



**UNIVERSIDAD LATINA
DE COSTA RICA**

POWERED BY **Arizona State University**

Universidad Latina de Costa Rica

Facultad Ingeniería Civil y TICs

Escuela Ingeniería Civil

Grado de Licenciatura

Tesis de Graduación

**Análisis de comportamiento de conexión resistente a momento con soldadura filete,
mediante simulación por el método de elementos finitos, para conocer su desempeño.**

Autor: Jonathan David Rodríguez Espinales

Dirigida por: Wilson Alberto González Arroyo

Heredia, 30/8/ 2023



**UNIVERSIDAD LATINA
DE COSTA RICA**
POWERED BY Arizona State University

TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: Análisis de comportamiento de conexión resistente a momento con soldadura filete, mediante simulación por el método de elementos finitos, para conocer su desempeño, por el (la) estudiante: Jonathan Rodríguez Espinales, fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:

Wilson González Arroyo
Tutor

Andrés Reyes Bonilla
Lector

Gerardo Chacón Rojas
Representante de la Escuela

DECLARACIÓN JURADA

Yo, Jonathan David Rodríguez Espinales estudiante de la Universidad Latina de Costa Rica, declaro bajo la fe de juramento y consciente de las responsabilidades penales de este acto, que soy Autor Intelectual de la Tesis de Graduación titulada:

Análisis de comportamiento de conexión resistente a momento con soldadura filete, mediante simulación por el método de elementos finitos, para conocer su desempeño.

Por lo que libero a la Universidad de cualquier responsabilidad en caso de que mi declaración sea falsa.

Firmo en Montes de Oro, 6 de septiembre 2023

Jonathan R.E.

Jonathan David Rodríguez Espinales

Licencia De Distribución No Exclusiva (carta de la persona autora para uso didáctico)

Universidad Latina de Costa Rica

Yo (Nosotros): Jonathan David Rodríguez Espinales

De la Carrera / Programa: Ingeniería Civil, Grado de Licenciatura

Modalidad de TFG: Tesis de Graduación

Titulado: Análisis de comportamiento de conexión resistente a momento con soldadura filete, mediante simulación por el método de elementos finitos, para conocer su desempeño.

Al firmar y enviar esta licencia, usted, el autor (es) y/o propietario (en adelante el "AUTOR"), declara lo siguiente: **PRIMERO:** Ser titular de todos los derechos patrimoniales de autor, o contar con todas las autorizaciones pertinentes de los titulares de los derechos patrimoniales de autor, en su caso, necesarias para la cesión del trabajo original del presente TFG (en adelante la "OBRA"). **SEGUNDO:** El AUTOR autoriza y cede a favor de la **UNIVERSIDAD U LATINA S.R.L.** con cédula jurídica número 3-102-177510 (en adelante la "UNIVERSIDAD"), quien adquiere la totalidad de los derechos patrimoniales de la **OBRA** necesarios para usar y reusar, publicar y republicar y modificar o alterar la **OBRA** con el propósito de divulgar de manera digital, de forma perpetua en la comunidad universitaria. **TERCERO:** El AUTOR acepta que la cesión se realiza a título gratuito, por lo que la **UNIVERSIDAD** no deberá abonar al autor retribución económica y/o patrimonial de ninguna especie. **CUARTO:** El AUTOR garantiza la originalidad de la **OBRA**, así como el hecho de que goza de la libre disponibilidad de los derechos que cede. En caso de impugnación de los derechos autorales o reclamaciones instadas por terceros relacionadas con el contenido o la autoría de la **OBRA**, la responsabilidad que pudiera derivarse será exclusivamente de cargo del **AUTOR** y este garantiza mantener indemne a la **UNIVERSIDAD** ante cualquier reclamo de algún tercero. **QUINTO:** El **AUTOR** se compromete a guardar confidencialidad sobre los alcances de la presente cesión, incluyendo todos aquellos temas que sean de orden meramente institucional o de organización interna de la **UNIVERSIDAD** **SEXTO:** La presente autorización y cesión se regirá por las leyes de la República de Costa Rica. Todas las controversias, diferencias, disputas o reclamos que pudieran derivarse de la presente cesión y la materia a la que este se refiere, su ejecución, incumplimiento, liquidación, interpretación o validez, se resolverán por medio de los Tribunales de Justicia de la República de Costa Rica, a cuyas normas se someten el **AUTOR** y la **UNIVERSIDAD**, en forma voluntaria e incondicional. **SÉPTIMO:** El **AUTOR** acepta que la **UNIVERSIDAD**, no se hace responsable del uso, reproducciones, venta y distribuciones de todo tipo de fotografías, audios, imágenes, grabaciones, o cualquier otro tipo de

presentación relacionado con la **OBRA**, y el **AUTOR**, está consciente de que no recibirá ningún tipo de compensación económica por parte de la **UNIVERSIDAD**, por lo que el **AUTOR** haya realizado antes de la firma de la presente autorización y cesión. **OCTAVO:** El **AUTOR** concede a **UNIVERSIDAD**, el derecho no exclusivo de reproducción, traducción y/o distribuir su envío (incluyendo el resumen) en todo el mundo en formato impreso y electrónico y en cualquier medio, incluyendo, pero no limitado a audio o video. El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD** puede, sin cambiar el contenido, traducir la **OBRA** a cualquier lenguaje, medio o formato con fines de conservación. **NOVENO:** El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD** puede conservar más de una copia de este envío de la **OBRA** por fines de seguridad, respaldo y preservación. El **AUTOR** declara que el envío de la **OBRA** es su trabajo original y que tiene el derecho a otorgar los derechos contenidos en esta licencia. **DÉCIMO:** El **AUTOR** manifiesta que la **OBRA** y/o trabajo original no infringe derechos de autor de cualquier persona. Si el envío de la **OBRA** contiene material del que no posee los derechos de autor, el **AUTOR** declara que ha obtenido el permiso irrestricto del propietario de los derechos de autor para otorgar a **UNIVERSIDAD** los derechos requeridos por esta licencia, y que dicho material de propiedad de terceros está claramente identificado y reconocido dentro del texto o contenido de la presentación. Asimismo, el **AUTOR** autoriza a que en caso de que no sea posible, en algunos casos la **UNIVERSIDAD** utiliza la **OBRA** sin incluir algunos o todos los derechos morales de autor de esta. **SI AL ENVÍO DE LA OBRA SE BASA EN UN TRABAJO QUE HA SIDO PATROCINADO O APOYADO POR UNA AGENCIA U ORGANIZACIÓN QUE NO SEA UNIVERSIDAD U LATINA, S.R.L., EL AUTOR DECLARA QUE HA CUMPLIDO CUALQUIER DERECHO DE REVISIÓN U OTRAS OBLIGACIONES REQUERIDAS POR DICHO CONTRATO O ACUERDO.** La presente autorización se extiende el día 6 de septiembre de 2023 a las 15 : 00

Firma del estudiante(s):

Jonathan R.E.

CARTA DE FILÓLOGA

Heredia, 27 de agosto de 2023

Señores (as)

Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingenierías y TIC's

Universidad Latina de Costa Rica

Estimado Señor (as)

Por este medio, la suscrita Edith Raissa Pizarro Alfaro, cédula 401780133 miembro activo del Colypro bajo el número 35554, doy fe de haber corregido exhaustivamente el proyecto titulado: “**Análisis de comportamiento de conexión resistente a momento con soldadura filete, mediante simulación por el método de elementos finitos, para conocer su desempeño**”, que estuvo a cargo del estudiante **Jonathan David Rodríguez Espinales**, con respecto a los siguientes aspectos:

1. Lexicografía, morfología, fondo y forma en su totalidad.
2. Uso correcto de las preposiciones.
3. Usos lingüísticos de los signos de puntuación, interrogación y exclamación.
4. Los solecismos, barbarismos, cacofonías, anfibologías, monotonía del lenguaje, redundancia, pleonasmos y la ortografía.

Por tanto, doy fe que este proyecto contiene un fondo claro y preciso de la propuesta expresada en el mismo, con ideas correctas, que mantienen el hilo conductor a lo largo del documento.

Atentamente,

Firmado por EDITH RAISSA PIZARRO ALFARO (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-04-0178-0133. Fecha declarada: 27/08/2023 09:32 AM
Esta representación visual no es una fuente de confianza, valide siempre la firma.

Lcda. Edith Raissa Pizarro Alfaro

Código 35554

Resumen

En la presente investigación se analiza el rendimiento de una conexión resistente a momento de patines y alma soldada con soldadura tipo filete, a ambos lados de los patines y el alma, fabricada con columnas y vigas de sección W, con imperfecciones en la soldadura de los patines. Inicialmente se evalúa la capacidad del programa ANSYS para simular un ensayo de cargas cíclicas, a través de una simulación con un modelo tridimensional de elementos finitos y mediante un análisis no lineal, se toma como base el ensayo experimental realizado por los investigadores W. Woerner, A. Short, W.G. Ferguson en la Universidad de Auckland en conjunto con Heavy Engineering Research Association (HERA), denominado “Seismic performance of fillet welds in moment resisting connections” en el año 2006, y otras investigaciones relacionadas con esta investigación, en este se evaluó el desempeño sísmico de la conexión mediante 5 especímenes que se diferencian principalmente por las dimensiones de sus imperfecciones en las soldaduras y la garganta efectiva de la soldadura medida. La simulación virtual realizada en ANSYS está basada en esta investigación, el objeto es replicar este ensayo mediante un modelo virtual, para ello se trazan diagramas de histéresis obtenidos en la simulación virtual y se comparan con los presentados por la investigación experimental para validar la factibilidad del programa en la simulación de este tipo de conexión y también de replicar deformaciones, esfuerzos, rupturas en los patines por fatiga ante las cargas cíclicas y el efecto en la zona panel.

Posteriormente se analiza la capacidad de deformación y ángulo de deriva, la aplicabilidad que ofrece la conexión en marcos intermedios, ya que es una conexión de gran interés nacional por su versatilidad, sencillez, facilidad de fabricación, siendo la soldadura filete una soldadura que requiere menor calificación de los operarios que la soldadura de penetración por ejemplo, además esta conexión es una potencial candidata en la nueva versión del nuevo código sísmico de Costa Rica como conexión precalificada para marcos intermedios.

Los resultados de la simulación confirman que la conexión satisface los requisitos para ser considerada apta en marcos intermedios resistentes a momento. Sin embargo, debido a las limitaciones de la investigación, no fue posible evaluar con precisión las rotaciones del efecto panel en la simulación virtual.

Summary

In this research, the performance of a welded flange-web moment resisting connection with fillet welds on both sides of the flanges and web, fabricated with W-section columns and beams, with imperfections in the flange welds, is analyzed. Initially, the ability of the ANSYS program to simulate a cyclic loading test is evaluated, through a simulation with a three-dimensional finite element model and by means of a nonlinear analysis. The experimental test carried out by the researchers W. Woerner, A. Short, W.G. Ferguson at the University of Auckland in conjunction with the Heavy Engineering Research Association (HERA), called “Seismic performance of fillet welds in moment resisting connections” in 2006, and other related research, is taken as a basis. In this test, the seismic performance of the connection was evaluated through 5 specimens that differ mainly in the dimensions of their imperfections in the welds and the measured effective weld throat. The virtual simulation carried out in ANSYS is based on this research, the object is to replicate this test by means of a virtual model, for this purpose hysteresis diagrams obtained in the virtual simulation are drawn and compared with those presented by the experimental research to validate the feasibility of the program in the simulation of this type of connection and also to replicate deformations, efforts, ruptures in the flanges due to fatigue under cyclic loads and the effect on the panel zone.

Subsequently, the deformation capacity and drift angle are analyzed, as well as the applicability that the connection offers in intermediate frames. This connection is of great national interest due to its versatility, simplicity, and ease of manufacture. Fillet welding is a type of welding that requires less qualification of the operators than penetration welding, for example. Additionally, this connection is a potential candidate in the new version of the new seismic code of Costa Rica as a prequalified connection for intermediate frames.

The simulation results confirm that the connection satisfies the requirements to be considered suitable for moment-resisting intermediate frames. However, due to research limitations, it was not possible to accurately assess panel effect rotations in virtual simulation.

Índice de contenidos

Capítulo Introducción	1
A. Antecedentes	1
Nacionales.....	1
Internacionales	2
B. Planteamiento del problema.....	4
C. Objetivo general	5
D. Objetivos específicos.....	5
E. Justificación.....	6
F. Alcances y limitaciones.....	7
Alcances	7
Limitaciones.....	7
G. Impacto.....	8
H. Hipótesis.....	9
Capítulo I: Fundamentación teórica.....	10
1.1. Acero estructural.....	10
1.1.1. Clasificación y designación de aceros estructurales	11
1.1.2. Caracterización y clasificación de perfiles de uso comercial.....	12
1.1.3. Propiedades mecánicas del acero	12
1.2. Fatiga de los materiales y curvas de Wohler (S-N).....	14
1.3. Soldadura de aceros	14
1.3.1. Procesos GMA y MMA	15
1.3.2. Grados según su resistencia en electrodos	15
1.3.3. Caracterización geométrica de soldaduras	16

1.3.4.	Resistencia de la soldadura	16
1.4.	Comportamiento histerético	18
1.5.	Conexiones de acero	20
1.5.1.	Conexiones a momento	20
1.6.	Sistemas marcos estructurales de aceros	21
1.6.1.	Marcos de momento intermedios (IMF)	21
1.6.2.	Marcos de momento ordinario (OMF).....	22
1.6.3.	Marcos de momentos especiales (SMF).....	23
1.7.	Zona de panel.....	24
1.7.1.	Distorsión en los patines y fluencia del alma de una columna.....	24
1.7.2.	Fuerzas en la zona del panel.....	26
1.7.3.	Modelo del comportamiento de la zona del panel.....	29
1.7.4.	Diseño de Zona de Paneles.....	30
1.8.	Ensayos cíclicos para conexiones de acero en estructuras	31
1.9.	Método de los elementos finitos fundamentos teóricos.....	33
1.9.1.	Matriz de rigidez	33
1.9.2.	Métodos numéricos para ecuaciones no lineales.....	34
1.10.	Criterios Tensión plana y triaxial	35
1.10.1.	Criterio de Tresca	36
1.10.2.	Criterio de Von Mises	36
Capítulo II. Marco Metodológico		37
a.	Paradigma, enfoque metodológico y métodos de investigación	37
b.	Categorías de análisis de la investigación	37
c.	Población y muestra, Técnicas de muestreo.....	39
d.	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.....	39

e.	Técnicas e instrumentación para el procesamiento y análisis de los datos	40
f.	Pre-procesamiento: preparación de modelo de elementos finitos.....	40
	Construcción geométrica de la conexión	40
	Propiedades mecánicas de los materiales	43
	Configuración de superficies en los modelos	46
	Definición de condiciones de frontera	47
	Discretización de los elementos finitos en los especímenes.....	47
	Protocolos de carga.....	47
g.	Procesamiento: Resolución de las ecuaciones del modelo de elementos finitos	50
h.	Post-Procesamiento: Muestra los resultados.....	50
	Capítulo III. Análisis de resultados.....	51
	3.1 Calidad de malla de elementos finitos generada en los modelos	52
	3.2 Comportamiento histérico de especímenes evaluados con protocolo de cargas ATC-24, 1992.	53
	3.2.1. Resultado de histéresis en espécimen MRC-2.	53
	3.2.2. Resultado de histéresis en espécimen T22.....	55
	3.2.3. Resultado de histéresis en espécimen T27.....	57
	3.2.4. Resultado de histéresis en espécimen T28.....	57
	3.2.5. Resultado de histéresis en espécimen T29.....	58
	3.2.6. Resultado de histéresis en espécimen T30.....	58
	3.3 Resultados de deformaciones en especímenes evaluados con protocolo de carga ATC-24, 1992.	58
	3.3.1. Deformaciones equivalentes en espécimen MRC2.....	58
	3.3.2. Deformaciones equivalentes en espécimen T22.....	60
	3.3.3. Deformaciones equivalentes en espécimen T28.....	65
	3.3.4. Deformaciones equivalentes en espécimen T29.....	66

3.3.5. Deformaciones equivalentes en espécimen T30.....	67
3.4 Resultados de esfuerzos en especímenes evaluados con protocolo de carga ATC-24, 1992. 69	
3.4.1. Esfuerzos equivalentes en espécimen MRC2	70
3.4.2. Esfuerzos equivalentes en espécimen T22.....	72
3.4.3. Esfuerzos equivalentes en espécimen T28.....	77
3.4.4. Esfuerzos equivalentes en espécimen T29.....	78
3.4.5. Esfuerzos equivalentes en espécimen T30.....	80
3.5 Resultado de histéresis de especímenes evaluados con protocolo de cargas AISC 341. 81	
3.5.1. Resultado de histéresis en espécimen MRC2.	81
3.5.1. Resultado de histéresis en espécimen T22.....	82
3.5.2. Resultado de histéresis en espécimen T27.....	83
3.5.3. Resultado de histéresis en espécimen T29.....	83
3.5.4. Resultado de histéresis en espécimen T30.....	83
3.6 Resultados de deformaciones en especímenes evaluados con protocolo de carga AISC 341-16.....	83
3.6.1. Deformaciones equivalentes en espécimen T22.....	83
3.6.2. Deformaciones equivalentes en espécimen T29.....	84
3.6.3. Deformaciones equivalentes en espécimen T30.....	85
3.7 Resultados de esfuerzos equivalentes en especímenes evaluados con protocolo de carga AISC 341-16.	86
3.7.1. Esfuerzos equivalentes en espécimen T22.....	86
3.7.2. Esfuerzos equivalentes en espécimen T27.....	87
3.7.3. Esfuerzos equivalentes en espécimen T29.....	88
3.7.4. Esfuerzos equivalentes en espécimen T30.....	88

3.8. Efecto panel	89
Conclusiones.....	93
Recomendaciones	95
Referencias.....	97
Anexos	101
Glosario.....	128

Índice de figuras

Figura 1 Carga de punta versus deflexión de punta MRC2 de ensayo en laboratorio.....	53
Figura 2 Diagrama de histéresis MRC2 generado en ANSYS	54
Figura 3 Comparación de distorsiones en rótula plástica de modelo experimental y simulación virtual del espécimen MRC2.....	59
Figura 4 Deformaciones en alma de viga vista frontal ciclo 31 primera excursión espécimen MRC2.....	60
Figura 5 Deformaciones en alma de viga vista frontal ciclo 31 segunda excursión espécimen MRC2.....	60
Figura 6 Deformaciones equivalente en la primera excursión del ciclo 13 del espécimen MRC2.....	60
Figura 7 Deformaciones equivalentes, 4.87s-5.25s, espécimen T22, ATC-24.	61
Figura 8 Deformaciones equivalentes, 8.4s-9.1s, espécimen T22, ATC-24.	61
Figura 9 Deformaciones equivalentes, 8.4s-9.1s, espécimen T22, ATC-24.	62
Figura 10 Deformaciones equivalentes, 15.85s-12.93s, espécimen T22, ATC-24.	63
Figura 11 Deformaciones equivalentes, 12.93s-15.885s, espécimen T22, ATC-24.	63
Figura 12 Fallo por sobrecarga dúctil cíclica en probeta T22.	64
Figura 13 Deformaciones y esfuerzos en zona de ruptura en último ciclo, espécimen T22, ATC-24.....	64
Figura 14 Deformaciones plásticas, en rótula del espécimen T22, ATC-24.	65
Figura 15 Deformaciones equivalentes, 10s-10.932s, espécimen T28, ATC-24.	65
Figura 16 Deformaciones equivalentes, 10s-12.93s, espécimen T28, ATC-24.	66
Figura 17 Deformaciones equivalentes, 5.8s, espécimen T29, ATC-24.	66
Figura 18 Deformaciones equivalentes, 10 s - 10.95 s, espécimen T29, ATC-24.	67
Figura 19 Deformaciones equivalentes, 5.8 s - 6.45 s, espécimen T30, ATC-24.	67
Figura 20 Deformaciones equivalentes, 10 s – 10.921 s, espécimen T30, ATC-24.....	68
Figura 21 Esfuerzo equivalente de Von Mises en la segunda excursión del ciclo 13 del espécimen MRC2.....	70
Figura 22 Esfuerzo equivalente de Von Mises en la primera excursión del ciclo 31 del espécimen MRC2.....	70
Figura 23 Concentración de esfuerzo en superficie dañada en espécimen MRC2.....	71

Figura 24 Irregularidades en Esfuerzos equivalentes, espécimen T22, ATC-24.....	72
Figura 25 Irregularidades en Esfuerzos equivalentes, en imperfección superior, espécimen T22, ATC-24.....	73
Figura 26 Irregularidades en Esfuerzos equivalentes, en imperfección inferior, espécimen T22, ATC-24.....	73
Figura 27 Irregularidades en Esfuerzos equivalentes de soldadura en alma, espécimen T22, ATC-24.....	74
Figura 28 Esfuerzos equivalentes, 4.87s-5.25s, espécimen T22, ATC-24.	74
Figura 29 Esfuerzos equivalentes, 8.4s-9.1s, espécimen T22, ATC-24.	75
Figura 30 Esfuerzos equivalentes, 10 s – 10.95 s, espécimen T22, ATC-24.	75
Figura 31 Esfuerzos y deformaciones equivalentes, 12.93s, espécimen T22, ATC-24. .	76
Figura 32 Esfuerzos y deformaciones equivalentes, 15.885s, espécimen T22, ATC-24.	76
Figura 33 Esfuerzos equivalentes, 10 s – 10.95 s, espécimen T28, ATC-24.	77
Figura 34 Esfuerzos y deformaciones, 10 s, espécimen T28, ATC-24.	77
Figura 35 Esfuerzos equivalentes, 10.95 s, espécimen T28, ATC-24.	78
Figura 36 Esfuerzos equivalentes, 10 s – 10.95 s, espécimen T29, ATC-24.	78
Figura 37 Esfuerzos y deformaciones, 10.95 s, espécimen T29, ATC-24.	79
Figura 38 Región de fallo por inestabilidad del haz en modelo virtual en última carga.	79
Figura 39 Fallo por inestabilidad del haz en la probeta T29.	79
Figura 40 <i>Esfuerzos equivalentes, 10 s – 10.95 s, espécimen T30, ATC-24.</i>	80
Figura 41 <i>Esfuerzos equivalentes, 10 s – 10.95 s, espécimen T30, ATC-24.</i>	80
Figura 42 Deformaciones equivalentes, 55 s – 56 s, espécimen T22, AISC 341-16.....	84
Figura 43 Deformaciones equivalentes, 56 s, espécimen T22, AISC 341-16.	84
Figura 44 Deformaciones equivalentes, 55 s – 56 s, espécimen T29, AISC 341-16.....	85
Figura 45 Deformaciones equivalentes, 56 s, espécimen T30, AISC 341-16.	85
Figura 46 Esfuerzos equivalentes 39.9 s - 40.9 s espécimen T22, historial AISC.	86
Figura 47 Esfuerzos equivalentes, 56 s, espécimen T22, AISC 341-16.....	87
Figura 48 <i>Esfuerzos en viga, 55 s y 56 s, espécimen T27, AISC 341-16.</i>	87
Figura 49 <i>Esfuerzos equivalentes, 57 s – 58 s, espécimen T29, AISC 341-16.</i>	88
Figura 50 <i>Esfuerzos en viga, 57 s, espécimen T29, AISC 341-16.....</i>	88
Figura 51 Esfuerzos en viga, 60 s, espécimen T30, AISC 341-16.	89

Figura 52 Daño en zona de panel.....	90
Figura 53 Esfuerzos típicos en zona de panel de especímenes virtuales.	90
Figura 54 Rotaciones en zona de panel de especímenes experimentales.	91
Figura 55 Puntos de extracción de rotaciones en zona de panel, punto 1 (a), punto 2 (b).	91
Figura 56 Rotaciones en zona de panel de especímenes virtuales en posición 1.	92
Figura 57 Rotaciones en zona de panel de especímenes virtuales en posición 2.	92
Figura 58 Diagrama esfuerzo - deformación de un acero estructural dulce	101
Figura 59 Áreas bajo las curvas de esfuerzo-deformación: (a) módulo de residencia, (b) tenacidad y (c) materiales de alta resistencia y alta tenacidad.....	101
Figura 60 Curva típica S-N para acero y aluminio	102
Figura 61 Diagrama esquemático de soldadura MMAW	103
Figura 62 Esquema de soldadura GMAW.....	103
Figura 63 Soldadura filete: (a) Superficie convexa. (b) Superficie cóncava.	104
Figura 64 Fuerzas de diseño en una soldadura de filete de NZS 3404: Parte 2.....	104
Figura 65 Relación esfuerzo-deformación cíclica del acero estructural.....	105
Figura 66 Efecto Bauschinger.....	105
Figura 67 Representación del endurecimiento isotrópico.....	106
Figura 68 Endurecimiento Cinemático	106
Figura 69 Momentos, fuerzas cortantes y fuerzas axiales que actúan sobre la zona del panel.....	107
Figura 70 Distorsiones en la Zona Panel	108
Figura 71 Diagrama histéresis en zona de panel.....	108
Figura 72 Modelo simplificado de zona de panel.....	109
Figura 73 Determinación de la deformación de fluencia δ_y y de la rigidez elástica K_e	109
Figura 74 Parámetros en un ciclo	110
Figura 75 Simbología de dimensiones de perfil tipo W	110
Figura 76 Esquema de modelo utilizado en pruebas experimentales de laboratorio.....	111
Figura 77 Esquema de defectos en soldadura.....	111
Figura 78 Fotografía de defecto en patín de la viga superior con cubo.....	112
Figura 79 Fotografía de defecto en patín inferior de la viga	112

Figura 80	Contacto sin fricción entre barras de control de pandeo torsional y viga	113
Figura 81	Soporte fijo en extremo de columna.....	113
Figura 82	Discretización del modelo	114
Figura 83	Esfuerzos equivalentes de Von-Mises en simulación del espécimen T29. ..	114
Figura 84	Historial de deformación para prueba de múltiples pasos ATC - 24.	115
Figura 85	Historial de carga para precalificación AISC-16.	115
Figura 86	Rotación angular del ensamblaje de prueba.....	116

Índice de gráficos

Tabla 1 Relaciones de variables.....	38
Tabla 2 Dimensiones de la sección 460 UB 74 utilizada como columna.....	41
Tabla 3 Dimensiones de la sección utilizada como viga	41
Tabla 4 Dimensiones de la sección utilizada como columna en el espécimen MRC-2...	41
Tabla 5 Tamaños de soldadura.....	42
Tabla 6 Dimensiones de las imperfecciones	42
Tabla 7 Propiedades mecánicas de viga y columna.....	43
Tabla 8 Propiedades mecánicas de soldaduras	43
Tabla 9 Valores de esfuerzo y deformación acero columna	44
Tabla 10 Valores de esfuerzo y deformación acero viga.....	44
Tabla 11 Valores de esfuerzo y deformación acero MMAW	45
Tabla 12 Valores de esfuerzo y deformación acero GMAW.....	45
Tabla 13 Valores de esfuerzo y deformación en perfiles del espécimen MRC-2.....	46
Tabla 14 Valores de esfuerzo y deformación Soldadura en espécimen MRC-2	46
Tabla 15 Parámetros de la prueba de modelos T22-T30.	48
Tabla 16 Parámetros de la prueba del modelo MRC-2.....	48
Tabla 17 Protocolo de cargas AISC 341-16.....	50
Tabla 18 Resumen resultados de mallado.....	53
Tabla 19 Capacidad a flexión de los especímenes.....	81
Tabla 20 Resumen de fuerzas máximas y ciclos hasta el fallo.	117
Tabla 21 Resumen de fallos en material, historial ATC-24, 1992.....	117
Tabla 22 Resumen de fallos en material, historial AISC 341-16.....	118
Tabla 23 Factores de reducción de la resistencia del estado límite último (ϕ) (según NZS 3404: Parte 1:1997).....	118
Tabla 24 Factor de reducción para una conexión de traslape soldada (K_r) (según NZS 3404: Parte 1:1997).....	119

Índice de gráficos

Gráfico 1 Curva de esfuerzo deformación AS3679.1-300 en columna de especímenes T22 a T30.....	44
Gráfico 2 Curva de esfuerzo deformación AS3679.1-300 en Viga de especímenes T22 a T30.....	44
Gráfico 3 Curva de esfuerzo deformación soldadura MMAW grado 60 de especímenes T29 y T30.....	45
Gráfico 4 Curva de esfuerzo deformación soldadura GMAW grado 70 de especímenes T22 a T28.....	45
Gráfico 5 Curva de esfuerzo deformación en perfiles del espécimen MRC-2	46
Gráfico 6 Curva de esfuerzo deformación soldadura GMAW grado 70 en espécimen MRC-2	46
Gráfico 7 Desplazamiento generado por el actuador en espécimen T22.....	49
Gráfico 8 Diagrama de histéresis de laboratorio y virtual espécimen MRC-2	55
Gráfico 10 Diagrama de histéresis espécimen virtual T22, historial ATC-24.....	56
Gráfico 11 Registro de fuerzas en espécimen virtual T22 ATC.....	57
Gráfico 11 Diagrama de histéresis espécimen T22, historial ASIC 341-16.	82
Gráfico 12 Desplazamiento generado por el actuador en espécimen T27.....	120
Gráfico 13 Desplazamiento generado por el actuador en espécimen T28.....	120
Gráfico 14 Desplazamiento generado por el actuador en espécimen T29.....	121
Gráfico 15 Desplazamiento generado por el actuador en espécimen T30.....	121
Gráfico 16 Desplazamiento generado por el actuador en espécimen MRC-2	122
Gráfico 17 Desplazamiento según el protocolo de precalificación de la norma AISC 341	122
Gráfico 18 Diagrama de histéresis espécimen virtual T27, historial ATC-24.....	123
Gráfico 19 Diagrama de histéresis espécimen virtual T28, historial ATC-24.....	123
Gráfico 20 Diagrama de histéresis espécimen virtual, historial ATC-24.	124
Gráfico 21 Diagrama de histéresis espécimen virtual T30, historial ATC-24.....	124
Gráfico 22 Momento en la cara de la columna espécimen T27, historial ASIC 341-16.	125
Gráfico 23 Diagrama de histéresis espécimen virtual MRC2, historial ATC-24.	125

Gráfico 24	Momento en la cara de la columna espécimen T22, historial ASIC 341-16	126
Gráfico 25	Diagrama de histéresis espécimen T27, historial ASIC 341-16.	126
Gráfico 26	Diagrama de histéresis espécimen T29, historial ASIC 341-16.	127
Gráfico 27	Diagrama de histéresis espécimen T30, historial ASIC 341-16.	127

Capítulo Introducción

A. Antecedentes

Nacionales

Wilson Alberto González Arroyo. Análisis de histéresis de la conexión WUF-W con columnas de sección cuadrada, por medio del método de elementos finitos. Universidad Latina de Costa Rica en el año 2018.

Efectuó un análisis de histéresis de la conexión WUF-W con columnas de sección cuadrada, por medio del método de elementos finitos, evaluando el rendimiento de la conexión por medio de 3 modelos virtuales realizados con asistencia del programa de cómputo ANSYS Workbench 18.1., los modelos mencionados fueron elaborados basándose en pruebas experimentales a escala real, realizadas por la Universidad de Teherán, los resultados de los diagramas de histéresis obtenidos en el programa ANSYS demostraron una alta equivalencia, comprobando que el programa ANSYS tiene la capacidad de replicar ensayos de conexiones sujetas a cargas cíclicas con objetivo de realizar clasificaciones preliminares de conexiones WUF – W y otros tipos de conexiones. (González, 2018).

María Amalia Elizondo Herrera. Evaluación por métodos analíticos de curva histerética de una conexión de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (conexión WUF-W). Universidad Latina de Costa Rica en el año 2019.

María Amalia Elizondo Herrera realizó una evaluación por métodos analíticos de curva histerética de una conexión de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (conexión WUF-W), para la cual modelo la conexión empleando el programa ANSYS, calculando los diagramas de histéresis, siguiendo el protocolo de ángulos de deriva, utilizado por González en el programa ANSYS para la obtención de resultados, se examinan tres modelos de tamaños diferentes y dos con diafragmas externo alrededor de la columna, con este buscaba determinar si la conexión contaba con resistencia a flexión y podía ser clasificada como SMF o IMF, en los resultados se determinó el momento plástico de la viga, los esfuerzos Von Mises y el equivalente plástico, sin embargo se demuestra que la conexión sin atiesadores internos no satisface los requerimientos para una conexión de un marco SMF o IMF. (Elizondo, 2019).

Lucía del Carmen Murillo Vega. Simulación numérica de procesos de fractura en conexiones de acero a momento. Universidad Latina de Costa Rica en el año 2022.

En su tesis Lucía Murillo realizó una simulación de procesos de fractura en dos conexiones de acero a momento una conexión de placa de ala empernada (BFP) y otra con placa extrema empernada sin rigidizar (BUEEP), mediante el método de los elementos finitos con el programa ANSYS WorkBench 19.2, donde comparó los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos experimentalmente en otra investigación. Lucía utilizó dos métodos de análisis el implícito y el explícito, por el método explícito determinó los esfuerzos equivalentes, deformaciones y desplazamientos de la viga, también logró simular la ruptura en la conexión BUEEP, mientras que en la simulación con el método implícito no fue posible alcanzar la ruptura (Murillo, 2022).

Internacionales

W. Woerner, A. Short, W.G. Ferguson. “Seismic performance of fillet welds in moment resisting connections”. Universidad de Auckland y HERA en el año 2006.

En este estudio se probaron 5 modelos a escala sometidos a cargas cíclicas para investigar el desempeño de la conexión, a esta conexión se le colocaron imperfecciones en la soldadura, retirando secciones de la misma. Tras someter la conexión a cargas dinámicas los especímenes demostraron tener la ductilidad requerida antes de la fractura, también determinó que las soldaduras soportaron los esfuerzos y la conexión demostró un rendimiento satisfactorio. Esta investigación presenta los diagramas de histéresis de la zona panel, la naturaleza de las fallas y la caracterización de los ensayos. Esta información experimental permite desarrollar la simulación virtual y comprobar la eficacia del modelo.

Wolfgang Scholz y Charles Clifton. “Improved welded connections for earthquake loading”. Publicado por New Zealand Society for Earthquake Engineering en el año 2000.

En esta investigación se describen las pruebas de fractura realizadas en las soldaduras de las conexiones viga-columna, utilizando una combinación de materiales y alternativas de soldadura usadas típicamente en juntas tipo T, utilizadas en la soldadura entre los patines de la viga y el ala de columnas, para investigar las influencias de estos materiales y alternativas de diseño se llevaron a cabo pruebas a pequeña escala y en cinco pruebas a gran escala en estas se

determinó que las tasas de deformación mejoran el desempeño sísmico de las conexiones soldadas y la fuerza real del haz tiene una fuerte influencia en el rendimiento entre otras observaciones (Scholz, 2000).

Clark W K Hyland, Charles G Clifton, John W Butterworth y Wolfgang Scholz. Performance of rigid welded beam to column connections under severe seismic conditions. 12th World Conference on Earthquake Engineering en el año 2000.

Por otra parte, este estudio buscaba clarificar el modelo de diseño utilizado para conexiones de vigas soldadas a columnas en marcos resistentes a momento de Nueva Zelanda, esta filosofía de diseño fue examinada luego del terremoto de Northridge en 1994 en conexiones resistente a momento con soldadura rígida, donde se estudió el rendimiento bajo cargas seudoestáticas y cargas sísmico-dinámicas, este documento presenta los resultados más importantes en estas pruebas. En estas investigaciones se analizó la diferencia de eficacia entre conexiones con soldadura a tope y con soldadura filete en los patines de la viga (Hyland, 2000).

B. Planteamiento del problema

Una estructura de acero es un conjunto de miembros unidos por medio de conexiones individuales, con la capacidad de mantenerse estable, sin sufrir cambios perceptibles, las estructuras están presentes en la vida cotidiana, edificios habitacionales donde se vive, supermercados, hospitales, almacenes y oficinas, una parte considerable de estas estructuras esenciales, son de acero. En el diseño de estructuras de acero debe tenerse presente que la comprensión de las conexiones de acero tiene una alta complejidad, en parte por su comportamiento no lineal, la alta cantidad de fuerzas que transmite, la complejidad de sus deformaciones, entre otros aspectos, resultando casi imposible analizar la gran parte de las conexiones por un método matemático simple que sea riguroso (Vinnakota, 2006). Debido a la complejidad es necesario hacer uso de softwares que con ayuda de la teoría de elementos finitos puedan aproximar soluciones con una alta exactitud simulando las deformaciones inelásticas e incluso rupturas en piezas de acero.

En el nuevo Código Sísmico de Costa Rica, se planea integrar nuevas conexiones precalificadas de acero, y la estudiada en esta investigación es una candidata, esta aún no ha sido probada experimentalmente en el país, a pesar de ser una conexión de gran interés nacional, por esto con el fin de generar una mayor comprensión del desempeño de esta conexión, se pretende realizar una simulación virtual, donde dicha conexión sea sometida a cargas cíclicas que representen el estrés al que esta llegaría a desarrollar, utilizando el protocolo de cargas presentado en la norma AISC 341, para poder realizar esta simulación, previamente debe comprobarse que los programas a utilizar pueden recrear una prueba de laboratorio de una conexión semejante a la estudiada, para esta comprobación es necesario modelar la conexión como la presente en el ensayo experimental utilizado como referencia. En la comprobación resulta de relevancia corroborar que en el programa ANSYS es posible simular el efecto de deformación dúctil en la zona de panel, debido a que aún no hay investigaciones que indiquen si el programa tiene esta capacidad en este tipo de conexiones, así como la evaluación de desempeño en soldaduras tipo filete con imperfecciones.

En el diseño sísmico resistente de conexiones de acero, es importante conocer el comportamiento de una conexión ante cargas cíclicas, este se suele estudiar mediante modelos a escala sometidos a cargas periódicas, simuladas en un laboratorio de forma experimental, donde se cuantifican rigurosamente las deformaciones y energía disipada. Para el caso de esta nueva

conexión precalificada no se han realizado pruebas a escala bajo las condiciones sísmicas de Costa Rica, por ello se considera oportuno analizarla mediante el método de elementos finitos, con el propósito de determinar si cumple los criterios, de resistencia, estabilidad y deformación de una conexión para marcos intermedios resistentes a momento, dados por normas o códigos como el Código Sísmico de Costa Rica 2010 revisión 2014, AISC 360, AISC 341.

Por consiguiente, conforme a lo mencionado anteriormente se plantea la siguiente interrogante ¿Se puede afirmar que la conexión analizada mediante el método de elementos finitos muestra resultados semejantes a los obtenidos en prueba a escala en un laboratorio y cumple con los requerimientos, de una conexión para marcos intermedios resistentes a momento?

C. Objetivo general

- Analizar el comportamiento de conexión resistente a momento con soldadura filete, mediante 6 modelos virtuales en simulación por el método de elementos finitos con el programa ANSYS Workbench, para conocer su desempeño.

D. Objetivos específicos

- Modelar conexión formada por perfiles W de ala y alma soldada, mediante el software ANSYS, calibrando las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en prueba experimental de laboratorio.
- Obtener diagramas de histéresis, que representen la rotación y la resistencia, ante cargas cíclicas, mediante simulación realizada por el método de los elementos finitos con el programa ANSYS.
- Determinar si el programa ANSYS es capaz de simular el efecto de la zona panel mediante la simulación virtual comprobando si el diagrama de histéresis es semejante al medido en la prueba experimental.
- Evaluar la naturaleza de las deformaciones elástica e inelástica y los patrones de esfuerzo.
- Demostrar si la conexión tiene la capacidad, para cumplir con los criterios de deformación y ángulo deriva de una conexión para marcos intermedios resistentes a momento, con el protocolo de cargas de las normativas AISC.

E. Justificación

El acero es un material de construcción muy conveniente debido a su versatilidad, alta resistencia, bajo peso, sus ventajosas propiedades mecánicas como la alta resistencia, elasticidad y su ductilidad, esa capacidad de deformarse sin fallar al ser sometido a altos esfuerzos, (Vinnakota, 2006). Esta propiedad permite la formación de rótulas plásticas, generando una gran capacidad de disipación de energía, esta rótula plástica se forma en las vigas cerca de la conexión por ello, la conexión debe tener la resistencia y rigidez suficiente para soportar el momento máximo que garantiza la formación de una articulación plástica. (McCormac, 2012).

Si bien las prioridades de un diseñador son la seguridad y funcionalidad de una estructura, la economía también es un aspecto relevante, esta requiere el manejo eficiente de los métodos constructivos y materiales, para lo cual el diseñador requiere de varias opciones con el fin de comparar sus costos y para cada estructuración debe realizarse una investigación previa que garantice su seguridad (Segui, 2000). En el caso de las conexiones las investigaciones previas, son necesarias para alcanzar la precalificación de conexiones, esta precalificación busca mediante pruebas experimentales de laboratorio realizadas rigurosamente definir las capacidades de un determinado tipo de conexión, códigos como el ANSI/AISC 341-16 establecen una metodología para llevar a cabo una evaluación del desempeño de una conexión, (American Institute of Steel Construction, 2016). Sin embargo, estos estudios suponen un costo económico muy alto y los equipos requeridos son limitados.

En el presente se cuenta con herramientas de cálculo con un alto potencial de simulación en la mecánica medios continuos, procesadores de elementos finitos capaces de analizar sólidos bajo el efecto de cargas dinámicas, es el caso de ANSYS, una aplicación que permite realizar simulaciones por elementos finitos, mediante este programa se pueden realizar simulaciones virtuales de conexiones bajo el efecto de cargas cíclicas, con el objetivo de evaluar el rendimiento de la conexión. Esta investigación pretende analizar una conexión de ala y alma soldada con soldadura tipo filete formada con perfiles W, conexión que se estudia para determinar si puede ser añadida a la nueva versión del Código Sísmico de Costa Rica, sin embargo aún no se han realizado pruebas experimentales en laboratorio en el país por lo que prevalecen ciertas inquietudes sobre el rendimiento exacto que es capaz de ofrecer esta conexión, por esta razón se modelará a través del método de elementos finitos con ayuda del software de ANSYS un espécimen basado en una prueba experimental para verificar la competencia del

programa simulando la prueba en la conexión, para posteriormente comprobar que cumple los requerimientos para ser denominada como una conexión para marcos intermedios resistentes a momento, analizando las deformaciones, la zona de panel y las soldaduras entre otros aspectos. De esta manera esta investigación resulta importante, ya que genera información beneficiosa para una mayor comprensión del comportamiento de esta conexión.

F. Alcances y limitaciones

Alcances

- Se realizará un modelado de la conexión en el programa ANSYS en su plataforma Workbench con el fin de hacer un análisis por el método de los elementos finitos de la respuesta de la conexión al ser sometida a cargas dinámicas.
- Se desea comprobar si los diagramas de histéresis reflejan un comportamiento similar al obtenido experimentalmente.
- La conexión a analizar estará compuesta por un perfil W como viga y un perfil tipo W como columna, la soldadura utilizada será tipo filete y total.
- Se examinará si esta conexión cumple criterios de deformación o agrietamiento en la zona de panel.
- Se analizará la conexión a la luz de los criterios establecidos en normas del Instituto Americano de la Construcción en Acero AISC 360, AISC 341 y el capítulo 10 del Código Sísmico de Costa Rica.

Limitaciones

- No se realizará ningún experimento a escala en laboratorio, por tanto, no es posible realizar ninguna calibración del modelo virtual, basada en un modelo real.
- El mallado será limitado por la cantidad mínima requerida para obtener resultados precisos en un entorno investigativo debido a la gran cantidad de recursos en hardware que supone un modelado con gran cantidad de elementos finitos.
- Únicamente se analizará un tipo de conexión, no se analizará la conexión al eje débil de columna, ni colocarán refuerzos.
- Simplificaciones en las curvaturas presentes en la unión del alma y el ala debido a que aproximar un radio semicircular con gran precisión mediante elementos finitos, representa una cantidad muy elevada en recursos de hardware.
- El artículo utilizado para comparar los diagramas de histéresis, documento nominado como “Seismic performance of fillet welds in moment resisting connections” fue elaborado por la Asociación de investigación de ingeniería pesada de Nueva Zelanda y la Universidad de Auckland, por lo que no se es responsable de la exactitud del mismo.

- No se cuenta con las curvas de esfuerzo deformación reales de los materiales utilizados en prueba experimental, por lo que se utilizan valores teóricos.

G. Impacto

Inicialmente debe tenerse en consideración que el propósito es, analizar una conexión de acero para precisar si, el programa ANSYS proporciona una representación consistente con las pruebas de laboratorio utilizadas como referencia y a su vez elucidar si la conexión cumple los requerimientos para ser utilizada en marcos intermedios resistentes a momento. Esta investigación contribuye a generar una mayor percepción del comportamiento de la conexión siendo de utilidad, para los diseñadores que se planten utilizar esta conexión, asimismo pretende colaborar con los esfuerzos de precalificación realizados por investigadores de Costa Rica. Brinda resultados que apoyan investigaciones previas de análisis de conexiones por medio del método de elementos finitos, dando continuación a esta corriente de investigación, reforzándola y aportando conocimientos que puedan ser de utilidad a investigadores pares. Es importante propiciar el desarrollo de investigaciones que generen mayor competitividad e independencia, de manera que coadyuven a la formación de nuevos criterios.

En caso de obtenerse resultados satisfactorios en referentes a comprobación del comportamiento histórico de la simulación y el experimento real, y que el rendimiento observado en la conexión presentado sea alto, esta conexión tiene un gran potencial para ser implementada en construcciones nacionales debido a su sencillez y bajo costo económico siendo por ellos una conexión de gran utilidad en el país, sin embargo en caso contrario y que el desempeño de la conexión no sea muy bueno esta investigación tendrá una repercusión significativa si algún diseñador llegase a considerar esta conexión, ya que podrá comprender los puntos débiles, pros y contras del uso de esta conexión.

Asimismo, por medio de esta investigación se pretende corroborar el potencial de las simulaciones virtuales de elementos finitos para generar diagnósticos preliminares del desempeño que es capaz ofrecer la soldadura de filete con defectos o imperfecciones en conexiones de acero formada con perfiles W al ser sometido a cargas cíclicas y esfuerzos de fatiga. Así como, determinar si el programa es capaz de simular el efecto panel, es decir las deformaciones, esfuerzos y la ductilidad desarrollada en esta zona. Además de la capacidad de replicar el mecanismo de fallo y ruptura que desarrollaría esta conexión al ser sometida a cargas periódicas, lo que permitirá ampliar el estudio de este tipo de conexiones con una metodología

más versátil y económica en clasificaciones preliminares donde no se cuente con los recursos necesarios para realizar una prueba experimental a escala real.

H. Hipótesis

Se supone que los diagramas de histéresis obtenidos mediante la simulación virtual serán semejantes a los utilizados como referencia trazados a partir de un ensayo real, asimismo se espera que la conexión evaluada cumpla con todas las disposiciones requeridas para ser clasificada como conexión para marcos intermedios resistentes a momento, teniendo en cuenta que no haya fallas significativas en zona de panel y si las hay estas estén dentro de lo permitido y además se presente un buen desempeño en la soldadura. Asimismo, se cree que el modelo virtual presentará grietas y ruptura en el ala de la viga por fatiga de la misma forma que sucedió en el ensayo real presentado en el estudio de referencia.

Capítulo I: Fundamentación teórica

En este capítulo se presentan conceptos y filosofías de diseño necesarias para comprender esta investigación, desde los fenómenos que gobiernan el comportamiento del acero en las condiciones más simples, hasta condiciones de carga más complejas, asimismo algunas pautas sobre el comportamiento presentado en conexiones de acero al ser sometidas a cargas cíclicas, y los requerimientos de las mismas, también se exponen fundamentos teóricos del método de los elementos finitos para el desarrollo del modelo en el software ANSYS.

1.1. Acero estructural

El acero es un material muy versátil, debido a los beneficios que ofrecen sus propiedades siendo un material isotrópico de alta resistencia, que presenta buena durabilidad entre otras propiedades, el acero debe sus propiedades a su composición química y la estructura de sus moléculas, que a su vez dependerán del proceso de fabricación e ingredientes utilizados (McCormac, 2012).

El acero es una aleación formada principalmente por hierro y en menor cantidad por elementos como carbón, azufre, silicio, manganeso fósforo entre otros. Sin embargo, el carbón es el que genera mayor influencia sobre la resistencia aumentándola y disminuyendo su ductilidad (McCormac, 2012). En cuanto a su proceso de fabricación de los perfiles puede realizar mediante diferentes etapas; fundición en altos hornos, hornos eléctricos o hornos de oxígeno y el laminado de los perfiles. Donde se funden principalmente magnetita y hematita, se retiran las impurezas y se modifica su composición química para su posterior vaciado en un molde de lingote que luego es moldeado mediante molinos de laminado, conocidos como rodillos de laminado de modo que estos comprimen el lingote hasta dar la forma y espesor requerido (Vinnakota, 2006).

Las relaciones esfuerzo – deformación presentan características que son necesarias en el diseño de estructuras, estas se representan mediante un Diagramas de esfuerzo – deformación donde se somete generalmente una probeta a una terminada fuerza de tensión, que genera un esfuerzo, en este diagrama se grafican los esfuerzos que experimente la probeta en el eje Y, y las deformaciones unitarias que estos generan en el eje X, véase en anexos la figura 58, hasta que la probeta alcance la ruptura, inicialmente la relación esfuerzo – deformación es lineal y está gobernada por la ley de Hooke donde el módulo de Young expresado en unidades de esfuerzo representa la pendiente (Segui, 2018).

El límite elástico es el esfuerzo máximo que puede soportar el acero sin sufrir una deformación permanente, donde al cargar y descargar esta se deformará y recuperará su forma siguiendo el mismo comportamiento lineal, esta parte del diagrama se denomina rango elástico. Mas allá del límite elástico, el acero entra en estado de fluencia este punto es conocido como punto de fluencia F_y a partir de este la deformación será inelástica, el acero podrá seguir deformándose, pero su comportamiento será no lineal, al descargarse la línea será paralela a la trayectoria de la deformación inicial y la deformación permanente (Seguí, 2018). Después de la deformación, es necesario aumento del esfuerzo para poder incrementar la deformación, este rango se denomina endurecimiento por deformación (McCormac, 2012). Además del punto de fluencia existe la resistencia última denotada F_u , este máximo valor de resistencia que es capaz de soportar (Seguí, 2018).

1.1.1. Clasificación y designación de aceros estructurales

La composición química del acero afecta significativamente sus propiedades, las normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM) define los porcentajes máximos de carbón, silicio y otros elementos. Asimismo, la American Society for Testing and Materials (ASTM) especifica las propiedades físicas y mecánicas requeridas según su clasificación de acero estas han sido incluidas en las especificaciones AISC, se catalogan en: Aceros al carbón, aceros de alta resistencia y baja aleación y aceros estructurales de alta resistencia, baja aleación y resistentes a la corrosión atmosférica (McCormac, 2012).

Aceros al carbón este tipo de acero puede contener hasta 1.7% de carbono y se divide en 4 tipos de los cuales destaca el acero dulce por aplicabilidad con fines estructurales este tiene entre 0,15% y 0.29% de carbono, se clasifican en A36, A53, A500 (grado B, C), A501 (grado A, B) y A529 (grado 50, 55) (McCormac, 2012).

Aceros de alta resistencia y baja aleación en estos el total de elementos de aleación no suele superar el 5%, se caracterizan por tener mayor resistencia a la corrosión que los aceros al carbón, se clasifican en A572 (grado 42, 50, 55, 60, 65), A618, A913 (grado 50, 60, 65, 70) y A992 (F_y , F_u) (McCormac, 2012).

Aceros estructurales de alta resistencia, baja aleación y resistentes a la corrosión atmosférica, tienen pequeñas cantidades de aleación de cobre que mejora resistencia a corrosión se clasifican en A242, A588 y A847 (McCormac, 2012).

1.1.2. Caracterización y clasificación de perfiles de uso comercial

Los miembros de acero se producen con secciones estandarizadas en Costa Rica se suele utilizar perfiles que fabricados según las dimensiones establecidas en las especificaciones ASTM A6 y AISC, las geometrías más comunes son secciones W, vigas S, ángulos L, secciones C, secciones HSS y sección WT. Para esta investigación en específico es relevante el perfil tipo W están formados por 2 elementos horizontales llamados patines, separados mediante un elemento vertical llamado alma, siendo simétrico con forma de I, en América se conoce como W (Salmon, 2009), pero en otras partes del mundo se pueden reconocer con nomenclaturas diferentes sea el caso de Europa este perfil se identifica IPE y en Nueva Zelanda por ejemplo es conocido como UB. Las longitudes, espesores y tolerancias pueden consultarse en las normas mencionadas.

1.1.3. Propiedades mecánicas del acero

Resistencia. La resistencia de un material está dada principalmente por su esfuerzo de fluencia y esfuerzo último, estos valores son obtenidos de forma empírica a tensión, pero los valores de resistencia a compresión son aproximadamente iguales a los obtenidos en la prueba a tensión, por ejemplo, el esfuerzo de fluencia del acero A992 grado 70 es de 482 Mpa (70 Ksi) y esfuerzo de ultimo es de 620 Mpa (90 Ksi) (Mamlouk, 2009).

Elasticidad. La elasticidad es la propiedad física de un material de deformarse al ser sometido a un determinado esfuerzo, y recuperar su forma original al retirar el esfuerzo, produciendo una deformación elástica, debido a que tensar un material las fuerzas de enlace entre sus átomos se estiran generando una deformación macroscópica y al quitar este esfuerzo de tracción los átomos vuelven a su posición original de equilibrio, este fenómeno se puede observar en los diagramas esfuerzo – deformación en el rango elástico, la constante de proporcionalidad o pendiente de deformación lineal es conocida como módulo elástico (Módulo de Young) se representa con la letra E (Güemes, 2012).

Ductilidad. Es la capacidad de un material de deformarse plásticamente sin romperse, se calcula mediante un ensayo a tracción de una probeta donde se cuantifica mediante el alargamiento porcentual a ruptura y el coeficiente de estricción que es la variación presentada en la sección transversal de probeta durante el ensayo, cuanto mayor sean estos mayores será la ductilidad de un material, permitiendo a un material deformarse mucho antes de alcanzar el

punto de ruptura, esta propiedad incrementa al aumentar la temperatura. Por otra parte, la fragilidad es todo lo contrario, entiéndase como la capacidad de los materiales de romperse sin deformarse plásticamente o deformándose mínimamente (Güemes, 2012).

En estructuras de aceros un material que no sea dúctil generalmente se considera inaceptable, ya que probablemente se romperá de forma frágil al ser sometido a un impacto, esto provocaría que por ejemplo un elemento a flexión se rompiera sin siquiera presentar una mínima deflexión, por lo que fallaría sin presentar un mínimo indicio, a diferencia de un elemento dúctil que si presentaría una visible deflexión. De ahí la importancia de que los elementos estructurales sean dúctiles, la naturaleza dúctil permite que un material pueda soportar altos esfuerzos en diferentes puntos, deformándose en estado de fluencia evitando el agrietamiento o la fractura en estos puntos (McCormac, 2012).

Tenacidad. La tenacidad es la energía necesaria para deformar o fracturar un objeto, de igual forma se puede visualizar como el área bajo la curva en un diagrama fuerza-desplazamiento, la unidad de trabajo, es fuerza multiplicada por la distancia de deformación, mientras la unidad del área debajo de la curva es el trabajo por unidad de volumen necesario para romper el material. El área bajo la curva en rango elástico es la medida del módulo de resiliencia de un material (Güemes, 2012). véase en anexos la figura 59.

La tenacidad es cuantificada experimentalmente mediante la prueba de impacto de Charpy (ASTM E23) mide la energía requerida para romper una probeta con una muesca mediante un impacto, la tenacidad disminuye en temperaturas bajas (Güemes, 2012). Es de gran importancia ya que permite absorber grandes cantidades de energía sin romperse durante su fabricación, montaje o al ser sometida a cargas monotónicas (McCormac, 2012).

Razón de Poisson. Mediante experimentación empírica sea determinado que al estirar una probeta su sección transversal se verá reducida, la razón entre las deformaciones transversales y deformaciones longitudinales se denomina razón de Poisson, se simboliza con la letra μ , se determina dividiendo la deformación unitaria longitudinal entre la deformación unitaria en dirección perpendicular. En los aceros este valor suele ser 0.3 en deformaciones elásticas y 0.5 cuando las deformaciones son plásticas, también pueden presentarse en valores negativos que hacen referencia a deformaciones por compresión (Salmon, 2009).

1.2. Fatiga de los materiales y curvas de Wohler (S-N)

Las cargas repetidas o fluctuantes sobre una pieza generan esfuerzos cíclicos al someter un material a estas condiciones se genera una degradación que puede generar grietas que se expandirán con la aplicación de estas cargas hasta que la cantidad y tamaño de las grietas generen la ruptura de la pieza, elemento o componente mecánico, este fenómeno es conocido como falla por fatiga. En los ensayos de fatiga se utiliza una probeta que está sujeta a diferentes esfuerzos, principalmente de compresión y tracción, en este ensayo se registra los esfuerzos máximos aplicados compresión o tracción también conocidos como amplitudes de esfuerzo (S), asimismo se registra el número de ciclos (N) necesarios para generar la falla de la probeta, en estos ensayos la probeta está sujeta a una inversión de esfuerzos donde pasa de tensión a compresión y viceversa de forma cíclica, la representación gráfica de los resultados de este ensayo son las Curvas S-N (Stress-Number of Cycles (N)) también llamadas Curvas de Fatiga y se utiliza para visualizar vida media en fatiga con la tensión (Kalpakjian, 2014). Con algunos materiales la curva es horizontal bajo un determinado esfuerzo, este es el límite de fatiga, lo que significa que sin importar el número de ciclos en esfuerzos menores a este límite no se presentará fatiga (Kalpakjian, 2014). En Figura 60 se presentan ejemplos de Curvas S-N de Acero y Aluminio.

1.3. Soldadura de aceros

La soldadura es el procedimiento por el cual se unen dos piezas metálicas por medio de la fundición de un material metálico con un arco eléctrico y endurecimiento del mismo por enfriamiento, esta técnica es muy utilizada en la ingeniería civil en el desarrollo de cercas, pórticos y conexiones de acero, presentando muchas ventajas como ahorro de peso, un mayor silencio durante la construcción entre otras, asimismo sus especificaciones e inspección es regulada por la American Welding Society (AWS) la cual presenta un código de la soldadura que son completamente aplicables en estructuras sismo resistentes según AISC con pocas excepciones. Los insumos para soldadura deben ser fabricados cumpliendo los estándares de la norma ASTM A 325, ASTM A490 (Salmon, 2009).

1.3.1. Procesos GMA y MMA

Existen muchos métodos de soldadura, sin embargo, los más utilizados métodos son la soldadura con arco, soldadura a gas u oxiacetilénica.

MMAW. La soldadura con arco eléctrico es una técnica muy simple y versátil, consiste en uso de un electrodo con forma de varilla al cual se le induce un arco eléctrico que funde tanto el electrodo como el material base, depositando el material fundido del electrodo. El electrodo consumible está cubierto con un fundente que genera un gas protector en el arco que no permite la oxidación del metal fundido. El fundente también se utiliza para proteger de impurezas la soldadura, el fundente se solidifica generando una escoria y también ayuda a concentrar el calor del arco eléctrico (Mamlouk, 2009). Véase en anexos la figura 61.

Soldadura por arco metálico con gas (GMAW). Esta soldadura cono conocida como MIG GMAW por sus siglas en inglés, este proceso utiliza un electrodo continuo con forma de cable que es suministrado por una punta de contacto o guía, a su vez se abastece una mezcla de gases inertes que genera un escudo de gases alrededor del arco de soldadura, permitiendo la colocación de altas tasas de soldadura de forma uniforme, controlando la forma y la transferencia del metal. Este dispositivo se conoce como pistola de soldadura (Mamlouk, 2009). Véase en anexos la figura 62.

1.3.2. Grados según su resistencia en electrodos

La resistencia de la soldadura dependerá del electro que se utilice, según su designación la nomenclatura es por ejemplo E6013, donde la E significa que es un electrodo, los primeros dos números representan la resistencia mínima en kilo libra entre pulgada cuadrada, se pueden encontrar resistencias de (60, 70, 80, 90, 100 o 120), para este ejemplo 60 klb/in² , el tercer número indica la dirección o posición en la que se puede soldar si el valor es 1 con este electrodo puede soldar de todas posiciones (Horizontal, vertical, plano o ascendente). Si el tercer dígito es 3 solo puede utilizarse en soldaduras horizontales, vertical descendente y si es 4 solo puede usarse en soldaduras horizontales descendientes. Por otra parte, el último dígito indica el tipo de cubrimiento del cual a su vez dependerá el tipo de corriente que puede utilizar ya sea corriente continua o alterna y polo negativo o positivo (Salmon, 2009).

1.3.3. Caracterización geométrica de soldaduras

La soldadura se clasifica por la geométrica de su sección transversal, los tipos más comunes son la soldadura de filete y la soldadura de ranura. Las soldaduras tipo filete son aquellas que se encuentran en una esquina, su forma transversal es triangular y mantiene unida a dos partes en contacto, mientras la soldadura de ranura son soldaduras de penetración completa o penetración parcial (Vinnakota, 2006).

Soldadura tipo filete. La soldadura de filete tiene una sección transversal teórica triangular y una 2 superficies formadas por el traslape o la interacción de los elementos, esta soldadura es muy utilizada ya que es muy económica, requiere poca preparación de la superficie y se requiere un nivel menor de capacitación que para las soldaduras de ranura. Esta soldadura puede ser cóncava o convexa, el tamaño de soldadura se mide mediante triángulo rectángulo más grande que se pueda ser inscrito en la soldadura (Vinnakota, 2006).

La raíz es el punto donde interceptan las caras de los elementos a soldar, la cara teórica es la hipotenusa del triángulo inscrito y la garganta teórica es el plano en el que se dan los mayores esfuerzos esta perpendicular a la mitad de la cara teórica hasta la raíz (Vinnakota, 2006). Las soldaduras filetes son muy resistentes en tensión y compresión, sin embargo, no tanto a esfuerzos de cortante, este tipo de soldadura suele fallar a 45 grados con una superficie de fallo sobre la garganta efectiva (McCormac, 2012). Véase en anexos la figura 63.

1.3.4. Resistencia de la soldadura

En las conexiones de marcos resistentes a momento las normas suelen recomendar soldaduras a tope de penetración total como un tipo de soldadura adecuado para soldar alas de vigas a alas de columnas en áreas sísmicas, siendo la norma NZS 3404 la única que permite usar soldaduras de filete para conexiones en zonas de alta sismicidad. Un aspecto importante es que esta norma utiliza un factor de sobrerresistencia que ha demostrado ser seguro durante eventos sísmicos. Aunque las soldaduras de filete basadas en el estándar NZS 3404 son más grandes que los tamaños de las normas europeas y ANSI/AISC 360-05 (Taheri, 2020). En el caso de las normas AISC las resistencias nominales de diferentes tipos de soldadura incluyendo la soldadura de filete se debe consultar tabla J2.5 de la Especificación del AISC 360, donde se indica el nivel de resistencia de aportación requerido para los respectivos tipos y direcciones de carga en la soldadura (McCormac, 2012).

1.3.5. Requisitos del NZS 3404

Los criterios de dimensionamiento de las soldaduras de filete de la norma NZS 3404: Parte 1 1997, son muy similares al método simplificado de la norma EN 1993, 2005b y la norma ANSI/AISC 360-05, Estos enfoques comparten el estado límite único de rotura por cortante, suponiendo que la rotura ocurra en el área efectiva de la soldadura. La norma NZS 3404 aplica el estado límite último para la capacidad de diseño de las soldaduras de filete lo mismo que otros estándares. La capacidad nominal de una soldadura de filete por unidad de longitud, tomando en cuenta el factor de reducción de la fuerza, debe ser mayor que la fuerza de diseño por unidad de longitud de la soldadura (Taheri, 2020). La fórmula general es

$$V_w^* \leq \phi V_w$$

Donde

ϕ es el factor de reducción de la resistencia que se puede seleccionar de la tabla 23.

V_w es la capacidad nominal de una soldadura de filete por unidad de longitud.

V_w^* es la fuerza de diseño por unidad de longitud.

El estándar NZS 3404 especifica la capacidad nominal de la soldadura de filete por unidad de longitud (VW) como

$$V_w = 0.6f_{uw}t_t k_r$$

Donde

f_{uw} es la resistencia a la tracción nominal de la soldadura.

t_t es el espesor de garganta de diseño.

k_r es el factor de reducción para la longitud de una conexión de traslape soldado (Lw) según la tabla 24.

NZS 3404: parte 2 proporciona los criterios generales de falla de las soldaduras de filete considerando un sistema de fuerzas (Taheri, 2020), como se muestra en la figura 64.

$$\sqrt{[V_n^{*2} + K_V(V_{Vt}^{*2} + V_{Vl}^{*2})]} = \phi K_w(0.6f_{uw}t_t K_r) = \phi K_w V_w$$

V_n^* es la fuerza de diseño por unidad de longitud de soldadura normal al plano de la garganta de la soldadura de filete.

V_{Vl}^* es la fuerza cortante de diseño por unidad de longitud de soldadura longitudinal al plano de la garganta de la soldadura de filete.

V_{Vt}^* es la fuerza cortante de diseño por unidad de longitud de soldadura transversal al plano de la garganta de la soldadura de filete.

Valores de $KV = 1.0$ y $KW = 1.0$ para la ecuación 2.17 sería similar al método simplificado utilizado en el estándar EN 1993-1-8:2005.

1.3.6. Requisitos del AISC

Los requisitos del AISC deben de cumplirse para que la soldadura de filete pueda tener una resistencia óptima. El AISC especifica la resistencia nominal de muchos tipos de soldadura en las que se encuentra incluido el tipo de soldadura filete. Para el diseño de la resistencia de la soldadura se indica como R_n , la resistencia de las juntas soldadas y se toma la resistencia menor también se obtiene la resistencia de los materiales donde se evalúa los estados límites como lo son fractura a constante y a tensión (McCormac, 2012).

El material se evalúa de la siguiente manera:

Se tiene la resistencia nominal del metal base es la siguiente:

$$R_n = F_{nBM}A_{BM} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Se tiene la resistencia nominal del metal de la soldadura filete es la siguiente:

$$R_n = F_{nw}A_{we} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Diseño de conexiones para miembros con soldaduras de filete longitudinal y transversal:

En el diseño de conexiones para miembros con soldadura filete transversal y longitudinal la resistencia nominal total de soldaduras se determina sumando todas las resistencias de la soldadura tanto transversal como longitudinal, pero no es lo correcto por lo que el AISC menciona que la resistencia de las soldaduras filete que se encuentren en los laterales tanto como las transversales tienen que tener los mismos o mayores resistencias, de las que se llegan a obtener con las siguientes ecuaciones del AISC (McCormac, 2012):

$$R_n = R_{mnl} + R_{mnt} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$R_n = 0.85R_{mvl} + 1.5R_{nwt} \quad (\text{Ecuación 4})$$

1.4. Comportamiento histérico

El comportamiento histérico representa los ciclos de deformación de un material elastoplástico al ser sometido a cargas monotónicas, así como su degradación histérica conocida

como fase transitoria, su representación gráfica muestra ciclos de carga y descarga junto a la acumulación de deformación en forma de bucles (Olleros, 2016).

La degradación histerética se presenta cuando un material es esforzado hasta alcanzar el estado de fluencia, al someter un material a cíclicos de carga y descarga invirtiendo el sentido del estrés. Inicialmente en un comportamiento elastoplástico perfecto partiendo de un esfuerzo cero, primeramente, al cargar el material en el rango elástico, donde en una gráfica esfuerzo contra deformación unitaria su pendiente es su módulo de elasticidad este presentaría una deformación lineal positiva, luego al alcanzar el esfuerzo de fluencia, véase en la figura 65 en el punto (a) de la gráfica, se da una deformación plástica, en la que el material va perdiendo su rigidez gradualmente hasta alcanzar el estrés máximo representado en el punto (b) de la figura 65, posterior a este presenta la descarga donde el material sufre una deformación lineal negativa, mantenido la rigidez original del módulo de elasticidad hasta que el esfuerzo sea nuevamente igual a cero. Posteriormente se invierte el sentido de la carga, repitiendo el mismo proceso en sentido contrario, de esta manera el ciclo se repite hasta que cesen las cargas cíclicas o el material alcance la ruptura por la acumulación de deformaciones plásticas (Gioncu, 2002). Este fenómeno se denomina efecto Bauschinger y es característico del acero. Este comportamiento se debe principalmente a que cuando se carga un material en rango plástico este presenta una meseta de esfuerzo-deformación (Bruneau, 2011). Este comportamiento es muy común en estructuras de acero durante sismos muy severos. Por ello son importantes los ensayos experimentales, para interpretar el comportamiento de estructuras bajo acciones sísmicas (Gioncu, 2002).

Esta es una propiedad de gran interés en el estudio de la capacidad de disipación de energía histerética, en elementos de acero sujetos a cargas cíclicas y deformaciones inelásticas. La energía histerética es la requerida para deformar inelásticamente un cuerpo de acero, se puede calcular como el producto de la fuerza plástica por el desplazamiento plástico, lo que es igual al trabajo en el rango plástico, esta energía es conocida como energía histerética y se diferencia de la energía cinética por ser una energía disipada irrecuperable.

Otros fenómenos que experimenta el acero al ser sometido a un comportamiento histerético severo el endurecimiento por deformación y la extensión del rango elástico previa al efecto Bauschinger (Bruneau, 2011). Véase en anexos la figura 66.

Reglas de endurecimiento

Efecto ratchetting es la acumulación de deformaciones plásticas durante la aplicación de cargas cíclicas, al replicar este efecto es difícil debido a que una pequeña desviación puede convertirse en un gran error luego de muchos ciclos (Feigenbaum, 2012). Por otra parte, la resistencia por endurecimiento de un material luego de llegar a fluencia aumenta de forma lineal, mientras que en materiales perfectamente plásticos dejaría de crecer una vez se alcanza la fluencia, así mismo si se induce un modelo de plasticidad perfecto el análisis será más conservador (ANSYS, 2020).

Existen dos modos de endurecimiento: endurecimiento isotrópico y endurecimiento cinemático, en el del endurecimiento cinemático el material se endurece en dirección radial aumentando la superficie en fluencia mientras, que el cinemático se endurece en una nueva dirección sin mantener la superficie de fluencia en una posición fija (Maricely, 2014). En casos de cargas cíclicas se debe utilizar el endurecimiento cinemático para simular el efecto Bauschinger (ANSYS, 2020). Para mayor comprensión véase la figura 67 y 68 en anexos.

En 1956 Wiliam Prager propuso una ley de endurecimiento cinemático lineal, el cual permitía reproducir el efecto Baushinger pero no la acumulación de deformación plástica, durante las siguientes décadas se propusieron diferentes teorías que aportaron avances en este campo (Argañaraz, 2018), donde cabe mencionar el modelo propuesto por Chaboche que permiten modelar el endurecimiento cinemático no lineal con fluencia implícita este modelo puede combinarse con el endurecimiento isotrópico de ley de potencia no lineal, la plasticidad anisotrópica y el endurecimiento isotrópico multilineal, para ajustar las curvas de endurecimiento y brindar resultados más precisos (ANSYS, 2020). Estos modelos se han implementado en paquetes software de elementos finitos como ANSYS.

1.5. Conexiones de acero

1.5.1. Conexiones a momento

Las conexiones a momento se clasifican según su capacidad de transmitir momento y su rotación, estas se dividen en dos tipos, denominadas: Completamente restringidas y parcialmente restringidas (American Institute of Steel Construction, 2016b).

Conexión a momento, completamente restringida. Este tipo de conexión presenta una buena transmisión de momento y rotaciones muy bajas, de modo que son consideradas

despreciables, para efectos de los análisis estructurales se considera que las conexiones completamente restringidas no presentasen rotaciones, para ello la conexión debe tener una alta rigidez y resistencia para garantizar que no pueda existir rotaciones relativas en sus miembros (American Institute of Steel Construction, 2016b).

Conexión a momento parcialmente restringida. La conexión de momento parcialmente restringida, tiene capacidad para transmitir momento, sin embargo, las rotaciones relativas que desarrolla no son despreciables, y deben ser consideradas en el análisis estructural, según lo determinado en las curvas esfuerzo deformación características de la conexión, de manera que se demuestre que la conexión cuenta con la rigidez, resistencia a las deformaciones de los estados límites. Estas curvas pueden encontrarse en la literatura o ser determinadas por métodos analíticos o experimentales (American Institute of Steel Construction, 2016b).

1.6. Sistemas marcos estructurales de aceros

Los marcos son sistemas formados por la unión de vigas y columnas que conforman una estructura (Molineaux, 2000), los marcos de acero se dividen en dos, los marcos formados por conexiones resistentes a momento y los marcos arriostrados, donde existen tres tipos pórticos resistentes a momentos, estos son: marcos de momento especiales (SMF), marcos de momento intermedios (IMF) y marcos de momento ordinarios (OMF) (American Institute of Steel Construction, 2016b). Cada uno de estos tres sistemas ofrece diferentes grados de ductilidad y capacidad de respuesta inelástica, los OMF suelen ser más resistentes que los IMF o los SMF, pero pueden tener características de respuesta inelástica mucho más pobres, por lo que a medida que un sismo de alta intensidad llevase al umbral a estos tipos de marcos sería el primero en sufrir daños críticos (Federal Emergency Management Agency, 2000).

1.6.1. Marcos de momento intermedios (IMF)

Los pórticos de momento intermedio (IMF) de acero estructural, son conexiones con una capacidad de deformación inelástica limitada que alcanza por la fluencia y flexión de sus miembros, además de la capacidad de deformación por fluencia en la zona de panel de la columna generada por los esfuerzos cortantes, en el diseño de las columnas, vigas, placas de continuidad y zona de panel, deben estar fundamentadas con pruebas, que demuestre que la conexión tiene el desempeño requerido. La conexión en este tipo de marco debe tener la

capacidad de rotar en un ángulo de deriva no menor a 0.02 rad, además la resistencia a la flexión de la conexión, debe ser igual o mayor al 80% del momento probable (0.80 Mp) de la viga en la conexión cuando está presente una rotación de 0.02 radianes (American Institute of Steel Construction, 2016a).

Zona Protegida y rótula plástica. Las zonas protegidas son las zonas ubicadas en los extremos de las vigas o elementos a flexión que puedan desarrollar rotaciones inelásticas (McCormac, 2012), generalmente la deformación inelástica se forma desde la cara de la columna hasta una distancia igual a la de la mitad del peralte de la sección (American Institute of Steel Construction, 2016a). Estas deformaciones inelásticas también se denominan articulaciones o rótulas plásticas, se generan cuando el momento del miembro es igual o superior a el momento de fluencia en sus fibras extremas, formando una articulación plástica (McCormac, 2012). En este caso la cedencia del acero en la articulación aporta una mayor capacidad de rotación a los miembros y permite al marco deformarse lateralmente de manera plástica, esto ayuda a disipar energía y genera daño a los elementos deformados, por otra parte, la formación de rótulas plásticas en las columnas es completamente indeseable ya que además aportar poca disipación de energía puede generar un sistema inestable (Federal Emergency Management Agency, 2000).

Deriva inelástica. La deriva es un desplazamiento relativo en sentido horizontal entre los niveles de una estructura, mientras la razón de deriva es el resultado de dividir la deriva entre la altura del entrepiso (American Institute of Steel Construction, 2016b).

1.6.2. Marcos de momento ordinario (OMF)

Los pórticos resistentes a momentos ordinarios (OMF) de acero estructural, deben diseñarse de manera que este sea capaz de proporcionar deformaciones inelásticas mínimas en sus elementos y conexiones, de manera la deformación en la zona de panel sea limitada. Los marcos estructurales OMF no tienen requisitos de esbeltez local adicionales a las razones de ancho-espesor para elementos a compresión sometidos a flexión presentadas en la norma AISC 360, este tipo de sistema de pórticos tampoco tiene zonas protegidas, las soldaduras en las conexiones deben ser consideradas como críticas por demanda (Código sísmico de Costa Rica 2010, 2016). Las conexiones de este sistema pueden ser rígidas o parcialmente rígidas:

Conexiones a momento rígidas en sistemas OMF. Este tipo de conexiones cuando se utilicen en marcos OMF, deben ser diseñadas para en momento y cortante máximo tomando en

cuenta los efectos de sobre resistencia y endurecimiento por deformación, para el caso de las conexiones de columnas y vigas de ala ancha deben cumplir los requisitos para el diseño de conexiones IMF o SMF o las alas de la viga deben estar conectadas mediante soldadura de penetración total, de igual manera el alma de la viga debe estar unida al ala de columna con soldadura de penetración total, además las placas de continuidad deben ser diseñadas para soportar la capacidad máxima de la superficie en contacto unidas mediante soldadura tipo filete o de penetración total. En este tipo de conexiones se espera que con la deformación medida con el ángulo de deriva de 0.04 la capacidad de momento en la conexión sea de al menos el 80% de la capacidad nominal de momento plástico de la viga (Código sísmico de Costa Rica 2010, 2016).

Conexiones a momento parcialmente rígidas en sistemas OMF. También conocidas como conexiones a momento semirrígidas, en este tipo de conexión la rigidez, resistencia y capacidad de deformación deben ser tomadas en cuenta en el análisis de la estructura, la resistencia nominal a flexión de la conexión no debe ser mayor a un 50% del momento plástico de la viga, excepto en las estructuras de un nivel donde no puede ser menor al 50% del momento plástico de la columna de la conexión (Código sísmico de Costa Rica 2010, 2016).

1.6.3. Marcos de momentos especiales (SMF)

Se espera que este tipo de sistema de pórticos cuente con una capacidad de deformación inelástica significativa mediante la fluencia por flexión de las vigas y cierto grado de fluencia limitada en las zonas de panel en el alma de las columnas, o por otra parte cuando exista un análisis y pruebas que corrobore que un marco es equivalente a este sistema. En todo caso las columnas deben ser más fuertes que las vigas al desarrollar su momento nominal máximo, después del desarrollo de una articulación plástica o luego del endurecimiento de deformación y únicamente se permite la fluencia por flexión en las columnas de la base y solo una articulación plástica, que debe estar respaldada por pruebas de rendimiento en las conexiones (Código sísmico de Costa Rica 2010, 2016).

En los marcos especiales a momento la relación entre la suma de las capacidades nominales en flexión de las columnas de una conexión entre suma de las capacidades nominales a flexión de una viga debe ser mayor o igual a uno, los elementos de este sistema están formados por alas conectadas de forma continua al alma, además deben cumplir con las razones de esbeltez por sismo para elementos en compresión. Las conexiones de este tipo de sistema tienen la capacidad de ajustarse a un ángulo de al menos 0.04 rad de manera segura, y una resistencia

mínima a flexión igual al 80% de la capacidad nominal del momento plástica de la viga con una rotación de 0.04 rad, las conexiones viga-columna utilizadas en este sistema deben ser precalificadas o se debe demostrar su desempeño en ensayos presentados en la literatura, también puede demostrarse su rendimiento mediante pruebas cíclicas (Código sísmico de Costa Rica 2010, 2016).

1.7. Zona de panel

La zona del panel es un segmento rectangular del alma de la columna, está ubicada en la intersección entre la columna y la viga justo entre las alas de la columna y las placas de continuidad, siendo el nodo de la conexión viga columna, esta zona se ve sometida a altos esfuerzos de cortante, (American Institute of Steel Construction, 2016b), que pueden generar distorsiones en el comportamiento de la zona de panel (Bruneau, 2011). El buen desempeño de un marco resistente a momento al experimentar cargas sísmicas dependerá del comportamiento y ductilidad que las conexiones viga columna puedan desarrollar, de esta manera las conexiones deben ser capaces de desarrollar el momento plástico en las vigas, sin que las conexiones viga-columna se vean comprometidas, asimismo evitando daños en las alas de la columna, el aplastamiento del alma de la columna o cualquier fallo en la zona de panel (Bruneau, 2011). En los marcos intermedios resistentes a momento (IMF) se permite la fluencia en la zona de panel debido a que esta fluencia ayuda a alcanzar la acción inelástica que permite que los marcos IMF puedan tener capacidad de deriva necesaria para alcanzar el rendimiento esperado (American Institute of Steel Construction, 2016a). La zona de panel generalmente está sometida a fuerzas de cortante, axiales y momentos que son transferidos entre las vigas y columnas.

1.7.1. Distorsión en los patines y fluencia del alma de una columna

Las placas de continuidad son refuerzos que unen las alas de la viga a través del alma de la columna, la utilización de las placas de continuidad es una forma muy eficaz de evitar la distorsión en alas y la fluencia o fatiga en el alma de la columna. Al plastificarse la viga por momentos elevados en la viga se genera distorsiones en las alas de la columna que suceden cuando el ala de la viga transfiere grandes esfuerzos a las columnas, donde el ala de la viga genera esfuerzos de tensión o compresión en el ala de la columna, en caso de no contar con placas de continuidad o alguna restricción este esfuerzo puede generar que el ala de la columna se deforme por el efecto de la tracción generado por la viga. No obstante, por causa de la rigidez en el plano de los patines de viga, el patín de la columna no puede deformarse

demasiado, en virtud de que las deformaciones deben coincidir entre los elementos conectados, los esfuerzos tienden a concertarse en el ala de la viga especialmente cerca del alma de la columna que es donde la columna es más fuerte (Bruneau, 2011).

Asimismo, en ensayos experimentales por el efecto de las deformaciones excesivas presentadas en estas conexiones sin placas de continuidad, se produce grietas en las soldaduras del patín de la viga, así como a lo largo y ancho del patín de la viga, principalmente en la parte central del patín. Por lo que, para prevención de estas fallas, es necesaria la utilización de placas de continuidad donde la fuerza máxima esperada exceda la resistencia mayorada es decir ϕR_n , véase la siguiente ecuación (Bruneau, 2011).

$$\phi R_n = 6.25t_{cf}^2 F_{yf} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde t_{cf} es el espesor y F_{yf} es el límite elástico de la columna, ϕ tiene un valor de 0.9. esta ecuación está basada en el análisis de rendimiento de Graham, mientras en la norma AISC 341 supone que el momento de la viga endurecida por deformación es un 30% mayor que el momento plástico nominal, también asume el alma de la viga no transmite eficientemente el momento, por lo que considera que el momento máximo se transmite únicamente por medio de los patines de la viga, asimismo supone que el módulo plástico de las alas $Z_f = A_f d$ donde d es el peralte de la viga, representa el 70% del módulo Z de una viga, por esto se considera que el esfuerzo máximo en la viga es igual a $1.8A_f f_y$ donde A_f es el área del ala conectada y f_y es la resistencia nominal de la viga. Véase en la siguiente ecuación (Bruneau, 2011).

$$T_{max} = \frac{M_{max}}{d} = \frac{1.3M_p}{d} = \frac{1.3(ZF_y)}{d} = \frac{1.3\left(\frac{Zf}{0.7}\right)F_y}{d} = \frac{1.8A_f d F_f}{d} = 1.8A_f d F_f \quad (\text{Ecuación 6})$$

En algunos casos las conexiones sin placas de continuidad pueden mostrar un buen desempeño inelástico desarrollando rotaciones apropiadas, pero para reconocer cuándo pueden no utilizarse placas de continuidad, las alas de las columnas deben cumplir con un requisito y es que $t_{cf} \geq b_{cf}/6$ donde b_{cf} es el ancho del ala de la columna. El AISC 341 establece que en caso de que existan dos vigas conectadas a la columna el espesor de las placas de continuidad debe ser igual o mayor al espesor de las vigas, por otra parte, si hay una viga conectada debe ser al menos igual a la mitad del espesor de la viga conectada exceptuando los siguientes casos (Bruneau, 2011).

$$t_{cf} \geq 0.4 \sqrt{1.8b_{bf} t_{bf} \frac{F_{yb} R_{yb}}{F_{yc} R_{yc}}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$t_{cf} \geq \frac{b_{bf}}{6} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde R_{yb} y R_{yc} las relaciones entre el esfuerzo de fluencia esperado y el esfuerzo de fluencia mínimo en la viga y columna que forman parte de la conexión, sin embargo, puede que se tenga que utilizar otros criterios o requisitos, indicados para conexiones precalificadas o por las pruebas de calificación (Bruneau, 2011).

La presión ejercida por el patín de la viga sobre columna puede generar la fluencia del alma de la columna, esto se debe evitar, la fluencia en el alma puede estimarse con la ecuación tradicional de aplastamiento (Bruneau, 2011):

$$B_r = (5k + N) t_{cw} F_{yw} = (5k + t_{bf}) t_{cw} F_{yw} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde k es la distancia desde la cara de la columna hasta la parte inferior de alma de la viga, N es la longitud de apoyo de la fuerza aplicada, F_{yw} es el límite elástico del alma de la columna y t_{bf} y t_{cw} son los espesores del alma de la viga y la columna. Por otra parte, se debe revisar la paralización de haz, que en palabras más simplistas es el efecto de una alta concentración esfuerzos entre el ala y el alma de la viga que genera un pandeo en el alma de la columna (Bruneau, 2011).

$$B_r = 0.8t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{E F_{yw} t_f}{t_w}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde B_r es el valor de la resistencia del alma a los esfuerzos aplicados longitudinalmente por el patín, esta ecuación presenta variaciones y requisitos adicionales en algunas conexiones precalificadas. Asimismo, cabe mencionar que algunos códigos de diseño sísmico no consideran el endurecimiento por deformación en el ala por ser un modo de falla frágil (Bruneau, 2011).

1.7.2. Fuerzas en la zona del panel

Las fuerzas axiales, fuerzas cortantes y los momentos transmitidos por las vigas y columnas, pueden afectar a las zonas de panel. En la figura 69 se presentan un diagrama de cuerpo libre de cómo interactúan las fuerzas con la zona panel, usando una convención de signos donde los momentos en la cara de la zona de panel son positivos, el cortante puede ser calculado con la siguiente expresión (Bruneau, 2011).

$$V_w = \frac{M_1}{0.95d_{b1}} + \frac{M_2}{0.95d_{b2}} - V_c \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde d_{b1} y d_{b2} son las longitudes del alma de las vigas conectadas a la columna $0.95 d_{b1}$ y $0.95 d_{b2}$ son aproximaciones de las fuerzas de palanca del patín de la viga resultantes de los momentos aplicados (Bruneau, 2011). Como se muestra en la figura 69 V_c es el cortante de equilibrio, su valor está dado por la siguiente expresión matemática:

$$V_c = \frac{M_1 \left(\frac{L_1}{L_{b1}} \right) + M_2 \left(\frac{L_2}{L_{b2}} \right)}{h} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde el valor de h es el promedio de los pisos encima y debajo de la conexión L_i es la distancia entre las columnas a las que está conectada la viga medida de centro a centro, mientras que L_{bi} es la longitud de la viga medida entre las caras de las columnas (Bruneau, 2011). Los análisis por computadora suelen proporcionar los cortantes de la columna en los bordes de la zona de panel, al promediar estos se puede obtener V_c :

$$V_c = \frac{V_3 + V_4}{2} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Este no es un valor exacto, más bien es un menor al real y por ser menor genera valores más altos de V_w lo que es más conservador (Bruneau, 2011). De las ecuaciones anteriores se reconoce que la condición de carga crítica en la zona de panel se da debido a un fuerte momento desequilibrado que genera una viga conectada a dos columnas (Bruneau, 2011).

Cuando las zonas de panel de las columnas interiores están sujetas a altos esfuerzos cortantes y estas columnas están involucradas en el mecanismo de colapso por balanceo del marco, las vigas conectadas a las columnas alcanzan su momento plástico. De manera que el cortante en la zona panel mucho más alto que el de las columnas o vigas adyacentes, en este caso se podría llegar a generar la cedencia en la zona panel. El cortante V_w depende solo de los momentos M_1 y M_2 , ya que el momento desequilibrado es igual a $\Delta M = M_1 + M_2$ y este controla la demanda de fuerza en la zona del panel. Según las normas AISC 341 Y AISC 358 el cortante en la zona de panel debe ser calculado con los momentos presentes en la cara de la columna, y el momento plástico que desarrolle la viga con el efecto de endurecimiento por deformación de la rótula plástica. Por lo que la capacidad que debe de tener la zona de panel se evalúa independientemente del comportamiento final previsto (Bruneau, 2011).

Durante muchos años se han realizado pruebas de especímenes a gran escala mediante las cuales se descubrió el dominio de las distorsiones de corte en el comportamiento del panel, con

ayuda de técnicas fotogramétricas se capturó visualmente este fenómeno, pudiendo observar fácilmente las grandes distorsiones generadas por los esfuerzos de corte en los especímenes (Bruneau, 2011). Véase en más detalle en la figura 70.

Estos estudios también demostraron que un diseño adecuado que evite el aplastamiento y deformación excesiva de la sección del alma de la columna que conforma la zona de panel puede contribuir con una gran disipación de energía histórica en cortante, y altas deformaciones inelásticas (Bruneau, 2011). Los resultados de las pruebas cíclicas que estudian las zonas de panel suelen representarse gráficamente mediante diagramas de histéresis de el desbalance de momentos generado por la viga ($\Delta M = M_1 + M_2$) versus las distorsiones de en la zona de panel γ_p . Véase el efecto de distorsión en la zona panel en la figura 71.

Al analizar detalladamente los diagramas de histéresis se puede observar una resistencia adicional debido a las deformaciones plásticas y las curvas del endurecimiento por deformación, a medida que incrementan los esfuerzos cortantes, la zona de panel estará sujeta a un complejo estado de tensión. Usualmente la fluencia se da inicialmente en la parte central de la zona de panel, continua de forma radial. Esto genera una mayor distorsión en el centro de la zona de panel que en las esquinas que es menor (Bruneau, 2011).

En el momento que la parte del alma de la columna que conforma la zona panel entra completamente en fluencia, la rigidez estará dada por la relación de aspecto del panel d_c/d_b , la rigidez de los miembros conectados, así como las alas y almas de las vigas y columnas, el endurecimiento por deformación de la zona de panel, estos factores producen una gran rigidez después de la fluencia generada por las cargas cíclicas. La carga axial ejercida sobre la columna también genera un gran efecto en la zona de panel, debido a que la tensión axial causa la fluencia por cortante en la zona de panel de forma anticipada, según el criterio de fluencia de Von Mises, sin embargo, las pruebas experimentales han indicado que la resistencia última al esfuerzo cortante en la zona de panel, no se ve significativamente reducida por el efecto de las cargas axiales en la columna. En parte porque cuando el panel cede por las fuerzas cortantes las alas de la columna transfieren la carga axial, de manera que se da una distribución de esfuerzos donde las alas aportan resistencia durante la fluencia de la zona de panel, siempre que las alas se mantengan en el rango elástico, porque en caso de desarrollar grandes deformaciones plásticas por las fuerzas cortantes y desarrollar su capacidad plástica, sujeta a fuerza axial y flexión de forma simultánea, cuando la columna es sometida a estas condiciones sufrirá grandes torceduras

en las alas, incrementando los esfuerzos y deformaciones en la soldadura hasta una posible fractura en la unión. Por esta razón algunos investigadores recomiendan que la distorsión de corte máxima permitida en la zona de panel γ_{\max} , sea menor a cuatro veces la distorsión de fluencia de corte γ_y (Bruneau, 2011).

1.7.3. Modelo del comportamiento de la zona del panel

Generar un modelo simple que represente el complejo comportamiento de la zona de panel es muy difícil, ya que se suele tener una gran variación en diferentes especímenes, por eso para comprender mejor el comportamiento, es necesario utilizar un modelo que simplifique este fenómeno, a pesar de que con este modelo se pierda significativamente la precisión del modelado de las condiciones de contorno, véase en la siguiente figura 72 el modelo simplificado consiste en un alma de columna elástica perfectamente plástica rodeada por cuatro lados rígidos conectados por resortes en las esquinas. Los resortes brindan una representación del efecto de las alas de la columna sobre la zona de panel, a su vez desprecia otros efectos (Bruneau, 2011). En el rango elástico, la rigidez de la zona del panel puede estimarse de forma aproximada mediante la siguiente expresión:

$$K_e = \frac{V}{\gamma} = \frac{1}{\frac{1}{0.95d_c t_{cw} G} + \frac{d_b^2}{24EI_{cf}}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde E es el módulo de elasticidad, G es el módulo de cortante, t_{cw} es el espesor del alma de la columna, I_{cf} es el momento de inercia del ala de una sola columna (Bruneau, 2011). Considerando que el ala de la columna normalmente solo aporta el 10% de la rigidez se ignora el segundo término en el denominador, obteniéndose la siguiente expresión:

$$K_e = \frac{V}{\gamma} = 0.95d_c t_{cw} G \quad (\text{Ecuación 15})$$

Para el rango plástico se considera que la rigidez a cortante en la zona de panel es cero, y la rigidez del resorte se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_s = \frac{M}{\theta} = \frac{Eb_c t_{cf}^2}{10} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde b_c es el ancho y t_{cf} es el espesor del ala de la columna, θ es la rotación concentrada del resorte, K_s no puede explicarse mediante modelos simples, esta ecuación fue obtenida mediante un análisis de elementos finitos (Bruneau, 2011). La rigidez del panel en estado de fluencia se expresa de la siguiente forma:

$$K_t = \frac{V}{\gamma} = \left[\frac{4M}{0.95d_b} \right] \frac{1}{\gamma} = \left[\frac{4}{0.95d_b} \right] \frac{M}{\theta} = \frac{1.095b_c t_{cf}^2 G}{d_b} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Considerando el equilibrio estático en la zona de panel y que γ es igual a θ en este caso, la ecuación es aplicable en el rango $\gamma_y < \gamma < 4\gamma_y$, donde γ_y es la distorsión de fluencia cortante (Bruneau, 2011). Teniendo en cuenta esto, se puede calcular la resistencia al corte del panel cuando alcanza un ángulo de distorsión de e $4\gamma_y$ mediante la siguiente expresión:

$$V_u = K_e \gamma_y + 3K_t \gamma_y = V_y \left(1 + 3 \frac{K_t}{K_e} \right) = 0.55F_y d_c t_{cw} \left(1 + \frac{3.45b_c t_{cf}^2 G}{d_b d_c t_{cw}} \right) \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde la relación entre paréntesis representa el aumento en la resistencia al corte de la zona del panel por el criterio de Von Mises. Las columnas con grandes alas tienen una mayor resistencia (Bruneau, 2011).

1.7.4. Diseño de Zona de Paneles

Mediante pruebas experimentales y observaciones tras eventos sísmicos se observó que la fluencia de la zona de panel por esfuerzos cortantes junto con la fluencia en la rótula plástica de la viga generaba una gran disipación de energía en comparación, con los casos donde la zona de panel se mantenía en el rango elástico, cuando la zona de panel no cede es necesaria una mayor rotación plástica de la viga para alcanzar las mismas derivas de entrepiso, de manera que las vigas son sometidas a un mayor pandeo inelástico y pandeo lateral torsional que desarrolla grandes deformaciones histeréticas de flexión. Algunos estudios también demostraron que las deformaciones inelásticas en una zona de panel bien diseñada presentan un buen comportamiento sísmico, porque no hay degradación de resistencia en la zona de panel por el comportamiento cíclico de los esfuerzos cortantes. No obstante, las grandes distorsiones en las zonas de panel pueden tener un efecto negativo en el comportamiento de las conexiones viga-columna. Encontrar un equilibrio entre la zona de panel y el límite elástico de las vigas es muy difícil por las variaciones que existen en el límite elástico de la zona de panel. Debido a esto, la resistencia al cortante para la zona mostrada anteriormente solo puede ser utilizada en la resistencia necesarias para resistir el desarrollo de la rótula plástica en la viga como indica la norma AISC 341, cuando se considera la flexibilidad de la zona de panel en el análisis según lo indica la norma AISC 360 (Bruneau, 2011).

Sin embargo, la ecuación 14 no puede utilizarse cuando los patines de las vigas están directamente conectadas a los patines de las columnas, debido al riesgo de que se inicien y

propaguen grietas en esa ubicación por el efecto de las grandes distorsiones de corte del panel, en este caso debe utilizarse la siguiente expresión, cabe mencionar que existen variables de la misma y requisitos adicionales para algunas conexiones precalificadas (Bruneau, 2011).

$$V_u = 0.60F_y d_c t_w \left(1 + \frac{3b_{cf} t_{cf}^2}{d_b d_c t_w} \right) \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$V_u = 0.55F_y d_c t_w \left(1 + \frac{3b_{cf} t_{cf}^2}{d_b d_c t_w} \right) \leq 0.66F_y d_c t_w \quad (\text{Ecuación 20})$$

Los límites de esbeltes generalmente utilizados por los códigos de diseño sísmico, indican que el espesor de la zona de panel debe ser al menos (Bruneau, 2011):

$$t_z \geq \frac{d_z + w_z}{90} \quad (\text{Ecuación 21})$$

1.8. Ensayos cíclicos para conexiones de acero en estructuras

Los experimentos con especímenes físicos, buscan recrear con el máximo realismo las condiciones de la vida real, para desarrollar, aumentar o confirmar modelos analíticos para establecer pautas que contribuyan al desarrollo de estructuras sismorresistentes seguras, asimismo buscan extender la comprensión del comportamiento de las estructuras ante perturbaciones sísmicas y su desempeño. Lo que implica determinar características como la resistencia, rigidez, endurecimiento cíclico, ablandamiento, deterioro, falla y modo de comportarse. Los modos de comportamiento en las conexiones pueden incluir, pandeo local del ala, distorsión por cortante de la unión y pandeo de las barras (Krawinkler, 1992).

En estas evaluaciones se deben considerar las condiciones de contorno, de fabricación y de carga, también es imprescindible evaluar las propiedades mecánicas de los materiales que componen el espécimen. Al menos se debe determinar las resistencias a la fluencia y a la tracción, trazado de diagrama tensión-deformación por tracción hasta la fractura según norma E8 de ASTM, es recomendable también realizar la prueba de material cíclica la Norma ASTM E606, con los ciclos de amplitud de deformación e incrementos, indicados por la norma del protocolo cargas o bien la norma ATC 24: 1992, pruebas de fatiga y fractura de ciclo bajo del material descrita en la norma ASTM E606 o (ASTM E1150, E466, E647, E813, E23, E399 y E561) (Krawinkler, 1992).

En las pruebas de carga cíclica, cíclico implica que la cantidad de "fuerza" utilizada para monitorear la prueba invierte el signo en excursiones posteriores. La selección el historial de cargas cíclicas y la metodología de la prueba se basa en el propósito del experimento, el tipo de muestra que se está probando y el tipo de modo de falla anticipado, como el deterioro rápido o lento de la resistencia, o el pandeo del miembro. Las pruebas se deben realizar bajo un parámetro de control que puede ser de fuerza, deformación o rotación, se suele usar el parámetro de fuerza para determinar el historial de carga determinado la fuerza de fluencia Q_y (mediante una prueba monotónica), para predecir la deformación de fluencia δ_y y la rigidez elástica K_e , como se muestra en la figura 73. Por otra parte, el parámetro de deformación es utilizado en la ejecución de la prueba debido a su relación con los parámetros de la deriva de piso. Del producto de ambos parámetros de control fuerza y deformación se obtiene un término de energía es decir fuerza por longitud (Krawinkler, 1992).

La historia se segmenta en pasos, donde la deformación máxima de cada paso, representada por δ_j , se establece como un valor predefinido del parámetro de control de "deformación" (Krawinkler, 1992). De esta manera, el historial de carga está determinado por los siguientes parámetros:

δ_j la deformación máxima en el paso de carga j (o la fuerza σ correspondiente, si se usa control de fuerza en el rango elástico)

n_j el número de ciclos a realizar en el paso de carga j

m el número total de pasos de carga a realizar con deformaciones máximas iguales o superiores a la deformación de fluencia

Δ el incremento en la deformación máxima entre dos pasos consecutivos.

Las excursiones, ciclos y pasos de carga son componentes fundamentales en un experimento cíclico. Cada paso de carga consta de uno o más ciclos, los cuales involucran deformaciones máximas o cargas, ya sea positivas y negativas predefinidas. Cada ciclo, a su vez, se compone de una excursión positiva y una excursión negativa. Es importante resaltar que la unidad básica de registro es la excursión, y no un ciclo, ya que dos excursiones de un ciclo pueden presentar características muy diferentes. Además, un ciclo no siempre constituye una unidad cerrada. En la figura 74 proporcionada en anexos, los ciclos están numerados secuencialmente según su ocurrencia, y las excursiones se identifican mediante el número de ciclo y un exponente que indica el signo correspondiente.

El concepto "rangos de deformación" se utiliza para describir las variaciones en las magnitudes de las deformaciones que ocurren dentro de las excursiones o entre los puntos máximos de las mismas. El rango de deformación total engloba tanto las deformaciones elásticas como las inelásticas que se presentan entre dos puntos máximos consecutivos en el historial de carga. Por otro lado, los rangos de deformación plástica se refieren a una excursión específica y se miden exclusivamente a lo largo del eje de carga cero.

1.9.Método de los elementos finitos fundamentos teóricos

Debido a la imposibilidad de obtener resultados exactos mediante modelos matemáticos analíticos como las ecuaciones diferenciales parciales, es necesario plantear soluciones aproximadas, como es el caso de los métodos con mallas que buscan definirse como aquellos que realizan una división del trabajo en elementos, celdas, volúmenes entre otros. Con el fin de crear aproximaciones locales. El método de los elementos finitos es un método con mallas que está orientado a la solución de problemas subdividiendo los elementos en partes de menor tamaño ya sea elementos unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales, de forma que los resultados de sus partes sean ensamblables para brindar una solución global aproximada. Es un método muy versátil y apreciado por su bajo consumo en recursos de hardware en comparación a un método analítico (Galeano, 2016).

El método de los elementos finitos es un método numérico aproximado, utilizado para resolver problemas sin solución exacta, o si es muy complejo encontrar una solución analítica, requiere de un gran esfuerzo computacional en problemas aplicados en la práctica. En este método el medio continuo se representa mediante el ensamblaje de sub-divisiones llamadas elementos finitos o medios discretos, este proceso es conocido como discretización. Asimismo, los elementos se encuentran unidos por nodos o juntas y el ensamblaje de estos se denomina malla, entre mayor sea discretización de una estructura, en elementos finitos de menor tamaño, mayor será la precisión (Zienkiewicz, 2018).

1.9.1. Matriz de rigidez

Los elementos estructurales pueden ser representados por la teoría de elementos finitos, mediante la idealización de estructuras reticulares, como es el caso del análisis estructural matricial, en donde generalmente se considera que una estructura es formada por elementos

rectos unidimensionales y elementos de área bidimensionales también llamados Shell, los cuales están conectados entre sí en sus extremos o vértices por nodos. Los elementos representan una parte de la estructura por lo que en su análisis se consideran sus propiedades mecánicas y geométricas, mientras un nodo se denomina como una parte de la estructura de tamaño infinitesimal ubicada en la conexión de los subelementos. Los métodos de análisis estructural matricial utilizan como referencia un sistema de coordenadas, este puede ser global utilizado para la estructura en general, por otra parte, el sistema de coordenadas locales es únicamente para cada elemento de una estructura, ambos utilizan coordenadas cartesianas tridimensionales utilizando valores (X, Y, Z) . Los grados de libertad de una estructura representan las rotaciones y desplazamientos en los nodos generadas por una carga arbitraria (Kassimali, 2015).

Los métodos matriciales se basan principalmente en las relaciones de equilibrio, compatibilidad, las relaciones de esfuerzo deformación, expresadas mediante ecuaciones matriciales. Por ejemplo, en el caso del método de rigidez, se utiliza un sistema de coordenadas, luego se definen los grados de libertad de la estructura de forma matricial, así como las propiedades de los elementos y las cargas expresadas matricialmente. Para determinar los desplazamientos mediante el uso de las relaciones de rigidez y posteriormente, determinar las fuerzas y los momentos con los desplazamientos obtenidos, por medio de las relaciones fuerza-desplazamiento (Kassimali, 2015). En el análisis tridimensional los métodos matriciales de elementos finitos son aplicados en la misma secuencia, la forma más simple para un sólido tridimensional es un sólido tetraédrico con cuatro nodos, sin embargo, estos pueden adoptar numerosas formas por ejemplo pentaedros, hexaedros, entre otros. Debido al incremento cantidad de nodos y por ende de grados de libertad la cantidad de recursos computacionales necesaria para su solución es considerablemente mayor. El esfuerzo y las deformaciones entre los subelementos puede ser determinado de forma aproximada por medio de interpolaciones haciendo uso de métodos numéricos (Zienkiewicz, 2018)

1.9.2. Métodos numéricos para ecuaciones no lineales

Los sistemas de ecuaciones expresados de forma matricial no son necesariamente lineales, como quizás si lo pueda ser para el análisis pórticos en el rango elástico, en el caso de los sólidos deformados inelásticamente por cargas cíclicas es necesario estudiar un comportamiento no lineal, para poder resolver sistemas de ecuaciones no lineales debe emplearse

métodos numéricos. Los métodos numéricos forman parte de un área de estudio denominada matemática aplicada. Los métodos numéricos se dividen principalmente en 3 tipos: Métodos Incrementales, Métodos Iterativos, Métodos de Longitud de Arco, muchos programas de simulación por elementos finitos utilizan estos métodos, incluyendo ANSYS (Bazzano 2017).

Los métodos incrementales. Estos son métodos numéricos utilizados para encontrar la solución de una ecuación diferencial ordinaria, considerando que las trayectorias se pueden parametrizar, establece una ecuación diferencial con condiciones iniciales que puede ser resuelta mediante métodos numéricos, como lo es el método de Euler hacia adelante (Bazzano 2017).

Métodos iterativos. La idea principal de los métodos iterativos es fijar el valor de un parámetro para encontrar un vector que constantemente es evaluado por medio de las entradas del vector, el método consiste en iterar mediante alguna regla hasta obtener convergencia, verificando que el margen de error satisface la tolerancia definida. Entre estos tipos de métodos numéricos se encuentra el Método Newton Raphson, Método de Newton-Raphson Modificado y el Métodos Cuasi-Newton (Bazzano 2017).

Métodos de Longitud de Arco (Arc-Length). Este tipo de métodos fueron desarrollados inicialmente en el área del análisis estructural. Su importancia sobre los métodos expuestos anteriormente radica en su capacidad para resolver ecuaciones no lineales en problemas en los que otros métodos numéricos no pueden converger o encontrar una solución. Por esto presentan una ventaja fundamental desde una perspectiva estructural, ya que permite resolver problemas que no es posible resolver con una matriz tangente. Siendo de gran utilidad para el análisis de fallas dúctiles y frágiles, en la simulación de comportamientos elásticos completamente plástico y estimar el esfuerzo máximo en un elemento entre otros aspectos. Ha sido empleado en muchos programas de simulación por el método de los elementos finitos como ANSYS, ABAQUS y ADINA entre otros programas. Este método genera el espaciado de puntos en función del arco de una curva paramétrica arbitraria, utiliza la magnitud de carga como una incógnita adicional, resuelve de forma simultánea cargas y desplazamientos, utilizando la longitud de arco de la trayectoria en el espacio carga y descarga para medir el progreso de la solución (Bazzano 2017).

1.10. Criterios Tensión plana y triaxial

La tensión plana hace referencia a un medio continuo al que solamente se le aplica esfuerzos en dos direcciones perpendiculares entre sí, es decir que el esfuerzo perpendicular a

estas dos direcciones es igual a cero. Mientras en la tensión triaxial un cuerpo está sujeto a esfuerzos en tres direcciones perpendiculares. En un estado tensional triple que las tensiones principales son $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, para definir las condiciones de estado tensional en las que produzca un estado límite es necesario recurrir a la tensión equivalente σ_{equiv} , para determinar su valor existen numerosos criterios de resistencia (Ortiz, 2007). El estrés equivalente simplifica la interpretación de los resultados combinando complejos estados de tensión y mostrándolos como un estrés equivalente en forma de índice o valor escalar.

1.10.1. Criterio de Tresca

Este criterio establece que cuando la tensión tangencial máxima en un sólido sometido a un estado tensional llegue a ser igual al de la tensión límite en una prueba uniaxial se alcanza el estado de tensión límite, es decir que cuando la tensión límite coincida con el límite plástico,

$$\tau_{\text{max}} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} = \frac{\sigma_u}{2} \quad (\text{Ecuación 22})$$

véase en la siguiente ecuación.

En caso de materiales dúctiles la tensión límite puede ser igual al límite elástico, es decir que la tensión tangencial de fluencia sería menor a la mitad del valor de la tensión de fluencia en una prueba uniaxial (Ortiz, 2007).

1.10.2. Criterio de Von Mises

También conocido como criterio de la máxima energía de distorsión, en este se determina la energía de distorsión de un material, asociándola con una deformación. Según este criterio la energía máxima de distorsión por unidad de volumen siempre será menor que la necesaria para que el material en una prueba a tracción entre en fluencia. (Beer, 2020). Este criterio es comúnmente utilizado en materiales dúctiles y es de gran utilidad en la determinación de rendimiento en los materiales, para conocer cuando rendirá un material según el valor máximo de tensión de Von Mises en comparativa con el límite elástico o la resistencia final, siendo además un valor práctico y funcional en la compresión del rendimiento de cuerpos con cargas complejas. (Thompson, 2023). Este se puede calcular con las tensiones principales a partir de la siguiente expresión.

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2 - \sigma_3)^2 + \sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Capítulo II. Marco Metodológico

a. Paradigma, enfoque metodológico y métodos de investigación

Las conexiones juegan un papel importante en la resistencia sísmica, deben ser estudiadas y diseñadas cuidadosamente para que sean capaces de soportar las rotaciones inelásticas de las articulaciones y la deriva que puede resultar durante un terremoto.

Esta investigación tiene el objeto de evaluar la capacidad de los programas ANSYS de simular el efecto panel mediante el método de los elementos finitos, así como evaluar el desempeño de la conexión estudiada sujeta a cargas cíclicas, para ello es necesario obtener ángulos de giro, deformaciones y esfuerzos que son representados mediante valores numéricos, que deben ser recolectados de los resultados de la simulación virtual y analizados con criterios científicos fundamentados en la mecánica de medios continuos.

Por lo que según Hernández Sampieri esta investigación tiene un enfoque cuantitativo no cualitativo debido que recolecta datos numéricos para probar teorías o reconocer patrones de comportamiento de un fenómeno, sin embargo, difiere únicamente de la terminología presentada por Hernández Sampieri en que esta investigación no pretende realizar ningún análisis estadístico (Hernández, 2014).

Se usará un método experimental en el sentido de que se manipularán variables independientes como es el caso de los parámetros físicos del modelo generando una causa o efecto en las variables dependientes entiéndase como la respuesta o resultados del modelo virtual.

b. Categorías de análisis de la investigación

En la tabla se presentan las variables de la investigación.

Tabla 1
Relaciones de variables

Variables	Variable Independiente	Herramientas A Utilizar	Variable Dependiente
Obtener diagramas de histéresis, mediante simulación realizada por el método de los elementos finitos con el programa ANSYS.	Modelado de conexión por el método de elementos finitos	ANSYS WorkBench	Diagrama de histéresis representativo conformado los valores de desplazamiento y la fuerza de reacción en la viga.
Examinar el comportamiento histerético de la conexión evaluada mediante la simulación virtual comprobando si es semejante al medido en la prueba experimental.	Comparar equivalencia en diagramas de histéresis obtenidos en simulación con experimentales	Artículo denominado “Seismic performance of fillet welds in moment resisting connections”	Similitud en forma de los bucles del diagrama, valores resistencia de la conexión-
Evaluar la naturaleza de las deformaciones elástica e inelástica y los patrones de esfuerzo.	Revisar deformaciones y esfuerzos	Curvas de esfuerzo deformación, esfuerzo ultimo.	Identificar la ubicación e instantes en que se presente la ruptura, indicando puntos débiles.
Demostrar si la conexión tiene la capacidad, para cumplir con los criterios de deformación y ángulo deriva de una conexión para marcos intermedios resistentes a momento.	Revisar ángulos de deriva y resistencia a flexión.	Norma AISC/ANSI 341-16	Capacidad de rotar manteniendo una resistencia a la flexión de al menos el 80% del momento probable.
Determinar si programa ANSYS es capaz de simular el efecto de la zona panel.	Comparar deformaciones, rotaciones y esfuerzos de simulación con prueba experimental	Artículo denominado “Seismic performance of fillet welds in moment resisting connections”	Similitud en efecto de esfuerzos cortantes y de momento en simulación con prueba experimental

Fuete: Propia

Se estudia únicamente un tipo de conexión formada por perfiles W, y unida por medio de soldadura tipo filete en ambos lados de las alas y el alma, para evaluar la capacidad del programa comparando los resultados obtenidos en la simulación con los presentados en la prueba

experimental de laboratorio del artículo utilizado como referencia. Además, se determinará el desempeño general de la conexión, el desempeño de la soldadura filete con imperfecciones y el efecto panel.

El diseño, las dimensiones de los especímenes, así como las propiedades mecánicas de los materiales de las conexiones modeladas serán iguales a los utilizados por Woerner, Short y Ferguson en su investigación denominada *Seismic Reformance of Fillet Welds in Moment Resisting Connections* en la cual realizaron pruebas experimentales con el objetivo de evaluar el desempeño de la soldadura con imperfecciones y un espécimen adicional presentado la investigación titulada “*Improved welded connections for earthquake loading*” realizada por Scholz. En la calibración de los materiales en el modelo virtual, se usan valores parcialmente teóricos de las curvas de endurecimiento de los aceros, así como en otras propiedades mecánicas no determinadas. Posteriormente se modela el mallado, se definen los parámetros del modelo, las cargas monotónicas y se procesa mediante un software computacional.

c. Población y muestra, Técnicas de muestreo

La población de estudio y muestras en este estudio están limitadas por los especímenes estudiados, que serán los presentados por Woerner en su investigación, son 5 muestras en total denominadas T22, T27, T28, T29 y T30 de los cuales se tienen resultados experimentales y un espécimen adicional llamado MRC-2 de la investigación de Wolfgang Scholz. En todos los especímenes de la investigación de Woerner se utilizaron perfiles UB equivalentes entre sí, de igual forma las propiedades mecánicas de las secciones son equivalentes, sin embargo, poseen variaciones en el diseño de las imperfecciones en la soldadura, el tipo de soldadura utilizada, así como las dimensiones de la garganta efectiva de la soldadura de filete, mientras el modelo MRC-2 se diferencia por tener una columna diferente, no contar imperfecciones y haber sido evaluado con un protocolo de desplazamiento ligeramente modificado.

d. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Inicialmente se debe tener bien definidas las características físicas y mecánicas de las conexiones según lo indicado en la investigación de Woerner, el estudio Wolfgang Scholz y las normas referentes a esta investigación, como lo es por ejemplo la norma AS/NZS 3679.1: 1996 que define las dimensiones de los perfiles utilizados, una vez definidas las características de los especímenes y las cargas bajo las que estará sujeta la conexión durante la simulación, debe modelarse, definir las propiedades y el entorno, discretizar el modelo y asignar las cargas,

obtención y análisis de resultados. Para estos pasos se hará uso de múltiples referencias bibliográficas tanto primarias como secundarias, que contribuyan a la comprensión y clasificación de los fenómenos físicos estudiados, así como una correcta gestión de los programas utilizados, asimismo se realizan consultas a expertos en los tópicos de interés.

e. Técnicas e instrumentación para el procesamiento y análisis de los datos

La simulación se realizará utilizando el programa de elementos finitos ANSYS Workbench, las simulaciones de elementos finitos tridimensionales que recrean problemas prácticos o reales requieren de una alta capacidad computacional, cuanto más pequeños sean subelementos discretizados mayor será la precisión de los resultados aproximados que puedan obtenerse, por ello se utilizará una máquina virtual de Microsoft Azure. En esta máquina virtual se instala el software ANSYS.

Los resultados obtenidos en la simulación primeramente se comparan con los obtenidos experimentalmente por Woerner y los presentados en la investigación de Wolfgang Scholz para determinar si la simulación es equivalente de ser satisfactoria se proporcionará una interpretación de las capacidades, comportamiento y aplicabilidad de la conexión. Esto debido a que las simulaciones por elementos finitos no producen resultados exactos, por lo que sus resultados son aproximaciones. Se obtendrán los esfuerzos equivalentes según la teoría de fallo aplicada y las deformaciones, especialmente en zonas de interés como lo son la articulación plástica, regiones de soldadura y la zona de panel.

f. Pre-procesamiento: preparación de modelo de elementos finitos

Posterior a la planificación inicial del modelo de los elementos finitos, se procede con el desarrollo del modelo mediante las siguientes etapas:

Construcción geométrica de la conexión

La conexión está formada por una columna con sección W y una viga sección W, unidas mediante soldadura tipo filete alrededor de la superficie en contacto entre la viga y la columna, la conexión también tiene placas de continuidad. Las dimensiones de la columna 460 UB 74 y la viga 410 UB 54 utilizadas por Woerner, fabricados según las dimensiones especificadas en AS/NZS 3679.1: 1996, se muestran a continuación en la tabla 2 y 3, mientras que en la investigación de Wolfgang Scholz se utilizó una columna formada por un perfil 460 UB 67 las dimensiones de esta se presentan en la tabla 4 y utilizó la misma sección como viga que Woerner, véase la simbología de las dimensiones en la figura 75 en anexos.

Tabla 2*Dimensiones de la sección 460 UB 74 utilizada como columna*

Columna 460 UB 74						
Geometría						
t_f (mm)	t_w (mm)	d (mm)	d₁ (mm)	b_f (mm)	R₁ (mm)	A (mm²)
14,5	9,1	457,4	428,4	190	11,4	9520

Tabla 3*Dimensiones de la sección utilizada como viga*

Columna 460 UB 74						
Geometría						
t_f (mm)	t_w (mm)	d (mm)	d₁ (mm)	b_f (mm)	R₁ (mm)	A (mm²)
10,9	7,6	402,6	380,8	178	11,4	6890

Tabla 4*Dimensiones de la sección utilizada como columna en el espécimen MRC-2*

Columna 460 UB 74						
Geometría						
t_f (mm)	t_w (mm)	d (mm)	d₁ (mm)	b_f (mm)	R₁ (mm)	A (mm²)
10,9	7,6	402,6	380,8	178	11,4	6890

Las dimensiones de la soldadura modeladas y las características de las imperfecciones son iguales a las medidas en los especímenes de la prueba experimental. La columna tiene una altura de 2442 mm de extremo a extremo y la viga tiene 1600 mm de la cara de la columna a el actuador que genera las cargas cíclicas. Véase en anexos la figura 76 un esquema del modelo, en la figura 77 un esquema de la ubicación de las imperfecciones de la soldadura, en las figuras 78 y 79 se presentan fotografías de las imperfecciones, los tamaños de las imperfecciones y sus dimensiones presentan en la tabla 5 y 6. Las imperfecciones van del 2.5% al 10%, la norma AWS D1.1, establecen que en cualquier caso la máxima imperfección permitida es del 10% (American Welding Society, 2022). Las soldaduras que conectan la viga y la columna se dimensionan usando el método de componentes de tensión (Woerner, 2006). La fórmula para determinar el tamaño de la soldadura de filete se detalla en otra fuente (Short ,2004), junto con un análisis completo sobre el diseño de la soldadura del alma de la viga. El cálculo del tamaño de la soldadura de filete en los patines fue realizado con la siguiente ecuación:

$$t_t \geq \frac{\sqrt{2}\phi_{oms}b_f t_{fb} f_y}{\sqrt{3}\phi 0.6 f_{uw} L_w} \quad (\text{Ecuación 24})$$

Donde

ϕ_{oms} = factor de sobre resistencia según NZS 3404. Por el material empleado = 1,25.

$\phi = 0.8$ para soldadura de filete categoría SP.

t_t = Espesor de garganta de diseño $t_w/\sqrt{2}$

b_f = ancho del ala de la viga

t_{fb} = espesor del ala de la viga = 10,9 mm

t_{wb} = espesor twb del alma de la viga = 7,6 mm

f_{uw} = la resistencia a la tracción nominal del metal de soldadura = 480 MPa

f_y = límite elástico nominal del material de la viga entrante = 310 MPa

L_w = longitud de la soldadura = $2b_f - t_{wb}$.

Tabla 5

Tamaños de soldadura

Muestra	Soldadura del ala de la viga al ala de la columna		Soldadura del alma de la viga al ala de la columna	
	Diseño	Medida	Diseño	Medida
	t_{if} (mm)	t_{if} (mm)	t_{if} (mm)	t_{if} (mm)
T22	8,0	8,8 ± 0,8	4,7	5,0 ± 0,0
T27	8,0	9,3 ± 0,6	4,7	5,0 ± 0,0
T28	8,0	8,6 ± 1,3	4,7	5,0 ± 0,0
T29	8,0	8,7 ± 0,4	4,7	5,0 ± 0,0
T30	8,0	8,6 ± 0,5	4,7	4,8 ± 0,4
MRC-2	6,0	10 ± -	-	No det.

Tabla 6

Dimensiones de las imperfecciones

Muestra	Imperfección diseñada		Dimensiones medidas			
	(%)	(mm)	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄
T22	5	17,8	No det.	18,5	2,5	18
T27	2,5	8,9	No det.	8,5	0	8
T28	2,5	8,9	91	10	-2	9
T29	5	17,8	86	17,5	0	21
T30	10	35,6	73	36	-7	35

Propiedades mecánicas de los materiales

La columna y la viga utilizada fue fabricada con la especificación AS 3679.1-300 para todos los especímenes, en la investigación de Woerner se utilizaron dos tipos de soldadura para los especímenes T22, T27 y T28 se soldó con el proceso GMAW con electrodos E70s-6 mientras que para los especímenes T29 y T30 se usó el proceso MMAW con electrodos E6013, el artículo indica el límite de fluencia, esfuerzo último, tenacidad. Se usarán valores teóricos para los parámetros no especificados en el artículo necesarios para la simulación. Es el caso de la curva de endurecimiento de los aceros, parámetros de Johnson Cook y parámetros de falla por deformación, las propiedades mecánicas tomadas del modelo real por Woerner se muestran en las siguientes Tablas 7 y 8, debido a que no se cuenta con las curvas de esfuerzo - deformación de los materiales, se utilizan las curvas de esfuerzo deformación obtenidas del software SAP2000, y ajustadas con el límite fluencia y esfuerzo último registrado en la prueba experimental, del mismo modo para la investigación de Wolfgang Scholz se utilizó un acero grado 300 y se utilizó una soldadura MMAW EN 499 E35 las curvas de endurecimiento de estos materiales basadas en comentarios de la investigación y valores teóricos de SAP2000.

Tabla 7

Propiedades mecánicas de viga y columna

Material	fy(MPA)	fu(MPA)	Elongación en 50 mm (%)
Beam	373	517	36
Column	329	485	27

Tabla 8

Propiedades mecánicas de soldaduras

Material	fy(MPA)	fu(MPA)	Elongación en 50 mm (%)	Valor de impacto de Charpy a 20 C(J)	Impacto de Charpy (J)
MMAW	449	487	29	110/98/110	106
GMAW	472	566	25	129/137/136	134

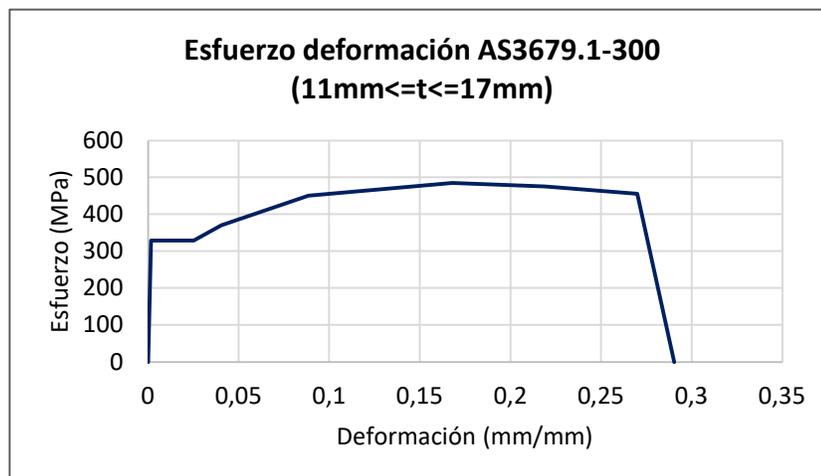
Tabla 9

Valores de esfuerzo y deformación acero columna

Columna	
Esfuerzo deformación mm/mm	Mpa
0	0
0,00160	329
0,0252	329
0,0405	370
0,0885	450
0,168	485
0,219	475
0,27	455
0,2904	0

Gráfico 1

Curva de esfuerzo deformación AS3679.1-300 en columna de especímenes T22 a T30

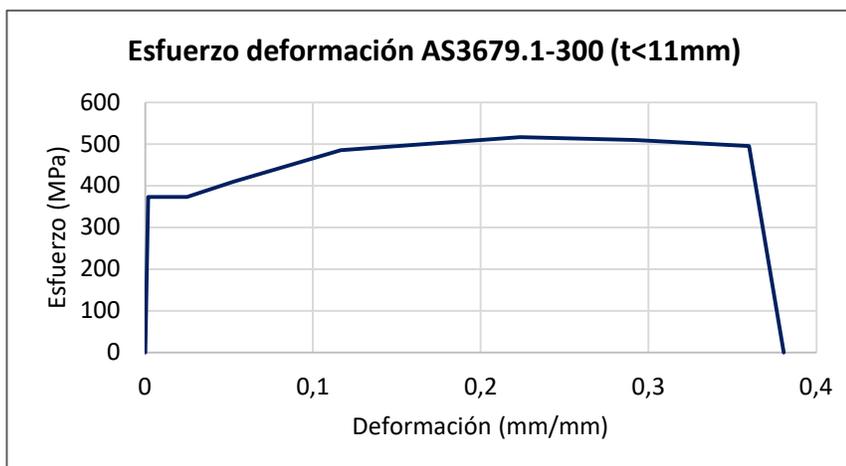
**Tabla 10**

Valores de esfuerzo y deformación acero viga

Viga	
Esfuerzo deformación mm/mm	Mpa
0	0
0,00182	373
0,025	373
0,0527	410
0,1167	485
0,2235	517
0,292	510
0,36	495
0,3805	0

Gráfico 2

Curva de esfuerzo deformación AS3679.1-300 en Viga de especímenes T22 a T30



El programa SAP2000 cuenta con curvas de esfuerzo deformación específicas de aceros AS3679.1-300, no así para soldaduras MMAW E6013, GMAW E70s-6 y MMAW EN 499 E35, por lo que para las soldaduras se utilizan las curvas de un acero grado 60 (ASTM A706 Grado 60), grado 70 (ASTM A709 Grado HPS 70W), y grado 50 (ASTM A572 Grado 50), ajustando

las curvas con los valores del límite de fluencia y esfuerzo ultimo archivado la prueba experimental.

Tabla 11

Valores de esfuerzo y deformación acero MMAW

MMAW	
Esfuerzo deformación mm/mm	Mpa
0	0
0,00225	449
0,02	449
0,045	460
0,12	475
0,24	487
0,29	111,6951

Gráfico 3

Curva de esfuerzo deformación soldadura MMAW grado 60 de especímenes T29 y T30

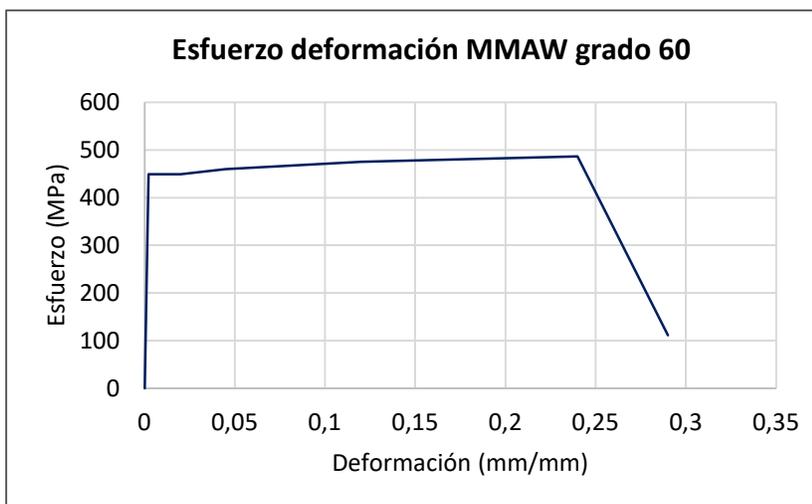


Tabla 12

Valores de esfuerzo y deformación acero GMAW

GMAW	
Esfuerzo deformación mm/mm	Mpa
0	0
0,00236	472
0,018	472
0,037	505
0,084	550
0,162	566
0,207	560
0,25	550
0,2786	0

Gráfico 4

Curva de esfuerzo deformación soldadura GMAW grado 70 de especímenes T22 a T28

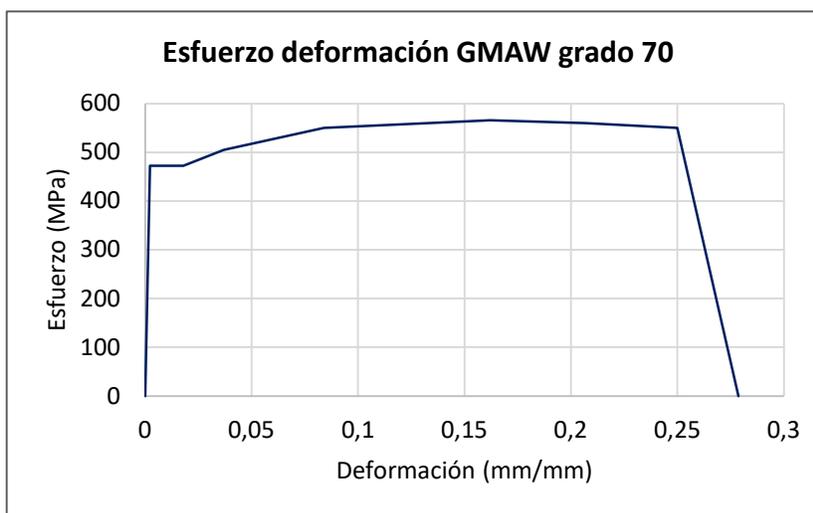


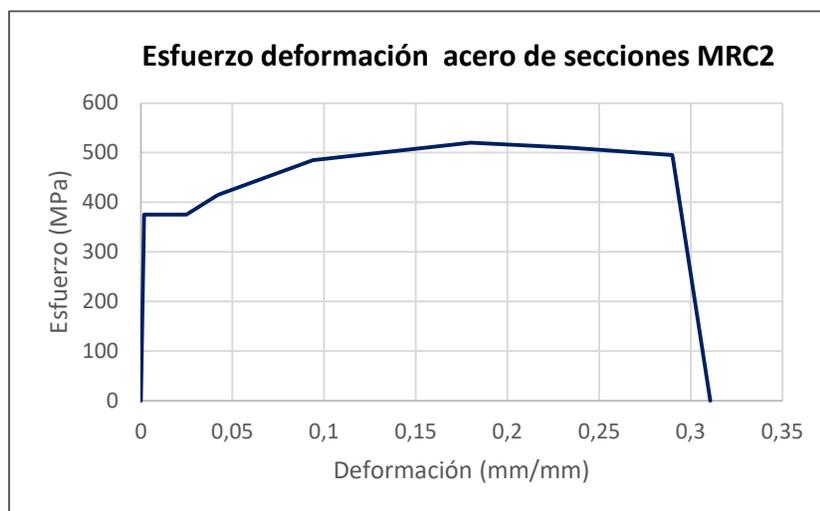
Tabla 13

Valores de esfuerzo y deformación en perfiles del espécimen MRC-2

Viga y columna MRC-2	
Esfuerzo deformación mm/mm	Mpa
0	0
0,00182	375
0,025	375
0,0422	415
0,0939	485
0,18	520
0,235	510
0,29	495
0,3105	0

Gráfico 5

Curva de esfuerzo deformación en perfiles del espécimen MRC-2

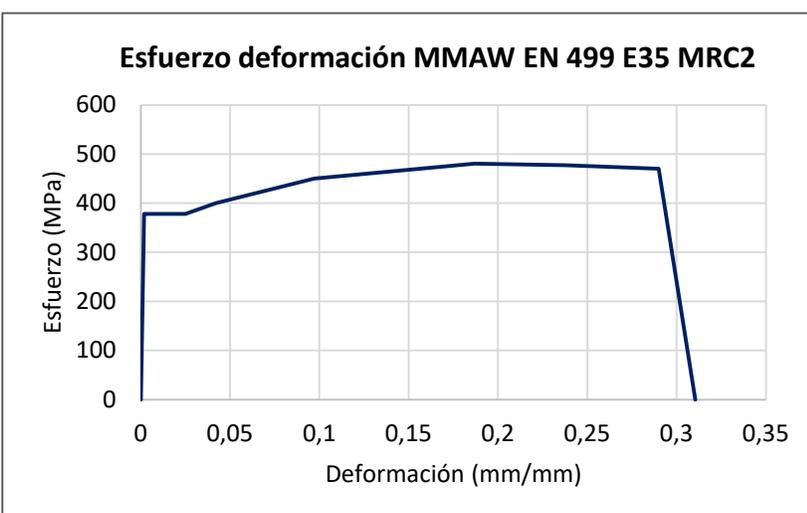
**Tabla 14**

Valores de esfuerzo y deformación Soldadura en espécimen MRC-2

MMAW MRC-2	
Esfuerzo deformación mm/mm	Mpa
0	0
0,00182	378
0,025	378
0,0422	400
0,097	450
0,187	481
0,238	477
0,29	470
0,3105	0

Gráfico 6

Curva de esfuerzo deformación soldadura GMAW grado 70 en espécimen MRC-2



Configuración de superficies en los modelos

Las superficies deben ser consideradas según su naturaleza, para esto ANSYS cuenta con condiciones de borde que representan las características físicas de los materiales en sus

superficies y como interactúan entre sí en los contactos, las condiciones de contacto pueden definirse como superficies sin fricción, con algún grado de fricción o unión. En el caso de superficie de la soldadura y los perfiles se considera que hay una unión, mientras que el contacto entre los atiesadores y los patines de la viga no hay fricción, véase en anexos la figura 80.

Definición de condiciones de frontera

Las condiciones de frontera son utilizadas para definir los apoyos del modelo, para este caso los extremos de la columna se encuentran completamente empotrados por lo que se genera esta misma fijación en el modelo, específicamente de los nodos de los elementos finitos en la superficie de sujeción, de manera que los extremos de las columnas sean inamovibles y restringidos en los 3 grados de libertad de desplazamiento y los 3 grados de libertad véase en los anexos la figura 81.

Discretización de los elementos finitos en los especímenes

En la discretización de los elementos finitos se divide un elemento en otro de menor dimensión, este proceso se denomina mallado, en ANSYS el mallado puede ser generado automáticamente o de forma manual si es necesario, es conveniente generar un mallado más detallado en las zonas donde se presentan las deformaciones y esfuerzos más altos para obtener resultados más precisos. Véase la figura 82 en anexos.

Protocolos de carga

Las cargas cíclicas que simulan el efecto generado por el actuador en la punta de la viga, se aplican con el mismo protocolo de cargas utilizado experimentalmente, el cual está basado en una guía para ensayos cíclicos de componentes estructurales denominada ATC 24: 1992.

El historial de cargas de las Directrices para ensayos sísmicos cíclicos de componentes de estructuras de acero ATC 24: 1992 recomienda usar un parámetro de control de deformación Δ , donde Δ es la deflexión de fluencia en la viga representada con δ_y , el historial de carga aumenta gradualmente cada 3 ciclos, iniciando 0.75Δ , y continuando con 1Δ , 2Δ , 3Δ , extendiendo esta última, hasta alcanzar la falla, véase en la figura 84. El valor de Δ se establece aplicando una fuerza monótona, que fue estimada basándose en el rendimiento, considerando la capacidad de momento de la sección de la viga de 386 kNm. Calculada como $Z_e f_y$, donde Z_e es el módulo de sección plástica de la sección transversal y f_y es el límite elástico real. Los investigadores cargaron al 75% del rendimiento calculado, suponiendo que la fluencia de la viga ocurriría inicialmente en la cara de la columna, debido a que la desviación es aproximadamente lineal, y

midieron el desplazamiento generado por el actuador, para posteriormente calcular el 100% de la deflexión Δ . Para todos los especímenes se utilizó un actuador capaz de aplicar los desplazamientos a una velocidad de 150 mm/s (Woerner, 2006).

Las frecuencias de carga usadas en los especímenes se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 15

Parámetros de la prueba de modelos T22-T30.

Pasos de deformación	Desplazamiento pico (mm)	Frecuencia (HZ)
1 (3 ciclos)	0.75Δ	≈ 2
2 (3 ciclos)	1Δ	$\approx 1,54$
3 (3 ciclos)	2Δ	≈ 0.76
4 (hasta la falla)	3Δ	≈ 0.51

Los valores de Δ medidos fueron los siguientes: Para T22 $\Delta= 18.8$, T27 $\Delta= 24.7$, T28 $\Delta=24.3$, T29 $\Delta=24.3$ y T30 $\Delta=24.3$.

Tabla 16

Parámetros de la prueba del modelo MRC-2.

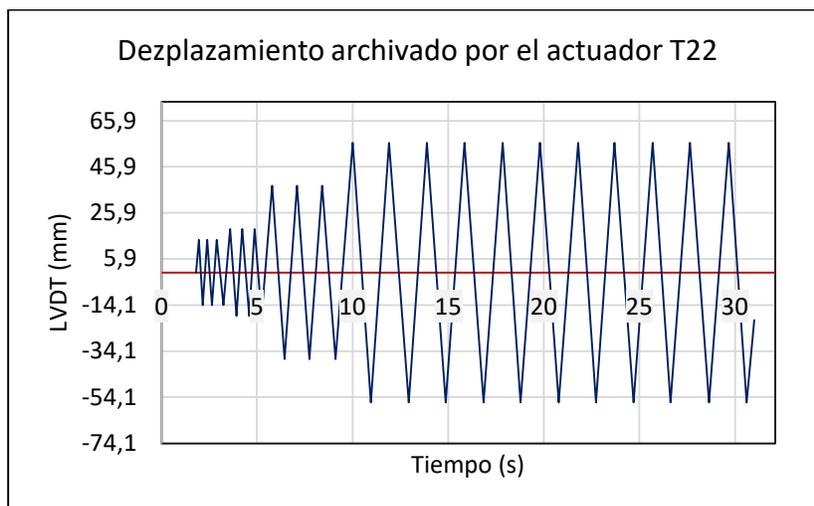
Pasos de deformación	Desplazamiento pico (mm)	Frecuencia (HZ)
1 (3 ciclos)	$\Delta \approx 18.8$	≈ 2
2 (3 ciclos)	$2\Delta \approx 37.7$	≈ 1
3 (20 ciclos)	$3\Delta \approx 56.6$	≈ 0.7
4 (hasta la falla)	$4\Delta \approx 75.2$	≈ 0.5

El espécimen MRC2 es parte de una investigación donde se estudiaron otras conexiones muy similares a esta, por esta razón el autor extendió los ciclos con una deflexión de 3Δ hasta 20 ciclos en el protocolo de cargas con el fin de diferenciar, los resultados de las otras conexiones evaluadas, además de visualizar de manera más detallada los efectos del daño acumulado (Scholz, 2000).

Véase el siguiente gráfico obtenido por Woerner presenta el registro de desplazamientos generados en la punta de la viga por el actuador en T22, véase los desplazamientos generados por el actuador en los especímenes T27, T28, T29, T30, MRC2 en los anexos como gráfico 12, gráfico 13, gráfico 14, gráfico 15 y gráfico 16 respectivamente.

Gráfico 7

Desplazamiento generado por el actuador en espécimen T22



Para una mayor comprensión del desempeño de la conexión se utilizará el protocolo de desplazamiento del AISC 341.

El protocolo para pruebas cíclicas del AISC, proporcionado en la norma de Disposiciones sísmicas para edificios de acero estructural AISC 341-16 en el capítulo K2, permite evaluar la capacidad de una conexión de adoptar ángulos de deriva sin degradar su resistencia, mediante la aplicación de desplazamientos en el extremo de la viga con un actuador hidráulico, estos desplazamientos deben generar ángulos predeterminados por el protocolo, iniciando con 0,00375 radianes e incrementando paulatinamente hasta 0.02 radianes, luego aumentara 0.01 radianes cada 2 ciclos hasta el fallo, véase en la tabla 17 el protocolo, en la figura 85 un gráfico con el historial de carga y en la figura 86 se presenta un esquema de la conexión donde se define el ángulo de deriva. Dependiendo del valor de la resistencia medida en la fuerza de reacción registrada en el actuador en determinados ángulos la conexión puede ser clasificada, como una conexión especial (SMF) para sistemas de marcos resistentes a momento, intermedia (IMF) u ordinaria (OMF). (González, 2018).

Tabla 17
Protocolo de cargas AISC 341-16

Pasos de deformación	Ángulo de deriva (rad)	Deflexión (mm)
1 (6 ciclos)	0,00375	6,8576
2 (6 ciclos)	0,005	9,1435
3 (6 ciclos)	0,0075	13,7153
4 (4 ciclos)	0,01	18,2870
5 (2 ciclos)	0,015	27,4305
6 (2 ciclos)	0,02	36,5740
7 (2 ciclos)	0,03	54,8610
8 (2 ciclos)	0,04	73,1480

En los siguientes pasos se incrementa 0.01 radianes cada dos ciclos hasta el fallo.

g. Procesamiento: Resolución de las ecuaciones del modelo de elementos finitos

El procesamiento consiste en una serie de procesos computacionales que son completamente realizados por el programa, donde se ensamblan las matrices de rigidez de los sub-elementos considerados en el análisis, asimismo se toman en cuenta todas las condiciones de frontera, acciones aplicadas y se resuelven los sistemas de ecuaciones lineales y no lineales para determinar los desplazamientos, con la finalidad de estimar valores de deformaciones y tensiones. Los sistemas ecuaciones no lineales requieren una alta capacidad de cómputo matemático.

h. Post-Procesamiento: Muestra los resultados

En esta etapa se visualizan los resultados mediante una interfaz gráfica, en la cual se pueden observar contornos generados a partir de las teorías de fallo, estos contornos pueden representar deformaciones o esfuerzos. Además de revisar si los resultados obtenidos son razonables o el modelo requiere mejoras. Véase en la figura 83 los esfuerzos representados por la teoría de fallo de Von Mises.

Capítulo III. Análisis de resultados

El objetivo de esta investigación es analizar el comportamiento de la conexión estudiada por medio simulaciones virtuales por el método de los elementos finitos para poder evaluar su desempeño, primeramente, para alcanzar este objetivo es medido analizar qué tan próximos son los resultados obtenidos por el programa ANSYS en los modelos virtuales en comparación con las pruebas experimentales realizadas por terceros, para ello se realizaron 6 simulaciones virtuales que pretenden recrear fielmente las pruebas experimentales incluyendo consideraciones de los estudios y suposiciones, estos fueron evaluados mediante el protocolo de cargas basado en la norma ATC-24 1992, posteriormente se evaluaron mediante el protocolo de cargas estándar de la norma AISC 341-16 para seguidamente examinar los resultados bajo los criterios de evaluación presentados en esta norma para conexión de Marcos Intermedios Resistentes a Momento, asimismo se presenta un breve análisis de los esfuerzos, deformaciones, fuerzas de reacción y comportamiento histerético de cada uno de los modelos.

ANSYS proporciona dos tipos de análisis muy útiles en esta clase de problemas, el método implícito en el módulo “Static Structural” que se caracteriza por ser preciso y recomendable en cargas lentas, mientras tanto por otra parte el método explícito en el módulo “Explicit Dynamic” este es recomendable en cargas que varían en el tiempo y son aplicadas rápidamente. Para esta investigación inicialmente se consideró de gran interés realizar la simulación por el método explícito, debido a que la interfaz de ANSYS permite implementar modelos de daño acumulativo y rupturas tal como presentó Lucia Murillo en su investigación, los modelos de daño acumulativo permiten simular la pérdida de rigidez por fatiga generada en los materiales imitando la pérdida de resistencia y daño generado físicamente en el proceso de nucleación, crecimiento de poros y coalescencia de poros que generan la ruptura en los aceros, sin embargo no fue posible realizar la simulación por este método debido, primeramente a las limitaciones presentadas por potencial de cómputo matemáticos disponible, en el método explícito ANSYS resuelve los problemas paso a paso, el tiempo entre cada uno de estos pasos se denomina tiempo crítico, este es calculado automáticamente por el programa y no puede ser editado, también depende de las propiedades mecánicas y el tamaño del elemento finito más pequeño presente el modelo, para la conexión estudiada el tiempo crítico generado por el programa fue muy pequeño, lo que generó un gran cantidad de pasos, de tal modo que excedió un tiempo razonable de solución, siendo el tiempo estimado de solución de varias semanas para

un modelo con un mallado muy optimizado de 3000 elementos finitos, Lucia Murillo en su investigación no tuvo problemas con esta limitación debido a que la carga monotónica se aplicó en un tiempo muy bajo de 0.01 s, por lo que a pesar de generar un tiempo crítico bajo, el tiempo total de 0.01 s, no permiten que se generen cantidades de pasos muy elevadas, porque el programa cuenta con un tiempo crítico mínimo no editable. Por lo que para el caso de la presente investigación se experimentó aplicando las cargas cíclicas en un tiempo menor pero se presentaron distorsiones en la punta de la viga debido a la mala transferencia de esfuerzos, ya que esta se ve limitada por la velocidad del sonido en el material de la viga y al aplicar múltiples cargas esta no se transfiere correctamente, al aumentar gradualmente el tiempo para evitar estas distorsiones se genera un error de energía donde el programa sugiere refinar el mallado con el fin de reducir el tiempo crítico y aumentar el número de pasos. Por estas razones no fue posible realizar la simulación por el método explícito.

Cabe mencionar que el método implícito a nivel de interfaz no cuenta con modelos de daño acumulado para materiales homogéneos, ni modelos de iniciación de rupturas o grietas, únicamente permite analizar grietas previamente formadas.

3.1 Calidad de malla de elementos finitos generada en los modelos

En primer lugar, se presentan las estadísticas del mallado generado en las conexiones y su calidad, en todos los modelos se utilizó un mallado mecánico no lineal, con un método multizona que genera elementos finitos más regulares y simétricos evitando ángulos menores a 45 grados en los elementos finitos, para examinar la calidad se utilizó un indicador llamado Skewness donde, un valor alto en este indica una mala calidad que puede generar problemas de convergencia o resultados imprecisos, mientras un valor de Skewness bajo representa una buena calidad en la malla, véase en la siguiente tabla las características del mallado generado, como se observa en la tabla el de Skewness siempre es menor a 7 lo que indica una calidad aceptable.

Tabla 18
Resumen resultados de mallado

Conexión	Número de elementos finitos	Numero de nodos	Tamaños (mm)	Calidad del mallado (Skewness máximo)
MRC-2	4 441	31 000	2.5 -150	0.68
T22	20 746	116 796	1 - 90	0.68
T27	19 919	110 760	1.25 - 55	0.68
T28	18 761	106 455	1.25 - 50	0.64
T29	17 881	100 091	1.25 - 80	0.64
T30	18 092	101 427	1.25 - 100	0.64

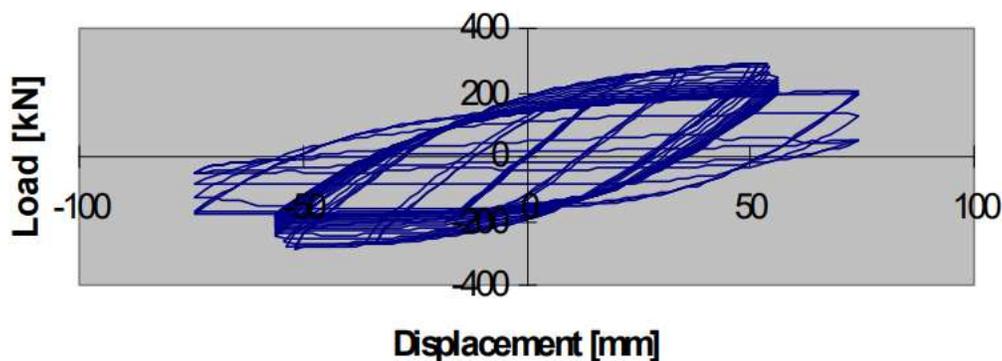
3.2 Comportamiento histerético de especímenes evaluados con protocolo de cargas ATC-24, 1992.

3.2.1. Resultado de histéresis en espécimen MRC-2.

Para este espécimen no se determinó la resistencia de los perfiles y se parte de valores aproximados, proporcionados por el fabricante de las secciones, los valores de la curva de endurecimiento corresponden a los valores de la base de datos del programa SAP2000 ajustados a la resistencia aproximada, proporcionada por el fabricante de los perfiles de un acero AS 3679.1-300, las dimensiones son iguales a las medidas en el ensayo experimental, obsérvese en la siguiente figura el diagrama histéresis medido en el laboratorio del espécimen MRC2, que representa gráficamente la fuerza generada en el actuador y el desplazamiento generado por este.

Figura 1

Carga de punta versus deflexión de punta MRC2 de ensayo en laboratorio.

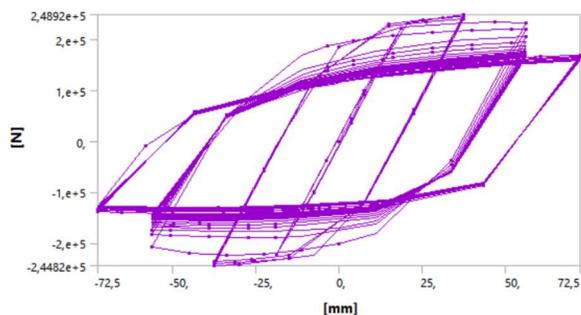


Fuente: Scholz, 2000.

El diagrama obtenido de la simulación en ANSYS, generado en el programa, luego de recrear la prueba experimental utilizando el historial de carga descrito en la investigación se presenta a continuación.

Figura 2

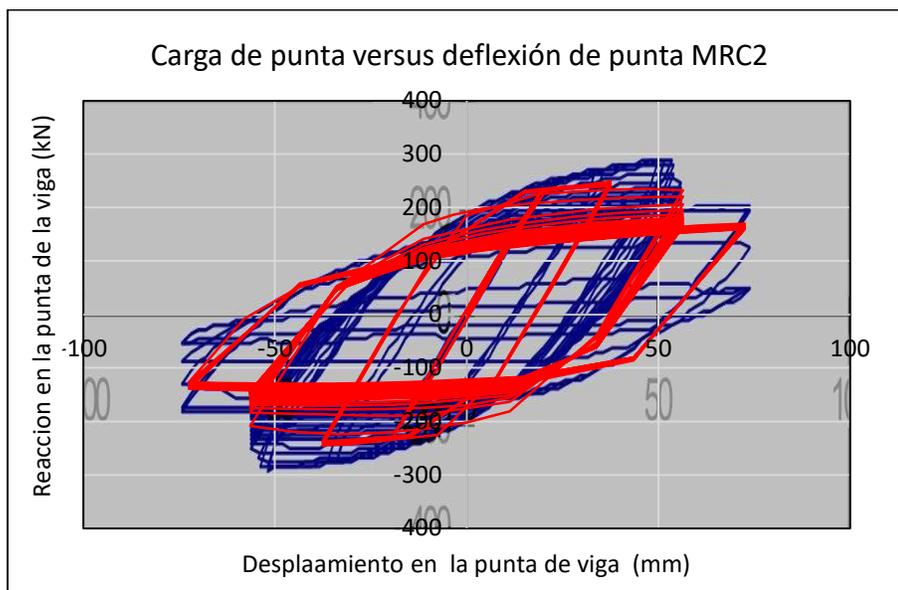
Diagrama de histéresis MRC2 generado en ANSYS



En primer lugar, se puede observar que en los últimos 5 ciclos del gráfico obtenido experimentalmente existe una caída en la resistencia y una degradación importante a pesar de no existir un incremento en los desplazamientos, este comportamiento se atribuye a la ruptura en los patines y la pérdida rigidez causada por el daño generado en el material, mientras en diagrama de histéresis obtenido mediante el software ANSYS no se obtuvieron estos resultados, porque no fue posible replicar este efecto destructivo por las razones mencionadas anteriormente. En siguiente gráfico se presenta una comparación entre ambos resultados sobreponiendo los resultados del modelado virtual en color rojo, en este se puede observar un comportamiento muy similar, donde las pendientes y la forma de las excursiones es decir desde cero hasta la deformación máxima en los bucles, así como la pendiente de las descargas, se asemejan, aunque no de manera idéntica.

Gráfico 8

Diagrama de histéresis de laboratorio y virtual espécimen MRC-2



En parte por la falta de claridad presentada en zona no lineal generada por la cantidad de sub-pasos generada por el programa en el análisis, a su vez las formas de las curvas de endurecimiento utilizadas en la calibración pudiesen ser distintas a las reales, sin embargo, la diferencia más notable es la resistencia generada en la conexión, en cada uno de los ciclos es menor, además de una pérdida de resistencia anticipada, después del séptimo ciclo a los 6,21 s se genera una pérdida de resistencia progresiva en los siguientes ciclos, que es más significativa a partir del sexto ciclo, en la prueba experimental, esta pérdida de resistencia se da en 5 ciclos después del sexto ciclo mientras que en el modelo virtual se dio en 3 ciclos.

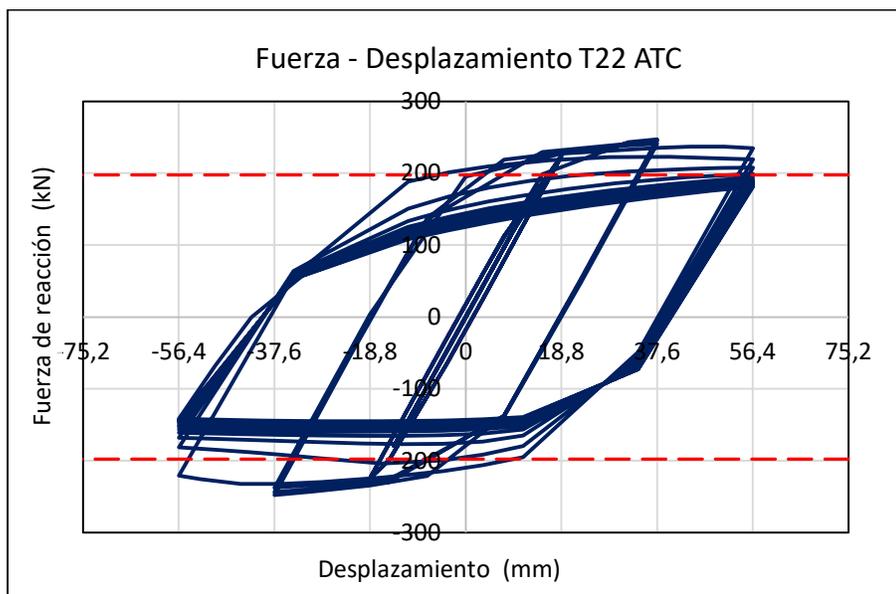
La fuerza máxima registrada en la prueba experimental en la punta de la viga fue de 290 kN, mientras que la fuerza máxima en el análisis computacional tuvo una magnitud de 248,92 kN un 14% menor que la medida experimentalmente.

3.2.2. Resultado de histéresis en espécimen T22.

En el espécimen T22 la fuerza máxima medida experimentalmente en el actuador fue de 281 kN, mientras que en el modelo virtual es de 247 kN, un 12% menos en comparación con la medición experimental, por lo que el programa está determinando resultados menores a los experimentales, tal como se muestra el diagrama de histéresis del espécimen MRC2 en el gráfico 10, en el siguiente gráfico se presentan los resultados del diagrama de histéresis del espécimen T22.

Gráfico 9

Diagrama de histéresis espécimen virtual T22, historial ATC-24.

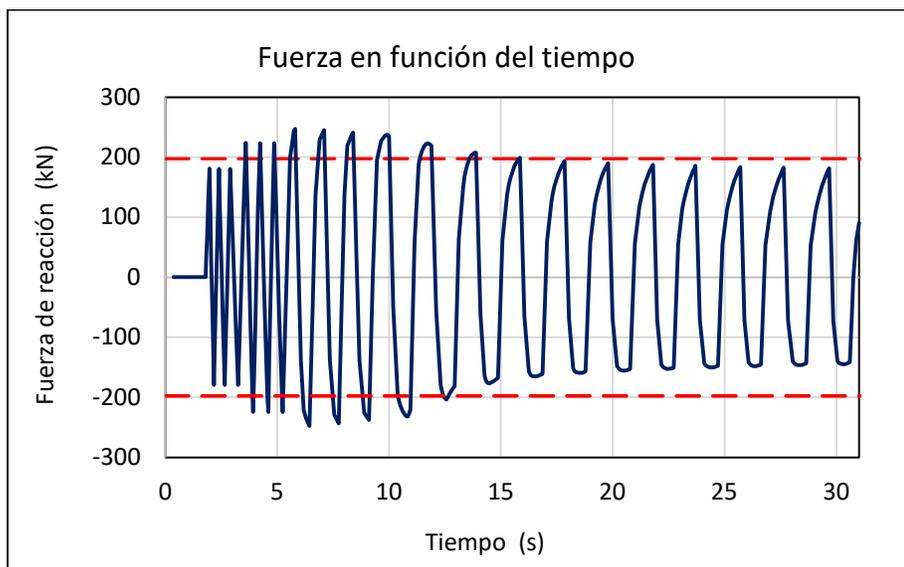


En este se puede visualizar una caída en la resistencia en los ciclos generados con el desplazamiento $3\Delta=56,4$ mm, específicamente después del primer ciclo, además de que en las excursiones con desplazamiento negativo se obtuvo una menor resistencia producto de un mayor ablandamiento y pandeo local en el ala inferior, en las excursiones positivas $3\Delta=75,2$ mm la rigidez elástica fue de 0.115 kN/mm mientras en las excursiones negativas la rigidez elástica de carga para estos desplazamientos fue de 0.0885 kN/mm, lo que denota la degradación en este sentido y la asimetría de la resistencia entre ambas direcciones de carga.

En el siguiente gráfico se presentan los valores de reacción en la punta de la viga en función del tiempo donde las líneas rojas representan el 80% de la fuerza de reacción máxima es decir $F_{\max} = 247 \text{ kN} \times 80\% = 197,6 \text{ kN}$, luego de que la conexión se degrade hasta alcanzar valores inferiores a este en la deformación pico se considera que la conexión a fallado, este caso se presentó en la segunda excursión del ciclo 3 con un desplazamiento 3Δ , mientras que en el experimento de laboratorio esta condición se generó en el ciclo 9 con un desplazamiento 3Δ , por lo que los resultados de la simulación virtual además de presentar valores de resistencia menores, también simula una falla prematura en este espécimen.

Gráfico 10

Registro de fuerzas en espécimen virtual T22 ATC.



3.2.3. Resultado de histéresis en espécimen T27.

En el espécimen T27 la fuerza máxima registrada por el actuador en la prueba experimental fue de 288 kN, por otro lado, en el espécimen virtual la fuerza de reacción en la punta de la viga fue de 253 kN, un 12% menos. La conexión del modelo virtual también se degradó más rápido que la prueba experimental, en el ensayo de laboratorio el fallo ocurrió en el octavo ciclo en paso de cargas 3Δ (ciclo 8, 3Δ), mientras que en el espécimen virtual sucedió en la segunda excursión del primer ciclo en el paso de cargas 3Δ (ciclo 1, 3Δ), 7 ciclos de carga antes. Véase en anexos el diagrama de histéresis en el gráfico 18.

3.2.4. Resultado de histéresis en espécimen T28.

En el ensayo experimental del espécimen T28, se registró una carga máxima de 289 kN a través del actuador. En contraste, en el espécimen virtual, la reacción en la punta de la viga alcanzó un valor de 251 kN, representando una disminución del 13% respecto al ensayo experimental. Tal como ocurrió en los especímenes anteriores, se observó una degradación anticipada en la modelo virtual, en comparación con el ensayo experimental. El espécimen de laboratorio falló durante el ciclo 3 del paso de cargas 3Δ (ciclo 3, 3Δ). En cambio, en el espécimen virtual, el fallo se presentó durante el paso de cargas 3Δ (ciclo 2, 3Δ), un ciclo de carga antes. Véase en el gráfico 19 en anexos el diagrama de histéresis del modelo virtual.

3.2.5. Resultado de histéresis en espécimen T29.

La fuerza máxima registrada por el actuador en el espécimen experimental T29, fue de 292 kN. En cambio, en el modelo virtual la resistencia obtenida fue de 253 kN, con una diferencia de 13%, similar a los especímenes anteriores. El fallo generado luego de que la resistencia disminuya más del 80% de la fuerza máxima, sucedió en el ciclo 3 del paso de carga 3Δ durante la prueba de laboratorio, mientras tanto en el espécimen virtual ocurrió en el primer ciclo del paso de carga con desplazamiento 3Δ , dos ciclos antes en comparación con el espécimen de laboratorio. Véase en el gráfico 20 en anexos.

3.2.6. Resultado de histéresis en espécimen T30.

De manera similar a los resultados anteriores, en el espécimen T30, el modelo virtual brindó resultados inferiores en las fuerzas de reacción de la viga, específicamente un 10% menos, la fuerza máxima en el modelo real fue de 280 kN, mientras en el virtual fue de 253 kN, asimismo en el fallo en modelo virtual se presentó ligeramente antes, en ciclo 3 del paso de carga 3Δ , mientras en el modelo virtual falló en la segunda excursión del primer ciclo en el paso de cargas 3Δ . Véase el diagrama de histéresis de este espécimen en el gráfico 21 en anexos.

Considerando los resultados obtenidos de los especímenes MRC2, T22, T27, T28, T29 y T30, se evidencia que las fuerzas (resistencias) registradas en el punto de aplicación de los desplazamientos en los modelos virtuales son consistentemente inferiores entre un 10% y un 14% en comparación con los modelos experimentales. Además, se ha constatado que el momento de fallo de la conexión siempre se presenta de manera anticipada en los especímenes virtuales en relación con los especímenes experimentales. En la tabla 20 presentada en anexos, se resume la comparación entre los resultados obtenidos del modelo virtual y los del espécimen real.

3.3 Resultados de deformaciones en especímenes evaluados con protocolo de carga ATC-24, 1992.

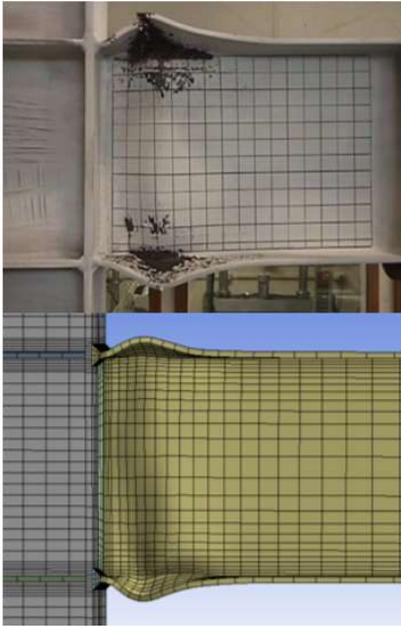
3.3.1. Deformaciones equivalentes en espécimen MRC2

Comparar las deformaciones observadas en el experimento real y la simulación por elementos finitos permite evaluar la concordancia y exactitud en los resultados obtenidos en modelo virtual, y establecer las limitaciones de los modelos realizados. En la figura 3 se presenta una fotografía de la conexión MRC2 tomada al final de la prueba, en esta se observa principalmente la deformación de la rótula plástica y la ruptura generada en las alas, bajo esta

figura se presenta el resultado de las deformaciones del modelo de elementos finitos, en la cual se aprecia que la ubicación de la rótula plástica es la misma y la forma de las deformaciones son semejantes a excepción de la ruptura.

Figura 3

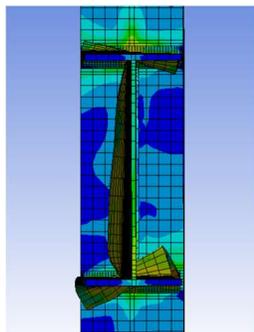
Comparación de distorsiones en rótula plástica de modelo experimental y simulación virtual del espécimen MRC2.



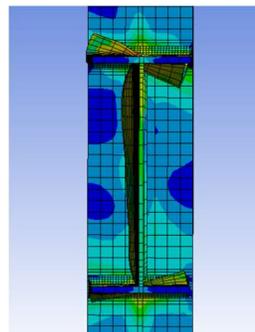
En la figura se percibe levemente el pandeo local del alma en ambas imágenes, sin embargo, este pandeo es más marcado y se extiende más en la parte superior del alma en el modelo de elementos finitos. Véase en la siguiente figura 4 y 5 se observa de una manera más detallada el pandeo local en el alma, y la pronunciada deformación generada en la simulación virtual durante la aplicación de los desplazamientos.

Figura 4

Deformaciones en alma de viga vista frontal ciclo 31 primera excursión espécimen MRC2.

**Figura 5**

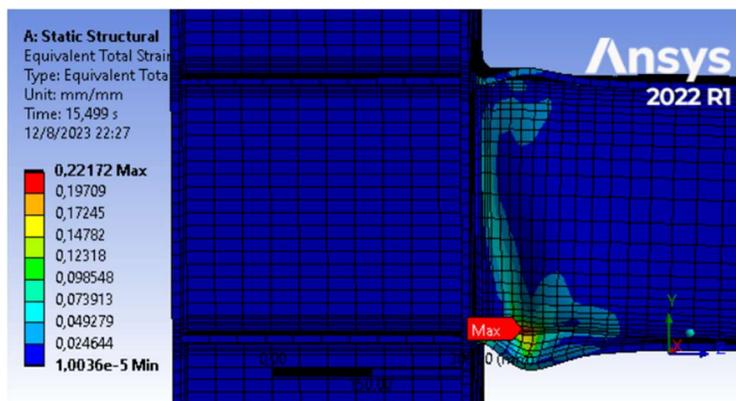
Deformaciones en alma de viga vista frontal ciclo 31 segunda excursión espécimen MRC2.



En la figura 6 se presenta la deformación total generada en el desplazamiento máximo de la segunda excursión del ciclo 13 ($7 @ 3\Delta$) a los 15.5 segundos, momento en cual se inicia la falla en el modelo experimental, en este instante el modelo virtual alcanza una deformación unitaria del 22% superando la deformación máxima de ruptura que es 18%, al mismo tiempo es notable que no se presentan deformaciones plásticas en la soldadura ni en la zona de panel. No obstante, el fallo en el modelo virtual por la degradación de capacidad se generó en el décimo ciclo, 21 ciclos antes.

Figura 6

Deformaciones equivalente en la primera excursión del ciclo 13 del espécimen MRC2



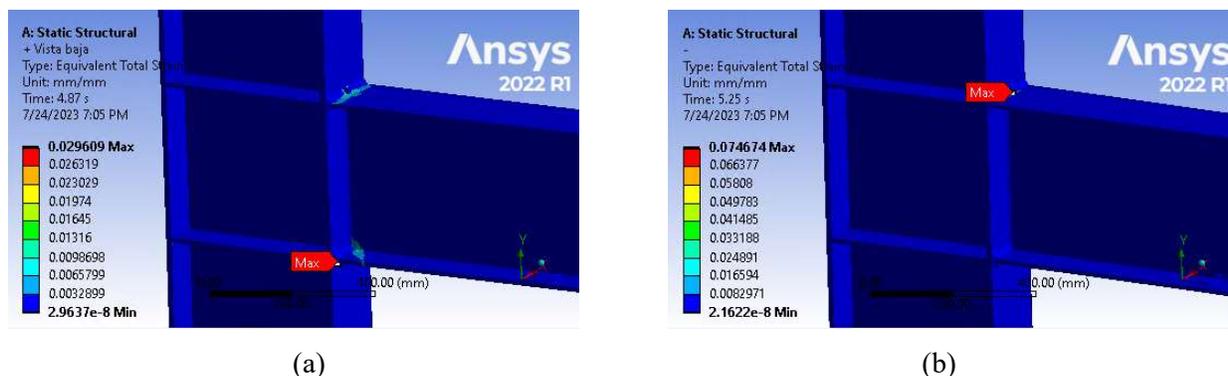
3.3.2. Deformaciones equivalentes en espécimen T22.

Para visualizar las deformaciones unitarias, se utilizaron las deformaciones totales equivalentes que representan la suma de deformaciones elásticas y plásticas, en el primer paso de cargas, aplicando un desplazamiento $0,75\Delta = 14,1$ mm, las deformaciones se concentran en las mismas regiones que en el segundo paso de cargas con desplazamientos de $1\Delta = 18,8$ mm, donde en la primera excursión del tercer ciclo de 1Δ , la deformación máxima se encuentra a un lado del

patín cerca de la soldadura, como se presenta en la figura 7 (a), en esta área la deformación máxima es de 0.029 mm/mm, mientras que en la segunda excursión es 0.074.

Figura 7

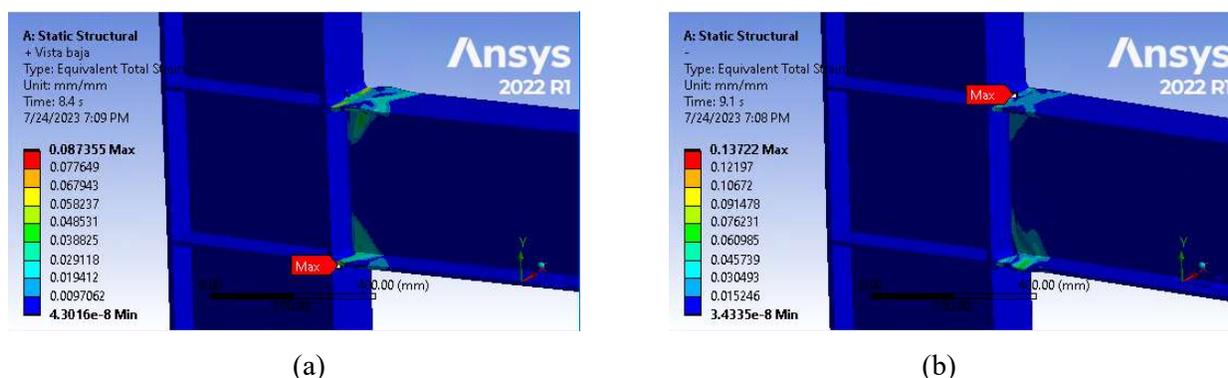
Deformaciones equivalentes, 4.87s-5.25s, espécimen T22, ATC-24.



En el tercer paso de cargas se aplicó un desplazamiento de $2\Delta = 37,6$ mm, en este instante se comienza a generar la rótula plástica, por lo que se empieza a percibir el pandeo en los patines y deformaciones equivalentes más altas cerca del pandeo en los patines, los puntos con las deformaciones máximas continúan siendo las mismas, como se muestra en siguiente figura, para el tercer ciclo de 2Δ , las deformaciones máximas equivalentes en la primera y segunda excursión fueron de 0.087 y 0.13 mm/mm respectivamente.

Figura 8

Deformaciones equivalentes, 8.4s-9.1s, espécimen T22, ATC-24.

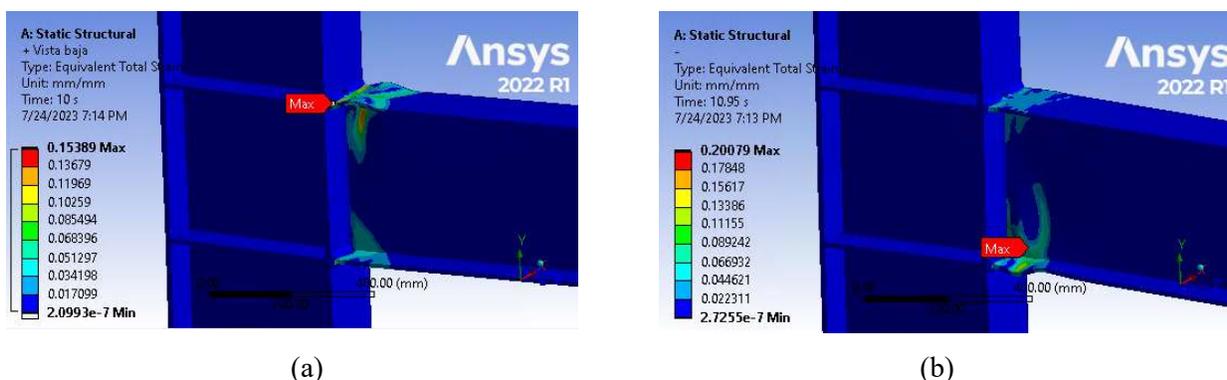


El último paso de cargas, se aplicó de forma más extendida, aplicando 11 ciclos con un desplazamiento de $3\Delta = 56,4$ mm, en la figura 9 se pueden observar los resultados del primer ciclo, en este hay mayores deformaciones en la formación de rotula plástica y más concentraciones de deformaciones equivalentes en el alma de la viga. Las posiciones de las deformaciones máximas ahora se encuentran en otras ubicaciones, para la primera excursión con

un desplazamiento de +56.4 mm, la deformación máxima se encuentra en el lado izquierdo del patín superior, mientras que para la segunda excursión aplicando el desplazamiento de -56.4 mm está en lado derecho del patín inferior, los valores de deformación fueron 0.15 y 0.20 mm/mm respectivamente.

Figura 9

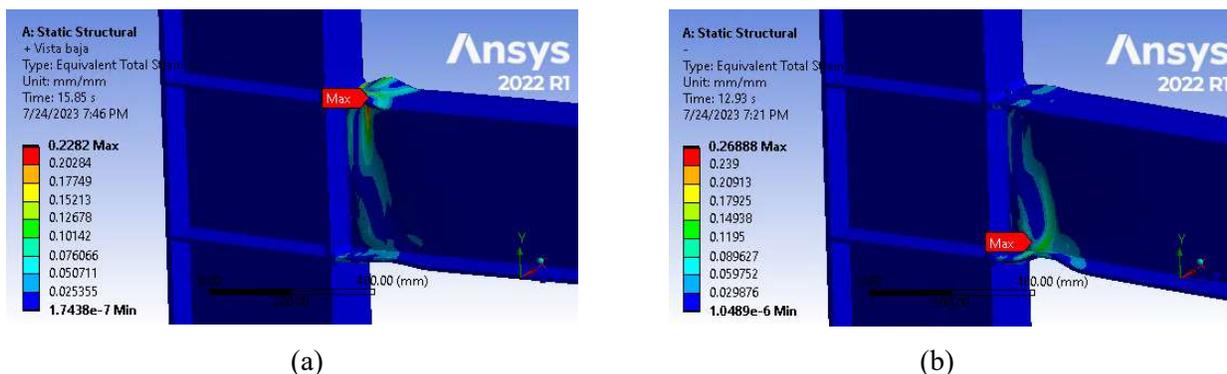
Deformaciones equivalentes, 8.4s-9.1s, espécimen T22, ATC-24.



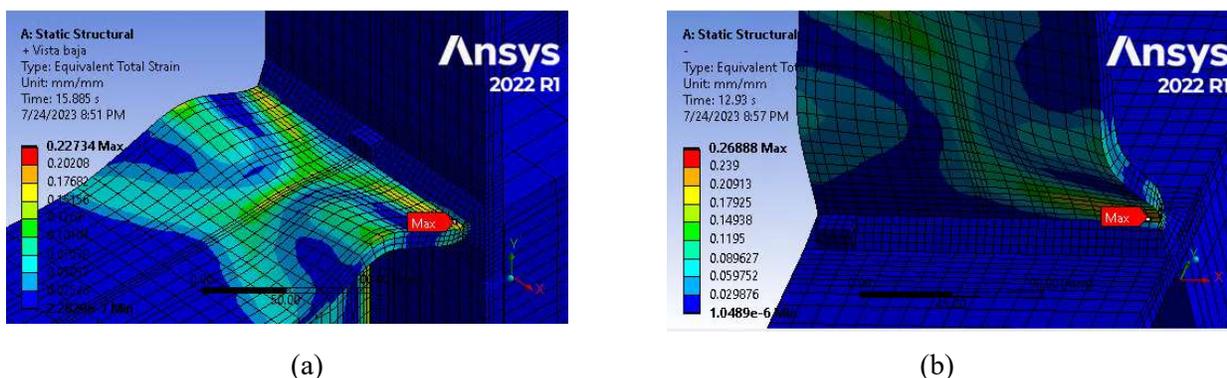
La deformación unitaria de la prueba de tracción axial para el esfuerzo máximo fue de 0.2235 mm/mm, este valor es superado por primera vez a los 12.93 s en la segunda excursión del ciclo 2 del paso de carga con desplazamiento 3Δ con una deformación equivalente de 0.26 mm/mm en el patín inferior cerca de soldadura, en patín superior se superó este valor a los 15.85s en el ciclo 4 con un desplazamiento 3Δ , con 0.2282 mm/mm, en la prueba experimental la primera grieta se generó en el ciclo (3 @ 3Δ), mientras que el virtual fue en ciclo (2 @ 3Δ), es decir un ciclo antes. Estas deformaciones equivalentes representan momentos críticos donde se presentaría la máxima resistencia antes de que se reduzca la resistencia y pueda generar una mayor degradación o ruptura. En la figura 10 las deformaciones equivalentes totales en el alma de la viga son significativas, y el sentido del pandeo en el lado izquierdo del ala inferior de la viga genera una pérdida significativa de resistencia en la conexión, se desconoce si este efecto de inversión en el sentido pandeo se produjo en algún momento durante la prueba experimental, aunque al final de la prueba experimental el pandeo se encontraba en sentido contrario que en la simulación virtual. Esto pudo haber sucedido por el contacto con la imperfección, ya que se desconoce su tamaño exacto y la calidad de la adhesión con la soldadura, aunque es relevante mencionar que en este tipo de pruebas es frecuente obtener resultados ligeramente diferentes en este tipo de ensayos con especímenes idénticos por la variabilidad de sus propiedades.

Figura 10

Deformaciones equivalentes, 15.85s-12.93s, espécimen T22, ATC-24.

**Figura 11**

Deformaciones equivalentes, 12.93s-15.885s, espécimen T22, ATC-24.



En la figura anterior se puede ver con más detalle la ubicación de las deformaciones equivalentes máximas, que como se mencionó anteriormente pueden ser considerados como posibles puntos débiles en una eventual falla, en la figura 11 las deformaciones se concentran principalmente de lado derecho y no al lado izquierdo como ocurrió en la prueba experimental, esto debido a la naturaleza de la dirección del pandeo en el patín.

La información obtenida en las deformaciones equivalentes es suficiente para argumentar la ruptura, y que el modelo presenta tendencias a fallar en puntos específicos a partir de momentos determinados, si se compara con los resultados experimentales de la figura 12, la ruptura inicia con grietas en la soldadura y el patín inferior de la viga específicamente en el lado izquierdo generando una ruptura que se propagó en el alma de la viga, por otra parte en el modelo virtual las deformaciones totales máximas se concentraron en el lado contrario del patín de la viga donde se genera el agrietamiento. Por consiguiente, a pesar de que el programa no está

reproduciendo de forma exacta las deformaciones generadas en el espécimen T22, se está produciendo una tendencia a un modo de falla similar.

Figura 12

Fallo por sobrecarga dúctil cíclica en probeta T22.

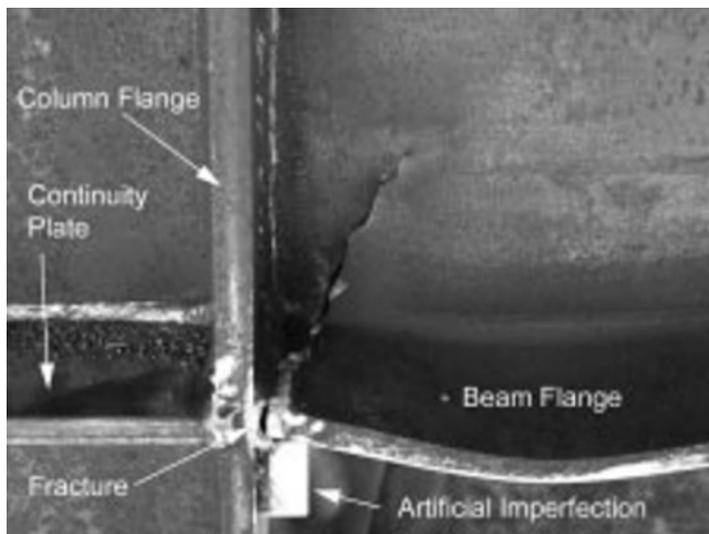
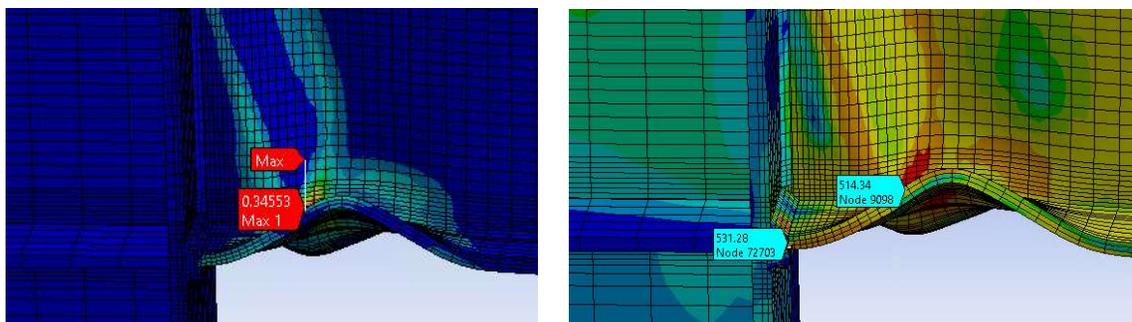


Figura 13

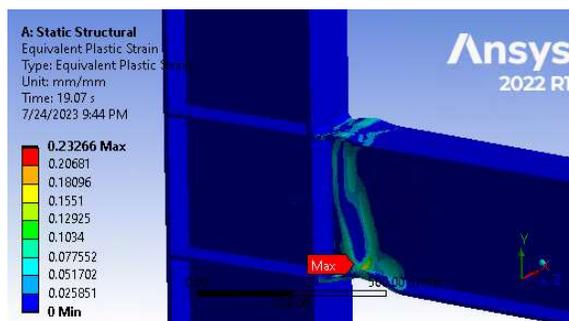
Deformaciones y esfuerzos en zona de ruptura en último ciclo, espécimen T22, ATC-24.



En la siguiente figura se presentan las deformaciones plásticas equivalentes que representan la plastificación del material en el sexto ciclo de paso de carga 3Δ , en esta figura se puede apreciar la rótula plástica en la viga, aunque inicialmente las deformaciones plásticas se generaron cerca de la soldadura, las deformaciones plásticas se presentaron a partir de los 8.4 s (excursión 1, 3 ciclo, 2Δ) en el patín inferior y a los 9.1 s (excursión 2, 3 ciclo, 2Δ) en el patín superior, y de manera más notable después de los 12.93 s (excursión 2, 2 ciclo, 3Δ).

Figura 14

Deformaciones plásticas, en rótula del espécimen T22, ATC-24.



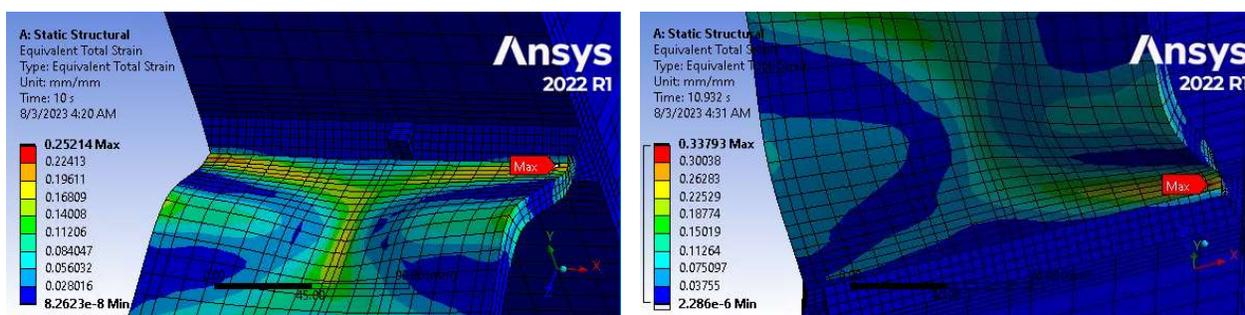
En la zona de panel no hay plastificación en la simulación virtual de este espécimen y no se tiene registro de las temperaturas de la zona de panel del espécimen T22 durante el experimento, por lo que se desconocen detalles sobre la plastificación en la zona de panel durante la prueba de laboratorio.

3.3.3. Deformaciones equivalentes en espécimen T28.

En el espécimen T28 las deformaciones equivalentes totales superaron por primera vez el valor de la deformación presentada en el esfuerzo máximo de la prueba uniaxial, durante el segundo ciclo del paso de cargas 3Δ , con valores de deformaciones equivalentes de 0.25 mm/mm y 0.33 mm/mm en la primera y segunda excursión de este ciclo presentadas en las figuras 15 (a) y (b), que muestran el patín superior e inferior de la viga.

Figura 15

Deformaciones equivalentes, 10s-10.932s, espécimen T28, ATC-24.



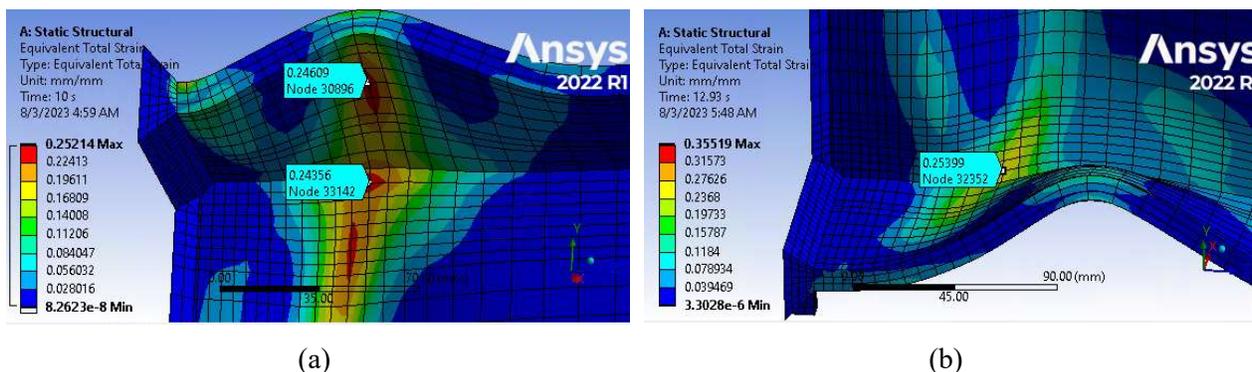
(a)

(b)

Por otra parte, en la figura 16 se presentan otros puntos de interés donde se presentan deformaciones considerables, la deformación unitaria de 0.2235 fue superada a los 10 s en la parte superior de la viga y a los 12.93 s, en estas zonas se continuaron presentando las mayores deformaciones, en ciclos de carga posteriores.

Figura 16

Deformaciones equivalentes, 10s-12.93s, espécimen T28, ATC-24.

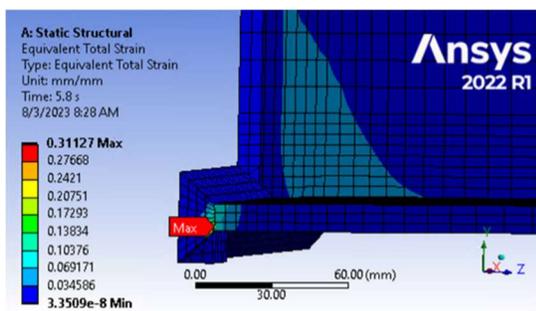


3.3.4. Deformaciones equivalentes en espécimen T29.

La primera deformación de interés identificada para este espécimen, se presentó entre la imperfección inferior y la soldadura, en esta se presentan esfuerzos significativos de 0.31 mm/mm, que tomando en cuenta la deformación de ruptura de la soldadura, sugieren un pequeño desprendimiento entre cubo que representa la imperfección y la soldadura.

Figura 17

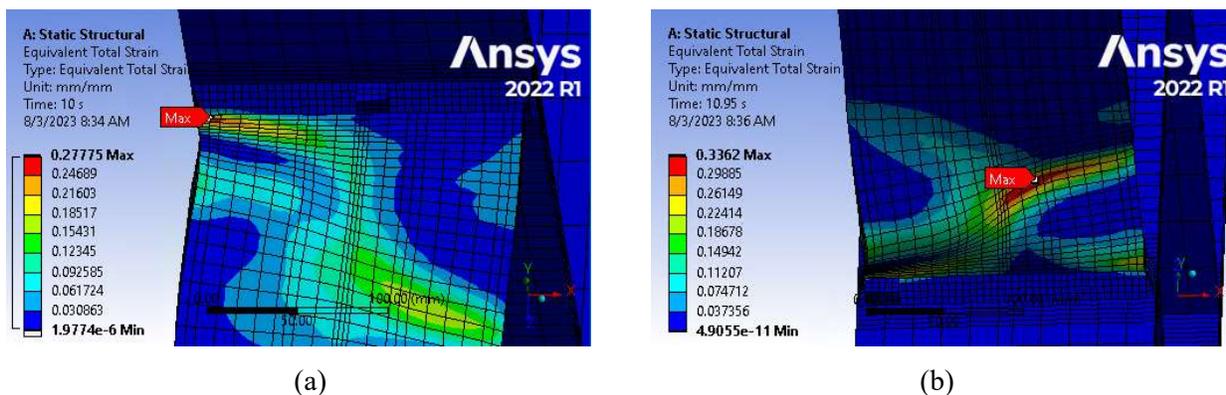
Deformaciones equivalentes, 5.8s, espécimen T29, ATC-24.



En la viga la deformación de 0.2235 mm/mm es superada por primera vez en la viga a los 10 s en el tercer ciclo durante en el paso de cargas 3Δ , en la figura 18 (a) se presenta el resultado de la primera excursión, desde una vista superior hacia la viga, mientras que el punto marcado en la figura 18 (b) se alcanzó una deformación de 0.33 superior a deformación en que se presenta el fallo en el material.

Figura 18

Deformaciones equivalentes, 10 s - 10.95 s, espécimen T29, ATC-24.

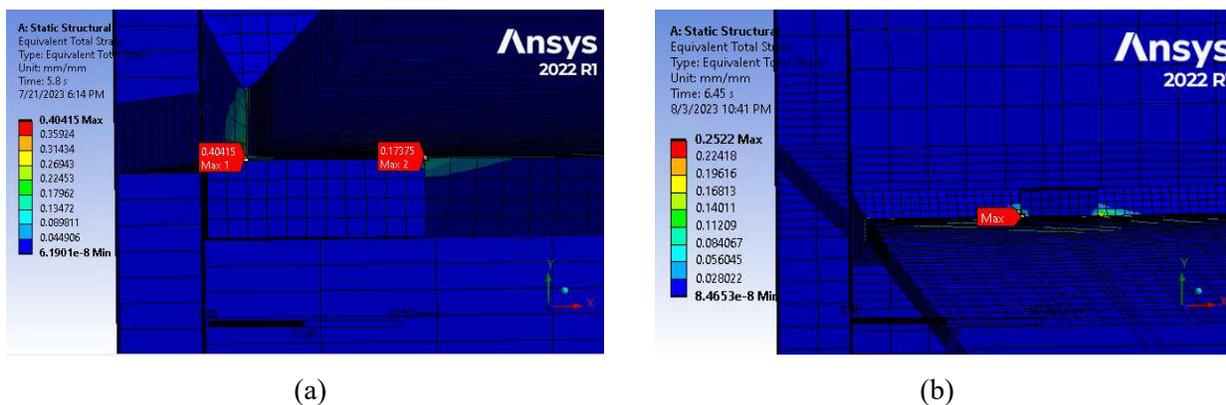


3.3.5. Deformaciones equivalentes en espécimen T30.

En el espécimen T30 se vuelven a observar deformaciones mayores a la de ruptura, en pequeñas zonas de contacto entre los cubos de la imperfección y la soldadura, donde para el material de la soldadura la deformación unitaria de ruptura es de 0.24 mm/mm, mientras en la figura 19 se pueden observar valores superiores. La figura (a) representa la imperfección inferior mientras la figura (b) la imperfección superior.

Figura 19

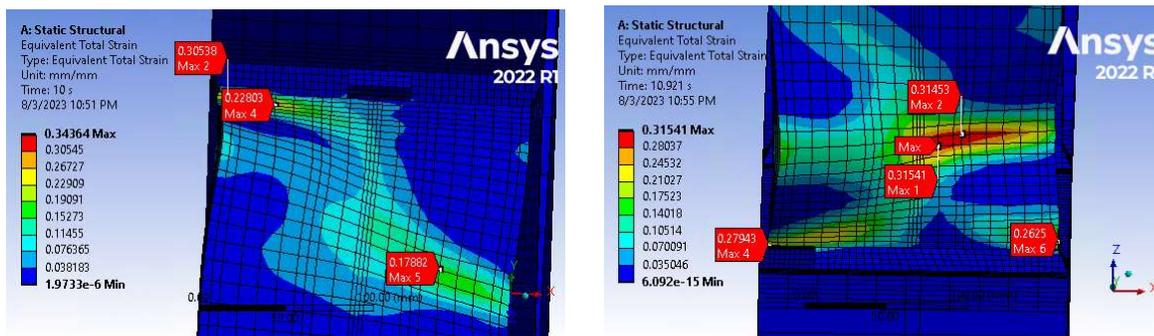
Deformaciones equivalentes, 5.8 s - 6.45 s, espécimen T30, ATC-24.



En la figura 20 (a) se presenta una vista superior de la viga, en el momento que las deformaciones superan el valor de 0.2235 mm/mm, mientras la figura 20 (b) muestra la vista inferior de la viga al superar esta deformación.

Figura 20

Deformaciones equivalentes, 10 s – 10.921 s, espécimen T30, ATC-24.



En este momento en el ciclo 1, 3Δ las deformaciones en la viga alcanzan un valor de 0.34 mm/mm mayor a 0.2235 mm/mm por lo que en este momento se presentarían grietas por primera vez en el espécimen T30, de manera distinta pero muy próxima en la prueba experimental evaluada en laboratorio las primeras grietas se generaron en el ciclo 2, 3Δ .

En las pruebas experimentales únicamente se registró el momento en el cual inicia la formación de grietas, en los especímenes T22 y T30, y en la conexión T22 las grietas inician en el ciclo 3, 3Δ , mientras que en el modelo virtual se presentaron deformaciones unitarias superiores al valor de la deformación de fallo en el material de la viga de 0.2235 mm/mm en el material de la viga en ciclo 2, 3Δ , es decir un ciclo antes. Por otro lado, en espécimen T30 evaluado en el laboratorio se generaron grietas en el ciclo 2, 3Δ , en cambio en el modelo virtual, se generarían grietas durante el ciclo 1, 3Δ , de esto se puede deducir que el programa está simulando de una manera muy cercana los momentos en los que inician las grietas, produciendo resultados conservadores o poco optimistas, con un ciclo de anticipación.

En el caso de las zonas donde se presentaron grietas en los modelos experimentales y las zonas donde se presentaron las mayores deformaciones en los especímenes virtuales, las similitudes variaron en los diferentes especímenes. En el caso del espécimen MRC2 la ubicación de la ruptura en modelo virtual coincide perfectamente en comparación con los resultados de la prueba experimental, en el espécimen T29 igualmente se identificaron grandes similitudes, sin embargo, el espécimen T22 no existe una similitud muy marcada, ya que las grietas inician en la soldadura, extendiéndose por el patín inferior y el alma de la viga. En contraste, en el modelo virtual, donde las deformaciones más críticas se encuentran del lado contrario del patín inferior de la viga.

Esto podría deberse a la posibilidad de que los pandeos generados en la simulación hayan sido ligeramente diferentes, lo que habría llevado a una redistribución de esfuerzos y, por ende, a resultados distintos. De cualquier manera, los resultados de las deformaciones equivalentes totales generados por los modelos virtuales arrojaron resultados que al compararse con los experimentales se puede constatar como aceptables para determinar el momento o posibles ubicaciones en las que se inician las grietas. Además, no fue posible implementar mejoras adicionales, como podría haber sido un mayor refinamiento del mallado, aumentar la cantidad de sub-pasos de análisis o incorporar modelos de daño acumulado mediante el método explícito en el modelo virtual, debido a las limitaciones de la investigación en capacidad de cómputo matemático. En la tabla 21 en anexos se presenta un resumen los resultados en las deformaciones de ruptura del material, y una comparación entre los modelos virtuales y reales de los instantes en los cuales estas se presentaron.

3.4 Resultados de esfuerzos en especímenes evaluados con protocolo de carga ATC-24, 1992.

Los esfuerzos se analizaron utilizando el criterio de esfuerzos equivalentes de Von Mises, antes de continuar con el análisis de los resultados, es importante recordar que los modelos de elementos finitos son aproximaciones, estas se generan a partir de la convergencia de una solución numérica, que en determinadas circunstancias puede no ser estable o precisa, lo que puede conducir a resultados incorrectos o poco confiable, comúnmente estos errores se presentan en superficies de contacto entre diferentes piezas. Los errores suelen estar relacionados con la transferencia de carga, penetración en la geometría y la interacción de materiales no lineales, en el caso de las transferencias de cargas, estas suelen ser muy complejas y no lineales, la penetración en la geometría puede ser generada por la deformación excesiva de los sólidos, lo que a su vez puede generar esfuerzos irrealistas y problemas de convergencia. Muchos de estos problemas se solucionan aumentando la cantidad de elementos finitos, de manera que se tengan más nodos en las superficies de contacto, recomendablemente con ayuda de un análisis de convergencia, pese a ello en algunas circunstancias esto conlleva un alto costo de cómputo matemático, que puede ser mayor a los recursos disponibles, como es el caso de esta investigación, por esta razón se consideró apropiado, detallar algunas concentraciones de esfuerzos poco confiables, para posteriormente ignorarlas en el análisis.

3.4.1. Esfuerzos equivalentes en espécimen MRC2

Los esfuerzos generados en la simulación en la región de inicio de la fractura son menores que el esfuerzo último del material determinado en la prueba uniaxial realizada durante el experimento, siendo de 516,28 Mpa en la parte inferior y 517,21 MPa en la parte superior de la viga, mientras que el esfuerzo último del material es de 520 MPa, en la figura 22 se visualizan las concentraciones de esfuerzos en las zonas más dañadas en fotografía del ensayo experimental.

Figura 21

Esfuerzo equivalente de Von Mises en la segunda excursión del ciclo 13 del espécimen MRC2.

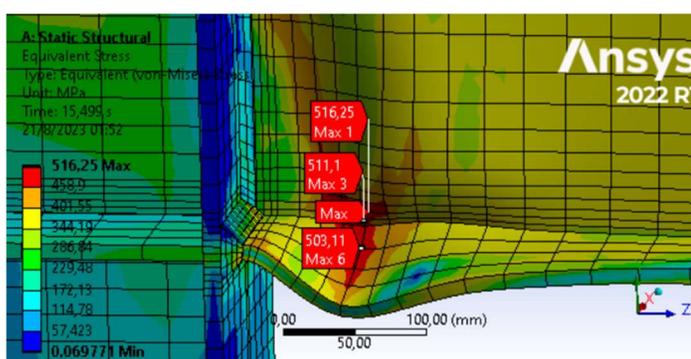


Figura 22

Esfuerzo equivalente de Von Mises en la primera excursión del ciclo 31 del espécimen MRC2.

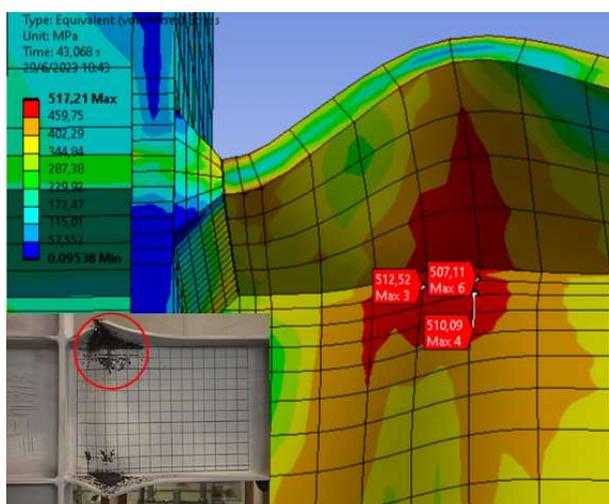
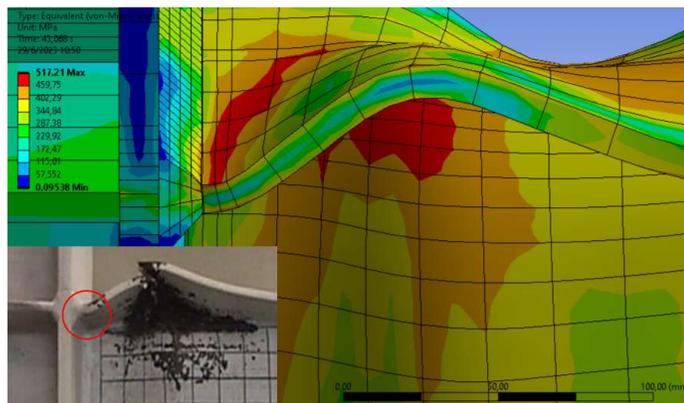


Figura 23

Concentración de esfuerzo en superficie dañada en espécimen MRC2.



En figura 23 se puede observar que existe una importante concentración de esfuerzos en una región superficial del patín superior de la viga, de manera coincidente en la fotografía del modelo experimental se visualiza desprendimiento de pintura en esta zona específica.

En la zona de panel los esfuerzos no superaron el esfuerzo de fluencia, los esfuerzos más altos se generaron al principio mientras se formaba la rótula plástica, una vez se formó los esfuerzos en la zona de panel decrecieron, el esfuerzo máximo en esta área fue de 374,99 MPa. Cabe mencionar que en este tipo de conexión es ideal que la zona de panel entre en fluencia con el fin de aportar una mayor ductilidad y disipación de energía, se desconocen detalles sobre la fluencia en zona panel del espécimen experimental.

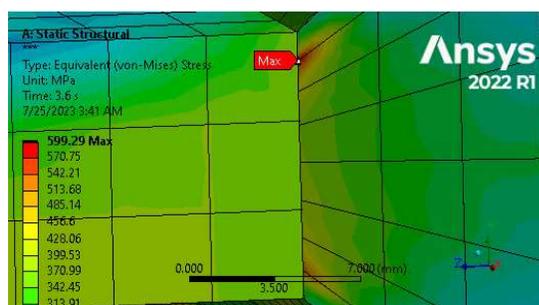
En el espécimen MRC2 bajo el protocolo de carga ATC-24, 1992 modificado por los investigadores y utilizado en la prueba experimental, los resultados de la simulación se manifiestan de una manera muy similar, siendo la principal diferencia la resistencia registrada y el proceso de degradación, estas diferencias pueden ser generadas por diversos factores, como la mala transferencia de esfuerzos en las superficies de contactos entre los nodos de los elementos finitos de diferentes elementos, la presencia de singularidades no identificadas, también por un desarrollo distinto del pandeo de local en el alma o de los patines de la viga, ya que se observó una deformación más marcada en el alma de la viga en el modelo de elementos finitos, asimismo pueden existir variaciones en las propiedades mecánicas, propiedades físicas y condiciones ambientales que generen resultados diferentes, un punto muy importante a tomar en cuenta, es que no se está utilizando un modelo de daño acumulado, además de recordar que algunas propiedades fueron parcialmente calibrada con suposiciones teóricas.

3.4.2. Esfuerzos equivalentes en espécimen T22.

Antes de discutir los resultados de cada espécimen se describirán los resultados poco confiables. En el espécimen T22 la primera concentración de esfuerzos que superó el esfuerzo de ruptura se presentó en la soldadura del patín que une el plano sobre el espesor del patín de la viga con el ala de la columna, véase en la figura 24, en este caso los esfuerzos se concentran un área muy pequeña la longitud de esta es menor 0.15 mm, el esfuerzo concentra en un nodo del mallado que no tiene contacto directo o cercano con otro nodo, esto provoca desconfianza. En iteraciones anteriores con un mallado menos refinado, las concentraciones de esfuerzo eran mayores y se aminoraron al refinar el mallado, se cree que un mayor refinamiento eliminaría la presencia de estos esfuerzos, además que no hay evidencia de daño en esta área el espécimen evaluado en laboratorio, por estas razones se decide ignorar concentraciones de esfuerzos en esta parte de la soldadura que se extiendan en longitudes menores a 0.15 mm.

Figura 24

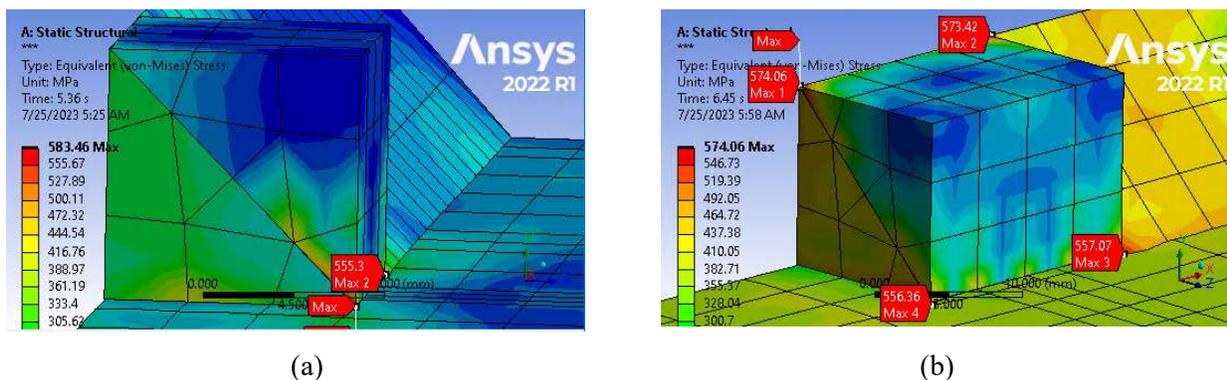
Irregularidades en Esfuerzos equivalentes, espécimen T22, ATC-24.



En las imperfecciones también se presentó una mala transferencia de esfuerzos. Los cubos de las imperfecciones están calibrados con las mismas propiedades mecánicas de la soldadura y los nodos en la superficie de contacto entre la imperfección y la soldadura coinciden de modo que están directamente conectados, en la figura 25 (a) se muestra la imperfección superior antes de la formación de la rótula plástica, el cubo que representa la imperfección, esta dividido con el fin de mejorar transmisión de esfuerzos de la parte inferior de cubo con la soldadura de filete, sin embargo entre la división del cubo se generó una mala transferencia de esfuerzos que se puede observar por el cambio de color en los contornos, donde la mayor concentración de esfuerzos se encuentra la parte del cubo que no tiene contacto con la soldadura y que por ende está bajo una menor tensión, además el contorno de los esfuerzos más altos están concentrado en un área muy baja extendiéndose longitudinalmente por 0.03 mm. En la figura 25 (b) se puede visualizar como se vuelve a presentar este comportamiento.

Figura 25

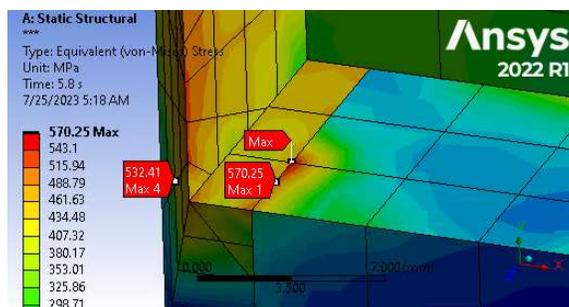
Irregularidades en Esfuerzos equivalentes, en imperfección superior, espécimen T22, ATC-24.



En la imperfección inferior de manera similar se presentan problemas con la transferencia de esfuerzos, en la figura 26 se muestra la superficie de la soldadura y la imperfección que está en contacto con el patín inferior de la viga, en esta imagen se visualizan los contornos de esfuerzos, estos se transmiten de una forma inadecuada, acumulando los esfuerzos máximos en un nodo la imperfección igual que en los casos anteriores en un área de tamaño diminuto.

Figura 26

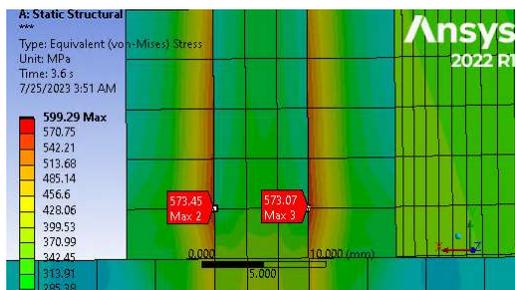
Irregularidades en Esfuerzos equivalentes, en imperfección inferior, espécimen T22, ATC-24.



En la figura 27 se muestra parte de soldadura del alma de la viga, en el plano de contacto con la columna, en este caso se presentaron esfuerzos en la raíz de la soldadura específicamente en los nodos del mallado, estos esfuerzos se consideraron poco confiables debido a que conforme se refino el mallado en el modelo la concentración de esfuerzos se redujo drásticamente en esta zona y no se continuó con el refinamiento debido a las limitaciones de hardware.

Figura 27

Irregularidades en Esfuerzos equivalentes de soldadura en alma, espécimen T22, ATC-24.

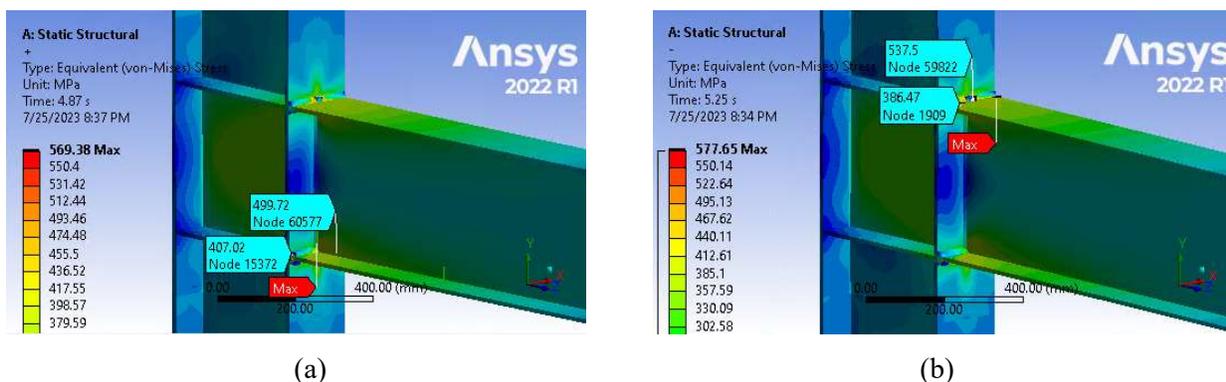


Los puntos, zonas o áreas que presentaron los esfuerzos máximos poco confiables, tal como fueron mencionados previamente, serán excluidos y no serán considerados en el análisis posterior de esfuerzos.

En el primer paso de cargas con desplazamientos de 0.75Δ , los mayores esfuerzos se presentaron en la soldadura de los patines, en la región central y en los patines la viga cerca de la soldadura, con una distribución de esfuerzos similar al paso de cargas desplazamientos 1Δ . El esfuerzo máximo en la primera y segunda excursión del tercer ciclo aplicando del paso de cargas con desplazamiento 1Δ tienen un comportamiento similar a los descritos anteriormente como muy probablemente erróneo y poco confiable, en el caso de la primera excursión figura 28 (a) este problema se generó en las soldadura del alma de la viga y en la segunda la soldadura lateral del patín de la viga, por lo que para la primera excursión el esfuerzo máximo considerado en la soldadura es de 499 MPa y para la viga es de 407 MPa.

Figura 28

Esfuerzos equivalentes, 4.87s-5.25s, espécimen T22, ATC-24.

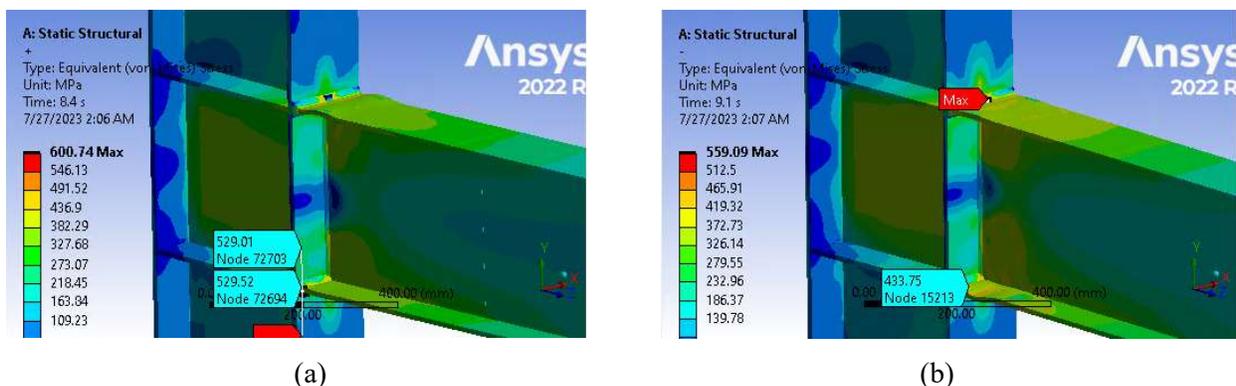


Es pertinente hacer referencia que, debido a la mayor rigidez y resistencia del material de la soldadura en comparación con el material de la viga, los esfuerzos en la soldadura serán mayores y las deformaciones serán menores en comparación con la viga. En la primera excursión

del tercer ciclo, en el paso de carga con desplazamientos de 2Δ , el esfuerzo máximo se identifica como el resultado de una mala transferencia de esfuerzos en la imperfección inferior de forma idéntica a la figura 26 mencionada anteriormente, omitiendo este el esfuerzo máximo en la soldadura fue de 529 MPa, mientras que, durante la segunda excursión, el esfuerzo máximo en la soldadura fue de 559 MPa y en la viga de 433 MPa, como se presenta en la siguiente figura.

Figura 29

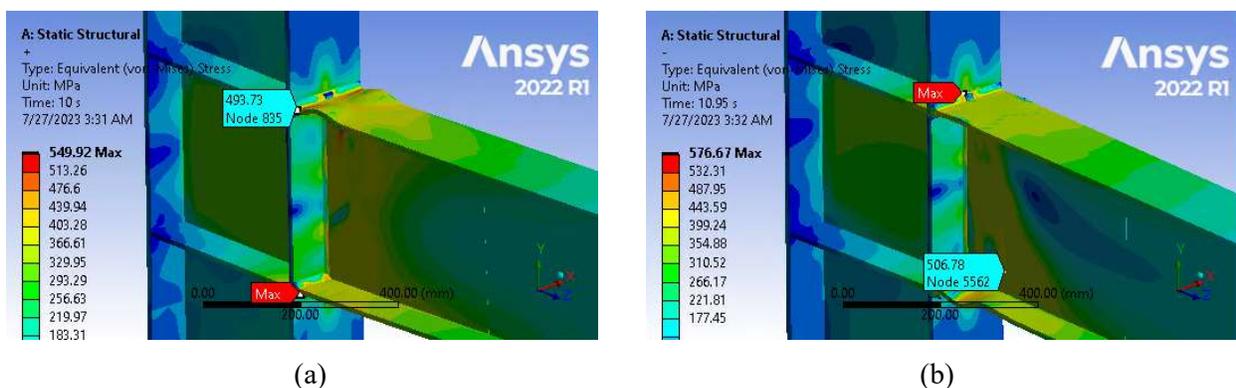
Esfuerzos equivalentes, 8.4s-9.1s, espécimen T22, ATC-24.



Los esfuerzos máximos generados en la primera excursión durante la aplicación del cuarto paso de carga, con desplazamientos de 3Δ , fueron de 549 MPa en la soldadura y 493 MPa en la viga, véase en la figura 30 (a), en la figura 30 (b) se presentan los resultados de la segunda excursión donde, el esfuerzo máximo mostrado en esta figura se presenta de forma idéntica al del figura 25 que fue catalogado como un error, por lo que se considera que el esfuerzo máximo en la soldadura es de 558 MPa y en el caso de la viga este se ubicó en misma parte del patín inferior de la viga con un valor de 506 MPa.

Figura 30

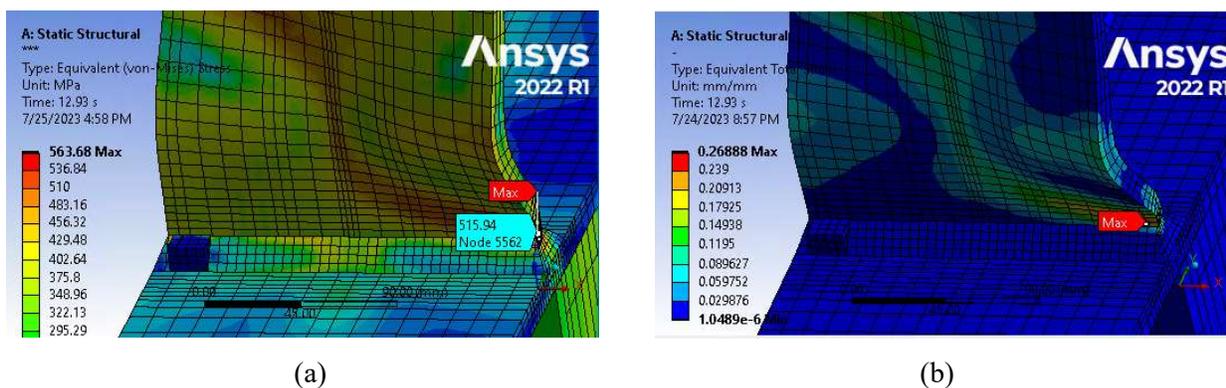
Esfuerzos equivalentes, 10 s – 10.95 s, espécimen T22, ATC-24.



Omitiendo las concentraciones de esfuerzos que fueron consideradas como errores de convergencia, los esfuerzos no superan el valor del esfuerzo máximo en ningún momento, sin embargo, los esfuerzos equivalentes de Von Mises más altos se presentaron en el mismo momento que las deformaciones equivalentes totales alcanzaron el valor de los esfuerzos últimos en las curvas de esfuerzo-deformación de los materiales de la viga y la soldadura. Véase la figura 31 y la figura 32.

Figura 31

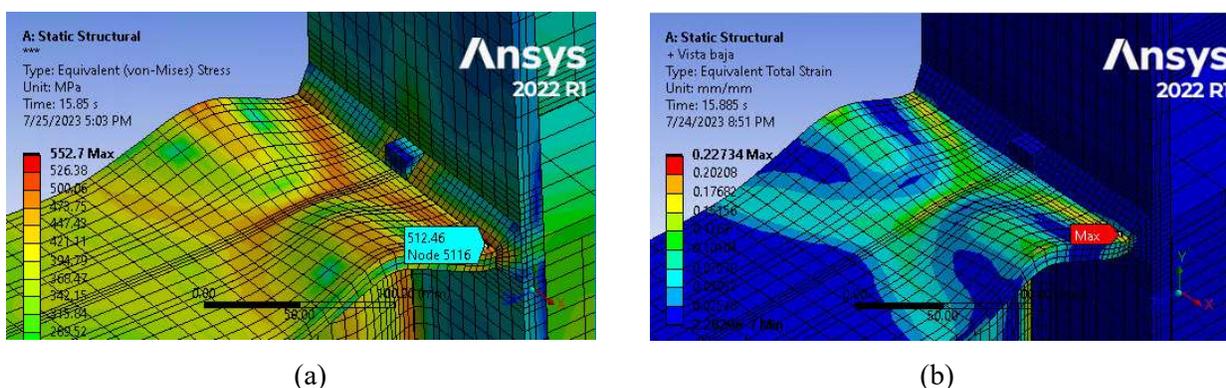
Esfuerzos y deformaciones equivalentes, 12.93s, espécimen T22, ATC-24.



En la figura anterior se puede observar lo comentado anteriormente en el apartado del análisis de las deformaciones, donde las deformaciones y esfuerzos se concentran de lado derecho, mientras que, en la prueba experimental, esta se generó de lado izquierdo.

Figura 32

Esfuerzos y deformaciones equivalentes, 15.885s, espécimen T22, ATC-24.



La coincidencia entre los esfuerzos y las deformaciones en estos puntos sugieren, la posibilidad de considerar estas zonas como puntos débiles donde se pueden generar grietas. También es importante mencionar que como ocurrió en modelo experimental, la formación de grietas no siempre significa que la conexión falle en ese mismo instante, en el caso del

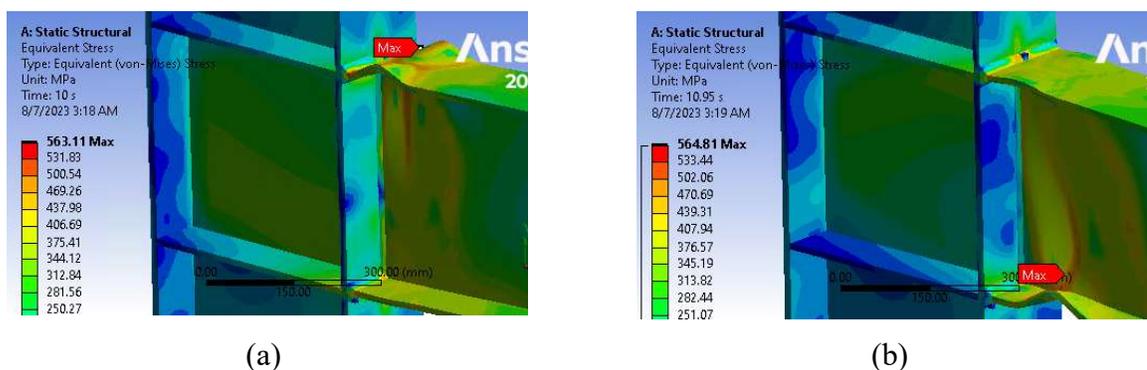
espécimen T22 evaluado experimentalmente este continuó con un buen desempeño a pesar de tener grietas y falló 6 ciclos después, esto sucede por la habilidad del material para desarrollar deformaciones plásticas posibilitando la disipación y redistribución de la esfuerzos alrededor de la grieta, lo cual demora su extensión.

3.4.3. Esfuerzos equivalentes en espécimen T28.

En la figura 33 se muestra la distribución de esfuerzos en el primer ciclo con un desplazamiento de 3Δ , de la primera y segunda excursión. En esta figura se presentan los esfuerzos máximos percibidos durante el historial de cargas en este espécimen, siendo de 563 MPa y 564 MPa en soldadura, estos valores son muy cercanos al valor de ruptura de 566 MPa, están ubicados en la soldadura del borde derecho del patín superior e inferior de la viga.

Figura 33

Esfuerzos equivalentes, 10 s – 10.95 s, espécimen T28, ATC-24.



En el caso de la viga, los esfuerzos equivalentes máximos generados, fueron de 515 MPa durante la primera excursión y de 516 MPa durante la segunda excursión, también muy cercanos al esfuerzo de ruptura de 517 MPa. Ver en las figuras 34 y 35 las ubicaciones de estos esfuerzos.

Figura 34

Esfuerzos y deformaciones, 10 s, espécimen T28, ATC-24.

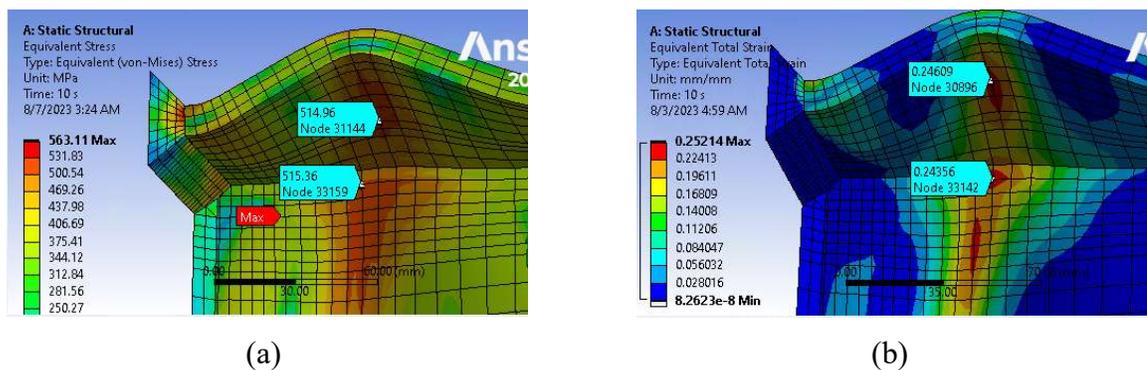
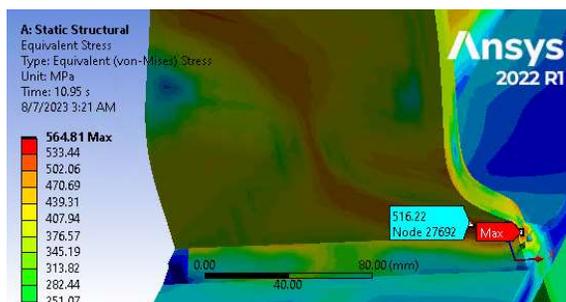


Figura 35

Esfuerzos equivalentes, 10.95 s, espécimen T28, ATC-24.

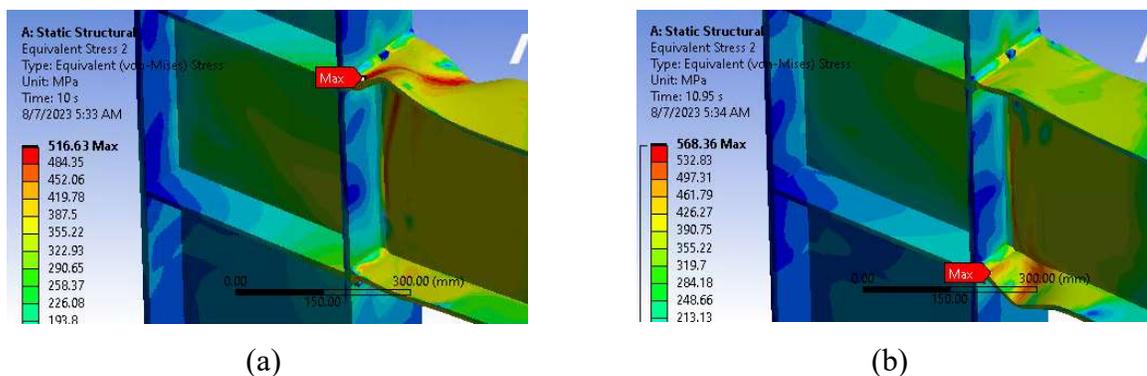


3.4.4. Esfuerzos equivalentes en espécimen T29.

En contraste con la conexión anterior, en el espécimen T29, los esfuerzos más altos se generaron en la viga y no en la soldadura, en la figura 36 se muestra nuevamente, los contornos de esfuerzos equivalentes del primer ciclo con un desplazamiento de 3Δ , durante la primera y segunda excursión, en la figura 36 (a) se puede observar el esfuerzo máximo de la viga de 516 MPa, mientras en la soldadura se desarrolló un esfuerzo máximo de 512 MPa. En la figura 36 (b) el esfuerzo máximo corresponde a un problema de transferencia de esfuerzo en la imperfección, con características similares al catalogado como erróneo, en la imperfección inferior del espécimen T22, bajo el protocolo de cargas ATC-24, por esta razón se omite y en cambio se acepta como válidos el esfuerzo de 516 MPa en la viga y 509 MPa en la soldadura.

Figura 36

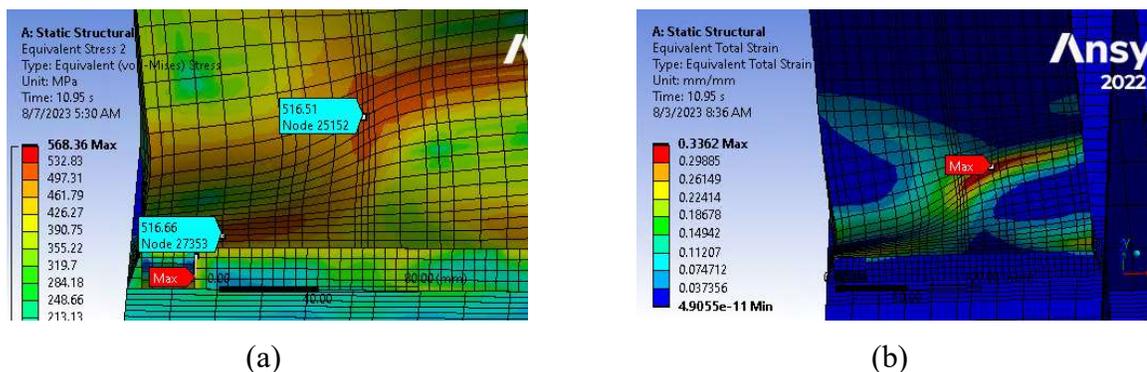
Esfuerzos equivalentes, 10 s – 10.95 s, espécimen T29, ATC-24.



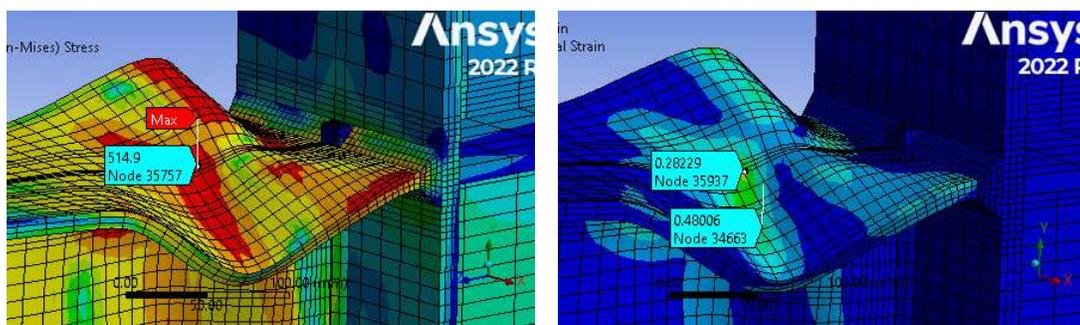
En las figuras 37 se puede ver de manera más detallada los esfuerzos equivalentes máximos al lado de las deformaciones equivalentes, durante la segunda carga en sentido negativo, aplicada en primer ciclo con un desplazamiento de 3Δ , desde una vista inferior.

Figura 37

Esfuerzos y deformaciones, 10.95 s, espécimen T29, ATC-24.

**Figura 38**

Región de fallo por inestabilidad del haz en modelo virtual en última carga.

**Figura 39**

Fallo por inestabilidad del haz en la probeta T29.



La imagen previa ilustra la fractura en el ala de la viga, junto con un notorio desprendimiento de la capa de pintura en el centro del ala. Asimismo, en el modelo virtual, si bien las tensiones y deformaciones también se distribuyeron en la región de ruptura de una manera similar, desde la parte interna inferior del ala y en la región superior o externa. Las tensiones en el espécimen virtual no concordaron de una forma perfecta con las áreas dañadas o

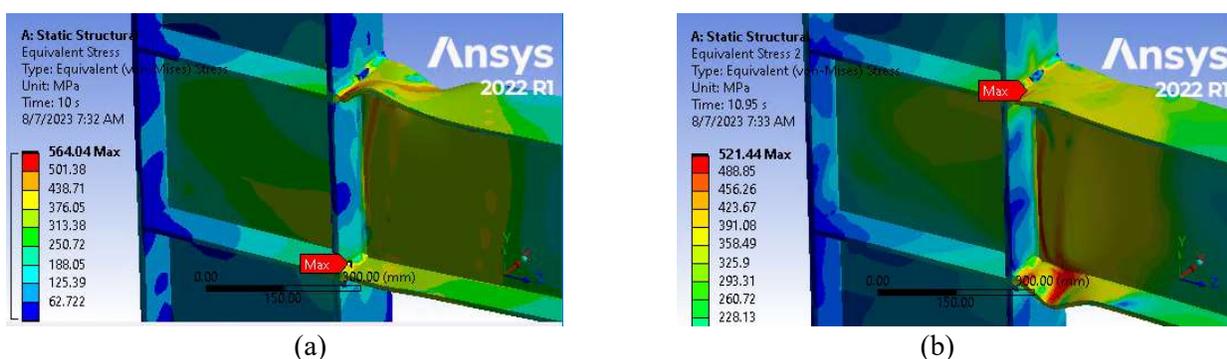
con desprendimiento de pintura, en el espécimen experimental, producto de ligeras diferencias en pandeo local de la viga entre el espécimen virtual y el experimental.

3.4.5. Esfuerzos equivalentes en espécimen T30.

Los resultados del espécimen T29 y T30 son muy similares debido a que las deformaciones tuvieron un comportamiento semejante, en figura 40 se puede apreciar las similitudes en la distribución de esfuerzos, además en este caso los esfuerzos máximos se presentaron durante el mismo ciclo que en los especímenes anteriores. Los mayores esfuerzos se encuentran en los patines, específicamente en el lado izquierdo del patín superior y el centro del patín inferior, con valores máximos de 516 MPa. Por otra parte, en soldadura los esfuerzos máximos fueron de 564 MPa y 521 MPa para la primera y excursión respectivamente.

Figura 40

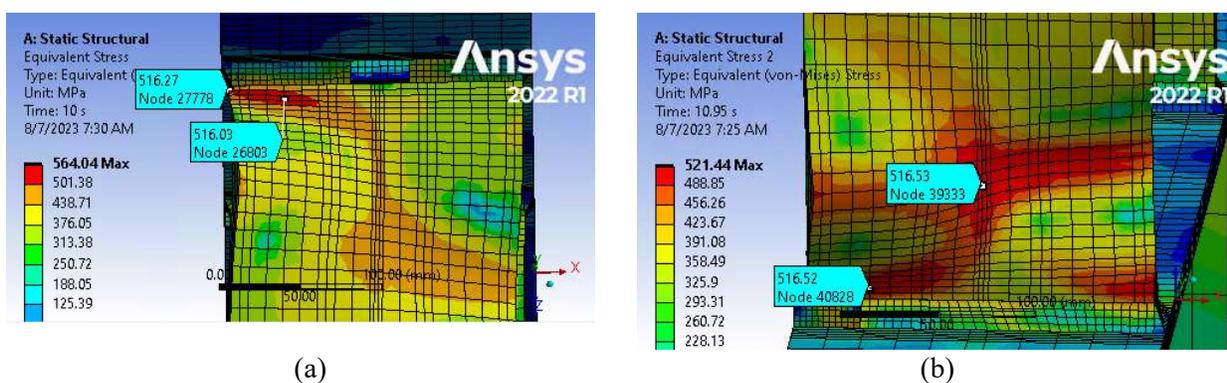
Esfuerzos equivalentes, 10 s – 10.95 s, espécimen T30, ATC-24.



En las figuras 41 se puede apreciar de una manera más clara, las distribuciones de los esfuerzos equivalentes. En la figura 41 (a) se muestra la conexión desde una vista superior, mientras en la figura 41 (b) muestra el ala inferior.

Figura 41

Esfuerzos equivalentes, 10 s – 10.95 s, espécimen T30, ATC-24.



3.5 Resultado de histéresis de especímenes evaluados con protocolo de cargas AISC 341.

Debido a que todas las conexiones se utilizó la misma sección 410 UB 54 como viga con un módulo plástico de la sección en el eje x (eje fuerte) de $Z_x = 933 \times 10^3 \text{ mm}^3$ y los especímenes T22, T27, T28, T29 y T30 tienen el mismo acero con un límite de fluencia de $F_y = 373 \text{ MPa}$, mientras que la viga del espécimen MRC2 está formada por acero con un límite de fluencia de $F_y = 375 \text{ MPa}$. Utilizando la siguiente expresión para el cálculo de momento plástico $M_p = Z_x \times F_y$ se obtiene $M_p = 348 \text{ MPa}$ para los especímenes con imperfecciones y $M_p = 349 \text{ MPa}$ para el espécimen MRC2.

Para marcos resistentes a momento la norma de Disposiciones sísmicas para edificios de acero estructural AISC 341-16, establece requerimientos que deben cumplirse para precalificar la conexión, en el caso de las conexiones para marcos resistentes intermedios de momento (IMF) la conexión debe ser capaz de adoptar una deriva con un ángulo de 0.02 radianes manteniendo al menos el 80% de la resistencia del momento plástico de la viga (0.8 Mp), mientras que para una conexión de un sistemas de marcos especiales a momento (SMF) la conexión deberá tener una resistencia del 80% del momento plástico cuanto alcance una rotación de 0.04 radianes. La resistencia a momento de la viga es calculada con la fuerza de reacción en punta de la viga donde se aplican los desplazamientos y la distancia hasta la cara de la columna.

Tabla 19

Capacidad a flexión de los especímenes.

Conexión	Momento a 0.02 rad (kNm)	Momento a 0.04 rad (kNm)	0.8 Mp (kNm)
MRC-2	376	278	278
T-22	393	255	278
T-27	345	257	278
T-28	-	-	278
T-29	379	254	278
T-30	372	265	278

En la tabla anterior se presentan los momentos mínimos en los picos de carga de 0.02 radianes y 0.04 radianes.

3.5.1. Resultado de histéresis en espécimen MRC2.

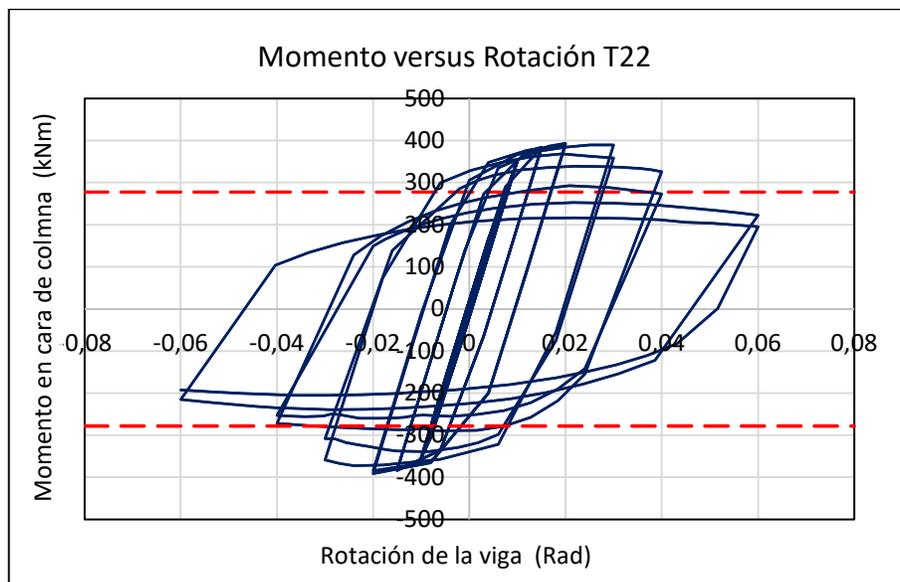
En espécimen MRC2 los momentos desarrollados al alcanzar una rotación de 0.02 radianes fue mayor a 0.8 Mp, se redujo a menos de 0.8 Mp durante la excursión δ^- , ciclo 2, paso de carga 0.04 rad. En el gráfico 23 presentado en anexos se presenta el diagrama de histéresis.

3.5.2. Resultado de histéresis en espécimen T22.

El momento máximo en la cara de la columna registrado en este espécimen fue de $M=393,69$ kNm, con una rotación de 0.02 radianes en la primera excursión del primer el ciclo con esta rotación, el historial de carga se aplicó tal como indica el protocolo de carga del AISC hasta alcanzar 0.06 radianes, véase el siguiente gráfico.

Gráfico 11

Diagrama de histéresis espécimen T22, historial ASIC 341-16.



En este gráfico, las líneas discontinuas de color rojo representan el valor correspondiente al 80% del momento plástico de la viga ($0,8M_p$), en todos los picos de carga de los ciclos generados en las rotaciones de 0.02 y 0.03 radianes, la conexión presenta una resistencia superior a $0,8M_p$, por lo que satisface el requerimiento de rotación y resistencia a momento de la norma AISC 341-16 para conexiones marcos resistentes intermedios de momento (IMF) y el requerimiento del código sísmico de Costa Rica para elementos, componentes y uniones con ductilidad local óptima. En el gráfico también se puede visualizar el último ciclo donde la resistencia es igual o mayor a $0,8 M_p$, a pesar de que, en los primeros ciclos, con una rotación de 0.04 radianes, la resistencia es aceptable, a partir de la primera excursión del segundo ciclo de 0.04 radianes, la resistencia es menor a $0,8 M_p$, por lo que por poco no cumple como una conexión SMF. Véase en más detalle la pérdida de resistencia en los ciclos y excursiones, en el gráfico 24 en anexos, donde este presenta el momento de la viga en la cara de la columna en función del tiempo.

3.5.3. Resultado de histéresis en espécimen T27.

En la respuesta histórica del espécimen T25, se observa en primera instancia una degradación más pronunciada en los desplazamientos descendentes o negativos, específicamente en las rotaciones de -0.04 rad y -0.06 rad, lo cual está relacionado con el pandeo y ablandamiento del patín inferior de la viga. El momento máximo alcanzado en este espécimen fue de 395.2 kNm con una rotación de 0.03 rad, y la resistencia fue menor al 80% del momento plástico hasta el segundo ciclo, generado con una rotación de 0.04 radianes, lo que indica que cumple como una conexión para marcos intermedios resistentes a momento (IMF). Véase el gráfico 23 en anexos.

3.5.4. Resultado de histéresis en espécimen T29.

En el espécimen T29, el resultado histórico representa un mayor deterioro en el patín inferior de la viga, de una manera muy similar al espécimen T27, el momento máximo en la cara de la columna fue el mismo que en espécimen T27, además se presentó en el mismo instante, a los 53 segundos, de manera similar cumplió con la precalificación de la conexión como, conexión apta para marcos intermedios resistentes a momento (IMF), debido que obtuvo una resistencia superior al 80% del momento plástico hasta el segundo ciclo del paso de cargas con una rotación de 0.04 radianes. El gráfico 26 en anexos presenta el diagrama de histéresis.

3.5.5. Resultado de histéresis en espécimen T30.

En diagrama de histéresis del espécimen T30 presentado en el gráfico 27, se observa una menor resistencia en los desplazamientos positivos, es decir en dirección hacia arriba, el momento máximo se presentó a los 53 segundos (δ^+ , ciclo 1, 0.03 rad) con un valor de 404 kNm, asimismo este espécimen demostró tener una resistencia mayor a 0.8 Mp en las rotaciones de 0.02 radianes y 0.03 radianes, no así a los 0.04 radianes.

En todos los especímenes evaluados con el protocolo de cargas del AISC, cumplieron los requisitos para conexiones para marcos intermedios a momento, demostrando tener una resistencia al momento superior al 80% del momento plástico en la cara de columna, al adoptar una rotación de 0.02 radianes y 0.03 radianes.

3.6 Resultados de deformaciones en especímenes evaluados con protocolo de carga AISC 341-16.

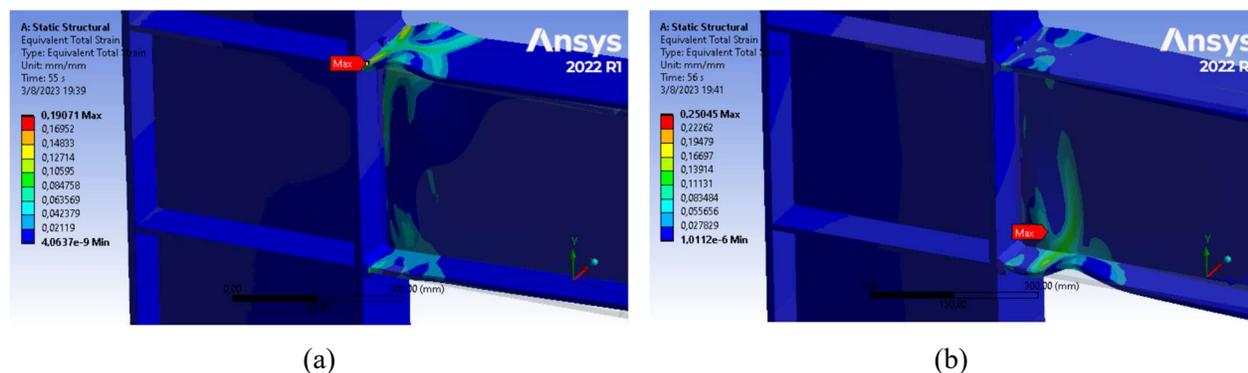
3.6.1. Deformaciones equivalentes en espécimen T22.

A confinación se presentan los resultados de las deformaciones equivalentes totales generadas por el programa ANSYS, bajo el protocolo de cargas para la precalificación de

conexiones resistentes a momento del AISC. En el paso de carga de 0.03 radianes, los pandeos locales en los patines de la viga son más pronunciados, el pandeo del patín inferior en viga cambia de sentido y en el segundo ciclo del paso de cargas de 0.04 radianes, se genera una nueva curvatura, en el pandeo del ala superior de la viga. La deformación de ruptura, fue alcanzada por primera vez a los 56 s, en la segunda excursión del segundo ciclo del paso de cargas con una rotación de 0.03 radianes. Véase en la figura 42, la ubicación de la deformación de 0.25 mm/mm.

Figura 42

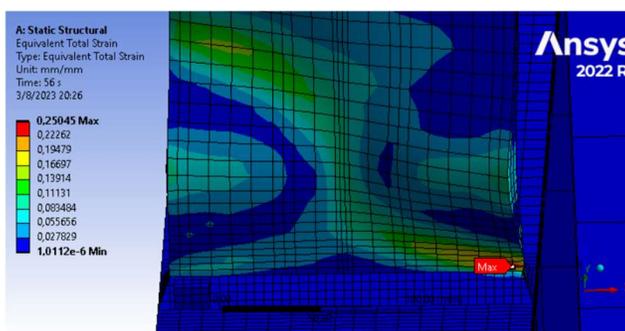
Deformaciones equivalentes, 55 s – 56 s, espécimen T22, AISC 341-16.



Véase con más detalle la zona de deformación máxima mostrada en la figura 42 (b) donde se muestra una vista inferior de la viga, en este instante.

Figura 43

Deformaciones equivalentes, 56 s, espécimen T22, AISC 341-16.



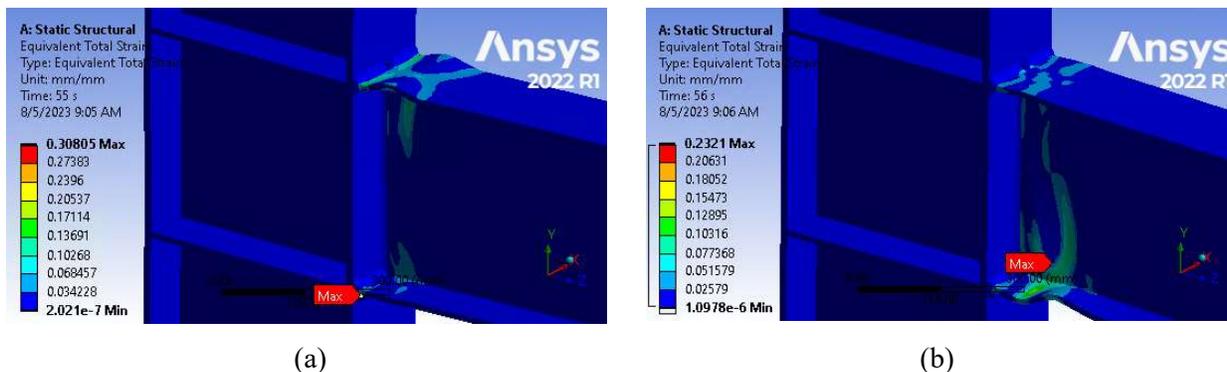
3.6.2. Deformaciones equivalentes en espécimen T29.

En el espécimen T29 las deformaciones inicialmente se concentraron en las esquinas de los patines, cerca de la soldadura de manera similar al espécimen anterior. En la primera excursión del ciclo 2, con una rotación de 0.03 radianes se generó una gran deformación entre la imperfección y la soldadura que ocasionaría su desprendimiento parcial, véase en la figura 44 (a). Mientras que en la segunda excursión la deformación equivalente de ruptura fue excedida al

alcanzar una deformación de 0.23 mm/mm, esta deformación se ubicó en el lado izquierdo del patín inferior como se muestra en la figura 44 (b).

Figura 44

Deformaciones equivalentes, 55 s – 56 s, espécimen T29, AISC 341-16.

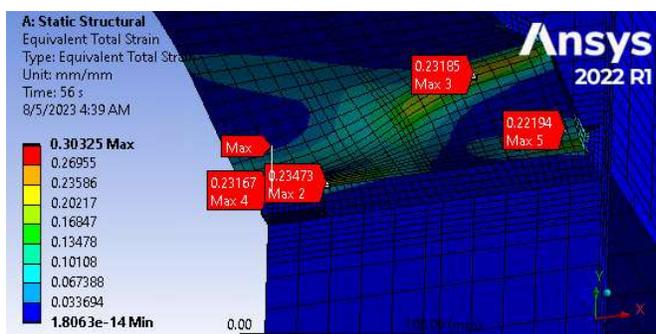


3.6.3. Deformaciones equivalentes en espécimen T30.

En el espécimen T30 se generaron deformaciones unitarias muy altas entre la imperfección inferior y la soldadura, lo que generaría el desprendimiento parcial de la misma en paso carga de 0.03 radianes, asimismo el segundo ciclo de este paso de carga se supera la deformación de 0.2235 mm/mm con una deformación equivalente en la viga de aproximadamente 0.3 mm/mm, nótese también, la asimetría del pandeo en el ala de la viga.

Figura 45

Deformaciones equivalentes, 56 s, espécimen T30, AISC 341-16.



En la tabla 22 en anexos se presenta un resumen de los resultados de las deformaciones totales equivalentes y el instante en que el material de la viga falla por primera vez en cada espécimen, en todos los especímenes, en los especímenes con imperfecciones presentaron el fallo en el material de la viga en la segunda excursión (desplazamiento negativo) del ciclo 2 durante el paso de cargas de 0.03 radianes (δ^-_2 , 0.03 rad), mientras que el espécimen MRC2 en el paso

de carga de 0.04 radianes ($\delta=2, 0.04 \text{ rad}$), por lo que no hubo posibles grietas durante las rotaciones de 0.02 radianes.

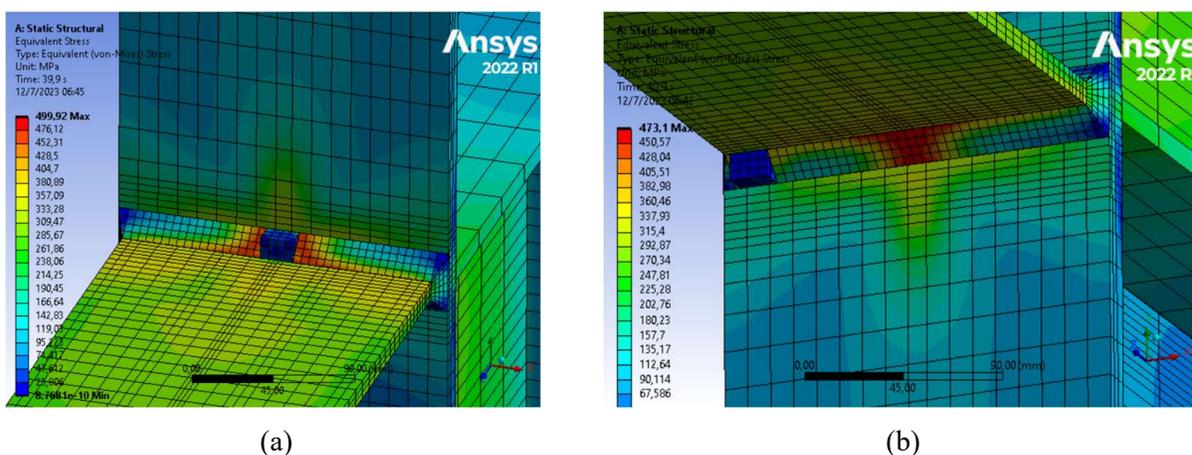
3.7 Resultados de esfuerzos equivalentes en especímenes evaluados con protocolo de carga AISC 341-16.

3.7.1. Esfuerzos equivalentes en espécimen T22.

Las concentraciones de esfuerzo más significativas, se presentan en la soldadura de los patines en la parte externa superior e inferior, en la zona más cercana al alma, la concentración de esfuerzos en la soldadura en esta zona es muy típica tal como se explicó en la fundamentación teórica, en esta zona no se presentaron esfuerzos mayores al esfuerzo de ruptura en ningún momento de la prueba, véase en las siguientes figuras.

Figura 46

Esfuerzos equivalentes 39.9 s - 40.9 s espécimen T22, historial AISC.



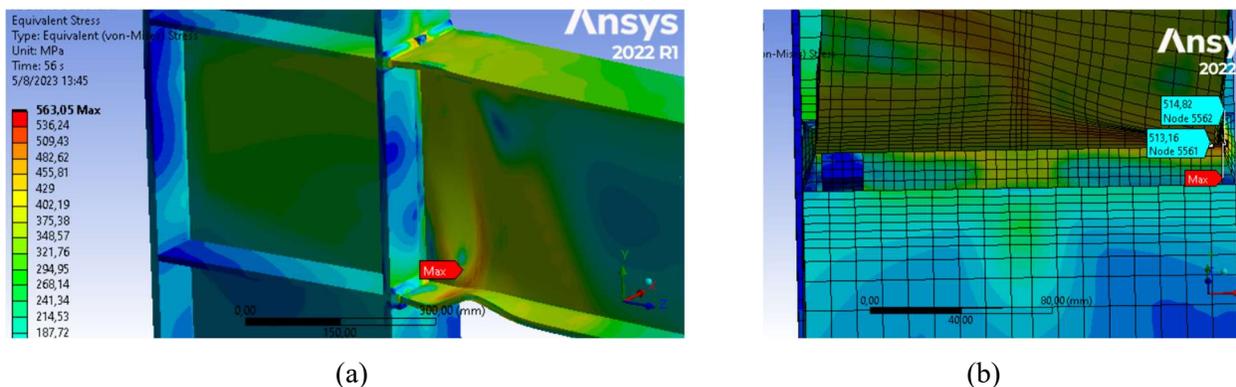
La concentración de tensiones en esta área se genera desde el primer desplazamiento y se incrementan a medida que aumentan los desplazamientos, también se observó que, con la formación de la rótula plástica, los esfuerzos experimentaron una reducción en la soldadura, es muy común que los esfuerzos se concentren en la raíz de la soldadura, aunque los esfuerzos nunca alcanzaron valores superiores al valor del esfuerzo último de 566 MPa en esta área.

Durante el paso de carga con rotaciones de 0.03 radianes, los esfuerzos más altos en la soldadura fueron de 556 MPa en la parte superior y 563 MPa la parte inferior de la viga, en la viga los esfuerzos más altos fueron de 503 MPa y 514 MPa respectivamente, en las figuras 47 (a) y (b) se observa la ubicación del esfuerzo máximo, y en la figura 47 (b) se puede observar los esfuerzos máximos en la viga. Posteriormente se incrementa el pandeo local en los patines de la viga, así como en el alma desarrollando mayores esfuerzos en las zonas adyacentes, alcanzando

esfuerzos de hasta 516.26 MPa y 516.39 MPa en el patín superior e inferior de la viga muy cercanos al esfuerzo máximo del material de 517 MPa. No se superaron los esfuerzos de ruptura.

Figura 47

Esfuerzos equivalentes, 56 s, espécimen T22, AISC 341-16.

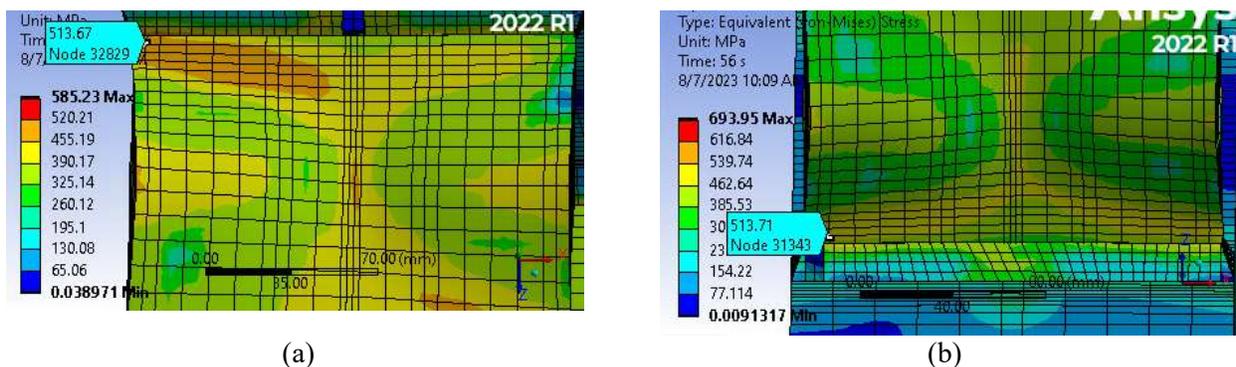


3.7.2. Esfuerzos equivalentes en espécimen T27.

Los esfuerzos máximos en el espécimen T27 fueron alcanzados durante el segundo ciclo con rotaciones de 0.03 radianes. En el transcurso de la primera excursión se generaron las distribuciones de esfuerzos, mostradas en la figura 48 (a), donde los esfuerzos máximos corresponden a un error en la transferencia de esfuerzos en la imperfección, similar al comentado en el espécimen T22, evaluado con el historial de carga del AISC 341-16, por lo que para efectos de interpretación se omite este valor y el valor máximo admitido es de 557 MPa en la soldadura del borde izquierdo del patín superior. En la figura 48 (b) se presenta el mismo error en esfuerzo máximo marcado, por lo que pasa por alto el valor indicado, en su lugar se admite como esfuerzo máximo 558 MPa, ubicado en soldadura lateral izquierda del patín inferior. En la viga el esfuerzo máximo es de 513 MPa para la primera excursión y de 513 en la segunda excursión.

Figura 48

Esfuerzos en viga, 55 s y 56 s, espécimen T27, AISC 341-16.



3.7.3. Esfuerzos equivalentes en espécimen T29.

En el espécimen T29 los esfuerzos máximos se originaron en el primer ciclo con una rotación de 0.04 radianes, en la primera excursión, el esfuerzo máximo se concentró en la soldadura con un valor 523 MPa, sin embargo, en la segunda excursión el esfuerzo máximo se produjo en la viga con un valor de 516 MPa. En la figura 49 se puede observar la distribución de esfuerzos alrededor de los pandeos locales de los patines, así como en el pandeo del alma. Véase en más detalle la distribución de esfuerzos en la viga, en la figura 50. En los especímenes T27, T28 y T29 con imperfecciones entre 2.5% y 5%, los esfuerzos más altos se presentaron generalmente en la viga, mientras en los especímenes T22 y T30 con imperfecciones de 5% y 10 %, los esfuerzos más altos se encontraban generalmente en la soldadura.

Figura 49

Esfuerzos equivalentes, 57 s – 58 s, espécimen T29, AISC 341-16.

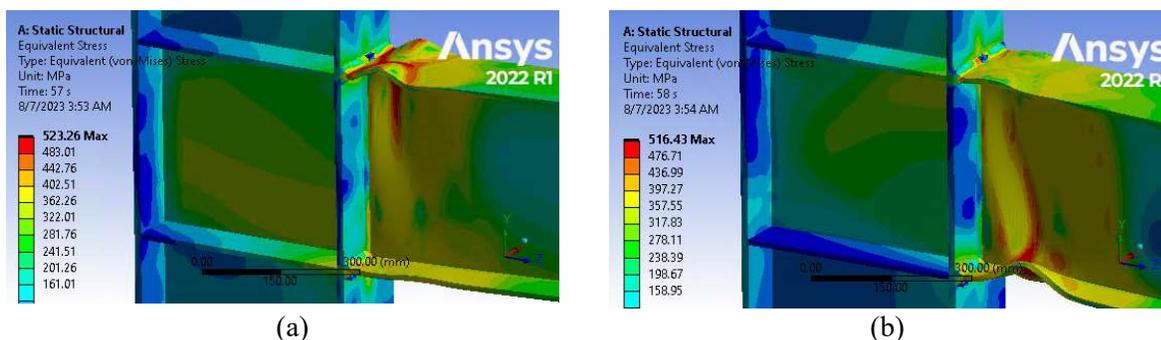
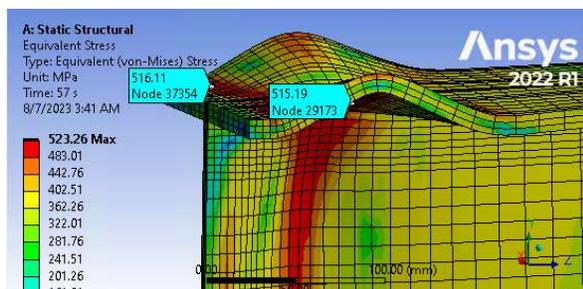


Figura 50

Esfuerzos en viga, 57 s, espécimen T29, AISC 341-16.



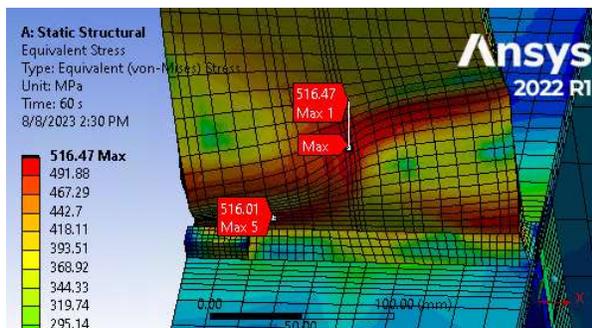
3.7.4. Esfuerzos equivalentes en espécimen T30.

En el espécimen T30 las deformaciones fueron muy similares a las generadas en espécimen T29, por lo que la distribución de esfuerzos también fue muy parecida, aunque los esfuerzos fueron menores que en el espécimen T29, además el espécimen T30, requirió de más ciclos y una mayor rotación en la viga para alcanzar el esfuerzo máximo en la viga, asimismo los

esfuerzos en la soldadura fueron sustancialmente menores en comparación con el espécimen T29. En la figura 51 se muestra el patín inferior, alcanzando el esfuerzo máximo en la viga.

Figura 51

Esfuerzos en viga, 60 s, espécimen T30, AISC 341-16.



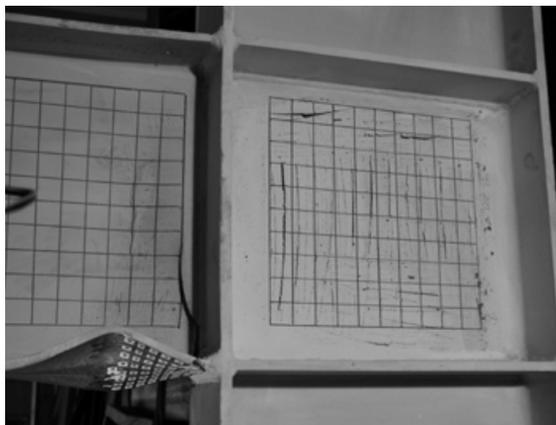
3.8. Efecto panel

En esta investigación, uno de los objetivos principales es evaluar la capacidad del programa para replicar el efecto panel. Durante las pruebas experimentales, se observaron deformaciones inelásticas en respuesta a los esfuerzos de corte. A pesar de ello, las deformaciones plásticas de corte no excedieron el 1% en ninguno de los especímenes satisfaciendo el requerimiento de norma NZS 3404, en otras investigaciones realizadas por el HERA, se repitió este desempeño con espesores entre 12 mm y 20 mm en los patines de la viga (Clifton, 2005). Sin embargo, en el modelo virtual, no se observó plastificación en la zona de panel. En la Figura 52 se muestra la zona de panel luego de concluir las pruebas, en la cual se aprecian pequeñas grietas que se generaron debido al cizallamiento. En contraste con el modelo virtual donde no se logró llegar al punto de fluencia en ningún espécimen, lo que resultó en la ausencia de grietas. De esta manera, se determinó que el modelo virtual no reprodujo de manera perfecta el efecto panel observado en las pruebas experimentales en algunos de los especímenes. Esto puede ser atribuido a diversas causas, como variaciones en las propiedades de los especímenes, diferencias en propiedades mecánicas, temperaturas, aplicaciones de carga, geometría, rigidez y restricciones de atizadores y actuador, en sentido horizontal. En el modelo virtual, puede ser influenciado por la transferencia de esfuerzos, el mallado y la ausencia de modelos de daño acumulado. La geometría del modelo virtual es una versión simplificada, sin curvas entre el ala y el alma, además una soldadura simplificada en las placas de continuidad. A pesar de que no se obtuvo una representación perfecta del efecto panel, los resultados

experimentales obtenidos por el HERA, determinaron que la zona de panel cumple los criterios de falla o agrietamiento en esta conexión.

Figura 52

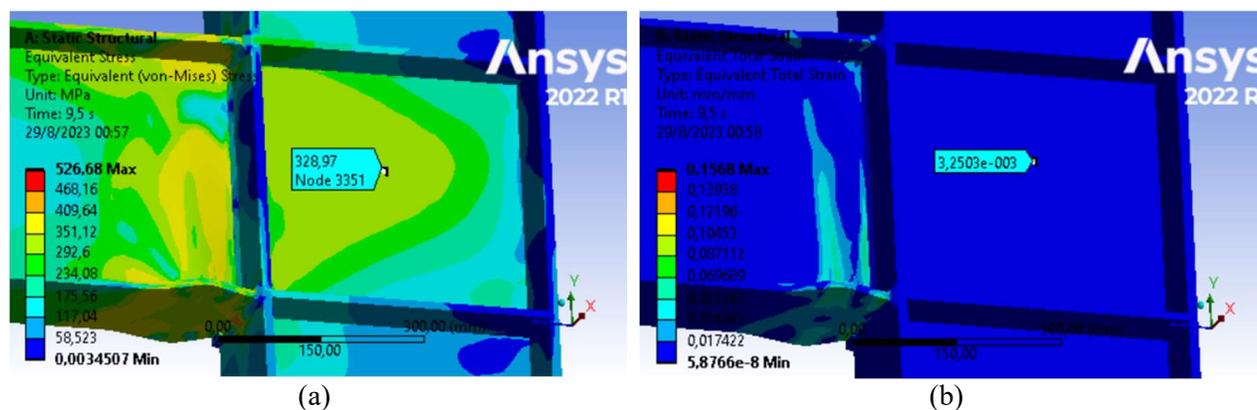
Daño en zona de panel.



Fuente: Clifton, 2005.

Figura 53

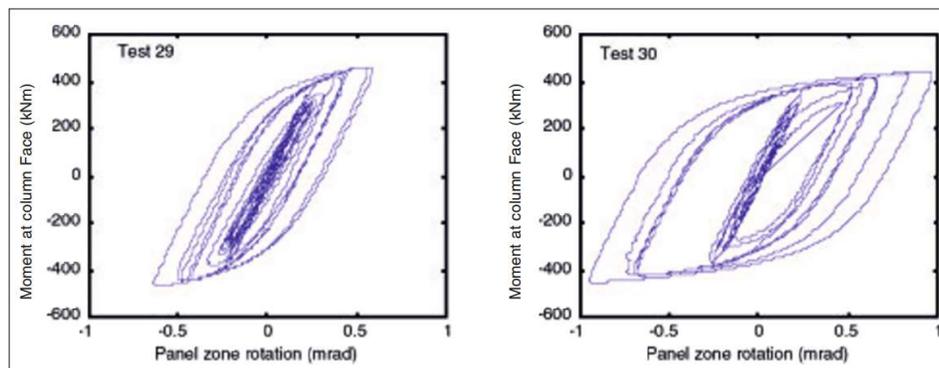
Esfuerzos típicos en zona de panel de especímenes virtuales.



Los esfuerzos y deformaciones en la zona del panel no se distribuyen de manera uniforme, por lo que, dependiendo de las ubicaciones utilizadas como referencia para obtener las rotaciones relativas y la metodología empleada, se pueden obtener resultados distintos. Debido a la limitación existente, donde la investigación utilizada fue realizada por terceros, no se conocen detalles sobre la metodología utilizada para obtener los diagramas de histéresis. Por esta razón, resulta muy difícil obtener resultados que representen las rotaciones de los diagramas de histéresis de la zona del panel presentados en la investigación con el fin de realizar una comparación.

Figura 54

Rotaciones en zona de panel de especímenes experimentales.



Se procedió a obtener los diagramas de histéresis de una forma típica, no con la intención de realizar una comparación numérica, sino más bien comparar el comportamiento de los diagramas. Aunque debe tomarse en cuenta que de la misma manera que se presentan variaciones en los valores numéricos, también se presentan variaciones en el comportamiento y la tendencia en las rotaciones, por lo que no sería válido afirmar conclusiones absolutas, sobre la capacidad del modelo virtual.

Figura 55

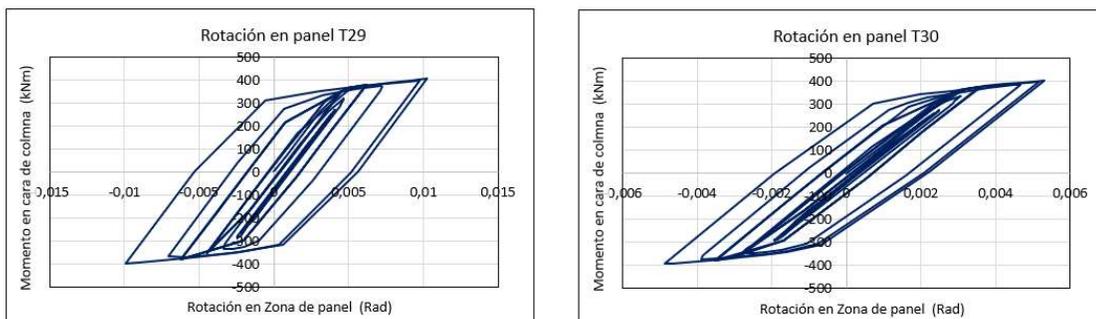
Puntos de extracción de rotaciones en zona de panel, punto 1 (a), punto 2 (b).



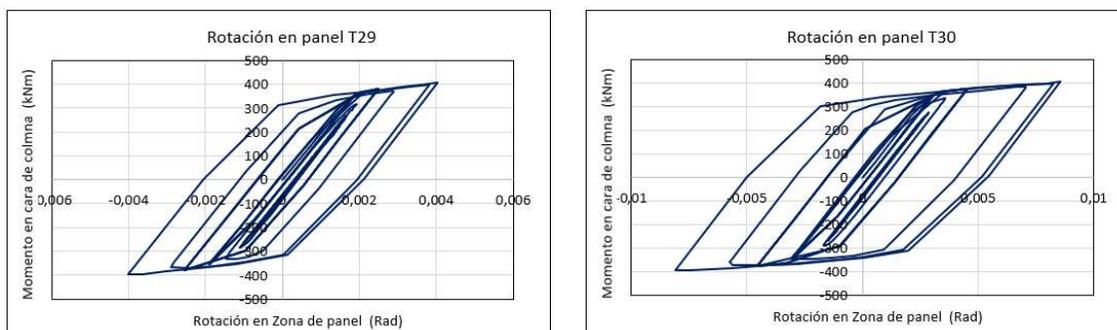
En las figuras anteriores se muestra una manera muy común de obtener la rotación para este caso se extraerán de dos maneras distintas, la primera punto 1 en la figura (a) y punto 2 en la figura (b).

Figura 56

Rotaciones en zona de panel de especímenes virtuales en posición 1.

**Figura 57**

Rotaciones en zona de panel de especímenes virtuales en posición 2.



En las figuras anteriores se muestra como la posición de los gráficos genera una gran variabilidad en las tendencias que se puedan observar, en primer caso el T29 presentó mayores rotaciones que el espécimen T30, lo que es contrario al comportamiento experimental, mientras en el segundo caso el espécimen T29 presentó rotaciones menores que el espécimen T30, de manera similar al espécimen experimental, debido a las limitaciones del caso no es posible valorar la precisión del programa en este ámbito.

Conclusiones

En la calibración de las propiedades geométricas y mecánicas, se constató que los diagramas resultantes del protocolo de cargas basado en desplazamientos mantenían una relativa estabilidad ante variaciones en las deformaciones unitarias en las curvas esfuerzo-deformación. Sin embargo, la precisión de los resultados se vio mayormente afectada por las dimensiones y resistencia de los materiales, siendo estos aspectos los que pudiesen haber introducido un margen de error más considerable. La caracterización del comportamiento histerético del material se limitó a los resultados obtenidos en las pruebas uniaxiales, utilizando un enfoque de endurecimiento cinemático multilineal y las curvas S-N. Esto se debió a las restricciones impuestas por las capacidades de cómputo matemático, que limitaron la aplicación del método explícito, y a las limitaciones en la interfaz de ANSYS que imposibilitaron la inclusión de modelos de daño acumulado, criterios de fractura o leyes de crecimiento de grietas en el enfoque implícito.

Los diagramas de histéresis generados a partir de las fuerzas de reacción y desplazamientos en la punta de la viga en el modelo virtual presentaron resultados con resistencias inferiores en relación con las pruebas experimentales. Específicamente, se observó que las fuerzas máximas en los modelos virtuales fueron entre un 12% y un 13% más bajas en comparación con los resultados obtenidos en las pruebas experimentales. Además, se pudo observar una degradación más rápida de la resistencia en las simulaciones virtuales, acentuando las diferencias en la respuesta de ambos enfoques.

Las conexiones sometidas a ensayos experimentales evidenciaron deformaciones plásticas ligeramente inferiores al 1% en la zona de panel, satisfaciendo los criterios de falla o agrietamiento en la zona de panel. Estos resultados contrastaron con la falta de desarrollo de deformaciones plásticas en el modelo virtual. Esta discrepancia resultó en una emulación limitada por parte del modelo virtual del efecto panel observado en las conexiones experimentales, aunque no fue posible evaluar la precisión de las rotaciones en el panel por las limitaciones, el programa cuenta con herramientas que permiten su extracción.

Las simulaciones mostraron que las deformaciones y pandeos locales en la viga siguieron un comportamiento similar a los resultados reales, si bien en algunos especímenes surgieron discrepancias. Las deformaciones equivalentes totales más elevadas obtenidas mediante el análisis de elementos finitos exhibieron paralelismos significativos con las áreas dañadas durante

las pruebas experimentales. Además, las simulaciones empleadas lograron proporcionar una confiabilidad aceptable en la determinación del momento de ruptura y en la localización de posibles puntos de ruptura. En los modelos evaluados con protocolo de cargas del AISC no se detectaron posibles grietas antes o durante los ciclos con rotaciones de 0.02 radianes. En lo que respecta a la estabilidad de los resultados, se observó una mayor consistencia en las deformaciones equivalentes en comparación con los esfuerzos equivalentes, lo que sugiere una tendencia hacia la predicción más confiable de las deformaciones en este contexto.

Considerando los resultados obtenidos en los modelos virtuales, donde los valores de momento y desplazamientos fueron inferiores a los experimentales, resalta la evidencia de que la conexión es capaz de soportar rotaciones de hasta 0.02 radianes, manteniendo una resistencia del 80% del momento plástico bajo el historial de cargas de la norma AISC 341-16. Esto la habilita como conexión apta para marcos intermedios resistentes a momento (IMF). Aunque se vislumbra un margen estrecho en su incumplimiento como conexión para sistemas de marcos especiales a momento (SMF), debido a la naturaleza conservadora de los resultados actuales, no se descarta la perspectiva de que futuras pruebas experimentales puedan generar resultados positivos.

Recomendaciones

Se sugiere llevar a cabo un análisis de independencia de malla, el cual involucra un proceso iterativo conocido como análisis de convergencia. En este procedimiento, se resuelve el modelo y se examinan los resultados, seguido de un refinamiento gradual de la malla mediante la disminución del tamaño de los elementos finitos. Esta secuencia se repite hasta que se observe valores esfuerzos y deformaciones que se sitúen dentro de una tolerancia aceptable. Esto con el propósito de determinar una malla óptima para el análisis.

Se aconseja evitar la división de un sólido en partes separadas que estén en contacto por adherencia, a menos que sea absolutamente necesario, especialmente en áreas donde los materiales experimentan incursiones en el rango no lineal. Esta precaución se debe a que tal separación podría dar lugar a complicaciones en la transferencia de esfuerzos y deformaciones, además de potenciales dificultades en el proceso de convergencia.

Es recomendable utilizar un dimensionamiento de contacto en malla en las superficies contacto unidas por adhesión, que experimenten deformaciones no lineales. Esta técnica produce divisiones idénticas en ambas superficies del contacto, lo cual favorece una transferencia más eficaz de esfuerzos y deformaciones.

El mallado utilizado tiene una gran influencia en los resultados. Se recomienda experimentar comparando los resultados entre elementos finitos formados por triángulos o pirámides y aquellos formados con rectángulos o hexaedros. Los triángulos pueden ofrecer mejores resultados en placas debido a su capacidad para adaptarse a deformaciones, mientras que los rectángulos pueden ser más convenientes para modelar soldaduras. Es importante considerar que la calidad y densidad de la malla, junto con otros factores, también desempeñan un papel fundamental en la precisión de la simulación.

Si se planea trabajar en un modelo utilizando el método explícito o dinámico, es aconsejable llevar a cabo una revisión exhaustiva del modelo, resolviéndolo previamente por el método estático para identificar posibles errores, como singularidades, problemas de convergencia o inconvenientes en los contactos, esto con fin de optimizar la utilización de los recursos de hardware y el tiempo del investigador. Debido a que un análisis que podría solucionarse en cuestión de horas empleando el método implícito, podría extenderse a días o incluso semanas al optar por el método explícito.

Se sugiere considerar la viabilidad de implementar modelos de daño acumulado derivados de cargas cíclicas, como Johnson-Cook o Lemaitre, en el contexto del método implícito de ANSYS, utilizando scripts generados a través de comandos APDL. En caso de ser factible, se recomienda también llevar a cabo una evaluación de la precisión de los resultados en comparación con pruebas experimentales.

Sería provechoso investigar la factibilidad de desarrollar un script basado en comandos APDL en ANSYS, que implemente elementos de nacimiento y muerte (EKILL) en nodos liberar los nodos en función de las deformaciones de ruptura. Este enfoque podría proporcionar información crucial sobre la ubicación, dirección y momento en el que se generan las grietas.

Se propone analizar la posibilidad de insertar pre-grietas con ubicación y dirección predefinidas, junto con sus propiedades, en medio o durante cargas cíclicas, mediante el uso de comandos APDL EKILL en ANSYS.

Se sugiere llevar a cabo experimentos con otras plataformas, como Abaqus, que brindan la capacidad de incorporar modelos de daño en análisis realizados por el método implícito.

Referencias

- Argentina: Argañaraz, P. L., Isla, F. A., Luccioni, B. M. (2018). Modelo con endurecimiento cinemático para hormigón reforzado con fibras. (n.d.). <https://docplayer.es/197072181-Modelo-con-endurecimiento-cinematico-para-hormigon-reforzado-con-fibras.html>
- Andrade García, C. (2015). Calificación de conexiones de perfiles I de acero – viga conectada al eje débil de la columna. [Tesis de Maestría, Universidad nacional de Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54270>
- ANSYS, Inc. (2013). Release Notes. https://www.kth.se/polopoly_fs/1.332104.1600689183!/rn_r15.pdf
- ANSYS, Inc. (2020). Metal Plasticity: Hardening of Plasticity — Lesson 3. Ansys Innovation Courses. Anasys 1 : <https://courses.ansys.com/index.php/courses/metal-plasticity/lessons/hardening-of-plasticity-lesson-3/>
- American Institute of Steel Construction.(2016a). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-16).AISC.
- American Institute of Steel Construction.(2016b).Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-16).AISC.
- American Welding Society. (2022). Código de soldadura estructural AWS D1.1 - Acero. American Welding Society: Miami, FL.
- Beer, F. P. Mazurek, D. F. (2020). Mecánica de materiales. McGraw-Hill Interamericana.
- Boracchini.A. (2018). Design and Analysis of Connections in Steel Structures. Ermst y Sohn.
- Bruneau M., Uang CM Y Sabelli R. (2011). Ductile Designo f Steel Structures.(2a ed.). Mc Graw Hill.
- Bazzano, J. B. Zerpa, J. P. (2017). Introducción al Análisis No Lineal de Estructuras. Universidad de la Republica Uruguay.
- Clifton, C. (2005). Desing and construction bulletin (DCB), HERA: Manukau, New Zealand.
- Código sísmico de Costa Rica 2010. (Revisión 2014). (2016). Costa Rica. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=72966&nValor3=89325&strTipM=TC

- Elizondo Herrera, M. A. (2019). Evaluación por métodos analíticos de curva histerética de una conexión de tubos de sección cuadrada y vigas I sin atiesadores internos (conexión WUF-W). [Tesis de Licenciatura, Universidad Latina de Costa Rica]. Repositorio Institucional de la Universidad Latina de Costa Rica. <https://hdl.handle.net/20.500.12411/902>
- Liberty Steel. (2019). Hot Rolled and Structural Steel Products. https://www.libertygfg.com/media/1851/hot-rolled-cat_edition8_2019.pdf
- Federal Emergency Management Agency. (2000a). Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, FEMA 350. <https://www.nehrp.gov/pdf/fema350.pdf>
- Federal Emergency Management Agency. (2000b). State of Art Report on Connection Performance, FEMA 355D. <https://www.nehrp.gov/pdf/fema355d.pdf>
- Feigenbaum, H. P., Dugdale, J., Dafalias, Y. F., Kourousis, K. I., & Plesek, J. (2012). Multiaxial ratcheting with advanced kinematic and directional distortional hardening rules. *International Journal of Solids and Structures*, 49(22), 3063–3076. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.06.006>
- Gioncu, V., Mazzolani, F. M., (2002). Ductility of Seismic Resistant Steel Structures. SPON PRESS.
- González Arroyo, W. A. (2018). Análisis de histéresis de la conexión WUF-W con columnas de sección cuadrada, por medio del método de elementos finitos. [Tesis de Licenciatura, Universidad Latina de Costa Rica]. Repositorio Institucional de la Universidad Latina de Costa Rica. <https://hdl.handle.net/20.500.12411/982>
- Güemes Gordo, A., Martín Piris, N.(2012). Ciencia de materiales para ingenieros. Pearson Educación. <https://www.ebooks7-24.com:443/?il=3277>
- Hernández Sampieri, R., Baptista Lucio, P., Fernández Collado, C.(2014). Metodología de la investigación. McGraw-Hill. <https://www.ebooks7-24.com:443/?il=721>
- Hyland, C. W., Clifton, C. G., Butterworth, J. W., Scholz, W., (2000). Performance of rigid welded beam to column connections under severe seismic conditions. 12th World Conference on Earthquake Engineering en el año 2000. <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/1601.pdf>
- Kassimali, A. (2015). Análisis estructural (5ª ed.). Cengage.

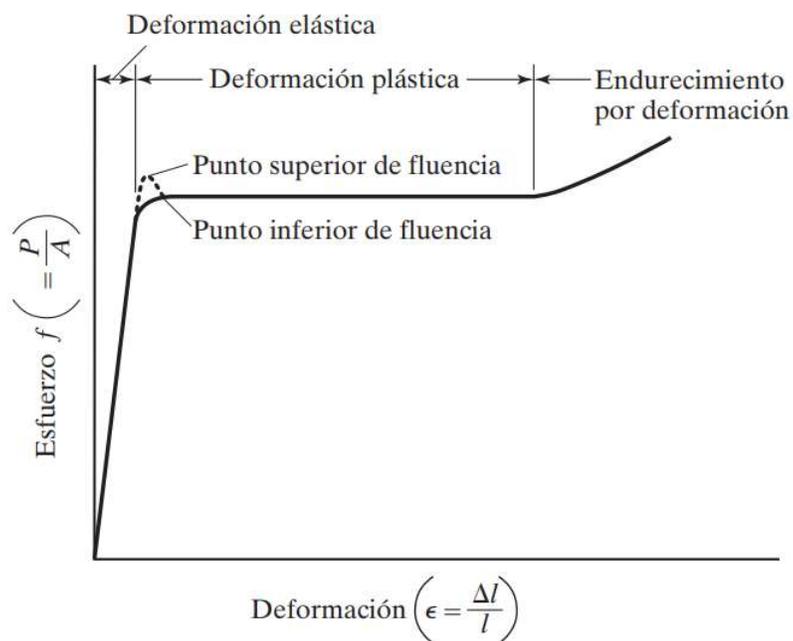
- Kalpakjian, S., Schmid, S. R.(2014). Manufactura, ingeniería y tecnología: tecnología de materiales. Pearson Educación. <https://www.ebooks7-24.com:443/?il=3641>
- Krawinkler H. (1992). Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures: ATC-24. 1992, Applied Technology Council, California, pp. 1-57.
- Murillo, L. C. (2022). Simulación Numérica de procesos de fractura en conexiones de acero a momento. [Tesis de Licenciatura no publicada]. Universidad Latina de Costa Rica.
- McCormac, J., Csernak S. F. (2012). Diseño de estructuras de acero (5ª. Edición). Alfaomega.
- Scholz, W, Clifton, C (2000). Improved welded connections for earthquake loading. 12WCEE. (8). <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/1304.pdf>
- Segui W. T. (2000). Diseño de estructuras de acero con LRFD (Segunda edición). International Thomson Editores.
- Maricely, D. A. (2014). Estimación del ensayo de compresión con deformación plana tipo FORD utilizando el método de elementos finitos y utilizando curvas de comportamiento obtenidas en un ensayo de tracción. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652014000200008
- Mamlouk, M. S., Zaniewski, J. P.(2009). Materiales para ingeniería civil. Pearson Educación. <https://www.ebooks7-24.com:443/?il=3723>
- Molineaux, J. M.(2000).Diseño de proyectos de ingeniería. Instituto Tecnológico de Santo Domingo.
- Olleros, I.R. (2016). Mecánica de sólidos. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ortiz, L. (2007). Resistencia de los materiales. McGraw-Hill.
- Segui, W. T. (2018).Steel Design.(6a ed).Cengage.
- Salmon C., G., Johnson J., E., y Malhas F., A. (2009). Steel Structures Design and Behavior (1a ed).Person Prentice Hall.
- Short A., et (2004). Earthquake Performance of Welded Moment Resisting Connections, New Zealand Welding Centre Report 8-28, HERA: Auckland, New Zealand.
- Taheri, H. (2020). Seismic Evaluation of Welded Moment-resisting Connections, Universidad de Auckland. <https://researchspace.auckland.ac.nz/bitstream/handle/2292/55221/Taheri%20Heravi-2020-thesis.pdf?sequence=4>

- Thompson, E. (2023, 11 abril). What is Equivalent Stress?. Ansys, Inc. <https://www.ansys.com/blog/what-is-equivalent-stress>
- Urueña, C. H. González, J. M. Arrieta, J. C. (2016). El método de los elementos finitos: un enfoque teórico práctico. ed. Bogotá. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Vinnakota S. (2006). Estructuras de acero: Comportamiento y LRFD. MwGraw-Hill Interamericana.
- Woerner, W. Short A. Ferguson, W.G. (2006). Seismic Reformance of Fillet Welds in Moment Resisting Connections. Universidad de Auckland y HERA.
- Zienkiewicz, O. C. (2018). El método de los elementos finitos. ed. Barcelona. Editorial Reverté.

Anexos

Figura 58

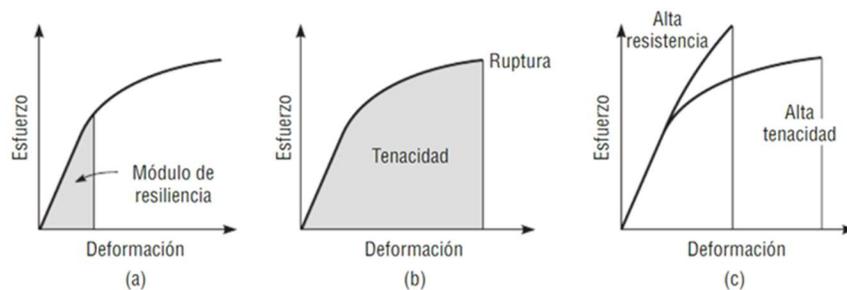
Diagrama esfuerzo - deformación de un acero estructural dulce



Fuente: McCormac, 2012

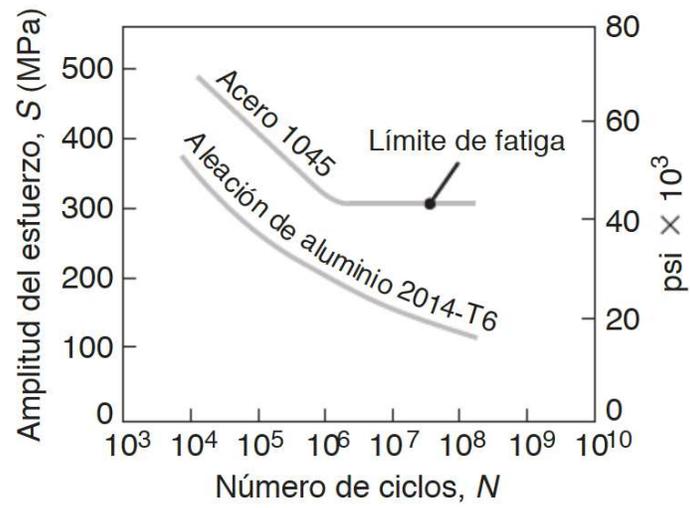
Figura 59

Áreas bajo las curvas de esfuerzo-deformación: (a) módulo de resiliencia, (b) tenacidad y (c) materiales de alta resistencia y alta tenacidad.

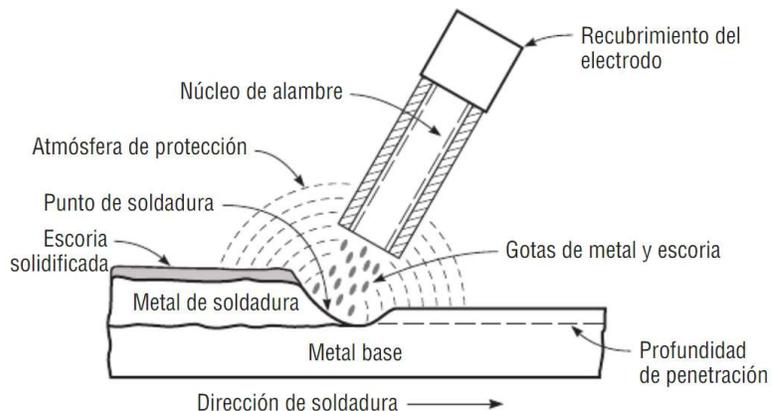


Fuente: Mamlouk, 2009

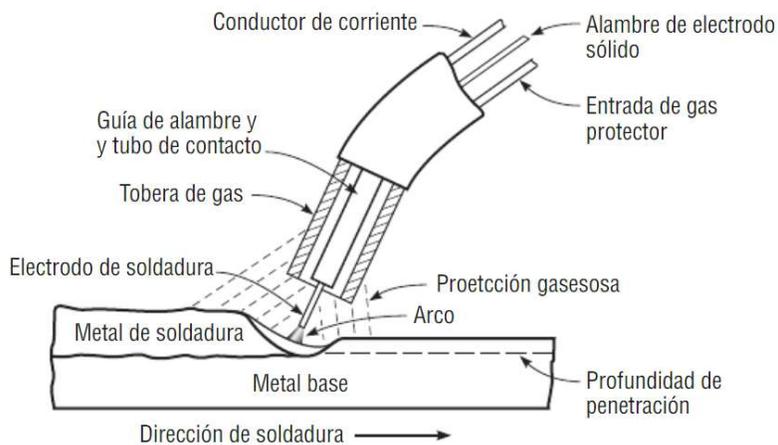
Figura 60
Curva típica S-N para acero y aluminio



Fuente: Kalpakjian, 2014

Figura 61*Diagrama esquemático de soldadura MMAW*

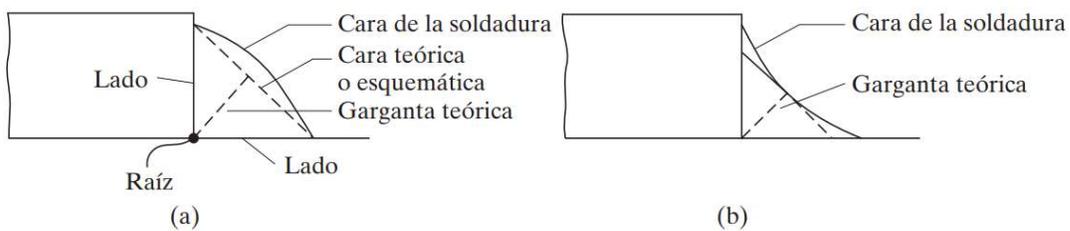
Fuente: Mamlouk, 2009

Figura 62*Esquema de soldadura GMAW*

Fuente: Mamlouk, 2009

Figura 63

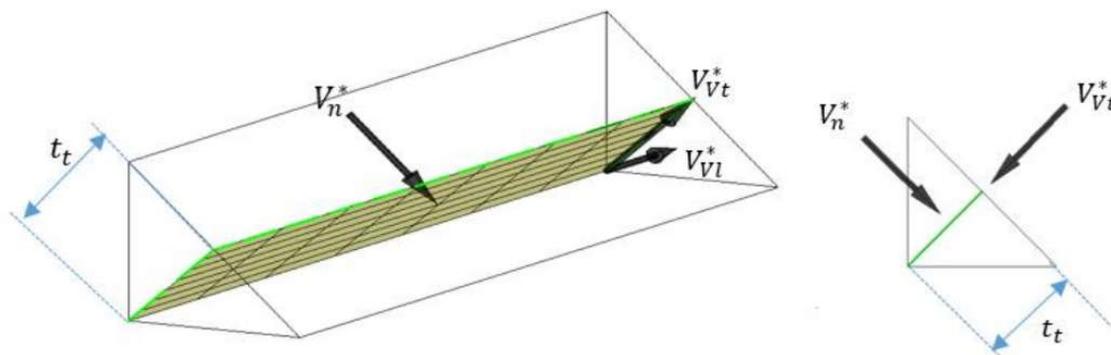
Soldadura filete: (a) Superficie convexa. (b) Superficie cóncava.



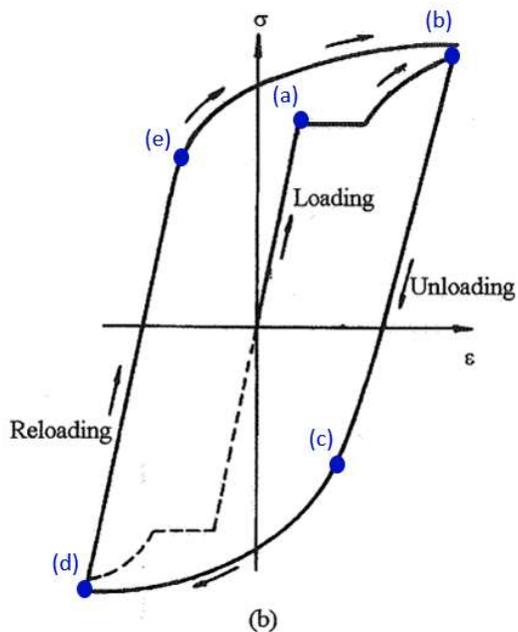
Fuente: McCormac, 2012

Figura 64

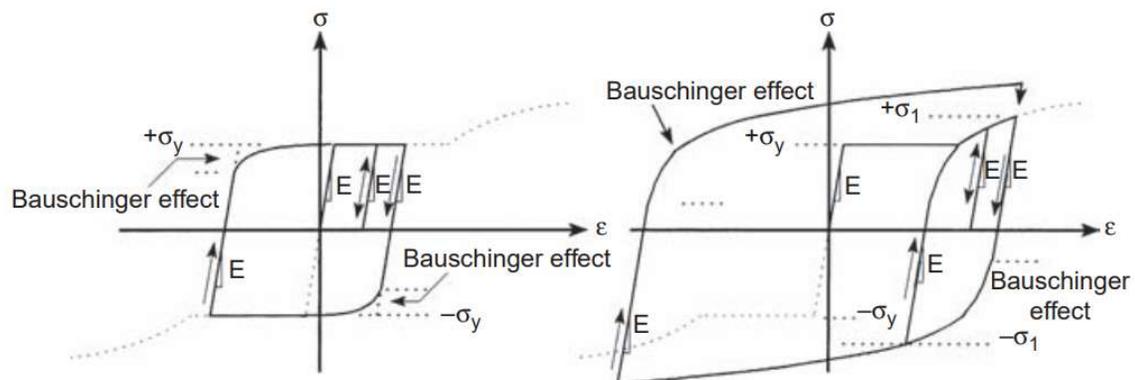
Fuerzas de diseño en una soldadura de filete de NZS 3404: Parte 2.



Fuente: Taheri, 2020

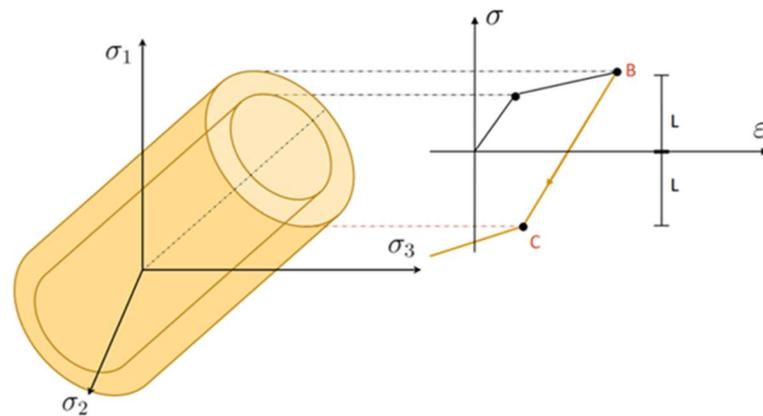
Figura 65*Relación esfuerzo-deformación cíclica del acero estructural*

Fuente: Gioncu, 2012. Modificado por autor.

Figura 66*Efecto Bauschinger*

Fuente: Bruneau, 2011

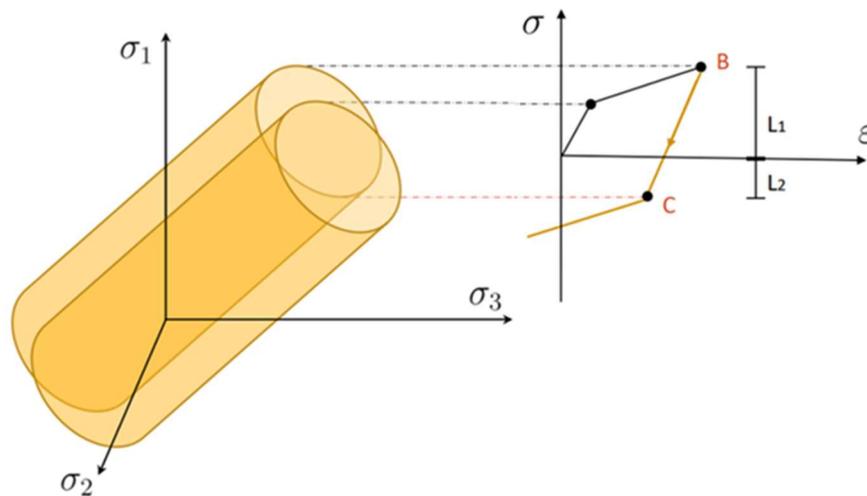
Figura 67
Representación del endurecimiento isotrópico



Nota. Relación entre la superficie de fluencia y la tensión de Von Mises en un gráfico unidimensional

Fuente: ANSYS, 2020

Figura 68
Endurecimiento Cinemático

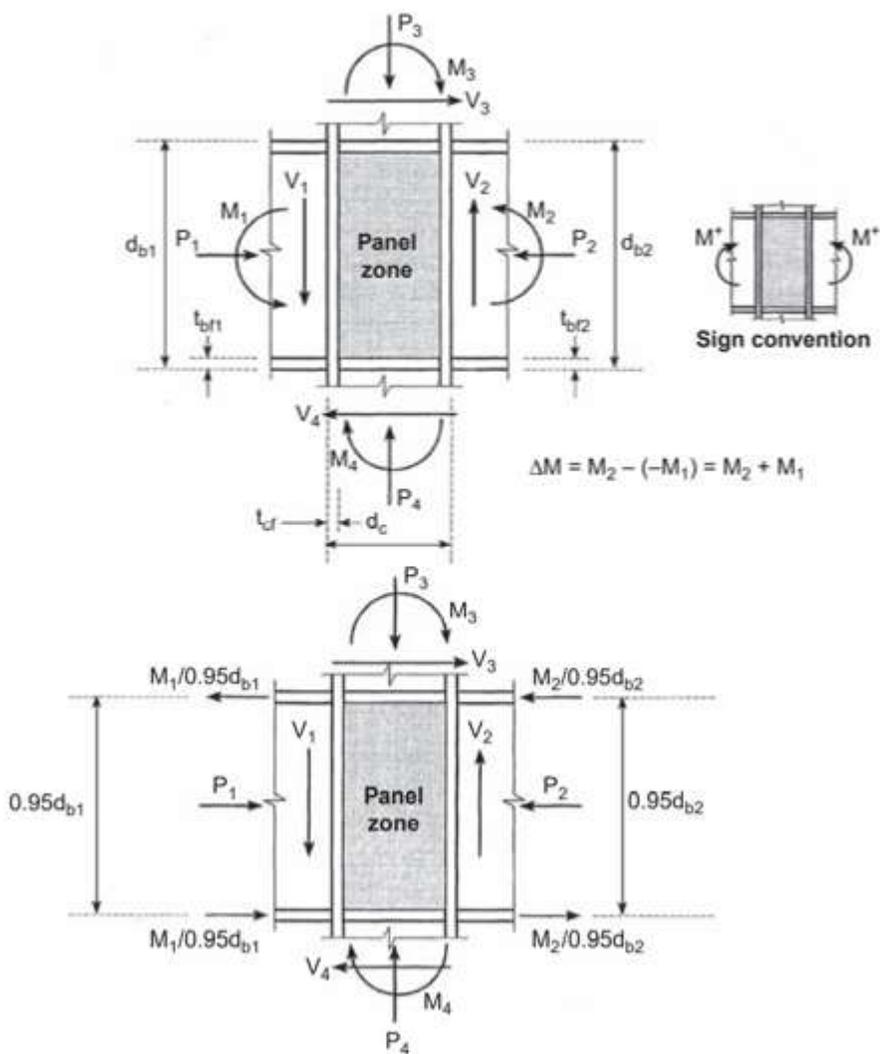


Nota. Representado por el desplazamiento en la superficie de fluencia y la tensión de Von Mises en un gráfico unidimensional

Fuente: ANSYS, 2020

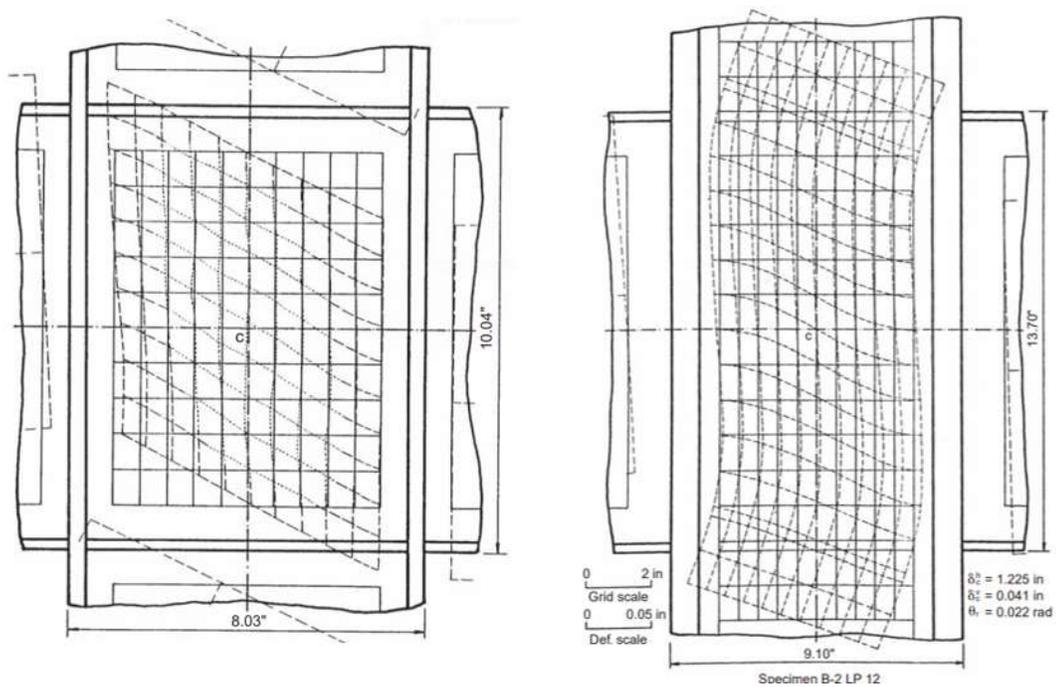
Figura 69

Momentos, fuerzas cortantes y fuerzas axiales que actúan sobre la zona del panel



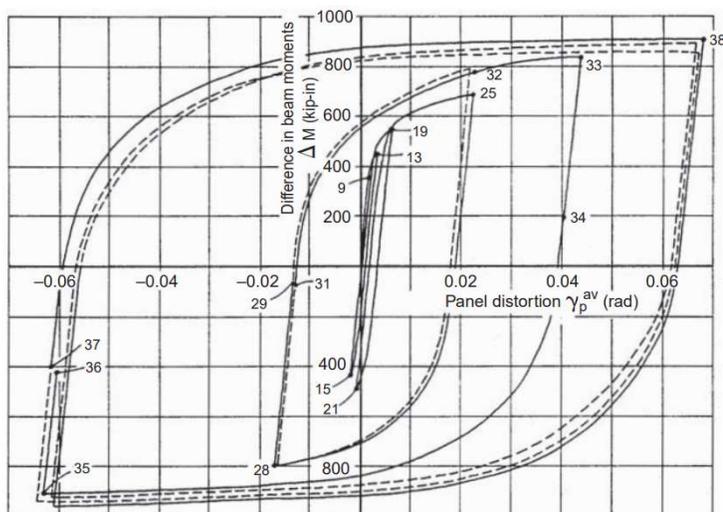
Fuente: Bruneau, 2011

Figura 70
Distorsiones en la Zona Panel



Fuente: Bruneau, 2011

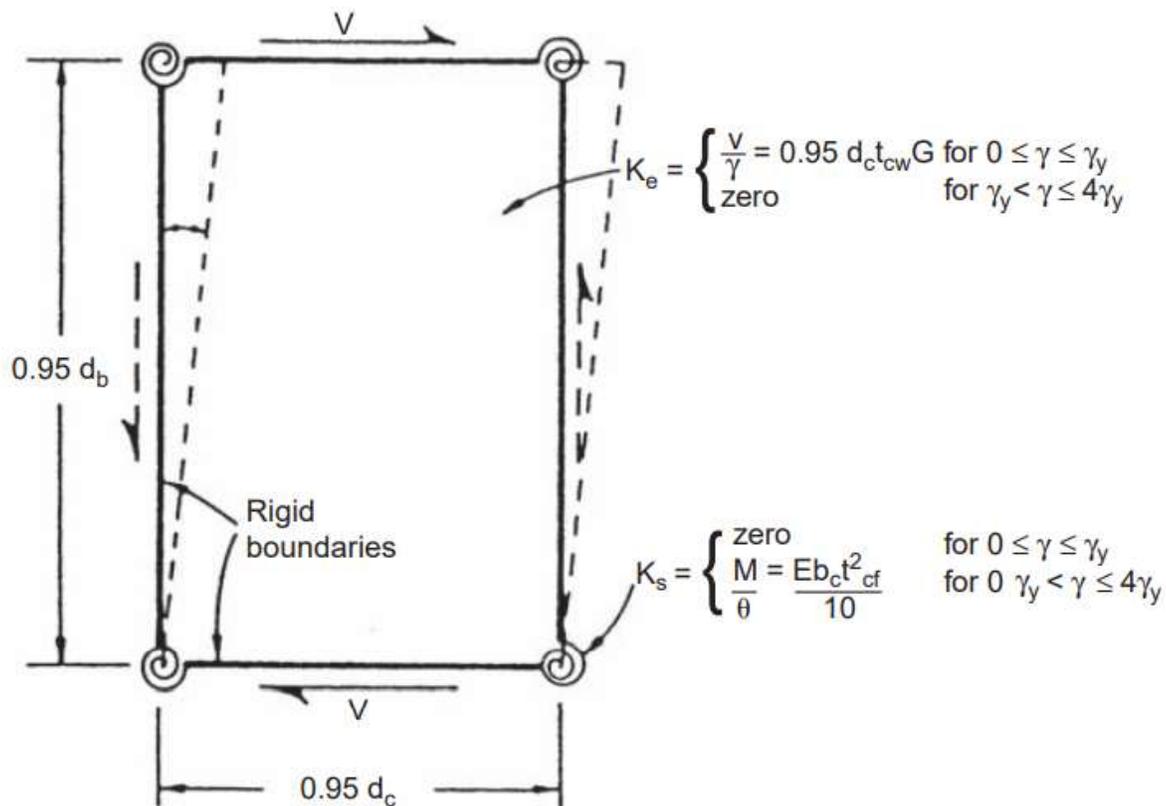
Figura 71
Diagrama histéresis en zona de panel



Fuente: Bruneau, 2011

Figura 72

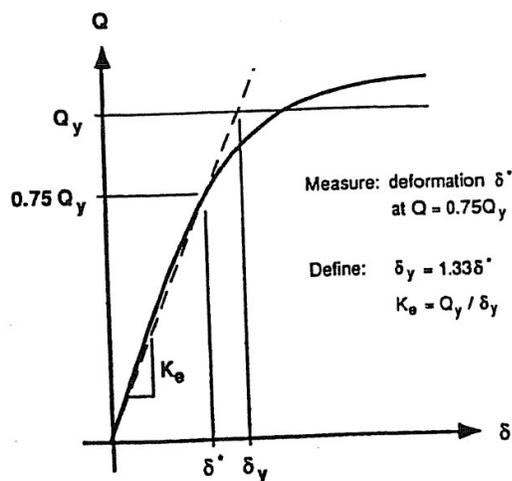
Modelo simplificado de zona de panel



Fuente: Bruneau, 2011

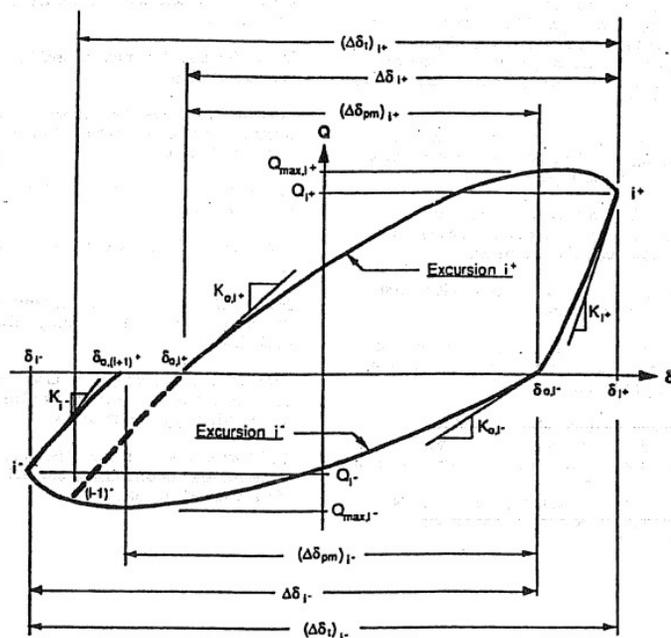
Figura 73

Determinación de la deformación de fluencia δ_y y de la rigidez elástica K_e .



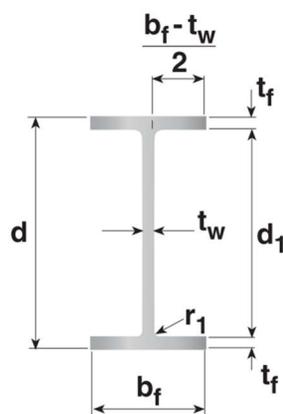
Fuente: Krawinkler, 1992

Figura 74
Parámetros en un ciclo



Fuente: Krawinkler, 1992

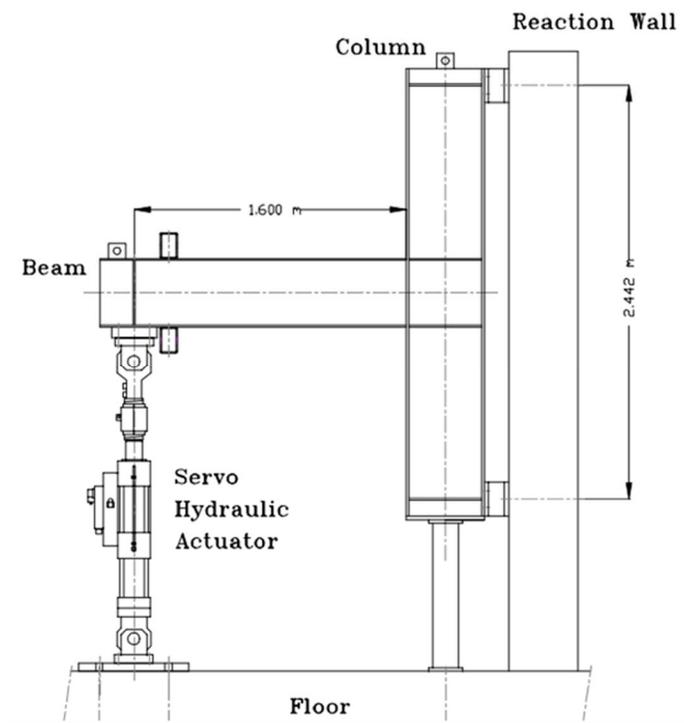
Figura 75
Simbología de dimensiones de perfil tipo W



Fuente: Liberty Steel, 2019

Figura 76

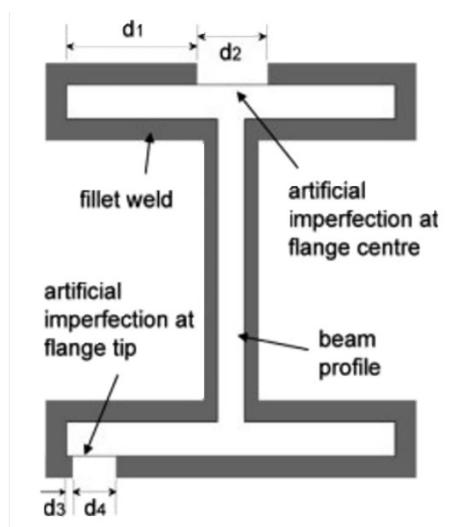
Esquema de modelo utilizado en pruebas experimentales de laboratorio



Fuente: Scholz, 2000

Figura 77

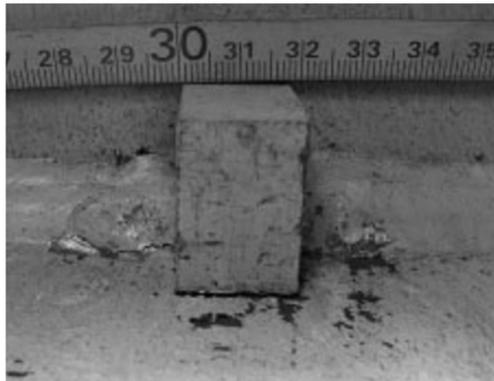
Esquema de defectos en soldadura



Fuente: Woerner, 2006

Figura 78

Fotografía de defecto en patín de la viga superior con cubo



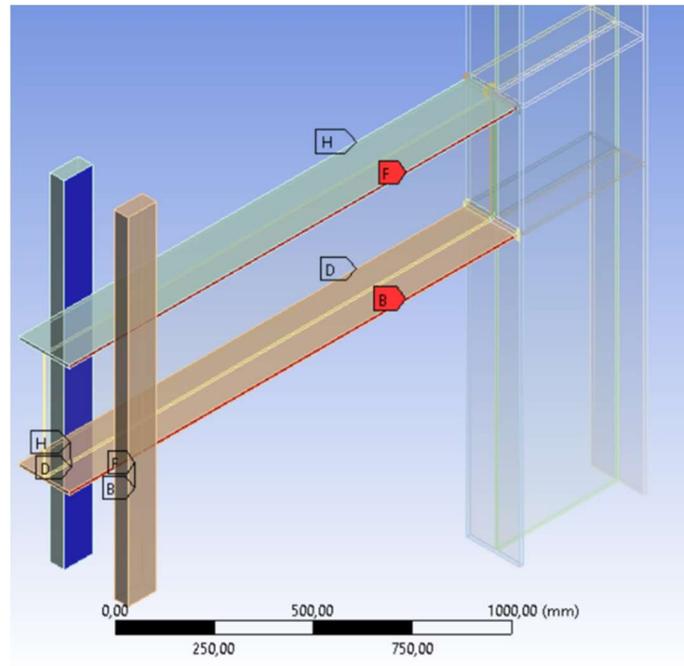
Fuente: Woerner, 2006

Figura 79

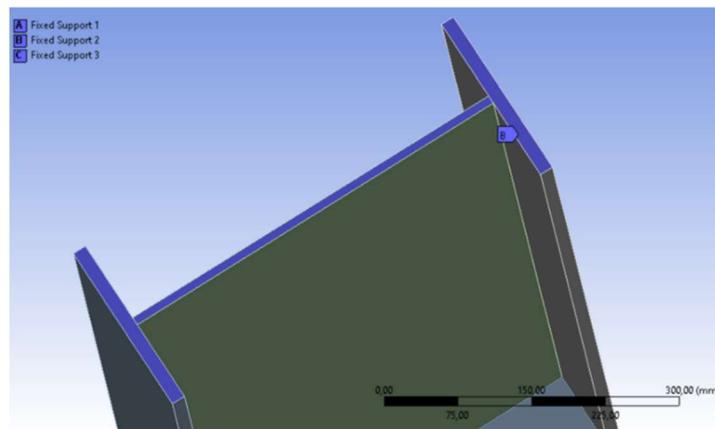
Fotografía de defecto en patín inferior de la viga



Fuente: Woerner, 2006

Figura 80*Contacto sin fricción entre barras de control de pandeo torsional y viga*

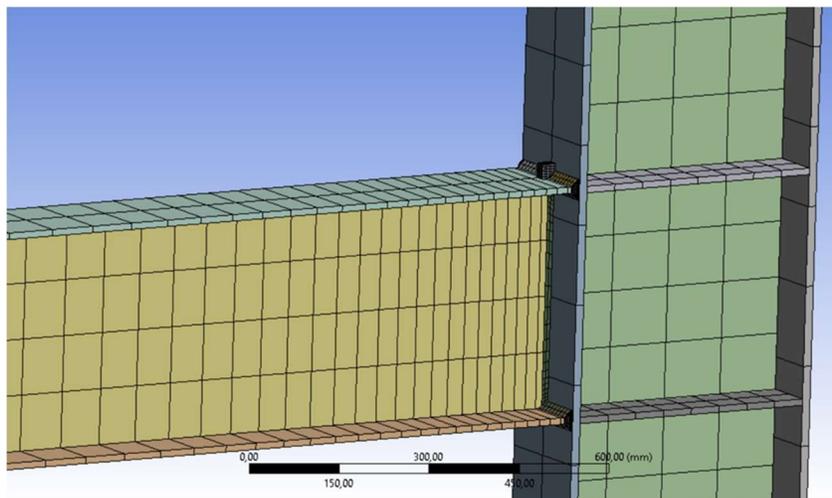
Fuente: Propia

Figura 81*Soporte fijo en extremo de columna*

Nota. Restricción de todos los grados de libertad en extremos de columna mediante soporte fijo.

Fuente: Propia

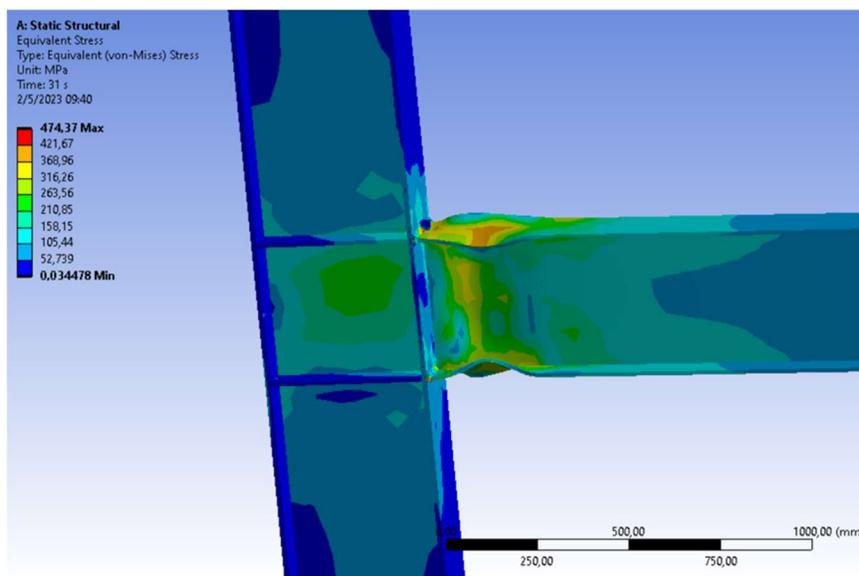
Figura 82
Discretización del modelo



Nota. columna con mallado por defecto, viga con mallada variable

Fuente: Propia

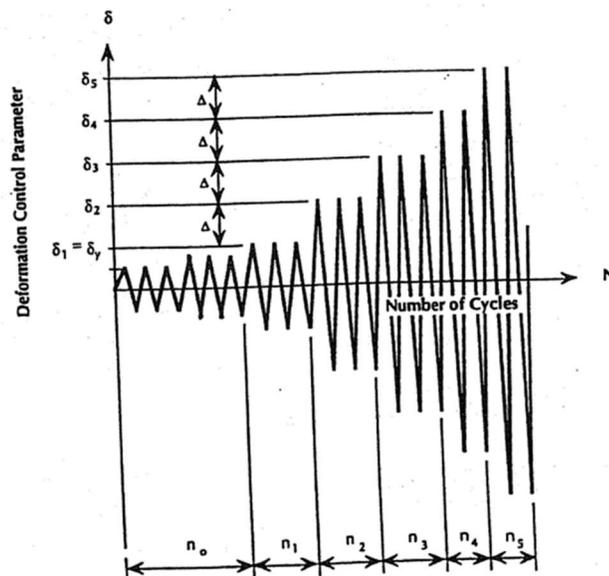
Figura 83
Esfuerzos equivalentes de Von-Mises en simulación del espécimen T29.



Fuente: Propia

Figura 84

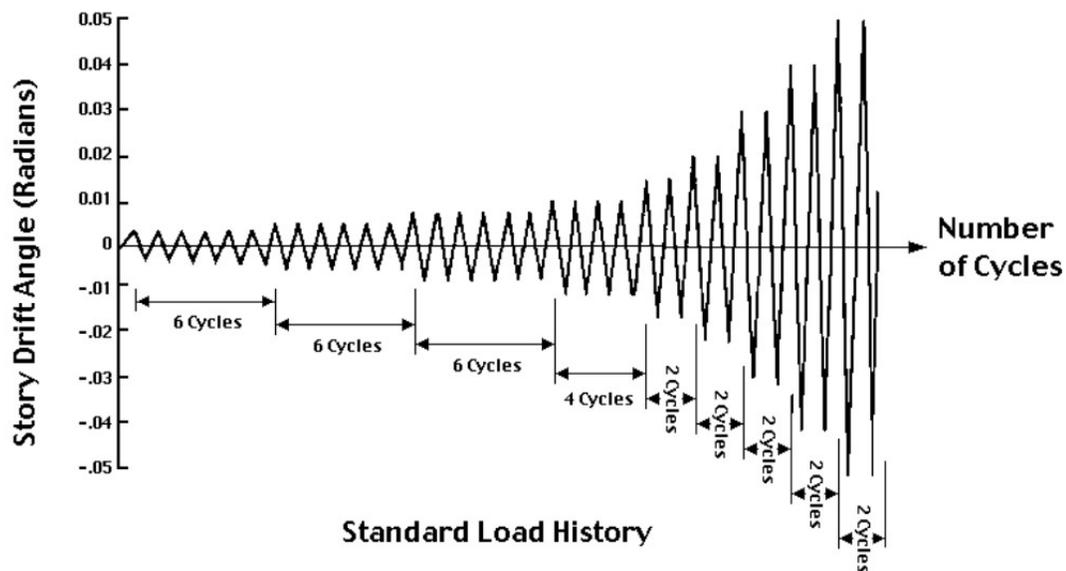
Historial de deformación para prueba de múltiples pasos ATC - 24.



Fuente: Krawinkler, 1992

Figura 85

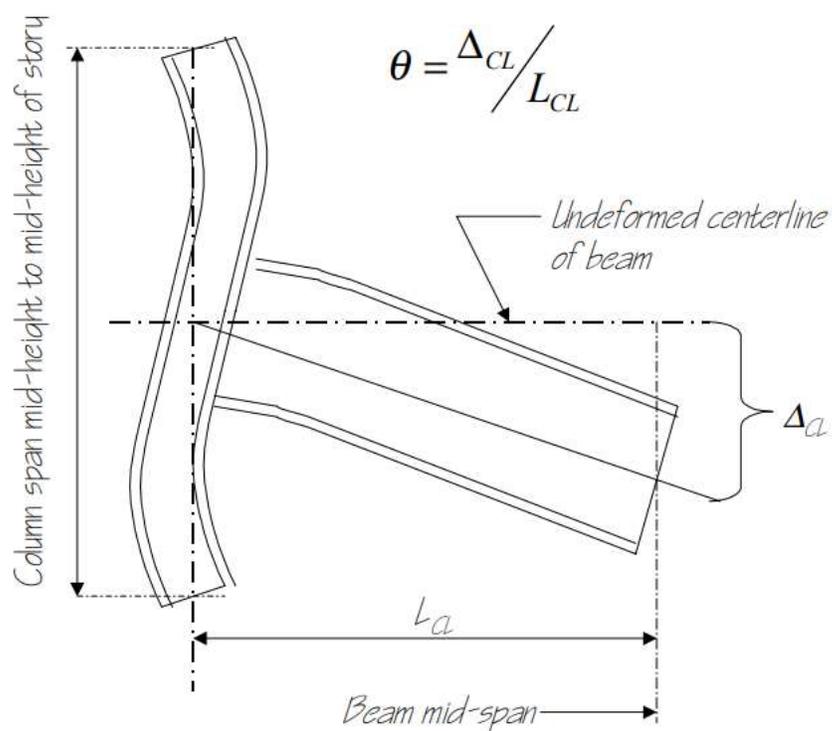
Historial de carga para precalificación AISC-16.



Fuente: Federal Emergency Management Agency, 2000b.

Figura 86

Rotación angular del ensamblaje de prueba.



Fuente: American Institute of Steel Construction, 2016a.

Tabla 20*Resumen de fuerzas máximas y ciclos hasta el fallo.*

Especimen	Experimental	Virtual	Experimental	Virtual
	F_{max} , (kN)	F_{max} , (kN)	Ciclos hasta el fallo N_f	Ciclos hasta el fallo N_f ,
MRC-2	290	249	5, 4 Δ	4, 3 Δ
T22	281	247	9, 3 Δ	3, 3 Δ
T27	288	253	8, 3 Δ	1, 3 Δ
T28	289	251	3, 3 Δ	2, 3 Δ
T29	292	253	3, 3 Δ	1, 3 Δ
T30	280	253	3, 3 Δ	1, 3 Δ

Tabla 21*Resumen de fallos en material, historial ATC-24, 1992.*

Especimen	Experimental	Virtual	Virtual
	Fallo material	Fallo material	Deformación (mm/mm)
MRC-2	-	7, 3 Δ	0.22
T22	3, 3 Δ	2, 3 Δ	0.26
T27	-	2, 3 Δ	0.26
T28	-	2, 3 Δ	0.25
T29	-	3, 3 Δ	0.27
T30	2, 3 Δ	1, 3 Δ	0.34

Tabla 22

Resumen de fallos en material, historial AISC 341-16.

Especimen	Ciclos hasta el	Deformación equivalente
	Fallo del material	(mm/mm)
MRC2	$\delta^{-}, 2, 0.04$ rad	0.24
T22	$\delta^{-}, 2, 0.03$ rad	0.25
T27	$\delta^{-}, 2, 0.03$ rad	0.23
T28	-	-
T29	$\delta^{-}, 2, 0.03$ rad	0.23
T30	$\delta^{-}, 2, 0.03$ rad	0.3

Tabla 23

Factores de reducción de la resistencia del estado límite último (ϕ) (según NZS 3404: Parte 1:1997).

Capacidad de diseño en el estado límite último para	Sección o cláusula	Factor de reducción de la fuerza (ϕ)	
		Categoría SP	Categoría GP
Conexión soldada: soldadura a tope de penetración completa soldadura de filete longitudinal en RHS	9.7.2.7	0.90	0.60
($t < 3$ mm)	9.7.3.10	0.70	-
otra soldadura de filete e incompleta soldadura a tope de penetración	9.7.3.10	0.80	0.60
soldadura de tapón o ranura	9.7.4	0.80	0.60
grupo de soldadura	9.8	0.80	0.60

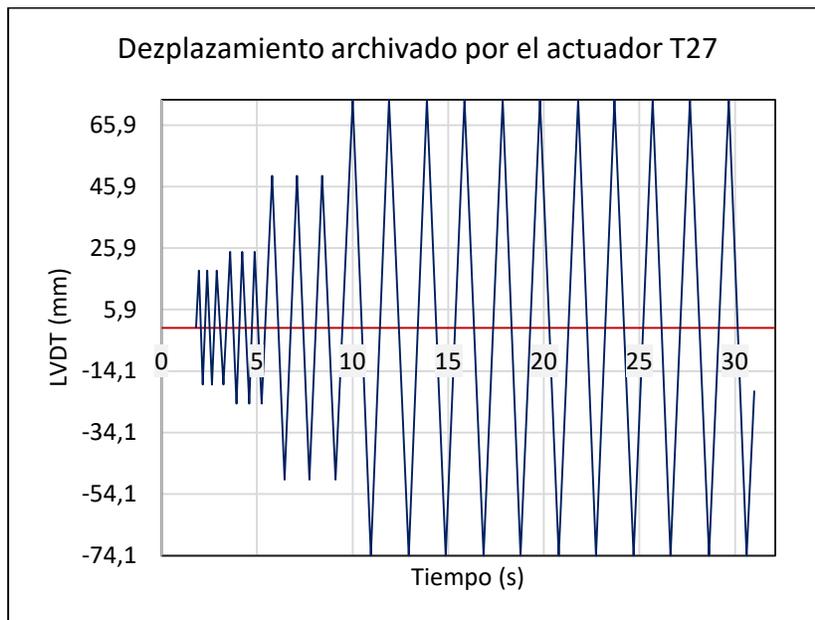
Tabla 24

Factor de reducción para una conexión de traslape soldada (K_r) (según NZS 3404: Parte 1:1997).

Longitud de soldadura (L_w) [Metros]	$L_w \leq 1.7$	$1.7 < L_w \leq 8.0$	$L_w > 8.0$
K_r	1.00	$1.10 - 0.06L_w$	0.62

Gráfico 12

Desplazamiento generado por el actuador en espécimen T27

**Gráfico 13**

Desplazamiento generado por el actuador en espécimen T28

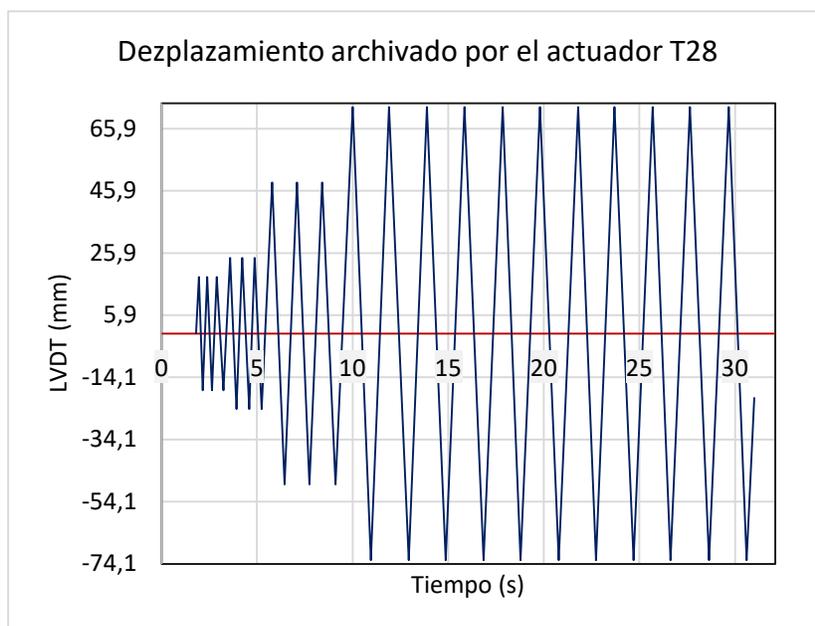
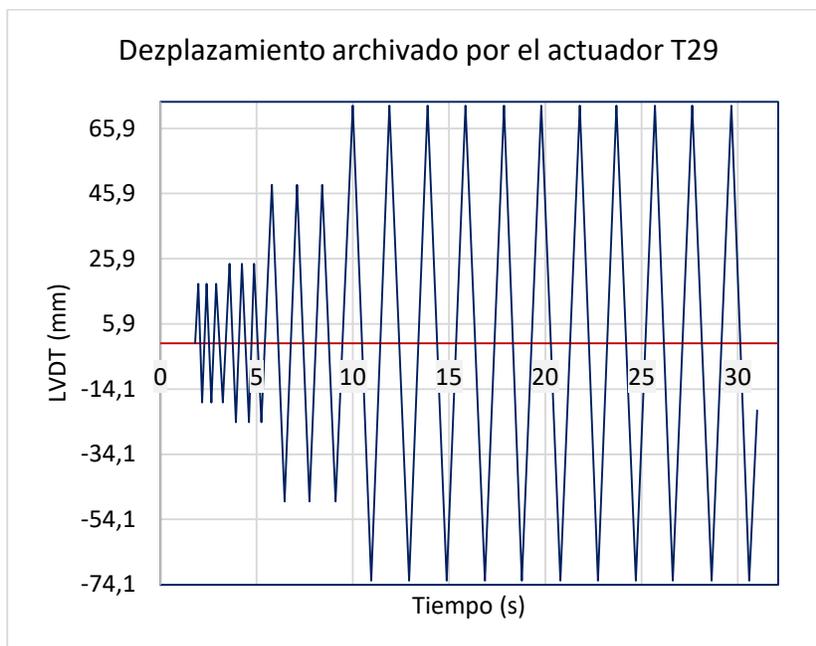


Gráfico 14

Desplazamiento generado por el actuador en espécimen T29

**Gráfico 15**

Desplazamiento generado por el actuador en espécimen T30

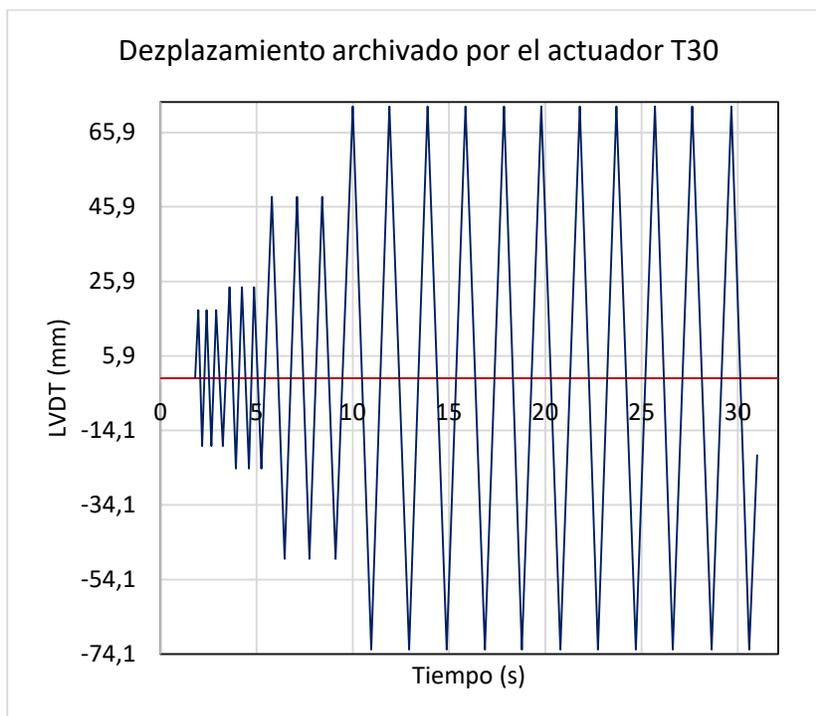
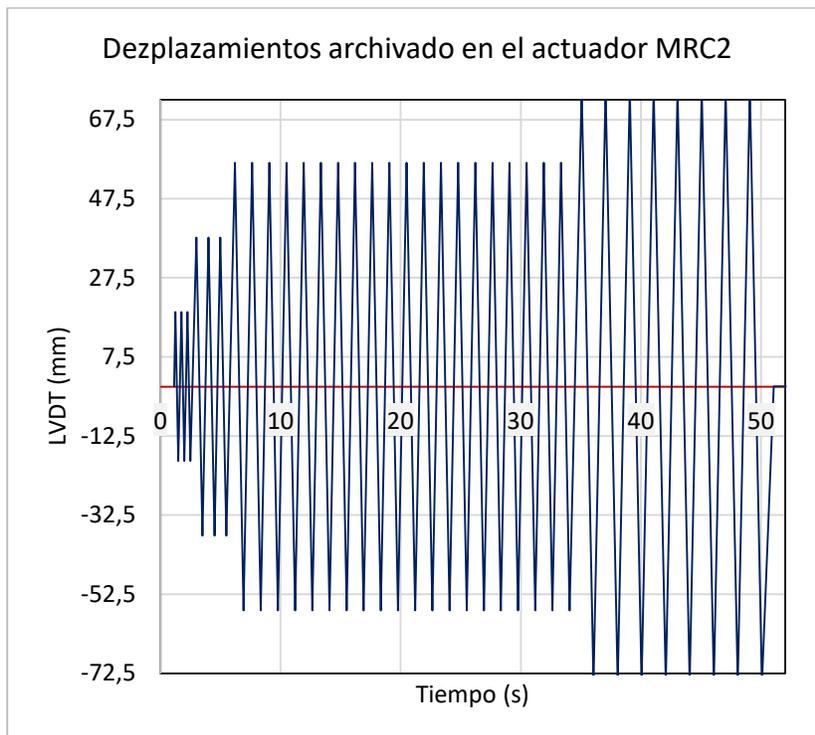


Gráfico 16

Desplazamiento generado por el actuador en espécimen MRC-2

**Gráfico 17**

Desplazamiento según el protocolo de precalificación de la norma AISC 341

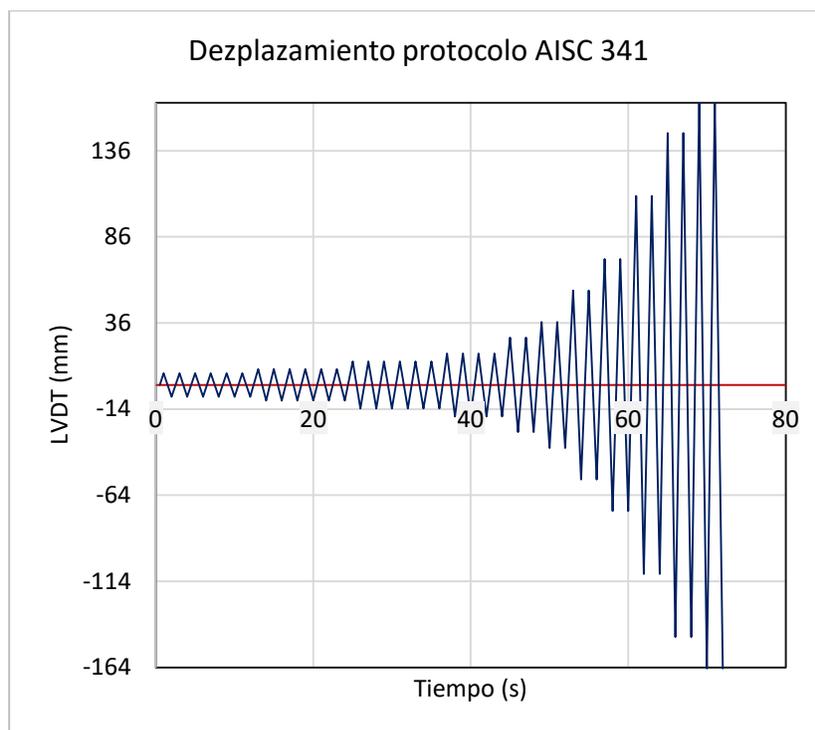


Gráfico 18

Diagrama de histéresis espécimen virtual T27, historial ATC-24.

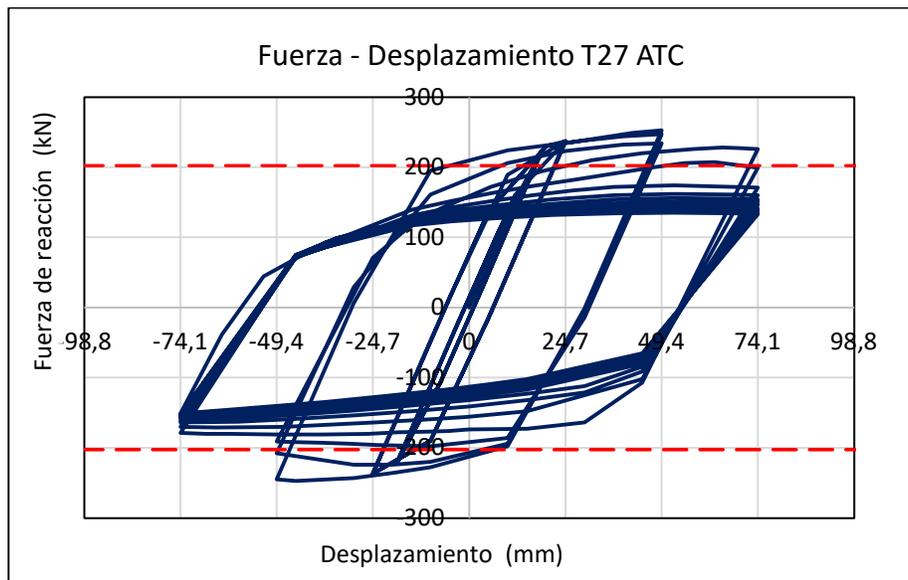
**Gráfico 19**

Diagrama de histéresis espécimen virtual T28, historial ATC-24.

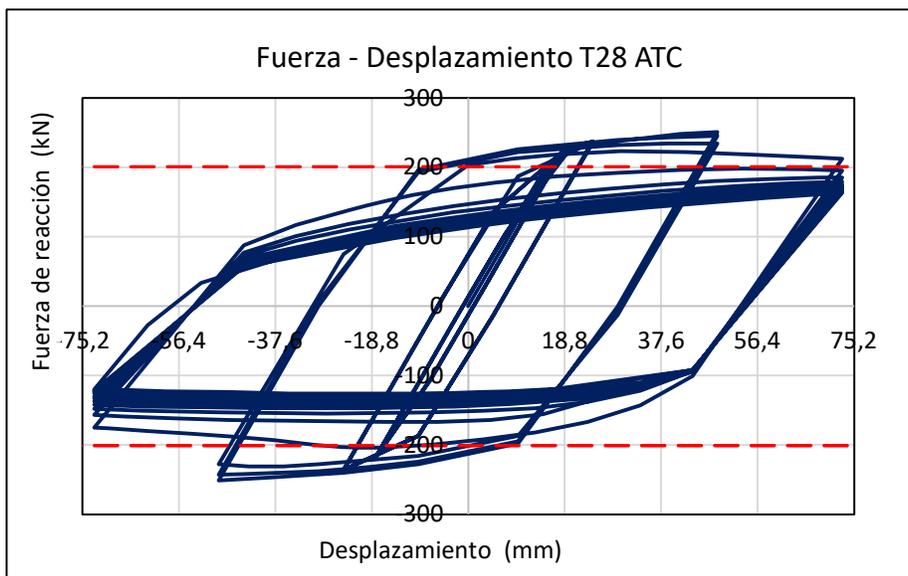


Gráfico 20

Diagrama de histéresis espécimen virtual, historial ATC-24.

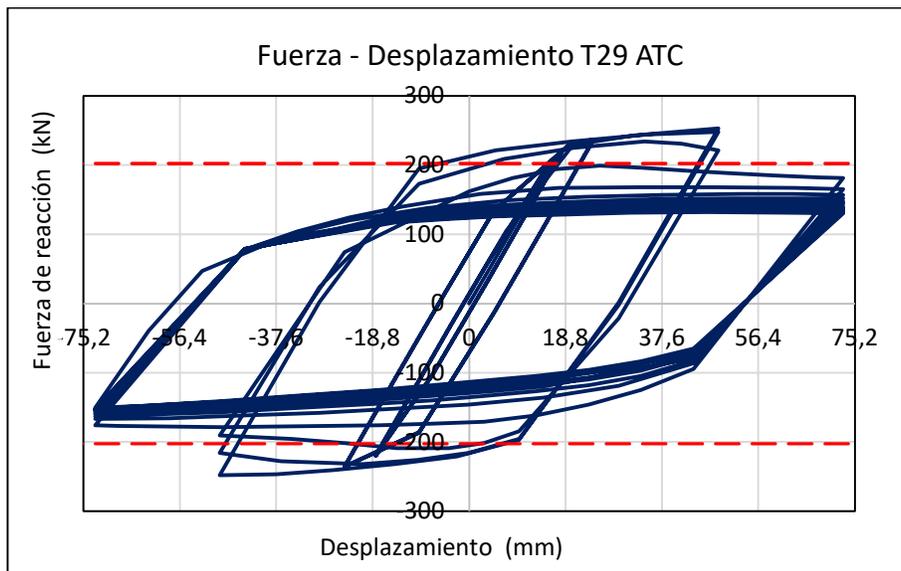
**Gráfico 21**

Diagrama de histéresis espécimen virtual T30, historial ATC-24.

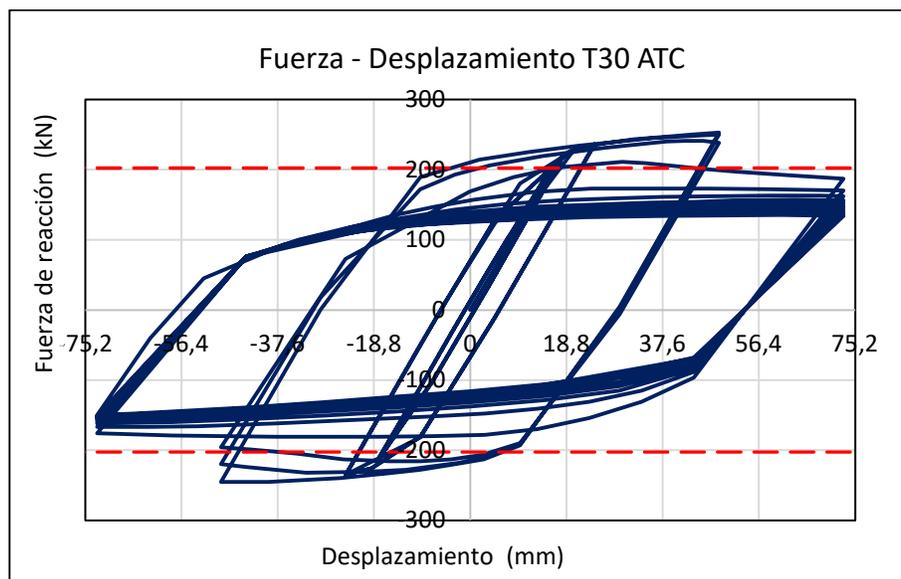


Gráfico 22

Momento en la cara de la columna espécimen T27, historial ASIC 341-16.

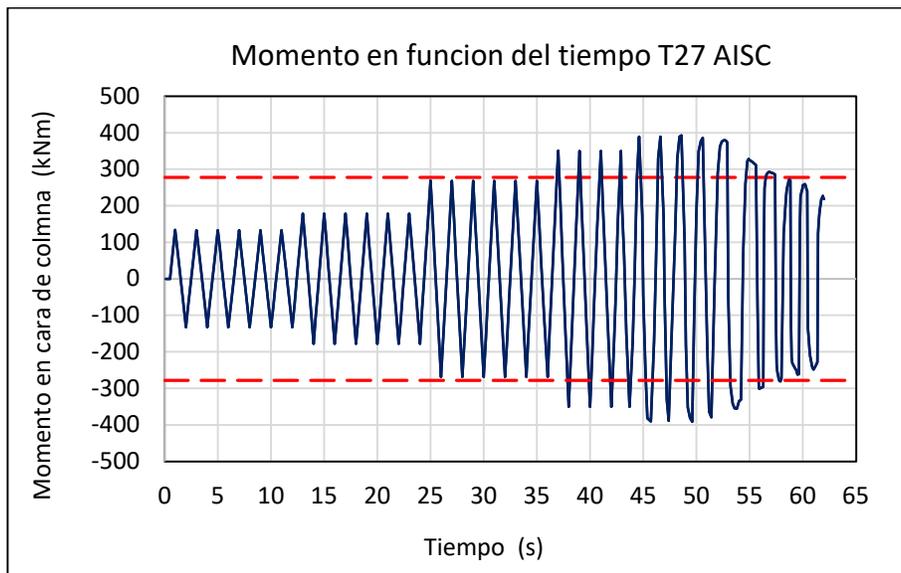
**Gráfico 23**

Diagrama de histéresis espécimen virtual MRC2, historial ATC-24.

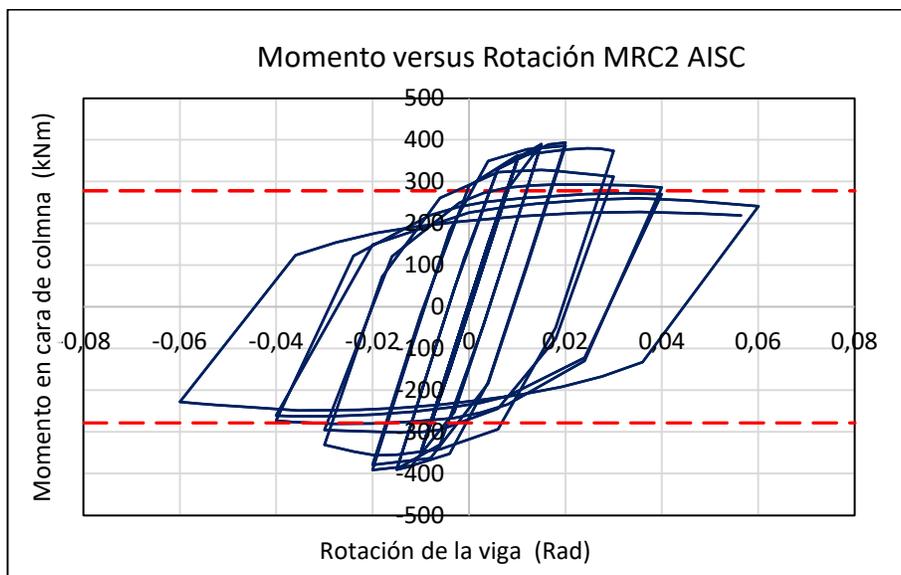


Gráfico 24

Momento en la cara de la columna espécimen T22, historial ASIC 341-16

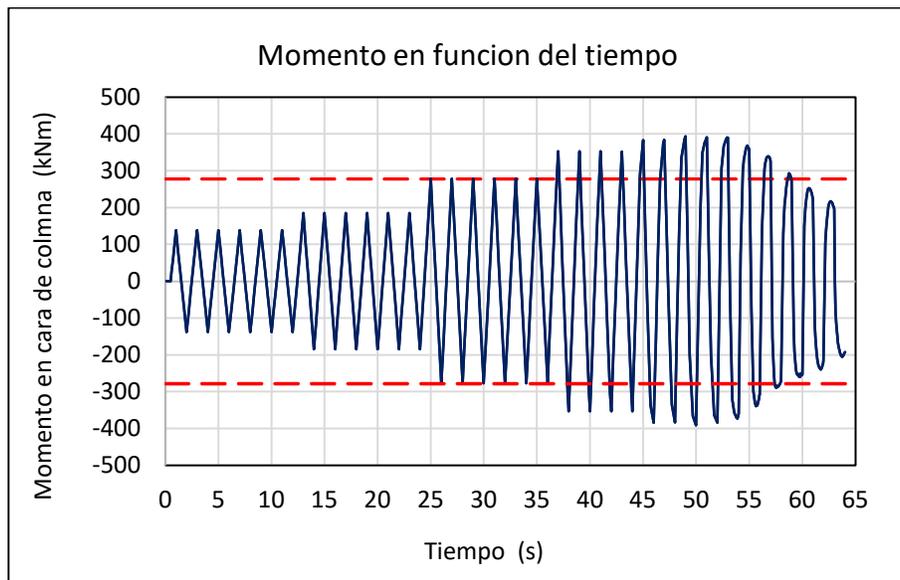
**Gráfico 25**

Diagrama de histéresis espécimen T27, historial ASIC 341-16.

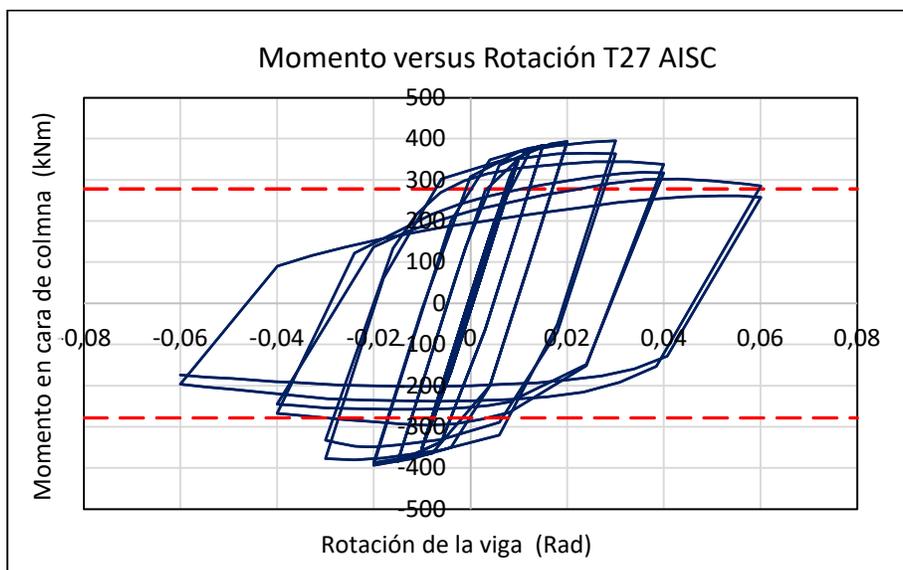


Gráfico 26

Diagrama de histéresis espécimen T29, historial ASIC 341-16.

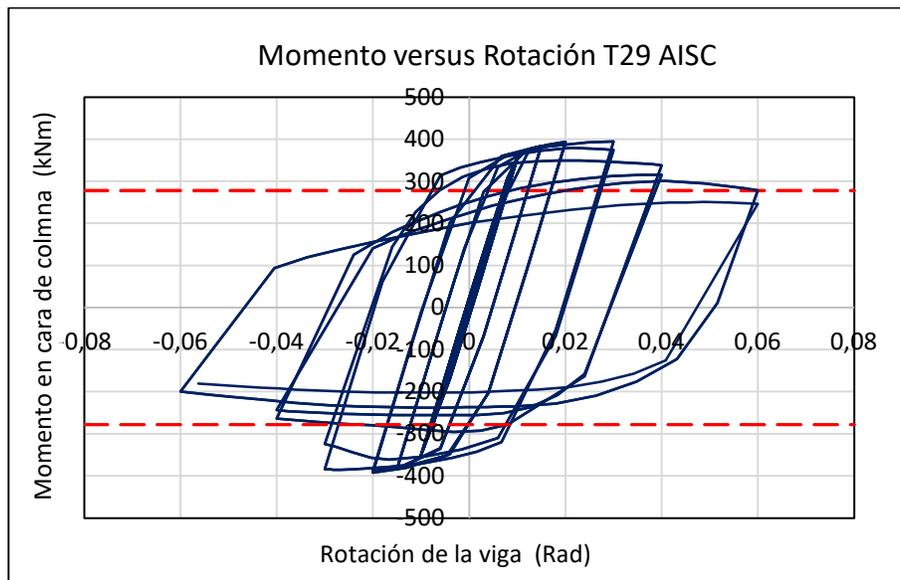
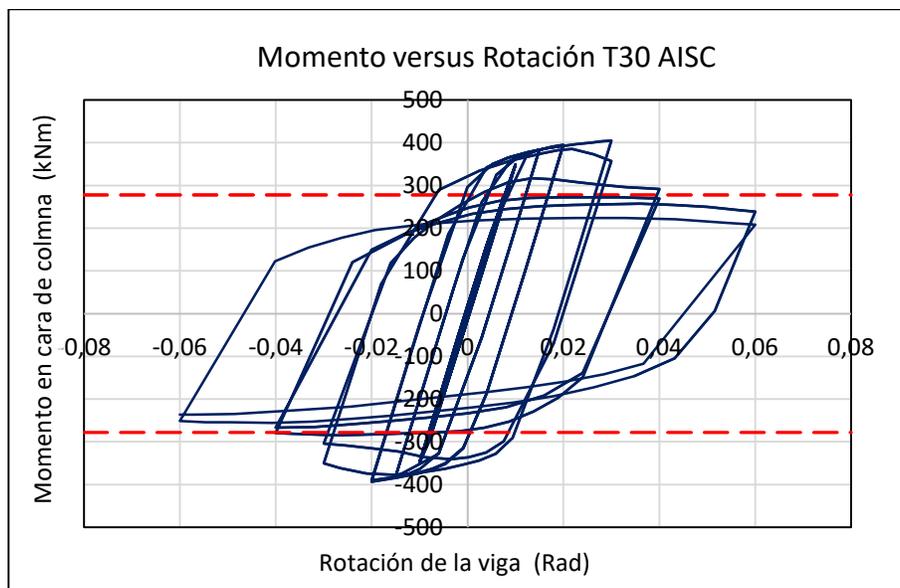
**Gráfico 27**

Diagrama de histéresis espécimen T30, historial ASIC 341-16.



Glosario

Elasticidad: Relación esfuerzo-deformación lineal, obedece a la ley de Hooke (McCormac, 2012).

Ductilidad: Capacidad de un material de deformarse plásticamente sin romperse (McCormac, 2012).

Ruptura: La ruptura por tensión es la falla repentina y completa de un material bajo estrés (Güemes, 2012).

Fatiga: La fatiga es la degradación de un material por la creación de grietas generadas por cargas cíclicas que generan deformaciones plásticas en el material (Güemes, 2012).

Endurecimiento por deformación: Es cuando un material obtiene una resistencia durante una deformación plástica por cambios en la estructura molecular de los aceros (Güemes, 2012).

Deriva elástica: Es un desplazamiento lateral de un punto de una estructura respecto a otro, en los edificios es el desplazamiento entre dos pisos (Bruneau, 2011).

Conexión de acero: Unión de miembros estructurales de acero, con capacidad de transmitir momento (McCormac, 2012).

Placas de continuidad: Las placas de continuidad son láminas de acero generalmente tienen un espesor igual o mayor al de los patines de la viga, estas están soldadas o unidas a las alas y alma del de la columna formando una continuidad de las alas de la viga en columna. (Vinnakota, 2006).

Zona panel: Nodo formado en el alma de la columna entre las placas de continuidad (Vinnakota, 2006).

Articulación plástica: Se genera debido a plastificación del material, disminuyendo la capacidad de transmitir momento (McCormac, 2012).

Soldadura filete: Geometría de sección transversal teórica triangular (Segui, 2018).

Elementos finitos: Es un método numérico que utiliza sistemas ecuaciones diferenciales para encontrar soluciones aproximadas (Zienkiewicz, 2018).

Marcos intermedios resistentes a momento: Son pórticos en la que sus elementos pueden rotar 0.02 radianes y mantener (American Institute of Steel Construction, 2016a).

Cargas cíclicas: Cargas aplicadas repetidamente con una determinada frecuencia (Gioncu, 2002).

Diagrama de histéresis: Es una representación gráfica del efecto Bauschinger de un material sujeto cargas cíclicas que deformado elástica y plásticamente (Gioncu, 2002).

Excursión: Una unidad histórica de carga o deformación que comienza cargando desde cero y luego una descarga hasta terminar con carga cero (Krawinkler, 1992).

Ciclo: Una secuencia secuencial de dos excursiones, una en dirección de carga positiva y otra en dirección de carga negativa, que conforma una unidad histórica de carga o deformación (Krawinkler, 1992).

Deformación: una medida general, representada por δ , que engloba diversas formas de deformación, como cambios de forma, rotaciones, distorsiones cortantes, deformaciones axiales y desplazamientos (Krawinkler, 1992).

Rango de deformación de la excursión: La amplitud de deformación que abarca desde el punto inicial hasta el máximo alcanzado durante una excursión (Krawinkler, 1992).

Relación de ductilidad: La medida que establece la relación entre la deformación máxima alcanzada y la deformación correspondiente al punto de fluencia (Krawinkler, 1992).

Fuerza: Una magnitud general, representada por Q , que abarca tanto las fuerzas internas (fuerza o momento) como las cargas externas aplicadas (Krawinkler, 1992).

Fuerza en la deformación máxima: La magnitud de fuerza en un punto de cambio de dirección de carga (Krawinkler, 1992).

Paso de carga o deformación: Una secuencia de ciclos con carga máxima o deformación constante, que conforman una unidad de historial de carga (Krawinkler, 1992).

Fuerza máxima: La fuerza máxima medida en una excursión (Krawinkler, 1992).

Deformación pico: La cantidad de deformación alcanzada en un punto de cambio de dirección de carga (Krawinkler, 1992).

Rango de deformación plástica: La deformación permanente entre el comienzo y el final de una excursión (Krawinkler, 1992).

Rango de deformación total: La deformación total entre el pico de una excursión y el pico de la excursión opuesta anterior (Krawinkler, 1992).

Fuerza o deformación de fluencia: La magnitud de fuerza o deformación estimada o medida en la cual ocurre una fluencia notable (Krawinkler, 1992).