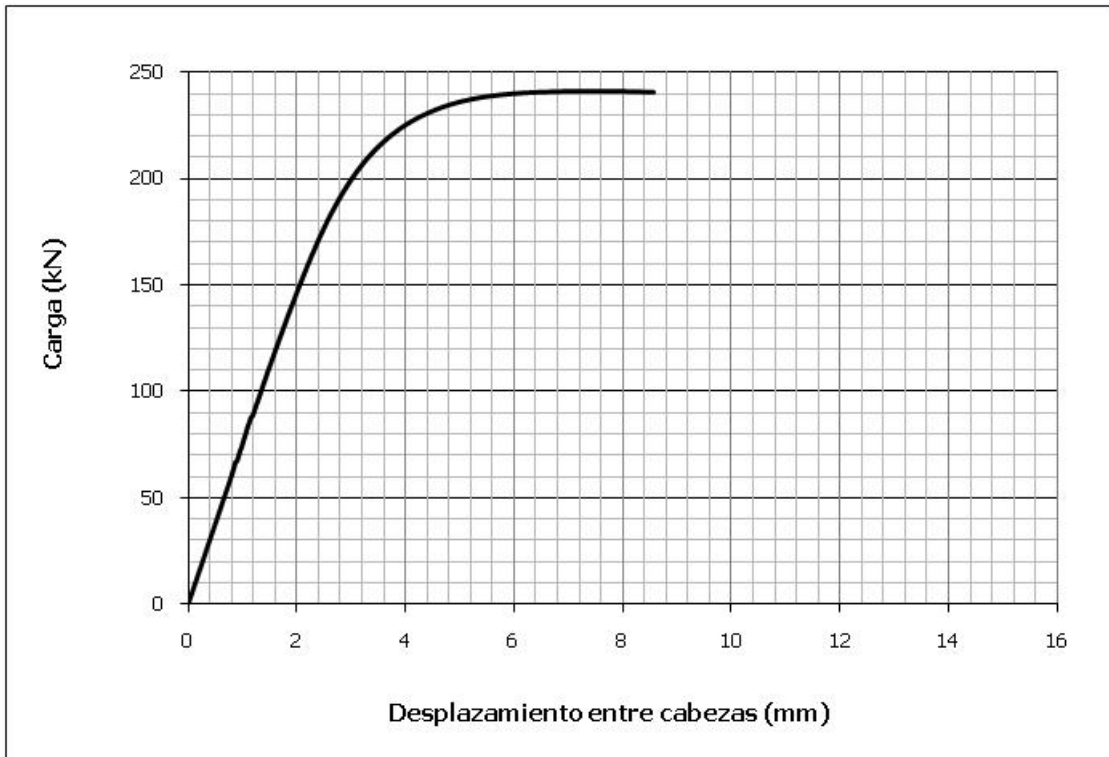


Figura G.3. Gráfico carga-desplazamiento entre cabezas de la máquina de ensayo, para el espécimen 2 de 500 mm.

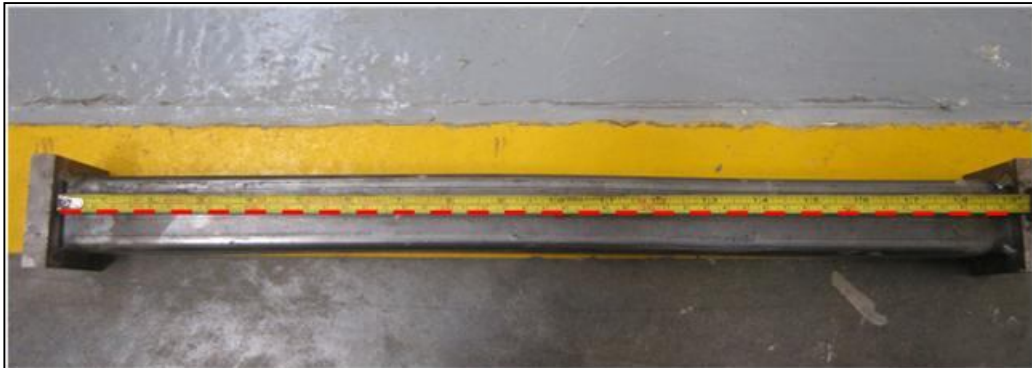


Figura G.4. Especimen 2 después de la falla.

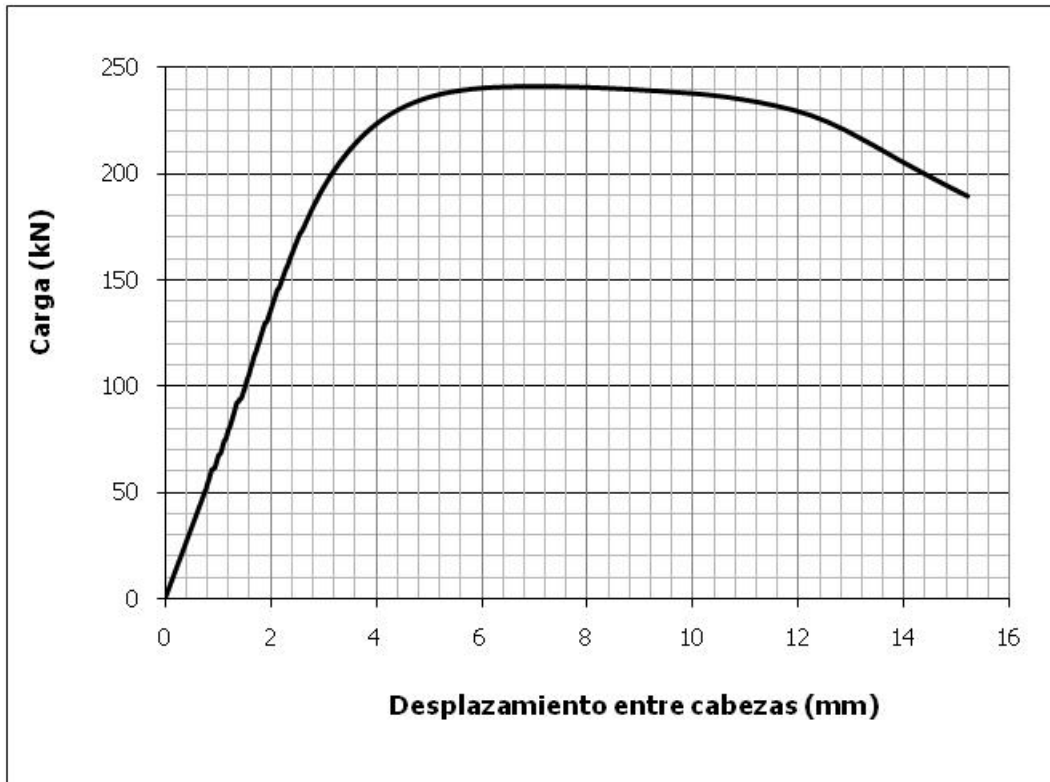


Figura G.5. Gráfico carga-desplazamiento entre cabezas de la máquina de ensayo, para el espécimen 3 de 500 mm.



Figura G.6. Especimen 3 después de la falla.

APÉNDICE H: RESULTADOS DE LAS PRUEBAS SOBRE EL ESPÉCIMEN C1-1

A continuación se presenta un resumen de los resultados de cada prueba realizada sobre el espécimen C1-1. No se muestran los resultados para la prueba 5 ya que estos están incluidos en el texto.

Prueba 1



Figura H.1 Gráfico carga-desplazamiento máximo en el plano. Prueba 1

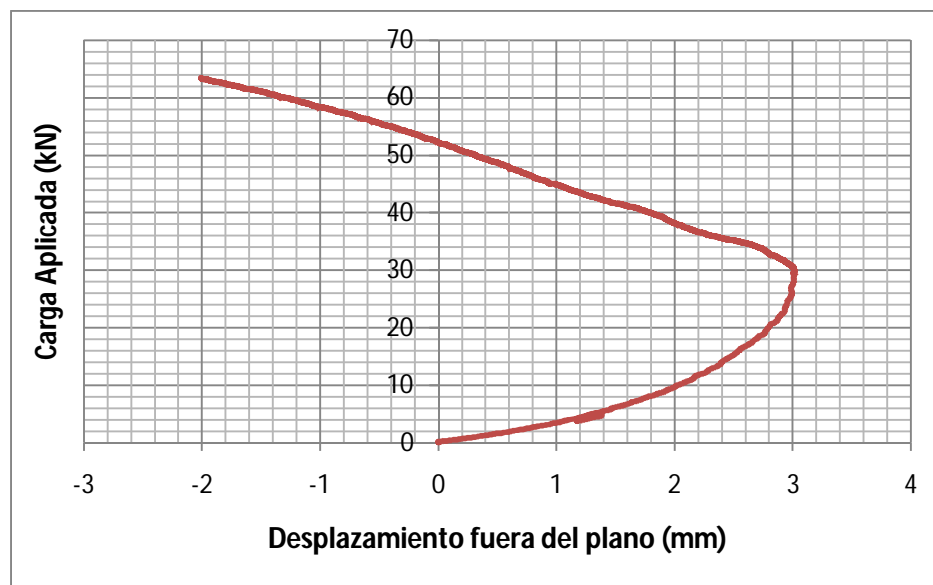


Figura H.2. Gráfico carga-desplazamiento fuera del plano. Prueba 1.

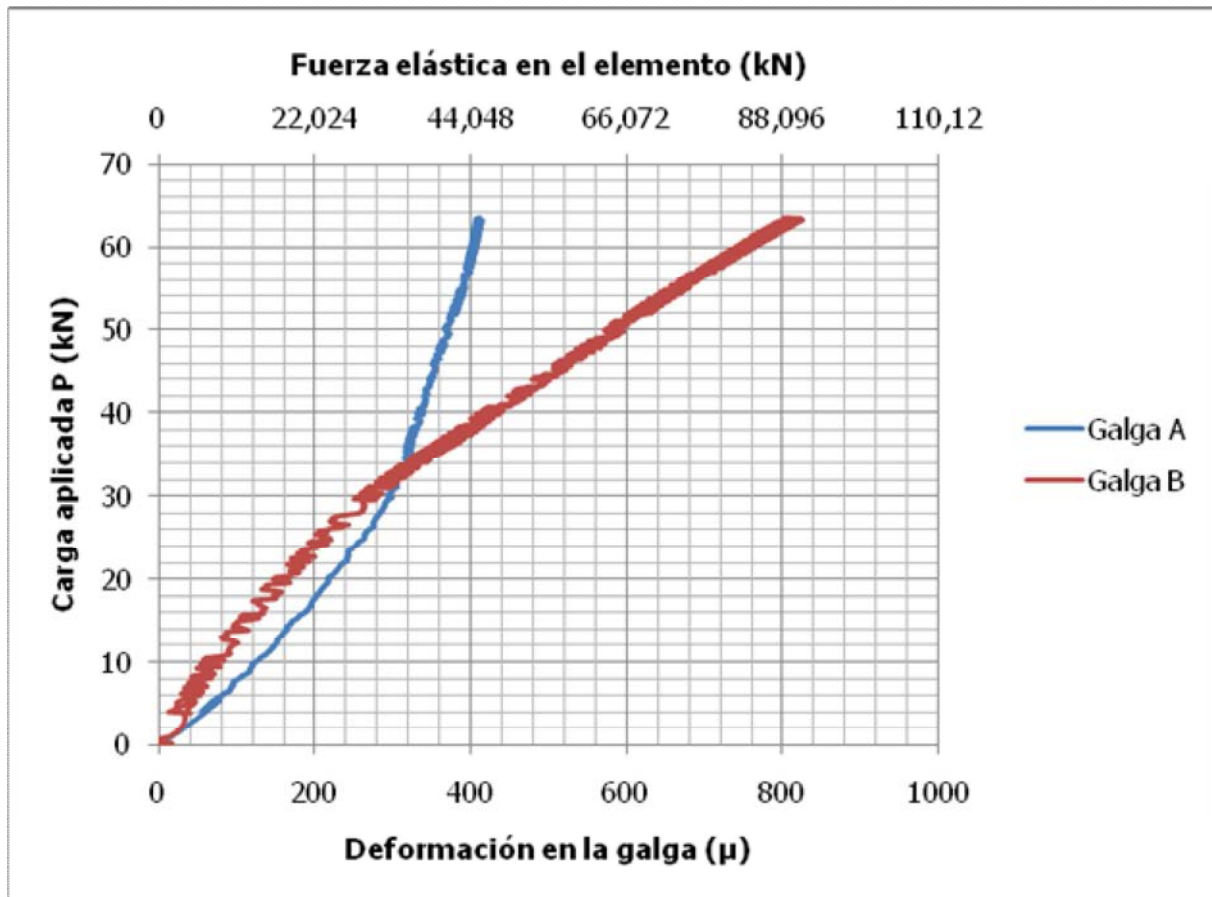


Figura H.3. Gráfico carga-deformación unitaria en las galgas (fuerza elástica en el elemento). Prueba 1

OBSERVACIONES:

Después de revisar el montaje se inician las pruebas con el protocolo de carga propuesto. El cable de carga que se utiliza no tiene suficiente longitud para anclarlo al gato hidráulico. La solución que se realiza es unirlos por medio de eslabones

Se establece que el protocolo de carga es muy lento, y debido a las disposiciones de seguridad que se establecieron en este protocolo la prueba se detuvo. El desplazamiento último del gato que se estableció para detener la prueba se alcanzó antes de la falla.

Se realizó una inspección al montaje. Se notó que el gancho de unión puede ser insuficiente para la carga. La placa que permite unir este gancho al gato está muy deformada. Se decide cambiar la placa por las que anteriormente se habían construido para el gato hidráulico. Además se decide construir un gancho nuevo.

Se posponen las pruebas hasta resolver este detalle.

No se muestra el gráfico de las relaciones entre las fuerzas elásticas en el elemento, y entre cada fuerza elástica y la carga aplicada, porque las fuerzas en las galgas no brindaron resultados válidos. Las galgas se acomodan a la deformación por la baja velocidad de carga.

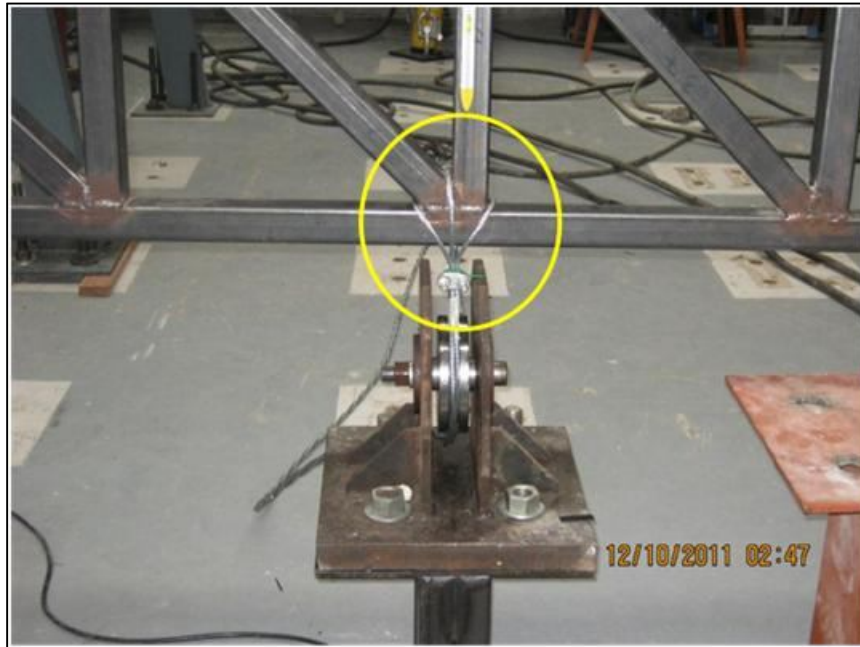


Figura H.4. Detalle de la unión cable-espécimen



Figura H.5. Detalle de la unión cable-gato. La placa mostrada falló.

Prueba 2

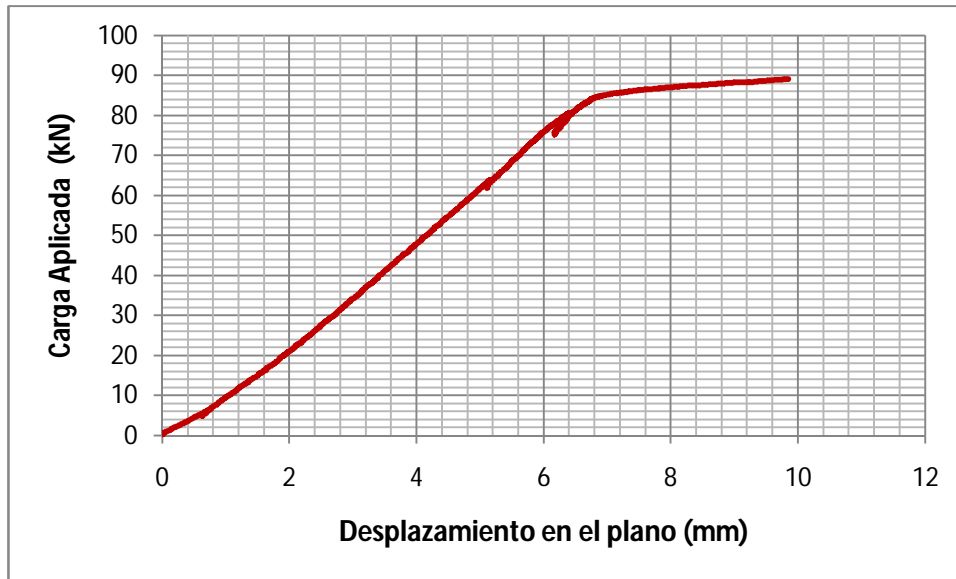


Figura H.6 Gráfico carga-desplazamiento máximo en el plano. Prueba 2

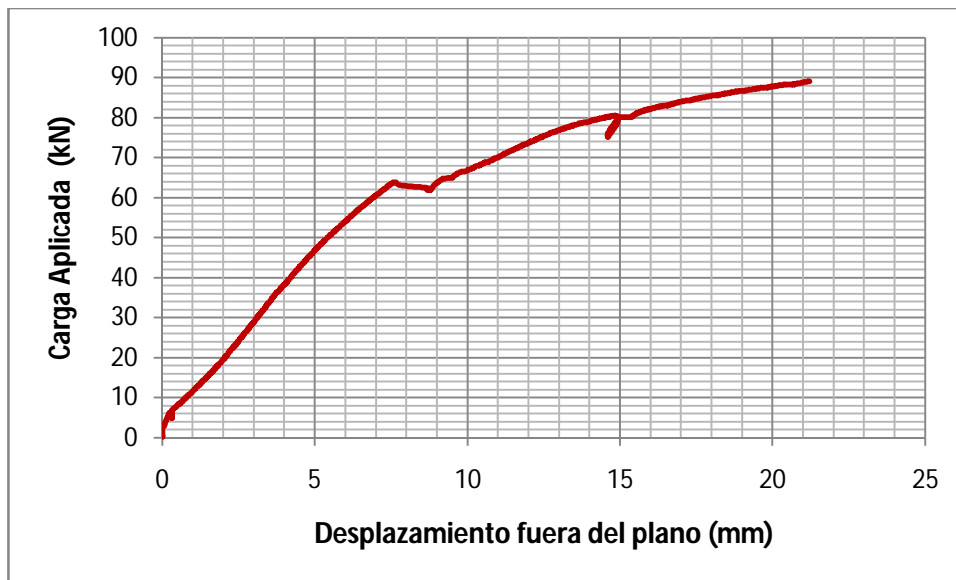


Figura H.7. Gráfico carga-desplazamiento fuera del plano. Prueba 2.

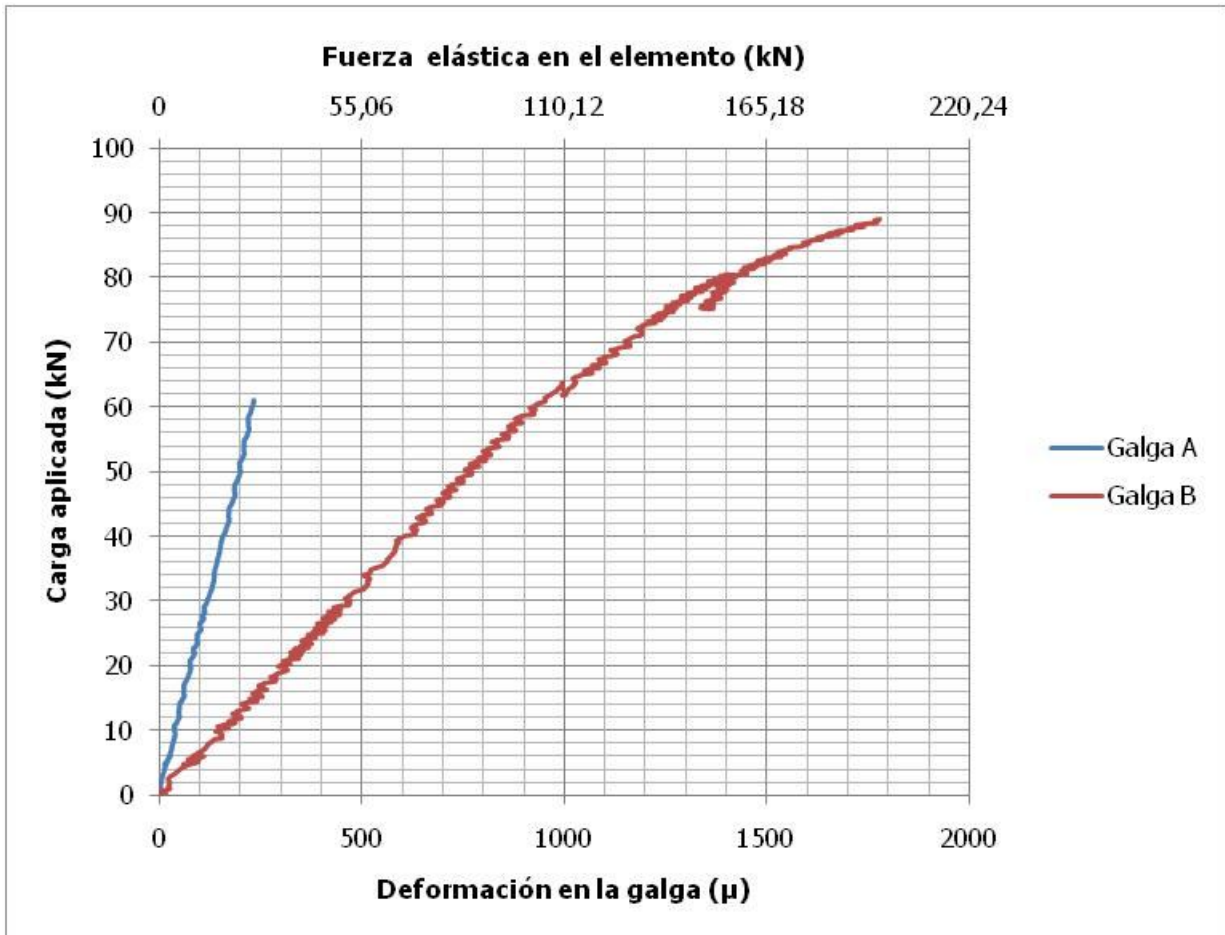


Figura H.8. Gráfico carga-deformación unitaria en las galgas (fuerza elástica en el elemento). Prueba 2

OBSERVACIONES:

La prueba se inició con presencia de público. Se ajustaron los detalles de la placa de carga del gato. Para ello se utilizaron las placas construidas para el gato, se utilizó un tornillo construido especialmente para el gancho de carga diseñado.

Fue necesario subir las burras para dar mayor espacio entre el espécimen y la polea. Esto se debe a que se aumentaron los cables de carga para soportar la carga en el elemento.

No se inspeccionó la gaza de unión del cable con los eslabones que lo unen al gato, y este falló.

Se resuelve este detalle en el momento.

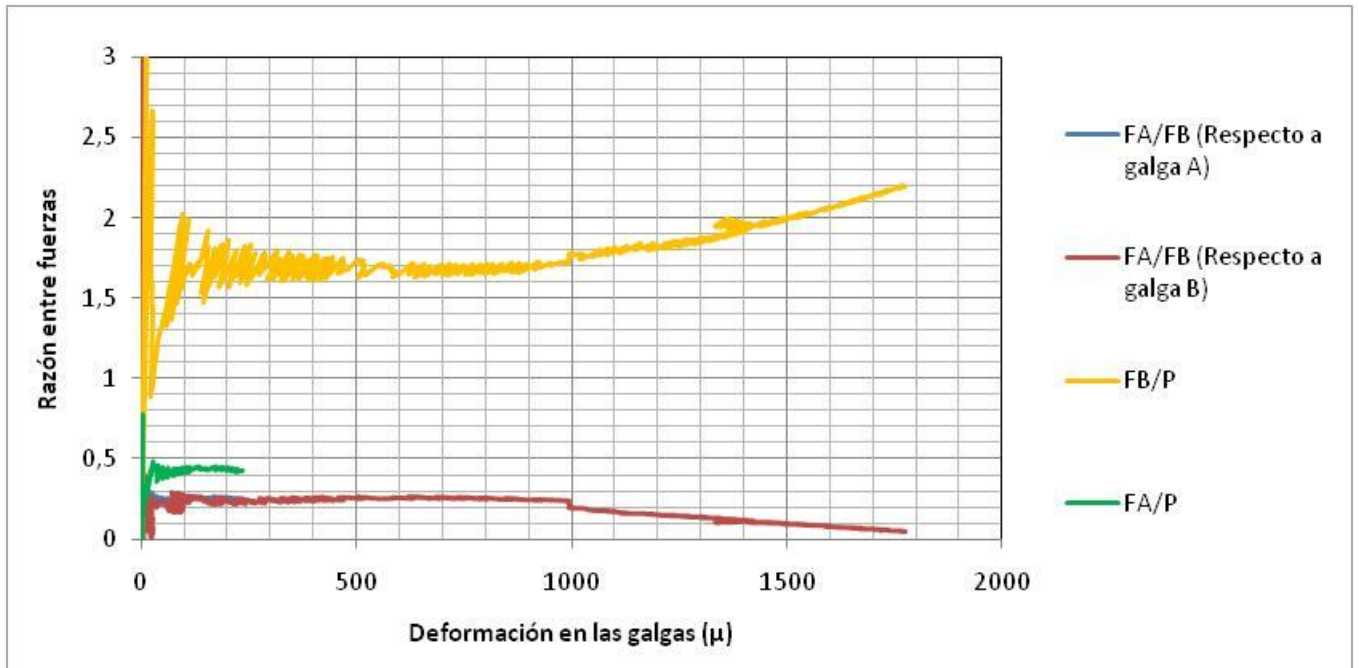


Figura H.9. Gráfico de las relaciones entre las fuerzas elásticas en el elemento, y entre cada fuerza elástica y la carga aplicada. Prueba 2.

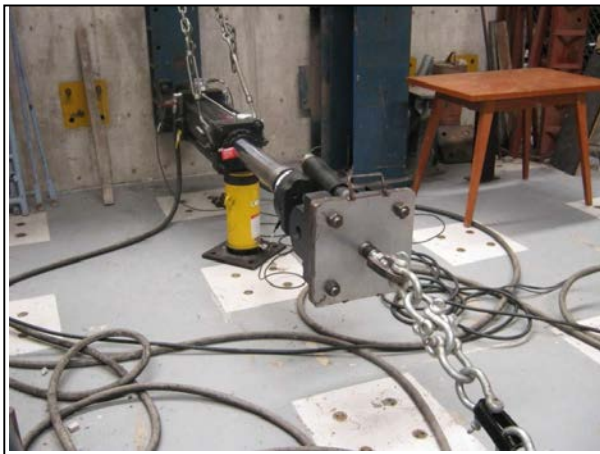


Figura H.10. Unión al gato por medio de eslabones



Figura H.11. Unión cable-espécimen

Falla en el cable de carga



Corrección hecha en la gaza del cable

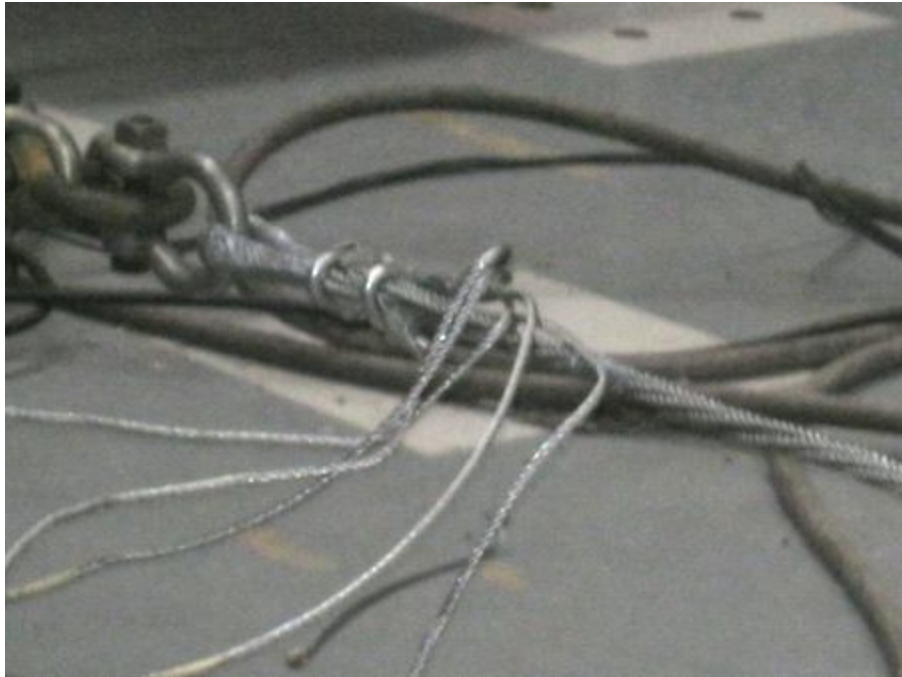


Figura H.12. Falla en el cable. Unión eslabones-cable

Prueba 3

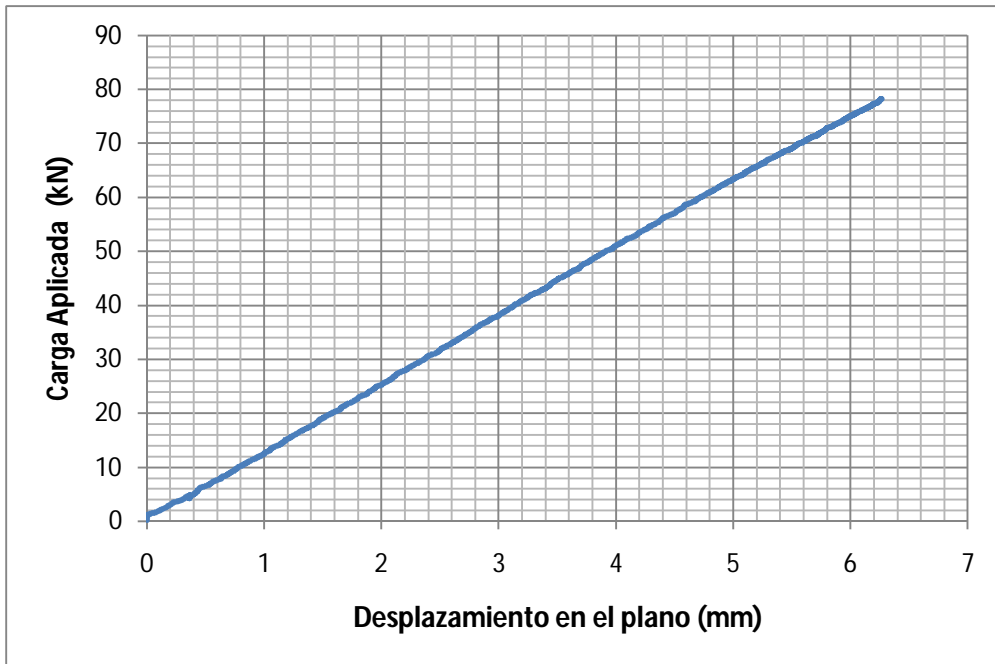


Figura H.13 Gráfico carga-desplazamiento máximo en el plano. Prueba 3

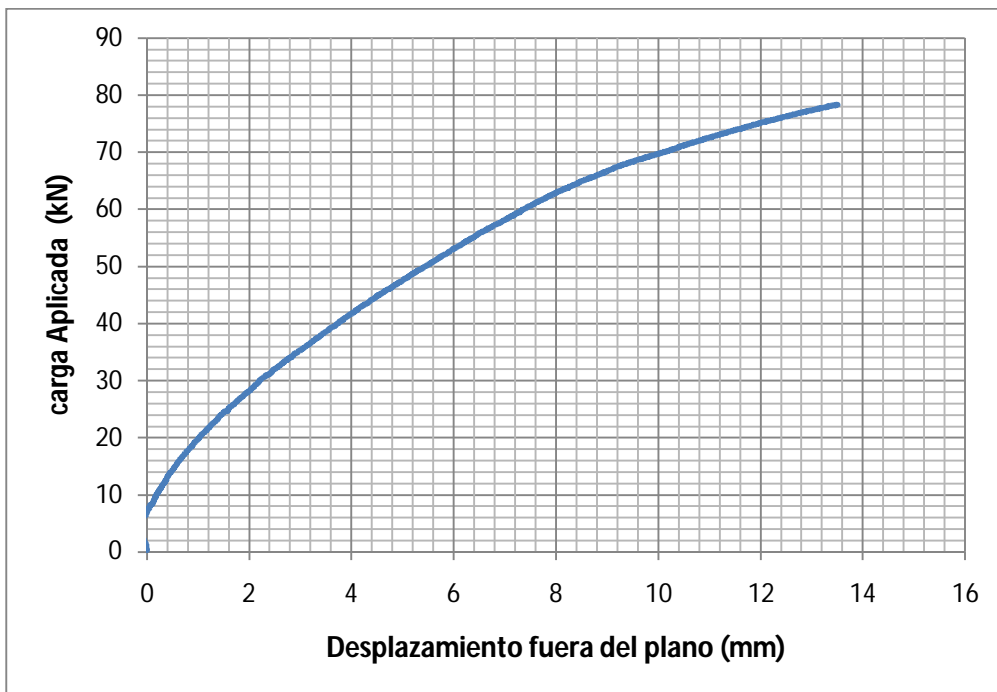


Figura H.14. Gráfico carga-desplazamiento fuera del plano. Prueba 3.

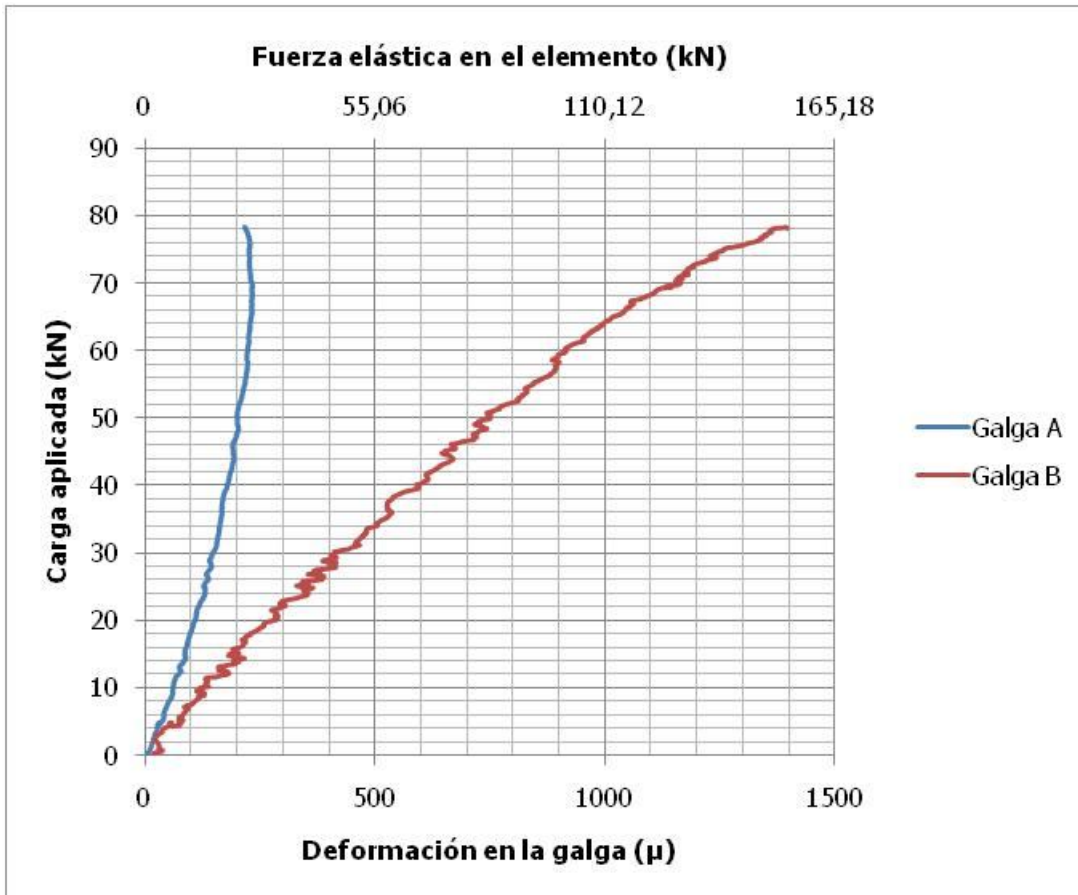


Figura H.15. Gráfico carga-deformación unitaria en las galgas (fuerza elástica en el elemento). Prueba 3

OBSERVACIONES:

Después de realizar el ajuste del cable de carga, se requirió colocar más eslabones.

Se produjo una falla en uno de los eslabones. Ahi se detuvo el experimento.

Después de inspeccion del montaje se notó que la placa inferior del pedestal había fallado. Se decide hacer otro pedestal.

Se posponen las pruebas hasta realizar este trabajo.

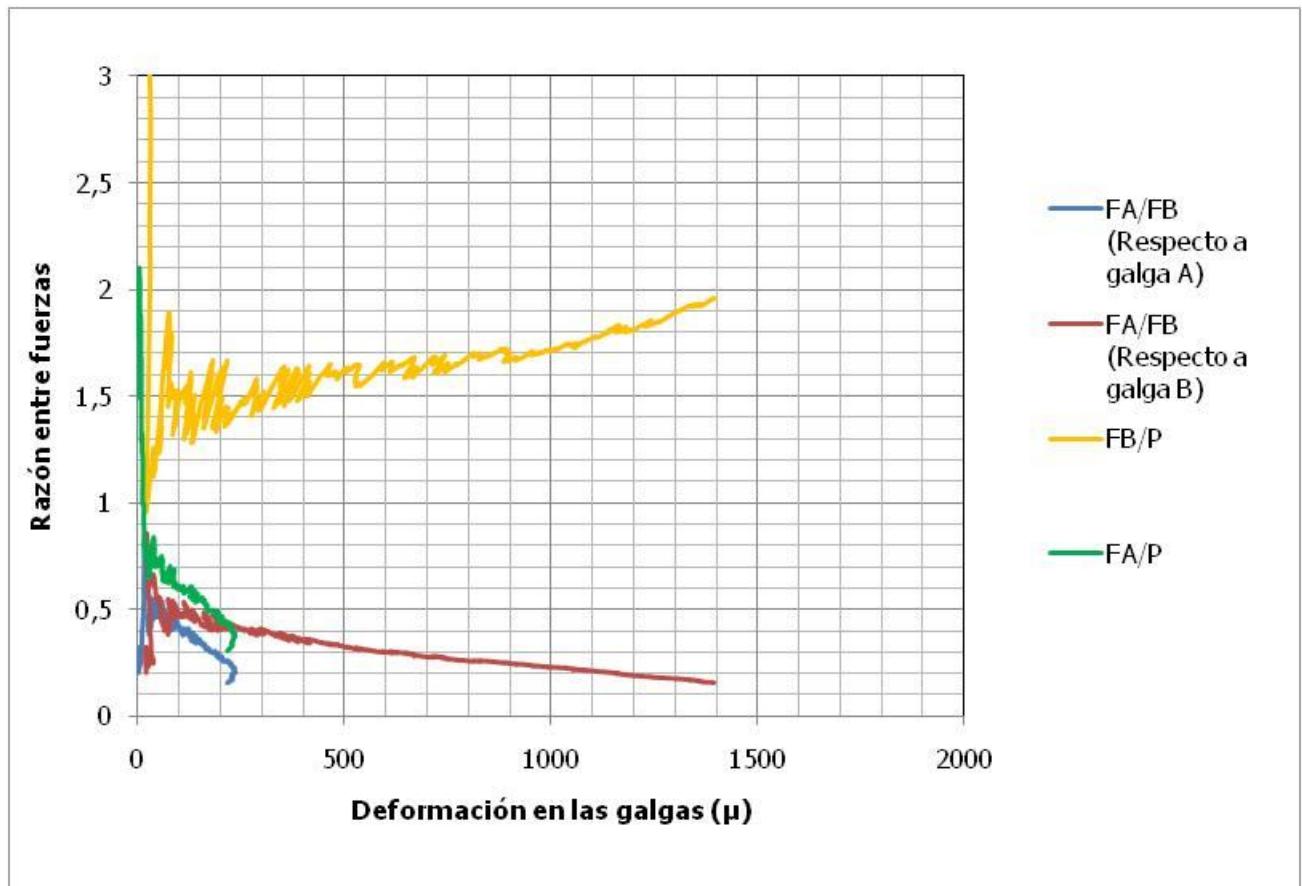


Figura H.16. Gráfico de las relaciones entre las fuerzas elásticas en el elemento, y entre cada fuerza elástica y la carga aplicada. Prueba 3.

Falla en placa del pedestal

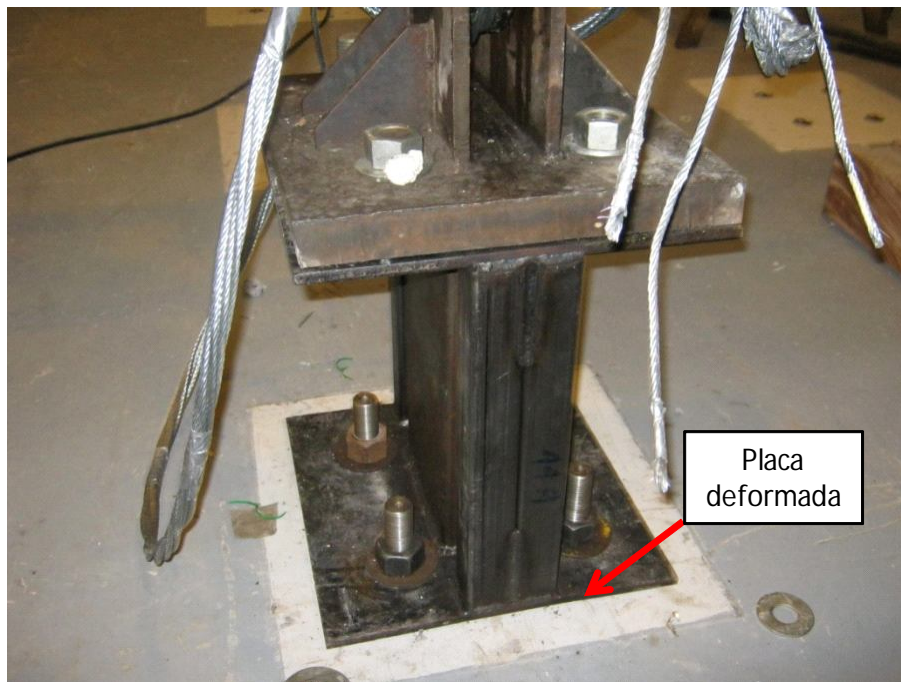


Figura H.17. Falla en la placa del pedestal.

Prueba 4

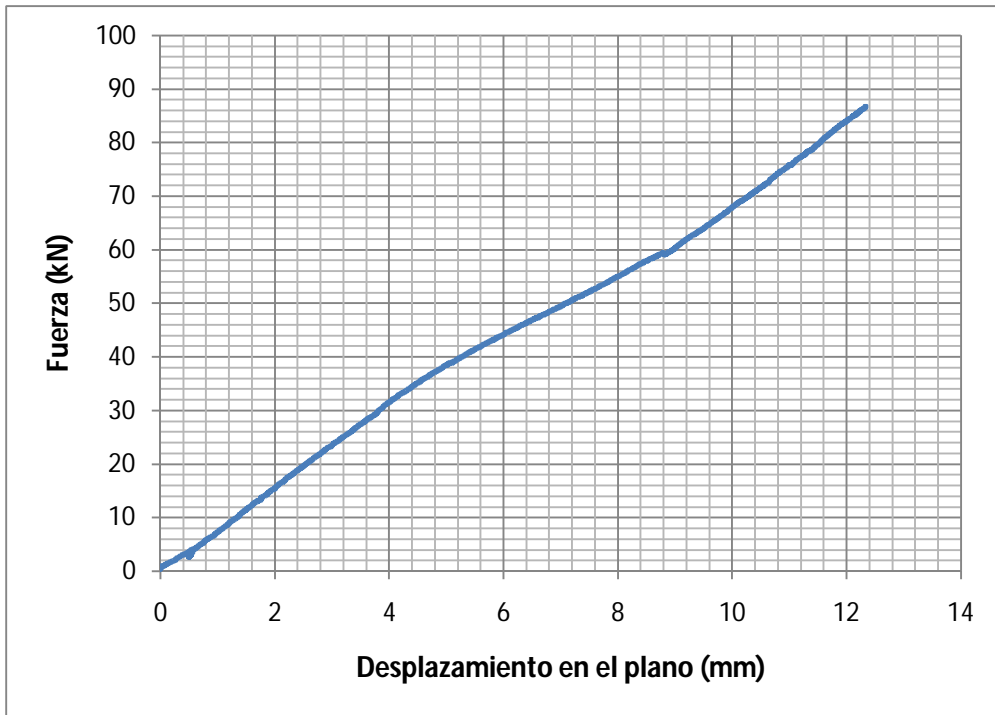


Figura H.18 Gráfico carga-desplazamiento máximo en el plano. Prueba 4

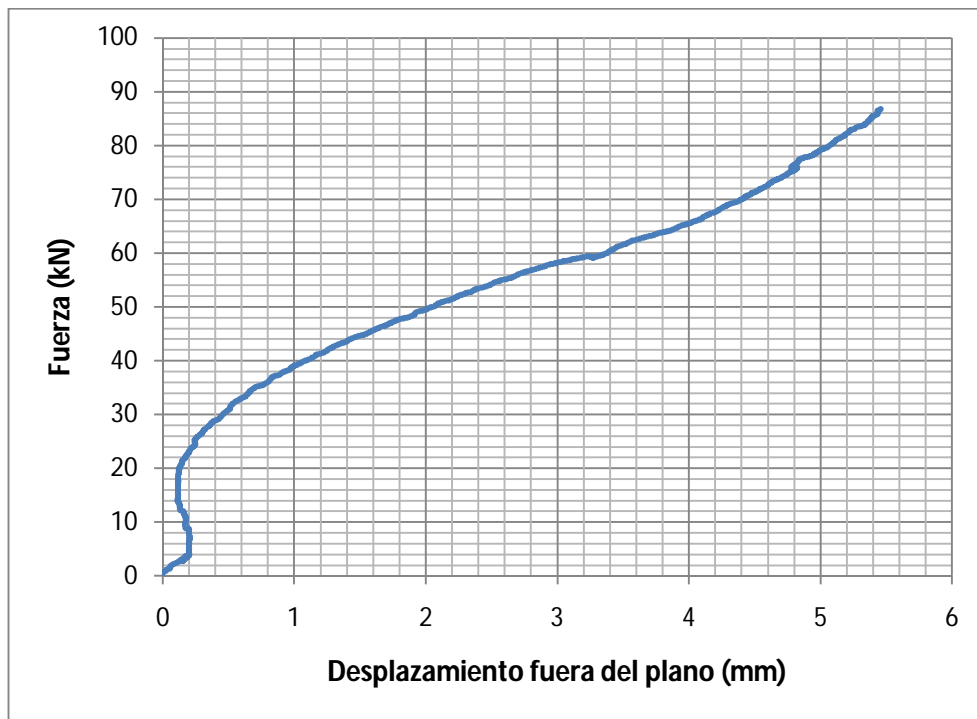


Figura H.19. Gráfico carga-desplazamiento fuera del plano. Prueba 4.

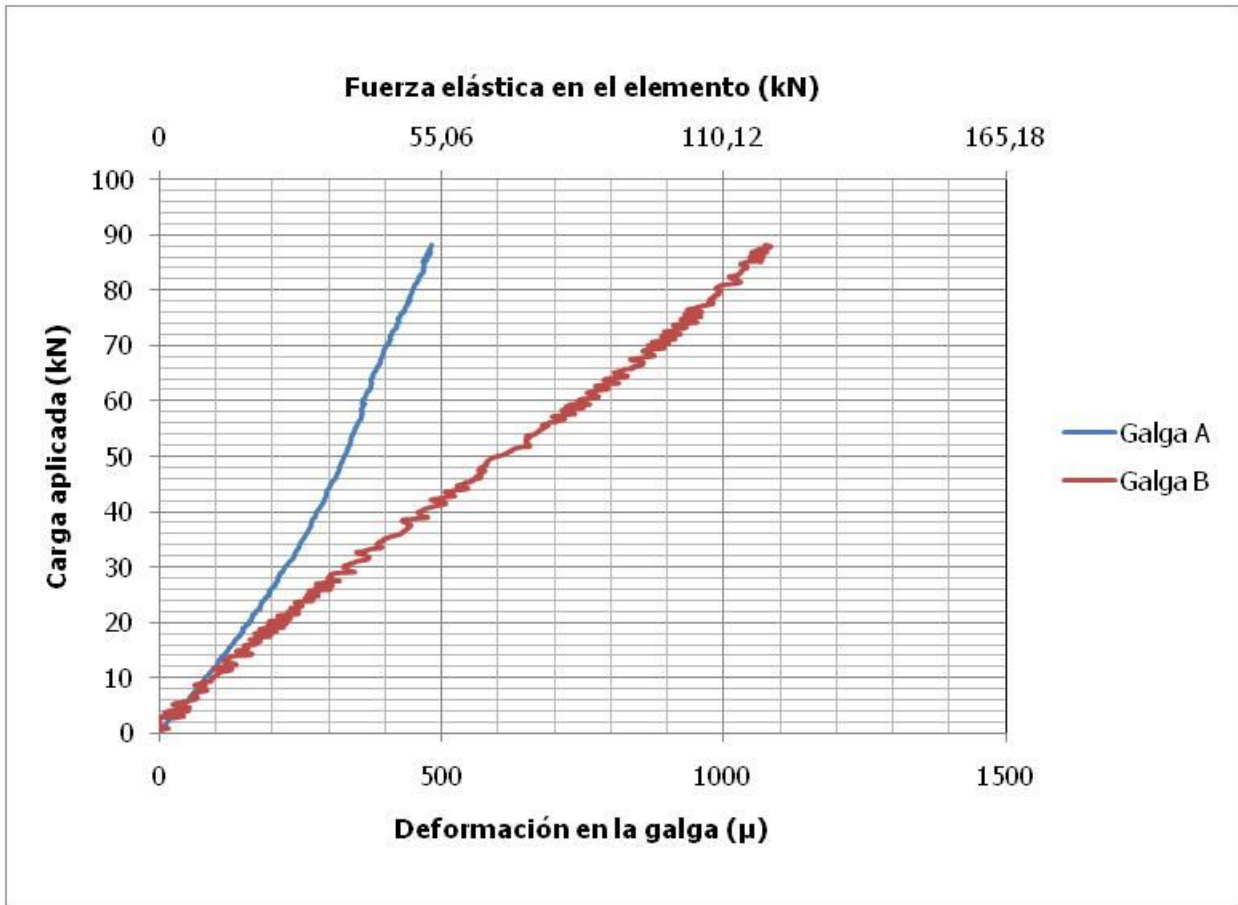


Figura H.20. Gráfico carga-deformación unitaria en las galgas (fuerza elástica en el elemento). Prueba 4

OBSERVACIONES:

Se construyó un nuevo pedestal.

Se inició la prueba con un cambio en la forma de amarrar el cable de carga en la cuerda inferior de la armadura. Ese cambio propició una falla en la pared del elemento diagonal, en donde se apoyaba el cable. Al fallar localmente la pared del elemento, se produjo la falla por corte en el cable de carga.

Se decide establecer una nueva solución para cargar el elemento y hacer la unión entre el cable y el espécimen. Las pruebas se posponen hasta la realización de estas soluciones.

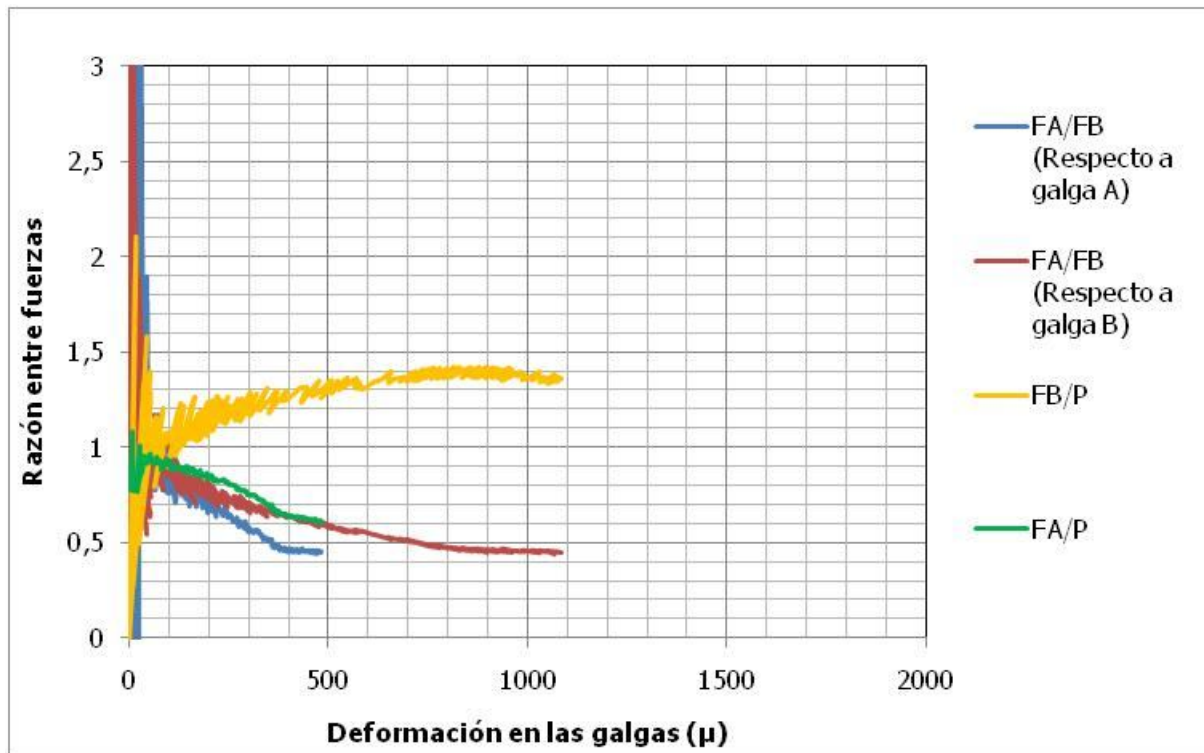


Figura H.21. Gráfico de las relaciones entre las fuerzas elásticas en el elemento, y entre cada fuerza elástica y la carga aplicada. Prueba 4.

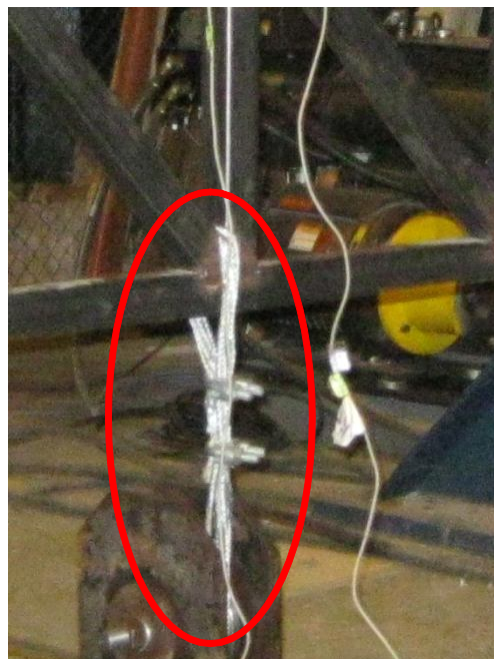


Figura H.22. Unión cable espécimen.



Figura H.23. Nuevo pedestal.

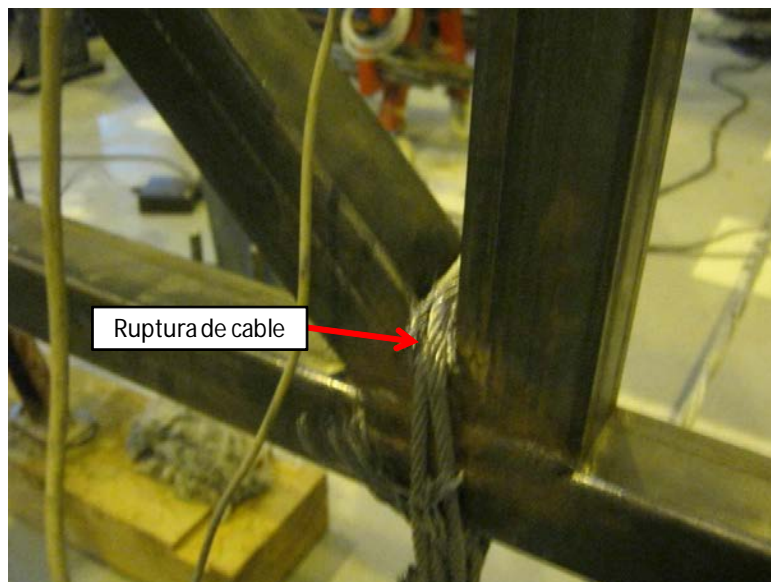


Figura H.24. Ruptura del cable al darse el aplastamiento.

Prueba 5

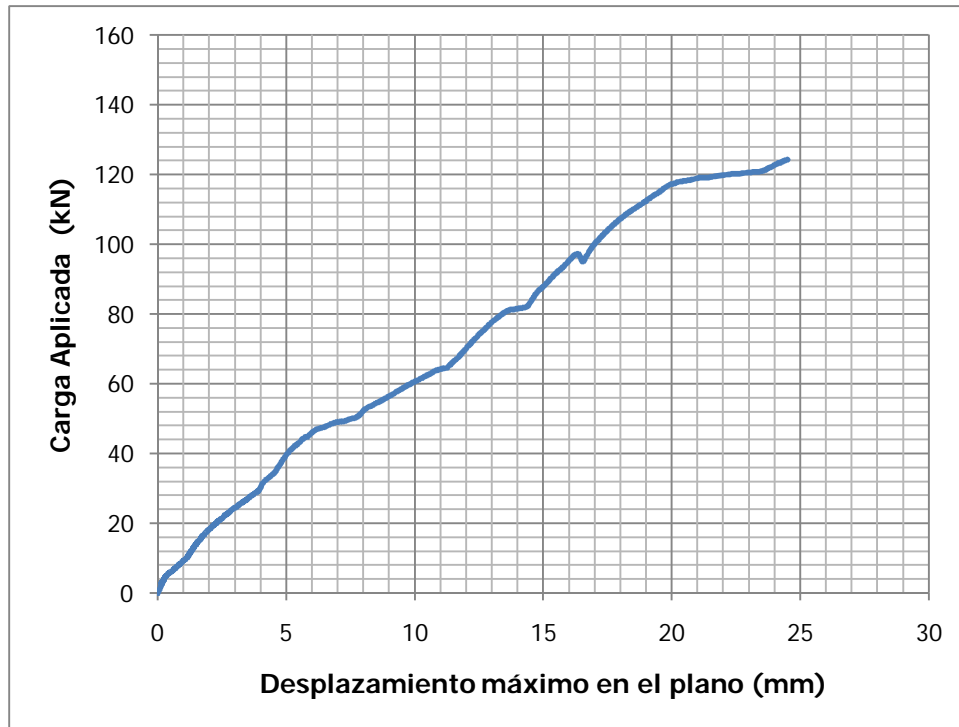


Figura H.25. Gráfico carga-desplazamiento máximo en el plano. Especimen C1-1.

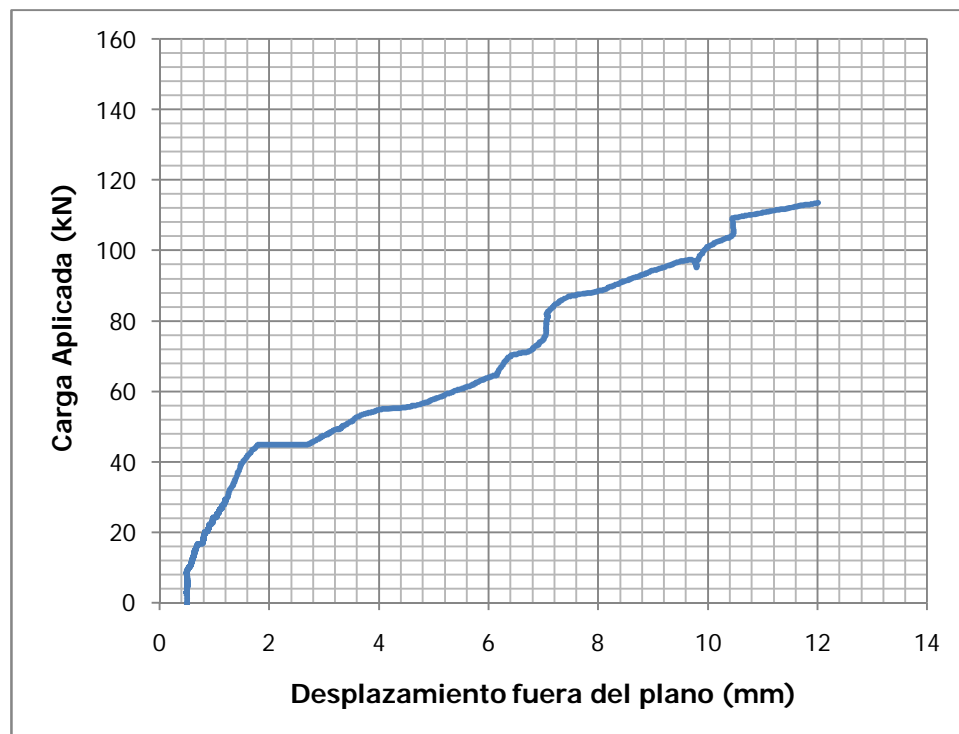


Figura H.26. Gráfico carga-desplazamiento fuera del plano. Especimen C1-1.

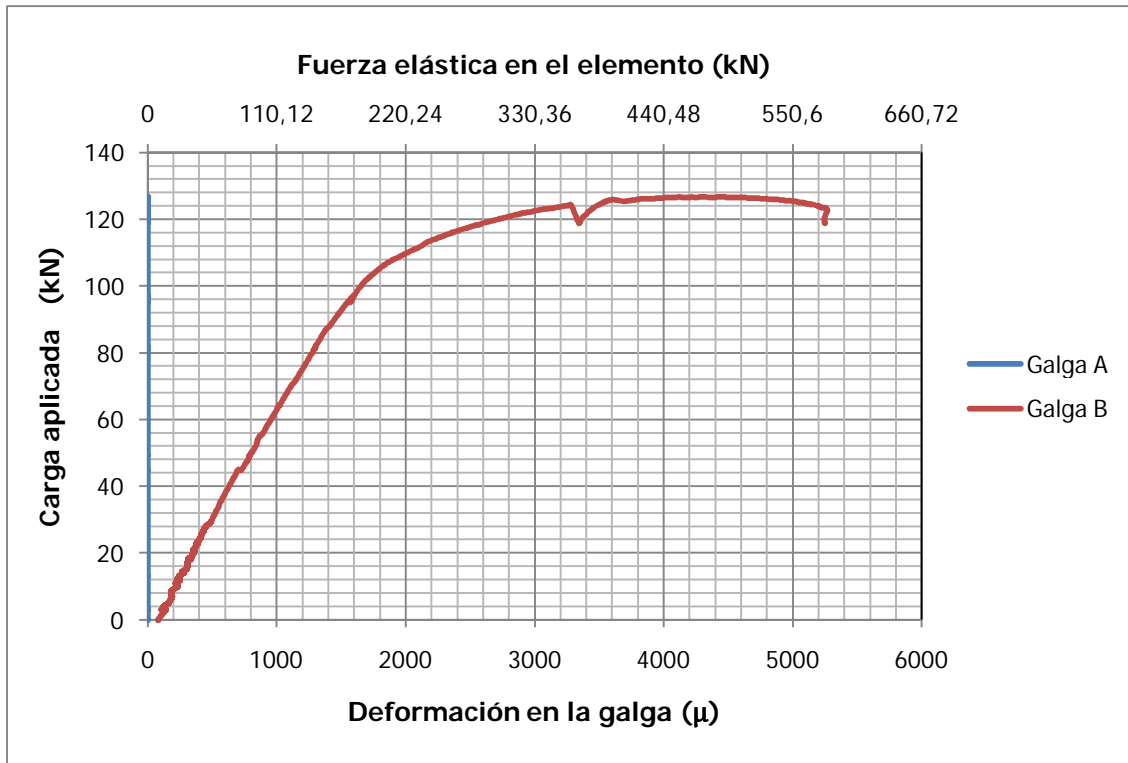


Figura H.27. Gráfico carga-deformación unitaria en las galgas (fuerza elástica en el elemento). Espécimen C1-1.

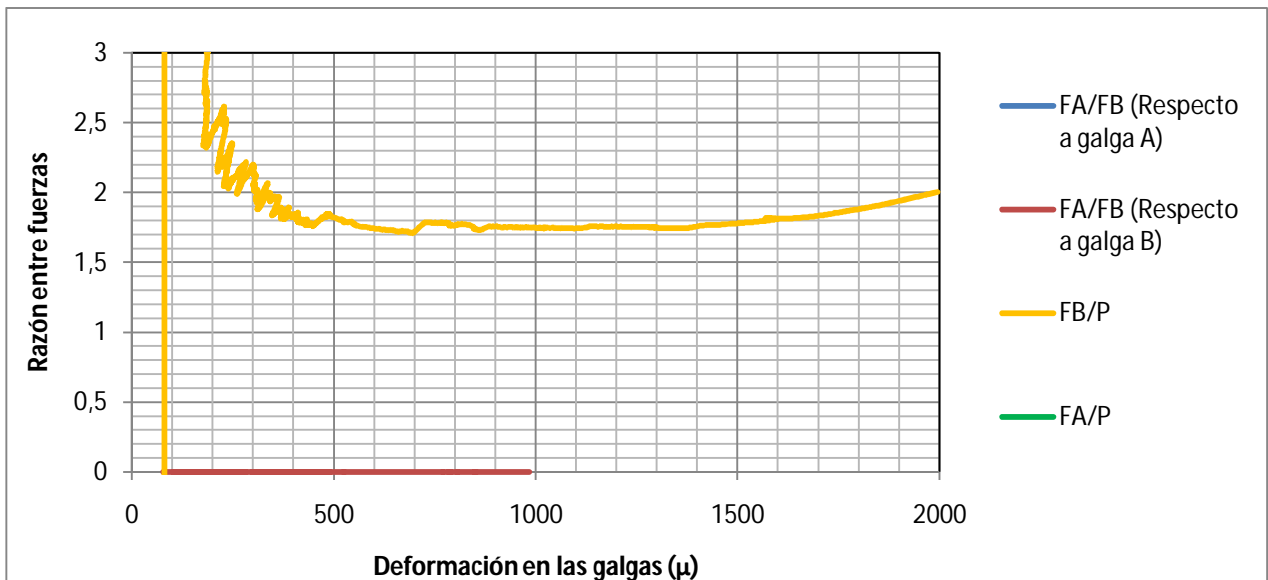


Figura H.28. Gráfico de las relaciones entre las fuerzas elásticas en el elemento, y entre cada fuerza elástica y la carga aplicada. Prueba 5.

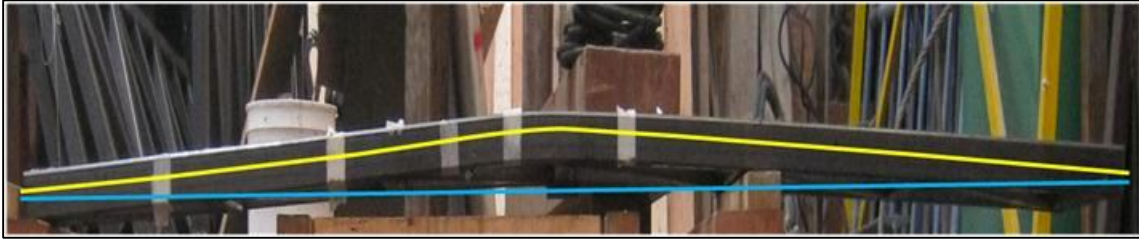


Figura H.29. Forma de pandeo en el espécimen C1-1

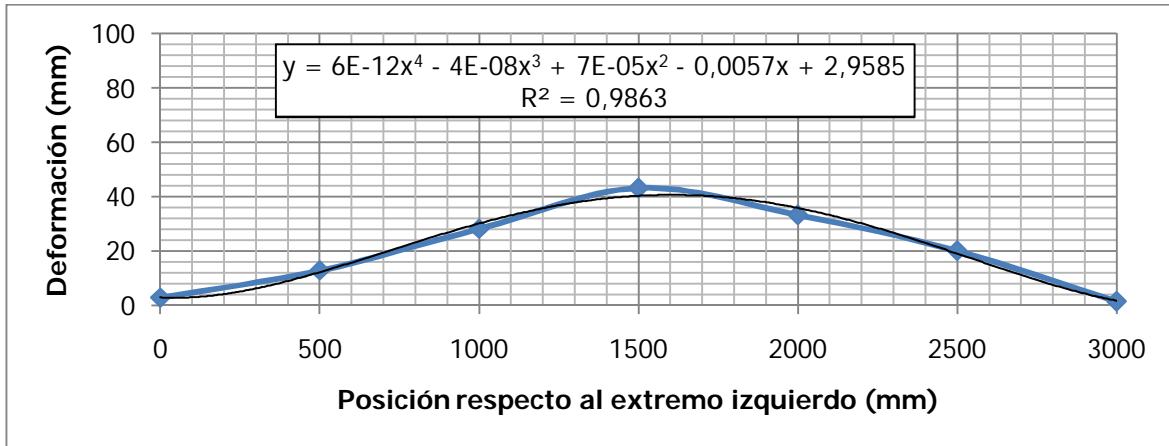


Figura H.30. Gráfico de la forma de pandeo en el espécimen C1-1.

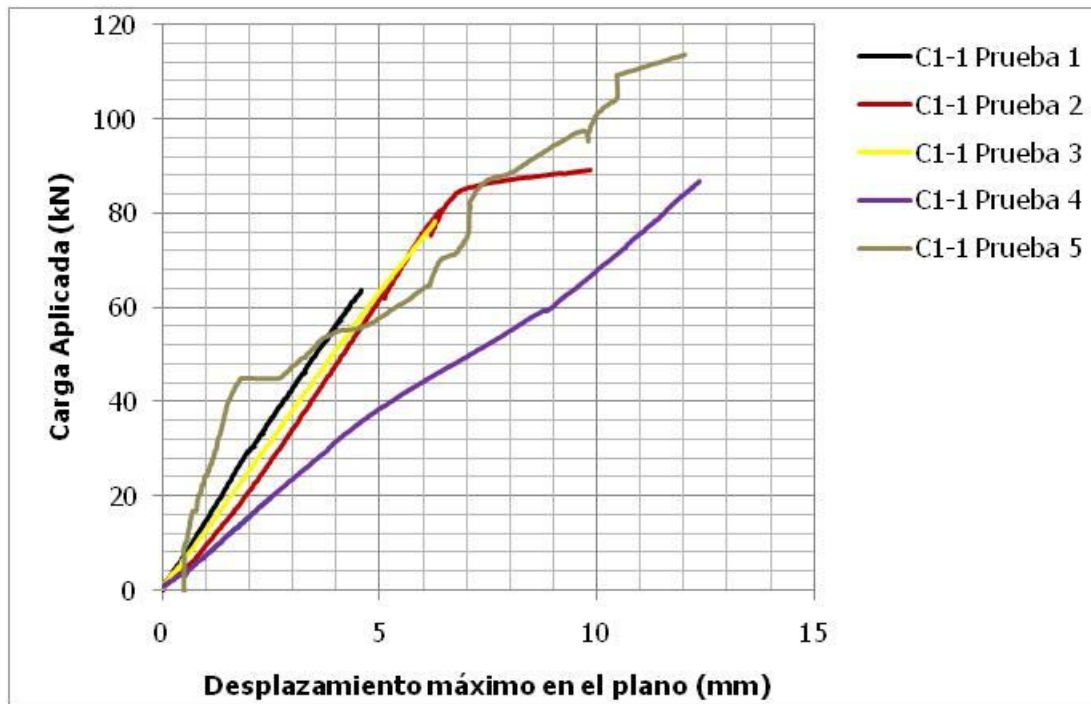


Figura H.31. Comparación entre los gráficos carga aplicada-desplazamiento máximo en el plano para las pruebas realizadas en el espécimen C1-1.

APÉNDICE I: RESULTADOS COMPLEMENTARIOS PARA LOS ESPECÍMENES TIPO ARMADURA

Resultados complementarios espécimen C1-2

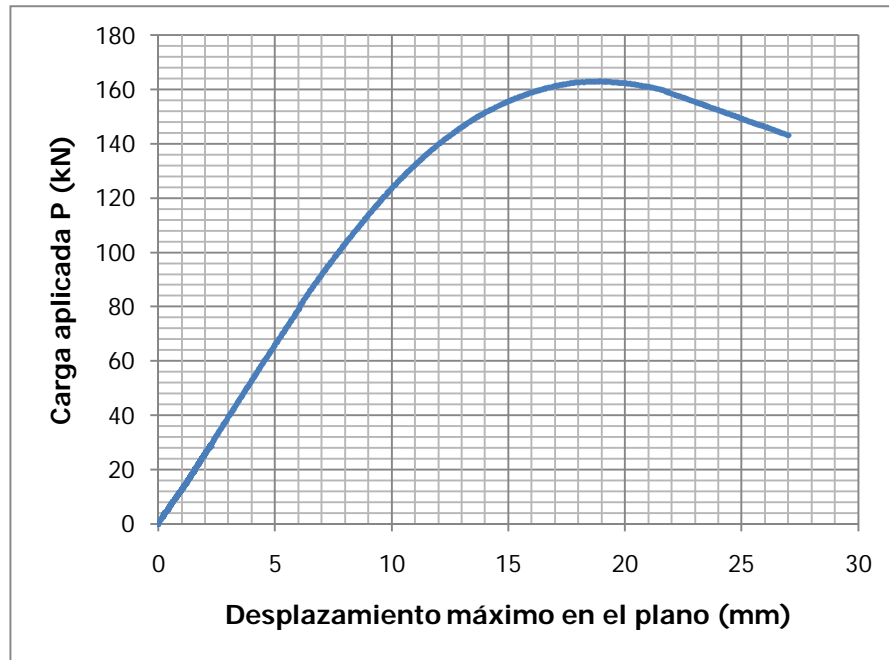


Figura I.1. Gráfico carga-desplazamiento máximo en el plano. Especímen C1-2.

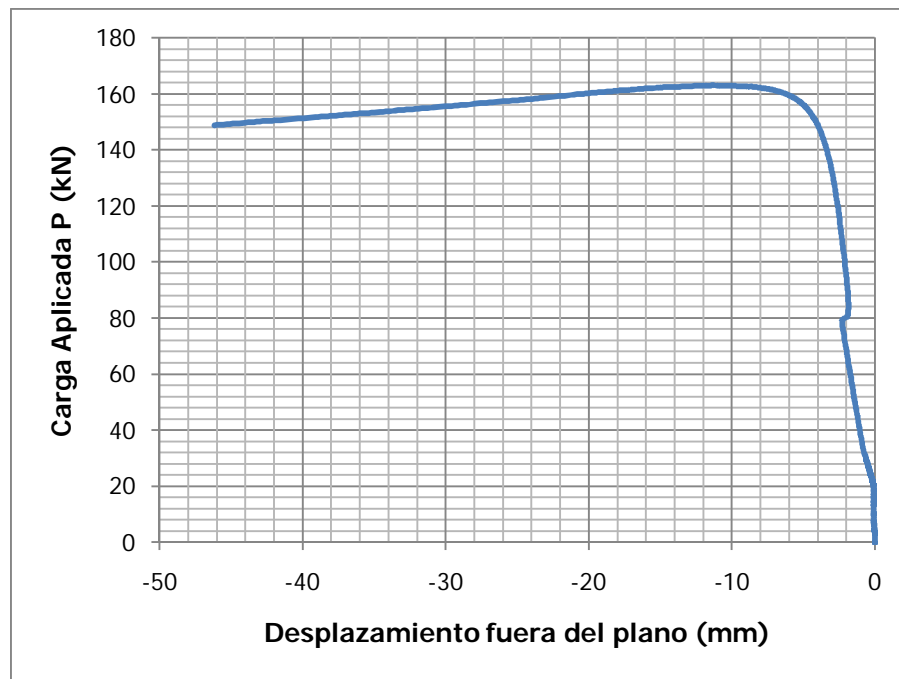


Figura I.2. Gráfico carga-desplazamiento fuera del plano. Especímen C1-2.

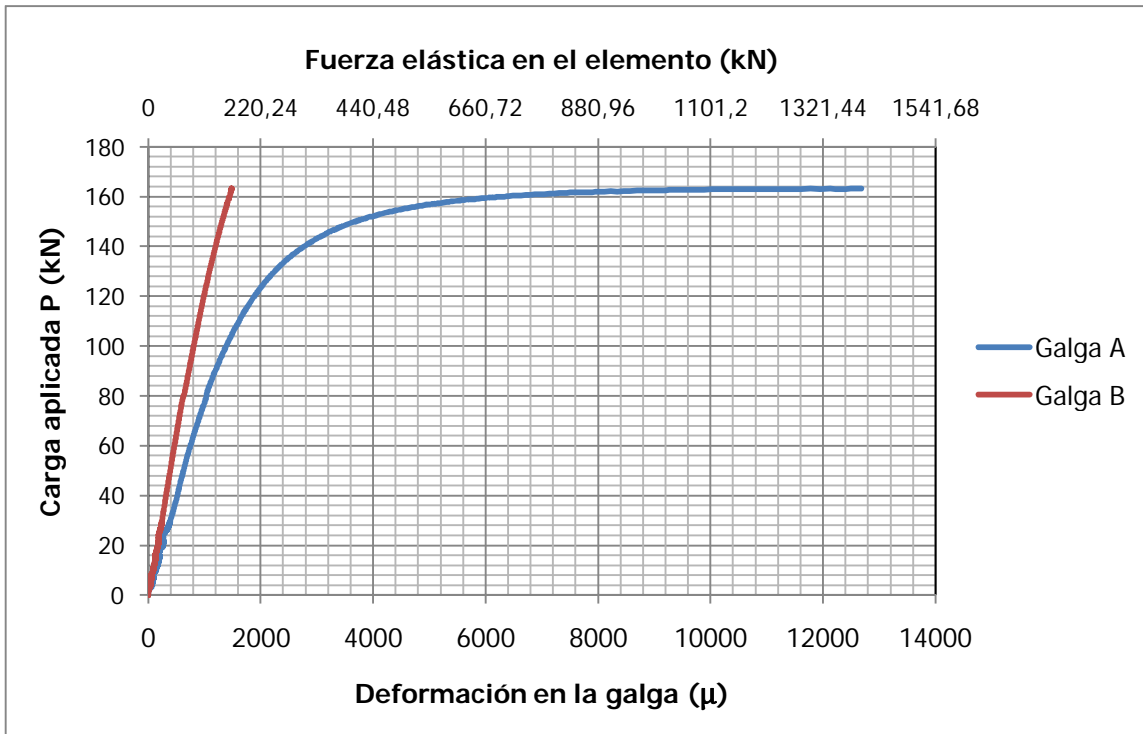


Figura I.3. Gráfico carga-deformación unitaria en las galgas (fuerza elástica en el elemento). Espécimen C1-2.

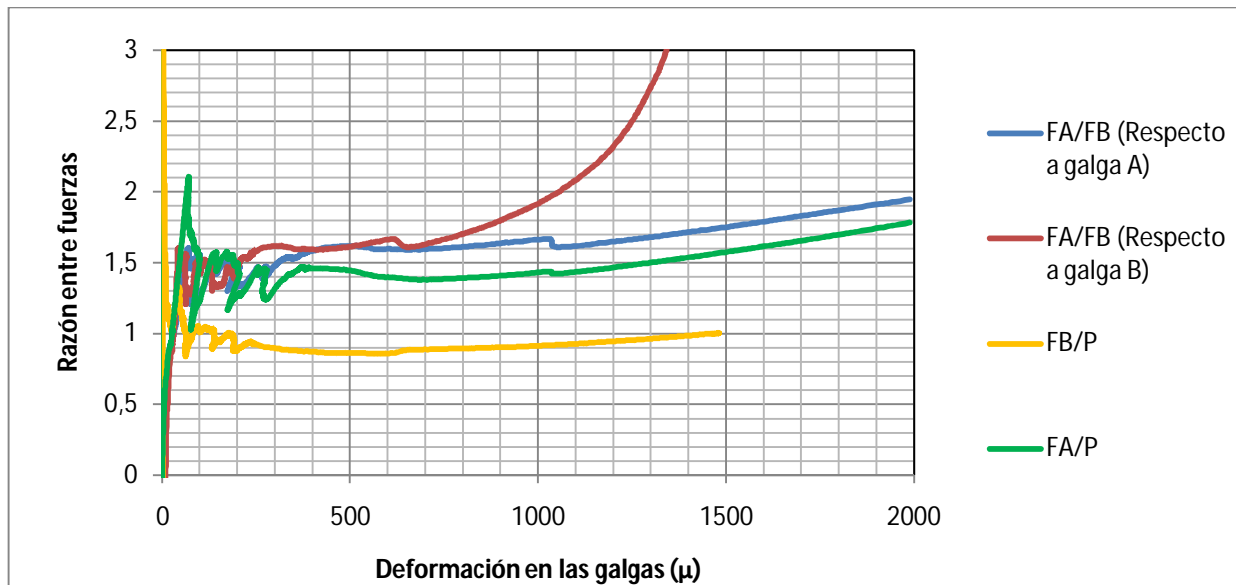


Figura I.4. Gráfico de las relaciones entre las fuerzas elásticas en el elemento, y entre cada fuerza elástica y la carga aplicada. Espécimen C1-2



Figura I.5. Forma del pandeo en el espécimen C1-2.

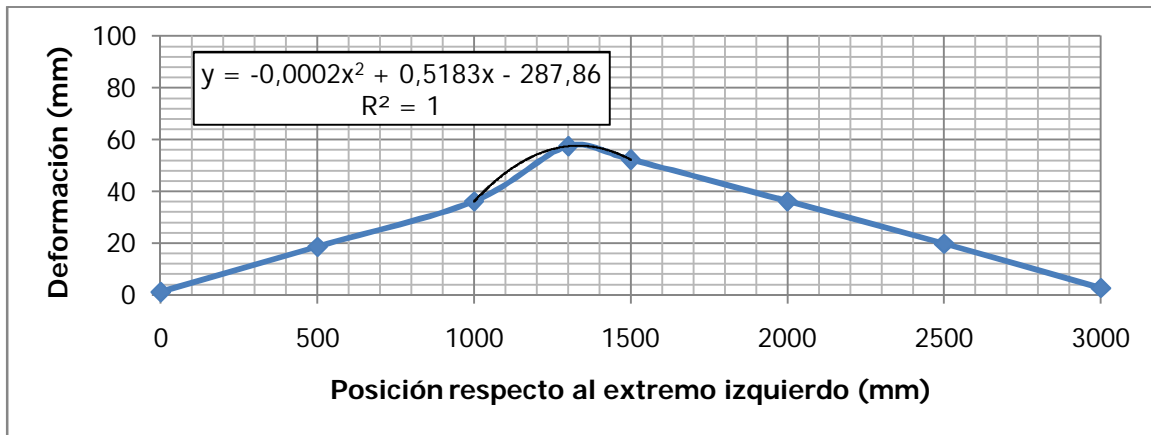


Figura I.6. Gráfico de la forma de pandeo en el espécimen C1-2.

Resultados complementarios espécimen C2-1

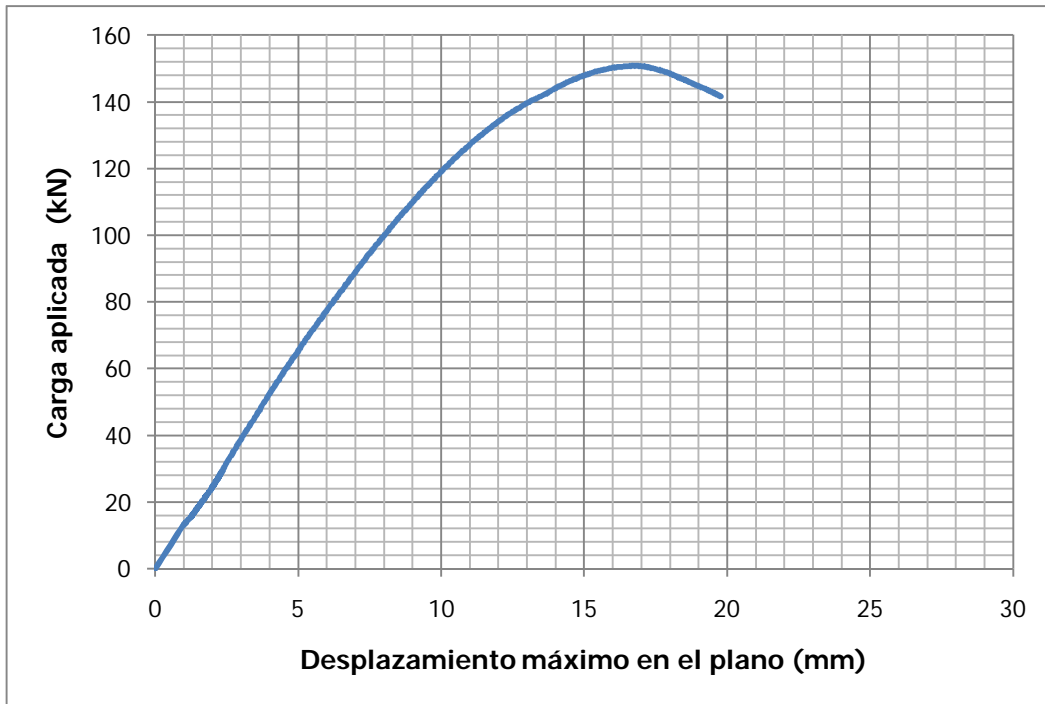


Figura I.7. Gráfico carga-desplazamiento máximo en el plano. Espécimen C2-1.

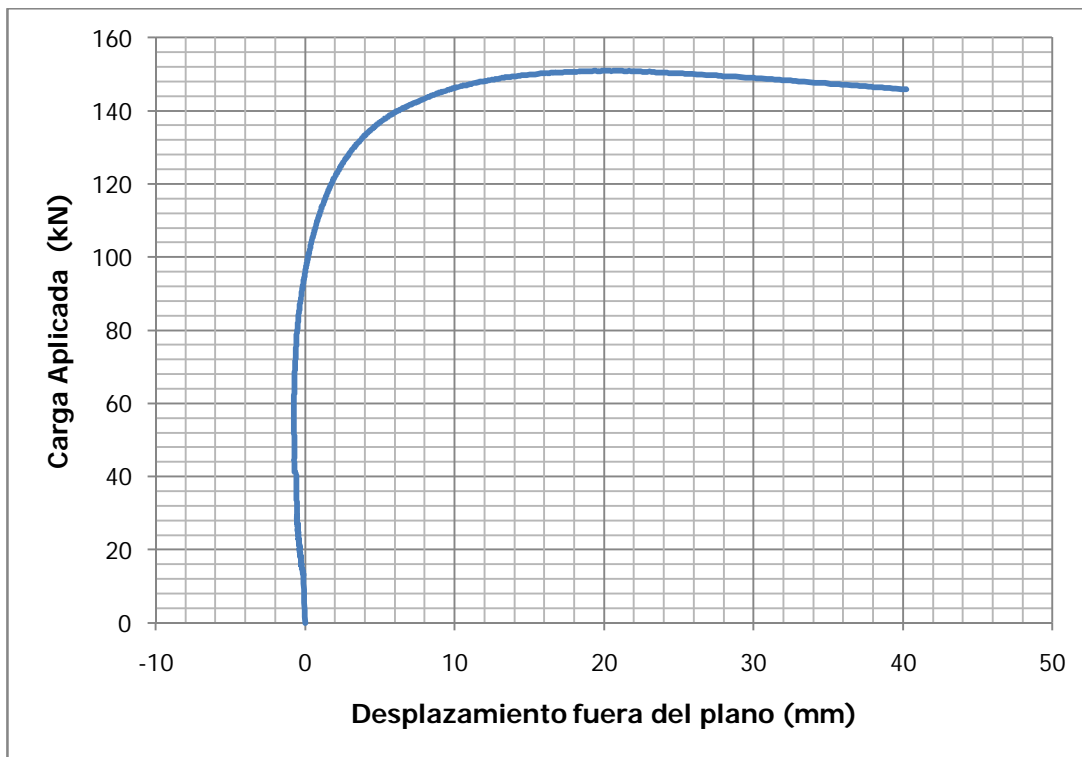


Figura I.8. Gráfico carga-desplazamiento fuera del plano. Espécimen C2-1.

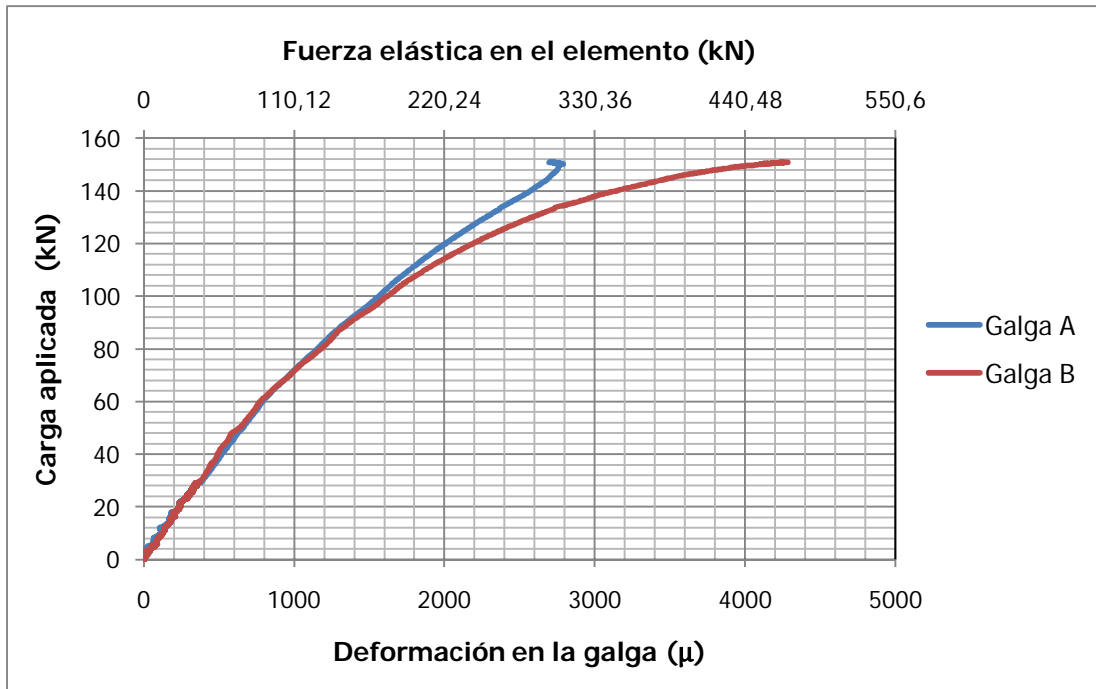


Figura I.9. Gráfico carga-deformación unitaria en las galgas (fuerza elástica en el elemento). Espécimen C2-1.

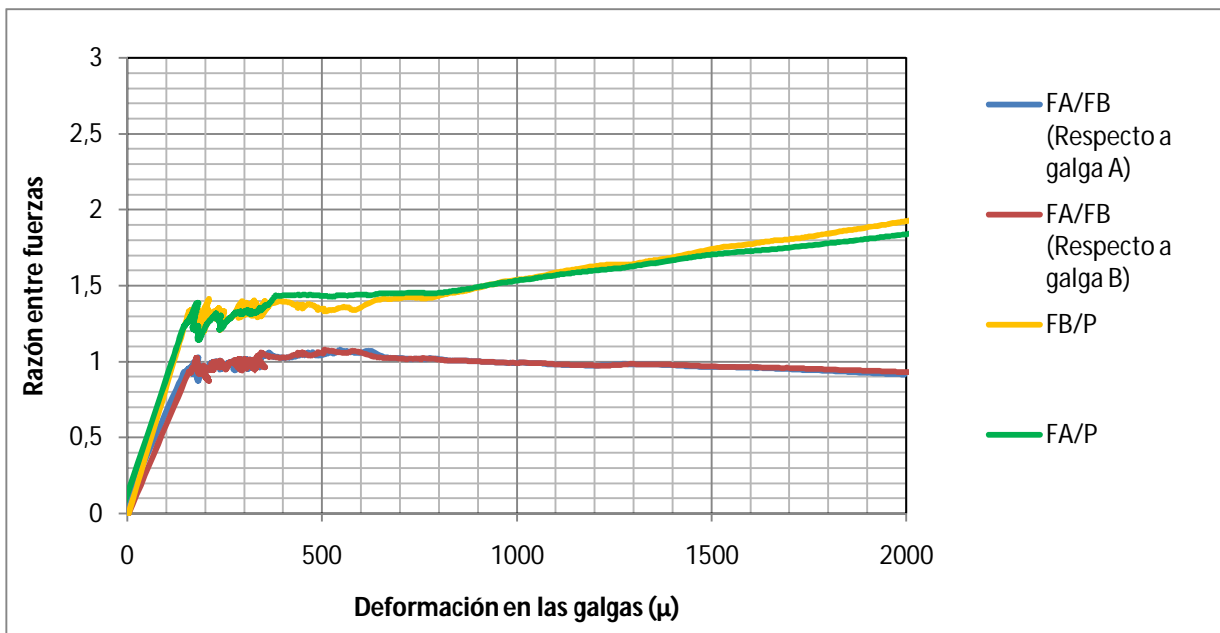


Figura I.10. Gráfico de las relaciones entre las fuerzas elásticas en el elemento, y entre cada fuerza elástica y la carga aplicada. Espécimen C2-1

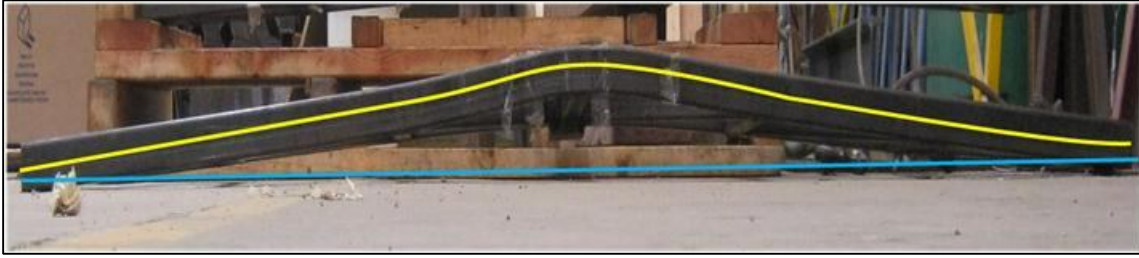


Figura I.11. Forma del pandeo en el espécimen C2-1.

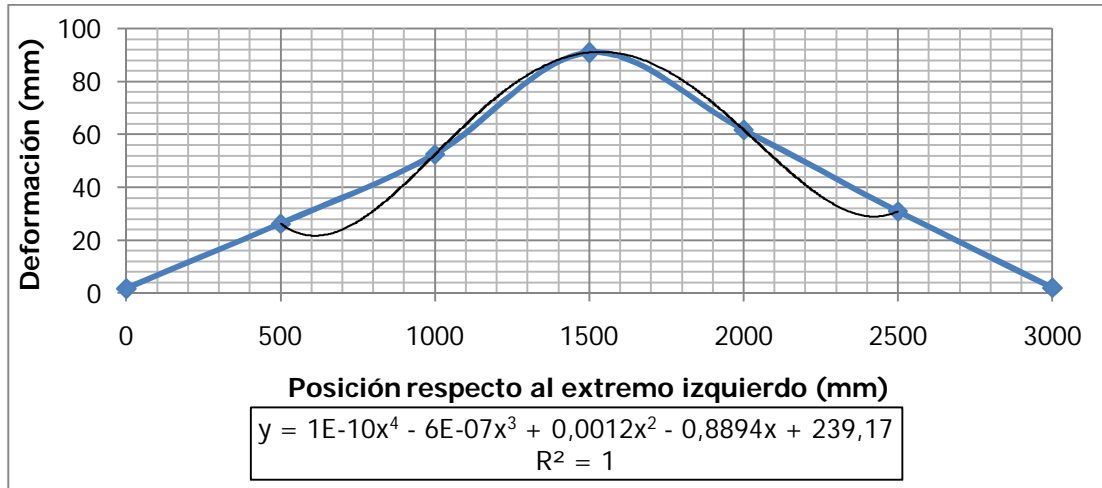


Figura I.12. Gráfico de la forma de pandeo en el espécimen C2-1.

Resultados complementarios espécimen C2-2

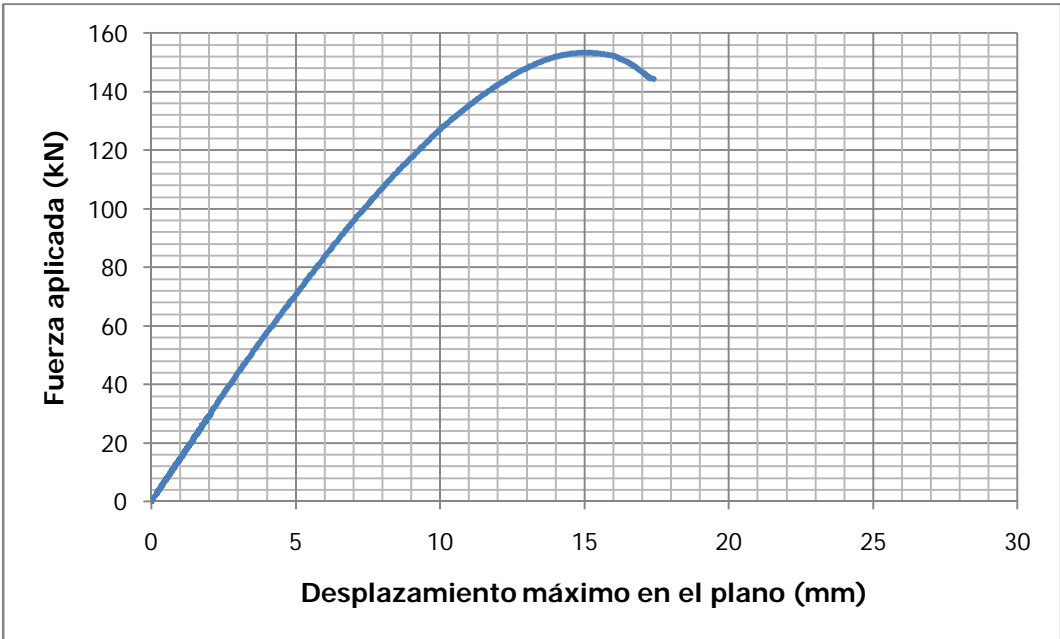


Figura I.13. Gráfico carga-desplazamiento máximo en el plano. Espécimen C2-2.

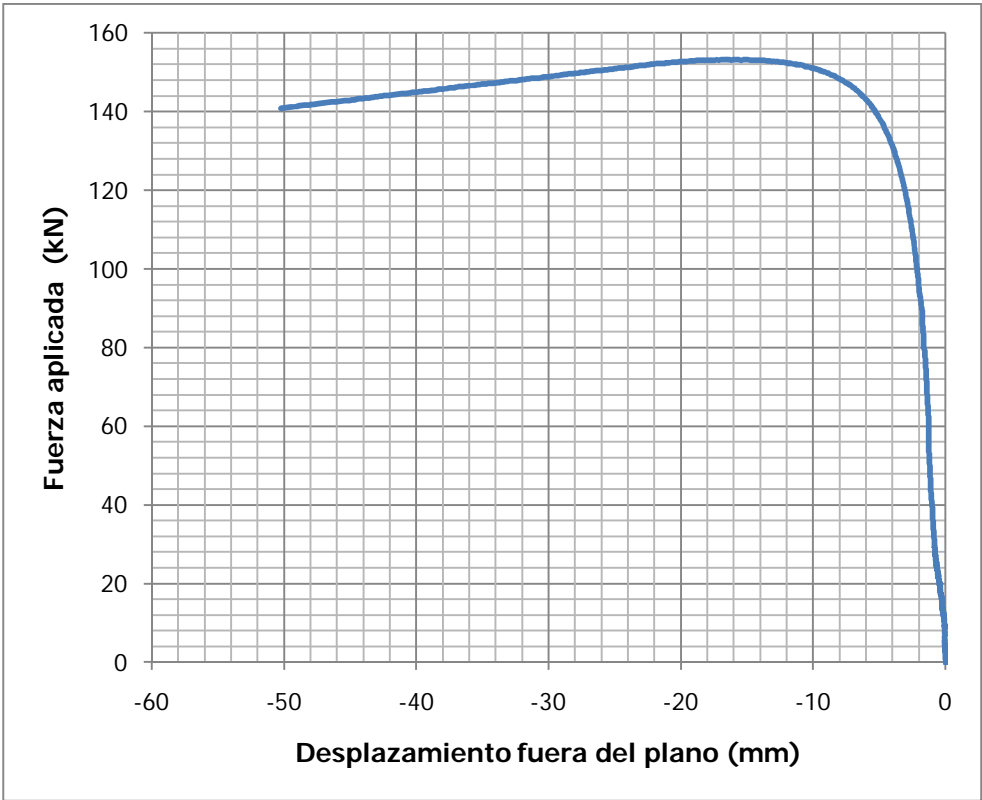


Figura I.14. Gráfico carga-desplazamiento fuera del plano. Espécimen C2-2.

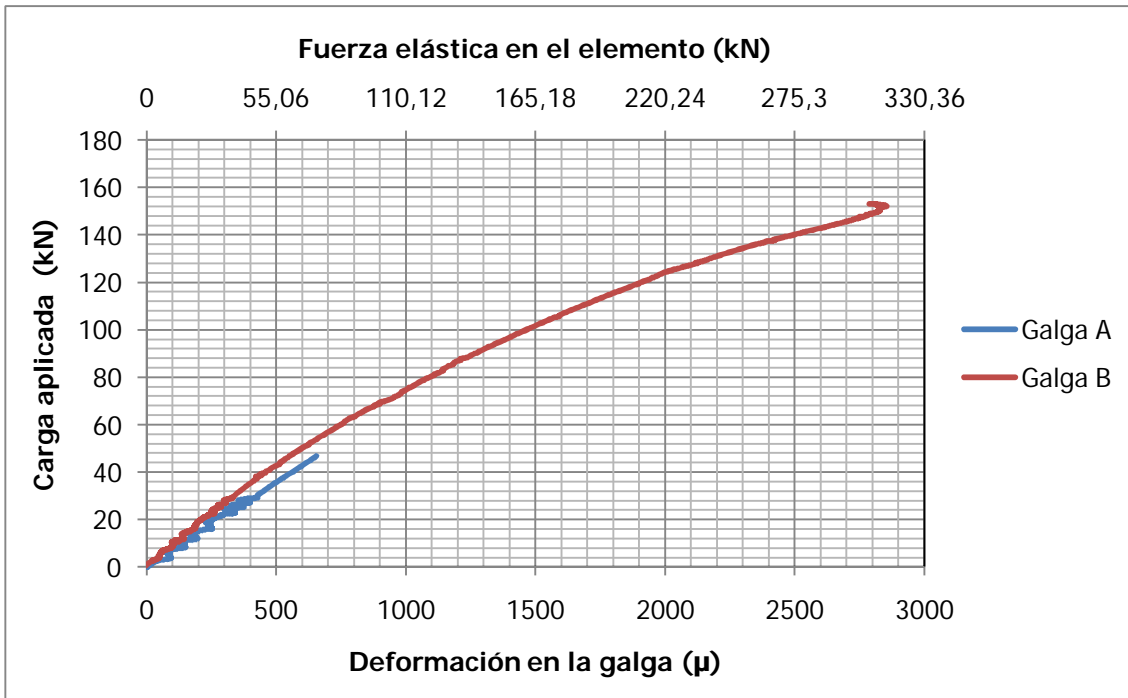


Figura I.15. Gráfico carga-deformación unitaria en las galgas (fuerza elástica en el elemento). Espécimen C2-2.

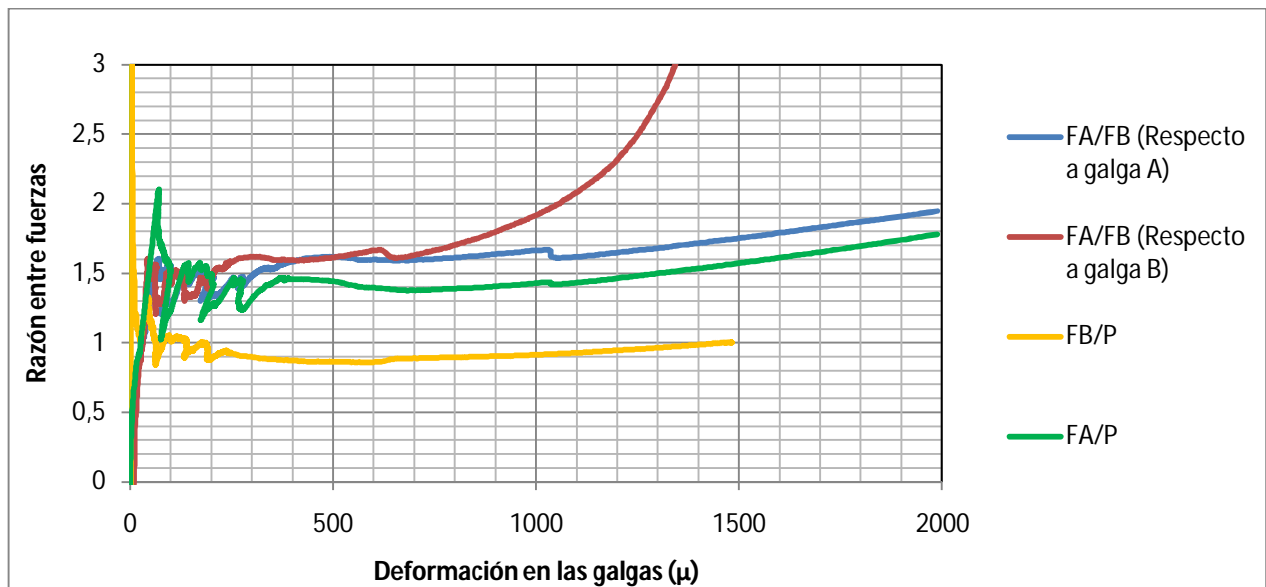


Figura I.16. Gráfico de las relaciones entre las fuerzas elásticas en el elemento, y entre cada fuerza elástica y la carga aplicada. Espécimen C2-2



Figura I.17 Forma del pandeo en el espécimen C2-2.

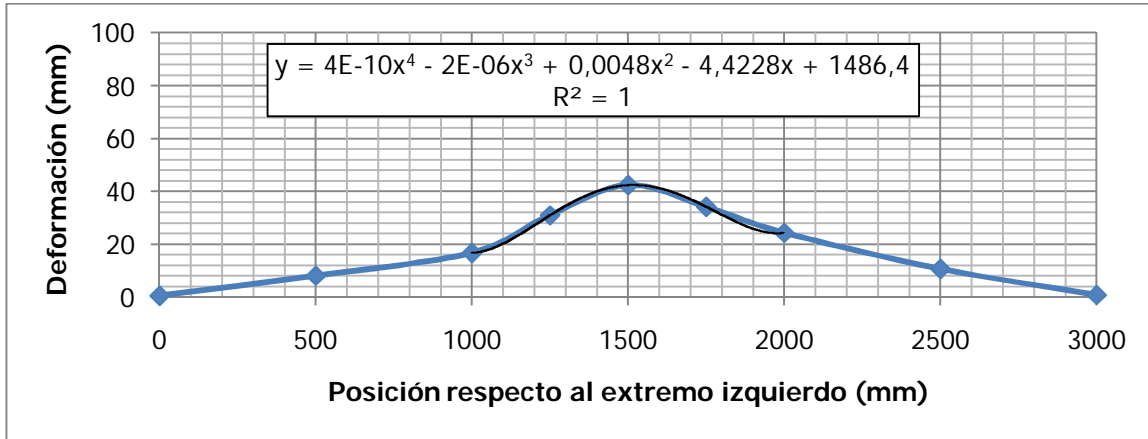


Figura I.18. Gráfico de la forma de pandeo en el espécimen C2-2.

Resultados complementarios espécimen C3-1

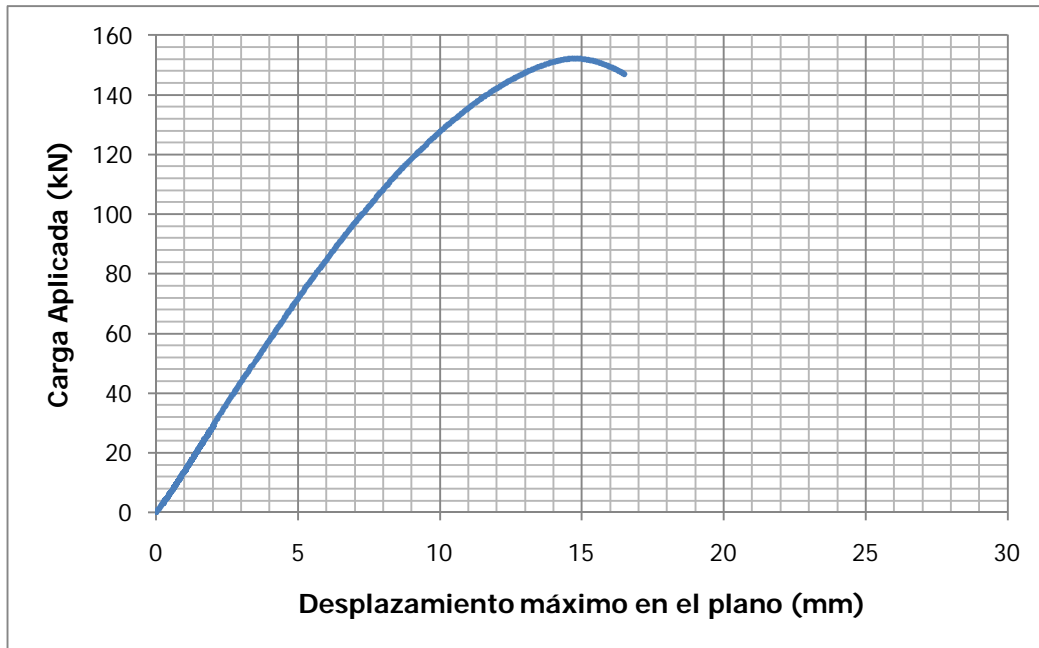


Figura I.19. Gráfico carga-desplazamiento máximo en el plano. Especimen C3-1.

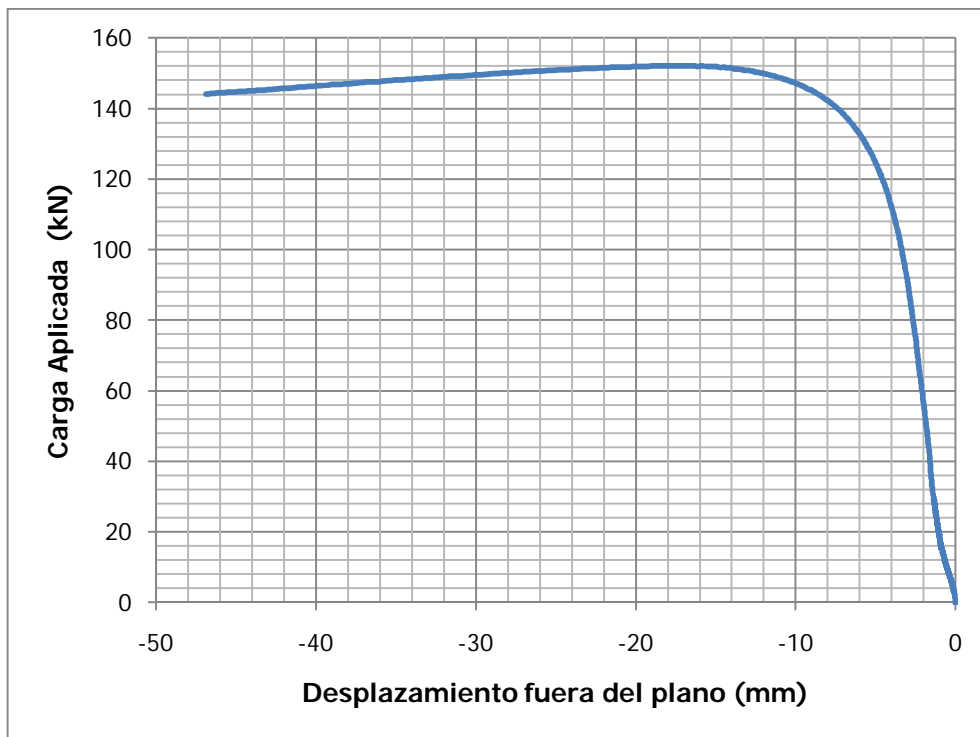


Figura I.20. Gráfico carga-desplazamiento fuera del plano. Especimen C3-1.

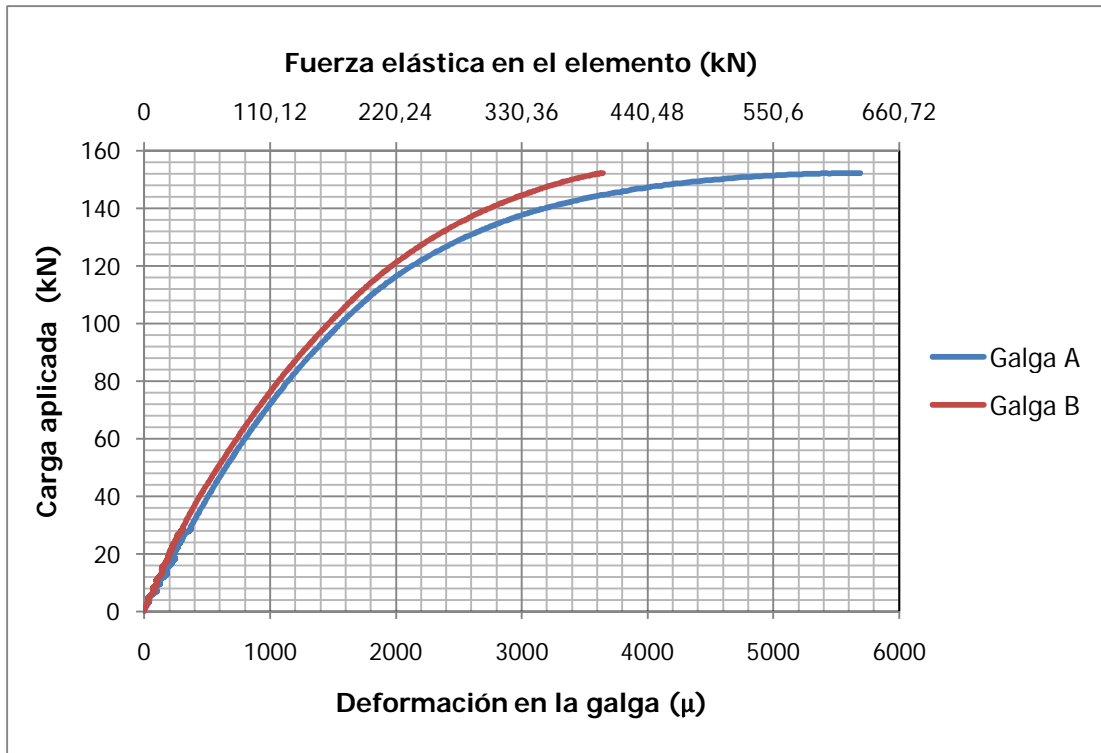


Figura I.21. Gráfico carga-deformación unitaria en las galgas (fuerza elástica en el elemento). Espécimen C3-1.

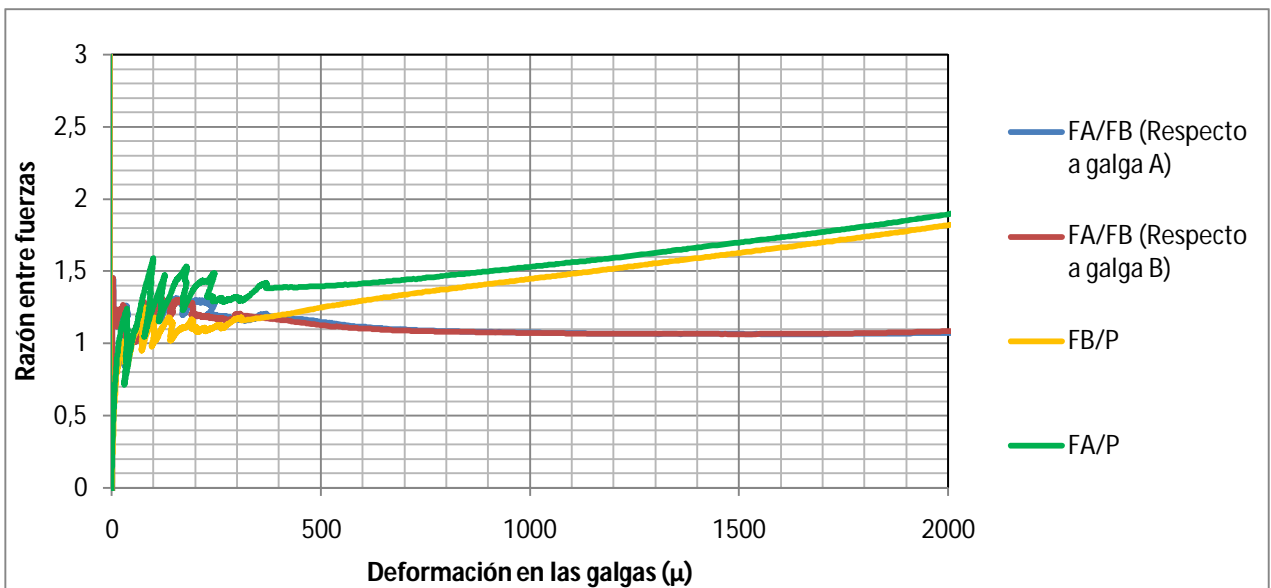


Figura I.22. Gráfico de las relaciones entre las fuerzas elásticas en el elemento, y entre cada fuerza elástica y la carga aplicada. Espécimen C3-1

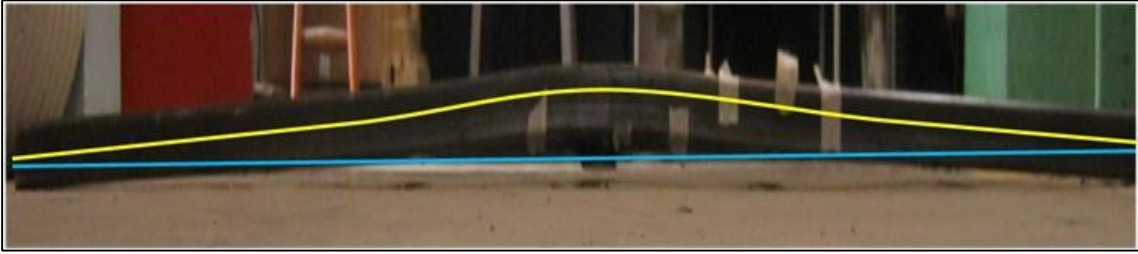


Figura I.23. Forma del pandeo en el espécimen C3-1.

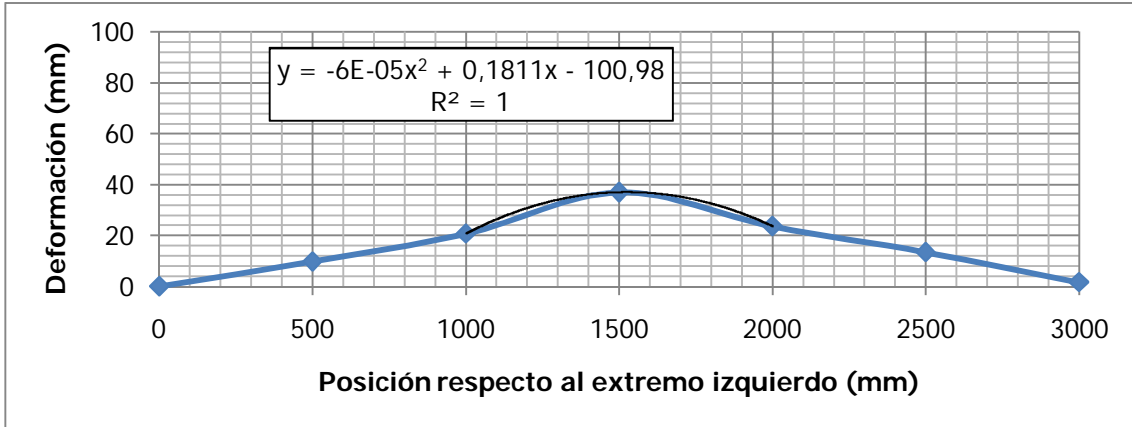


Figura I.24. Gráfico de la forma de pandeo en el espécimen C3-1.

Resultados complementarios espécimen C3-2

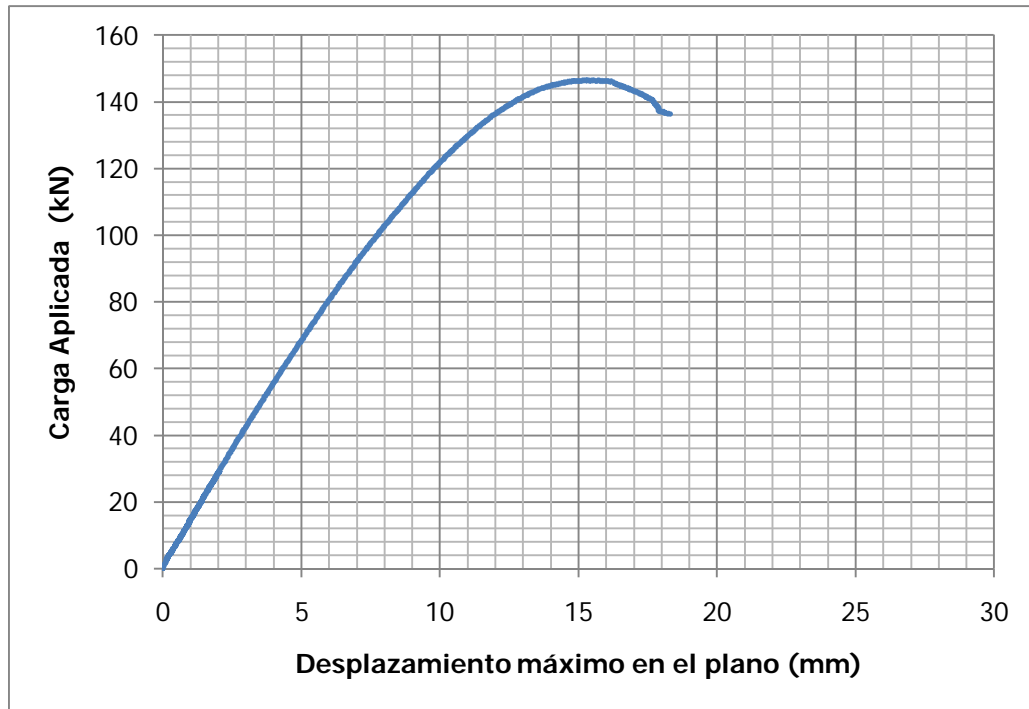


Figura I.25. Gráfico carga-desplazamiento máximo en el plano. Espécimen C3-2.

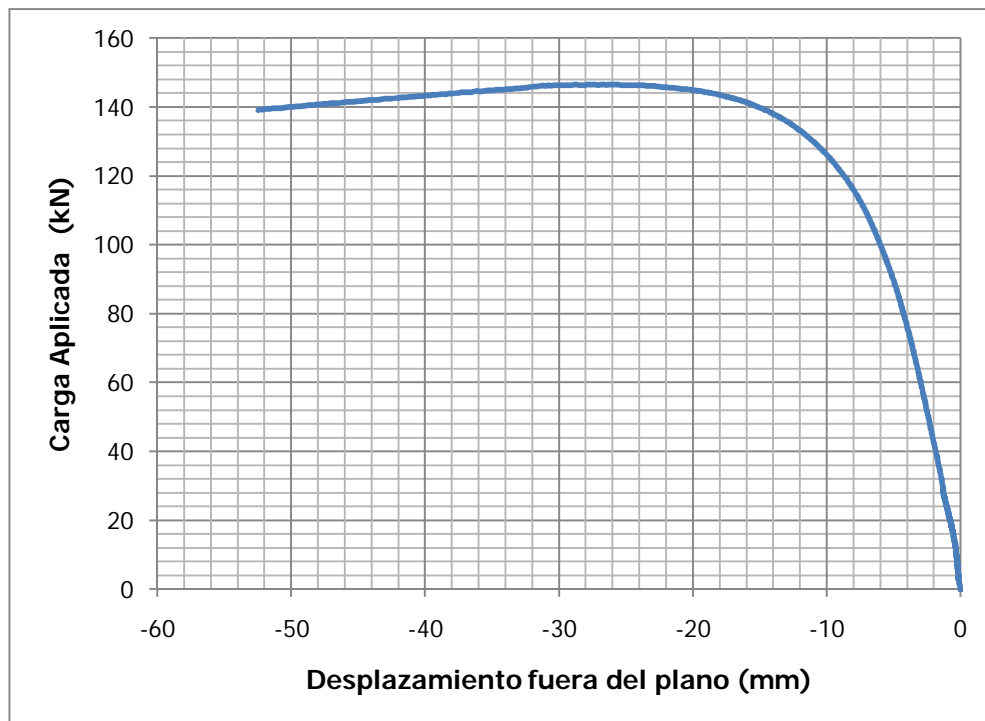


Figura I.26. Gráfico carga-desplazamiento fuera del plano. Espécimen C3-2.

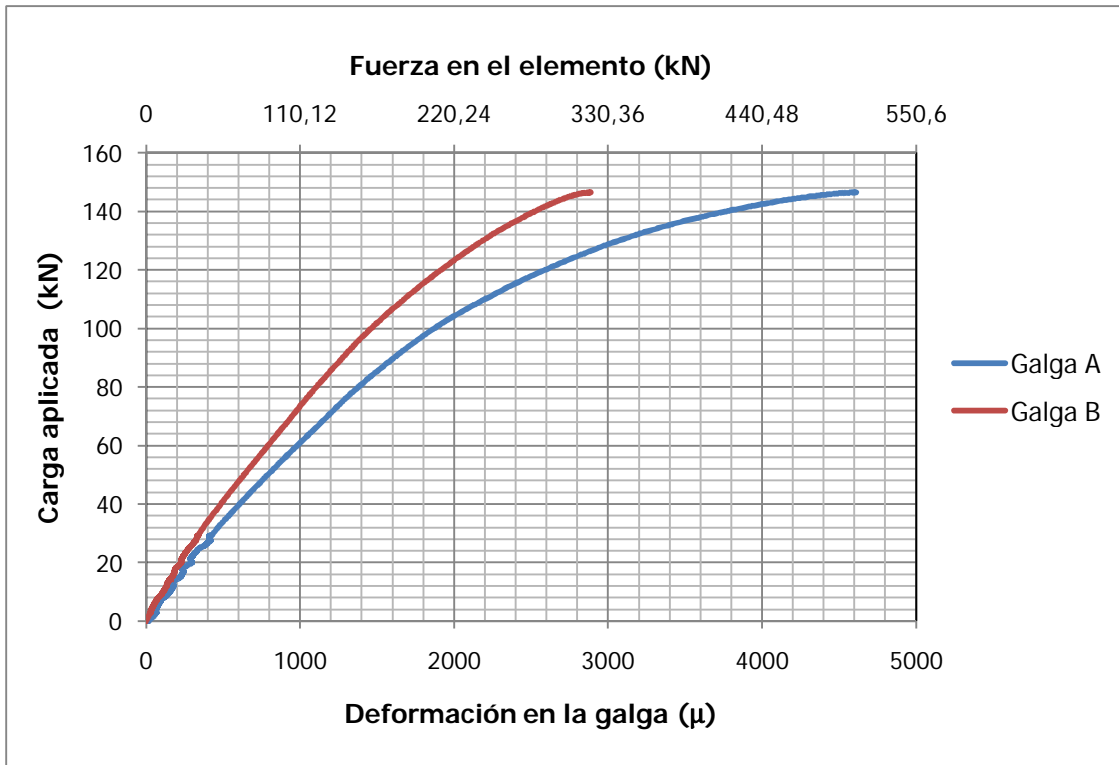


Figura I.27. Gráfico carga-deformación unitaria en las galgas (fuerza elástica en el elemento). Espécimen C3-2.

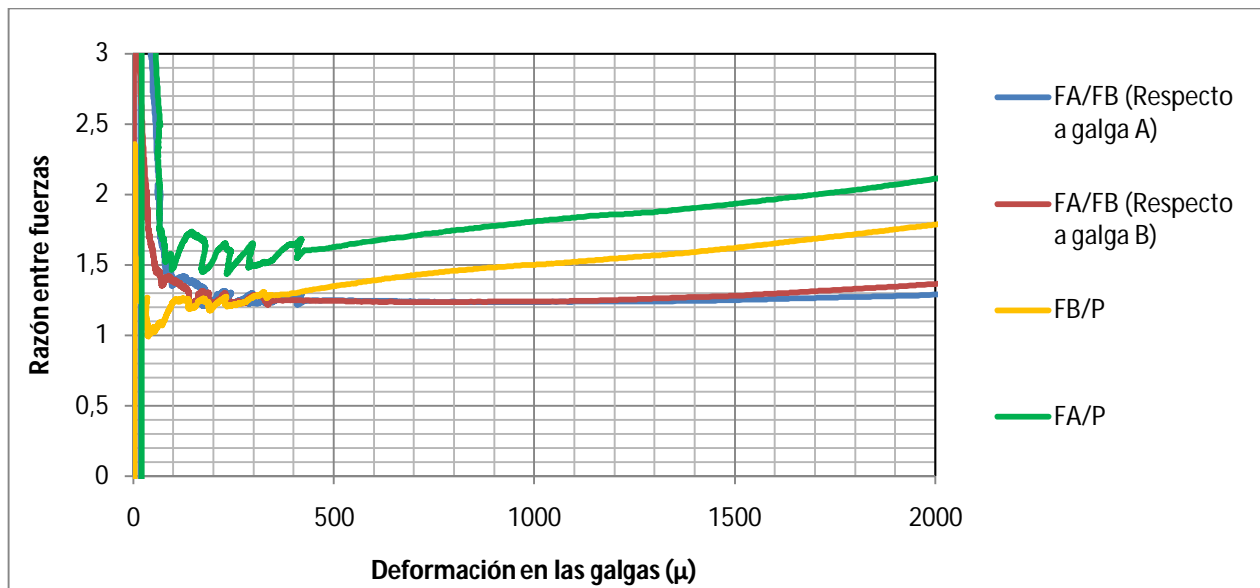


Figura I.28. Gráfico de las relaciones entre las fuerzas elásticas en el elemento, y entre cada fuerza elástica y la carga aplicada. Espécimen C3-2

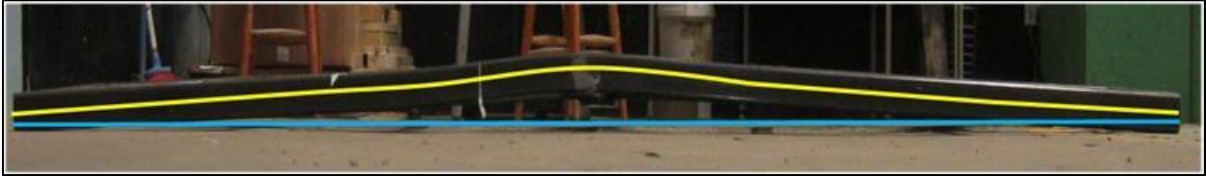


Figura I.29. Forma del pandeo en el espécimen C3-2.

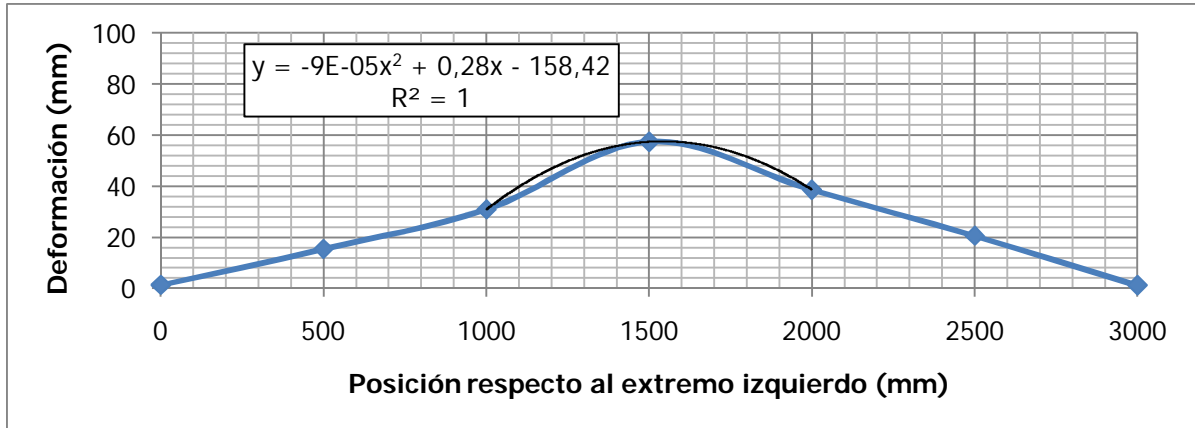
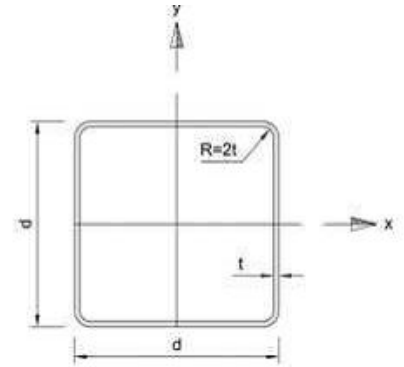


Figura I.30. Gráfico de la forma de pandeo en el espécimen C3-2.

ANEXOS

ANEXO 1. PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LAS SECCIONES DE TUBO ESTRUCTURAL BRINDADAS POR EL FABRICANTE

A = área de la sección	d = peralte de la sección
t = espesor de los perfiles	C_w = constante del alabeo de la sección
J = constante de la torsión de la sección (constante de St. Venant)	r_x = radio del giro de la sección con respecto al eje x
r_y = radio del giro de la sección con respecto al eje y	I_x = momento de inercia de la sección con respecto al eje x
I_y = momento de inercia de la sección con respecto al eje y	S_x = módulo elástico de la sección con respecto al eje x
H. G. = Hierro Galvanizado	H.N. = Laminado en caliente



Nota: Calculado según las expresiones dadas en el manual del AISI

TUBERÍA ESTRUCTURAL CUADRADA EN HIERRO NEGRO Y GALVANIZADA (especificaciones técnicas y propiedades geométricas de las secciones)

SECCIÓN	Largo (m)	d (cm)	t (cm)	A (cm ²)	F _y (Mpa)	I _x = I _y (cm ⁴)	S _x = S _y (cm ³)	r _x = r _y (cm)	Acabado y Peso (kg/unidad)			
									H.N.	H.G.		
50 X 50			1.20 mm	5.0	0.120	2.280	0	8.92	3.57	1.98	11.135	11.346
			1.50 mm	5.0	0.150	2.810	0	10.82	4.33	1.96	13.919	14.13
			1.80 mm	5.0	0.180	3.330	0	12.60	5.04	1.94	16.703	16.914
			2.37 mm	5.0	0.237	4.370	227	16.24	6.50	1.93	21.992	
			3.17 mm	5.0	0.317	5.506	227	19.15	7.66	1.86	28.972	
72 X 72			1.20 mm	7.2	0.120	3.340	0	27.60	7.67	2.88	15.891	16.192
			1.50 mm	7.2	0.150	4.130	0	33.80	9.39	2.86	19.864	20.165
			1.80 mm	7.2	0.180	4.915	0	39.75	11.04	2.84	23.837	24.138
			2.37 mm	7.2	0.237	6.442	227	51.39	14.28	2.82	31.385	
91 X 91			3.17 mm	7.2	0.317	8.296	227	63.54	17.65	2.76	41.831	
			1.50 mm	9.1	0.150	5.330	0	72.10	15.67	3.68	24.83	25.206
			1.80 mm	9.1	0.180	6.355	0	85.17	18.52	3.66	29.796	30.172
			1.50 mm	10.0	0.150	5.813	227	93.18	18.63	4.36	27.418	27.834
100 X 100			1.80 mm	10.0	0.180	6.931	227	110.21	22.04	3.98	32.902	33.317
			2.37 mm	10.0	0.237	9.050	227	141.65	28.33	3.95	43.32	
			3.17 mm	10.0	0.317	11.847	227	181.37	36.27	3.91	57.943	
150 X 150			4.75 mm	10.0	0.475	17.129	227	250.44	50.08	3.82	86.38	
			2.37 mm	15.0	0.237	13.810	227	496.92	66.26	5.99	65.754	
			3.17 mm	15.0	0.317	18.187	227	645.10	86.02	5.96	87.21	
			4.75 mm	15.0	0.475	26.629	227	917.40	122.32	5.86	129.792	

Nota: La fabricación especial se da en los productos de lista, en longitudes de 4 a 12 metros, cantidad mínima 20 unidades.

Utilizar límite de fluencia F_y, según la sección A7.2 de AISI con F_x = 227 Mpa
Límite de fluencia mínimo del acero virgen F_y = 227 MPA / Esfuerzo último mínimo de acero virgen F_u = 310 MPA