



**UNIVERSIDAD LATINA
DE COSTA RICA**
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES®

Universidad Latina de Costa Rica

Facultad de Ingenierías y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

Escuela de Ingeniería Civil

Licenciatura en Ingeniería Civil

Tesis de grado

**EVALUACIÓN POR MÉTODOS ANALÍTICOS DE CURVA HISTERÉTICA DE UNA
CONEXIÓN DE TUBOS DE SECCIÓN CUADRADA Y VIGAS I SIN ATIESADORES
INTERNOS (CONEXIÓN WUF-W)**

Autora: María Amalia Elizondo Herrera

Heredia, Setiembre de 2019



TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: "EVALUACIÓN POR MÉTODOS ANALÍTICOS DE CURVA HISTERÉTICA DE UNA CONEXIÓN DE TUBOS DE SECCIÓN CUADRADA Y VIGAS I SIN ATIESADORES INTERNOS (CONEXIÓN WUF-W).", fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:



ING. GERARDO ENRIQUE CHACÓN ROJAS

TUTOR



ING. WILSON ALBERTO GONZÁLEZ ARROYO

LECTOR



ING. SIRLEY ALVAREZ GONZÁLEZ

REPRESENTANTE DE RECTORÍA

COMITÉ ASESOR

ING. GERARDO ENRIQUE CHACÓN ROJAS
TUTOR

ING. WILSON ALBERTO GONZÁLEZ ARROYO
LECTOR

ING. SIRLEY ALVAREZ GONZÁLEZ
REPRESENTANTE DE RECTORÍA



**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR TUTOR DEL
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD TESIS DE GRADO**

Heredia, 21 de agosto de 2019

Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad Tesis de Grado bajo el título Evaluación por métodos analíticos de curva histerética de una conexión de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (conexión WUF-W) por parte de la estudiante: María Amalia Elizondo Herrera, como requisito para que la citada estudiante pueda optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,



Ing. Gerado Chacón Rojas



**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR LECTOR DEL
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD TESIS DE GRADO**

Heredia, 21 de agosto, de 2019

Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad Tesis de Grado bajo el título Evaluación por métodos analíticos de curva histerética de una conexión de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (conexión WUF-W) por parte de la estudiante: María Amalia Elizondo Herrera, como requisito para que la citada estudiante pueda optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,


Ing. Wilson González Arroyo

Naranjo, 9 de setiembre de 2019

Señores

Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingenierías y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

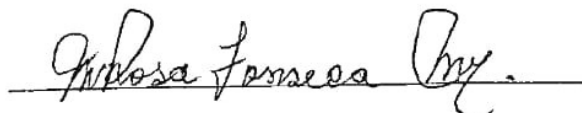
Universidad Latina de Costa Rica

Estimados señores:

Me permito informarles que he realizado la revisión del documento titulado: **Evaluación por métodos analíticos la curva histerética de una conexión de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (conexión WUF-W)**, escrito por la sustentante María Amalia Elizondo Herrera. Este trabajo constituye la Tesis de Grado para la obtención del título de Licenciatura en Ingeniería Civil.

He señalado las diversas correcciones de carácter lingüístico y estilístico hechas a este trabajo, en el entendido de que algunas sugerencias quedan a criterio de la sustentante.

Con gusto brindaré cualquier otra información o aclaración que requiera la Universidad. Atentamente,



Filóloga María. Rosa Fonseca Murillo
Cédula: 2-0271-0938
Carne 4864

Colegio de Licenciados y Profesores
en Letras, Filosofía, Ciencias y Artes Costa Rica



“Carta Autorización del autor(es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016

Instrucción: Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.

Yo (Nosotros):

Escriba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; "

María Amalia Elizondo Herrera

De la Carrera / Programa: **Licenciatura en Ingeniería Civil**
 autor (es) del (de la) (Indique tipo de trabajo): **Tesis de Grado**
 titulado:

Evaluación por métodos analíticos de curva histerética de una conexión de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (conexión WUF-W).

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página web institucional, así como medios electrónicos en general, internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos dentro o fuera de la Red Laureate, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo con lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de esta.

La presente autorización se extiende el día (Día, fecha) **12** del mes **septiembre** del año **2019** a las **9:00 a.m.** . Asimismo declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que conlleva el delito de perjurio: que soy el autor(a) del presente trabajo final de graduación, que el contenido de dicho trabajo es obra original del (la) suscrito(a) y de la veracidad de los datos incluidos en el documento. Eximo a la Universidad Latina; así como al Tutor y Lector que han revisado el presente, por las manifestaciones y/o apreciaciones personales incluidas en el mismo, de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjuicio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores *Según orden de mención al inicio de ésta carta:*

María Amalia

Agradecimientos

A el Ingeniero Gerardo Chacón Rojas por sus conocimientos, apoyo y confianza, durante la elaboración de este proyecto.

A el Ingeniero Wilson González Aroyo por su ayuda, apoyo y conocimientos brindados.

A la Ingeniera Sirley Álvarez Gonzalez por su guía en la elaboración de este documento.

A mi esposo por su motivación constante y su comprensión para conseguir mis propósitos.

A mis padres por su apoyo incondicional en el alcance de mis metas.

A Dios, mis hermanos y mis sobrinos, por su compañía.

Dedicatoria

A mi esposo y mis padres.

Resumen

En la presente investigación se analiza, a través del método de elemento finito, el comportamiento histerético de una conexión de tubos de sección cuadrada, y una viga I (conexión WUF-W). Se hace uso del programa ANSYS, como instrumento para resolver el comportamiento histerético de la conexión.

González (2018), estudió el comportamiento de la conexión de tubos de sección cuadrada, y una viga I (conexión WUF-W), con atiesadores internos, haciendo uso del programa ANSYS, con lo cual logró obtener resultados de gran similitud, con la investigación realizada a escala real, por Saneei, Ghassemieh y Mazroi (2013).

El objetivo de esta investigación es determinar, si la conexión estudiada por Saneei, Ghassemieh y Mazroi, sin atiesadores internos, cuenta con resistencia a flexión y se puede asignar como una conexión útil para un marco clasificado como SMF o bien IMF, pues la construcción de la conexión con atiesadores internos, es un proceso que requiere personal con alta destreza en soldadura, y existe la posibilidad de que, en los atiesadores internos se generen fracturas frágiles alrededor de la soldadura, disminuyendo la resistencia de la conexión ante una carga cíclica.

Así pues, se sigue el modelado de la conexión y la aplicación del protocolo de ángulos de deriva, utilizado por González en el programa ANSYS para la determinación de los resultados. Se estudian tres especímenes cuya geometría difiere en tamaño: DCS, DCM y DCL, y además dos especímenes adicionales los cuales incorporan diafragmas externos alrededor de la columna, estos especímenes poseen el mismo tamaño de columna y viga que el espécimen DCL.

Se determinan el momento plástico de la viga, los diagramas de histéresis de los especímenes en estudio, los esfuerzos equivalentes de Von Mises y el equivalente plástico.

Los resultados demuestran que la conexión sin atiesadores internos, no cumple con los requisitos para ser utilizada en un marco SMF o uno IMF, ni tampoco lo hace, cuando cuenta con los diafragmas externos.

Palabras clave: conexión, histéresis, método de elemento finito, carga cíclica, esfuerzos, resistencia.

Abstract

In this investigation, the hysteretic behavior of a hollow section tube connection and a W beam (WUF-W connection) is analyzed through the finite element method. The ANSYS program is used as an instrument to solve the hysterical behavior of the connection.

González (2018), studied the behavior of the connection of hollow section tubes and a W beam (WUF-W connection), with internal stiffeners, using the ANSYS program. The results obtained were of great similarity with the research carried out on a real scale by Saneei, Ghassemieh and Mazroi (2013).

The objective of this investigation is to determine if the connection studied by Saneei, Ghassemieh and Mazroi, without internal stiffeners, has flexural strength and can be assigned as a useful connection for an SMF or IMF. The construction of the connection with internal stiffeners is a process that requires personnel with high welding skills, and there is the possibility of the formation of fragile fractures around the weld in the internal stiffeners, reducing the resistance of the connection to a cyclic load. Therefore, it would be desirable to eliminate the internal stiffeners, not only for construction case but to reduce connection vulnerability.

The connection modeling and the application of the drift angle protocol, used by González in the ANSYS program for the determination of the results, are followed. Three specimens whose geometry differ in size are studied: DCS, DCM and DCL, and also two additional specimens which incorporate external diaphragms around the column, these specimens have the same column and beam size as the DCL specimen.

The plastic moment of the beam, the hysteresis diagrams of the specimens under study, the equivalent stresses of Von Mises and the plastic equivalent are determined.

The results show that the connection without internal stiffeners does not meet the requirements to be used in an SMF or an MFI frame, nor does it when it has external diaphragms.

Keywords: connection, hysteresis, finite element method, cyclic load, stress, resistance.

Índice de Contenidos

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema de investigación.....	3
1.3 Hipótesis	4
1.4 Objetivo general.....	4
1.5 Objetivos específicos	4
1.6 Justificación	4
1.7 Alcances.....	5
1.8 Limitaciones.....	6
1.9 Impacto	6
Capítulo 2. Marco Teórico	8
2.1 Materiales.....	8
2.1.1 Acero estructural.....	8
2.1.2 Soldadura	10
2.2 Sistemas de marcos estructurales resistentes a momento	11
2.2.1 Marcos especiales (SMF).....	11
2.2.2 Marcos intermedios (IMF).....	12
2.2.3 Marcos ordinarios (OMF)	13
2.3 Clasificación por capacidad de rotación de conexiones viga-columna	13
2.4 Conexión WUF-W	14
2.5 Definición de histéresis.....	15
2.6 Teoría del método de elementos finitos	17
2.7 Marco Situacional	18
Capítulo 3. Marco Metodológico.....	20

3.1 Paradigma, enfoque metodológico y método de investigación propuestos	20
3.2 Categorías de análisis de la investigación (operacionalización de variables).....	21
3.2.1 Configuración del método de elemento finito en el programa ANSYS	22
3.2.2 Modelado de geometría.....	22
3.2.3 Condiciones de frontera	24
3.2.4 Protocolo de ángulos de deriva	26
3.2.5 División de dominio en elementos.....	30
3.2.6 Contacto entre piezas	34
3.3 Población y muestra.....	34
3.3.1 Geometría de especímenes en estudio	34
3.3.2 Propiedades mecánicas de especímenes en estudio.....	38
3.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	40
3.5 Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de los datos.....	42
3.5.1 Validación y certeza de los resultados	42
Capítulo 4. Análisis de resultados.....	43
4.1 Resultados de histéresis de la conexión de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (WUF-W).....	43
4.2. Comparación de resultados de histéresis de la conexión de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (WUF-W) contra la conexión con atiesadores internos.....	48
4.3 Distribución de esfuerzos equivalentes de Von Mises para especímenes	51
4.4 Equivalente plástico de especímenes	58
4.5 Comportamiento de conexión incorporando placas cuadradas alrededor de columna	61
4.5.1 Resultados de histéresis	62
4.5.2 Distribución de esfuerzos equivalentes de Von Mises de especímenes	66
4.5.3 Equivalente plástico de especímenes	67
4.6 Estadística de la solución de los análisis virtuales.....	69

4.7 Capacidad computacional utilizada y estadísticas de la solución de los análisis virtuales.	70
Conclusiones.....	71
Recomendaciones	73
Referencias Bibliográficas	74

Índice de Tablas

Tabla 1. Parámetros especificados para tipos de acero.....	9
Tabla 2. Propiedades mecánicas para material de aporte en soldaduras del sistema sismorresistente.	10
Tabla 3. Protocolo de ángulos de deriva del ANSI/AISC 341-16, para conexiones resistentes a momento en SMF y IMF.....	21
Tabla 4. Proceso de modelado de espécimen DCM.	23
Tabla 5. Características de malla para cada espécimen.	31
Tabla 6. Perfiles de vigas y secciones transversales de las columnas po utilizar en el modelado de la conexión WUF-W (González, 2018).	36
Tabla 7. Datos utilizados para la curva esfuerzo deformación de los aceros utilizados.....	39
Tabla 8. Momento plástico para cada espécimen en estudio.	43
Tabla 9. Momento máximo alcanzado para cada espécimen a 0.02 rad y 0.04 rad.....	43
Tabla 10. Momento máximo alcanzado para cada espécimen a 0.02 rad y 0.04 rad.....	62
Tabla 11. Estadísticas de las mallas para cada espécimen estudiado.	69
Tabla 12. Estadística del proceso de datos para cada espécimen estudiado.	69

Índice de Figuras

Figura 1. Fractura de soldadura de penetración completa en una conexión de pórtico resistente a momento. Fuente: Crisafulli, 2018.	1
Figura 2. Curvas características de esfuerzo-deformación. Fuente: McCormac & Cserneck; 2013.	9
Figura 3. Soldadura de penetración completa. Fuente: American Welding Society, 2019.	11
Figura 4. Comportamiento inelástico de marcos, con rótulas plásticas en luz de vigas. Fuente FEMA-350, modificado por autora.....	12
Figura 5. Curva de momento-rotación para clasificación de conexiones. Fuente: Cabezas, 2011.	15
Figura 6. Conexión WUF-W. Fuente González, 2018.....	15
Figura 7. Ciclo de histéresis de cargas cíclicas: ciclo de inversión completa. Fuente: Nuñez, Roca & Jorba, s.f.....	16
Figura 8. a) Ciclo de variación de tensión constante. b) Ciclo de disminución de deformación con el número de ciclos. c) Aumento de la deformación con el número de ciclos. d) Ciclo de histéresis con endurecimiento. e) Ciclo de histéresis con ablandamiento. Fuente: Nuñez, Roca & Jorba, s.f.	17
Figura 9. Malla de elemento finito de un cuerpo. Fuente: Alawadhi, 2010, modificada por autora.	18
Figura 10. Verificación de modelado: a) Espécimen experimental; b) Modelo de elemento finito. Fuente: Fanaie & Moghadam, 2019.....	19
Figura 11. Comparación de resultados de pandeo local en la rótula plástica para el espécimen DC-S. Fuente: González, 2018.	19
Figura 12. Célula de análisis estructural estático de ANSYS Workbench. Fuente: ANSYS Workbench, modificado por autora.	22
Figura 13. Banco de pruebas de modelo a escala real de conexión WUF-W de columna de sección cuadrada y viga I con atiesadores internos. Fuente: Saneei, Gassemieh, & Mazroi, 2013, modificado por autora.	24
Figura 14. Restricción de movimiento en caras de extremos de la columna y barras de pandeo torsional, para simulación virtual Fuente: Programa ANSYS Mechanical, modificado por autora.	25

Figura 15. Ensamble de pruebas para rotación angular. Fuente: FEMA, 2000, modificada por autora.....	26
Figura 16. Protocolo de desplazamientos para espécimen DCL. Fuente propia.	27
Figura 17. Protocolo de desplazamientos para espécimen DCM. Fuente propia.	28
Figura 18. Protocolo de desplazamientos para espécimen DCS. Fuente propia.....	28
Figura 19. Detalles de comando desplazamiento en programa ANSYS Mechanical. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.	29
Figura 20. Selección de caras, sobre las cuales se aplicará el desplazamiento, caras de punta de la viga en color amarillo. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.	29
Figura 21. Dimensionamiento de malla utilizado en el modelo de elemento finito. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.	32
Figura 22. Menú para definición de características de mallado. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.	33
Figura 23. Detalles de agujeros de acceso y placas de refuerzo cortantes de la conexión. Fuente: Saneei, Gassemieh, & Mazroi, 2013, modificado por autora.	35
Figura 24. Detalle de conexión para espécimen DCL PC1. Fuente: propia.	37
Figura 25. Detalle de conexión para espécimen DCL PC2. Fuente: propia.	38
Figura 26. Curva de esfuerzo deformación para los aceros utilizados en los componentes de la conexión. Fuente propia.....	39
Figura 27. Esfuerzos de Von Mises en viga I, conectada a columna de sección cuadrada (conexión WUF-W). Fuente: González, 2018.	40
Figura 28. Esfuerzos de Von Mises, en conexión de viga I y columna de sección cuadrada (conexión WUF-W). Fuente: González, 2018.	41
Figura 29. Equivalente plástico, para conexión de viga I y columna de sección cuadrada (conexión WUF-W). Fuente: González, 2018.	41
Figura 30. Diagrama de histéresis de espécimen representativo DCS. Fuente: propia.	44
Figura 31. Diagrama de histéresis de espécimen representativo DCM. Fuente: propia.	45
Figura 32. Diagrama de histéresis de espécimen representativo DCL. Fuente: propia.	46
Figura 33. Especimen de conexión soldada directamente sin refuerzo, ECS1. Fuente: del Campo Flores & Gómez Bernal, 2010.	47

Figura 34. Comportamiento de conexión entre tubo HSS 12x12x1/2 y una viga W16x36, ante cargas cíclicas. Fuente: del Campo Flores & Gómez Bernal, 2010.....	48
Figura 35. Comparación de diagrama de histéresis de espécimen DCS, con atiesadores internos y sin ellos. Fuente: propia.	49
Figura 36. Comparación de diagrama de histéresis de espécimen DCM, con atiesadores internos y sin ellos. Fuente: propia.	50
Figura 37. Comparación de diagrama de histéresis de espécimen DCL, con atiesadores internos y sin ellos. Fuente: propia.	50
Figura 38. Especimen de conexión soldada directamente con atiesadores internos como refuerzo. Fuente: del Campo Flores & Gómez Bernal, 2010.....	51
Figura 39. Comparación de esfuerzos de Von Mises para conexión sin atiesadores (arriba) y con estos (abajo), espécimen DCS. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.	52
Figura 40. Esfuerzos de Von Mises máximos presentados para espécimen DCS. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.	53
Figura 41. Modos de falla de conexión entre viga I y columna tubular. Fuente: Wardenier, Packer, Zhao, & van der Vegte, 2010, modificado por autora.	54
Figura 42. Fenómeno de falla en conexiones soldadas bajo cargas cíclicas. Fuente: Song, Heidarpour, Zhao, & Han, 2015, modificado por autora.....	54
Figura 43. Comparación de esfuerzos de Von Mises, para conexión sin atiesadores (arriba) y con estos (abajo), espécimen DCM. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.....	56
Figura 44. Esfuerzos de Von Mises máximos presentados para espécimen DCM. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.	57
Figura 45. Esfuerzos de Von Mises máximos presentados para espécimen DCL. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.	57
Figura 46. Comparación de esfuerzos de Von Mises, para conexión sin atiesadores (arriba) y con ellos (abajo), espécimen DCL. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.	58
Figura 47. Equivalente plástico de espécimen DCS. Comparación de equivalente plástico entre conexión sin atiesadores (arriba) y con estos (abajo). Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.....	59

Figura 48. Equivalente plástico de espécimen DCM. Comparación de equivalente plástico entre conexión sin atiesadores (arriba) y con atiesadores (abajo). Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.	60
Figura 49. Equivalente plástico de espécimen DCL. Comparación de equivalente plástico entre conexión sin atiesadores (arriba) y con estos (abajo). Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.....	61
Figura 50. Diagrama de histéresis de espécimen representativo DCL PC1. Fuente: propia.	63
Figura 51. Diagrama de histéresis de espécimen representativo DCL PC2. Fuente: propia.	63
Figura 52. Conexión resistente a momento con diafragmas externos. Fuente: del Campo Flores & Gómez Bernal, 2010.	64
Figura 53. Conexiones entre vigas I y columnas de sección cuadrada con diafragmas externos resistentes a momento. a) Propuesta por AIJ por sus siglas en inglés (Architectural Institute of Japan). b) Propuesta de Mitnusari et al (2001). Fuente: Kurobane, Packer, Wardenier & Yeomans, 2004, modificado por autora.	65
Figura 54. Esfuerzos de Von Mises máximos, presentados para espécimen DCL PC1. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.	66
Figura 55. Esfuerzos de Von Mises máximos, presentados para espécimen DCL PC2. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.	67
Figura 56. Equivalente plástico de espécimen DCL PC1. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.	68
Figura 57. Equivalente plástico de espécimen DCL PC2. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.	68

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

Las conexiones han sido estudiadas con mayor repercusión tras los sismos de Northridge (1994) y Kobe (1995), en donde conexiones diseñadas con normativas vigentes para la época, sufrieron daños importantes e inesperados como fallas frágiles. Ambos terremotos afectaron zonas de dos países considerados líderes en ingeniería sismorresistente: Estados Unidos y Japón; y dañaron severamente las construcciones metálicas. En ambos eventos no se registraron colapsos de edificios con estructuras de acero, y tras varias inspecciones se logró determinar un mal comportamiento de las conexiones de los pórticos resistentes a momento (sin arriostramientos), particularmente en los nudos viga-columna, en donde ocurrieron distintos tipos de falla por fractura en la soldadura y placas (Crisafulli, 2018). En la Figura 1 se puede apreciar una fractura de la soldadura de penetración completa que se apreció posterior al terremoto de Northridge.



Figura 1. Fractura de soldadura de penetración completa en una conexión de pórtico resistente a momento. Fuente: Crisafulli, 2018.

Aun siendo obvio el deterioro en la resistencia inducido por estas fracturas, las estructuras permanecieron estables, por lo que fue necesario remover elementos arquitectónicos y protecciones contra el fuego que usualmente cubren las estructuras de acero, para poder visualizar

los daños ocasionados por el terremoto. Este proceso generó pérdidas cuantiosas, en algunos casos era más viable económicamente, demoler los edificios que repararlos (Zambrano , 2008).

Tras los daños observados en los terremotos mencionados, en 1994, se desarrolló en Estados Unidos un programa denominado SAC (siglas surgen del nombre de las tres organizaciones que forman el consorcio: SEAOC, ATC y CUREE). Este programa generó información de gran valor para el diseño sismorresistente de estructuras en acero, los avances obtenidos fueron publicados por la Agencia Federal de Administración de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés), e incorporada en las especificaciones sísmicas del Instituto Americano de Construcción de Acero (AISC, por sus siglas en inglés).

En el año 2000, se publica el documento denominado Recomendaciones y Criterios de Diseño para Nuevos Edificios de Marcos de Acero (FEMA-350), el cual plantea metodologías de diseño para conexiones viga-columna, que mostraron un comportamiento adecuado en el proceso de investigación (FEMA, 2000).

Posteriormente el AISC publica su propia especificación para conexiones de momento viga-columna, denominado Conexiones Precalificadas para Aplicaciones Sísmicas en Marcos de Momento Intermedio y Especiales (AISC 358). Este documento se amplió en el 2016, en el AISC 358-16, la versión actual contempla diez tipos de conexiones (ANSI/AISC, 2016), dentro de las cuales se encuentra la conexión a momento WUF-W, por sus siglas en inglés. La unión WUF-W posee una serie de limitaciones, requeridas para su precalificación.

Adicionalmente la AISC cuenta con una especificación denominada Provisiones Sísmicas para Edificios de Acero Estructural (AISC 341-16), la cual cuenta con los requisitos de las pruebas cíclicas de calificación para las conexiones de momento, en su Anexo K (ANSI/AISC, 2016).

Saneei, Ghassemieh y Mazroi, estudiaron el comportamiento de una conexión de momento de tubos de sección cuadrada y vigas I (conexión WUF-W) con atiesadores, ante pruebas cíclicas de carga. Los resultados de la investigación indican que la conexión cumple con los criterios de precalificación de un marco especial de momento (SMF). Adicionalmente tras estudios analíticos determinaron que, para cumplir con el comportamiento esperado bajo cargas biaxiales, la zona panel debe poseer una relación columna fuerte-viga débil superior que la sugerida por el AISC. Adicionalmente los estudios analíticos revelaron que los atiesadores internos pueden no ser adecuados debido al potencial de fractura en la soldadura. Los estudios analíticos de esta

investigación se realizaron utilizando el sistema computacional denominado ABAQUS (Saneei, Gassemieh, & Mazroi, 2013).

La presencia de la fractura en la soldadura presente en los atiesadores internos, también fue presentada por Kim, Stojadinovic y Whittaker. En este estudio se concluye, que el pandeo local de la columna de sección cuadrada de cara a la viga, se convierte en un problema a niveles altos de rotación (Kim, Stojadinovic, & Whittaker, 2002).

González evaluó el rendimiento dúctil de la conexión de acero estudiada por Saneei et al, “siguiendo el protocolo de ángulos de deriva inelástica dispuesto por la normativa del AISC, mediante el método de elementos finitos, auxiliado por el programa de análisis estructural de medios continuos ANSYS Workbench 18.1.” (González, 2018). En donde los resultados obtenidos lograron determinar que el programa ANSYS tiene cualidades para la aplicación preliminar de la calificación en la conexión WUF-W, pues se obtuvieron resultados similares a los expuestos en la investigación de Saneei et al.

En la presente investigación se quiere corroborar si la conexión estudiada por Saneei et al, cumple con los criterios de precalificación, en caso de no contar con los atiesadores internos que poseen potencial de fractura en la soldadura.

El interés en conocer el comportamiento de una conexión entre una columna de tubos de sección cuadrada y una viga I (conexión WUF-W), radica en su facilidad constructiva y el alto uso que se da a las columnas de sección cuadrada en nuestro país. Adicionalmente el uso de tubos de sección cuadrada como columnas tienen mayor resistencia a esfuerzos biaxiales que su equivalente en una sección I y permite el uso de estructuras de menor peso (Nakashima, Roeder, & Maruoka, 2000).

1.2 Planteamiento del problema de investigación

El comportamiento de una conexión de momento de tubos de sección cuadrada y vigas I (WUF-W) con atiesadores internos en la columna, requiere de una construcción con detalles que pueden ser delicados y propiciar fractura en las soldaduras presentes en los atiesadores (Saneei, Gassemieh, & Mazroi, 2013). Surge entonces la inquietud de analizar por métodos analíticos el comportamiento de la misma unión sin los atiesadores internos en la columna, mediante el programa computacional ANSYS. Y responder la siguiente pregunta: ¿Es la conexión en estudio resistente a momento y satisface los requerimientos de un marco especial de momento o de un marco intermedio de momento?

1.3 Hipótesis

Se considera que eliminando los atiesadores internos a la conexión, el tubo de la columna soporte la mayor concentración de esfuerzos que serán trasladados por las alas de la viga, con lo cual la conexión resulte resistente a momento. Además, la resistencia a la flexión con la que cuente la conexión, determinará si se cumple con los requerimientos de un marco SMF ó un marco IMF.

1.4 Objetivo general

Evaluar por métodos analíticos la curva histerética de una conexión de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (conexión WUF-W).

1.5 Objetivos específicos

1. Modelar especímenes virtuales representativos de la conexión en estudio en el programa computacional ANSYS.
2. Analizar el comportamiento de los especímenes virtuales mediante la aplicación del protocolo de ángulos de deriva del AISC, en el programa computacional ANSYS.
3. Demostrar si la conexión en estudio satisface o no los requerimientos de un marco especial de momento o de un marco intermedio de momento.
4. Investigar el comportamiento de un espécimen al añadir placas cuadradas alrededor de la columna, mediante la aplicación del protocolo de ángulos de deriva del AISC, en el programa computacional ANSYS.

1.6 Justificación

El uso del acero estructural provee ventajas al diseño estructural y al proceso de construcción. El acero estructural es un material con alta resistencia por unidad de peso, posee propiedades uniformes en todo el elemento, es elástico, dúctil y tenaz. Adicionalmente presenta gran facilidad para unir diversos miembros por medio de conexiones, para la prefabricación, el montaje y la disposición de laminarse en diversas formas (McCormac & Cserneck, 2013).

Los edificios de acero estructural superan a los edificios de concreto reforzado en área disponible para ser utilizada, flexibilidad de espacio interno, capacidad de reciclaje, tasa de reciclaje, menor consumo de agua, tasa de desechos sólidos generados, ahorro en mano de obra y duración de la construcción (Zhong & Wu, 2015). Sin embargo, parte de las ventajas del uso de edificaciones en concreto reforzado, se basa en el cuantioso número de investigaciones realizadas para conocer su comportamiento ante un evento sísmico.

La resistencia y el comportamiento de estructuras de acero ante eventos sísmicos ha sido estudiado por daños ocurridos a estas edificaciones durante terremotos, y hoy los ingenieros intentan entender a cabalidad el comportamiento de las estructuras de acero.

La cultura en las prácticas ingenieriles varía de acuerdo a cada país. En Costa Rica, un país de alta sismicidad, los edificios pequeños a base de marcos de acero, han ido aumentando en número y se hace evidente la necesidad de revisar, entender y establecer metodologías de análisis de conexiones en sistemas sismorresistentes y otros elementos estructurales.

Dentro de los componentes estructurales fabricados en acero, las conexiones viga-columna son un elemento de gran valor en el comportamiento sismorresistente de las edificaciones. Del diseño, construcción e inspección de una conexión dependerá el comportamiento adecuado de los marcos resistentes a momento. Alejándose las concentraciones de esfuerzos de la conexión y generando rótulas plásticas en las zonas esperadas de la viga (FEMA, 2000).

Según Cabezas (2012), los detalles en las conexiones de acero requieren de amplios conocimientos en soldadura y mano de obra altamente calificada, que empresas dedicadas a la construcción de edificios en nuestro país no toman en consideración por el alto costo, debido a este factor el uso de conexiones con alta complejidad de elaboración puede generar problemas a los proyectos.

Las columnas de sección cuadrada son muy utilizadas en países con alto riesgo sísmico, por ende, estudiar el comportamiento de una conexión entre tubos de sección cuadrada y vigas I (conexión WUF-W) es importante. Además, debe considerarse que una columna de sección cuadrada posee menor rigidez en la zona panel en comparación con una columna de sección I.

La conexión a estudiar permitiría realizar una unión entre una columna de sección cuadrada y una viga I, favoreciendo el proceso de construcción, en la medida que no se incorporan los atiesadores a lo interno de la columna. El análisis permitiría conocer el comportamiento de la conexión y evaluar si su rendimiento permite ser asignada a un marco especial de momento o un marco intermedio de momento.

1.7 Alcances

1. Se analizará la conexión de acero de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (conexión WUF-W), siguiendo las pruebas de calificación de las normas del AISC, mediante el uso del software ANSYS 18.2 y su plataforma ANSYS Workbench 18.2.

2. Se obtendrán los diagramas de histéresis mediante simulaciones virtuales del proceso de prueba de calificación, mediante el uso del software ANSYS 18.2 y su plataforma ANSYS Workbench 18.2.
3. La evaluación de los resultados obtenidos se hará con base en los lineamientos expuestos en las normas ANSI/AISC 341-16, FEMA 350, ANSI/AISC 358-16, ANSI/AISC 360-16 y en el Capítulo 10 y Anexo B del Código Sísmico de Costa Rica (CSCR).
4. Se evaluará si las conexiones son resistentes a momento mediante el protocolo de ángulos de deriva establecido en ANSI/AISC 341-16.

1.8 Limitaciones

1. Solamente se analizará la conexión mediante un ensamble simple, como lo indica la normativa para las pruebas de calificación. No se realizarán análisis de marcos o estructuras compuestas por la conexión.
2. Para el análisis de elementos finitos haciendo uso del programa ANSYS Workbench 18.2, se debe realizar el mallado de los elementos en estudio. Debido a que se cuenta con una capacidad computacional limitada, la calidad de las mallas de elementos finitos se ajustará para lograr la obtención de resultados.
3. Los detalles presentes en el diseño de la conexión que requieran de cortes en ángulo o biseles en las soldaduras de penetración completa de la zona protegida de la conexión, requieren de un número elevado de elementos finitos para su análisis. Por lo tanto, en dichos casos se utilizará la unión de las áreas en contacto por medio de un comando que idealiza la unión entre las piezas como si estuviesen soldadas.
4. Se parte de la calibración del programa a partir de resultados de pruebas reales de una conexión de momento de tubos de sección cuadrada y vigas I con atiesadores internos.

1.9 Impacto

La metodología de investigación a través del uso de los métodos analíticos permite estudiar las conexiones y evaluarlas, obteniendo resultados con alto grado de similitud a los obtenidos en una prueba realizada con una conexión a escala real.

Los métodos analíticos generan la posibilidad de realizar infinidad de pruebas sobre un espécimen virtual. Por lo tanto, es posible optimizar el diseño de una conexión antes de llevarla a una prueba de escala real, a un costo económico mucho menor, en comparación con optimizar una conexión realizando las pruebas a escala real.

Se busca a través del método analítico asegurar si el comportamiento de la conexión en estudio puede ser utilizada en nuestro país u otra zona de alta sismicidad y bajo qué condiciones puede ser utilizada. De esta manera se permite ampliar el conocimiento de la sociedad ingenieril de nuestro país, con el propósito de que el diseño general de estructuras en acero sea viable, económico y ante todo procure proteger la vida humana y reducir las pérdidas económicas que se generan en los eventos sísmicos.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Materiales

2.1.1 Acero estructural

El acero estructural está caracterizado por su alta resistencia, uniformidad, elasticidad, durabilidad, ductilidad, tenacidad, fatiga y de alto grado de importancia se debe mencionar su relación esfuerzo-deformación. “No pueden desarrollarse métodos satisfactorios de diseño, a menos que se disponga de información completa relativa a las relaciones esfuerzo-deformación del material que se usa” (McCormac & Cserneck, 2013).

Si se somete una pieza de acero dúctil a una fuerza de tensión, la pieza se alargará. Al aumentar la fuerza a una razón constante, la magnitud del alargamiento aumentará en forma lineal dentro de ciertos límites. El punto más alto de la porción lineal se denomina límite proporcional. Posteriormente el esfuerzo en el que se presenta un incremento brusco en el alargamiento se denomina esfuerzo de fluencia. La deformación que ocurre posterior al esfuerzo de fluencia se denomina deformación plástica, un esfuerzo adicional genera el endurecimiento por deformación.

Las características del acero estructural estarán directamente relacionadas con su composición química y su relación entre el contenido de hierro, quien es su componente mayor, y carbono u otros componentes como silicio, manganeso, azufre, fósforo, cromo, níquel o silicio. En la Figura 2 se observa el diagrama esfuerzo-deformación para diferentes aceros, se puede observar la variación relacionada con su composición y proceso de fabricación (McCormac & Cserneck, 2013).

Según el CSCR:

Los aceros para la fabricación de perfiles y placas de acero estructural utilizados en elementos componentes y uniones de los sistemas sismorresistentes deben satisfacer una de las siguientes especificaciones de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials, ASTM) en su última revisión: A36, A53, A500 (grado B o C), A501, A529, A572 (grado 42, 50 o 55), A588, A913 (grado 50, 60 o 65), A992, A1011 (grado 55), A1043 o especificaciones equivalentes internacionalmente reconocidas (p. 10/2).

A continuación, se muestran las propiedades del acero estructural ASTM A36 y A572, los cuales serán los materiales de referencia en la presente investigación.

Tabla 1. Parámetros especificados para tipos de acero.

Norma ASTM	Límite proporcional elástico	Tensión última
	F_y (MPa)	F_u (MPa)
A36	250	400
		550
A572	345	450
	414	515
	451	550

Nota: Recuperado de González, 2018.

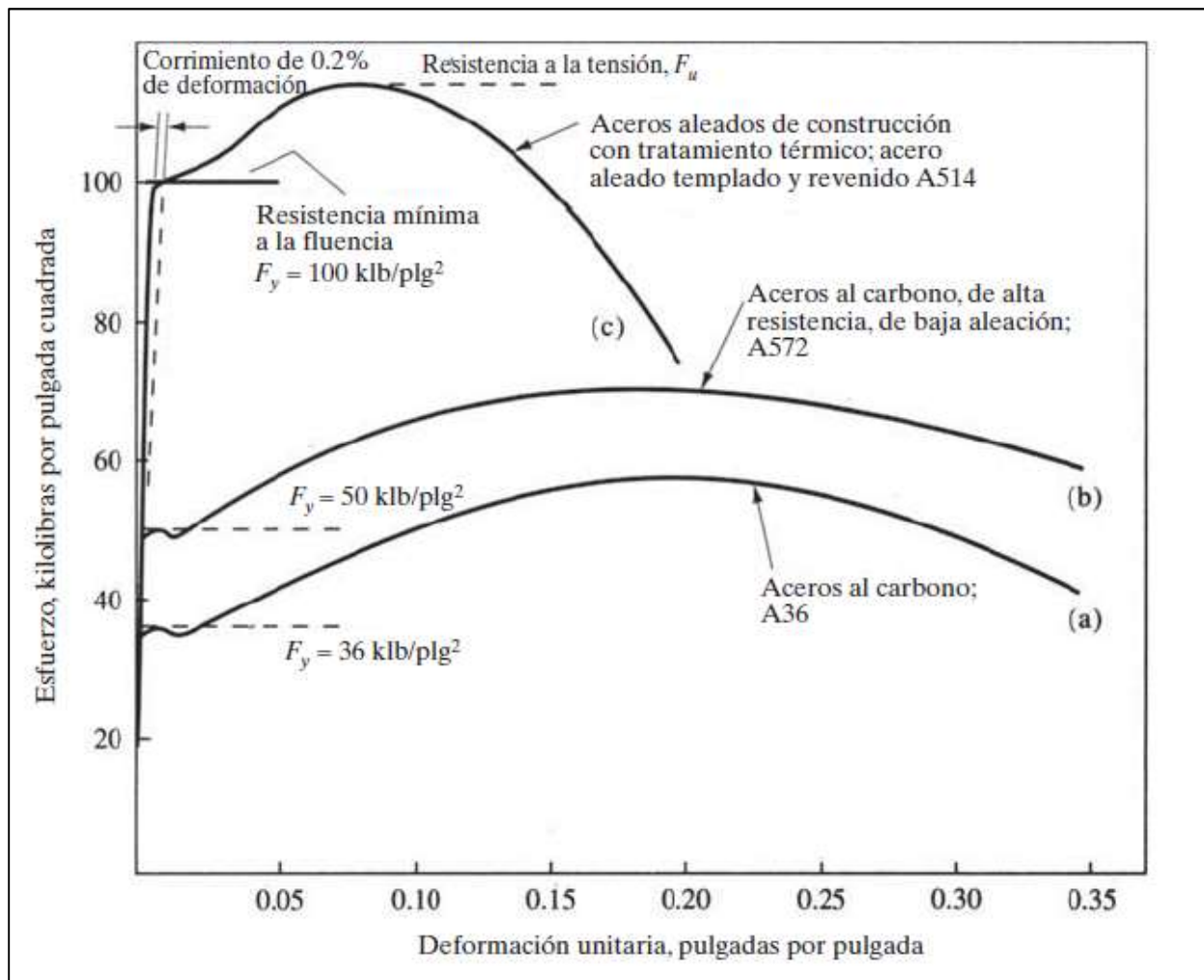


Figura 2. Curvas características de esfuerzo-deformación. Fuente: McCormac & Cserneck; 2013.

2.1.2 Soldadura

La soldadura permite unificar partes metálicas mediante el calentamiento de superficies a un estado plástico, generando la unión entre las partes. Las propiedades mecánicas para material de aporte en soldaduras críticas por demanda, se observan en el Cuadro a continuación. La soldadura crítica por demanda, corresponde a una soldadura que es parte del sistema sismorresistente, la cual generalmente es sometida a esfuerzos de fluencia (Stockmann & Schlafly, 2008).

Tabla 2. Propiedades mecánicas para material de aporte en soldaduras del sistema sismorresistente.

Propiedades	Clasificación del material de aporte	
	Grado 70 (480 MPa)	Grado 80 (550 MPa)
Esfuerzo de cedencia F_y (MPa)	398 mínimo.	466 mínimo.
Esfuerzo último F_u (MPa)	480 mínimo	550 mínimo
Elongación	22 mínimo.	19 mínimo.
Tenacidad de Charpy CVN¹	552 kg-cm a una temperatura de -18°C.	

Nota: Recuperado de CSCR, 2010.

La prueba de tenacidad de Charpy, permite conocer el comportamiento que tienen los materiales al impacto. Se determina la cantidad de energía por deformación absorbida por un material durante la fractura. Y se clasifica el comportamiento de un material como frágil o dúctil. Asociando un comportamiento dúctil a altos niveles de deformación plástica (Ortega, 2006).

Generalmente las soldaduras del sistema sismorresistente corresponden a soldaduras de penetración completa o CJP por sus siglas en inglés *Complete Joint Penetration*. Esta soldadura presenta una ranura en la que el metal de soldadura se extiende a través del espesor de la junta (American Welding Society, 2019), como se observa en la Figura a continuación. Se espera una mayor demanda de esfuerzos en la soldadura del sistema sismorresistente, por lo que su falla resultaría en una degradación significativa de la resistencia y rigidez del sistema (Cabezas, 2012).

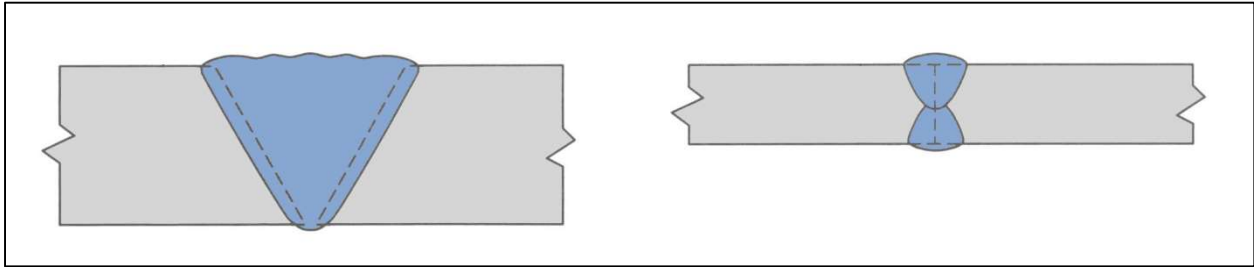


Figura 3. Soldadura de penetración completa. Fuente: American Welding Society, 2019.

2.2 Sistemas de marcos estructurales resistentes a momento

Los marcos de acero permitidos para conformar un sistema sismorresistente son detallados en el CSCR y en ANSI/AISC 341-16. Se detalla a continuación una descripción de los sistemas de marcos especiales (SMF), marcos intermedios (IMF) y marcos ordinarios (OMF) resistentes a momento.

2.2.1 Marcos especiales (SMF)

Los sistemas sismorresistentes a base de SMF soportan deformaciones inelásticas importantes en sus elementos y conexiones durante el sismo de diseño.

Según el CSCR:

La capacidad de deformación inelástica de un SMF se logra mediante la cedencia en flexión de sus vigas y una cedencia limitada en cortante de la zona panel de la columna. Las columnas deben ser diseñadas para tener mayor capacidad que la demandada por las vigas totalmente plastificadas y endurecidas por deformación (p. 10/33).

En la figura a continuación se observa un marco cuya deriva inelástica se logra mediante el desarrollo de rótulas plásticas localizadas en las vigas y alejadas de la cara de la columna.

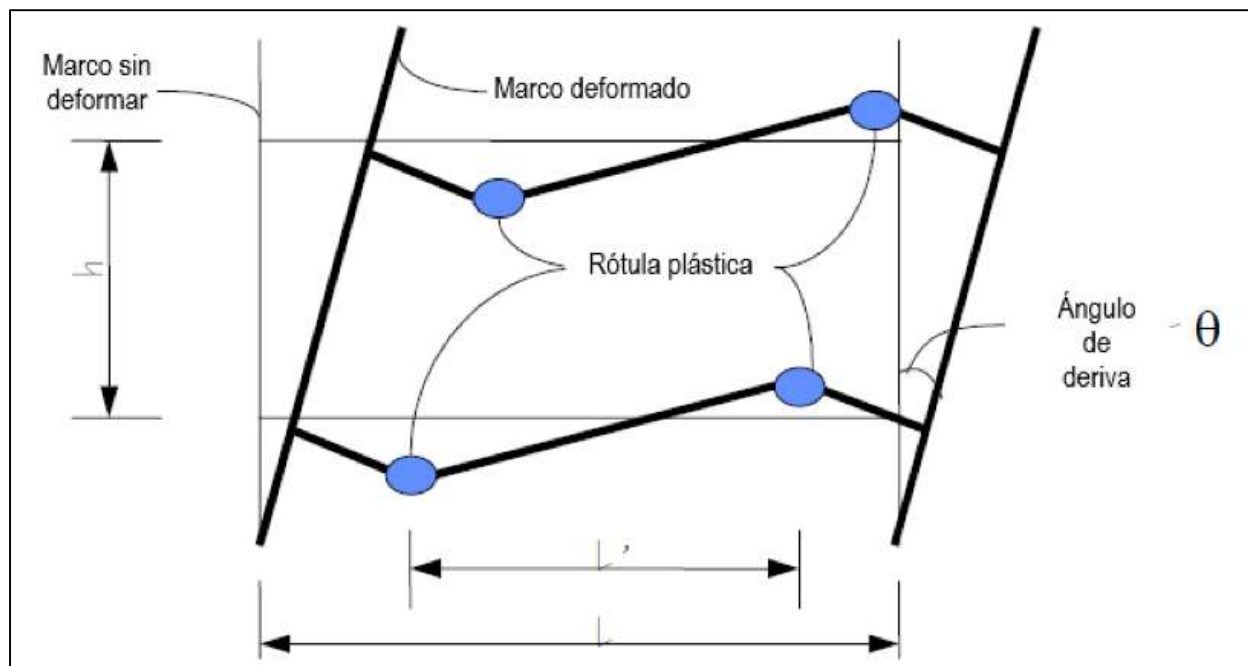


Figura 4. Comportamiento inelástico de marcos, con rótulas plásticas en luz de vigas. Fuente FEMA-350, modificado por autora.

El CSCR asigna una ductilidad global de 6 para una estructura regular en planta y una ductilidad global de 3 si existe irregularidad moderada. En los marcos SMF los elementos deben cumplir con las razones de esbeltez indicadas en la Tabla 10.6 del CSCR. Adicionalmente este tipo de sistema estructural no tiene limitación de altura.

Por su parte las conexiones viga-columna de estos sistemas deben cumplir con las siguientes especificaciones:

1. La conexión debe ser capaz de soportar una rotación debido al desplazamiento entre niveles, de al menos 0.04 rad.
2. La resistencia a la flexión medida de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser al menos $0.8M_p$ de la viga conectada, para una rotación de 0.04 radianes (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2010).

2.2.2 Marcos intermedios (IMF)

Los sistemas sismorresistentes a base de IMF soportan deformaciones inelásticas limitadas en sus elementos y conexiones durante el sismo de diseño. El CSCR asigna una ductilidad global de 3 para una estructura regular en planta y una ductilidad global de 2 si existe irregularidad

moderada. En los marcos IMF los elementos deben cumplir con las razones de esbeltez indicadas en la Tabla 10.6 del CSCR.

Los sistemas IMF pueden ser utilizados en las siguientes condiciones:

1. En edificaciones de un solo nivel con altura máxima de 18 m en su parte más alta y cuya carga permanente a nivel de techo no exceda 95 kg/m^2 .
2. En edificaciones de varios niveles con una altura máxima de 10 m en su parte más alta y sin restricción de carga permanente de entrepiso y techo (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2010).

Por su parte las conexiones viga-columna de estos sistemas deben cumplir con las siguientes especificaciones:

1. La conexión debe ser capaz de soportar una rotación debido al desplazamiento entre niveles, de al menos 0.02 rad.
2. La resistencia a la flexión medida de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser al menos $0.8Mp$ de la viga conectada, para una rotación de 0.02 radianes (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2010).

2.2.3 Marcos ordinarios (OMF)

Los sistemas sismorresistentes a base de marcos OMF, soportan deformaciones inelásticas mínimas en sus elementos y conexiones durante el sismo de diseño. El CSCR asigna una ductilidad local moderada a los elementos de los marcos OMF y una ductilidad global asignada de 1.5, excepto cuando existe irregularidad severa; en ese caso, la ductilidad disminuye a un valor de 1.

Los sistemas OMF pueden ser utilizados en las siguientes condiciones:

3. En edificaciones de un solo nivel con altura máxima de 18 m en su parte más alta y cuya carga permanente a nivel de techo no exceda 95 kg/m^2 .
4. En edificaciones de varios niveles con una altura máxima de 10 m en su parte más alta y cuya carga permanente de entrepiso y techo no exceda 95 kg/m^2 (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2010).

2.3 Clasificación por capacidad de rotación de conexiones viga-columna

Una manera de clasificar las conexiones es mediante su capacidad de rotación, esta diferencia su rigidez. La clasificación se ha logrado gracias a curvas de Momento – Rotación, como la observada en la Figura 5. A mayor rigidez característico de la conexión, mayor será su capacidad

para resistir momentos flectores con menores rotaciones. Es posible inferir, sin embargo, y aun cuando existe esta clasificación, que no se puede lograr una rigidez o flexibilidad absoluta en conexiones de acero estructural (Loges, 2017).

Aquellas conexiones que transmiten al menos el 90% del momento de la viga a la columna se denominan conexiones totalmente restringidas (FR) y cuando este valor es menor al 20% se clasifican como conexiones simples a cortante (Cabezas, 2012). Aquella conexión que proporcione una restricción rotacional intermedia (PR) se denomina parcialmente restringida.

Dentro de las conexiones resistentes a momento se encuentra la conexión WUF-W.

2.4 Conexión WUF-W

La conexión WUF-W une las alas de la viga con la columna con soldadura de penetración completa. Además, el alma de la viga va soldada al área adyacente de la columna y contiene un refuerzo con placa de cortante de forma trapezoidal. La placa de refuerzo cortante se suelda al alma de la viga y a la columna.

La unión WUF-W únicamente lleva una placa cortante como refuerzo. Su mayor problema es que requiere que todas las soldaduras se lleven a cabo en el sitio de obra, lo que se traduce en un proceso constructivo que demanda soldadores calificados (Cabezas, 2012).

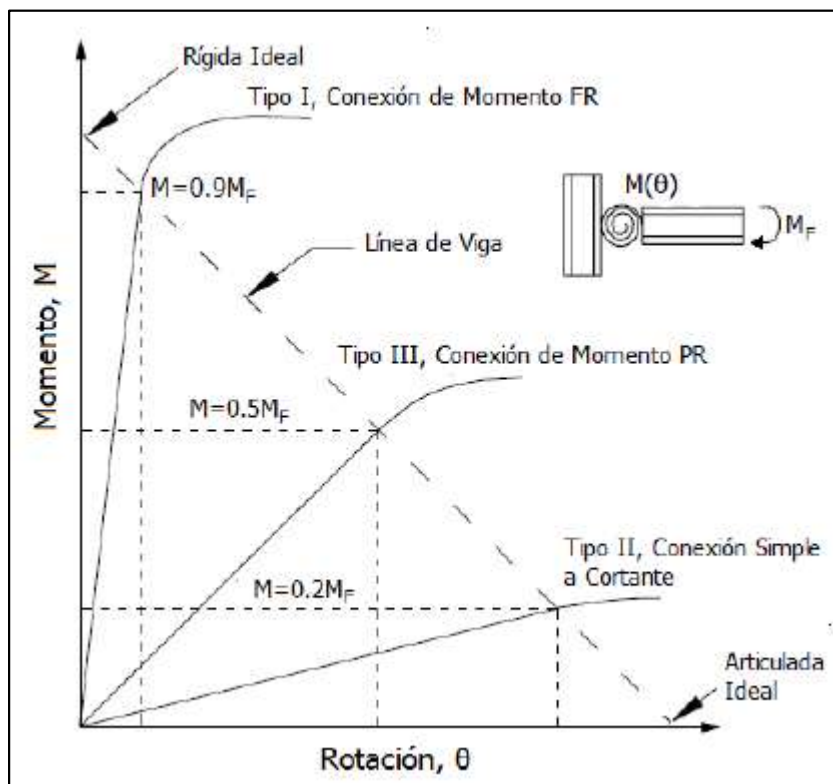


Figura 5. Curva de momento-rotación para clasificación de conexiones. Fuente: Cabezas, 2011.

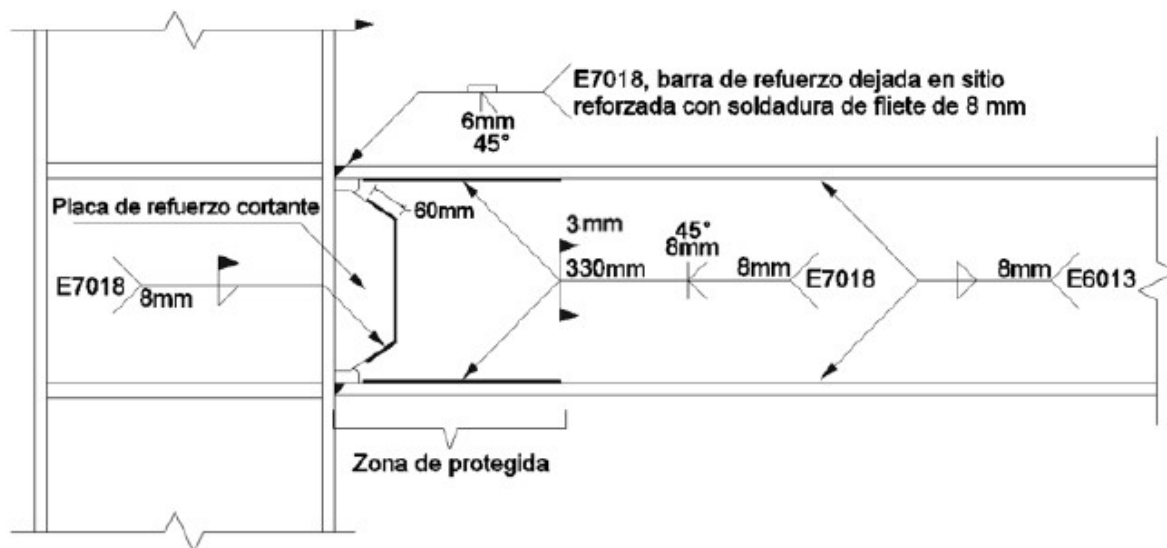


Figura 6. Conexión WUF-W. Fuente González, 2018.

2.5 Definición de histéresis

La histéresis se considera como la tendencia de un material a conservar sus propiedades, una vez que se le es aplicada alguna fuerza externa. En la Figura a continuación se puede observar que,

si se registra un ciclo de tensión aplicado a un material elástico, se obtendría una recta con una pendiente relacionada con el módulo de Young, que corresponde a la línea H-H' (Nuñez, Roca, & Jorba, 2013).

Cuando se aplica un ciclo de tensión a un sólido real se observa un desfase entre la tensión aplicada y la deformación producida, generándose un ciclo como el mostrado en la figura.

El primer ciclo de tensión es explicado por Nuñez, Roca & Jorba de la siguiente manera:

En el primer ciclo, la tensión sube según la línea OPQ y, al descender la carga aplicada hasta cero, el material se recupera elásticamente, pero queda con una deformación plástica de valor OU . Al invertirse el ciclo de carga aplicada, la deformación producida pasa por R y S y, al volver a invertirse, por T y Q . A partir de este primer ciclo, la repetición de sucesivos ciclos de carga provoca una deformación asociada que sigue el ciclo de histéresis definido por $QRSTQ$ (p. 127-128).

El área encerrada en el ciclo corresponde a la energía involucrada en el proceso. Esta energía es involucrada en los fenómenos microplásticos, que son los responsables de generar fallo por fatiga en el elemento.

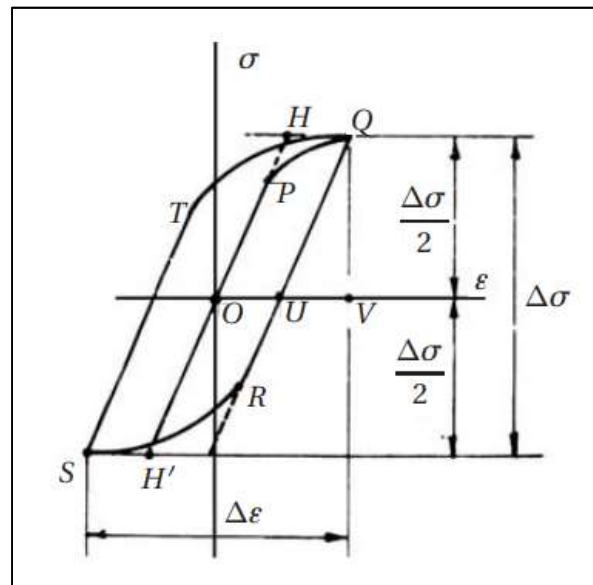


Figura 7. Ciclo de histéresis de cargas cíclicas: ciclo de inversión completa. Fuente: Nuñez, Roca & Jorba, s.f.

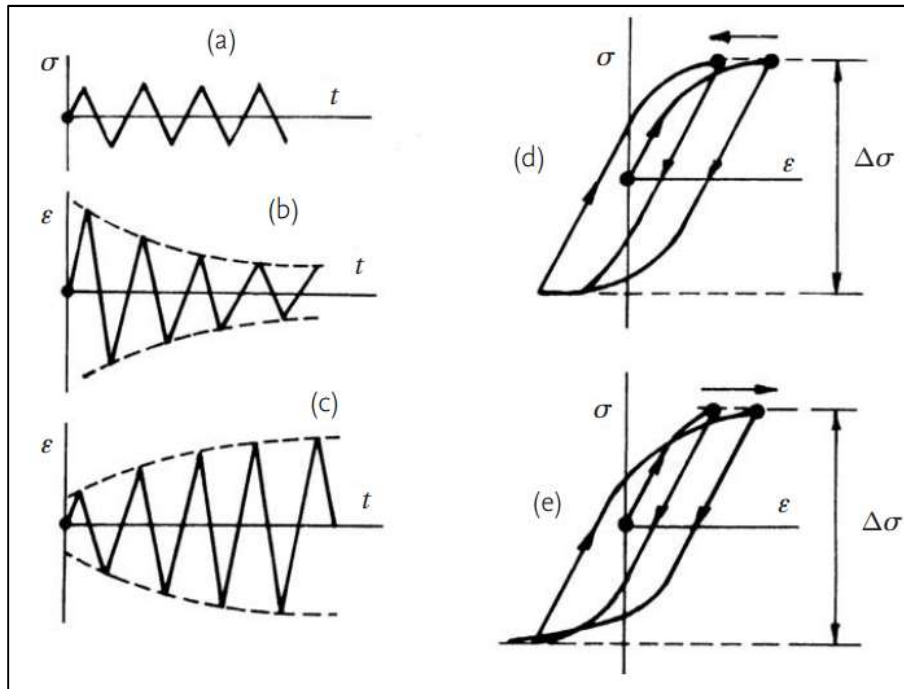


Figura 8. a) Ciclo de variación de tensión constante. b) Ciclo de disminución de deformación con el número de ciclos. c) Aumento de la deformación con el número de ciclos. d) Ciclo de histéresis con endurecimiento. e) Ciclo de histéresis con ablandamiento. Fuente: Nuñez, Roca & Jorba, s.f.

2.6 Teoría del método de elementos finitos

El principio básico del método de elementos finitos se puede visualizar de la siguiente manera:

1. El primer paso consiste en dividir el dominio en elementos, este proceso es llamado discretización. La distribución de los elementos es denominada malla. Y los elementos se conectan en puntos denominados nodos. Como se observa en la Figura 9.
2. Una vez discretizada la región, se deben establecer las ecuaciones o comportamientos para cada elemento que van a gobernar el desarrollo de un fenómeno físico. Aquí se incluyen características de los materiales como esfuerzos de cedencia y deformación.
3. Finalmente, las ecuaciones de los elementos son ensambladas para obtener la ecuación global de la malla, que describe el comportamiento del cuerpo completo. Normalmente la ecuación global tiene la siguiente forma:

$$[K]\{A\} = \{B\} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde $[K]$ es la matriz de rigidez, $\{A\}$ es el grado de libertad de los nodos ó los desplazamientos para análisis estructural y $\{B\}$ es la fuerza externa o las fuerzas para análisis estructural (Alawadhi, 2010).

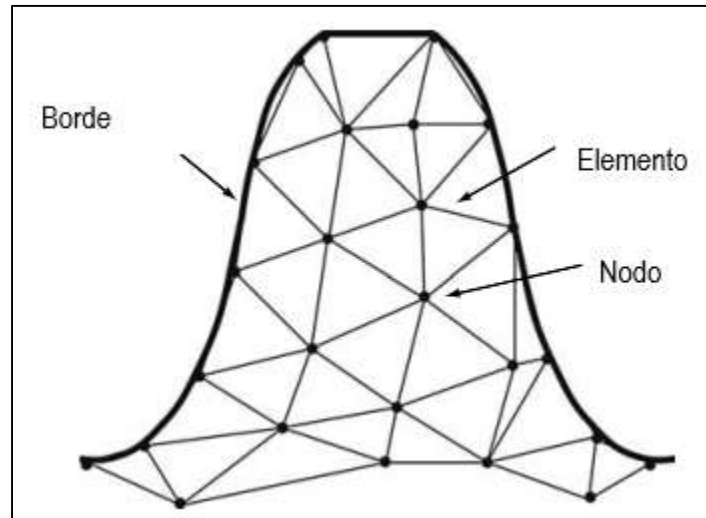


Figura 9. Malla de elemento finito de un cuerpo. Fuente: Alawadhi, 2010, modificada por autora.

Según González:

Se puede describir el método de elementos finitos como una idealización del método de rigidez, en donde se toma un modelo tridimensional por analizar, se divide en elementos lineales, que adoptan características físico mecánicas del material, además de condiciones de frontera. Una vez discretizado el modelo, son aplicables las teorías de Navier Bernoulli y Saint Venant, para ser tratado como un “prisma mecánico”, al cual es posible aplicar ecuaciones de compatibilidad y equilibrio para logra un modelo matemático con el mismo número de incógnitas y de ecuaciones (p.29).

2.7 Marco Situacional

En la actualidad la versatilidad de los sistemas computacionales como ANSYS o ABAQUS, ha permitido por métodos analíticos evaluar el comportamiento de conexiones de acero. Las investigaciones enfocadas a conexiones realizadas en estos programas, se han desarrollado variando las geometrías de los elementos en estudio, con el objetivo de optimizar los resultados obtenidos y proponer el diseño de una mejor conexión en términos de ductilidad, esfuerzos permisibles y otras propiedades.

Posterior a obtener un diseño optimizado, es posible construir el elemento a escala real y experimentalmente estudiar la conexión, logrando reproducir resultados similares entre el

experimento virtual modelado por elementos finitos y el experimento a escala real (Fanaie & Moghadam, 2019). Como se observa a continuación en las investigaciones virtuales, se ha logrado determinar la ubicación de la rótula plástica y compararla con la rótula plástica real.

En ocasiones se realiza primero el modelo experimental y posteriormente se realiza el modelo virtual, con el objetivo de calibrar el sistema computacional y afinar los parámetros que se deben incorporar al modelo virtual. Este ejemplo de investigación fue desarrollado por González.

En la presente investigación se desea modificar geoméricamente la conexión investigada por González, para optimizar el diseño desde el punto de vista constructivo, y haciendo uso de ANSYS determinar el comportamiento de la conexión. Posteriormente en futuras investigaciones se espera construir un modelo a escala real de la conexión optimizada.

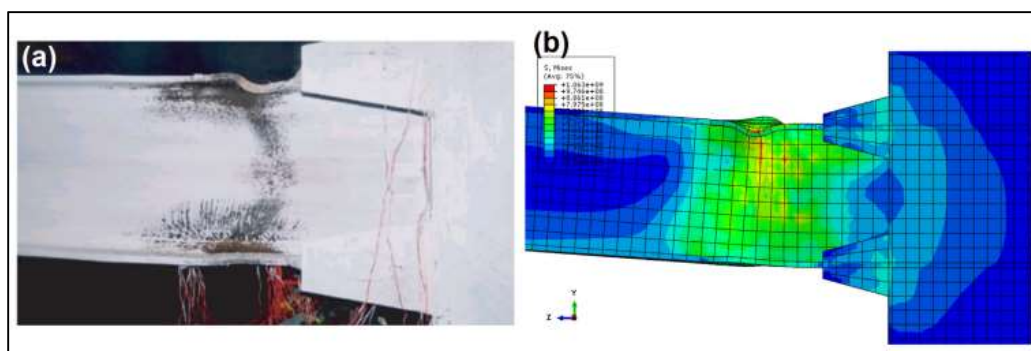


Figura 10. Verificación de modelado: a) Especimen experimental; b) Modelo de elemento finito.
Fuente: Fanaie & Moghadam, 2019

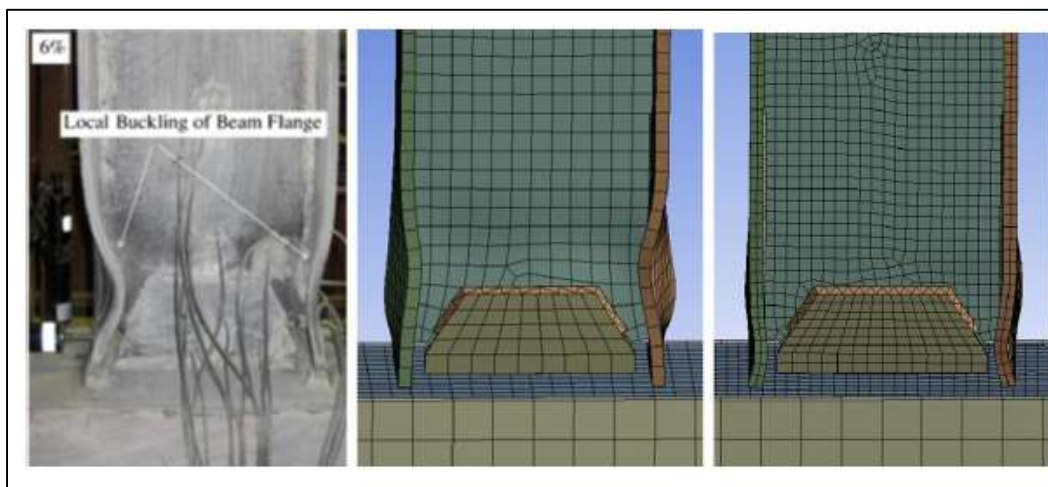


Figura 11. Comparación de resultados de pandeo local en la rótula plástica para el espécimen DC-S. Fuente: González, 2018.

Capítulo 3. Marco Metodológico

3.1 Paradigma, enfoque metodológico y método de investigación propuestos

Según lo expuesto en el ANSI/AISC 341-16 y el en Código Sísmico de Costa Rica (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2010), los requerimientos para una conexión viga-columna de un IMF son:

1. La conexión debe ser capaz de soportar una rotación debido al desplazamiento entre niveles, de al menos 0.02 rad.
2. La resistencia a la flexión medida de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser al menos $0.8M_p$ de la viga conectada, para una rotación de 0.02 radianes.

Por su parte los requerimientos para una conexión viga-columna de un SMF son:

1. La conexión debe ser capaz de soportar una rotación debido al desplazamiento entre niveles, de al menos 0.04 rad.
2. La resistencia a la flexión medida de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser al menos $0.8M_p$ de la viga conectada, para una rotación de 0.04 radianes.

Donde M_p corresponde al momento plástico nominal de la sección:

$$M_p = F_y Z \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde F_y es el esfuerzo de fluencia del material y Z el módulo de sección plástica.

Se desea corroborar en la presente investigación si la conexión en estudio cumple con al menos los requerimientos de un marco IMF o un marco SMF.

La investigación se llevará a cabo a través de un enfoque cuantitativo, el cual representa un conjunto de procesos, se realiza de forma secuencial y probatoria. El enfoque cuantitativo, busca medir variables en un determinado contexto, analiza las mediciones obtenidas utilizando métodos estadísticos y establece una serie de conclusiones respecto de la hipótesis (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010).

El método de investigación que se propone es experimental puro, debido a que se busca analizar el comportamiento de una conexión ya estudiada (González, 2018), haciendo variar su geometría, eliminando los atiesadores internos en la columna cuadrada. Y obtener diagramas de momento en la cara de la columna contra rotación relativa de la viga.

3.2 Categorías de análisis de la investigación (operacionalización de variables)

El modelo de elementos finitos genérico representa el equilibrio a lo largo de los grados de libertad de una estructura. Los modelos se pueden expresar como:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + P_R(U) = P \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde M es la masa de la matriz, C es la matriz de amortiguamiento, P es el vector de fuerzas externas, P_r es el vector de fuerzas internas y U es el vector de desplazamientos y rotaciones nodales. Cada punto superpuestos sobre las variable corresponde a una diferencial con respecto al tiempo (Haukaas & Gardoni, 2011).

En esta investigación, se mantendrán las variables M y C constantes para cada elemento de estudio y se espera obtener variación en los demás componentes del modelo genérico de elementos finitos.

La variable dependiente del estudio corresponde a los desplazamientos generados en la punta de la viga, que en este caso es el vector de fuerzas externas. A partir de las variaciones nodales generadas por los desplazamientos se obtendrán las variables independientes: fuerza total en el punto más lejano de la viga, el momento en la cara de la columna, los esfuerzos de Von Mises y la tensión equivalente plástica.

El vector de fuerzas externas (P) corresponde al protocolo de pruebas de ángulos de deriva inelástica, los cuales se encuentran establecidos en ANSI/AISC 341-16. Estos se muestran a continuación.

Tabla 3. Protocolo de ángulos de deriva del ANSI/AISC 341-16, para conexiones resistentes a momento en SMF y IMF.

Número de ángulo	Cantidad de ciclos	Ángulo de deriva (rad)
1	6	0.00375
2	6	0.005
3	6	0.0075
4	4	0.01
5	2	0.015
6	2	0.02
7	2	0.03
8	2	0.04

Se continúa cargando a incrementos de 0.01 rad con dos ciclos de carga en cada paso (ANSI/AISC, 2016)

Nota: Recuperado de ANSI/AISC 341-16, 2016.

3.2.1 Configuración del método de elemento finito en el programa ANSYS

Para llevar a cabo un análisis a través del método del elemento finito en el programa ANSYS, debemos establecer el protocolo de desplazamiento, las condiciones de frontera, la división del dominio en elementos y las características mecánicas y geométricas de los especímenes en estudio. Estas variables se pueden insertar en el programa ANSYS siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Se debe generar la geometría del elemento en estudio haciendo uso del programa SpaceClaim.
2. En el programa ANSYS Workbench, se escoge un sistema de análisis estructural estático, en donde se asigna la geometría previamente elaborada, las características mecánicas y físicas de los materiales y el modelo donde se desarrolla el análisis del elemento finito.
3. En el programa ANSYS Mechanical se desarrolla el análisis del elemento finito, se asignan las condiciones de frontera, el modelo de desplazamiento y se elabora la división del dominio en elementos.

En la figura a continuación se observa como integra el programa ANSYS Workbench la asignación de la geometría (Geometry), las características de los materiales (Engineering Data) y el modelo del análisis del elemento finito (Model).



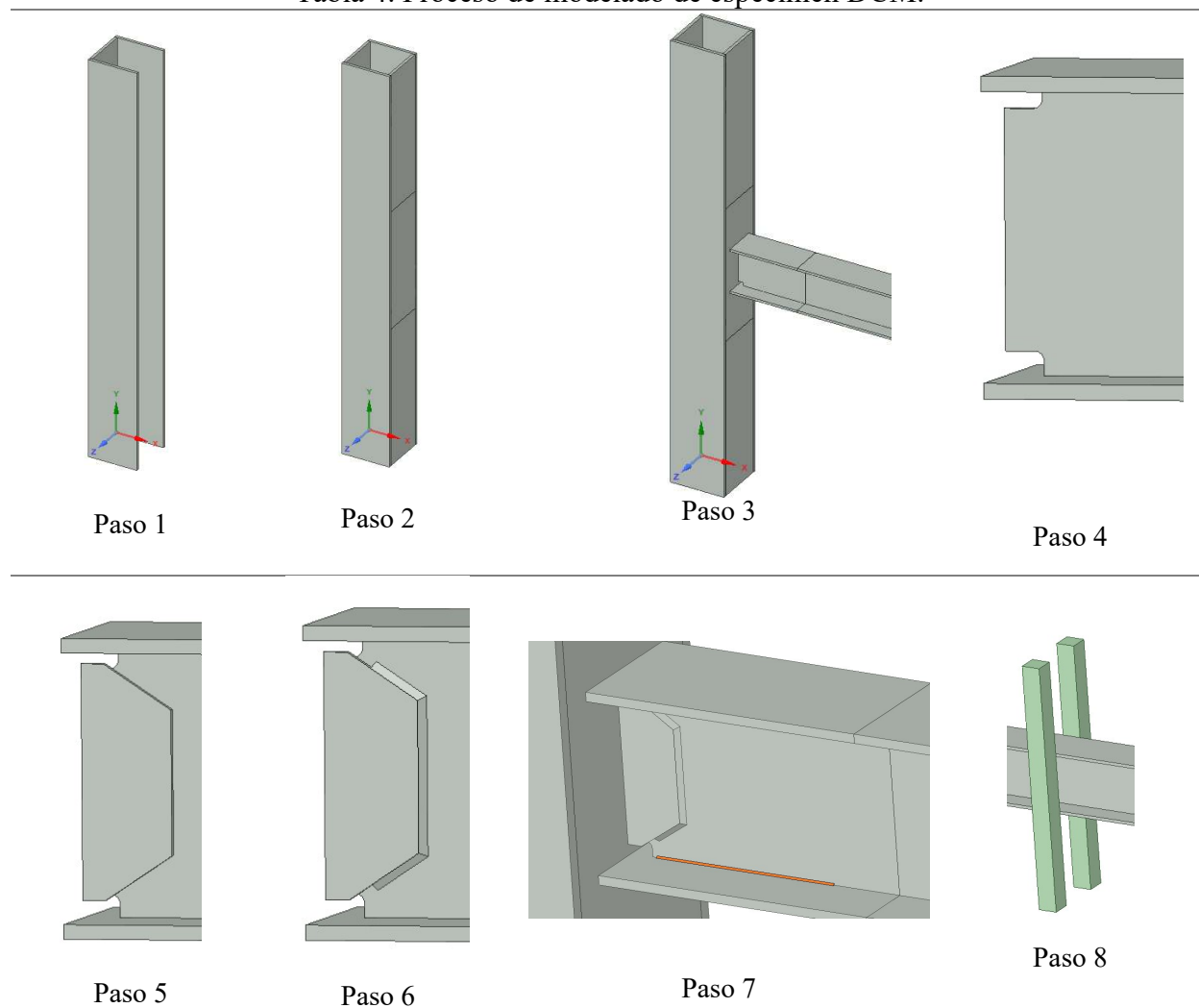
Figura 12. Célula de análisis estructural estático de ANSYS Workbench. Fuente: ANSYS Workbench, modificado por autora.

A continuación, se describen el desarrollo del análisis del elemento finito en ANSYS.

3.2.2 Modelado de geometría

A continuación, se detalla el proceso de modelado del espécimen DCM de la conexión en estudio.

Tabla 4. Proceso de modelado de espécimen DCM.



Paso 1: Se construyen tres placas individuales que conforman las caras de fondo de la columna en el modelo de la conexión. Paso 2: Se construye la placa frontal de la columna, en tres secciones por motivo de comparación de resultados obtenidos contra el estudio de González. Paso 3: Se construyen tres placas individuales para la viga, extruida en dos partes; 0.5 m y 2m. Paso 4: Se detallan los agujeros de acceso. Paso 5: Se construye la placa de refuerzo cortante. Paso 6: Se coloca la soldadura que une la placa de refuerzo cortante con el alma como soldadura de filete de 8 mm. Paso 7: Se coloca la soldadura de filete de refuerzo de 3 mm para la zona protegida. Paso 8: Se modelan las barras de control lateral torsional a 1.5 m de la cara de la columna con una longitud de 1 m.

Nota: la viga y la columna se modelaron en dos partes, para proporcionar un mallado menor a la zona cercana al nudo de la conexión.

3.2.3 Condiciones de frontera

Al realizar un análisis con el programa ANSYS, se desea modelar computacionalmente el banco de pruebas que se utiliza en una prueba a escala real como el que se muestra en la figura a continuación.

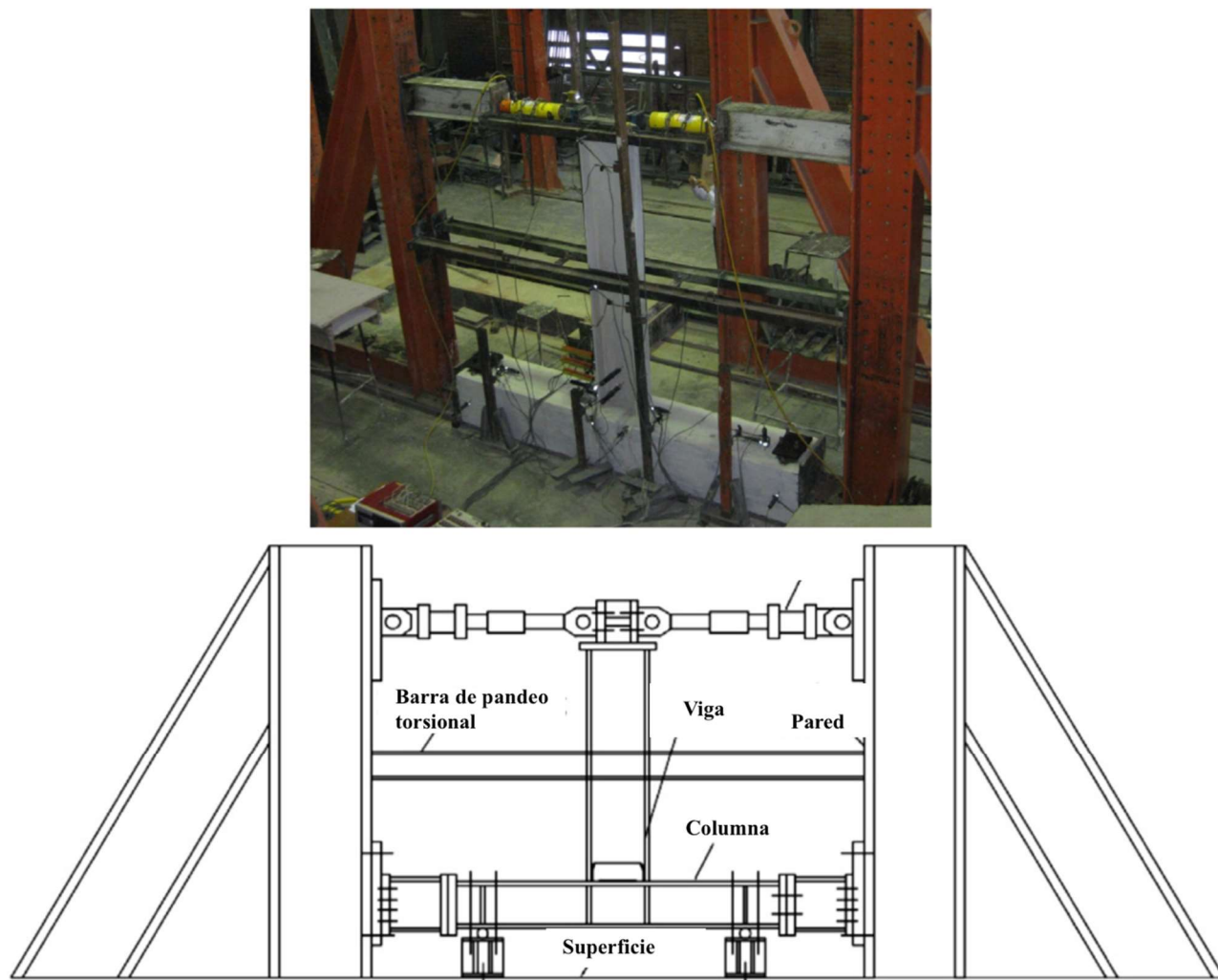


Figura 13. Banco de pruebas de modelo a escala real de conexión WUF-W de columna de sección cuadrada y viga I con atiesadores internos. Fuente: Saneei, Gassemieh, & Mazroi, 2013, modificado por autora.

Se deben establecer las condiciones de frontera para la simulación. Por lo tanto, en el programa ANSYS Mechanical se restringen los grados de libertad de traslación y rotación en todos los sentidos de: las caras de los bordes en ambos extremos de la columna y la cara externa de la barra de pandeo torsional. De este modo la simulación virtual generará los desplazamientos que resultan

en una prueba a escala real. Para realizar esta acción se debe utilizar el comando “Fixed Support” y elegir las caras correspondientes, como se muestra en la figura a continuación.

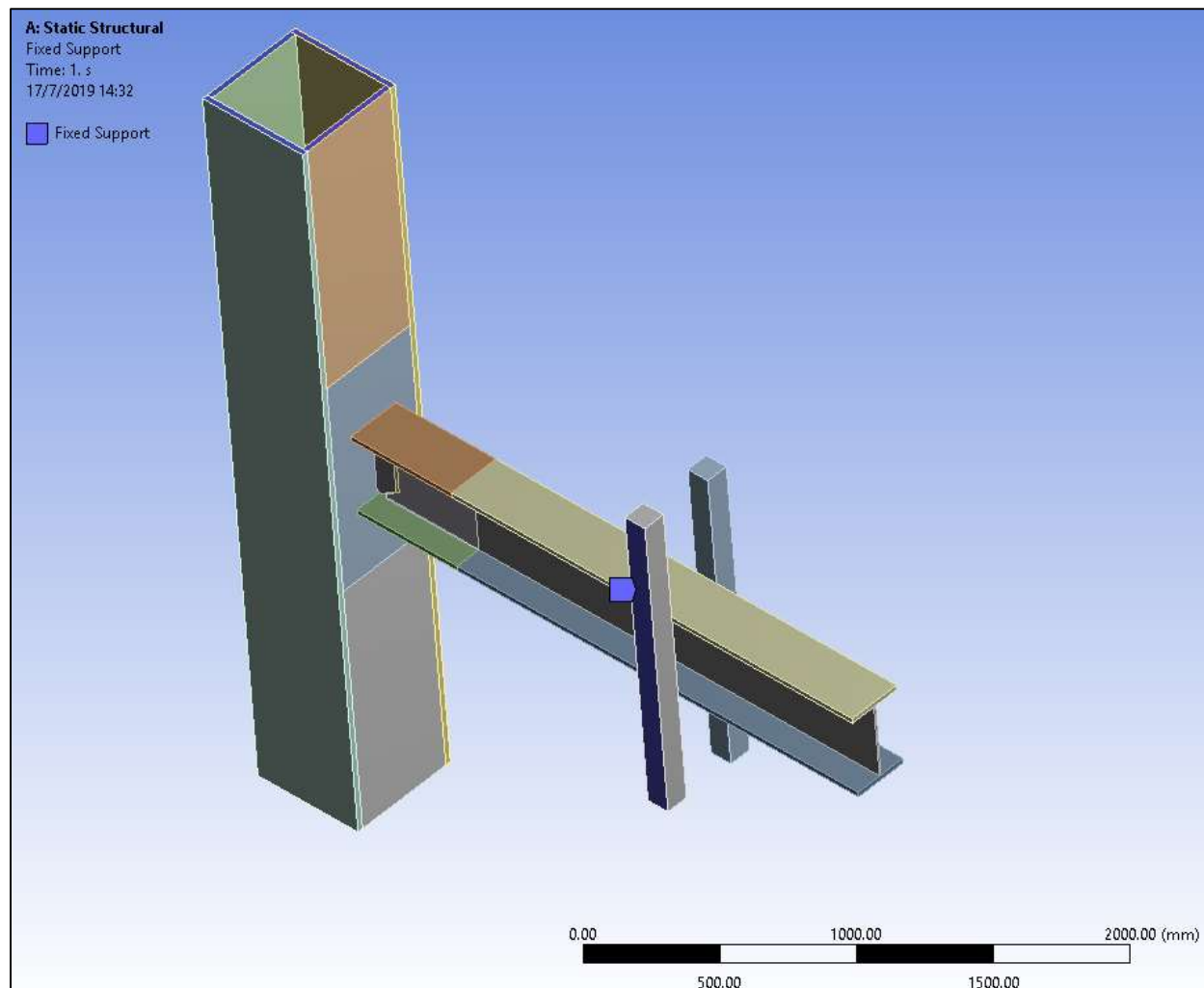


Figura 14. Restricción de movimiento en caras de extremos de la columna y barras de pandeo torsional, para simulación virtual Fuente: Programa ANSYS Mechanical, modificado por autora.

3.2.4 Protocolo de ángulos de deriva

Las conexiones resistentes a momento deben ser capaces de proveer niveles mínimos de capacidad para ángulos de deriva intersticial. Este ángulo de deriva intersticial es el resultado de la línea central de una viga no deformada y la línea central de una viga deformada tras su rotación, como se muestra en la figura a continuación. El vértice del ángulo se ubica en la intersección del eje neutro de la columna y el eje neutro de la viga (FEMA, 2000).

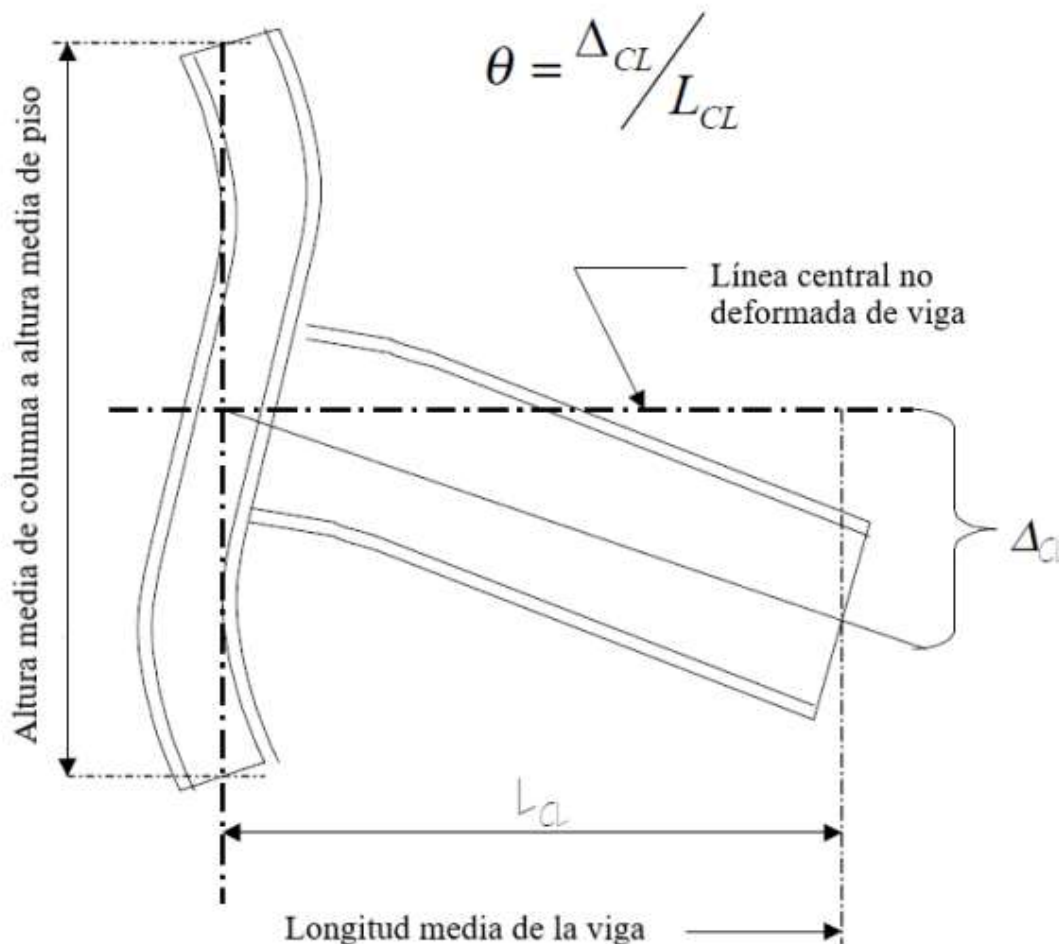


Figura 15. Ensamble de pruebas para rotación angular. Fuente: FEMA, 2000, modificada por autora.

Para esta investigación los ángulos de deriva son incorporados en el programa ANSYS Workbench, como desplazamientos originados en la punta de la viga siguiendo la expresión:

$$\frac{\Delta_{CL}}{L_{CL}} = \theta \quad \text{Ecuación 4.}$$

El protocolo de desplazamiento varía de acuerdo al espécimen a estudiar. De esta manera para los tres especímenes en estudio {DCL, DCM y DCS) se cuenta con los siguientes protocolos de desplazamientos según los ángulos de deriva inelástica del AISC.

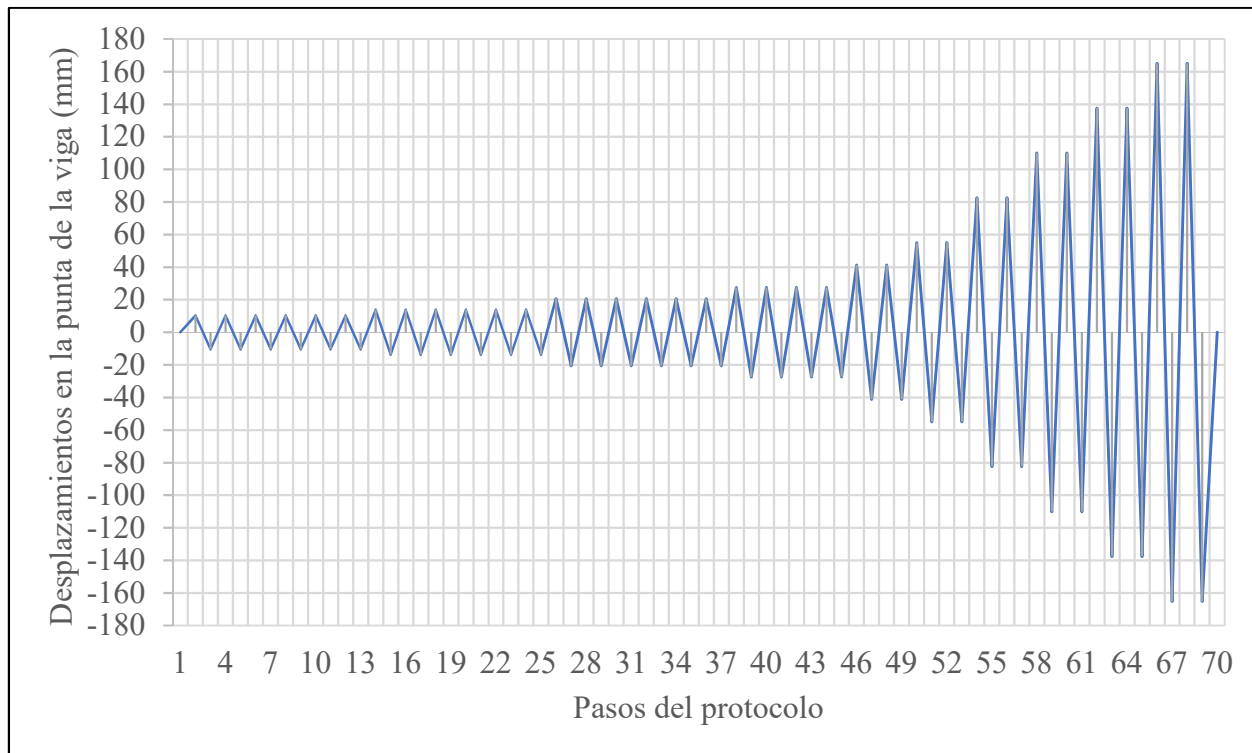


Figura 16. Protocolo de desplazamientos para espécimen DCL. Fuente propia.

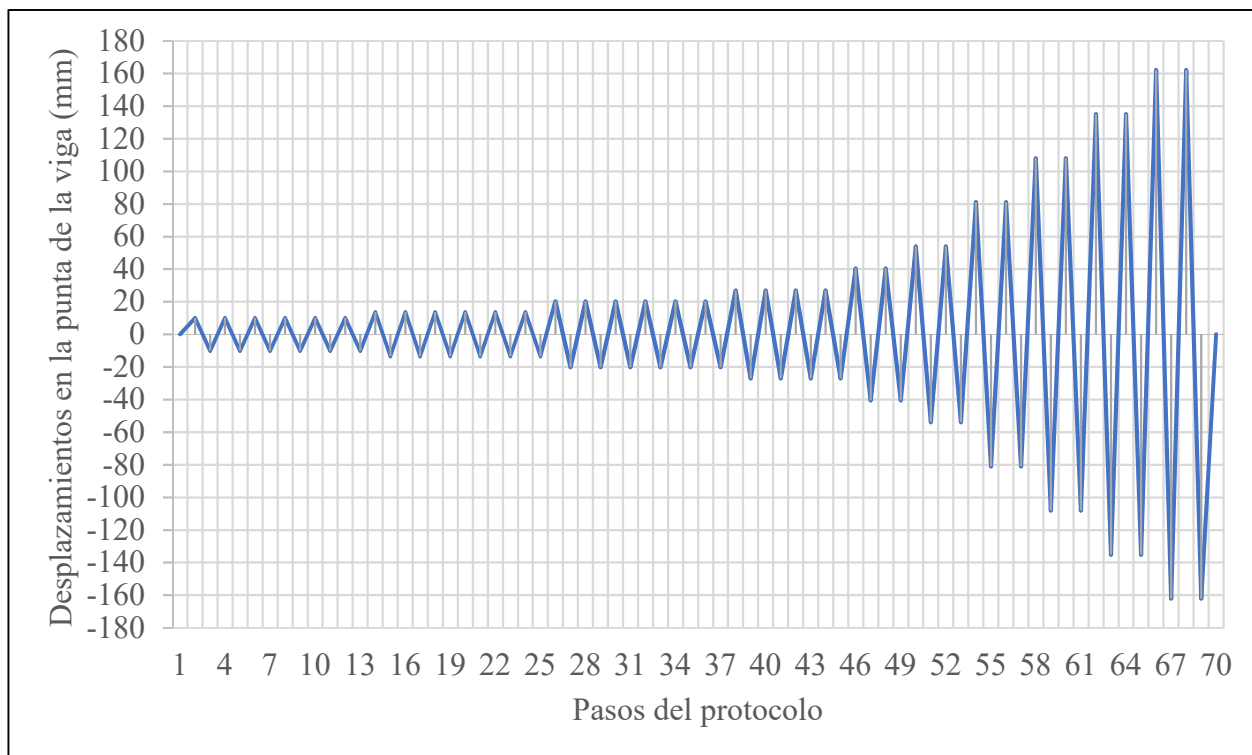


Figura 17. Protocolo de desplazamientos para espécimen DCM. Fuente propia.

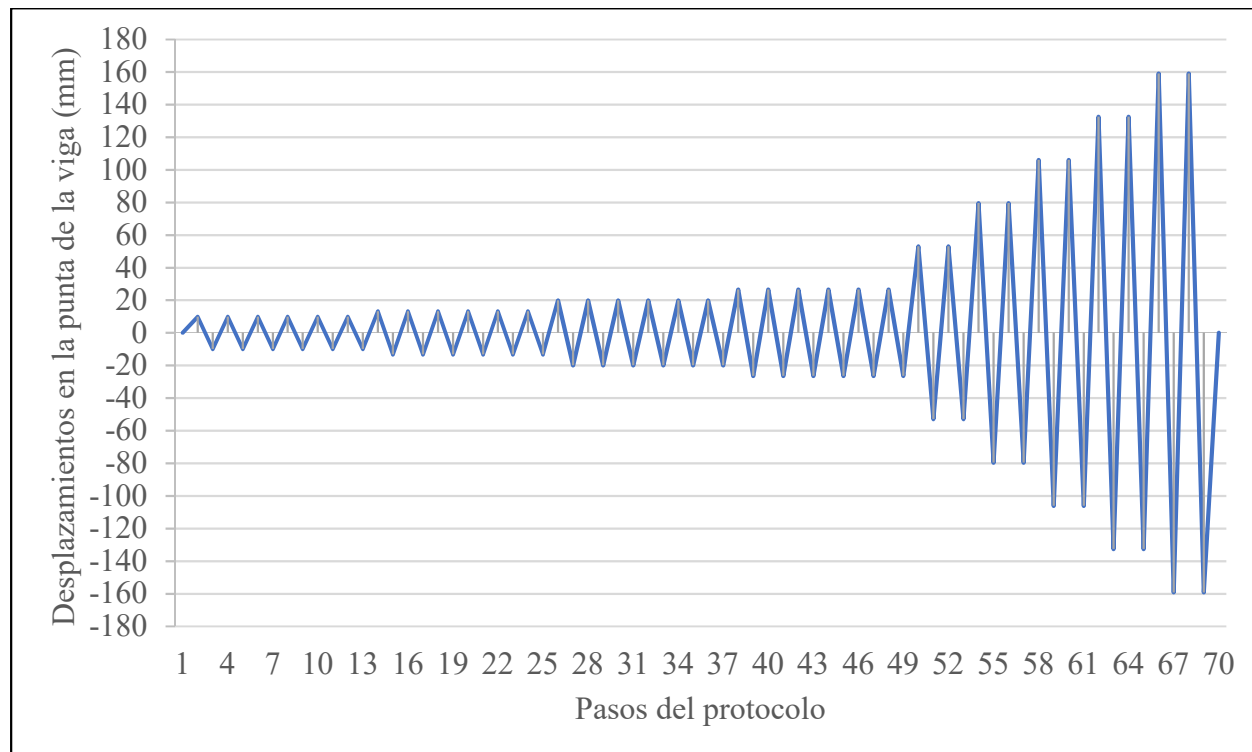


Figura 18. Protocolo de desplazamientos para espécimen DCS. Fuente propia.

Para incluir el protocolo de desplazamientos en la modelación virtual se debe utilizar el comando “Displacement” del programa ANSYS Mechanical, como se observa en la figura a continuación. El comando permite seleccionar las tres caras de la punta de la viga, en donde se generarán los desplazamientos. Se debe definir el eje sobre el cual se desean generar los desplazamientos establecidos en el protocolo y tabular los desplazamientos de acuerdo al número de pasos asignados al modelo. Los ejes sobre los cuales no se establecen desplazamientos tienen libertad de movimiento de traslación y rotación.

Details of "Displacement"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Faces
Definition	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	Free
Y Component	Tabular Data
Z Component	Free
Suppressed	No
Tabular Data	
Independent Variable	Time

Figura 19. Detalles de comando desplazamiento en programa ANSYS Mechanical. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

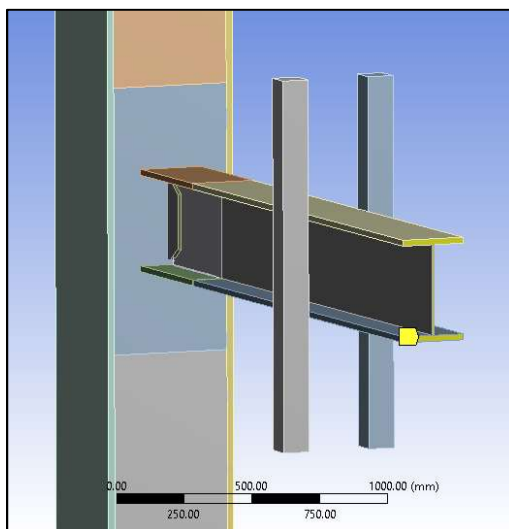


Figura 20. Selección de caras, sobre las cuales se aplicará el desplazamiento, caras de punta de la viga en color amarillo. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

El protocolo de desplazamiento es además asignado a la configuración del análisis de elemento finito en el programa ANSYS Mechanical, en donde se atribuyen 69 pasos asociados a cada desplazamiento, en donde cada paso posee un tiempo de aplicación.

Según González (2008):

La variable de tiempo de aplicación de los desplazamientos en los modelos es controlada a partir de subetapas de análisis numérico, mediante el criterio de Newton Raphson. Así es posible asignar la magnitud de cada incremento de desplazamiento por unidad de tiempo que se aplica al modelo o bien permite este control al programa, el cual escoge la mejor distribución de los subpasos para la convergencia del análisis numérico (p. 70).

3.2.5 División de dominio en elementos

En el análisis de elementos finitos, la precisión de los resultados y el tiempo de cálculo solicitado están determinados por el tamaño del elemento finito. De acuerdo con la teoría, los modelos con malla fina (tamaño de elemento pequeño) dan resultados altamente precisos, pero pueden llevar más tiempo de computación. Por el contrario, los modelos con malla gruesa pueden llevar a resultados menos precisos, pero ahorran más tiempo de computación. Además, el tamaño de elemento pequeño aumentará la complejidad del modelo, que solo se utiliza cuando se requiere una alta precisión.

El tamaño grande de los elementos reducirá el tamaño del modelo y se utiliza ampliamente en modelos simplificados para proporcionar una estimación rápida y aproximada de los diseños (Liu & Glass, 2013).

En esta investigación el mallado se adapta al estudio previo realizado por González (2018), en donde se obtuvieron resultados histeréticos casi idénticos a los reportados en los ensayos reales. La modelación de la malla contempla: el dimensionamiento del cuerpo, la calidad de la malla, la preferencia física y la función de dimensionamiento. A continuación, se observan las características del mallado para cada espécimen y una figura que ejemplifica el dimensionamiento de la malla de acuerdo a los componentes de la conexión.

Tabla 5. Características de malla para cada espécimen.

Espécimen	Dimensionamiento del cuerpo (mm)¹	Calidad de la malla (Skewness)	Preferencia física	Función de dimensionamiento
DCS	15-50	< 0.7	No lineal	Adaptativo
DCM	15-50	< 0.7	No lineal	Adaptativo
DCL	15-50	< 0.7	No lineal	Adaptativo
DCL PC1	15-50	< 0.7	No lineal	Adaptativo
DCL PC2	15-50	< 0.7	No lineal	Adaptativo

¹Nota: En el dimensionamiento del cuerpo se utiliza una malla de 50 mm en las placas de la columna y la sección larga de la viga. La placa de refuerzo cortante, la sección corta de la viga, una sección de la parte frontal de la columna y las soldaduras utilizan un dimensionamiento de 15 mm. Las barras de control de pandeo lateral torsional se dimensionan por defecto. En el caso de los especímenes DCL PC1 y DCL PC2 las placas alrededor de la columna tienen un dimensionamiento de 15 mm.

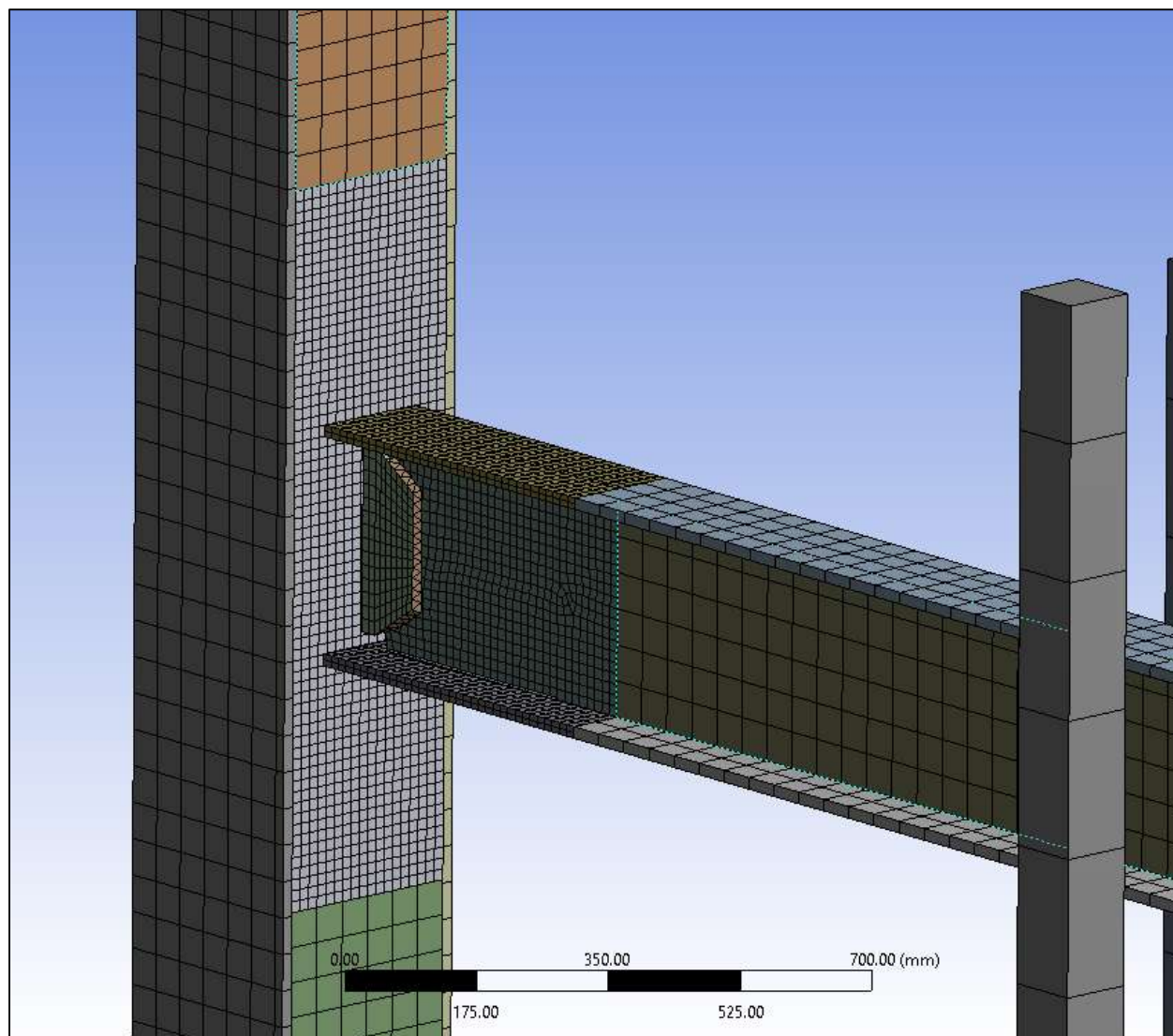


Figura 21. Dimensionamiento de malla utilizado en el modelo de elemento finito. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

Se dimensionan las partes de la conexión donde se desea conocer un resultado más preciso con un dimensionamiento de 15 mm. La calidad de la malla se mide de acuerdo a la métrica denominada “skewness”, la cual es una de las medidas primarias para determinar la calidad de una malla, esta determina cuan cercano se encuentra a lo ideal (equilátero o equiangular) una celda o cara. De acuerdo a la definición de “skewness” un valor de 0 indica una celda equilátera y un valor de 1 indica una celda completamente degenerada. Se debe evitar valores cercanos a 1 pues las ecuaciones a resolver en el modelo de elemento finito asumen que las celdas son relativamente equilaterales, caracterizadas por nodos casi coplanares, lo que genera imprecisión. Los valores

entre 0.5-0.75 son definidos como aceptables por el programa ANSYS y nos permiten trabajar con un tiempo y capacidad de cálculo razonable.

La preferencia física se define como mecánica no lineal, debido a que es el tipo de análisis físico que se realizará en esta investigación. Finalmente, la función de dimensionamiento se determina adaptativa, la cual está destinada a mallas aplicadas a soluciones estructurales. La función de tamaño adaptativo usa el valor de la propiedad tamaño de semilla del elemento para determinar un punto de inicio para el tamaño de malla. Cuando comienza el mallado, los bordes se combinan con este tamaño inicialmente, y luego se refinan para la curvatura y la proximidad a dos dimensiones (SAP IP, 2017).

Para definir las características del mallado se insertan los tamaños de cuerpo seleccionando la malla en el modelo y se definen las opciones requeridas en el menú del detalle de la malla que se muestra a continuación.

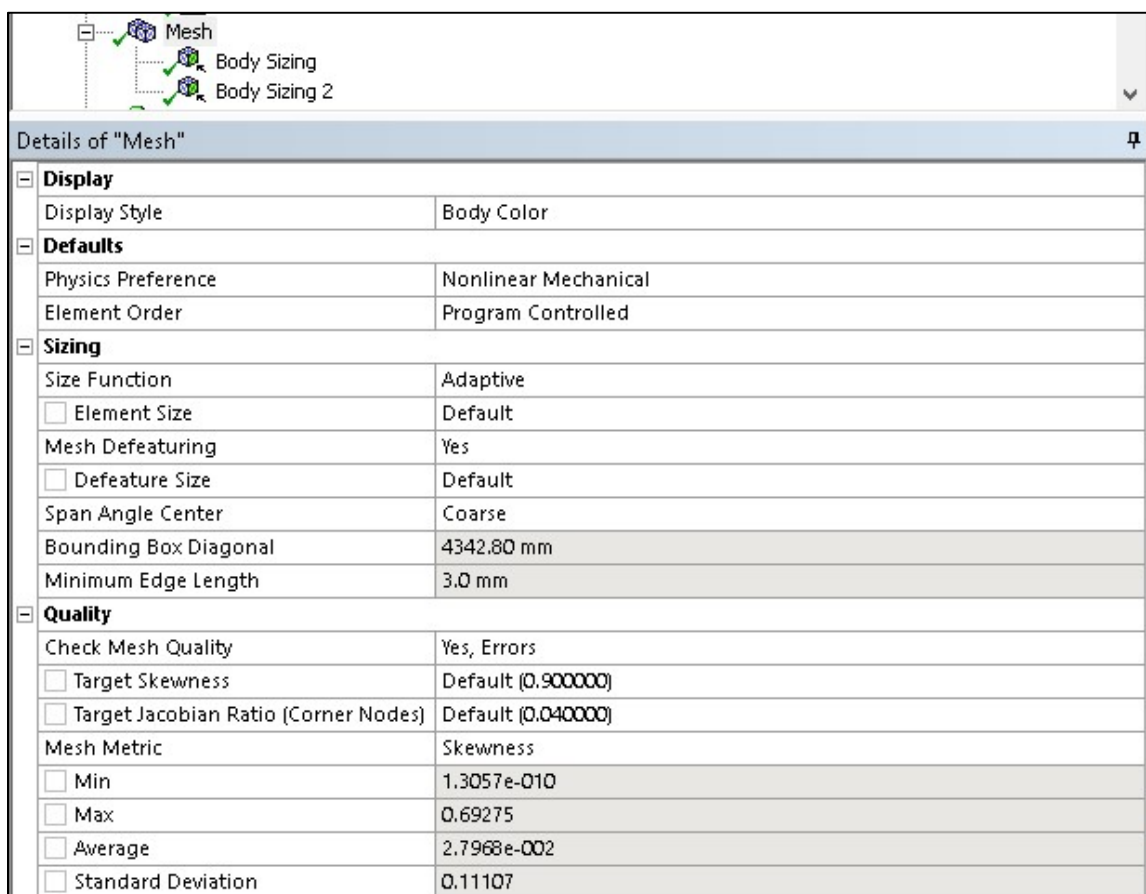


Figura 22. Menú para definición de características de mallado. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

3.2.6 Contacto entre piezas

Es necesario establecer condiciones especiales para el contacto entre las barras de pandeo torsional y la viga. Así como el contacto entre el alma de la viga y la placa de refuerzo cortante. Se asigna en la opción de contacto que no haya fricción entre las partes antes mencionadas. Las demás piezas de la conexión poseen el contacto de unión, simulando que se encuentran unidas.

La opción sin fricción evita que una o más caras planas o curvas se muevan o se deformen en la dirección normal. Ninguna parte del cuerpo de la superficie puede moverse, girar o deformarse de manera normal a la cara. Para las direcciones tangenciales, el cuerpo de la superficie es libre de moverse, girar y deformarse tangencialmente a la cara.

Las características mecánicas y geométricas de los especímenes en estudio se detallan a continuación.

3.3 Población y muestra

La selección de la muestra se hace de forma no probabilística, en donde desde el punto de vista cuantitativo, es útil para este diseño experimental, en cuanto lo que se desea elegir son tres geometrías específicas para la conexión estudiadas por Saneei et al y González, una controlada elección con objetivos especificados en el planteamiento del problema (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010). El motivo de esta elección es poder contar con valores reales obtenidos en un proceso experimental, con los cuales comparar los resultados que se vayan a obtener.

Adicionalmente se estudian dos conexiones con la misma geometría del espécimen de mayor tamaño, a la cual se le añade diafragmas alrededor de la columna, como atiesadores externos.

3.3.1 Geometría de especímenes en estudio

A continuación, se muestran los perfiles de las vigas y las secciones transversales de las columnas, que serán modeladas. Así como el agujero de acceso ubicado en el alma de la viga y las dimensiones utilizadas para la placa de refuerzo cortante.

Las soldaduras modeladas corresponden a las especificadas en la Figura 6, correspondientes a soldadura que une la placa de refuerzo cortante con la viga y la soldadura entre las alas y el alma de la viga, sobre la zona protegida. Siguiendo la investigación realizada por González (2018), no se realizan cuñas o biseles para la elaboración de las soldaduras, con el propósito de agilizar el modelo y disminuir la demanda de cálculo.

Además, se hace uso del comando de conexión que simula una unión entre las caras de los componentes con el propósito de simular las soldaduras correspondientes: soldaduras entre placas de la columna, soldaduras entre viga y cara de la columna, soldadura entre placa de refuerzo cortante y cara de columna, soldadura entre placas de la viga.

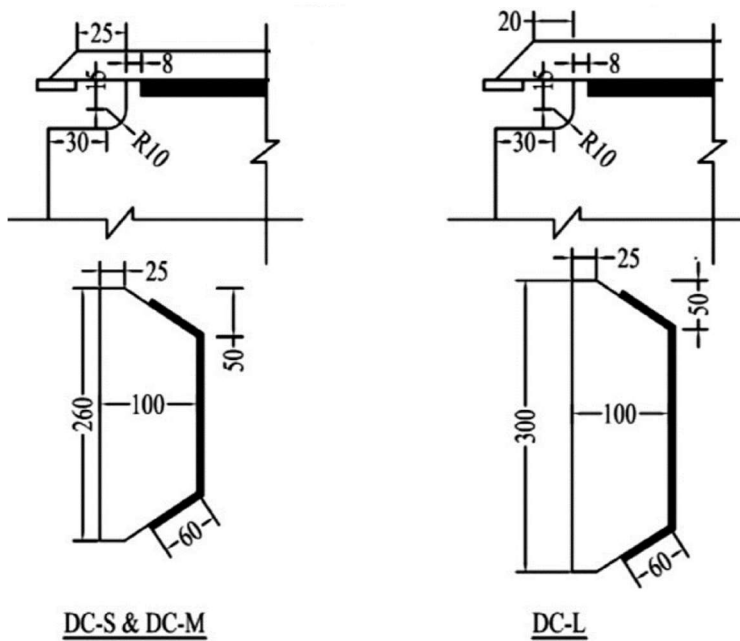


Figura 23. Detalles de agujeros de acceso y placas de refuerzo cortantes de la conexión. Fuente: Saneei, Gassemieh, & Mazroi, 2013, modificado por autora.

Tabla 6. Perfiles de vigas y secciones transversales de las columnas po utilizar en el modelado de la conexión WUF-W (González, 2018).

Especimen representativo	Especimen representativo	Especimen representativo
DCS	DCM	DCL
Viga		
Columna		

Los especímenes con diafragmas externos DCL PC1 y DCL PC2 son modificaciones realizadas al espécimen DCL, por lo tanto, las dimensiones de la viga y la columna son iguales. Sólo varía la unión que se realiza entre la viga y la columna. A continuación, se observa el detalle de estos especímenes.

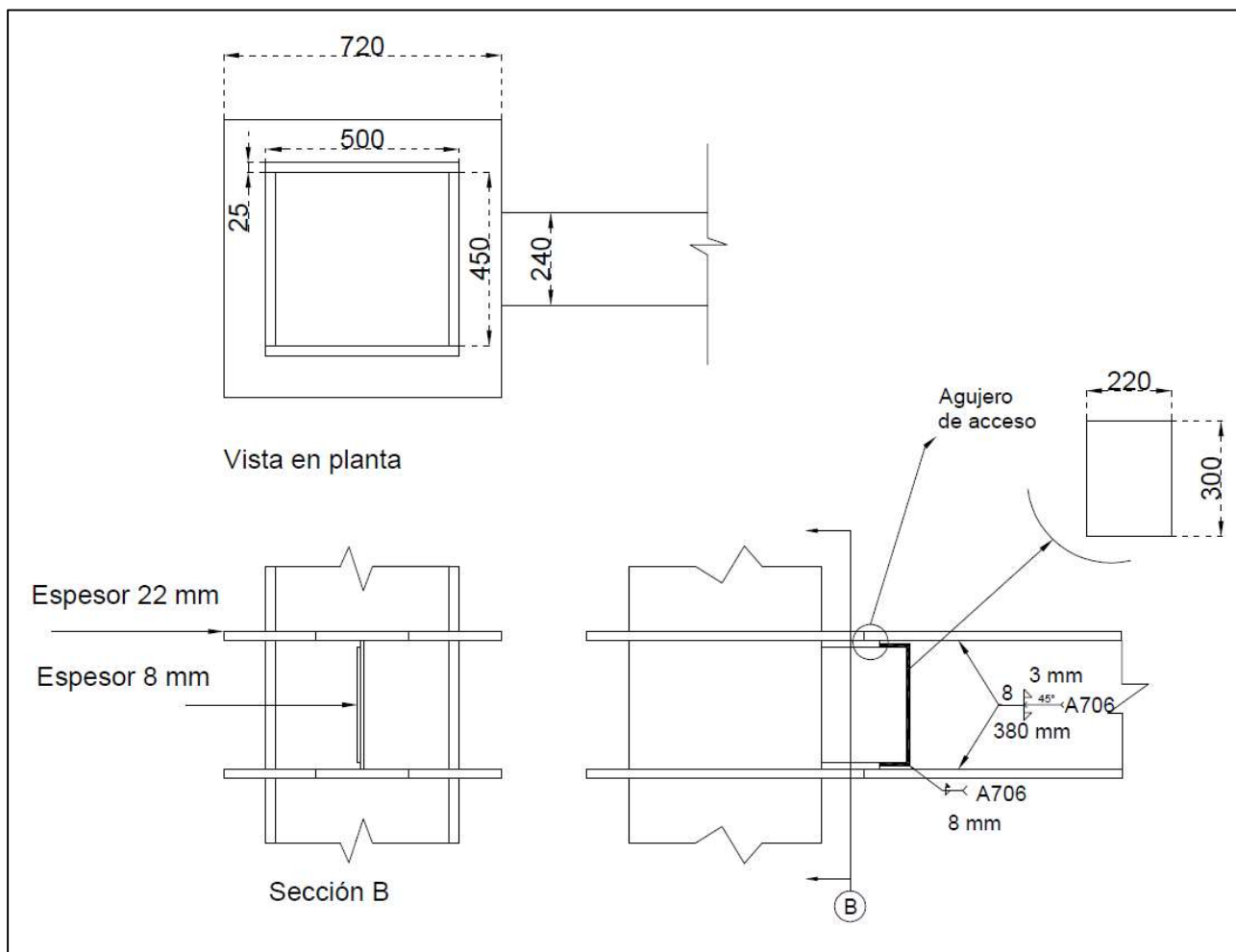


Figura 24. Detalle de conexión para espécimen DCL PC1. Fuente: propia.

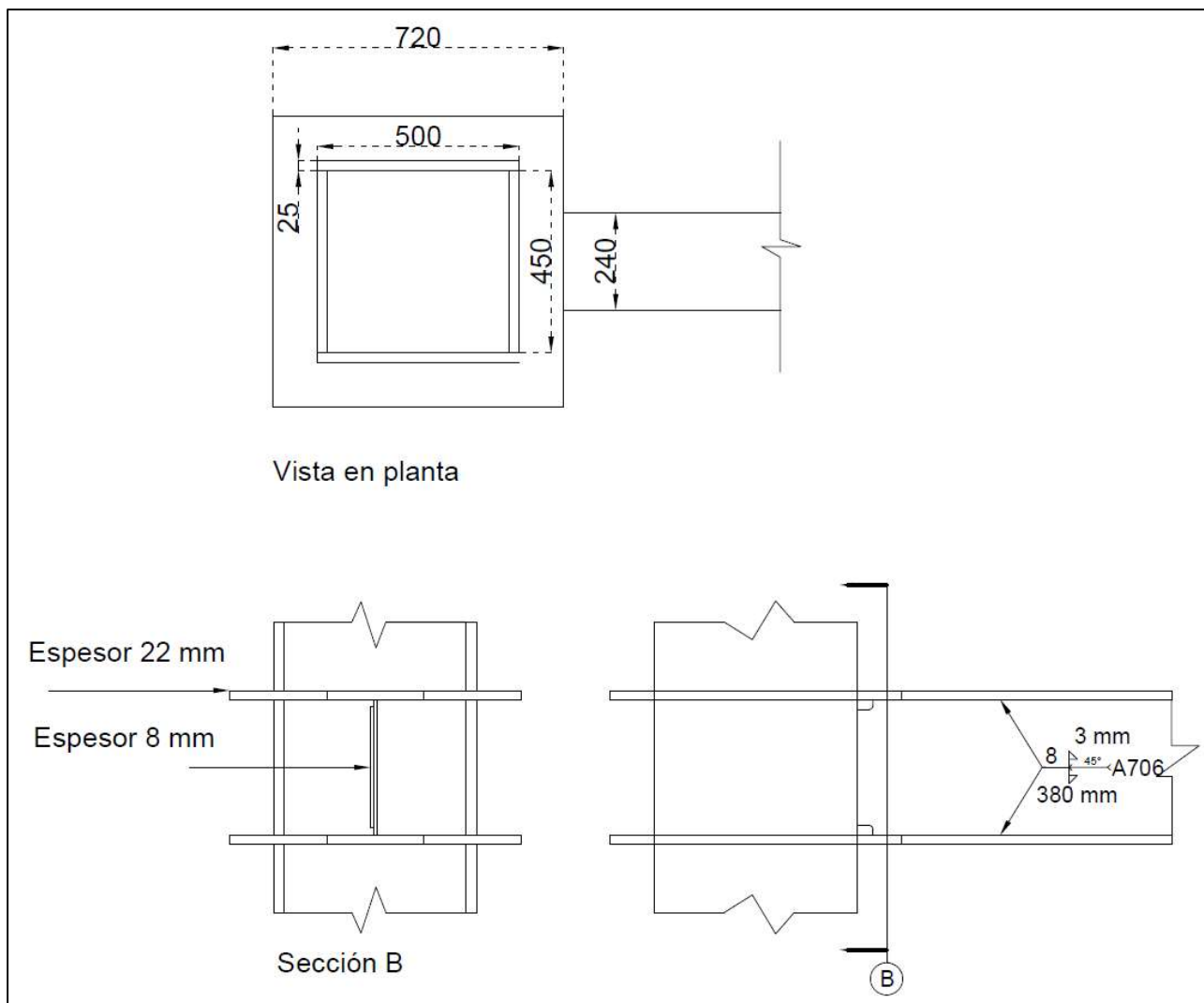


Figura 25. Detalle de conexión para espécimen DCL PC2. Fuente: propia.

3.3.2 Propiedades mecánicas de especímenes en estudio

A través del programa ANSYS Workbench, es posible definir las características mecánicas de los materiales que forman parte de la conexión. En este estudio se consideró acero A36 para la columna y los diafragmas externos, acero A572 para la viga y la placa de refuerzo cortante y acero A706 para las soldaduras, a continuación, se detalla la curva esfuerzo deformación utilizada para cada acero. Esta información se obtuvo de la investigación realizada por González (2018).

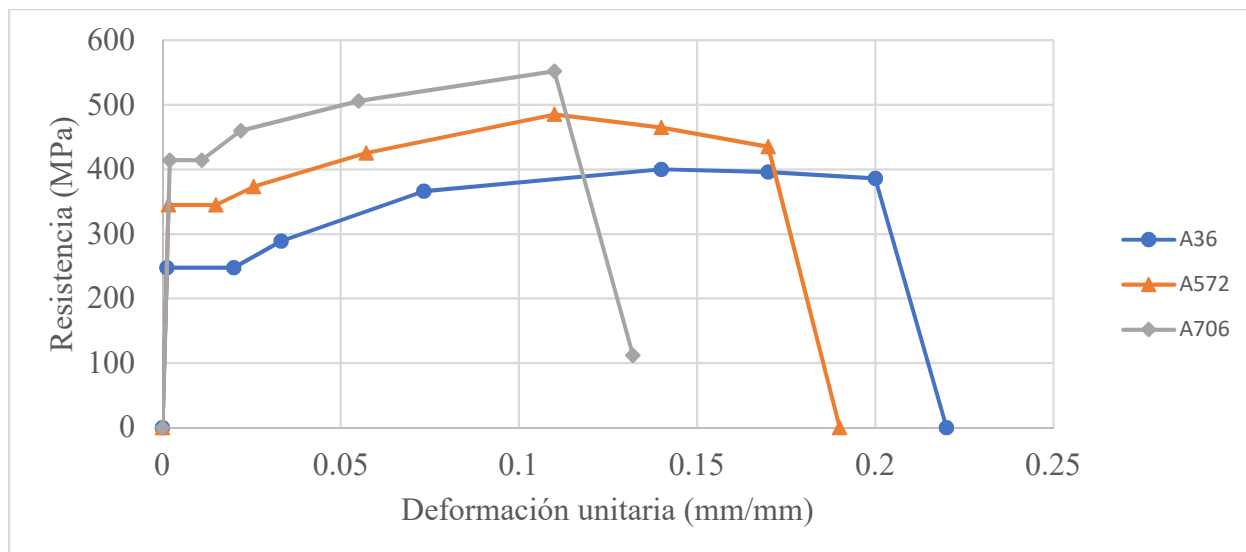


Figura 26. Curva de esfuerzo deformación para los aceros utilizados en los componentes de la conexión. Fuente propia.

Tabla 7. Datos utilizados para la curva esfuerzo deformación de los aceros utilizados.

A36		A572		A706	
Deformación unitaria (mm/mm)	Resistencia (Mpa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Resistencia (Mpa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Resistencia (Mpa)
0	0	0	0	0	0
0.00124	248	0.00172	345	0.002	414
0.02	248	0.015	345	0.011	414
0.0333	289	0.0256	373	0.022	460
0.0733	366	0.0572	425	0.055	506
0.14	400	0.11	485	0.11	552
0.17	396	0.14	465	0.132	112
0.2	386	0.17	435	-	-
0.22	0	0.19	0	-	-

Fuente: (González, 2018)

Los datos utilizados han sido los del comportamiento inelástico de los aceros correspondientes, buscando simular la conducta dúctil del acero y siendo estos los responsables del comportamiento histerético. Los datos de la Tabla 7 son asignados en ANSYS Workbench a los datos de ingeniería de la propiedad denominada endurecimiento cinemático multilíneal.

El modelo de endurecimiento cinemático multilíneal, simula el comportamiento de la plasticidad del metal bajo una carga cíclica. Se deben proporcionar los datos en forma de

deformación plástica versus tensión. El primer punto de la curva debe ser el punto de fluencia, es decir, tensión plástica cero y tensión de fluencia (SAP IP, 2017).

Además, se asigna un módulo de Young de 201000 MPa, y los demás datos se han dejado por defecto: densidad = 7850 Kg/m³, número de Poisson = 0.3, módulo de cortante = 77 300 MPa y módulo de volumen = 167 000 MPa.

Una vez definidas las características mecánicas, se procede a seleccionar para cada elemento de la conexión su material en el programa ANSYS Mechanical.

3.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Los datos serán obtenidos tras las corridas de los experimentos configurados en el sistema computacional ANSYS.

Haciendo uso de ANSYS y sus herramientas de representación gráfica, se buscará obtener la distribución de esfuerzos equivalentes de Von Mises y la ubicación de las articulaciones plásticas, como fue obtenido en la investigación realizada por González.

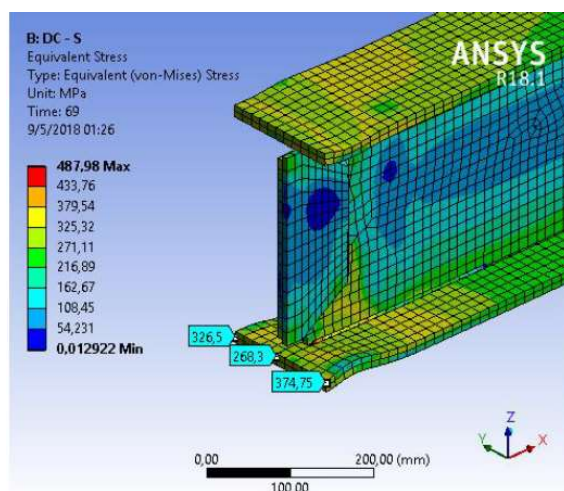


Figura 27. Esfuerzos de Von Mises en viga I, conectada a columna de sección cuadrada (conexión WUF-W). Fuente: González, 2018.

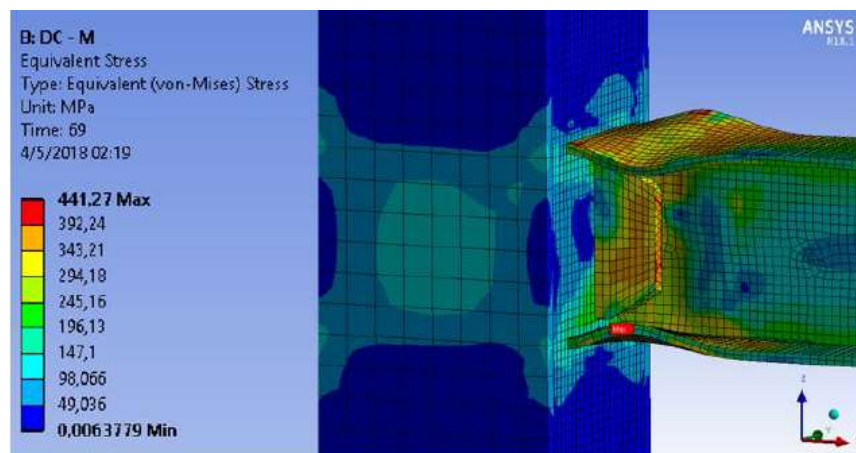


Figura 28. Esfuerzos de Von Mises, en conexión de viga I y columna de sección cuadrada (conexión WUF-W). Fuente: González, 2018.

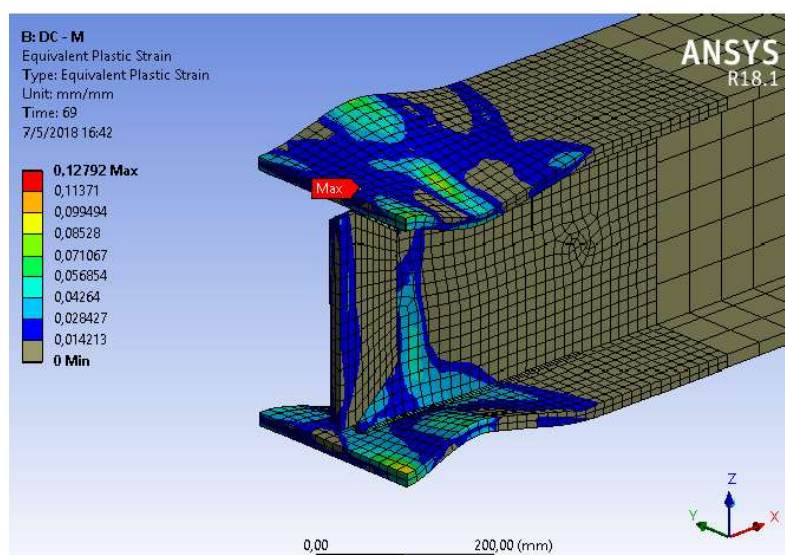


Figura 29. Equivalente plástico, para conexión de viga I y columna de sección cuadrada (conexión WUF-W). Fuente: González, 2018.

Adicionalmente es posible obtener en ANSYS Mechanical la fuerza de reacción en la punta de la viga y la deformación en ese punto.

Multiplicando la fuerza en la punta de la viga por la longitud de la viga obtendremos el momento que se genera en la cara de la columna. El momento en la cara de la columna se grafica contra el desplazamiento en la punta de la viga y se debe obtener un gráfico histerético. El momento en la cara de la columna deberá cumplir con lo expuesto en el paradigma de esta investigación para asignar la conexión a una conexión apta para un marco IMF o SMF.

3.5 Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de los datos

Para el procesamiento y análisis de datos se hará uso del sistema computacional Microsoft Excel 2016, en donde a partir de los datos obtenidos de ANSYS, se graficarán los diagramas de histéresis: curvas de relación entre momento en la cara de la columna y rotación relativa de la viga.

3.5.1 Validación y certeza de los resultados

En los modelos de elementos finitos la incertidumbre se puede encontrar en errores provenientes de la idealización de la realidad asociados a asunciones, leyes mecánicas de comportamiento, la cinemática, el equilibrio y las condiciones de frontera. También puede haber errores provenientes de la discretización.

Para evaluar la incertidumbre, se seguirá el modelo para análisis de elementos finitos denominado elementos finitos bayesianos (Haukaas & Gardoni, 2011). En donde se propone contar con un sensor o variable que logra inscribir la incertidumbre de los resultados obtenidos. Para este caso específico se propone utilizar el sensor debido a la geometría de los elementos.

Capítulo 4. Análisis de resultados

4.1 Resultados de histéresis de la conexión de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (WUF-W)

Siguiendo la investigación realizada por González (2018), se modelaron las piezas de la columna con acero A36 y las piezas de la viga con acero A572, para los tres especímenes.

Se calculó el momento máximo que se desarrollaría en la rótula plástica para los tres especímenes y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 8. Momento plástico para cada espécimen en estudio.

Especimen	Momento plástico (KN m)	0.8Mp
DCS	445.30	356.24
DCM	554.37	443.50
DCL	965.95	772.76

Para cumplir con lo requerido para una conexión IMF, la resistencia a la flexión medida de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser al menos $0.8Mp$ de la viga conectada, para una rotación de 0.02 radianes. Por su parte los requerimientos para una conexión viga-columna de un SMF, debe ser al menos $0.8 Mp$ de la viga conectada, para una rotación de 0.04 radianes.

En las siguientes páginas, se pueden observar los diagramas de histéresis obtenidos para los especímenes en estudio. De acuerdo a los resultados obtenidos no se cumple con la resistencia a la flexión establecida para una conexión viga columna en un marco IMF ni para una conexión en un marco SMF.

El valor del momento máximo alcanzado para 0.02 rad y 0.04 rad para los especímenes en estudio se muestra a continuación.

Tabla 9. Momento máximo alcanzado para cada espécimen a 0.02 rad y 0.04 rad.

Especimen	Momento máximo a 0.02 rad (KN m)	Momento máximo a 0.04 rad (KN m)
DCS	93.00	108.80
DCM	177.05	206.60
DCL	213.83	255.87

El momento máximo para el espécimen DCS a 0.02 rad es un 26.1 % del $0.8M_p$, para el espécimen DCM es un 26.4 % del $0.8M_p$ y para el espécimen DCL es un 27.8 % del $0.8M_p$. El momento máximo para el espécimen DCS a 0.04 rad es un 30.5 % del $0.8M_p$, para el espécimen DCM es un 46.6 % del $0.8M_p$ y para el espécimen DCL es un 33.1 % del $0.8M_p$.

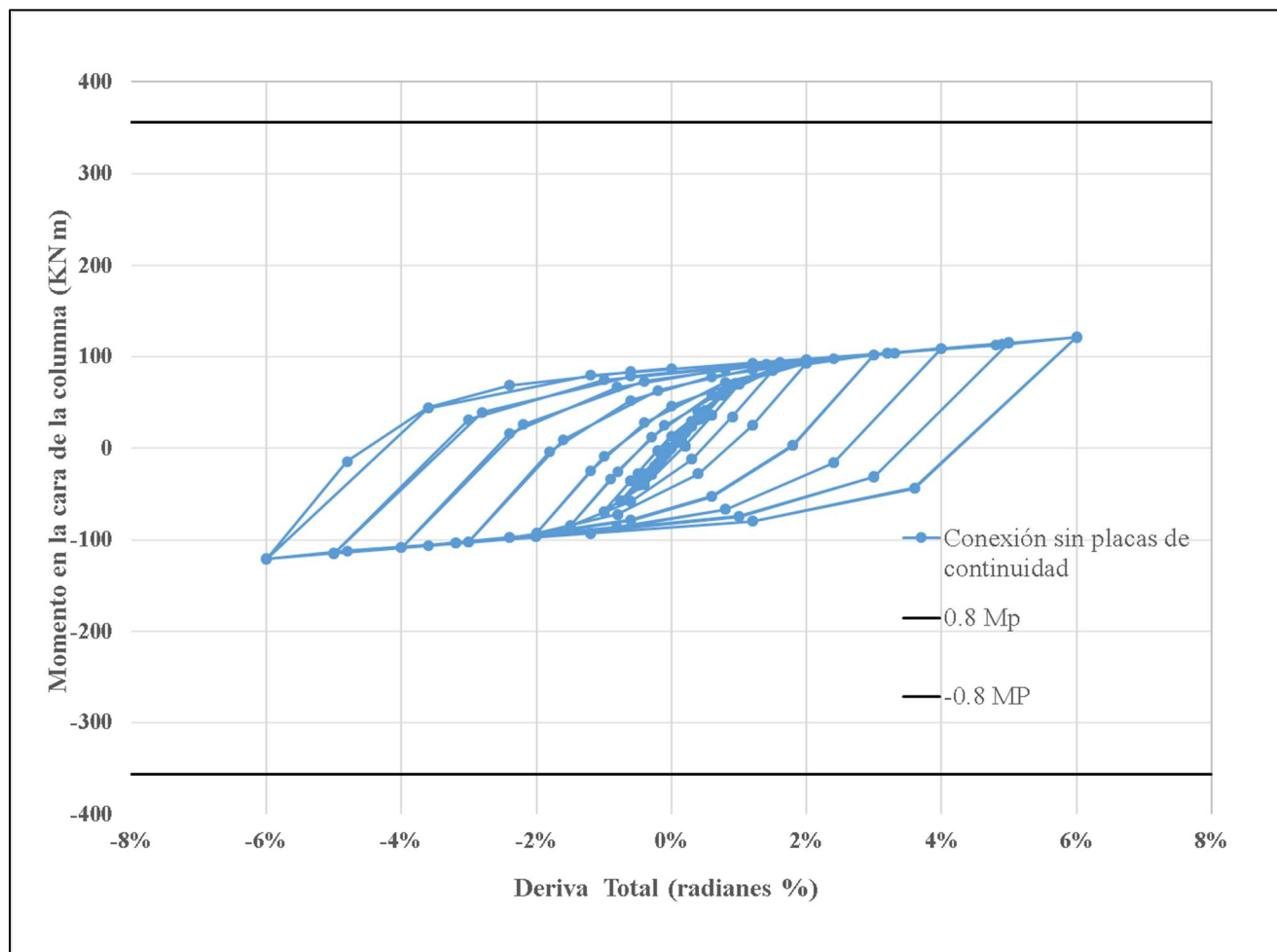


Figura 30. Diagrama de histéresis de espécimen representativo DCS. Fuente: propia.

La conexión estudiada corresponde a una conexión flexible, que no alcanza la resistencia a flexión requerida. Esto revela un comportamiento que dista mucho de la hipótesis usual en los modelos de conexión rígida y resistente a momento.

Si la rigidez de la conexión es muy baja, la capacidad del momento plástico de la viga puede ser alcanzada rápidamente. Por lo tanto, la capacidad de resistencia a la flexión en la conexión, sólo podrá ser alcanzada si existe suficiente capacidad de rotación en donde se localizaría la rótula

plástica. Para el caso de las conexiones con muy baja rigidez este fenómeno no se desarrolla (Kurobane, Packer, Wardenier, & Yeomans, 2004).

Los diagramas de histéresis obtenidos para los tres especímenes demuestran un comportamiento inelástico en la conexión. Además, los diagramas de histéresis no muestran presencia de degradación en la resistencia de la conexión, pues los bucles histéreticos son continuos.

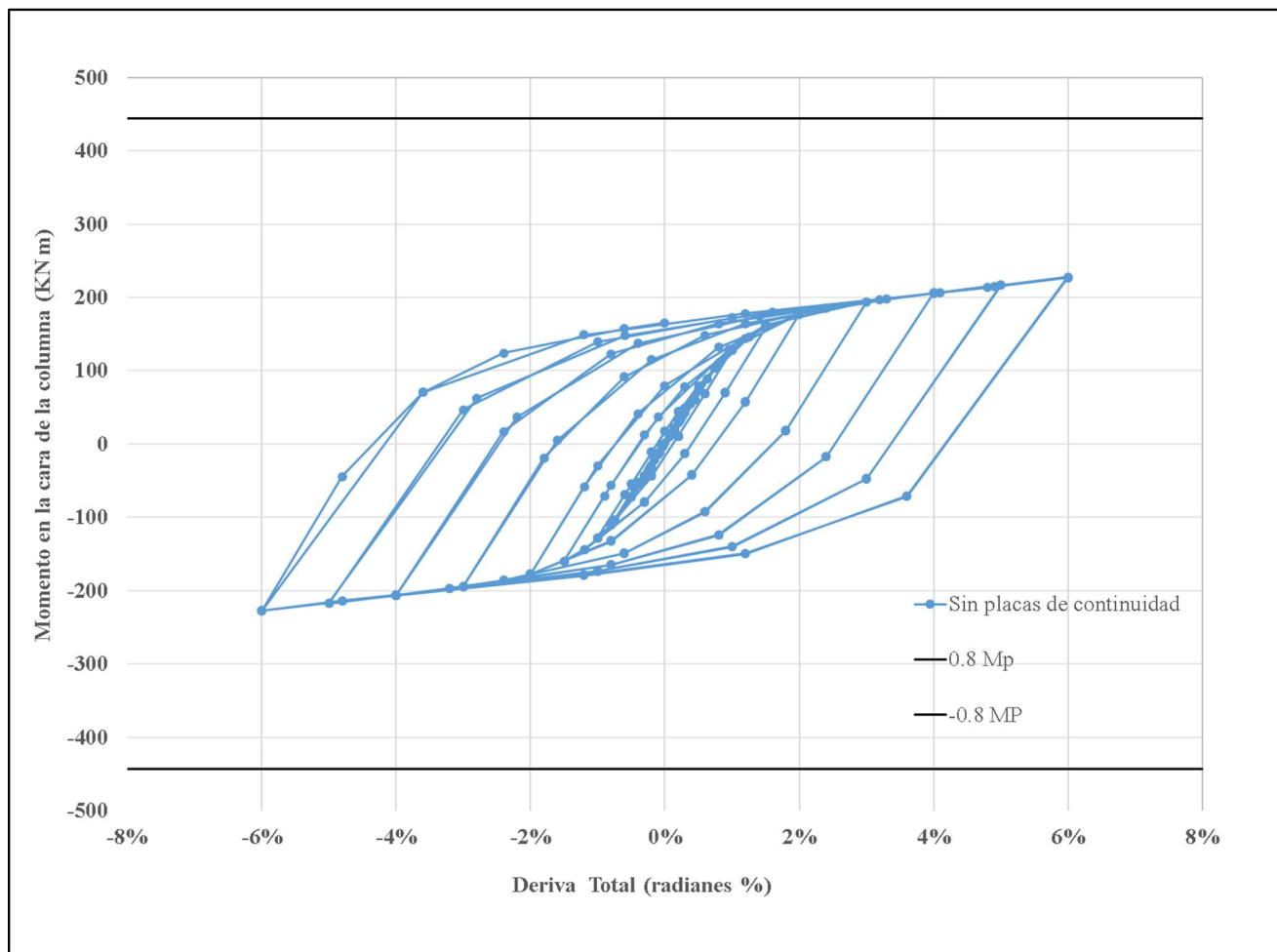


Figura 31. Diagrama de histéresis de espécimen representativo DCM. Fuente: propia.

Sin embargo, como se verá a continuación, en la comparación de resultados de histéresis de la conexión de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (conexión WUF-W), contra la conexión con atiesadores internos, al alcanzar rotaciones de 6 radianes en las conexiones con atiesadores internos, ya se habían generado rótulas plásticas en la viga.

Por lo tanto, se considera la posibilidad de que la falla generada ante una carga cíclica en la conexión sin atiesadores internos, no sea visible en los diagramas de histéresis. Ya que el modelo de endurecimiento cinemático multilíneal, simula el comportamiento inelástico de los materiales ante una carga cíclica, pero no nos muestra explícitamente otro tipo de fallas, como delaminación, que comprometen la resistencia de una conexión.

Lo que sí es posible determinar haciendo uso de esta metodología son los puntos donde se concentran los esfuerzos generados ante una carga cíclica. Y en caso de estar presentes, se logra determinar la ubicación de las rótulas plásticas. Este detalle se podrá observar en la sección que analiza la distribución de esfuerzos equivalentes.

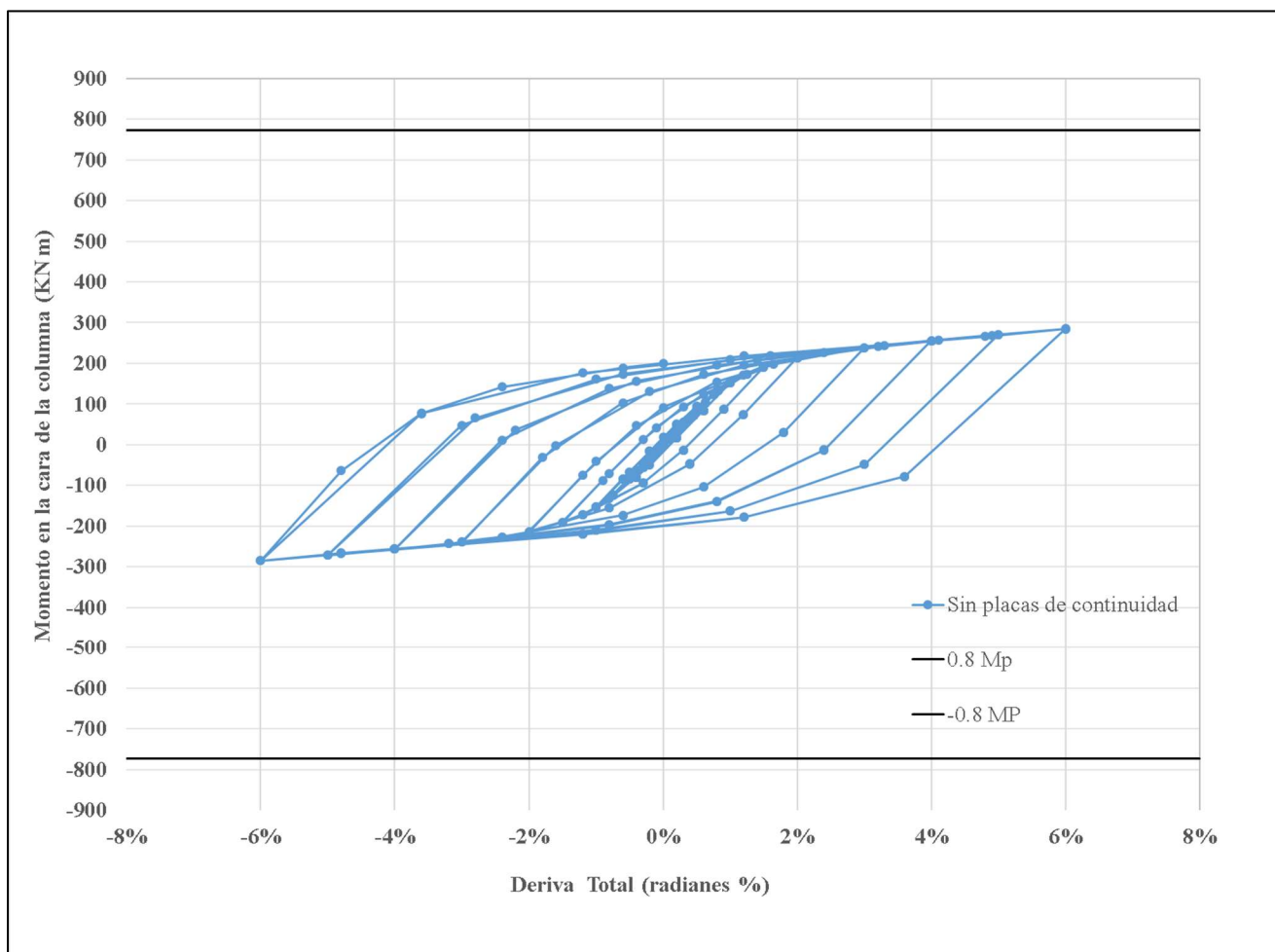


Figura 32. Diagrama de histéresis de espécimen representativo DCL. Fuente: propia.

El resultado obtenido en esta investigación, en donde el momento alcanzado por la conexión es inferior a M_p , concuerda con los resultados de la investigación denominada Estudio experimental de conexiones de acero a momento de vigas I con columna rectangular HSS (del Campo Flores & Gómez Bernal, 2010). En dicha investigación se somete a una carga cíclica una conexión formada por una columna tubular HSS 12x12x1/2 y una viga W16x36, cuya conexión se encuentra soldada sin refuerzo. Los resultados en términos de la curva de histéresis muestran una resistencia a flexión por debajo del momento plástico nominal (M_p) y la degradación de los bucles histeréticos a niveles de carga relativamente bajo (cercano a 0.04 rad). Físicamente la conexión presenta un desgarre en el borde del patín y en la arista de la columna. Por lo que los investigadores no recomiendan el uso de esta conexión en edificios diseñados para resistir fuerzas laterales altas, ni cuando se contempla un diseño para ductilidad alta.

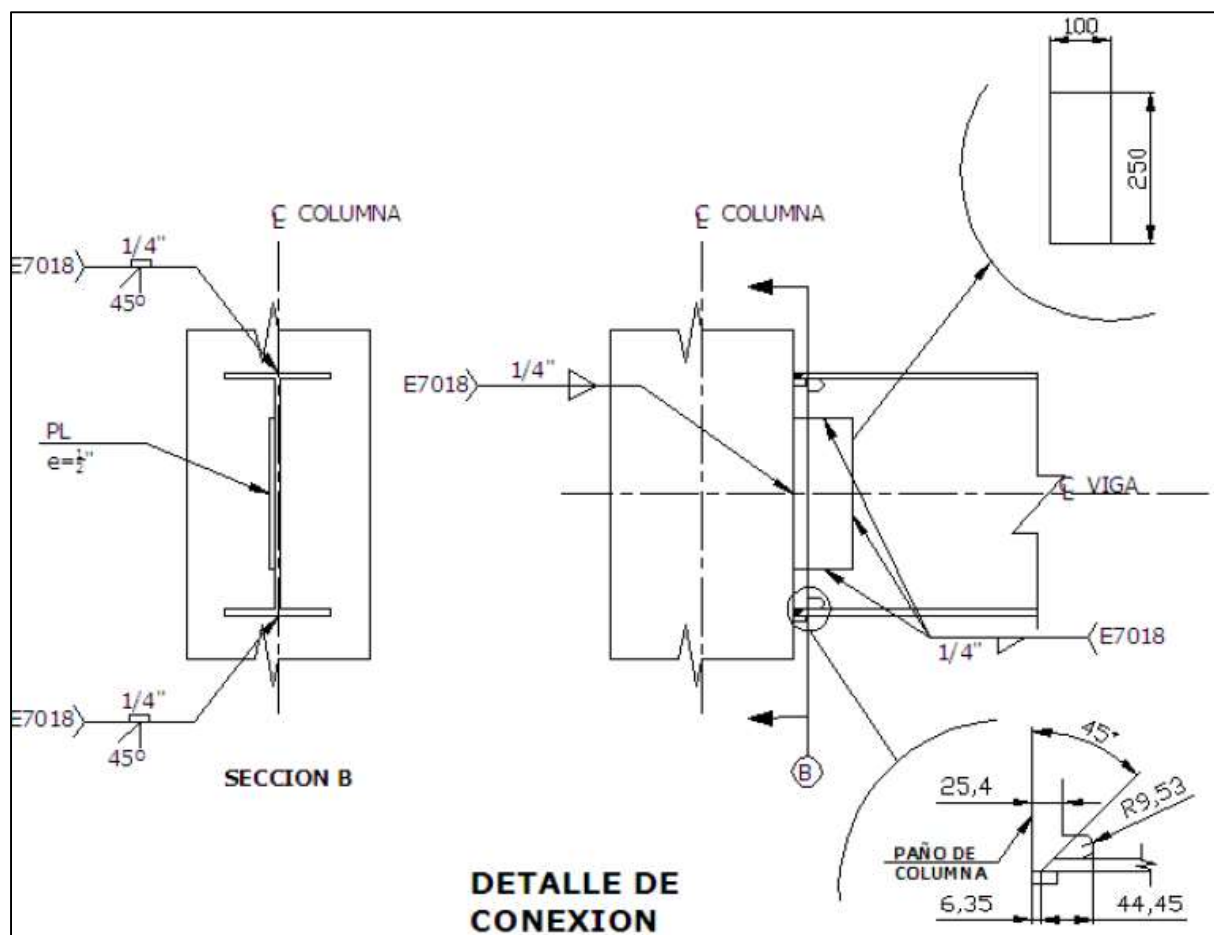


Figura 33. Especímen de conexión soldada directamente sin refuerzo, ECS1. Fuente: del Campo Flores & Gómez Bernal, 2010.



Figura 34. Comportamiento de conexión entre tubo HSS 12x12x1/2 y una viga W16x36, ante cargas cíclicas. Fuente: del Campo Flores & Gómez Bernal, 2010

4.2. Comparación de resultados de histéresis de la conexión de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (WUF-W) contra la conexión con atiesadores internos

A continuación, se observa la comparación entre las curvas de histéresis de los especímenes estudiados y la conexión con atiesadores internos. Ambas curvas fueron obtenidas tras el estudio analítico a través del programa ANSYS. La conexión con atiesadores internos fue estudiada por González (2018) haciendo uso de ANSYS. Se observa que la conexión con atiesadores internos alcanza la resistencia a la flexión requerida para ser utilizada en un marco especial de momento SMF. La resistencia a la flexión disminuye alrededor de 3.5 veces al eliminar los atiesadores en los especímenes DCL y DCS, y aproximadamente 2 veces para el espécimen DCM.

Sin embargo, la conexión con atiesadores internos tiene sus desventajas. La investigación de del Campo Flores & Gómez Bernal, realiza esta comparación en sus especímenes:

En resumen, con esta solución (con atiesadores internos) si se incrementó en aproximadamente 3 veces la capacidad a momento respecto al espécimen ECS1, y desde luego también aumenta la rigidez, sin embargo, debe tomarse en cuenta que después de la falla de la soldadura, disminuyen drásticamente el momento resistente y la rigidez, llegando a una situación similar al caso uno (p.15).

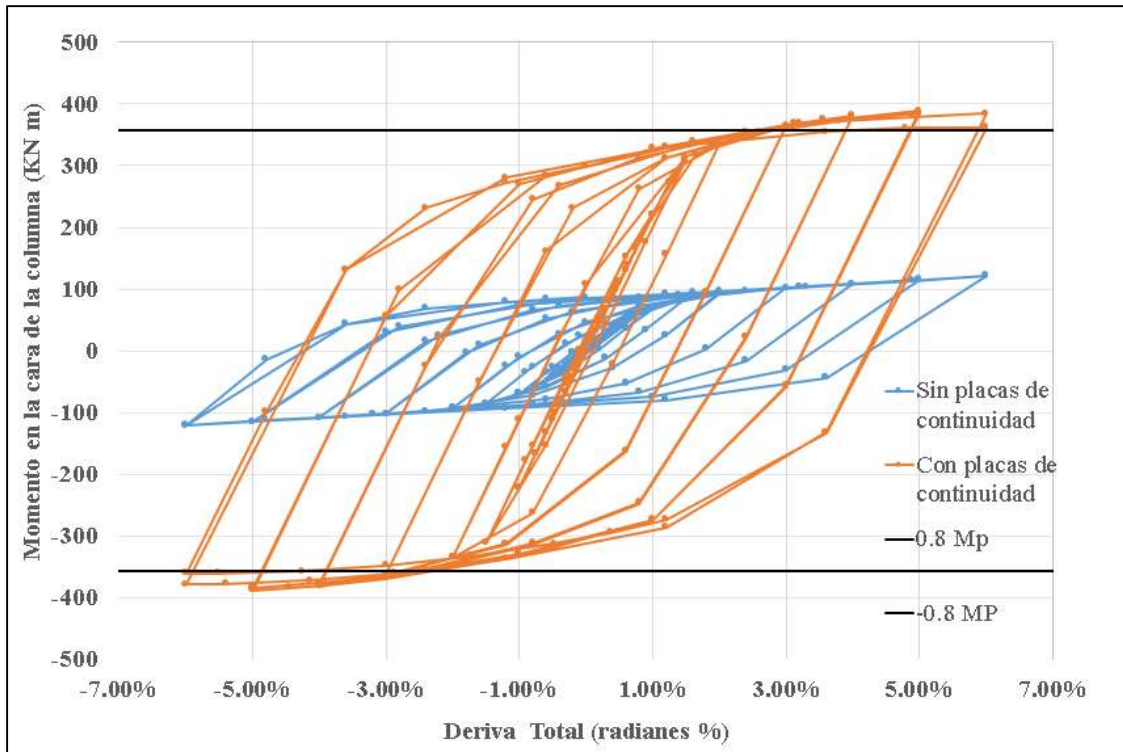


Figura 35. Comparación de diagrama de histéresis de espécimen DCS, con atiesadores internos y sin ellos. Fuente: propia.

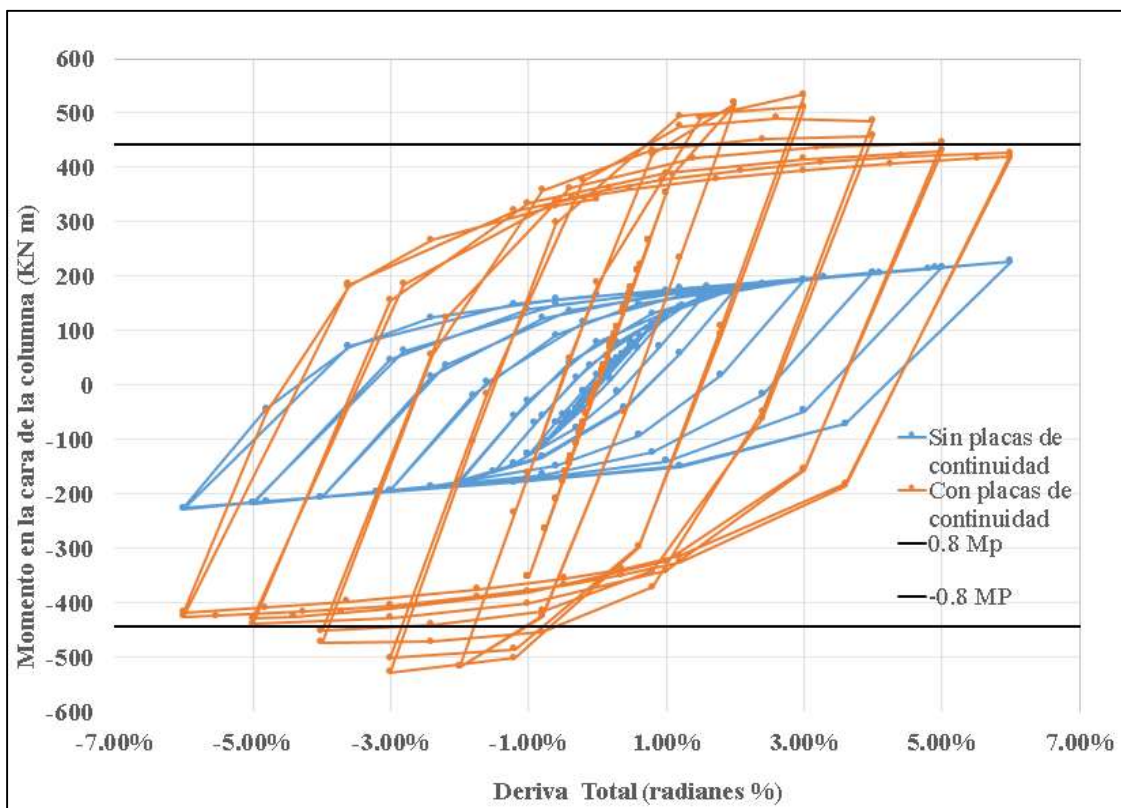


Figura 36. Comparación de diagrama de histéresis de espécimen DCM, con atiesadores internos y sin ellos. Fuente: propia.

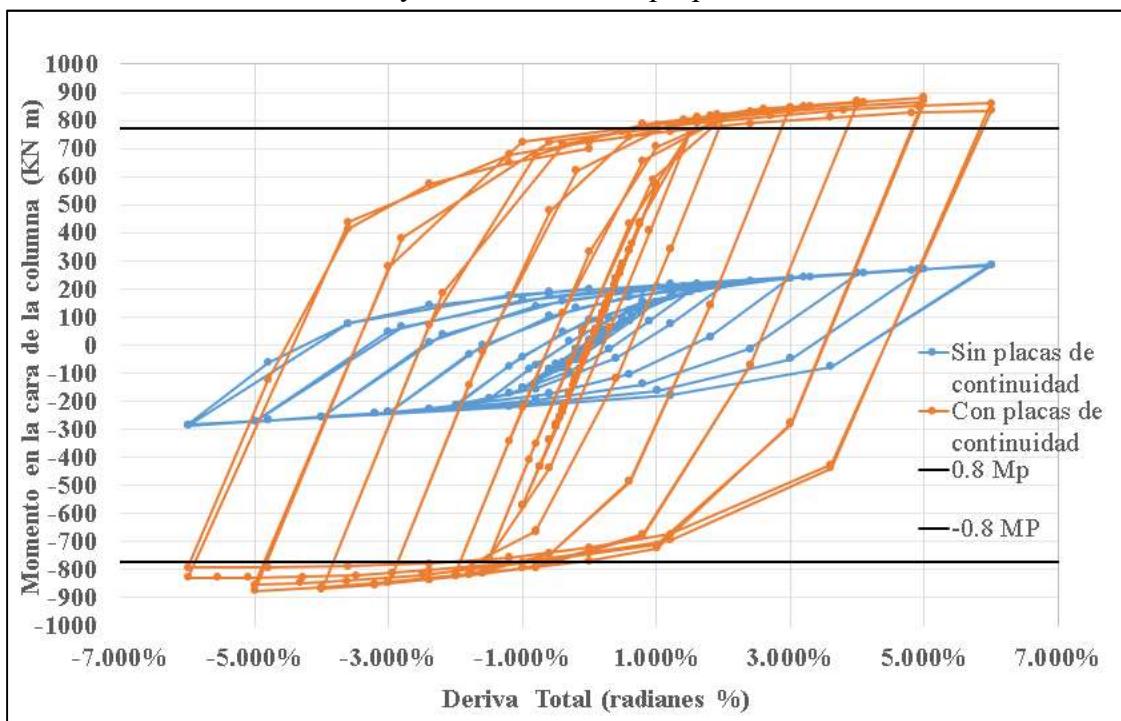


Figura 37. Comparación de diagrama de histéresis de espécimen DCL, con atiesadores internos y sin ellos. Fuente: propia.

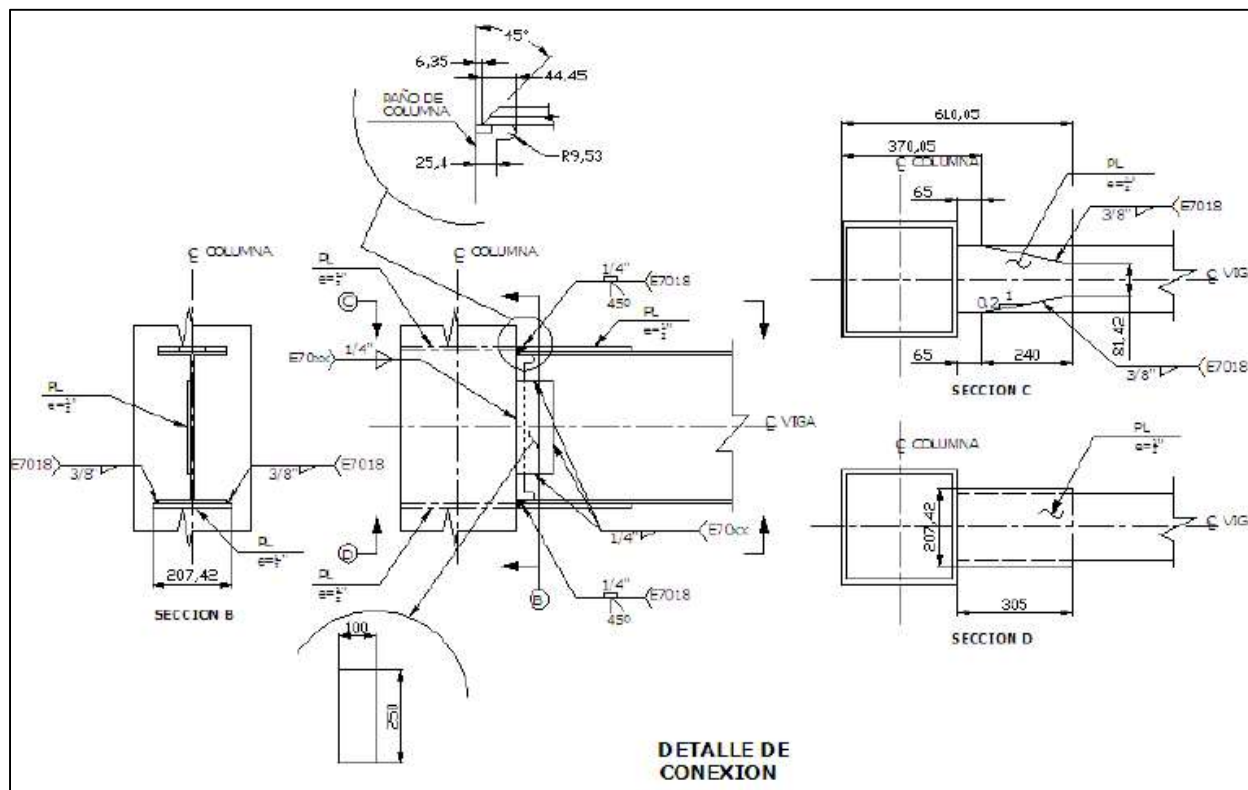


Figura 38. Especimen de conexión soldada directamente con atiesadores internos como refuerzo.
Fuente: del Campo Flores & Gómez Bernal, 2010.

Según Saneei, Ghassemieh & Mazrio (2013), la conexión con atiesadores internos puede no ser útil debido a la potencial factura en la soldadura presente en los atiesadores internos. Adicionalmente su construcción añade mayor incertidumbre en el posible comportamiento de la conexión, pues requiere de un trabajo altamente calificado para construir el detalle requerido por los atiesadores internos.

4.3 Distribución de esfuerzos equivalentes de Von Mises para especímenes

Realizando una comparación de los especímenes estudiados, contra la investigación realizada por González (2018). Se observa que existe una mayor concentración de esfuerzos en la columna, cuando no se cuenta con los atiesadores internos, pues hay una disminución en la rigidez de la conexión y el acero de la columna presenta mayor deformación unitaria, a menor esfuerzo aplicado, en comparación con el acero de la viga. Además, hay una disminución de esfuerzos en la viga, tanto en las alas como en el alma, de aproximadamente 246 MPa.

Para el espécimen DCS, la mayor concentración de esfuerzos se genera en las esquinas de las alas adyacentes a la columna, y sus magnitudes son de aproximadamente 360 MPa. Se observa

como a excepción de las esquinas de las alas de la viga, el acero de la viga se comporta en un rango lineal, pues los esfuerzos alcanzados en esta zona son inferiores al esfuerzo de cedencia de 345 MPa. Sin embargo, en las esquinas de las alas de la viga adyacentes a la columna si se da un comportamiento inelástico. Por su parte la cara de la columna adyacente a la viga presenta un comportamiento inelástico pues gran porcentaje de su área supera esfuerzos de 248 MPa. Cuando la conexión posee atiesadores internos, la viga se comporta inelásticamente y se generan rótulas plásticas en la viga.

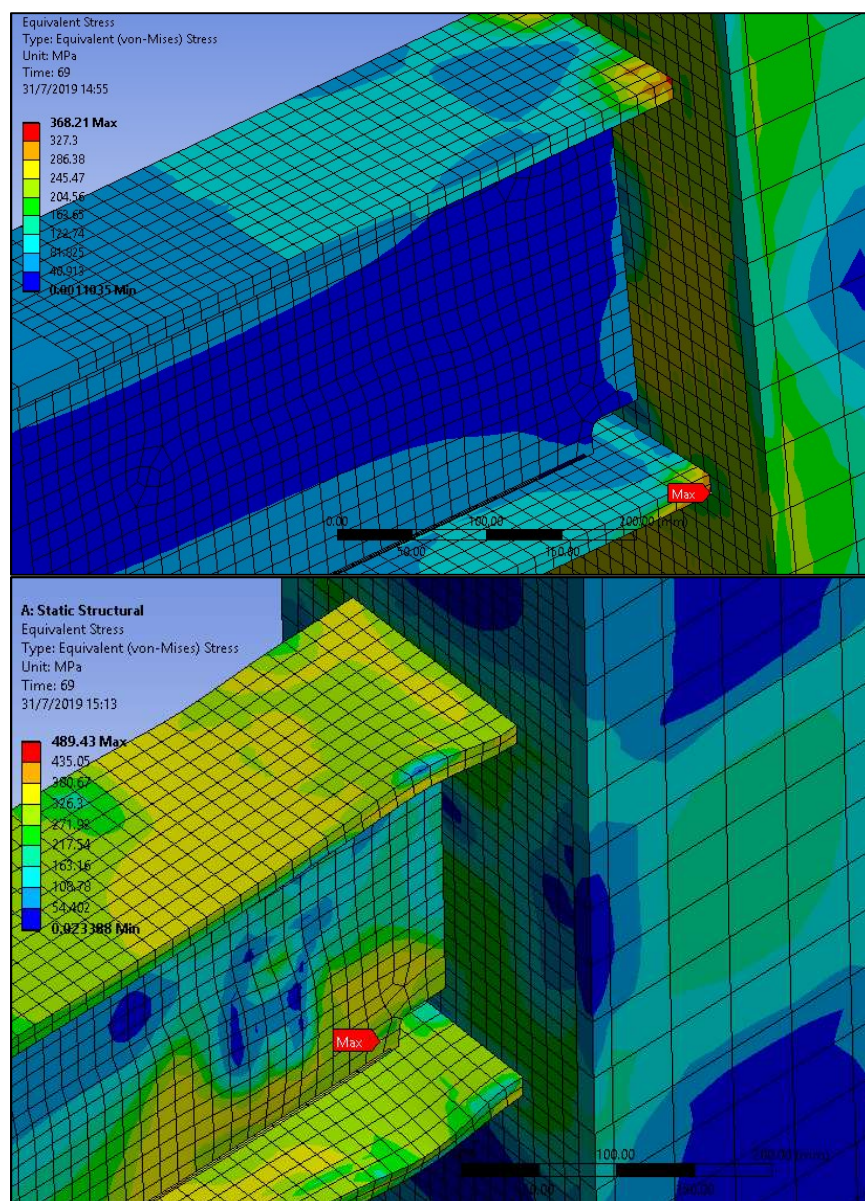


Figura 39. Comparación de esfuerzos de Von Mises para conexión sin atiesadores (arriba) y con estos (abajo), espécimen DCS. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

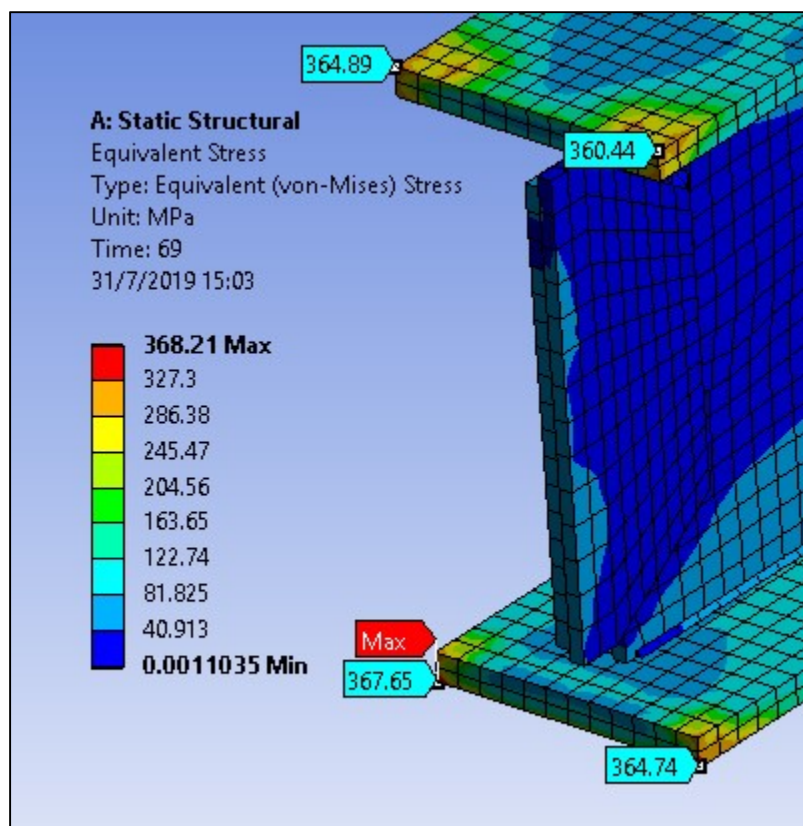


Figura 40. Esfuerzos de Von Mises máximos presentados para espécimen DCS. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

Probablemente la alta concentración de esfuerzos en las esquinas del patín de la viga, propicie un desgarramiento laminar en la parte de la unión entre la viga y la columna cercano al sitio donde se desarrollan estos esfuerzos. También se puede presentar una falla en la soldadura o una falla en el ala de la viga. No es viable que la falla sea controlada en áreas cercanas a la soldadura, donde el proceso constructivo incorpora incertidumbre.

En el esquema a continuación se pueden observar los modos de falla antes mencionados previstos en una conexión entre una viga I y una columna tubular (Wardenier, Packer, Zhao, & van der Vegte, 2010). Estos modos de falla fueron el resultado de la investigación denominada Comportamiento de una conexión flexible soldada entre una viga I y una columna tubular bajo una carga sísmica, en donde la columna tubular contaba con un espesor de 4.76 mm y 8.75 mm y el espesor del alma de la viga I era de 5.14 mm (Song, Heidarpour, Zhao, & Han, 2015).

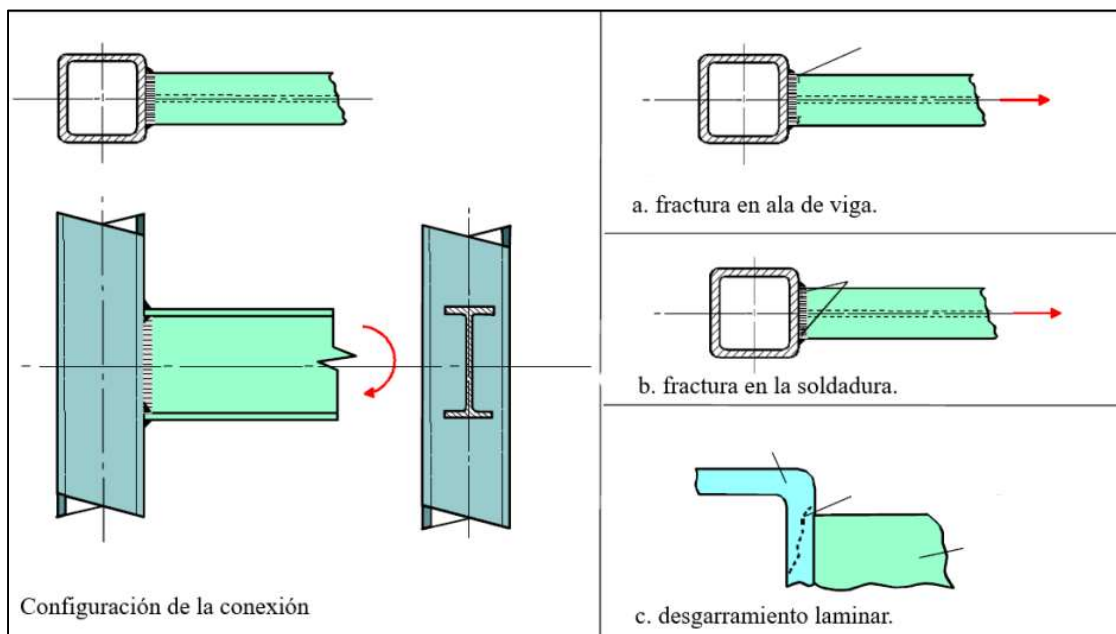


Figura 41. Modos de falla de conexión entre viga I y columna tubular. Fuente: Wardenier, Packer, Zhao, & van der Vegte, 2010, modificado por autora.



Figura 42. Fenómeno de falla en conexiones soldadas bajo cargas cíclicas. Fuente: Song, Heidarpour, Zhao, & Han, 2015, modificado por autora.

El fenómeno observado en el espécimen DCS, se repite en los especímenes DCM y DCL, en donde la mayor concentración de esfuerzos, se presenta en las esquinas del ala de la viga. En el espécimen DCM, los esfuerzos en las esquinas de patín de la viga son, en promedio, de 398 MPa.

En el espécimen DCL, los esfuerzos en las esquinas del patín superior de la viga son, en promedio, de 364 MPa y en las esquinas inferiores, de 319 MPa. El espécimen DCL presenta una concentración de esfuerzos, de aproximadamente 335 MPa, a lo largo del extremo del patín superior de la viga adyacente a la columna.

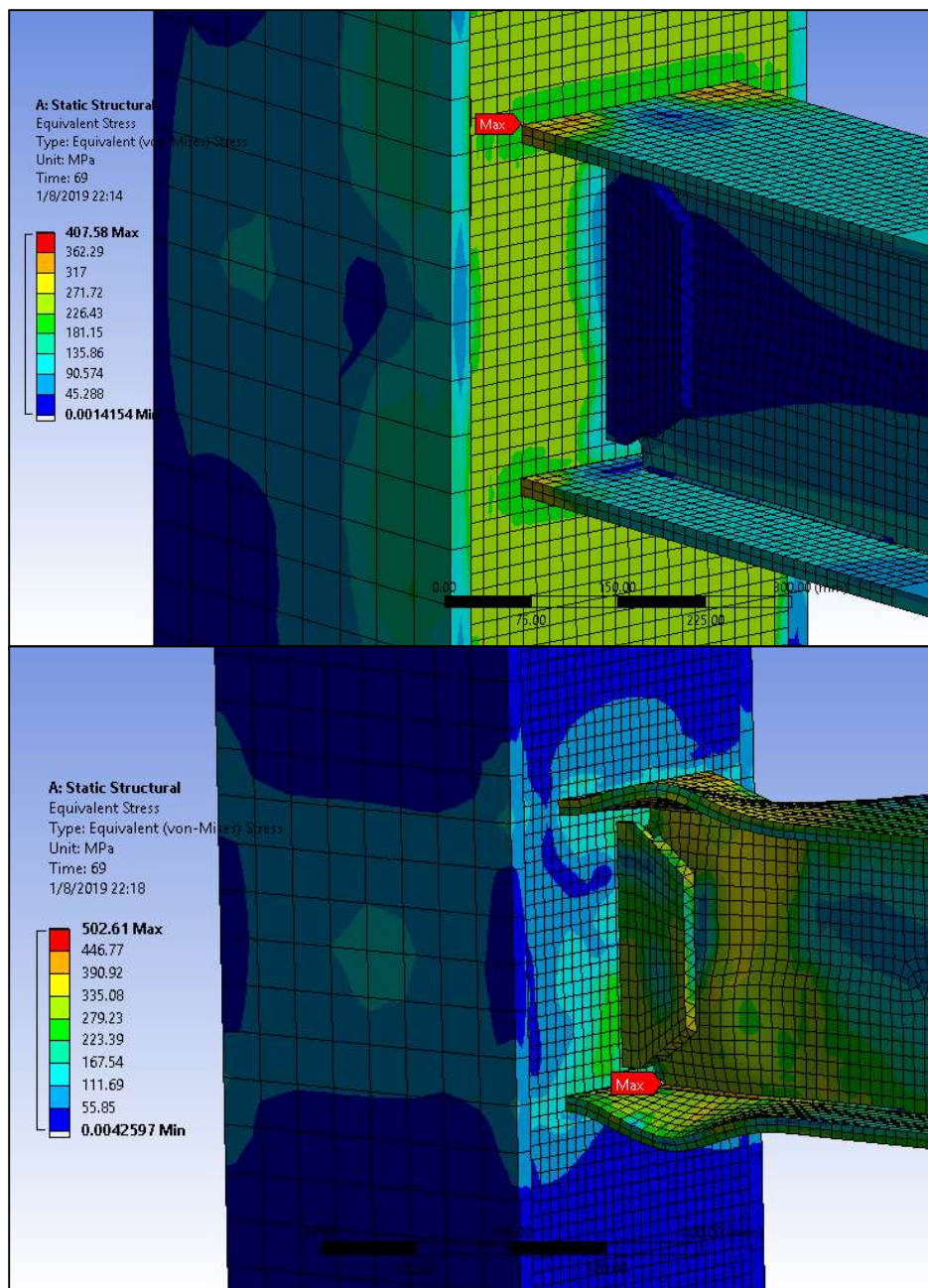


Figura 43. Comparación de esfuerzos de Von Mises, para conexión sin atesadores (arriba) y con estos (abajo), espécimen DCM. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

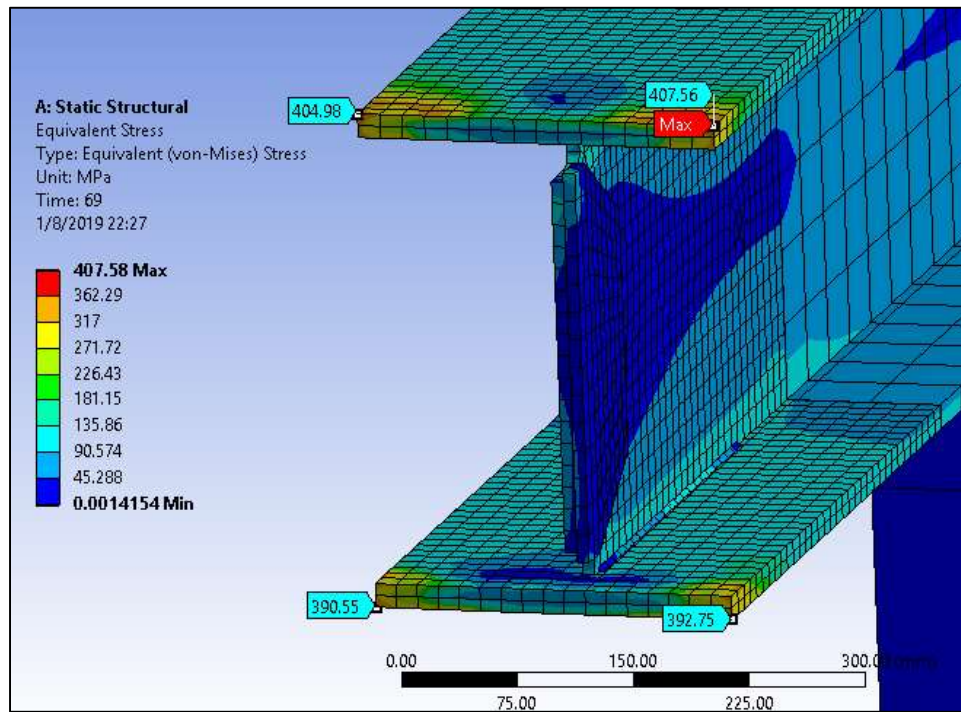


Figura 44. Esfuerzos de Von Mises máximos presentados para espécimen DCM. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

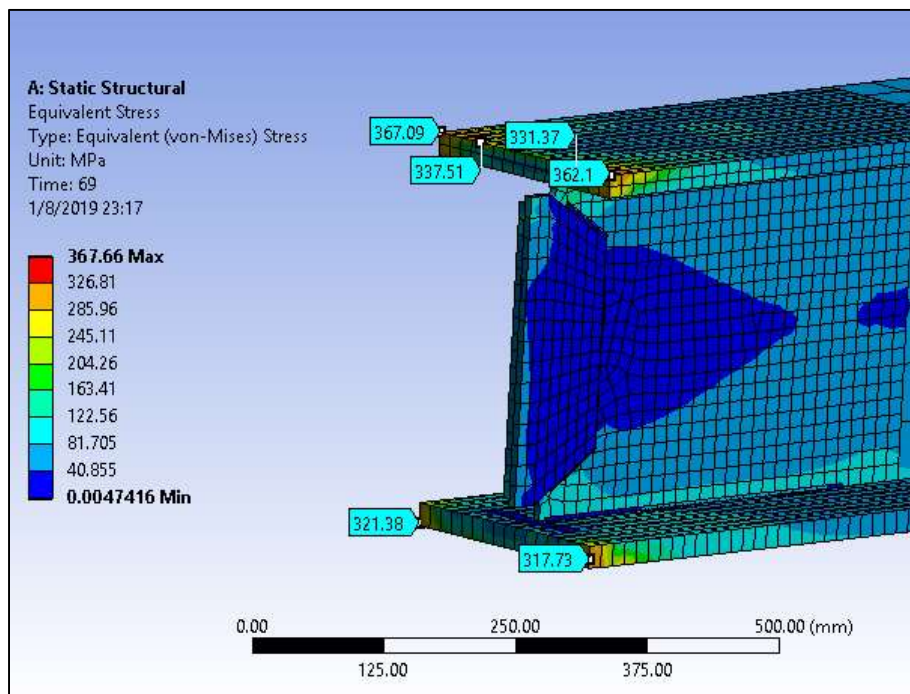


Figura 45. Esfuerzos de Von Mises máximos presentados para espécimen DCL. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

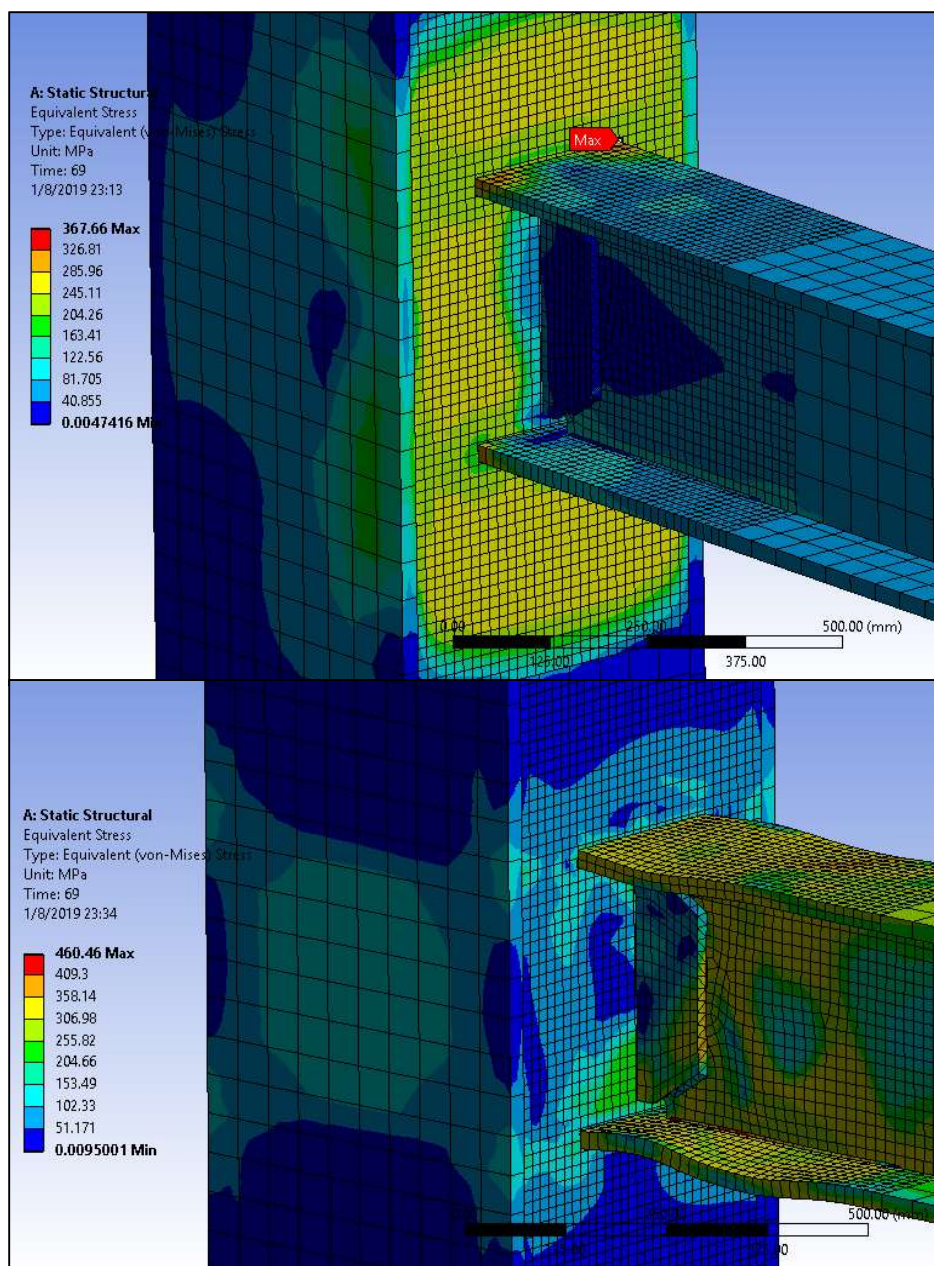


Figura 46. Comparación de esfuerzos de Von Mises, para conexión sin atesadores (arriba) y con ellos (abajo), espécimen DCL. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

4.4 Equivalente plástico de especímenes

A continuación, se observa el equivalente plástico para cada espécimen y su homólogo, con atesadores. La deformación plástica equivalente da una medida de la cantidad de deformación permanente en un cuerpo.

Se observa que, en ausencia de atesadores internos, hay deformación unitaria en la cara de la columna adyacente a la viga y en las esquinas de las alas de la viga, con una mayor concentración

de deformaciones unitarias alrededor de las alas de la viga, en la cara de la columna. Este fenómeno se desarrolla en todos los especímenes.

La mayor deformación unitaria de los especímenes, al final de la prueba, se ubica en las esquinas superiores de las alas de la viga, con un 3.37 % para el espécimen DCS, un 3.14 % para el espécimen DCM y un 2.4 % para el espécimen DCL.

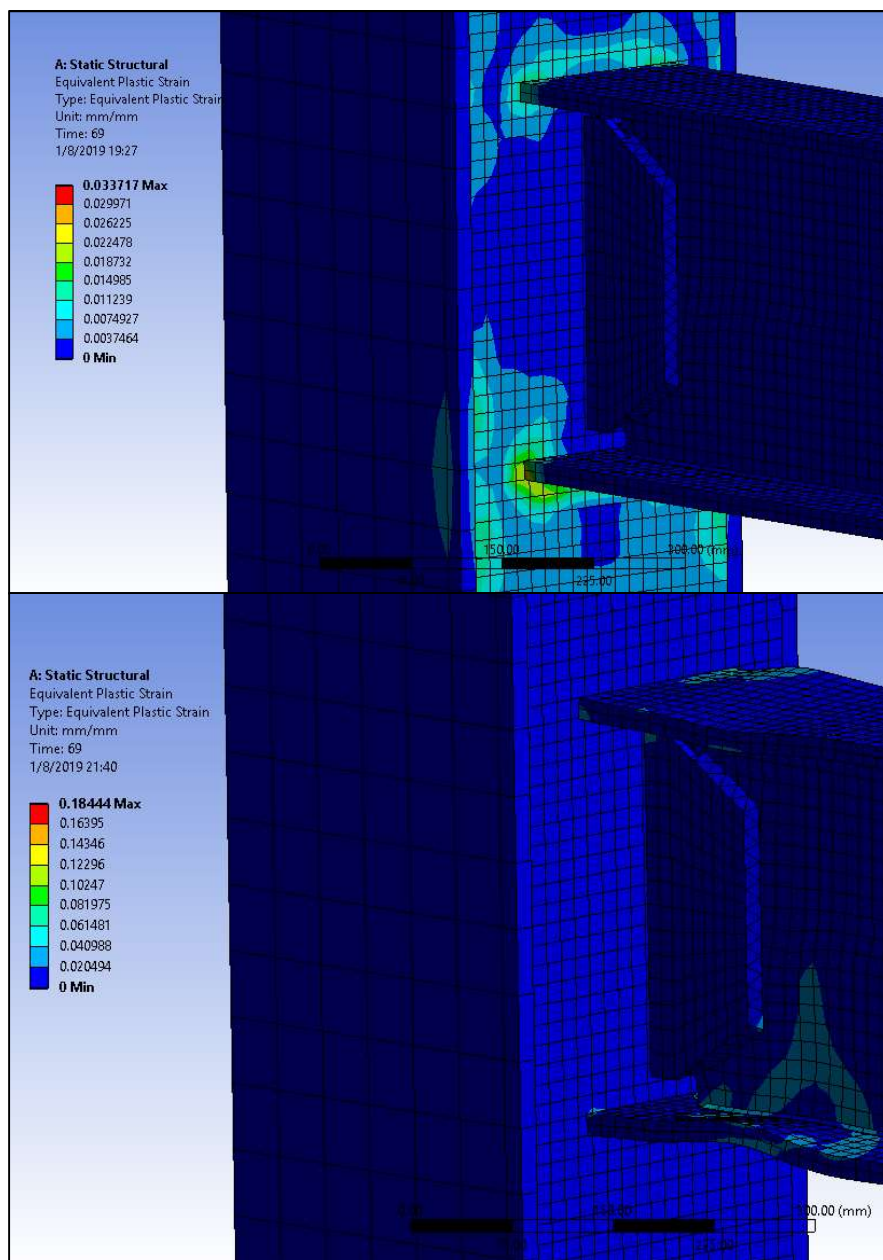


Figura 47. Equivalente plástico de espécimen DCS. Comparación de equivalente plástico entre conexión sin atiesadores (arriba) y con estos (abajo). Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

Por su parte, cuando están presentes los atiesadores internos las deformaciones unitarias máximas alcanzadas superan el 11 % e inclusive alcanzan el 20,3 % en el espécimen DCM. Además, en la ausencia de atiesadores internos no se da la presencia de deformaciones unitarias en la placa de refuerzo cortante, en el alma de la viga, ni en la mayor parte de las alas para ningún espécimen.

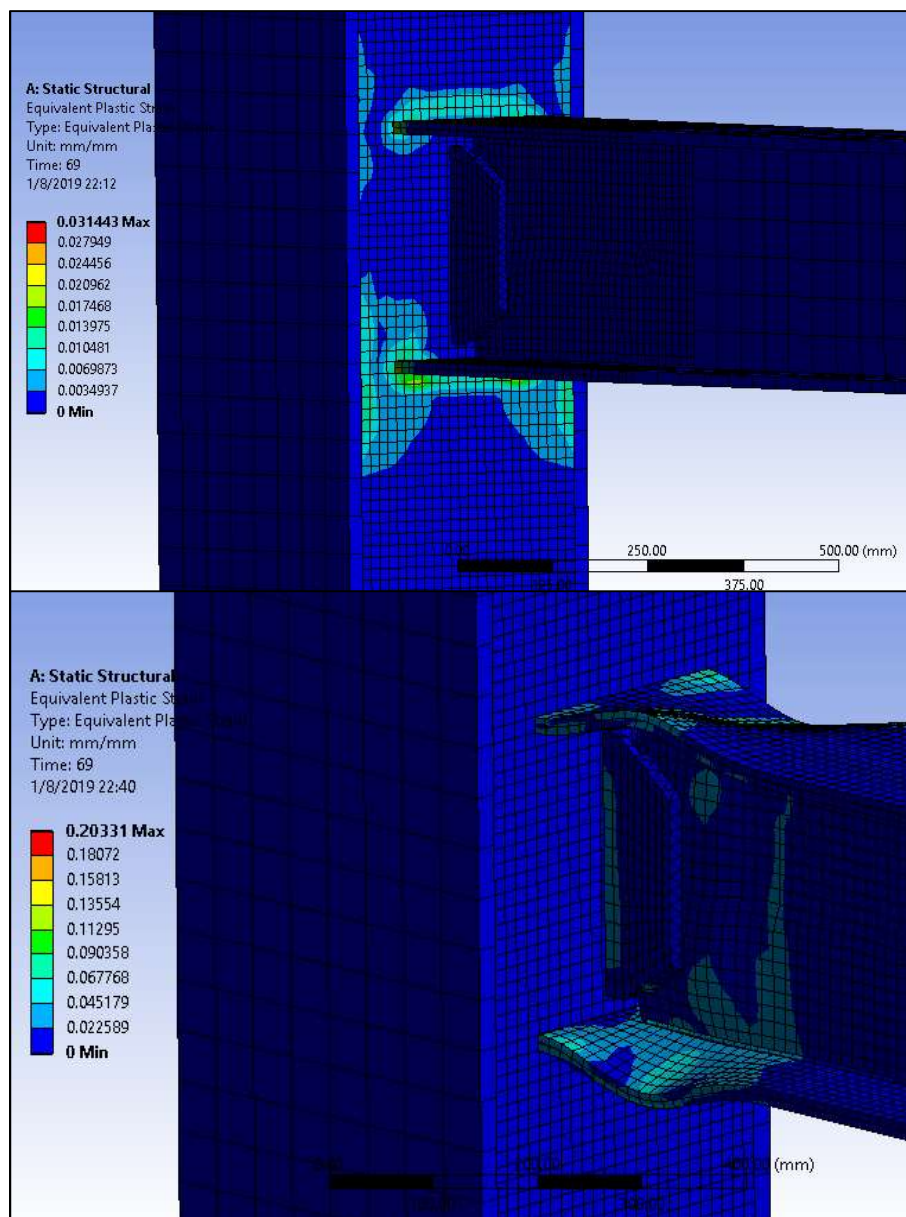


Figura 48. Equivalente plástico de espécimen DCM. Comparación de equivalente plástico entre conexión sin atiesadores (arriba) y con atiesadores (abajo). Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

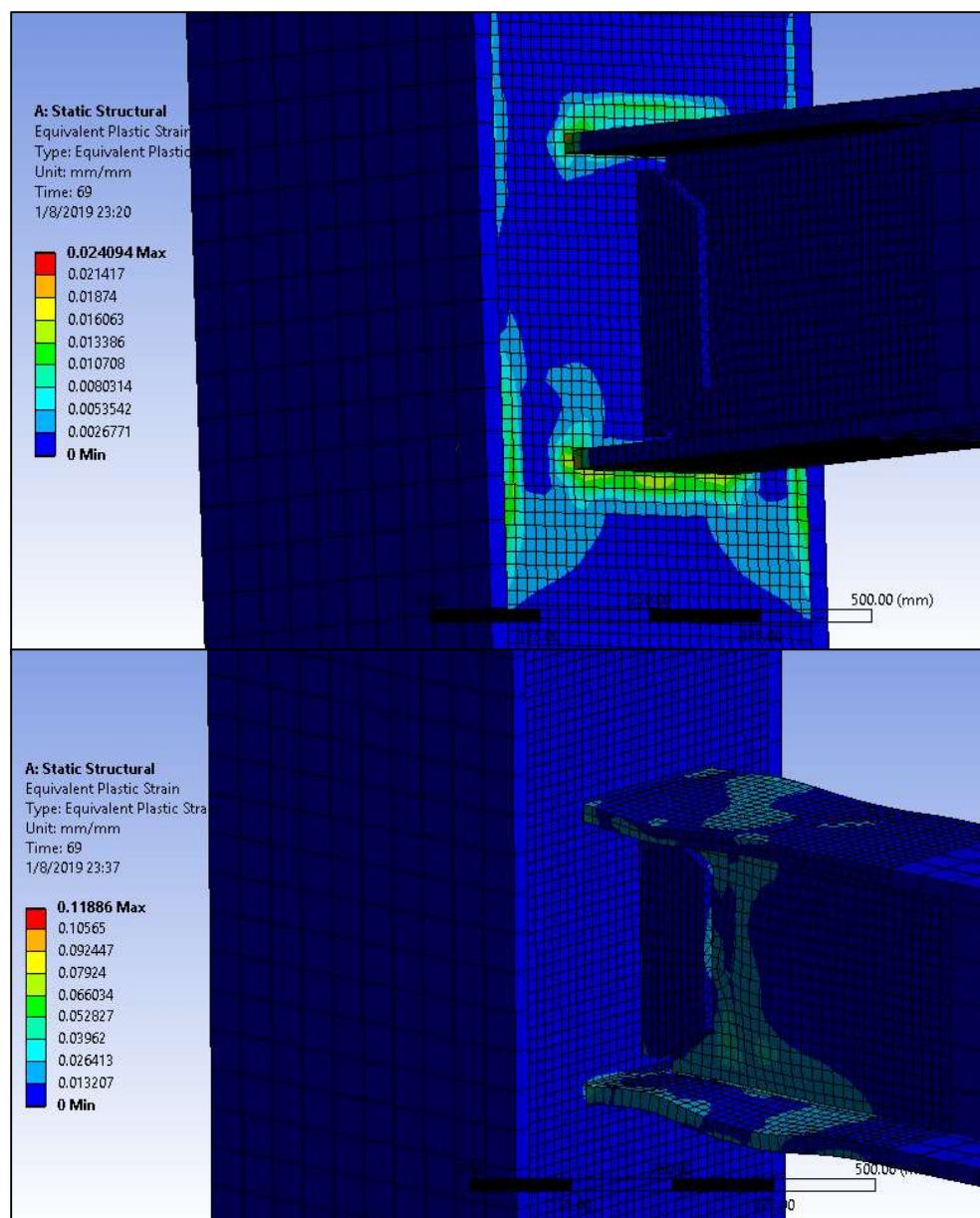


Figura 49. Equivalente plástico de espécimen DCL. Comparación de equivalente plástico entre conexión sin atiesadores (arriba) y con estos (abajo). Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

4.5 Comportamiento de conexión incorporando placas cuadradas alrededor de columna

En el afán por encontrar una solución viable, para una conexión resistente a momento, entre una columna de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (conexión WUF-W), se estudió la incorporación de placas cuadradas alrededor de la columna y se evaluó su comportamiento.

Se busca incorporar las placas en la parte exterior de la columna, con el propósito de evadir la intervención en la columna, con el uso de atiesadores internos.

4.5.1 Resultados de histéresis

En las figuras, a continuación, se muestra los diagramas de histéresis obtenidos para los especímenes DCL PC1 y DCL PC2. De acuerdo con los resultados obtenidos, no se cumple con la resistencia a la flexión establecida para una conexión viga columna IMF ni para una SMF.

El valor del momento máximo alcanzado a 0.02 rad y 0.04 rad para los especímenes, se muestra a continuación.

Tabla 10. Momento máximo alcanzado para cada espécimen a 0.02 rad y 0.04 rad

Especímen	Momento máximo a 0.02 rad (KN m)	Momento máximo a 0.04 rad (KN m)
DCL PC1	446.27	509.52
DCL PC2	469.56	510.86

El momento máximo para el espécimen DCL PC1 a 0.02 rad es un 57.7 % del $0.8Mp$ y para el DCL PC2, es un 60.76 % del $0.8Mp$. El momento máximo para el espécimen DCL PC1 a 0.04 rad, es un 65.9 % del $0.8Mp$ y para el DCL PC2, es un 66.1 % del $0.8Mp$. Eso nos indica que hay un ligero aumento en la resistencia a flexión, por parte de la conexión, cuando el alma de la viga se encuentra adyacente a la cara de la columna. Además, al incorporar las placas cuadradas alrededor de la columna, la resistencia a flexión de la conexión aumenta en aproximadamente un 30 %, en comparación con los especímenes DCS, DCM y DCL.

Nuevamente, en los diagramas de histéresis de cada espécimen se obtienen bucles histeréticos sin presencia de degradación de la resistencia, pues no hay deformación considerable en el material ni presencia de rótulas plásticas, una vez finalizado el análisis. La conexión estudiada corresponde a una conexión flexible.

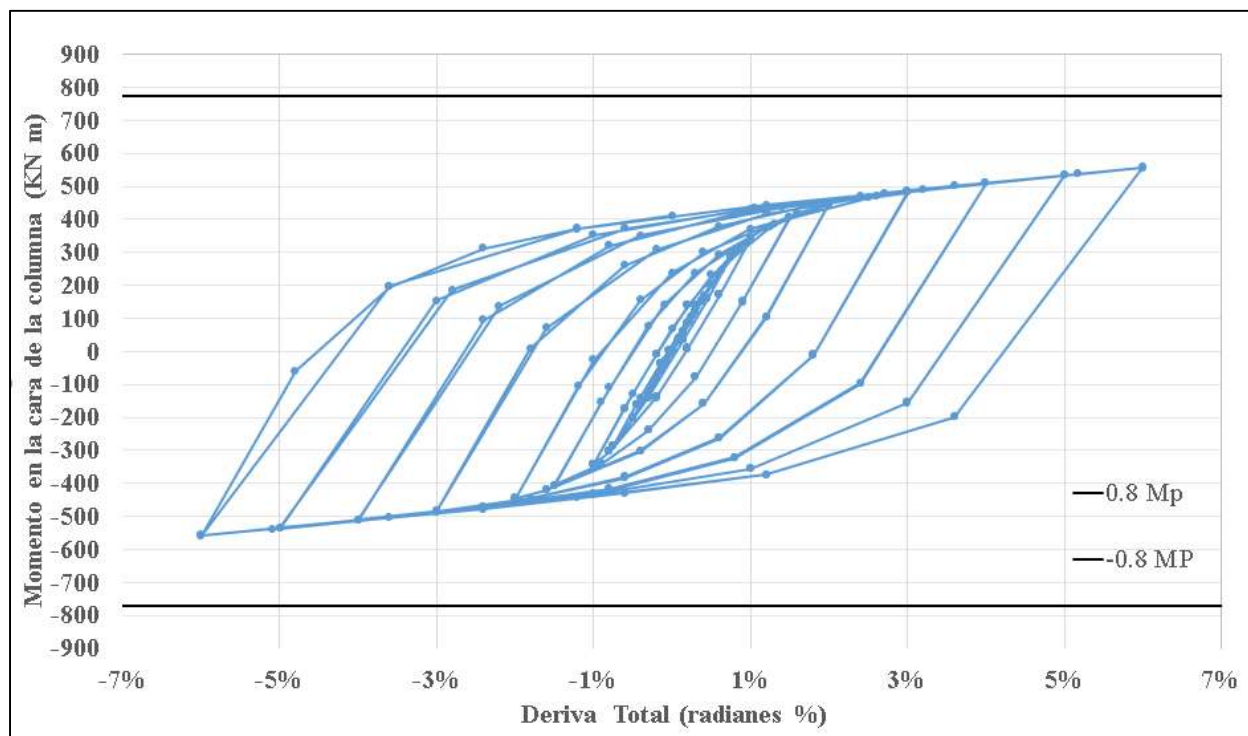


Figura 50. Diagrama de histéresis de espécimen representativo DCL PC1. Fuente: propia.

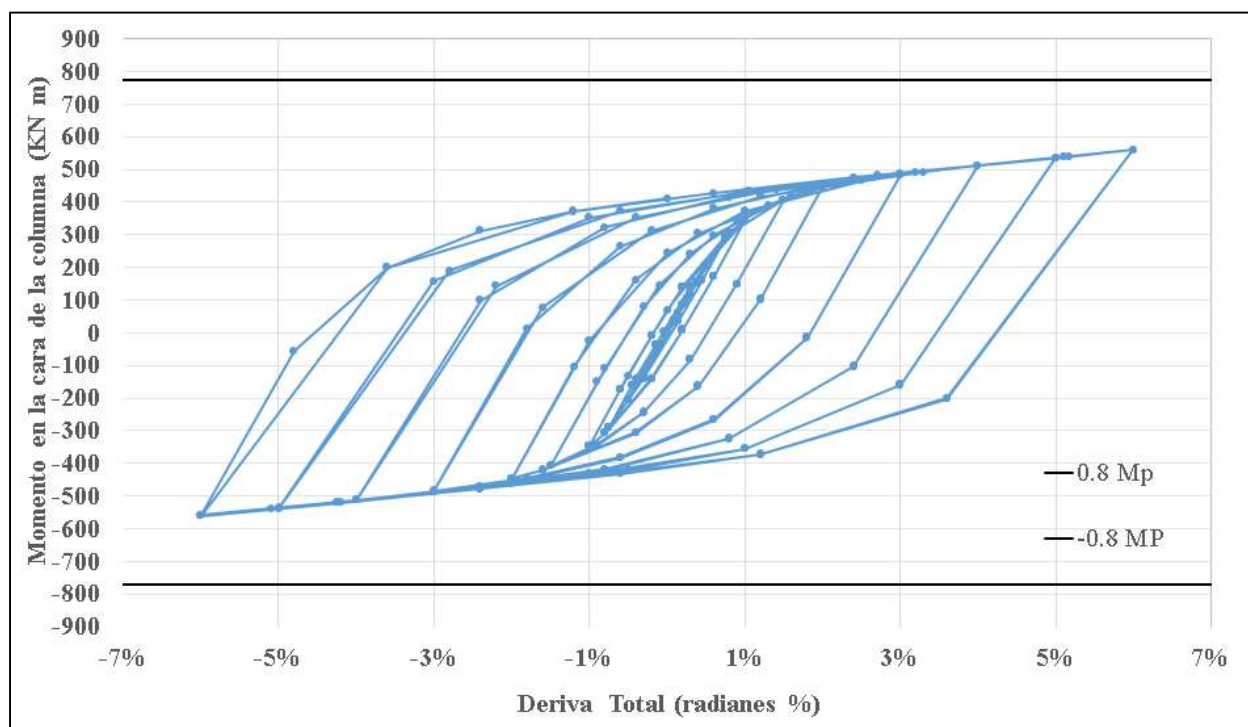


Figura 51. Diagrama de histéresis de espécimen representativo DCL PC2. Fuente: propia.

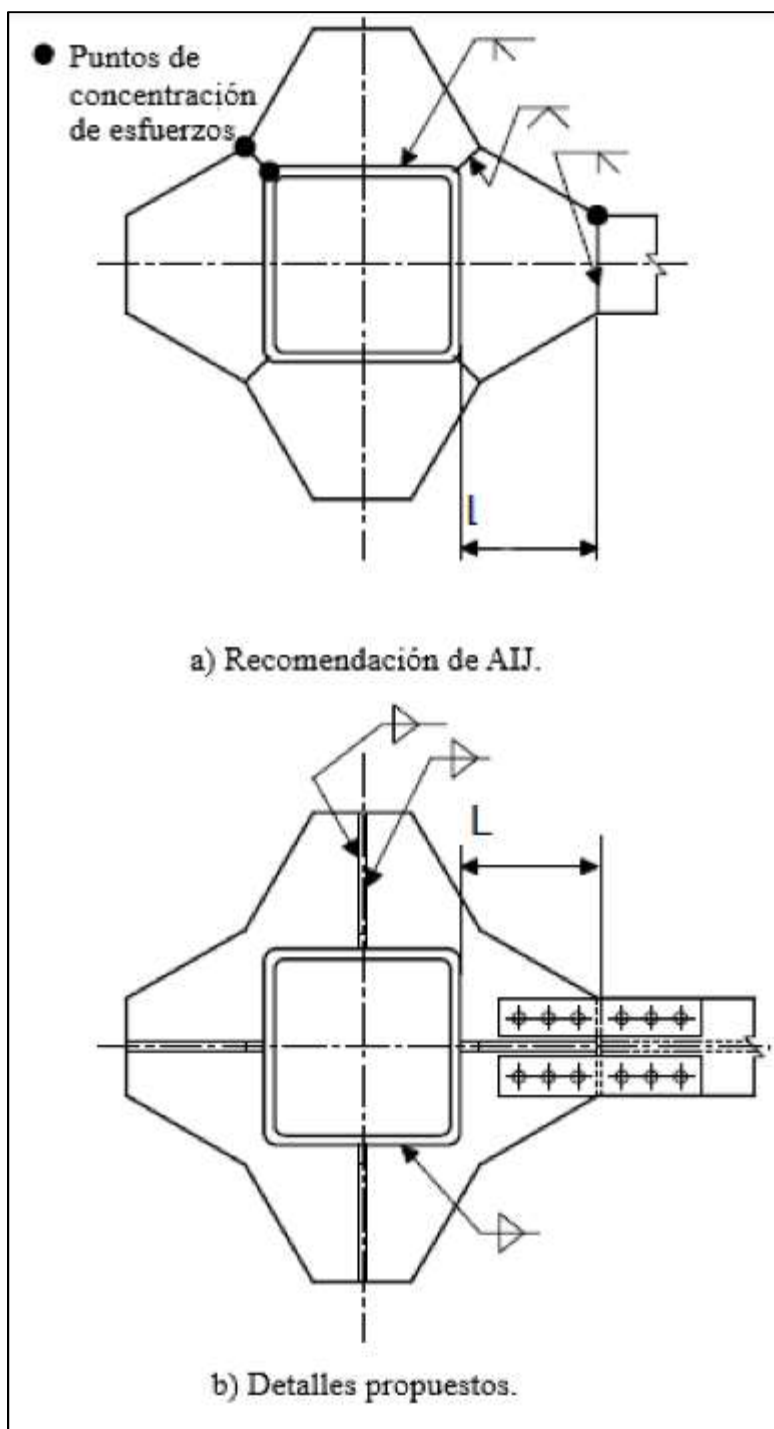


Figura 53. Conexiones entre vigas I y columnas de sección cuadrada con diafragmas externos resistentes a momento. a) Propuesta por AIJ por sus siglas en inglés (Architectural Institute of Japan). b) Propuesta de Mitnusari et al (2001). Fuente: Kurobane, Packer, Wardenier & Yeomans, 2004, modificado por autora.

4.5.2 Distribución de esfuerzos equivalentes de Von Mises de especímenes

Al incorporar diafragmas cuadrados alrededor de la columna se observa cómo la mayoría de la transmisión de esfuerzos, desde la viga hacia la columna, se da a través de las alas de la viga hacia los diafragmas, lo que concuerda con las prácticas de ingeniería en China, donde el ancho del diafragma externo es, al menos, el 70% del ancho del ala de la viga. Suponiendo que la fuerza del ala de la viga se transfiere completamente a través del diafragma externo (Li, Chen, Wang, & Xu, 2010).

No se observa alta concentración de esfuerzos en la viga en ambos especímenes. A excepción de las esquinas de las alas de la viga, donde nuevamente, hay esfuerzos cercanos a 360 MPa y las zonas cercanas a la soldadura, entre las alas de la viga y el alma.

Para el espécimen DCL PC1 se alcanzan 400 MPa de esfuerzo sobre la soldadura superior ubicada entre el ala y el alma de la viga. Por su parte, el espécimen DCL PC2 tiene la mayor concentración de esfuerzos ubicada en la esquina inferior izquierda del ala inferior, donde se conecta con el diafragma, el esfuerzo equivalente máximo es de 384.63 MPa.

En ambos especímenes, los esfuerzos localizados en la cara de la columna adyacente a la conexión y los diafragmas se encuentran dentro del rango de 170 MPa – 250 MPa.

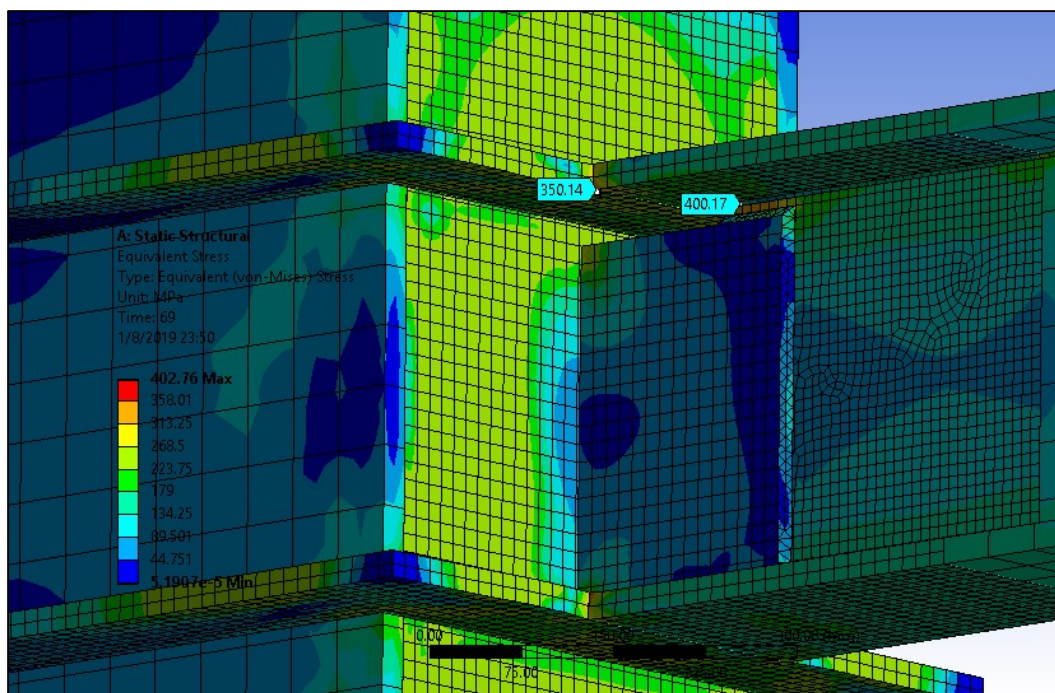


Figura 54. Esfuerzos de Von Mises máximos, presentados para espécimen DCL PC1. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

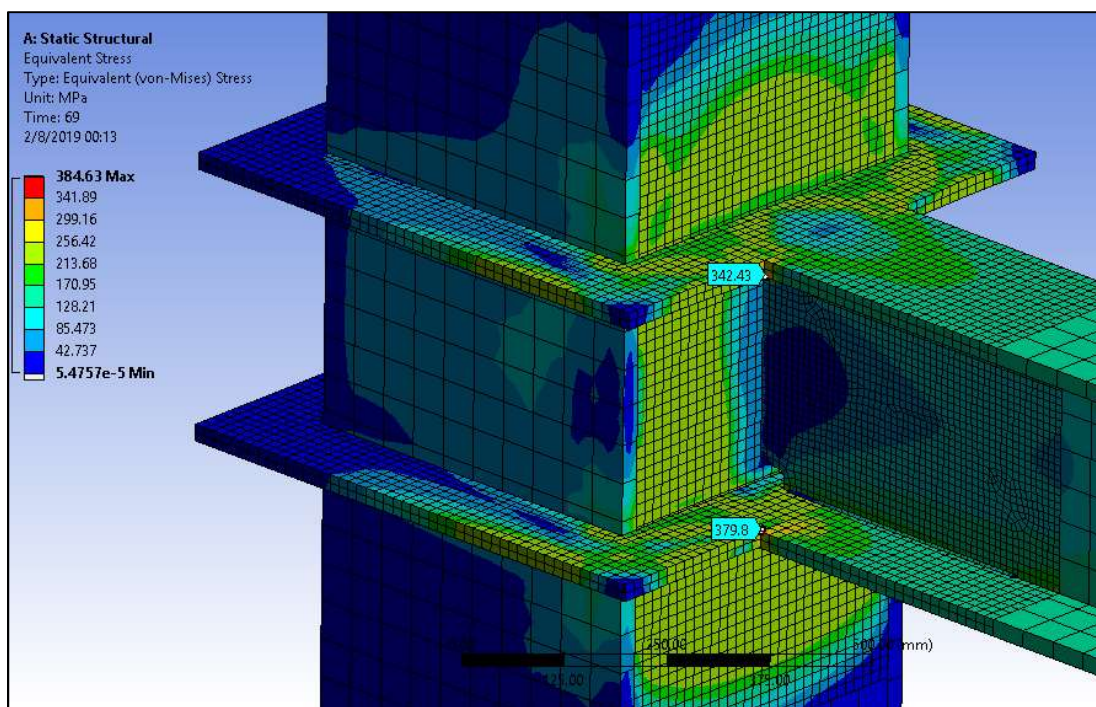


Figura 55. Esfuerzos de Von Mises máximos, presentados para espécimen DCL PC2. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora

Se observan esfuerzos equivalentes elevados en el punto, donde se conecta el diafragma con las esquinas de las alas de la viga. Este sitio correspondería al punto de falla pues estas conexiones con diafragmas externos pueden fallar por grietas, que comienzan en las esquinas entrantes del mismo o de las uniones soldadas entre él y el ala de la viga. Se deben evitar las esquinas afiladas en estos puntos críticos, pues las concentraciones de tensión y deformación, son inevitables en los puntos alrededor de las esquinas de los diafragmas. Frecuentemente, se desarrollan grietas en las soldaduras, paredes de las columnas o diafragmas, en estos puntos (Kurobane, Packer, Wardenier, & Yeomans, 2004).

4.5.3 Equivalente plástico de especímenes

Al observar la distribución de las deformaciones generadas en las conexiones, no queda duda que la zona más frágil de las conexiones de los especímenes DCL PC1 y DCL PC2, corresponde a la esquina, donde se une el diafragma con el ala de la viga. Es en esta zona donde para el espécimen DCL PC1 se alcanza una deformación unitaria del 6,1 % y para DCL PC2 se alcanza una deformación unitaria del 5,8 %.

Ante la presencia de los diafragmas disminuye la deformación unitaria, que se presenta en la columna para los especímenes DCS, DCM y DCL, y no se presenta en las vigas, en las soldaduras ni en la placa de refuerzo cortante.

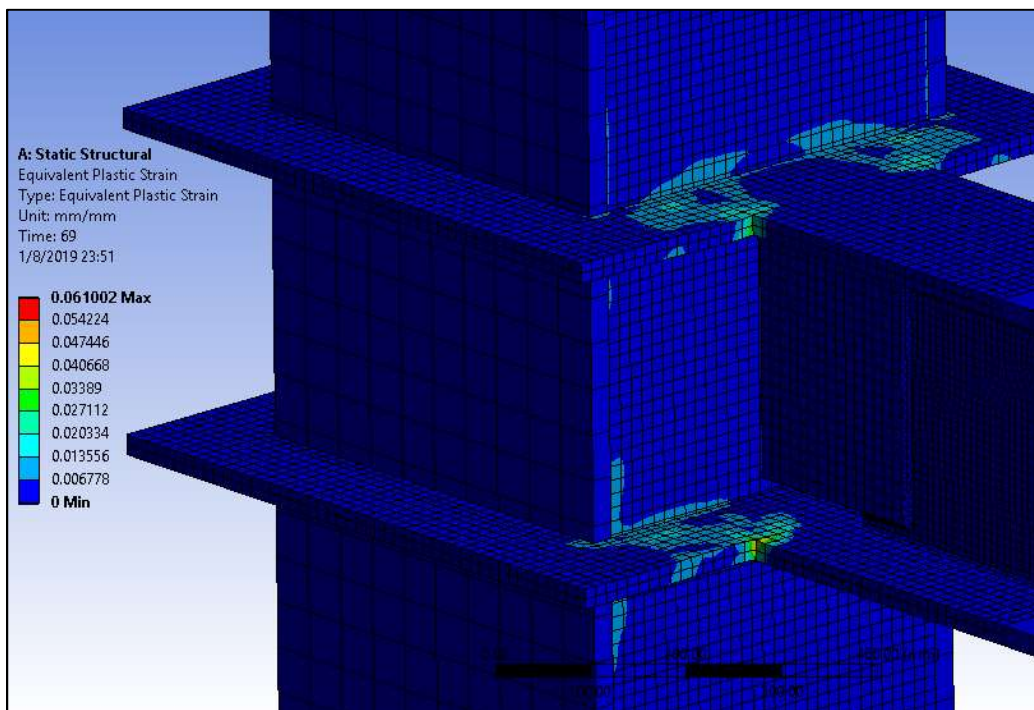


Figura 56. Equivalente plástico de espécimen DCL PC1. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

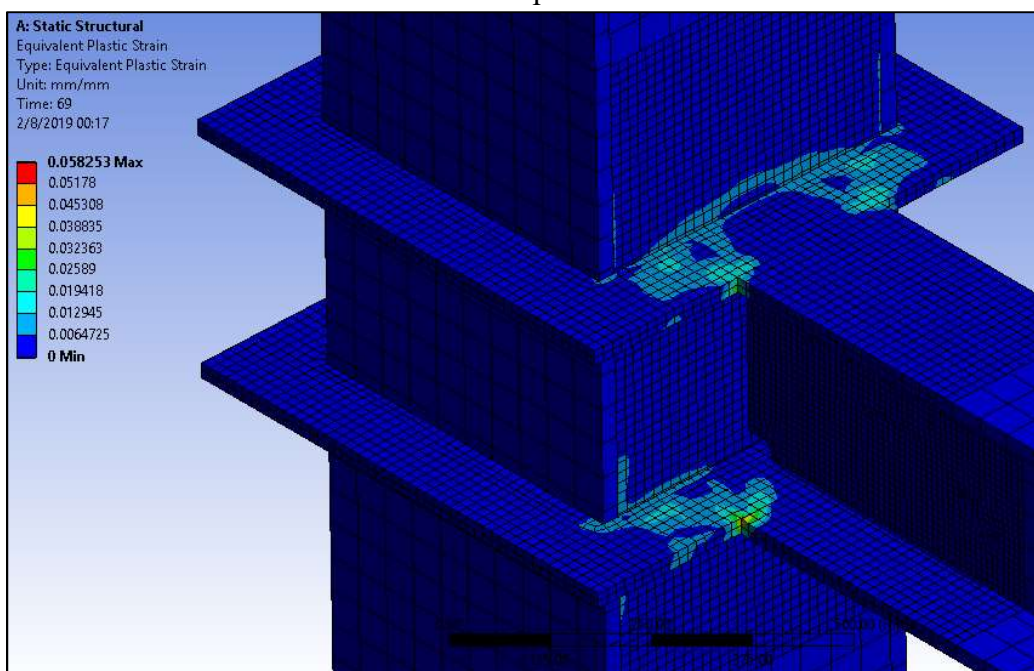


Figura 57. Equivalente plástico de espécimen DCL PC2. Fuente: ANSYS Mechanical, modificado por autora.

4.6 Estadística de la solución de los análisis virtuales

Se observa en la siguiente tabla la estadística de las mallas para cada espécimen estudiado.

Tabla 11. Estadísticas de las mallas para cada espécimen estudiado.

Espécimen	Cantidad de elementos finitos	Cantidad de nodos	Calidad de la malla (Skewness)
DCS	7234	48389	0.69
DCM	9078	59361	0.69
DCL	9540	63013	0.69
DCL-PC1	16017	101846	0.73
DCL PC2	15845	101467	0.69

La calidad de la malla, para el espécimen DCL-PC1 se encuentra en un rango superior a 0.7, pues no se consideró necesario afinar el detalle del mallado, cuando el momento en la cara de la columna alcanzado, no supera $0.8Mp$. Adicionalmente, refinar el mallado requeriría de mayor capacidad computacional.

A continuación, se muestran las estadísticas del proceso de datos de los análisis virtuales.

Tabla 12. Estadística del proceso de datos para cada espécimen estudiado.

Espécimen	Cantidad de pasos	Cantidad de iteraciones	Tiempo de procesamiento de datos (h: min)	Memoria utilizada (GB)	Tamaño de archivo de resultados (GB)
DCS	69	1508	2:19	1.19	2.99
DCM	69	1555	3:45	1.54	3.84
DCL	69	1606	3:25	1.75	4.01
DCL PC1	69	2027	8:15	2.71	6.87
DCL PC2	69	1943	6:38	2.68	6.68

Nota: cada paso tiene una duración de 1 s y están divididos en subpasos, controlados por el programa.

4.7 Capacidad computacional utilizada y estadísticas de la solución de los análisis virtuales

Dentro de las características para lograr el eficiente funcionamiento de ANSYS se mencionan la memoria RAM, el procesador, la tarjeta gráfica y la memoria de almacenamiento (Newman, 2017). El ordenador utilizado para llevar a cabo los análisis de elemento finito contaba con las siguientes características:

1. Memoria física instalada (RAM) de 16 GB.
2. Procesador Intel(R) Core (TM) i7-7500U CPU @ 2.70GHz, 2904 MHz, 2 Cores, 4 Logical processors.
3. Tarjeta gráfica Intel(R) HD Graphics 620.
4. Memoria de almacenamiento libre de 648 GB.

Newman (2017) recomienda darle prioridad a la memoria física instalada, la cual debe ser superior a 4 GB, aumentando la velocidad de resolución cuando se aumenta la capacidad. Respecto de la velocidad del procesador y la cantidad de núcleos sugiere que sea superior a 2.56 GHz y 4, respectivamente. Y por último con la capacidad de la tarjeta gráfica se permite agilizar la obtención de los resultados gráficos.

Como se observó anteriormente, los archivos generados tras la solución de cada análisis, requieren de más de 3 GB de memoria libre en el ordenador, por lo que se debe contemplar la memoria disponible, antes de iniciar cada análisis.

De no contar con las capacidades informáticas, la solución demorará mayor tiempo del esperado y el equipo puede comprometerse.

Conclusiones

1. La conexión entre una viga I y una columna de tubos de sección cuadrada (conexión WUF-W) sin atiesadores internos, presenta mayor concentración de esfuerzos en la cara de la columna, que la conexión con atiesadores internos. Sin embargo, la mayor concentración de esfuerzos se ubica en las esquinas de las alas de la viga. Por lo tanto, no se cumple con lo establecido en la hipótesis.
2. La conexión entre una viga I y una columna de tubos de sección cuadrada (conexión WUF-W) sin atiesadores internos, no cuenta con la resistencia a flexión, necesaria para satisfacer los requerimientos de un marco SMF ni de un IMF.
3. Los diagramas de histéresis obtenidos para la conexión entre una viga I y una columna de tubos de sección cuadrada (conexión WUF-W) sin atiesadores internos, no presentan disminución en la resistencia a la flexión, a pesar de que, en procesos experimentales, semejantes a la conexión en estudio, las conexiones mostraron fallas por delaminación o fallas en la soldadura. Este fenómeno se debe a que, la metodología utilizada, de endurecimiento cinemático multilineal, no contempla fallas debido a delaminación o de fractura.
4. Las soldaduras, que fueron modeladas en los especímenes en estudio, no cuentan con altas concentraciones de esfuerzos.
5. La presencia de diafragmas externos, en una conexión, entre una viga I y tubos de sección cuadrada, aumenta su resistencia a la flexión, en comparación a la conexión sin los diafragmas externos. Sin embargo, no satisface los requerimientos de un marco SMF, ni de un IMF.
6. No se generan deformaciones unitarias, considerables en los especímenes estudiados, y las de mayor orden, se establecen principalmente, en la cara de la columna adyacente a la conexión y en las esquinas de las alas de la viga.
7. La mayor concentración de esfuerzos, en los especímenes estudiados, permite exponer los posibles métodos de fractura, vigentes para la conexión. Localizándose la fractura tanto para la conexión sin atiesadores internos como para la conexión con los diafragmas externos en las esquinas de las alas de la viga.

8. El uso de conexiones compuestas por vigas I y columnas tubulares o de tubos de sección cuadrada, debe realizarse bajo el criterio de que la conexión es flexible, o bien una parcialmente restringida, cuando se conozca información detallada de su comportamiento.
9. Cuando se da la presencia de elementos triangulares, oblicuos o circulares en las geometrías de los elementos, el tiempo de respuesta del programa ANSYS, para resolver el estudio de la conexión ante el desplazamiento establecido, aumenta considerablemente.

Recomendaciones

1. Se recomienda aumentar la capacidad del ordenador primeramente en la memoria RAM, lo mismo que la velocidad de almacenaje de información y el número de núcleos en el procesador, cuando se requiera discretizar los elementos a tamaños menores a 5 mm y siempre que se cuente con elementos triangulares, ovalados o circulares.
2. Se recomienda seguir las metodologías de diseño estructural, establecidas por el AISC, de tal manera, que se acoja la fiel utilización de conexiones precalificadas o aquellas que hayan aprobado los criterios de precalificación.
3. Es importante, que la comunidad ingenieril de nuestro país conozca los efectos, de utilizar una conexión entre una viga I y una columna, compuesta por tubos de sección cuadrada o tipo HSS, en donde no se cuenta con la resistencia a flexión, requerida para ser asignada a un marco tipo SMF o IMF.
4. Se recomienda no ensayar la conexión de una viga I y tubos de sección cuadrada (conexión WUF-W) sin atiesadores internos, a escala real, ni sus semejantes con placas cuadradas, alrededor de la columna, estudiadas en este proyecto. Debido al conocimiento, generado en esta investigación, donde se demuestra que las conexiones no poseen la resistencia a la flexión requerida.
5. Se recomienda estudiar las metodologías de fractura y delaminación, en el programa ANSYS e incorporarlas a los análisis de endurecimiento cinemático multilinear.
6. Se recomienda introducir el análisis del elemento finito y el uso de software, asociado a la solución de problemas a través del elemento finito, posterior al estudio de la mecánica de sólidos, con el propósito de ampliar las herramientas de aprendizaje y mejorar el entendimiento en el comportamiento de las estructuras, para el futuro profesional de Ingeniería Civil.

Referencias Bibliográficas

- Alawadhi, E. (2010). *Finite Element Simulations Using ANSYS*. Florida: Taylor & Francis Group, LLC.
- American Welding Society. (2019). *American Welding Society Learning*. Obtenido de <https://awo.aws.org/glossary/complete-joint-penetration-weld/>
- ANSI/AISC. (2016). *Prequalified Conections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*. Obtenido de <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/a358-18w.pdf>
- ANSI/AISC. (2016). *Seismic Provisions For Structural Steel Buildings*. Obtenido de <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/seismic-provisions-for-structural-steel-buildings-ansi-aisc-341-16.pdf>
- Cabezas, Ó. J. (2012). *Propuesta de un sistema de conexión a base de una unión WUF-W y un empalme de viga tipo placa extendida empernada para marcos resistentes a momento (IMF y SMF) (Tesis de grado, Universidad de Costa Rica)*. Obtenido de <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3591/33870.pdf?sequence=1>
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. (2010). *Código sísmico de Costa Rica*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Crisafulli, F. J. (2018). *Diseño sismorresistente de construcciones de acero*. Obtenido de <https://www.alacero.org/es/page/publicaciones/disenio-sismorresistente-de-construcciones-de-acero>
- del Campo Flores, I. M., & Gómez Bernal, A. (2010). Estudio experimental de conexiones de acero a momento de vigas I con columna rectangular HSS. *XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, (págs. 1-17). León Guanajuato.
- Fanaie, N., & Moghadam, S. (2019). Experimental study of rigid connection of drilled beam to CFT column. *Journal of Constructional Steel Research*, 209-221.
- FEMA. (2000). *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings (FEMA-350)*. Obtenido de <https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1454-20490-9895/fema-350.pdf>

- González, W. (2018). Análisis de Histéresis de la Conexión WUF-W con Columnas de Sección Cuadrada por Medio del Método de Elementos Finitos (Tesis de grado). Universidad Latina de Costa Rica, Heredia, Costa Rica.
- Haukaas, T., & Gardoni, P. (2011). Model Uncertainty in Finite-Element Analysis: Bayesian Finite Elements. *Journal of Engineering Mechanics*, 519-526.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación*. Mexico: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Kim, T., Stojadinovic, B., & Whittaker, A. (2002). Behavior of steel moment connections between a wide-flange beam and a box column. *Proceedings, Seventh US National Conference on Earthquake Engineering (7NCEE)*. Boston, Massachusetts.
- Kurobane, Y., Packer, J., Wardenier, J., & Yeomans, N. (2004). *Design guide for structural hollow section column connections*. Alemania: TÜV-VERlag GmbH.
- Li, W., Chen, Y., Wang, W., & Xu, Y. (2010). Experimental study of external diaphragm joint connecting CHS column and H-shaped beam. *Advanced Steel Construction*, 578-588.
- Liu, Y., & Glass, G. (2013). Effects of mesh density on finite element analysis. *SaE Technical Paper Series*.
- Loges, S. (2017). Importancia de las conexiones en el comportamiento sismorresistente de edificaciones aporricadas de acero estructural. *XI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica CONVESIS*. (págs. 780-792). Caracas: CONVESIS.
- McCormac, J. C., & Cserneck, S. F. (2013). *Diseño de estructuras de acero*. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- Nakashima, M., Roeder, C., & Maruoka, Y. (2000). Steel moment frames for earthquakes in United States and Japan. *Journal of Structural Engineering*, 861-868.
- Newman, P. (17 de Noviembre de 2017). *ANSYS Student Community*. Obtenido de <https://studentcommunity.ansys.com/profile/peteroznewman/>
- Nuñez, C., Roca, A., & Jorba, J. (2013). *Comportamiento mecánico de los materiales. Volumen II. Ensayos mecánicos. Ensayos no destructivos*. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- Ortega, Y. (2006). Prueba de impacto: ensayo Charpy. *Revista Mexicana de Física*, 51-57.

- Saneei, Z. N., Gassemieh, M., & Mazroi, A. (2013). WUF-W connection performance to box column subjected to uniaxial and biaxial loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 90-108.
- SAP IP, I. (14 de julio de 2017). ANSYS Help Viewer.
- Song, Q.-Y., Heidarpour, A., Zhao, X.-L., & Han, L.-H. (2015). Performance of unstiffened welded steel I-beam to hollow tubular column connections under seismic loading. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 1-27.
- Stockmann, M., & Schlafly, T. (2008). Digging through th rubble. *Modern Steel Construction*, 68-69.
- Wardenier, J., Packer, J., Zhao, X.-L., & van der Vegte, G. (2010). *Hollow sections in structural applications*. Ginebra: Boumen met Staal.
- Zambrano , P. B. (2008). *Diseño Sismorresistente de Conexiones Rígidas Viga-Columna y Arriostramientos Excéntricos para un Edificio de Acero de 15 Pisos Emplazado en la Ciudad de Valdivia (Tesis de grado, Universidad Austral de Chile)*. Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmfciz.24d/doc/bmfciz.24d.pdf>
- Zhong, Y., & Wu, P. (2015). Economic sustainability, environmental sustainability and constructability indicators related to concrete- and steel-projects. *Journal of Cleaner Production*, 748-756.

