



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**SIMULACIÓN NUMÉRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE FALLAS
POR SOBRECARGA EN CONEXIONES TIPO BOTÓN Y TROQUELADAS DE
ESTRUCTURAS MÉTALICAS DE LÁMINA DELGADA PARA ESTANTERÍAS**

Héctor Alfonso Castelblanco González

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Ingeniería, Departamento Mecánica

Bogotá, Colombia

2020

**SIMULACIÓN NUMÉRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE FALLAS
POR SOBRECARGA EN CONEXIONES TIPO BOTÓN Y TROQUELADAS DE
ESTRUCTURAS MÉTALICAS DE LÁMINA DELGADA PARA ESTANTERÍAS**

Héctor Alfonso Castelblanco González

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: **Magister en
Ingeniería Mecánica.**

Director:
Edgar Espejo Mora

Línea de Investigación:
Mecanismos de falla de elementos de máquinas y estructuras
Grupo de Investigación:
AFIS

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Colombia
Año 2020

Contenido

	INTRODUCCIÓN	1
	JUSTIFICACIÓN	3
	ESTADO DEL ARTE	6
	OBJETIVO GENERAL	9
	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	9
	ALCANCE	10
	METODOLOGÍA	10
	ESTRUCTURA GENERAL DEL DOCUMENTO.....	11
	MARCO TEÓRICO	13
1.	1.1 ESTANTERÍAS.....	13
	1.2 COLUMNAS.....	15
	1.3 VIGAS	16
	1.4 CONEXIONES.....	19
	1.5 MÉTODOS EXPERIMENTALES.....	21
	1.6 MÉTODOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	25
2.	INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL.....	28
	2.1 MUESTRA ANALIZADA	28
	2.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	32
	2.3 DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBA	34
3.	2.4 INSTRUMENTACIÓN DEL BANCO.....	35
	2.5 MONTAJE DE PROBETAS	37
	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	40
	3.1 ENSAYOS REALIZADOS.....	40
	3.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	42
	3.2.1 Modelo tres troqueles (3T)	47
	3.2.2 Modelo tres botones (3B)	47
	3.2.3 Modelo cuatro botones (4B)	48
	3.2.4 Modelo cuatro troqueles (4T)	48
	3.2.5 Modelo tres troqueles con separación (3TS).....	49
	3.2.6 Modelo tres botones con separación (3BS).....	49
	3.2.7 Modelo cuatro botones con separación (4BS).....	50

3.2.8 Modelo tres troqueles (4TS)	50
3.2.9 Análisis de modos de falla.	52
4 SIMULACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS.....	60
4.1 MALLADO Y TIPO DE ELEMENTOS USADOS.....	60
4.2 DEFINICIÓN DEL TIPO DE CONTACTO.....	62
4.3 MÉTODO DE RESOLUCIÓN.	64
4.4 APLICACIÓN DE LA CARGA.	66
4.5 CONDICIONES CONTORNO.....	66
4.6 CASOS EVALUADOS.....	67
4.6.1 Conexiones con tres y cuatro troqueles.....	67
4.6.2 Conexiones con tres y cuatro botones.....	74
4.7 Modos de falla en simulación	78
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	81
6. CONCLUSIONES.....	86
7. TRABAJOS A FUTURO.....	88
8. BIBIOGRAFÍA	89

LISTADO DE FIGURAS

Figura 0-1 Ejemplos de puntales de estantería perforadas Fuente: www.mecalux.es	3
Figura 0-2 Conexión viga columna: (a) troquel, (botón) [17]	5
Figura 0-3 Metodología de la Investigación.....	11
Figura 1-1 Estantería tipo selectiva. Autoría propia	14
Figura 1-2 Conexión viga columna en estantería selectiva, imágenes ajustadas de catálogo Mecalux [54].	15
Figura 1-3 Perfiles usados en columnas de estanterías. Tomado de [55]	15
Figura 1-4 Partes que componen el ensamble de la viga: (a) viga y chapetas, (b) chapetas con botón, (c) chapeta troquelada. Autoría propia	17
Figura 1-5 Representación de comportamiento de las conexiones respecto a su rigidez rotacional, adaptado de [58].....	20
Figura 1-6 Comportamiento de una conexión bajo condiciones de carga a flexión [47].	21
Figura 1-7 Disposición para ensayos de flexión en conexiones [4]	22
Figura 1-8 Relación Momento flector ángulo de rotación [4]	23
Figura 1-9 Método Newton Raphson (tomado de ayuda de ANSYS).....	26
Figura 1-10 Propiedades de algunos elementos finitos usados en ANSYS [49]	26
Figura 2-1 Sección transversal de columna tipo botón. Autoría propia.....	29
Figura 2-2 Sección transversal de columna tipo Troquelada. Autoría propia.....	30
Figura 2-3 Geometría perfil extremo o chapeta de viga tipo troquelada. Autoría propia.	31
Figura 2-4 Geometría de extremo o chapeta de la viga tipo Botón.....	31
Figura 2-5 Lámina separador viga columna.....	32
Figura 2-6 Codificación de ensayos.	33
Figura 2-7 Diseño de marco de carga.....	34
Figura 2-8 Montaje preliminar de pruebas.....	35
Figura 2-9 Configuración sistema de adquisición de datos por Arduino.....	36
Figura 2-10 Calibración de celda de carga.....	36
Figura 2-11 Diagrama esquemático del ensayo.....	37
Figura 2-12 Configuración de prueba.....	38
Figura 2-13 Anclajes de sujeción de las Columnas	39
Figura 3-1 Diagrama por grupo de ensayos.	40
Figura 3-2 Ensayos practicados según grupo.	42
Figura 3-3 Resumen de capacidad de momento flector por grupo.....	46
Figura 3-4 Modelo característico tres troqueles sin separación (3T)	47
Figura 3-5 Modelo característico tres botones sin separación (3B)	48
Figura 3-6 Modelo característico cuatro botones sin separación (4B)	48
Figura 3-7 Modelo característico cuatro troqueles (4T).....	49
Figura 3-8 Modelo característico tres troqueles con separación (3TS)	49
Figura 3-9 Modelo característico tres botones con separación (3BS)	50
Figura 3-10 Modelo característico cuatro botones con separación (4BS)	50
Figura 3-11 Modelo característico cuatro troqueles con separación (4TS)	51
Figura 3-12 Modelos definidos para conexiones	52
Figura 3-13 Modos de falla en Conexiones.....	59

Figura 4-1 Modelo Mallado y elemento181: (a) Columna tipo Botón, (b) columna tipo troquel (c) elemento cascaron de ANSYS Shell 181	61
Figura 4-2 Representación de chapeta (a) Chapeta tipo botón, (b) troquel y (c) elemento Solid 187.....	62
Figura 4-3 Elemento SHELL 181 y elemento SOLID186	63
Figura 4-4 Contacto conector -columna y representación CONTAC 174.....	63
Figura 4-5 Contacto conector tipo troquel: (a) conexión, (b) superficie de columna y (c) superficie de chapeta.....	64
Figura 4-6 Desplazamientos aplacados a la conexión.....	66
Figura 4-7 Apoyos usados en la conexión: (a) Restricciones rígidas de la columna y (b) restricción de desplazamiento en eje Z.	67
Figura 4-8 Malla de las conexiones tipo troquel	68
Figura 4-9 Geometría general conexiones analizadas.....	69
Figura 4-10 Independencia de malla para modelo 3T y TS.....	70
Figura 4-11 Comportamiento de simulación conexión 3T (tres troqueles sin separación)	71
Figura 4-12 Comportamiento conexión tres troqueles con sepación (3TS).....	72
Figura 4-13 Comportamiento conexión cuatro troqueles sin sepación (4T).....	73
Figura 4-14 Comportamiento conexión cuatro troqueles con sepación (4TS).....	73
Figura 4-15 Comparación modelos tipo troquel.....	74
Figura 4-16 Modelos tipo botón.....	75
Figura 4-17 Comportamiento conexión cuatro botones sin separación 4B.....	76
Figura 4-18 Comportamiento conexión cuatro botones con separación 4BS.....	76
Figura 4-19 Comportamiento conexión tres botones sin separación 3B.....	77
Figura 4-20 Comparación de modelos tipo Botón.....	78
Figura 5-1 Comparación modelos 3T y 3TS.....	81
Figura 5-2 puntos de penetración en columna modelo-experimentación.....	81
Figura 5-3 Diferencias en modelos de simulación y experimentación 3T 3TS.....	82
Figura 5-4 Comparación modelos 4T y 4TS.....	82
Figura 5-5 Comparación deformación modelo-experimentación.....	83
Figura 5-6 Comparación de modelos tres botones.....	83
Figura 5-7 Deformación de la chapeta y el conector.....	84
Figura 5-8 Comparación de modelos cuatro botones.....	84

LISTADO DE TABLAS

Tabla 0-1 Fallas por pandeo de las columnas [32].....	4
Tabla 0-2 Revisión bibliográfica de tipo review.....	7
Tabla 0-3 Revisión bibliográfica asociada con experimentación y simulación	8
Tabla 1-1 Geometrías usadas a nivel local.....	16
Tabla 1-2 Tipos de perfiles en vigas de estanterías selectivas. Autoría propia.	17
Tabla 2-1 Dimensiones de columna tipo botón	29
Tabla 2-2 Dimensiones columna tipo troquel	30
Tabla 2-3 Dimensiones extremo viga o chapeta tipo troquel	31
Tabla 2-4 Dimensiones extremo o chapeta de la viga tipo botón	31
Tabla 2-5 Identificación de muestras a ensayar.....	33
Tabla 3-1 Resultados por grupos ensayados	41
Tabla 3-2 Prueba de normalidad muestras independientes.....	43
Tabla 3-3 Prueba de homogeneidad de varianzas.....	44
Tabla 3-4 Anova unifactorial.....	44
Tabla 3-5 Diferencias entre grupos ángulo de rotación	45
Tabla 3-6 Resultados definitivos por tratamiento.....	51
Tabla 3-7 Modos de falla en conexión de estantería tipo botón y troquel ensayadas.	53
Tabla 4-1 Parámetros de contactos en modelos.....	69
Tabla 4-2 Tamaño de malla tres troqueles con y sin separación.....	70
Tabla 4-3 Resumen general de modelos cuatro troqueles con y sin separación.....	72
Tabla 4-4 Resumen modelos cuatro botones con y sin separación.	75
Tabla 4-5 Resumen general tres botones con y sin separación.....	77
Tabla 4-6 Modos de falla observado en la simulación.....	79

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan de forma argumentativa las razones que dieron origen a la investigación, junto con sus respectivas justificaciones que dan un punto de partida al presente trabajo. A su vez, se define el alcance y la forma en la cual se desarrolló cada uno de los objetivos planteados.

El uso de estanterías de lámina delgada tipo Racks, se ha extendido en la industria nacional colombiana en los últimos años por el creciente costo del metro cuadrado[1], llevando a crear módulos de estructuras en grandes superficies que llegan a alturas hasta de quince metros [2]. Las estanterías tradicionales que se diseñan y manufacturan en Colombia son de lámina delgada conformada en frío, los perfiles son doblados y punzonados para generar las diferentes conexiones y juntas necesarias para el ensamble.

En Colombia se cuenta con varias normas para el desarrollo, inspección y ensayos de estos elementos, la inspección y los ensayos. Según[3], todas las especificaciones que se aplican a nivel local se toman con base en la reglamentación ANSI-RMI MH16.1-2004 (especificaciones para el diseño, ensayos y utilización de estanterías metálicas de acero y las consideraciones de sismo resistencia que adoptan del método de Diseño por Factores de Carga y de Resistencia (LRFD) especificados en la NSR 10 (Reglamento colombiano de construcción sismo-resistente).

A nivel internacional existen diferentes normativas propias de cada país, dentro de las más destacadas se tienen la EURO EC3 (Design of steel structures) con la UNE-EN-15512-2010 (principios para el diseño estructural de estanterías)[4], AS4084 Australian Standard y las realizadas por la RMI (The Rack Manufacturers' Institute)[5], especificaciones para el diseño de miembros estructurales de acero conformado en frío de Chile[6] en sus versiones 2008 y 2011[7], de las cuales se toman consideraciones para las normas nacionales, como es el caso de NTC 5689 y NTC 1805.

A nivel internacional existen varios grupos de investigación, cuyo objetivo ha sido el de estudiar el comportamiento de los perfiles de lámina delgada, con un mayor énfasis en el comportamiento no lineal. Por ejemplo, en la universidad UPC (Universidad politécnica de Cataluña) se encuentra el REMM – (Investigación en Estructuras y Mecánica de Materiales), con sus investigadores más destacados Casafont, M. y Bonada J, los cuales han trabajado en temas de lámina delgada y tienen más de 45 publicaciones en el tema. Bonada en su tesis doctoral estudió la influencia del efecto de trabajo en frío, las tensiones residuales y la capacidad de carga de las columnas de estantería de acero formadas en frío mediante análisis de elementos finitos no lineales[8]. Durante el periodo 2009 -2011 realizaron investigaciones del comportamiento de los modos de falla de las columnas de las estanterías y sus modelos matemáticos adecuados para evaluarlos en programas de análisis por elementos finitos (FEA). En Norte América, se destaca, entre otros, el profesor Benjamin Schafer, de la Universidad Johns Hopkins, quien ha trabajado la última década en el comportamiento de elementos de lámina delgada y sus diferentes modos de falla, en su trabajo ha establecido teorías de comportamiento no lineal para las columnas y formas combinadas de falla, en la Universidad de Cornell, desarrolló como complemento a su tesis de doctorado, un programa de uso libre que permite predecir las formas de falla en perfiles de lámina delgada laminada en

frio, que generan inestabilidad local, distorsional y global. Este software se conoce como (CUFSM 4.05 Elastic Buckling Analysis of Thin-walled Members)[9].

En Australia, en la Universidad de Sydney los investigadores Kim Rasmussen y Gregory Hancock han trabajado en el comportamiento de los elementos de lámina delgada y sus diversas formas de pandeando, sus publicaciones están directamente relacionadas con este tipo de fallas en columnas y marcos de estanterías[10]. Muy cercano a las investigaciones desarrolladas en la Universidad de Dortmund en Alemania, el profesor Dan Dubina de la Universidad Politécnica de Timisoara en Rumania ha trabajado sobre la degradación de los perfiles de lámina delgada. Su interés se orienta a generar normativa para la utilización de la lámina delgada, en otros ámbitos de la industria[11].

La evaluación del comportamiento de las estanterías no cuentan con un estándar para realizar análisis globales de carga y del comportamiento como ensamble[12][13], los estudios realizados muestran que difieren de la evaluación de los componentes por separado[14][15], y es necesario la evaluación general de la misma por cada configuración para determinar la rigidez de la estructura y las formas de falla.

Los estudios realizados en los sistemas de racks a nivel nacional se enfocan en la capacidad de carga bajo condiciones LRFD (factores de carga y resistencia), sus formas de anclajes y uniones entre juntas [16]. Las administradoras de riesgos laborales (ARL), han implementado estrategias de vigilancia en las empresas para la protección de las columnas de las estanterías para evitar choques con montacargas y una señalización para la capacidad de carga de cada estructura.

La norma técnica colombiana NTC 5689, establece los requerimientos técnicos para el diseño, ensayo y utilización de estanterías metálicas tipo RACK; a pesar de esto, en los últimos años se han presentado colapsos de estantería las cuales generaron pérdidas económicas considerables en el sector industrial, algunos de estos colapsos son de conocimiento del autor por tener relaciones directas con el sector de las aseguradoras.

Las especificaciones de las estanterías para cargas pesadas exigen tener en cuenta toda una serie de disposiciones referentes al entorno y a su finalidad. La elección del sistema de almacenamiento depende del espacio disponible, del tipo de mercancía que se almacena, el tipo de embalaje y las normatividades de cada país. Es importante especificar que en Colombia no se cuenta con una reglamentación clara en la certificación de este tipo de estructuras de fabricación local o la homologación de racks importados.

La evaluación realizada para la presente investigación en este tipo de estructuras, muestra que el comportamiento de cada uno de los componentes de la misma, columnas, vigas, riostras y conexiones depende de su geometría, tipo de aplicación de carga, materiales y manufactura; de igual forma, las conexiones viga columna representan los aspectos más críticos del ensamble y gobiernan, en un gran porcentaje la estabilidad de la estructura[17][18].

JUSTIFICACIÓN

Colombia cuenta con normas específicas para el diseño, la construcción y ensayos de estructuras metálicas NTC 5689 (estructuras de lámina delgada)[3], NSR10 (Norma de sismo resistencia Colombiana)[19]; en contraste con lo anterior, se han venido presentando colapsos de estructuras de lámina delgada (Racks) en los últimos años, bajo diferentes condiciones de carga, cuyo diseño no está ampliamente tratado en estas normas. La falta de apartados específicos de diseño, evidencia que los comportamientos de falla de dichas estructuras no han sido completamente definidos o no se están teniendo en cuenta para el diseño, fabricación y montaje de este tipo de estructuras[2] EURO EC3 (Design of steel structures)[4], AISI-S100-07 Specification[20] y RMI (The Rack Manufacturers' Institute)[21].

Cuando ocurre una falla de este tipo se debe realizar un análisis minucioso basado en la aplicación del método científico, para determinar la causa del colapso, tomando en cuenta entre otras posibilidades el diseño inapropiado, deficiencias del material, problemas de manufactura, condiciones de servicio fuera de especificación [22]. Lo anterior está relacionado con la definición de los modos de falla de este tipo de estructuras y el posterior análisis de los mecanismos de falla.

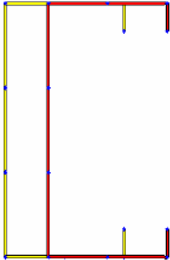
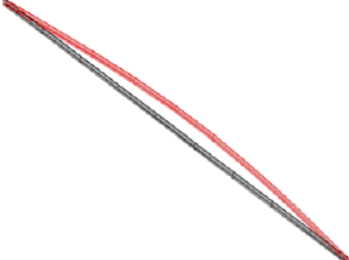
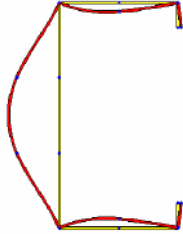
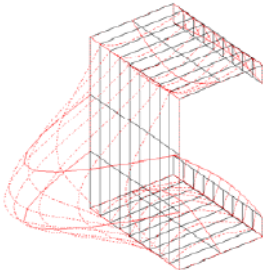
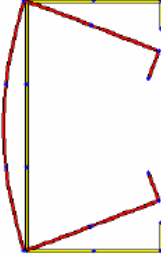
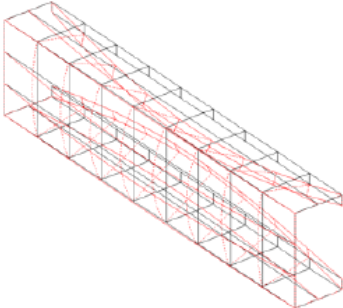
Las herramientas computacionales y los programas de simulación por el método de los elementos finitos (FEM), han permitido verificar las condiciones de rigidez, resistencia, condiciones de aceptación o rechazo en el diseño de racks; no obstante, este tipo de herramientas no permiten realizar una validación completa de todos los fenómenos y los modos de falla que se pueden presentar [18][23], condición que no permite validar todo el espectro de mecanismos de falla. Las estructuras de lámina delgada desde su manufactura presentan zonas de concentraciones de esfuerzo, como por ejemplo los agujeros de sujeción, así como la presencia de esfuerzos residuales por los diferentes pliegues en su geometría[24], condiciones que modifican su comportamiento mecánico real y que además no se pueden simular en su totalidad, dando como resultado una aproximación en los estudios realizados[25][26]. En la figura 0-1, se muestra algunos ejemplos de perfiles con la tipología mencionada.

Figura 0-1 Ejemplos de puntales de estantería perforadas Fuente: www.mecalux.es



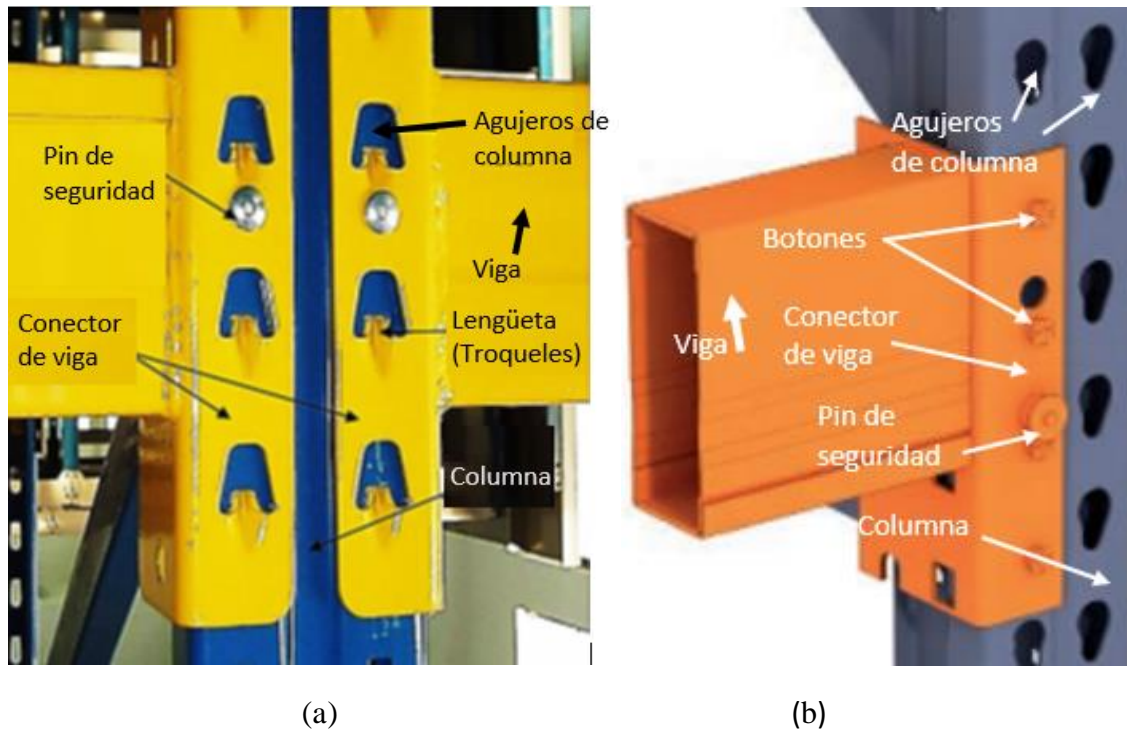
El reporte de investigación consultado, en la mayoría de los casos presenta simulaciones de carga sobre los elementos que componen las estanterías; por ejemplo, se evalúa el comportamiento de las columnas, vigas, anclajes y juntas en forma independiente[27]. En los casos de falla por pandeo de las columnas, estas pueden clasificarse como local, global, distorsional y combinadas[28][29][30][31], como se pueden observar en la Tabla 0-1.

Tabla 0-1 Fallas por pandeo de las columnas [32]

<u>TIPO DE FALLA POR PANDEO</u>	<u>FORMA DE FALLA CARACTERÍSTICA</u>	
<p>PANDEO GLOBAL:</p> <p>En el pandeo global la columna se deforma sin modificar la geometría de su sección transversal. Por lo tanto, las deformaciones se caracterizan por el desplazamiento con o sin torsión de la directriz del perfil.</p>		
<p>PANDEO LOCAL:</p> <p>Implica solamente deformaciones del alma, sin que existan translaciones de las líneas de intersección de dos elementos placa adyacentes.</p>		
<p>PANDEO DISTORSIONAL:</p> <p>Se puede definir como un modo con distorsión de la sección transversal del perfil que implica la translación de alguna de las líneas de intersección entre el alma secciones no atiesadas y que también puede presentar pandeo de la columna en el eje longitudinal y transversal.</p>		

Existen diferentes técnicas para construir o manufacturar las conexiones viga columna en los racks, por ejemplo con juntas soldadas, pernadas, botón, con pasador o troqueladas[33], siendo este último uno de los más usados pero que conlleva una incidencia amplia en la falla de este tipo de estructuras[34][35]. Las conexiones tipo botón y troqueladas usadas en este tipo de estructuras se puede observar en la Figura 0-2.

Figura 0-2 Conexión viga columna: (a) troquel, (botón) [17]



A nivel de literatura, las conexiones pueden considerarse como junta rígida o semi rígida dentro de las suposiciones del análisis y los parámetros asumidos en el diseño [36][37], asimismo, las consideraciones en conexiones de estanterías no es clara en las normas y se pueden presentar fallas por falta de rigidez[38][35] [39], lo que a su vez lleva a encontrar ensambles con deficiencias o consideraciones de carga subestimadas para aplicaciones específicas.

Los cálculos estructurales de perfiles de lámina delgada, se realizan en la mayoría de los casos, de acuerdo a la filosofía de diseño denominada LRFD, conocida en español como factores de diseño por carga y resistencia, dichos factores intentan describir en forma probabilista, las condiciones más críticas para los diferentes elementos estructurales y sus solicitaciones. En el caso particular de las conexiones para estructuras tipo estantería, no existen valores apropiados, para las diferentes tipologías.

Las especificaciones de diseño de las normas internacionales tales como Racks Manufacturers Institute (RMI 2008) y la norma europea EN 15512: (2009) reconocen la importancia de la investigación en las características de los componentes individuales, y con enfoques similares presentan más elementos para entender el comportamiento de las mismas[40].

El diseño de las conexiones de las estanterías de lámina delgada tiene grandes variaciones debido a las diferentes configuraciones para la tipología de conexión botón y troquelada y al tamaño que comercialmente se encuentra [41], la cantidad de puntos de contacto entre superficies, la longitud y el diseño del bloqueo[42][40]. Para entender cada conexión, es necesario desarrollar un modelo de simulación numérica que permita predecir con un mayor grado de precisión, el comportamiento de bastidores de almacenamiento y las vigas, es por tal, que cualquier simulación numérica debe estar validado usando evidencia experimental[17].

El conector de este tipo de estructuras gobierna y evita las condiciones de falla en dirección del pasillo; datos reportados por [43][44], muestran la incidencia del comportamiento en función del tipo de conector. Además, las propiedades del conector también determinan la capacidad global de carga estática y dinámica. La rigidez del conector depende del ángulo de rotación generado bajo condiciones de carga como lo expresan [45][46].

La interacción entre el momento flector y la rotación, denominada como $M-\theta$ de la conexión viga columna (CBC), y los parales en acero de estantería (SPR), es una línea de investigación y exploración reciente [47]. Los resultados de estas investigaciones tendrán una gran incidencia e impacto en las necesidades en nuestro medio local.

Investigaciones internacionales[48], muestran que el diseño de las columnas de estantería actuales, así como el de las vigas presenta buenos índices de confiabilidad en su aplicación. Sin embargo, en el diseño de conexiones de elementos de estantería, aún existen muchas incertidumbres, como por ejemplo la tipología, el desempeño bajo condiciones estáticas y dinámicas, el montaje, el uso, la alineación y mantenimiento.

A nivel nacional no se encuentra ningún tipo de referencia sobre estudios específicos realizados a la fecha sobre conexiones en estanterías. Existen algunos documentos en los que se mencionan comparaciones entre tipos de manufactura, pero no investigaciones propiamente dichas. Las condiciones de fabricación están sujetas a la NTC 5689 o la NRS 10, quedando vacíos en el diseño de las mismas debido a que no son normas específicas para este tipo de estructuras.

La presente tesis de maestría se justificó porque permite medir aproximadamente el comportamiento real de las conexiones, así como la diferencia entre estructuras con diferentes números de conectores, aspectos que no se han tenido en cuenta para el diseño, simulación y construcción de estanterías a nivel local. La simulación de conexiones en estructuras de lámina delgada bajo condiciones de sobrecarga y la comparación mediante la experimentación, permitió determinar factores asociados al comportamiento y la forma de falla de las mismas como componente y como ensamble, a su vez definir los factores y mecanismos de falla típicos.

ESTADO DEL ARTE

La metodología utilizada para la revisión bibliográfica se muestra en el presente apartado, a su vez, se hace una clasificación según las revistas consultadas, universidades con líneas o grupos de investigación en relación y entes gubernamentales que promueven reglamentación en relación con el campo de estudio de diseño de estructuras de lámina delgada.

Las revistas con mayor relación con el estudio de estructuras de lámina delgada y que han publicado investigaciones en relación con las fallas en conexiones de estanterías son:

- Computers & Structures,
- Engineering Structures
- International Journal of Structural Stability & Dynamics
- Journal of Constructional Steel Research
- Journal of Structural Engineering
- Latin American Journal of Solids & Structures

- Material Handling Management
- Thin-Walled Structures

En cuanto a las universidades que tienen grupos de investigación, líneas o han desarrollado tesis de maestría o doctorado en el campo de estudio, se citan a continuación:

- Universidad Politécnica de Catalunya-Barcelonatech Barcelona España
- Universidad de Cornell – Ithaca, NY USA
- Universidad Politécnica de Cartagena
- Politécnico Di Milano – Milán Italia
- Universidad Autónoma de México
- The National University of Singapore, Structural Steel Research Group (SSRG), Singapore
- Johns Hopkins University, Baltimore, MD, USA
- The University of Sydney, School of Civil Engineering, Sydney, NSW , Australia
- University of Trento, Department of Mechanical and Structural Engineering, Trento, Italia
- University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia
- Indian Institute of Technology Bombay

A su vez, se refieren las asociaciones y entes de reglamentación nacionales e internacionales, que trabajan en la verificación y reglamentación de elementos relacionados con la investigación:

- ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación –Colombia
- AIS - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica
- CEN- UE- Comité Europeo de Normalización
- AENOR- Asociación Española de Normalización y Certificación – Genova -España
- RMI-Rack Manufacturers Institut- USA
- AISI-American Iron and Steel Institut, USA
- BS 826-British Standard
- AS 2143-Australian Standard

Es por tanto, que luego de la clasificación de revistas, Universidades e instituciones, se estableció una clasificación de información según cuatro tipos de fuentes bibliográficas propias de la investigación y enfocadas en el comportamiento de conexiones de estantería, a continuación se muestra el criterio establecido según dicha búsqueda:

1. Bibliografía de estado del arte o “review”.
2. Experimentación sobre conexiones de estanterías.
3. Análisis matemático de las conexiones de estantería.
4. Simulaciones de conexiones en estanterías.

Con los criterios de clasificación de la información definida para la investigación, se establece un resumen de cada fuente por separado con sus respectivas referencias hechas durante la revisión documental como se muestra en la Tabla 0-2.

Tabla 0-2
Revisión bibliográfica de tipo review

<u>Condiciones Evaluadas</u>	<u>Investigaciones</u>
Comportamiento de conexiones según RMI Y EN 15512	[17]
Tipos de juntas (soldadas, atornilladas)	[38]
Comportamiento de conexiones con altas temperaturas	[49]

La evaluación de este tipo de pruebas en conexiones de estantería de tipo botón y troqueladas, se realizaron a partir de 1997 hasta la fecha. El punto de partida está relacionado con una fuerte

tendencia de ciertos autores que incluso en la actualidad siguen trabajando el mismo tema. La correlación de autores y su campo de estudio se muestra en la Tabla 0-3

Tabla 0-3
Revisión bibliográfica asociada con experimentación y simulación

<u>Nombre de la investigación y referencia</u>	<u>Parámetros de la investigación</u>	<u>Año de la referencia</u>
Experimental analysis of semi-rigid boltless connectors.[50]	Realiza ensayos en cantiléver a 22 probetas con diferentes conexiones (botón y troquelada), evaluando su comportamiento y su relación como ensamble	1997
Experimental analysis on the cyclic behavior of beam-to-column joints in steel storage pallet racks.[51]	Comportamiento cíclico de las conexiones y su relación de curva de histéresis bajo dicha condición	2001
Experimental Stiffness and Seismic Response of Pallet-Type Steel Storage Rack Connectors.[52]	Comportamiento de conexiones bajo condiciones de carga sísmica.	2006
Determination of flexibility of beam-to-column connectors used in thin walled cold-formed steel pallet racking systems. [53]	Comparación entre ensayo y análisis por elementos finitos	2006
Experimental and theoretical investigations of pallet racks connections.[47]	Realiza ensayos en conexiones tipo troqueladas y hace una comparación con métodos analíticos “método de componentes”	2006
Direct strength design of cold-formed steel members with perforations. [54]	Tesis, evaluación del comportamiento de columnas de lámina delgada con y sin agujeros.	2008

<u>Nombre de la investigación y referencia</u>	<u>Parámetros de la investigación</u>	<u>Año de la referencia</u>
Stiffness tests, failure tests and load transfer in steel drive-in storage racks. [10]	Reporte de investigación en el cual se evalúa el comportamiento de un ensamble de estantería bajo cargas axiales y cargas muertas.	2009
Evaluation of connection flexibility in cold formed steel racks. [55]	Experimentación y simulación por elementos finitos de una conexión a doble catiliver.	2010
Experimental Analysis of Beam-to-upright Connections in Cold-formed Steel Storage Pallet Racks. [56]	Experimentación en viga en cantiliver, 21 ensayos con método de sujeción mixta RMI y sistema Europeo.	2012
Seismic performance of steel lallet racks.[57]	Comparación entre métodos para cálculo de juntas y simulación con software SAP.	2012

Como se puede establecer en la tabla 03, las investigaciones más relevantes en el campo de estudio están relacionadas con la experimentación en conexiones; sin embargo, no se tiene referencias específicas sobre simulaciones y aplicaciones de carga en conexiones tipo botón usadas a nivel local.

OBJETIVO GENERAL

Determinar los modos de falla por sobrecarga de las conexiones de estantería tipo botón y troquelada.

OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Formular un marco teórico sobre el comportamiento mecánico y estructural de los diferentes elementos que componen la conexión.
- Concebir, desarrollar e implementar un modelo de simulación numérica que permita representar el comportamiento de conexiones tipo botón-troquel y predecir la falla.
- Establecer un programa de experimentación, indicando montaje, caracterización de material, plan de instrumentación e interpretación de resultados sobre especímenes de conexiones que simulen su comportamiento en las condiciones reales de trabajo.
- Interpretar los resultados de la simulación numérica y validarlos con los del programa experimental para establecer valores de correlación que permitan validar el modelo.
-

ALCANCE

Considerando, que sobre este tema de investigación no existe una gran difusión de experiencias investigativas ni directrices de análisis y diseño explícitas, la presente investigación se limitó en la siguiente forma:

- Geometría:

Con el fin de limitar la búsqueda y enfocarla a la problemática nacional, se seleccionó una conexión viga columna de fabricación local. Con base en lo encontrado en la revisión bibliográfica, es claro que la columna tiene unas características específicas asociadas a su construcción y por tal razón, se tuvo como punto de partida en la búsqueda la más usada en ensambles con capacidad de 1000 kilogramos por entrepaño.

- Parámetros:

Los parámetros a evaluar en la presente investigación, se enfocaron al comportamiento de la conexión viga columna como ensamble y la forma de falla de la misma. La falla consecencial como dobleces en la viga o fallas globales o distorsiónales en la columna no se tienen en cuenta y podría llegar a considerarse como problema de investigación de futuros trabajos.

- Materiales:

Teniendo en cuenta que a nivel internacional se realizan fabricaciones de estanterías con aceros laminados en frío (CD) y en caliente (HD), la presente investigación se limita a estanterías manufacturadas a nivel local en acero ASTM A36 laminado en frío y SAE 1008 Gr 30 para todos los elemento que componen el ensamble.

- Solicitación a flexión en un plano, compresión y cortante:

Debido a las múltiples formas de carga de este tipo de estructuras y sus respectivas combinaciones estáticas y dinámicas, solo se tiene como solicitaciones de carga las de flexión en un plano, compresión y cortante, en condiciones cuasi-estáticas.

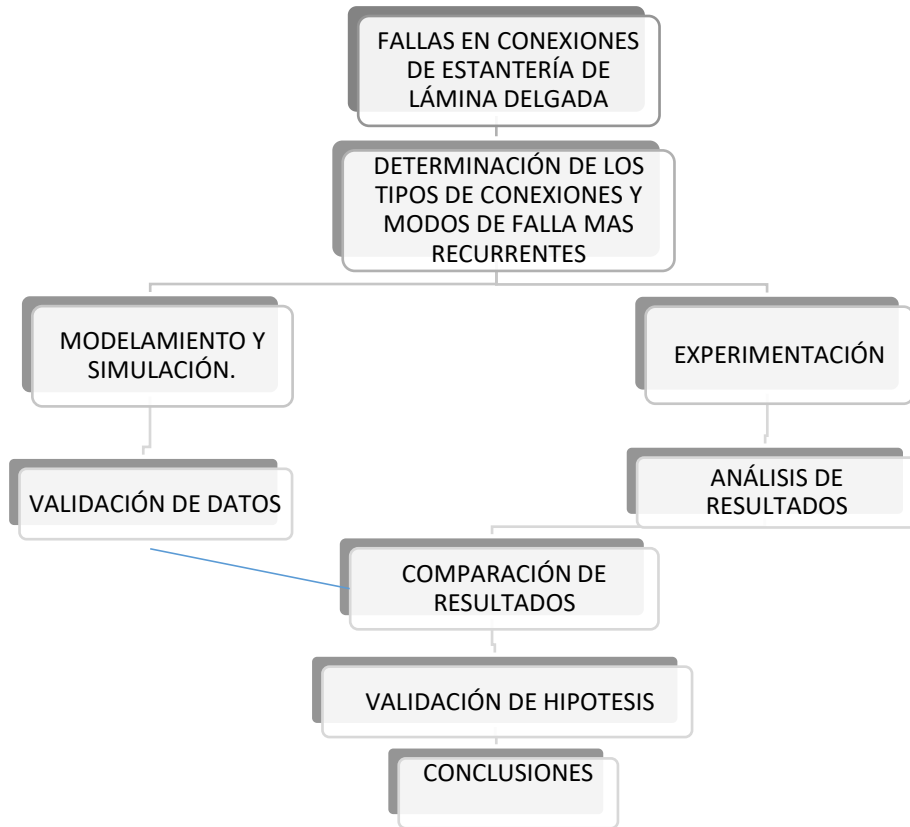
- Degradación de los materiales:

En la presente investigación no se realizó consideraciones de uso, en la cual se involucre relación vida por cantidad de ciclos o fenómenos de fatiga por variaciones de carga en el tiempo.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del problema de investigación, se planteó la simulación de 8 grupos de conexiones viga columna, en los cuales se involucran conectores con botones y troquelados, con y sin tolerancia (espaciamiento entre la viga y la columna). De forma paralela se realizaron ensayos que llevan a la falla de las mismas, con sus respectivas repeticiones, con el fin de validar los datos obtenidos por simulación, como se muestra en la Figura 0-3.

Figura 0-3 Metodología de la Investigación.



ESTRUCTURA GENERAL DEL DOCUMENTO

Introducción

En este capítulo se presentan de forma argumentativa las razones que dieron origen a la investigación, junto con sus respectivas justificaciones que dan un punto de partida a la presente investigación. Se enuncia la forma en la cual se construyó el estado del arte, el marco teórico y los principales investigadores, Universidades y entes gubernamentales relacionados con el campo de estudio particular. Se definen los objetivos, limitaciones generales y específicas, para finalizar se presenta la metodología ejecutada para el desarrollo de la misma.

Capítulo 1: Marco Teórico

Para este apartado se realiza una conceptualización de los temas específicos de la investigación, presentando una relación entre definiciones, conceptos, términos y normatividad relacionada con el comportamiento de conexiones en estanterías metálicas. A su vez, se establece la nomenclatura

del campo de estudio, las partes que componen las conexiones, los métodos de fabricación y todas las variables que pueden incidir en los fenómenos de falla.

Adicional a esto, se documentan casos de estudio en el ámbito local, los cuales son de interés y los hallazgos encontrados en los mismos desde el punto de vista de comportamiento a la falla. Con el fin de establecer las metodologías usadas para el diseño de conexiones, ventajas y desventajas frente al comportamiento de la misma.

Capítulo 2: Investigación Experimental

En esta sección del documento se establece una secuencia lógica para realizar la experimentación en conexiones, empezando con la selección de los tipos de perfiles a ensayar, sus características geométricas, los procedimientos de los ensayos, el diseño del marco para realizar los ensayos, instrumentación.

Capítulo 3: Resultados experimentales

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos practicados a 24 conexiones y se describen en dos sub secciones, la primera en la cual se muestran los valores numéricos establecidos a partir de los ensayos, sus respectivas iteraciones, el análisis estadístico y la evaluación de los modos de falla de las mismas.

Capítulo 4: Simulación de elementos finitos

En este capítulo se definen los parámetros, propiedades de materiales y las restricciones y demás condiciones de frontera establecidos para cada una de las simulaciones realizadas. A su vez, se presentan los resultados para cada uno de los grupos.

Capítulo 5 Análisis de resultados

En este apartado se realiza un análisis de los resultados obtenidos en los dos capítulos antes presentados, dichas relaciones buscan determinar las ventajas, desventajas, modos de falla particulares y condiciones que afectan a cada una de las conexiones examinadas.

Capítulo 6: Conclusiones

Finalmente se presentan las conclusiones de la investigación, realizando una comparación entre los resultados obtenidos de forma experimental y las validaciones por el método de los elementos finitos. A su vez, se establecen las líneas en las cuales se pueden plantear trabajos a futuro sobre la temáticas particulares de las conexiones de estanterías.

MARCO TEÓRICO

El proceso de definición de las fuentes, modos y mecanismos de falla de las conexiones en estanterías de lámina delgada, involucra el conocimiento de los materiales, las partes que componen la conexión, las interacciones entre elementos y las normas nacionales e internacionales que definen los ensayos y sus cálculos en general. Además de esto, como parámetros estudiados está el comportamiento del ángulo de rotación con respecto al momento flector, lo que hace necesario establecer un contexto de la evaluación de dicho parámetro desde el punto de vista experimental y de simulación. Se inicia entonces en este apartado con las definiciones de las partes que componen la estantería, pasando por el comportamiento de las juntas y finalizando con los métodos de simulación usados para predecir el comportamiento de las conexiones.

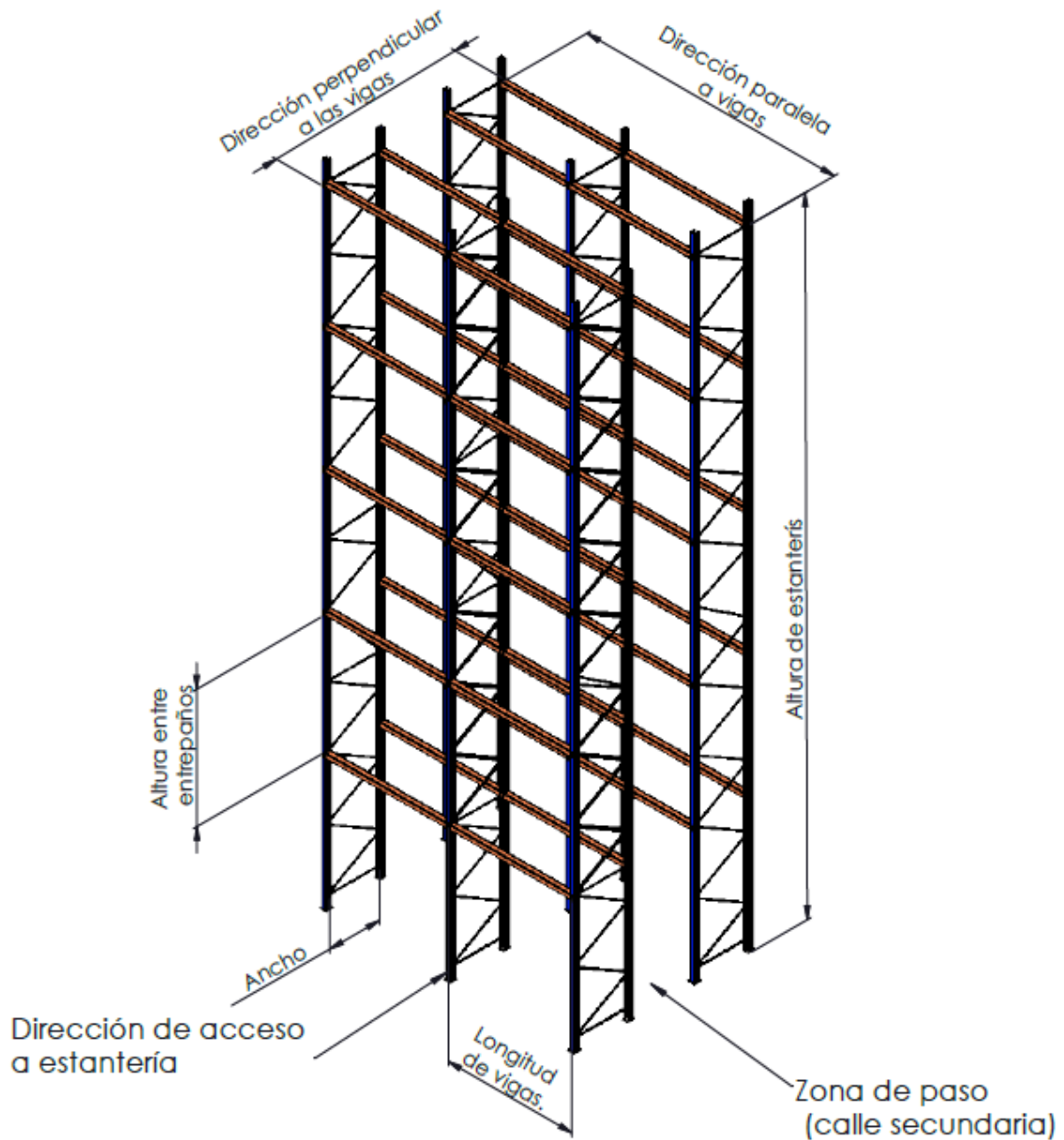
1.1 ESTANTERÍAS

Existen diferentes tipos de estantería, las cuales varían según el tipo de trabajo a realizar, el peso a soportar, el tipo de elementos a almacenar y el grado de rotación de la mercancía almacenada. Dentro de las más destacadas se encuentran la estantería liviana, la estantería tipo pesada o selectiva, estructural y la estantería en cantiliver, cada una de ellas con variaciones en la geometría de sus partes principales, espesores y tamaño.

Para la presente investigación se realiza una descripción detallada de las partes y funcionamiento de la estantería tipo pesada o selectiva como es conocida a nivel local. Por esta razón, en este apartado se presentan por un lado los elementos principales que forman parte de las conexiones de este tipo de estanterías, y por otro lado, las configuraciones típicas en las estanterías usadas a nivel local.

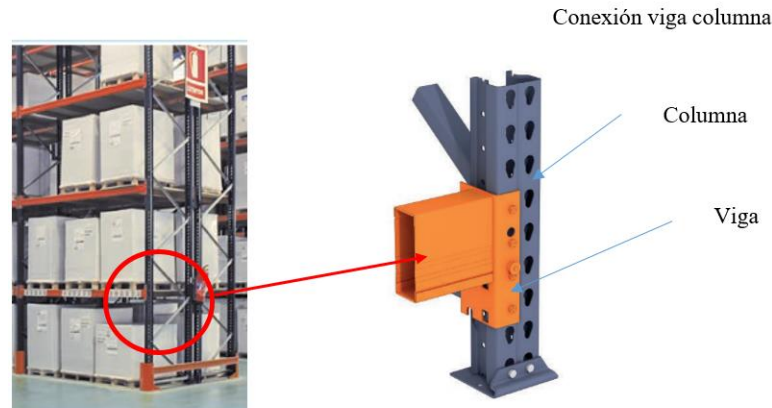
En la Figura 1-1 se muestra en términos generales la geometría de un ensamble tipo estantería selectiva, en la cual se establecen convenciones generales que serán tenidas en cuenta en el presente apartado y buscan dar un punto de partida para los conceptos a tratar. A su vez, contextualiza a nivel global la interacción entre componentes y su distribución espacial.

Figura 1-1 Estantería tipo selectiva. Autoría propia



En el caso particular de la investigación, la cual se centra en el comportamiento de las conexiones de este tipo de estructuras, se definen solo los componentes que hacen parte de la misma (Figura 1-2), sus respectivos materiales de manufactura y su forma de ensamble.

Figura 1-2 Conexión viga columna en estantería selectiva, imágenes ajustadas de catálogo Mecalux [54].

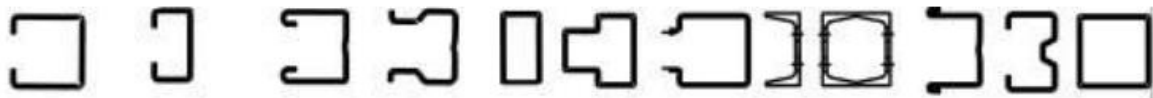


Como se muestra en la Figura 1-2, la conexión de una estantería está compuesta por una columna o puntales (elemento vertical), construidos por láminas de acero de bajo contenido de carbono según norma ASTM A36, los cuales son doblados por medio de rodillos y troquelados según la geometría deseada para la conexión. En el caso de la viga, es el elemento horizontal y cuya función principal es soportar el peso de los elementos almacenados, se unen a las columnas mediante conectores que encajan en las ranuras de las columnas, las cuales cambian su geometría dependiendo del fabricante.

1.2 COLUMNAS

Los puntales o columnas son los componentes que resisten las cargas verticales y las trasladan en forma de reacción al piso. Por su geometría permite un amplio grado de modularidad con las vigas, permitiendo modificar las alturas según sea necesario, a su vez, hacen la integración con los arriostramientos, formando lo que se conoce como marcos (unión de dos columnas con arriostramientos). Para permitir las condiciones antes mencionadas, los fabricantes cambian sus geometrías y espesores con el fin de garantizar su fácil ensamble junto con una resistencia adecuada según la aplicación. Por lo general los perfiles de las columnas son abiertos con más de dos dobleces sobre su superficie, en cuanto a esto, autores como [41][9][58] realizan diferentes experimentos con el fin de predecir el comportamiento con diferentes geometrías y espesores. Siendo los más relevantes y citados los que se muestran en la Figura 1-3.

Figura 1-3 Perfiles usados en columnas de estanterías. Tomado de [55]

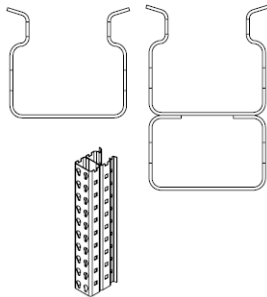
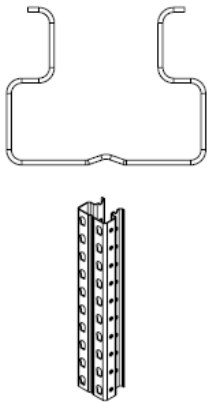


Como se muestra en la Figura 1-3, los perfiles pueden variar en proporciones de ancho, alto, espesor y resistencia. Encontrándose columnas que varían en ancho desde 30 mm hasta 120 mm (plano horizontal), alto desde 50 hasta 145 mm (plano vertical), espesor desde 1 hasta 2.5 mm y resistencia de 270 a 570 MPa. Siendo estas variables las que hacen tan complejo el

comportamiento, esto sumado con las formas de las ranuras que presentan sobre su superficie, lo que hace que para los cálculos sobre las columnas se tome el área neta efectiva (resta del área de la sección transversal sin agujeros y el área que cubren los agujeros), para realizar las estimaciones.

Para la presente investigación se toma en cuenta las geometrías de las columnas usadas en estanterías selectivas a nivel local como se muestra en la Tabla 1-1.

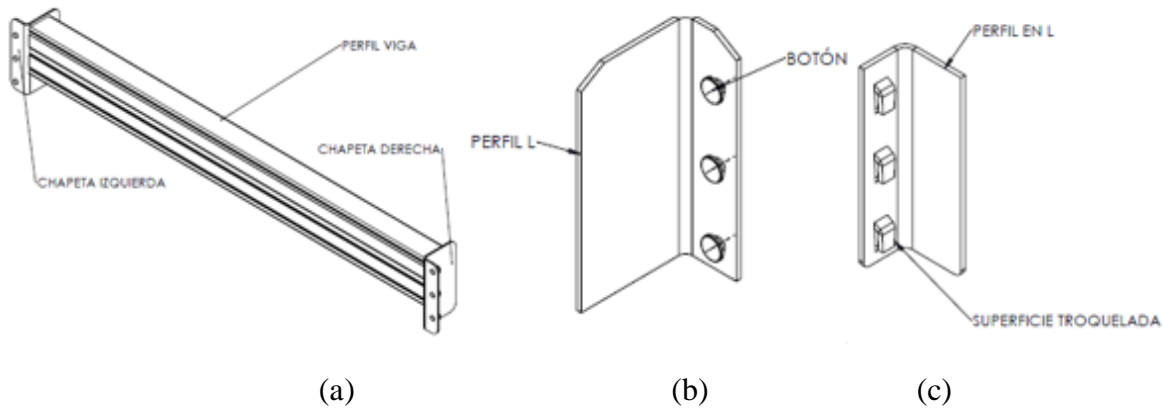
Tabla 1-1
Geometrías usadas a nivel local

<u>TIPO DE PERFIL</u>	<u>GEOMETRÍA</u>	<u>DESCRIPCIÓN</u>
BOTÓN		<p>Las estanterías selectivas a nivel local presentan perfiles en los cuales dependiendo de la altura de trabajo las usan sencillas (parte superior izquierda) o dobles (parte superior derecha). En el caso de perfiles dobles se encuentra soldaduras de tipo intermitente con espaciamientos que oscilan entre 300 y 500 mm y una longitud de cordón de 20 a 30 mm.</p>
TROQUELADA		<p>Para el caso de perfiles de columnas en conexión con vigas de perfil troquelado, es muy común encontrar columnas sencillas con perfil de tipo abierto, el cual a diferencia del botón presenta unas nervaduras en la parte central por la cara de conexión.</p>

1.3 VIGAS

Las vigas están compuestas por un elemento central (perfil doblado y grafado o perfil doblado y soldado), el cual es fabricado en acero laminado en frío (CR). En los extremos unas placas soldadas denominadas chapetas o lengüetas, los cuales a su vez, se componen de unos elementos llamados pines (botones) o unas aristas troqueladas, los cuales por lo general están contruidos en un acero laminado en caliente (HR) en forma de L la cual contiene los enganches, como se muestra en la Figura 1-4.



Figura 1-4 Partes que componen el ensamble de la viga: (a) viga y chapetas, (b) chapetas con botón, (c) chapeta troquelada. Autoría propia


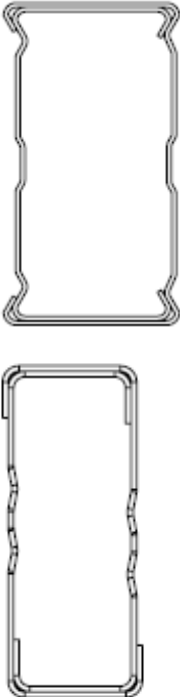


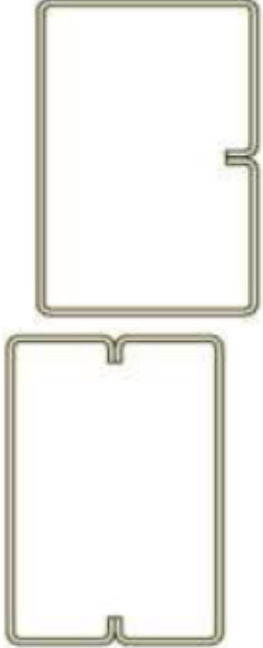
Como se muestra en la Figura 1-4, la viga es la unión de diferentes componentes, cada uno de ellos con una geometría y una función específica dentro del ensamble. En nuestro entorno se pueden encontrar los dos tipos de chapetas (troqueladas y botón), lo que hace incrementar el número de variables a relacionar para el diseño de la experimentación. A su vez, se encuentra distribuciones en las cuales hay tres y cuatro puntos de contacto tanto para botón como por superficies troqueladas.

Para la presente investigación fue realizada una clasificación de las diferentes geometrías usadas en los perfiles de las vigas de las estanterías de tipo selectiva a nivel local como se muestra en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2
Tipos de perfiles en vigas de estanterías selectivas. Autoría propia.

<u>TIPO DE PERFIL</u>	<u>GEOMETRÍA</u>	<u>DESCRIPCIÓN</u>
ENTREPAÑO	 <p>A</p>	<p>Su diseño permite que se pueda ubicar un entrepaño en el escalón o sobre la superficie superior. En el caso de ubicar la carga sobre el escalón se podría considerar una carga distribuida puesto que el entrepaño realiza dicha función, en el caso de colocar sobre la superficie es una distribución más puntual y depende de la geometría de la estiba.</p> <p>La diferencia entre el modelo A y B está asociada a los puntos en los cuales se realiza la soldadura para la unión del perfil, siendo en el primer caso la junta en la parte superior (tope) y en el B se realiza donde se unen las dos pestañas en la parte inferior (filete). Es de destacar que la capacidad de soportar esfuerzos se ve modificada por el cambio de la inercia de la misma.</p>
	 <p>B</p>	

<u>TIPO DE PERFIL</u>	<u>GEOMETRÍA</u>	<u>DESCRIPCIÓN</u>
DOBLE ENTREPAÑO		<p>Este perfil permite que se ubiquen dos entrepaños, uno a cada lado del escalón. Igual que los de entrepaño sencillo, el método constructivo está en láminas dobladas y soldaduras intermitentes tipo filete.</p>
ESTIBA SIN SOLDADURA		<p>Este tipo de perfiles están diseñados para ser ensamblados de tal manera que no requieran soldadura entre las láminas. A su vez, las deformaciones en los costados modifican las propiedades inerciales de la viga y generan mayor rigidez.</p> <p>Los perfiles están diseñados para colocar estibas en la parte superior, lo cual se podría considerar como cargas puntuales dependiendo del diseño de la estiba.</p>

<u>TIPO DE PERFIL</u>	<u>GEOMETRÍA</u>	<u>DESCRIPCIÓN</u>
ESTIBA CON SOLDADURA		<p>La geometría es más sencilla que las anteriores, sin embargo, en este caso si requieren de soldadura en la junta (parte lateral o superior e inferior).</p> <p>Los perfiles están diseñados para colocar estibas en la parte superior, lo cual se podría considerar como cargas puntuales dependiendo del diseño de la estiba</p>

1.4 CONEXIONES

Las conexiones en estanterías de lámina delgada están en los extremos de las vigas y constituyen la interacción entre las chapetas y la columna, en unas superficies muy pequeñas de contacto entre el perfil troquelado y la columna (en el caso de chapetas troqueladas), y el contacto entre un segmento del contorno del botón y la columna (en el caso de vigas con botones). Es por tanto, que por definición se podría establecer que una conexión es un conjunto de componentes (placas, pernos, soldaduras, etc.) dispuestos para transmitir fuerzas de un miembro a otro[59], los cuales para el caso particular de la estantería se hablaría de la columna y el ensamble de la viga.

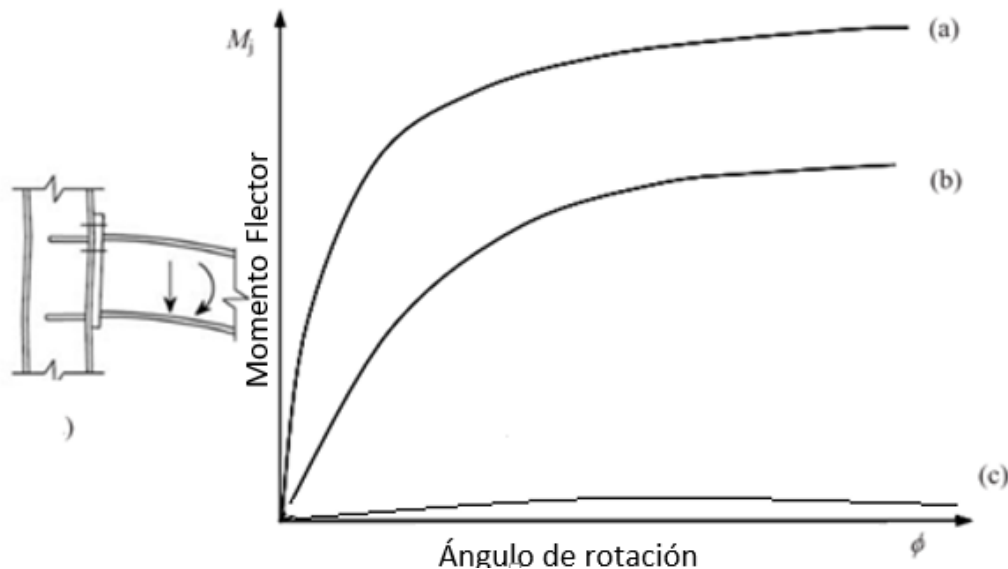
Una conexión de estantería puede estar sometida a cualquier combinación de fuerza axial, fuerza de corte y momento de flexión en relación con tres ejes perpendiculares, sin embargo, por simplicidad se reduce a fuerzas en un plano, lo cual favorece el análisis y permite para el caso en particular evaluar las condiciones experimentales muy cercanas a las evaluadas en la simulación.

Para la presente investigación se evaluó el comportamiento del conector de extremo de viga (chapeta) en interacción con la columna, bajo los estándares internacionales más utilizados en el diseño de estanterías de almacenamiento. Los códigos de diseño recientes que proporcionan orientación sobre el diseño son RMI [21] , EN 15512 [4] y a nivel local la NTC 5689 [60] la cual toma consideraciones de las dos anteriores.

A su vez, se debe comprender el comportamiento de la conexión bajo carga, y su clasificación respecto a los otros tipos de conexiones existentes. En este sentido, se puede establecer que existen tres tipos de conexiones que se comparan en la Figura 1-5.

- Rígidas (a)
- Articuladas (c)
- Semirrígidas (b)

Figura 1-5 Representación de comportamiento de las conexiones respecto a su rigidez rotacional, adaptado de [58]



En la Figura 1-5 se observan tres comportamientos de conexiones, graficando en las abscisas el ángulo de rotación y en las ordenadas el momento flector máximo, siendo las rígidas (a) aquellas que pueden transmitir todo tipo de solicitaciones a la estructura, por lo general están asociadas a elementos soldados o atornillados con refuerzos que hacen que la rigidez de la junta sea más alta que la de los elementos adyacentes a la misma. En el caso de las articuladas (c) están definidas como aquellas que no pueden transmitir momentos y su construcción están en muchos casos asociada a conectores tipo pasador. Por ultimo las semirrígidas (b), se consideran un punto intermedio entre a y c pueden transmitir todo tipo de esfuerzos (normales y de corte), sin embargo los incrementos en el ángulo de rotación y el desplazamiento no pueden ser despreciados. Para la presente investigación se establece que el comportamiento de las conexiones en estantería presenta un comportamiento tipo semirrígido (b).

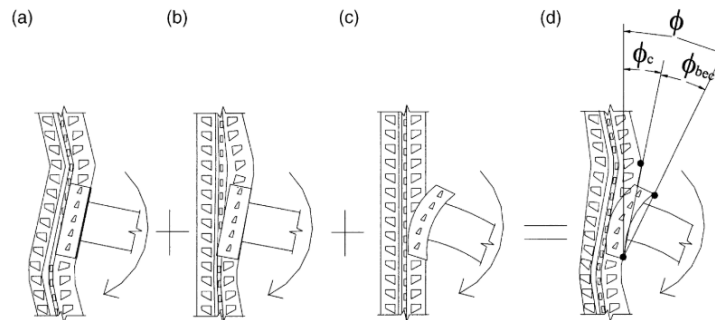
A nivel del euro código EC3 y a nivel local la NSR10, las conexiones tienen una clasificación general hacia la consideración de cómo sus elementos adyacentes están unidos, es así como se establecen que las juntas solo pueden ser soldadas, atornilladas y remachadas, no encontrando como tal una clasificación exacta para nuestra investigación particular.

Es así como, la clasificación de las conexiones de estanterías se consideran sin pernos debido a la forma del conector del extremo de la viga y al uso del conector de lengüeta (botón o troquelado), que se acoplan en función del paso de perforación (superficie troquelada) o el contacto del borde del botón. Las lengüetas actúan como parte integral del conector del extremo de la viga. El comportamiento semirrígido se debe a la distorsión de las paredes verticales (columna y sus fallas locales), el desgarro de la perforación vertical y la distorsión del conector ya sea por la deformación del botón o la cizalladura del extremo troquelado.

Las pruebas de conexión viga-columna han buscado determinar la relación del momento flector en la articulación, con el ángulo de rotación entre la columna y la viga de conexión. Lewis en 1991 proporcionó un enfoque de diseño simple para garantizar la estabilidad de las estructuras de estanterías e incluir el efecto que la forma de las características de momento-rotación que tiene sobre el comportamiento general de la misma[61].

Hacia 1995 Markazi [50], realizó pruebas en cuatro tipos de conectores de extremo de viga disponibles comercialmente, con el fin de determinar los parámetros que rigen un diseño eficiente de conector de extremo de viga, concluyendo sobre los factores que más inciden en el comportamiento de la junta. Por su parte Bernuzzi y Castiglioni [51], mencionan que la predicción analítica de la rigidez y la resistencia del conector no es práctica y los principales códigos internacionales de diseño de racks recomiendan experimentos para determinar las propiedades puesto que el comportamiento relaciona a la rigidez de la columna y del propio conector como se muestra Figura 1-6.

Figura 1-6 Comportamiento de una conexión bajo condiciones de carga a flexión [47].



En la Figura 1-6 se muestra que la deformación bajo condición de carga en una conexión de estantería debe involucra la suma de (a) deformación de la columna en corte, más (b) deformación de la columna en flexión, junto con (c) deformación de la conexión, con el fin de obtener (d) deformación de la articulación global.

Por otro lado, en el 2004 Aguirre [46] (página 545) presentó hallazgos experimentales sobre la conexión viga-columna bajo cargas estáticas y cíclicas. La similitud de los modos de falla estática y cíclica indica que la carga de falla es controlada completamente por los elementos de conexión.

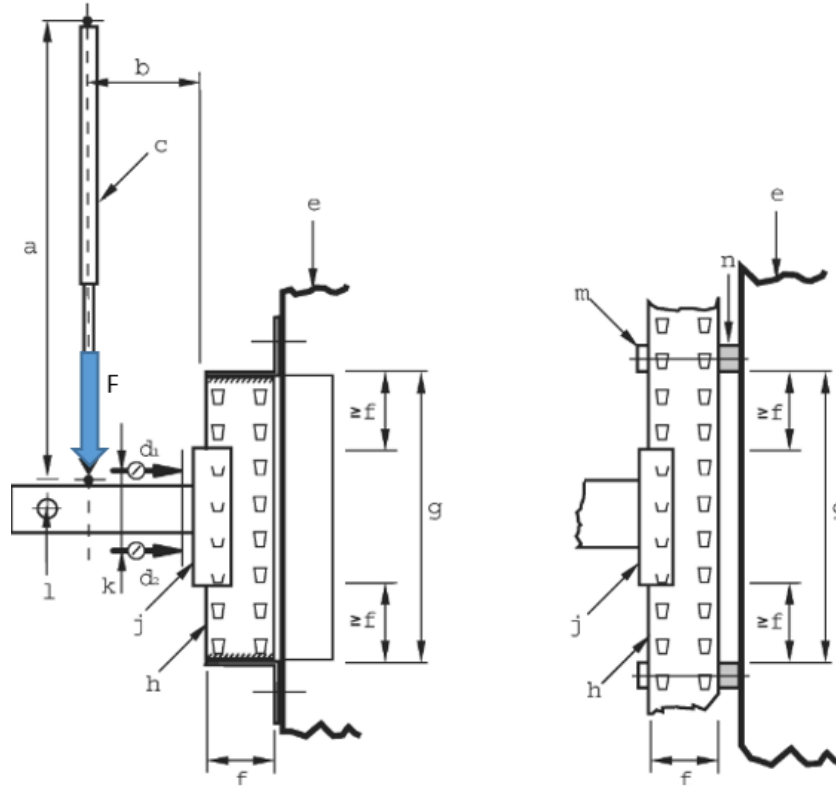
Bajoria y Talikoti (2006) han realizado pruebas para determinar la flexibilidad de los conectores de viga a columna utilizados en los sistemas convencionales de sujeción de estanterías, mediante la configuración de pruebas en voladizo y doble en voladizo. Otras investigaciones de tipo experimental más recientes muestran que el enfoque principal de la problemática se plantea desde el cálculo del momento flector con respecto al ángulo de rotación en simple y doble cantiliver[17]

1.5 MÉTODOS EXPERIMENTALES

Es claro que existen diferentes metodologías con las cuáles se puede estimar de manera experimental la relación entre el ángulo de rotación y el momento flector máximo sobre las conexiones rígidas y semirrígidas; sin embargo, la presente investigación toma como referentes principales el RMI 2012 y el EN 15512, siendo este último el más recomendado por múltiples

autores para determinar la rigidez de la conexión. Al verificar la norma y sus respectivos parámetros se establece el punto de partida del diseño experimental, como se muestra en la Figura 1-7.

Figura 1-7 Disposición para ensayos de flexión en conexiones [4]



Nomenclatura de Figura 1-7:

$a \geq 750 \text{ mm}$, $b = 400 \text{ mm}$, $c = \text{Cilindro de carga}$, $d = \text{Aparatos de medida}$

$e = \text{Marco de ensayo}$, $f = \text{ancho del puntal}$ $g = \text{Longitud del componente a ensayar}$

$h = \text{Puntal corto}$, $j = \text{Conector}$, $K = \text{Distancia entre captadores}$.

$l = \text{Restricción lateral}$, $m = \text{Morzada}$, $n = \text{Espaciador}$ $F = \text{fuerza aplicada}$.

Como se muestra en la Figura 1-7, se pueden realizar dos montajes alternativos para la sujeción de la columna, y de esta manera evitar la rotación de la misma, a su vez, se deben garantizar unas dimensiones específicas para la aplicación de la carga, como se establece para las cotas a y b .

Es por tal, que el cálculo del momento flector sobre la conexión se define en la ecuación 1-1.

Ecuación 1-1 Momento flector

$$M = b * F$$

Donde: b es el brazo de la fuerza F .

Respecto a la rigidez rotacional, EN 15512 (2009) brinda la oportunidad de trazar las curvas bilineales, mostradas en la figura 2.8. La rigidez rotacional del conector se puede obtener como la pendiente (K_{ni}), la cual se mide como una línea que pasa por el origen y que aísla áreas iguales entre ella y la curva experimental (A1 y A2), por debajo del momento de diseño corregido (MRd), siempre y que se cumpla la ecuación 1-4.

Ecuación 1-4 Rigidez rotacional.

$$K_{ni} \leq 1.15 = \frac{MRd}{\theta_{ki}}$$

El valor de diseño de la rigidez del conector se tomará como el valor promedio K_m como se especifica en la ecuación 1-5.

Ecuación 1-5 Rigidez rotacional de diseño.

$$K_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{ni}$$

Esta disposición está diseñada para limitar la diferencia entre la rotación en caso de falla asumida en el modelo y la indicada por la prueba hasta en un 15%, en los casos en que el conector se comporta de forma no lineal. El diagrama de derivación de la rigidez del conector se presenta en la Figura 1.8. La curva mostrada representa la curva promedio de las repeticiones de cada grupo de experimentos, esta se obtiene trazando el valor medio de la rotación en cada incremento de momento hasta el valor del momento de diseño (MRd) utilizando las curvas $M-\theta$ después de la corrección. La curva multi-lineal se obtiene reemplazando la curva promedio con una serie de líneas rectas, que siempre están debajo de ella. Se supone que la característica $M-\theta$ también es válida para las rotaciones negativas.

La ductilidad del conector viga columna o BCC, juega un papel importante en la minimización de la intensidad de la deformación en la propia articulación, así como las deformaciones más grandes proyectadas en la superficie cerca de la conexión. Autores como KM Bajoria y Talicotti, ratifican en sus artículos que en rotaciones más bajas se desarrollan una alta no linealidad en el conector (troqueles del conector), que influye en la capacidad estática de la estructura. En rotaciones más grandes, la capacidad de rotación inelástica de BCC es sustancial y, para algunas conexiones, puede superar los 0,2 radianes, específica autores como Filiatrault.

Las anteriores ecuaciones mostradas, indican que existen factores que modifican la capacidad de la conexión, así como el análisis si la deformación sobre la junta es baja (menor a 0,1 radianes) o alta (superior a 0,2 radianes), variables que deben ser tenidas en cuenta tanto en el análisis de los datos como en el modelo planteado para ser analizado a nivel de simulación.

1.6 MÉTODOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA.

El uso de métodos de simulación para la verificación del comportamiento de las conexiones de estantería y en general de conexiones es una alternativa muy usada a nivel mundial, puesto que permite ahorrar costos, minimizar errores aleatorios y sistemáticos que pueden presentarse en investigaciones que usan solo el método de experimentación.

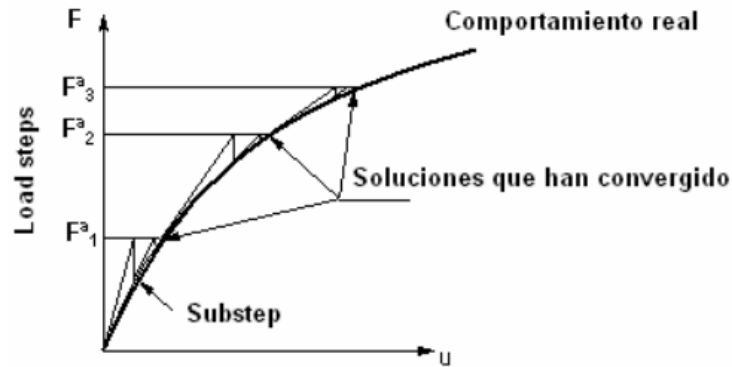
El desarrollo basado en el método de los elementos finitos de este tipo de análisis se ha realizado a través de la historia en diferentes programas, los cuales han mostrado ser una herramienta viable para describir el comportamiento y predecir los cambios con varios parámetros que gobiernan la conexión. El método de elementos finitos (FEA) suele estar enmarcado en dos fases, la primera en la cual se realiza el levantamiento dimensional y el respectivo modelado y la fase de análisis propiamente dicho, es así como en esta última se definen condiciones de interacción entre componentes, aplicación de carga, materiales, geometría de elementos, etc.

La definición del modelo en la presente investigación involucra realizar un análisis de otras investigaciones (a nivel mundial), con el fin de establecer las estrategias usadas, los programas y las condiciones de frontera que más se recomiendan para este tipo de comportamiento.

Las consideraciones para el material de las partes que componen la conexión fueron establecidas a partir de ensayos de laboratorio realizados en investigaciones previas (autor) y datos de investigaciones de referencia, como la de Urbano en 2018 [58], quien documentó las propiedades no lineales del material de las columnas de las estanterías fabricadas a nivel local, las cuales se ajustan con lo especificado en la norma EN15512 [62] en su capítulo 8 y la norma EC3 (2005); por su parte, Moen [54], en el capítulo 7 especifica que las propiedades del acero laminado en frío usado en las columnas de estanterías se puede modelar con la teoría clásica de no linealidad, con el modelo de plasticidad de von Mises y cargas de tipo estáticas, lo cual es reafirmado por Syed [49] en su tesis doctoral.

Los métodos de solución para los problemas de no linealidad usados en el análisis de elementos de lámina delgada y conexiones son: el método de Ricks y Newton Raphson [54], El método de Ricks es discutido por investigadores como Crisfield, Powell y Simons, Ros[63][11]; sin embargo, el método de Newton-Raphson es usado en investigaciones como [48][58][54][49] y especifican que es apropiado para solucionar los problemas no lineales de componentes de lámina delgada. Se trata de un método mixto que consiste en aplicar alternativamente el método incremental y el método iterativo de Newton [58].

Figura 1-9 Método Newton Raphson (tomado de ayuda de ANSYS)



La Figura 1-9 muestra la forma en que el método realiza los incrementos de carga que se conocen con el nombre en inglés de load steps, mientras que las iteraciones que se hacen dentro de cada load step reciben el nombre de substeps. Antes de cada solución, el método Newton-Raphson evalúa el vector de cargas que está fuera de equilibrio, que corresponde a la diferencia entre las fuerzas internas y las fuerzas aplicadas (externas).

El software de elementos finitos ANSYS, es citado por autores como Casafont [9] [64], Bajoria [43], Chen[65], usado como herramienta para predecir el comportamiento tanto de la columna como como de la junta, los autores mencionados anteriormente referencian el elemento SHELL63 para representar la columna y la sección de la viga de caja. Las superficies de contacto se las definen con el elemento CONTA173 entre la placa de conexión y la columna para su interacción. Las pestañas las modelan mediante el uso del elemento SOLID43 para proporcionar conexión entre el conector y la columna [53].

Figura 1-10 Propiedades de algunos elementos finitos usados en ANSYS [49]

Element name	SHELL63	SOLID45	CONTA173
Position of connector element	Upright	Connector hook	Contact between connector and upright
Description	Plastic shell element	3D structural solid element	3D surface-to-surface contact element
Number of nodes	4	8	4
Degrees of freedom	x, y, and z translational and rotational displacements	x, y, and z translational displacements	x, y, and z translational displacements, temperature

Como se muestra en la Figura 1-10, ya existen datos en la literatura para la simulación, pero también es conocido que el tipo de contacto entre componentes (fricción) es una condición de no linealidad que involucra un gasto computacional muy alto por la complejidad de la restricción y la convergencia.

Los contactos por fricción son definidos claramente en juntas atornilladas [46]; sin embargo, para las conexiones de estantería no se cuenta con un marco teórico de referencia. Por su parte, al tratar de evaluar la fricción como una fuerza no conservativa dificulta la convergencia del modelo, porque se necesita un historial de cargas y un aumento paulatino de la misma, es por esto que depende del programa específico en el que se realice la simulación que se deben configurar los

métodos de resolución, entre los que se encuentran: Penalty Method, Lagrange Multiplier Method y Augmented Lagrange Method.

Investigaciones como [55], muestran que una forma sencilla es realizar una conexión virtual entre el conector y la columna, usando elementos de tipo resortes axiales que generen restricción horizontal y vertical y evitan el uso de contactos de fricción. En cuanto al coeficiente de rigidez de los mismos, son estimados en función de ensayos experimentales.

Como conclusión a este apartado, se podría establecer que las conexiones en estanterías presentan un comportamiento de tipo semirrígido, condición que es relevante en el comportamiento total de la estructura como ensamble. La caracterización de la junta se puede realizar a través de ensayos de simple y doble cantiliver, los cuales buscan determinar la capacidad que tiene a rotar bajo una condición de carga.

A su vez, se puede definir los parámetros iniciales para el diseño y construcción del marco de carga y su respectiva instrumentación para aplicar y medir las cargas a las conexiones, datos de entrada para la simulación y posterior comparación.

En cuanto a la simulación, se puede concluir que el programa a usar es ANSYS, debido que existen varios autores que han realizado las simulaciones en dicho software y que las condiciones de frontera y forma de aplicación de carga ya tienen precedentes, los cuales serán el punto de partida para la presente investigación. Sin embargo, se cuenta con una gran incertidumbre frente a parámetros específicos a tomar en la definición de los contactos, puesto que las conexiones tipo botón no tienen referencias claras, condición que se considera crítica en la simulación.

INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL.

Con el fin de establecer un procedimiento de experimentación se realizó una revisión a nivel local, con el fin de verificar si se contaba con una máquina para realizar el ensayo a las conexiones de estantería, encontrándose que no se cuenta con reportes de experimentación de comportamiento de conexiones de estantería. Por tal razón, se procedió a verificar en las diferentes investigaciones los factores más relevantes, la forma de selección de las muestras, el tipo de instrumentación, la forma de sujeción de la muestra, la cantidad de repeticiones por muestra, etc.

Al realizar un análisis de los diferentes autores mostrados en la revisión bibliográfica asociada con experimentación, se encuentra que [50] realizó modificaciones en la cantidad de puntos de contacto variando desde 3 hasta 5 en conectores tipo troquelada, espesor del conector, espesor de la lámina de la viga y profundidad de la misma en la dirección de aplicación de carga, la cantidad de repeticiones reportada es de tres por cada variable.

Por su parte [55] realiza 18 ensayos en los cuales modifica la cantidad de puntos de contacto reportando con 4 y 5 puntos en junta troquelada, espesor de la columna (desde 1.8 a 2.5 mm), altura de la columna y profundidad del perfil de la columna; para este caso el autor no reporta repeticiones por modificación.

A su vez, [56] realiza ensayos con variantes en el espesor de la columna, la profundidad de la misma y el número de puntos de contacto, en este caso se realizaron 3 repeticiones por cada variante, ensayando en total 18 conexiones de estantería tipo troquel.

Para complementar, se toma como referencia la investigación de [40] realizada en el 2015 y cuyo reporte muestra la mayor cantidad de variantes realizada sobre las conexiones de estantería, siendo en total 35 variables tenidas en cuenta y realizando 3 ensayos por cada variante para un total de 105 ensayos. Los diferentes parámetros tenidos en cuenta por parte del autor son dos tipos de perfiles para las columnas, cuatro espesores de columna, siete profundidades de viga diferentes y tres profundidades de conector de extremo de viga.

2.1 MUESTRA ANALIZADA

Al no disponer de procedimientos de diseño e investigaciones a nivel local en conexiones de estanterías de lámina delgada, se tomó en consideración los factores preponderantes que autores han reportado en sus investigaciones a nivel internacional. Tomando en consideración lo anterior se verifica cuáles pueden ser las variantes que el mercado local presenta en sus diseños. Las especificaciones para la realización del ensayo se asumen según estándares internacionales como lo es la EN15512, el cual reconoce la importancia de realizar este tipo de ensayos para definir las propiedades específicas de un componente.

El propósito del presente programa experimental es investigar el comportamiento de las conexiones a la falla y sus condiciones semirrígidas, variando la cantidad de puntos de conexión, la holgura o separación entre componentes y el tipo de conector (troquelado o botón). Con base en lo anteriormente expuesto se tomaron las variables antes mencionadas y se definió una cantidad

de repeticiones de 3 por tratamiento, esto como referencia de las investigaciones referenciadas en numerales anteriores y de las recomendaciones de las normas consultadas para la aplicación específica.

En la investigación se realizó en total 24 ensayos, compuestos por tres repeticiones de 8 variantes, dentro de las cuales se distinguen 2 relacionadas con el tipo de conector (botón y troquel), 2 de la cantidad de puntos de contacto (tres y cuatro), y sus respectivas repeticiones con y sin separación entre la lengüeta o chapeta y la columna de ensamble. El tamaño de la muestra está definida por los criterios iniciales planteados en la investigación y los tipos de estanterías selectivas usadas en el rango de una tonelada por entrepaño a nivel local.

Se utilizaron dos tipos de columnas botón y troquelada, las secciones transversales fueron seleccionadas según la fabricación en el mercado local (consulta de fabricantes). Para esto fue necesario validar con diferentes proveedores y revisar reportes de falla de aseguradoras en estanterías metálicas (reportes propios).

Para el caso de las conexiones tipo botón se presentan sus dimensiones generales en la Figura 2-1, y los detalles de la sección transversal en la Tabla 2-1.

Figura 2-1 Sección transversal de columna tipo botón. Autoría propia.

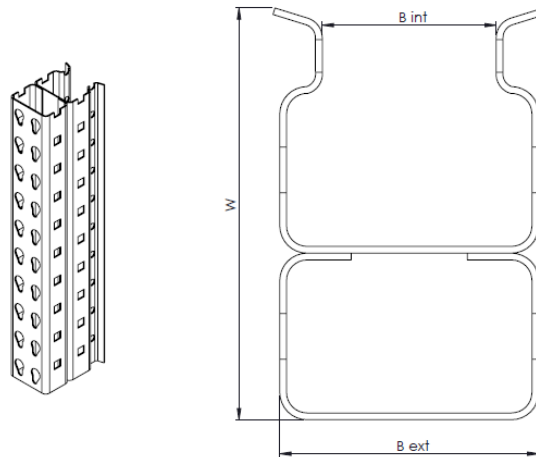


Tabla 2-1 Dimensiones de columna tipo botón

<u>Ancho Externo</u> <u>(mm)</u>	<u>B ext</u>	<u>Ancho interior</u> <u>(mm)</u>	<u>B int</u>	<u>Profundidad</u> <u>(mm)</u>	<u>W</u>	<u>Espesor (mm)</u>
76		51		121		2

Como se puede observar en la geometría de la columna tipo botón, se usa un perfil doble, el cual es soldado de forma intermitente y es usado por lo general para estanterías de tipo selectiva que varían en alturas de 6 a 15 metros, con una capacidad por entrepaño hasta de 2 toneladas.

Por su parte, la geometría más común encontrada en el mercado local en las estanterías tipo troquel difiere de la tipo botón, en este caso se tiene un perfil de tipo sencillo (abierto) como se muestra en la Figura 2-2 y las dimensiones de la misma en la Tabla 2-2.

Figura 2-2 Sección transversal de columna tipo Troquelada. Autoría propia.

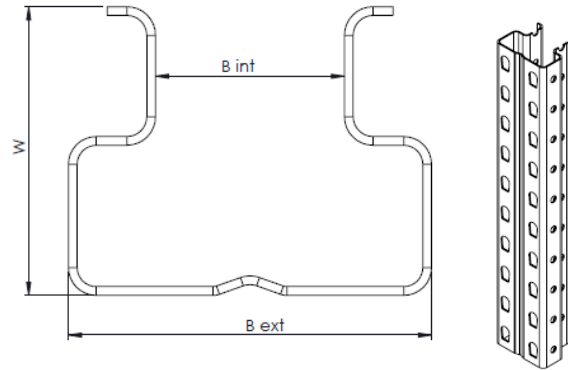


Tabla 2-2
Dimensiones columna tipo troquel

<u>Ancho Externo</u> B ext <u>(mm)</u>	<u>Ancho interior</u> B int <u>(mm)</u>	<u>Profundidad</u> W <u>(mm)</u>	<u>Espesor (mm)</u>
91,5	46,5	73	2,2

Como se observa en la geometría de la columna tipo troquelada, el cambio general está asociado al espesor y a un pequeño pliegue (atiesador) en la parte frontal, sin tener en cuenta que este perfil no cuenta con un soporte frontal soldado como se observó en la columna tipo botón. Este tipo de columnas son usadas en estanterías que llegan hasta 6 metros de altura, con capacidad de carga de máximo 1,5 toneladas por entrepaño.

Los detalles asociados a los conectores de extremo de viga (chapetas), tienen diferentes configuraciones, puesto que la longitud de las mismas varían dependiendo la cantidad de puntos de contacto (botón o troqueladas). La nomenclatura de la geometría se muestra en las figuras Figura 2-3 y Figura 2-4, en cuanto a los detalles dimensionales se establecen en la Tabla 2-3 y Tabla 2-4 respectivamente.

Figura 2-3 Geometría perfil extremo o chapeta de viga tipo troquelada. Autoría propia.

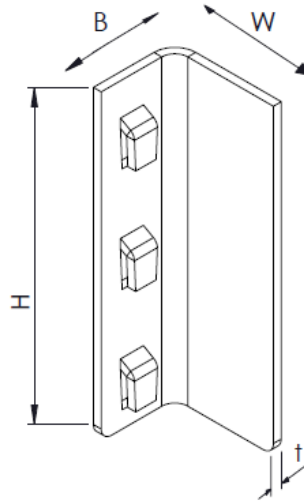


Tabla 2-3
Dimensiones extremo viga o chapeta tipo troquel

<u>Ref</u>	<u># de Pestañas</u>	<u>Ancho B (mm)</u>	<u>Profundidad W (mm)</u>	<u>Altura H (mm)</u>	<u>Espesor t (mm)</u>
1	3	42	64	160	3,75
2	4	42	64	205	3,75

Como se muestra en Tabla 2-3, las modificaciones establecidas para los ensayos de 3 y 4 pestañas están relacionadas con la altura total de la chapeta, las demás dimensiones permanecieron constantes.

Figura 2-4 Geometría de extremo o chapeta de la viga tipo Botón.

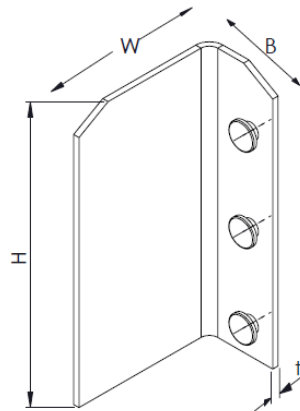


Tabla 2-4
Dimensiones extremo o chapeta de la viga tipo botón

<u>Ref</u>	<u># de Botones</u>	<u>Ancho B (mm)</u>	<u>Profundidad W (mm)</u>	<u>Altura H (mm)</u>	<u>Espesor t (mm)</u>
1	3	41	81	150	3,2
2	4	41	81	200	3,2

En cuanto a la geometría y dimensiones de las chapetas de las vigas tipo botón, se puede establecer que la única diferencia evidenciada en la Tabla 2-4 está relacionada con la altura, parámetro que cambia en función de la cantidad de puntos de contacto.

La altura de la columna se mantuvo constante para todos los ensayos, independiente del tipo de conector (troquelado o botón), la dimensión se mantuvo en 500 mm según lo establecido en la norma EN 15512. En cuanto a la forma de sujeción de la columna al equipo, fue necesario considerar los dos montajes mostrados en la Figura 1-7 y los cuales se explicarán en el siguiente numeral.

Por otra parte, se estableció que otro de los factores a tener en cuenta en el proceso de experimentación, fue la separación existente entre el extremo de la viga y la columna en el momento de realizar el ensamble. Para modificar esta variable y mantener las mismas condiciones geométricas citadas, se construyó una platina con el espesor necesario de los diferentes ensambles que garantiza que los componentes estuvieran en contacto al inicio del ensayo, como se muestra en la Figura 2-5.

Figura 2-5 Lámina separador viga columna.

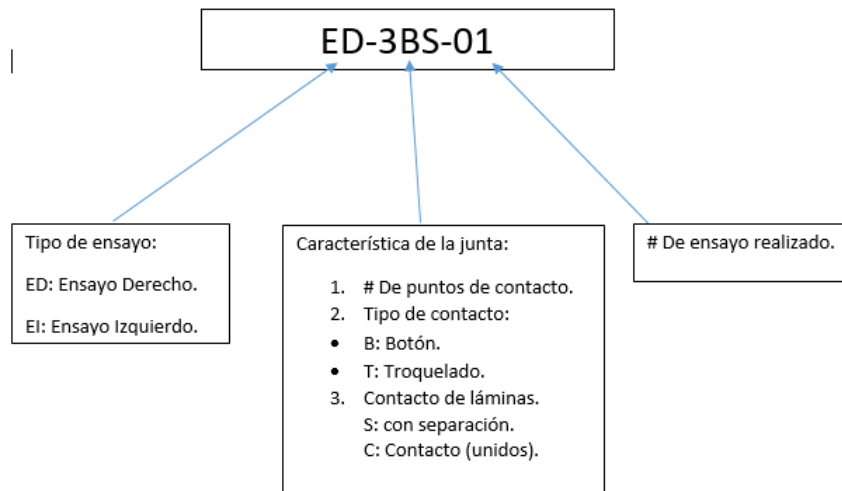


Como se muestra en la Figura 2-5, se fabricó con una lámina doblada, un soporte que permitiera un contacto entre la viga y la columna, de tal manera que al comienzo del ensayo no se generará un desplazamiento angular adicional debido a la separación entre componentes y validar como la junta se comportaba a la falla con dicha separación.

2.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS

Para la identificación de las muestras se realizó una codificación que permite establecer si se trata de una probeta tipo botón o troquelado, de lado derecho o izquierdo, si cuenta con 3 o 4 puntos de contacto, si tiene separación o no y establece que repetición de ensayo se está ejecutando.

Figura 2-6 Codificación de ensayos.



Como se muestra en Figura 2-6, la identificación permite definir en primera instancia si el ensayo es practicado a un perfil derecho o izquierdo (lado de corte sobre el extremo de la viga), a continuación se define si se trata de una conexión de 3 o 4 puntos de contacto, de tipo botón o troquelado y si tiene separación entre componentes o no; para finalizar se define el número de ensayos que se realizó bajo dicha configuración. En el ejemplo mostrado en la Figura 2-6, se está definiendo un ensayo derecho para un perfil de tipo botón, con tres puntos de contacto con separación, y es el primer ensayo realizado con dicha configuración.

Con la codificación establecida para la realización de los ensayos, se procedió a la identificación de los ocho grupos que hicieron parte de la presente investigación, de los cuales se ejecutaron tres ensayos por cada modelo como se muestra a continuación:

Tabla 2-5
Identificación de muestras a ensayar

<u>Grupo</u>	<u>Identificación</u>	<u>Grupo</u>	<u>Identificación</u>
1	EI-3BS-01	5	EI-3TS-01
	EI-3BS-02		EI-3TS-02
	EI-3BS-03		EI-3TS-03
2	ED-4BS-01	6	ED-4TS-01
	ED-4BS-02		EI-4TS-02
	ED-4BS-03		ED-4TS-03
3	EI-3BC-01	7	ED-3TC-01
	EI-3BC-02		ED-3TC-02
	EI-3BC-03		ED-3TC-03
4	ED-4BC-01	8	ED-4TC-01
	ED-4BC-02		ED-4TC-02
	ED-4BC-03		ED-4TC-03

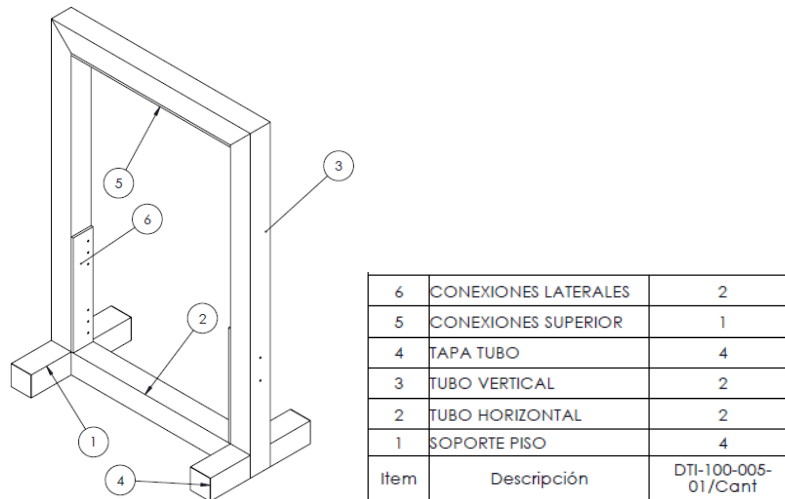
Como se muestra en la Tabla 2-5, la presente investigación muestra los resultados de 24 ensayos de laboratorio, los cuales están divididos en 8 grupos, en los cuales se realizó tres repeticiones por cada configuración para realizar una comparación entre ensayos y un análisis estadístico. La

cantidad de repeticiones se establece desde la norma EN15512 donde se define que “*para cada conjunto puntal y conector, deben hacerse un mínimo de tres ensayos idénticos y los resultados pueden ser interpretados estadísticamente de acuerdo con el apartado 13.3.3*”.

2.3 DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBA

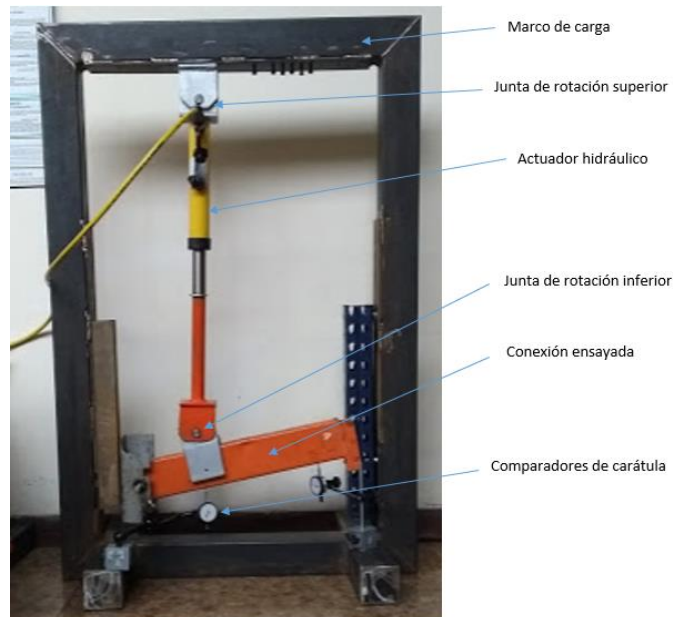
Para el proceso de experimentación fue necesario diseñar y construir un banco el cual garantizó las restricciones establecidas en las normas relacionadas con este tipo de ensayos y mostradas en la Figura 2-7. Por tal razón, se empezó con el diseño de una estructura cerrada que permitiera el anclaje de un actuador hidráulico (ítem 5 Figura 2-7) y la sujeción de forma lateral de la columna de la estantería (ítem 6 Figura 2-7). A su vez, se definió una superficie de sustentación con el fin de dejarla apoyada sobre el piso sin necesidad de realizar anclajes permanentes como se muestra a continuación:

Figura 2-7 Diseño de marco de carga



Con el marco construido, se realizó un primer ensayo, en el cual se usaron comparadores de caratula para medir el desplazamiento de la columna en relación con la carga aplicada. En cuanto a la aplicación de la carga se usó un actuador hidráulico marca Enerpac con gato de referencia RC1010, como se muestran en la Figura 2-8.

Figura 2-8 Montaje preliminar de pruebas



La junta inferior y superior generaron la auto alineación solicitada; sin embargo, la toma de datos de los comparadores de caratula es muy dispendiosa porque se deben re ubicar en varias ocasiones durante el ensayo, lo cual suma un error en la medición. Por otro lado, se debe tomar los datos de forma manual respecto a la presión del cilindro y posteriormente hacer la conversión a fuerza aplicada.

Es claro que las condiciones usadas para la medición de ángulo de rotación y carga no fueron apropiadas, por esta razón se decidió implementar un sistema de adquisición de datos, que permita tener en tiempo real el ángulo de rotación y aplicación de carga.

2.4 INSTRUMENTACIÓN DEL BANCO

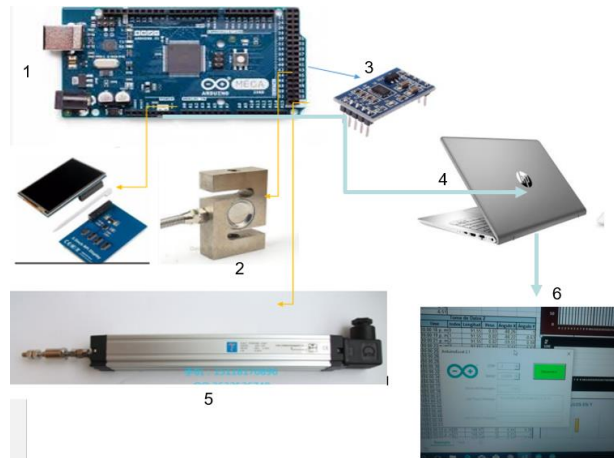
Para la instrumentación del banco se definen las variables a medir, los rangos y velocidad de captura, para esto se tuvo en consideración artículos en los cuales se establecen el uso de inclinómetros para medir el ángulo de rotación [40], y celdas de carga para la medición de la carga de aplicación. Otros autores como [45][17][66] usan sensores de tipo LVDT (Transformador diferencial de variación lineal), los cuales son ubicados sobre la columna, sobre el extremo de la viga y directamente sobre el larguero de la viga.

Carga y desplazamiento.

Para realizar el proceso de captura de datos de carga y desplazamiento se usó un Arduino Mega (ítem 1 Figura 2-9) de referencia ATMEGA 2560, al cual se le conectaron como entradas un

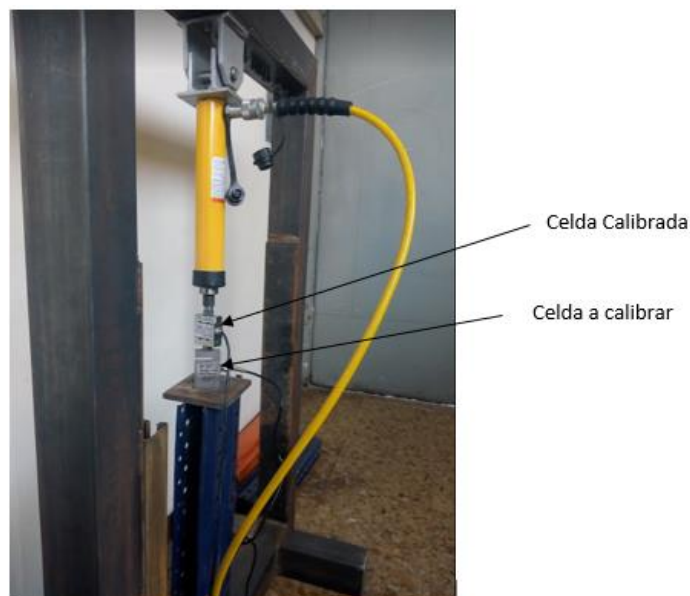
sensor de desplazamiento lineal (ítem 5 Figura 2-9) con referencia LWF-150-A1, y un sensor de tipo Giroscopio de 3 Ejes (ítem 3 Figura 2-9) de referencia MPU 6050, para medir la carga se usó una celda de carga tipo S con capacidad de 1000 kg (ítem 2 Figura 2-9). Para energizar el sistema se usó un computador (ítem 4 Figura 2-9), y para visualizar y almacenar las señales se realizó una interfaz con Excel, ítem 6 Figura 2-9.

Figura 2-9 Configuración sistema de adquisición de datos por Arduino



Con la integración mostrada en la Figura 2-9, se pudo captar y almacenar una medición cada 1,5 segundos tanto de la carga como del desplazamiento lineal y angular de la viga, este último en los tres planos. Para realizar la calibración del sistema de carga se realizó una comparación de la medición de una celda de carga calibrada con la instalada en el sistema, como se muestra en la Figura 2-10.

Figura 2-10 Calibración de celda de carga

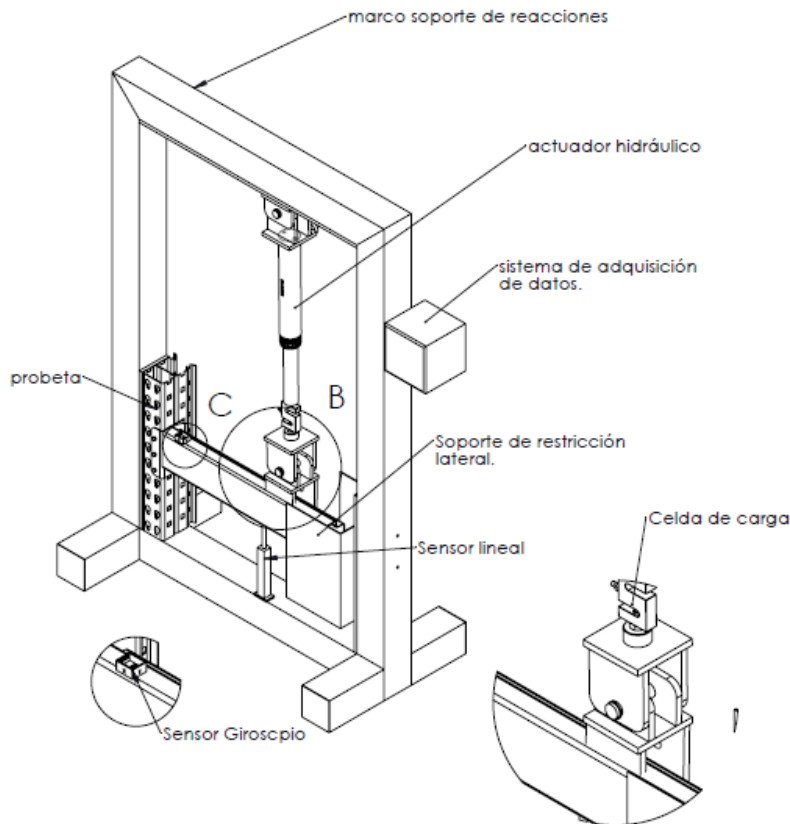


En la Figura 2-10, se puede observar el montaje sobre el marco de carga de dos celdas ensambladas en serie, una de ellas usada como patrón (calibrada) y la otra conectada al sistema de adquisición de datos de la Figura 2-9, con esto se realizó mediciones de tipo ascendente y descendente en un rango de carga del 20 al 80% de la capacidad de la celda. Con dichas mediciones se pudo tomar como patrón la celda de carga calibrada y linealizar la usada en la presente investigación.

2.5 MONTAJE DE PROBETAS

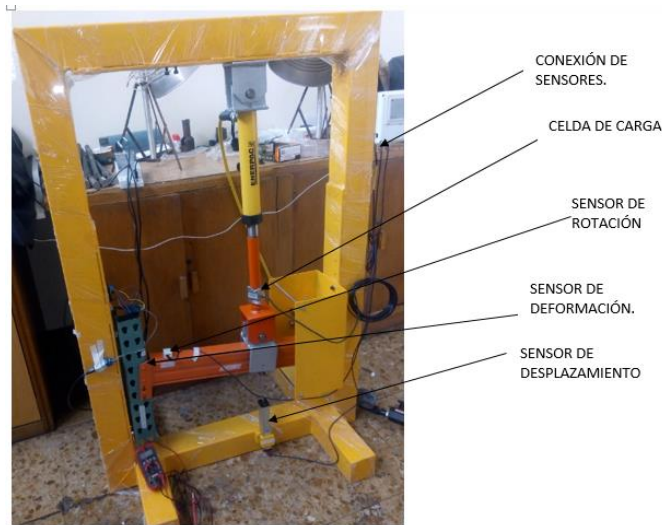
La configuración de montaje para la prueba adoptada en la presente investigación y su representación esquemática se observa en la Figura 2-11. La viga con una longitud de 600 mm se coloca sobre un soporte de restricción lateral que evita los desplazamientos fuera del plano. La columna vertical está conectada al marco de carga en dos puntos utilizando pernos con una distancia libre de 400 mm. Se mantienen dos arandelas de 10 mm de espesor a ambos lados del perno para evitar el contacto de la columna con el marco de reacción. El conector del extremo de la viga con pestañas o botones se engancha en las perforaciones de la columna.

Figura 2-11 Diagrama esquemático del ensayo



La longitud total de la viga es de 600 mm y la carga se aplica a una distancia de 400 mm desde la cara externa de la columna, en donde se ubica una articulación y la conexión con una celda de carga, la cual a su vez se conecta a un eje extensor acoplado al actuador hidráulico.

Figura 2-12 Configuración de prueba



El sensor de desplazamiento se fija a una distancia de 400 mm desde la cara externa de la columna y alineado con la aplicación de la carga (Figura 2-12), la conexión entre el sensor y el extremo de la viga se hace mediante un soporte con un imán cuyas carcasas fueron prototipadas para la aplicación. Los sensores de deformación se ubican sobre la columna, alineados con los puntos de conexión entre el extremo de la viga y la superficie de la columna, el sensor de rotación se coloca lo más cerca posible de la conexión para registrar con precisión la holgura inicial del conector de lengüeta.

El sensor de desplazamiento, sensor de rotación y la celda de carga están conectados a un sistema de registro de datos (parte superior derecha Figura 2-12), a la cual a su vez se conecta la computadora para monitorear la respuesta en tiempo real como se detalló en el apartado anterior. Inicialmente se aplicó una precarga de aproximadamente el 10% de la carga de falla, con el fin de ajustar la conexión y evitar datos errados en la medición, posterior a esto se aplicó la carga real en pequeños incrementos hasta la falla de la conexión.

Para la fijación de los ensambles tipo troquel y botón fue necesario usar métodos diferentes, puesto que las propiedades de sección le permite una mayor resistencia a las columnas tipo botón, como se mostró en la Figura 2-1 y Figura 2-2. Al realizar la aplicación del ensayo se generaban desplazamientos en un plano secundario con respecto al de aplicación de la carga en el caso de las columnas tipo troquel, para esto fue necesario generar una restricción adicional en los extremos de la columna, todo esto tomando como referencia la norma EN.15512[4] y mostrado en la Figura 1-7.

Figura 2-13 Anclajes de sujeción de las Columnas



a) ensamble tipo troquel

b) ensamble tipo botón

En la Figura 2-13, se muestra las diferencias entre los métodos de sujeción para las columnas tipo troquel y botón, para el tipo botón se observa que se ubicaron unos separadores en la parte superior e inferior y se sujetaron con tornillos al marco de carga (costado derecho). En el caso de las tipo troquel (costado izquierdo), fue necesario soldar una platina en forma de L con el fin de rigidizar el extremo de la columna y evitar el pandeo torsional de la columna durante el ensayo.

Algunos detalles de la alineación de la viga respecto a la columna y la sujeción del extremo de la viga no se especifican, así como las herramientas necesarias para la fijación de los diferentes componentes del ensayo. Como parte de la tesis realizó los protocolos del ensayo de la conexión y los planos del marco de carga, como se cita a continuación:

Anexo 1: Planos de fabricación y ensamble de marco de carga

Anexo 2: Protocolo de ensayo, en el cual se encuentra la información técnica de la instrumentación y adquisición de datos del marco de carga.

Información que puede ser consultada y descargada en el siguiente vinculo:

<https://bit.ly/3f7a8S4>

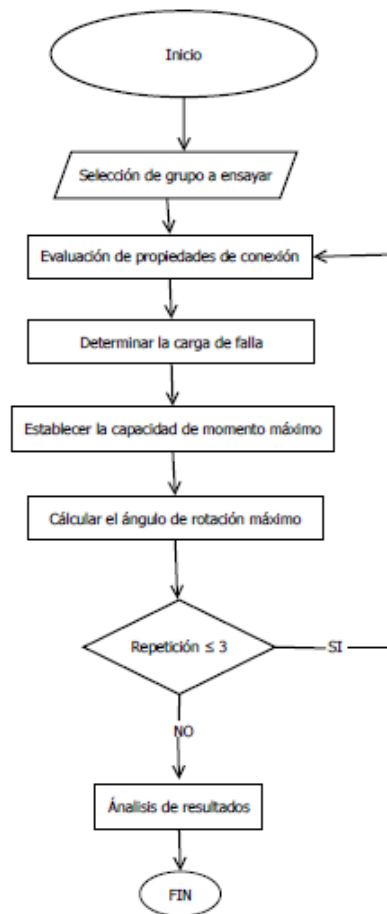
RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos practicados a 24 conexiones y se describen en dos sub secciones, la primera en la cual se muestran los valores numéricos establecidos a partir de los ensayos, sus respectivas repeticiones y el análisis estadístico. Por otro lado, se presentan los modos de falla observados en los elementos que componen la columna y la viga, lo cual involucra un análisis de las deformaciones permanentes.

3.1 ENSAYOS REALIZADOS.

Para cada grupo de probetas ensayadas se realizó un análisis siguiendo el procedimiento detallado en la Figura 3-1, en la cual se describe el proceso hecho por cada tratamiento de datos y sus respectivas repeticiones.

Figura 3-1 Diagrama por grupo de ensayos.



El resumen general de los veinticuatro ensayos practicados se muestran en la Tabla 3-1, junto con el análisis practicado para definir el promedio de momento último y ángulo de rotación máximo promedio. La carga de falla y el momento último fueron medidos a un ángulo de rotación

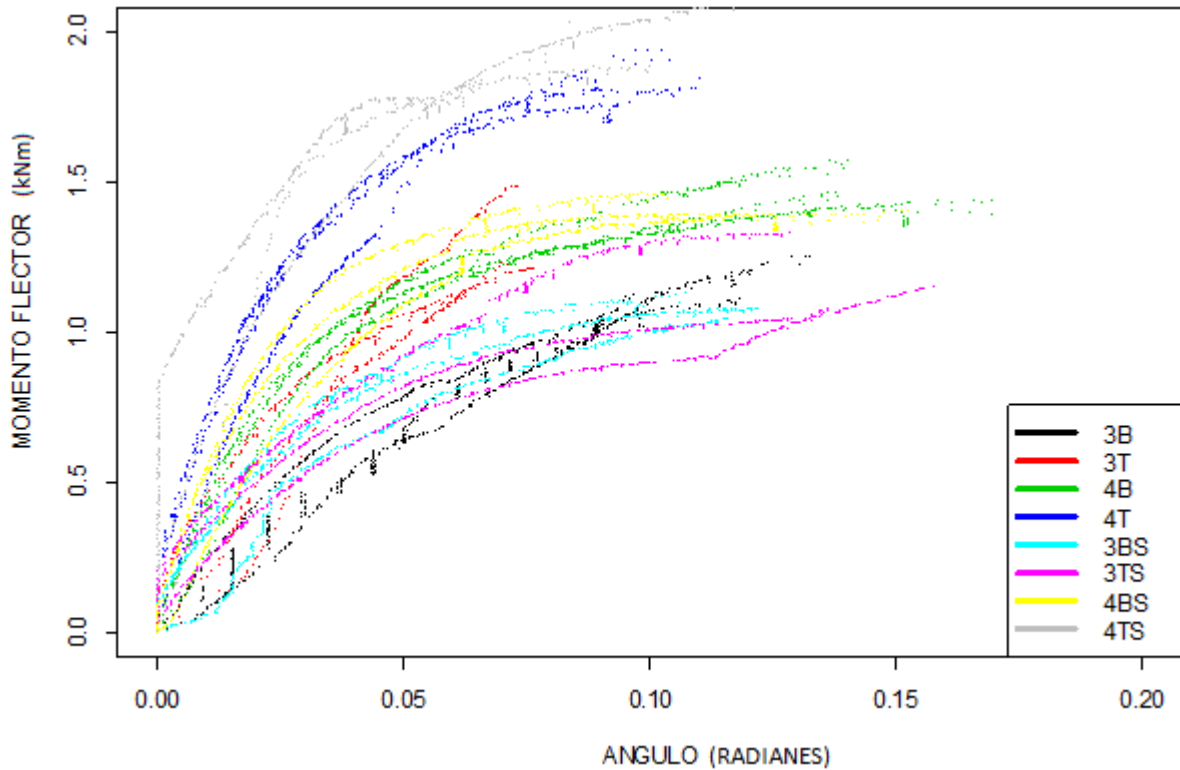
superiores a 0,1 radianes, tomando como referencia la investigación de Vimal Mohan [40] para variables de conexiones similares a las evaluadas en la presente investigación.

Tabla 3-1
Resultados por grupos ensayados

Grupo	Descripción	Ensayos	Carga de falla kN	Promedio Carga de falla kN	Momento último kNm	Promedio Momento último kNm	Ángulo de rotación último Radianes	Promedio del ángulo de Rotación último (Rad)
1	E-3BS	1	2.825	2.70	1.13	1.08	0.13	0.13
		2	2.675		1.07		0.14	
		3	2.6		1.04		0.12	
2	E-4BS	1	3.425	3.53	1.37	1.41	0.13	0.14
		2	3.65		1.46		0.14	
		3	3.5		1.4		0.15	
3	E-3B	1	3.1	2.88	1.24	1.15	0.13	0.12
		2	2.8		1.12		0.1	
		3	2.75		1.1		0.12	
4	E-4B	1	3.675	3.73	1.47	1.49	0.13	0.15
		2	3.925		1.57		0.14	
		3	3.575		1.43		0.17	
5	E-3TS	1	3.325	2.96	1.33	1.18	0.13	0.14
		2	2.675		1.07		0.14	
		3	2.875		1.15		0.16	
6	E-4TS	1	5.85	5.35	2.34	2.14	0.09	0.11
		2	4.75		1.9		0.12	
		3	5.45		2.18		0.13	
7	E-3T	1	3.025	3.53	1.21	1.41	0.08	0.09
		2	3.875		1.55		0.13	
		3	3.7		1.48		0.07	
8	E-4T	1	4.4	4.63	1.76	1.85	0.12	0.12
		2	4.9		1.96		0.13	
		3	4.6		1.84		0.11	

En cuanto a la relación directa o indirecta del comportamiento de cada uno de los casos evaluados, a continuación se muestran todos los tratamientos durante el desarrollo de la investigación:

Figura 3-2 Ensayos practicados según grupo.



En la Figura 3-2 se muestra la distribución de todos los datos tomados en relación al ángulo de rotación (radianes) y el momento flector de la conexión (kNm), condición que permite observar claramente la superioridad en el caso de las conexiones con cuatro puntos de contacto, y en especial los referentes a troquelados; sin embargo, se observa que la tendencia de los mismos y la pendiente al inicio del ensayo cambia para las diferentes variaciones, por tal razón, se establece la necesidad de generar un modelo estadístico que pueda representar cada una de las variaciones realizadas.

3.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

Con el fin de determinar si existe algún tipo de diferencia entre los datos obtenidos de la experimentación, se realizó un análisis estadístico de los datos, el cual se hizo con el programa estadístico SPSS (IBM SPSSv20.0. Armonk, NY: IBM Corp.). Se toman como datos iniciales los mostrados en la Tabla 3-1, posterior a esto se realiza la prueba de normalidad para cada uno de los grupos, en el cual se asume la condición de Shapiro Wilk [67], puesto que se cuenta con menos de 50 datos (3 para la presente investigación por grupo).

Tabla 3-2
Prueba de normalidad muestras independientes

<u>Característica</u>	<u>Grupos</u>	<u>Shapiro-Wilk^a</u>
		Significancia (Sig).
Promedio momento último kNm	3BS	0.637
	3B	0.253
	3TS	0.583
	3T	0.375
	4BS	0.637
	4B	0.537
	4TS	0.702
	4T	0.780
Promedio del ángulo de Rotación (Rad)	3BS	1.000
	3B	0.637
	3TS	0.637
	3T	0.298
	4BS	1.000
	4B	0.637
	4T	1.000

Como se muestra en la Tabla 3-2, la prueba de normalidad Ks indica que cumple el supuesto de normalidad, puesto que los valores de p valor (Sig), son mayores a 0.05, como se recomienda e [67]. Con el supuesto de normalidad verificado, se procede a realizar un test de homogeneidad de varianzas. En todos los análisis realizados se fijó el nivel de significación α en 0,05.

La Tabla 3-3, muestra que la prueba de homogeneidad de varianza de Levene cumple el supuesto, puesto que el estadístico 2.175 para el momento flector máximo promedio y 1.93 para el ángulo de rotación máximo promedio y los valores de significancia o p están por arriba del 0.05.

Tabla 3-3
Prueba de homogeneidad de varianzas

<u>Característica</u>	<u>Criterio</u>	<u>Estadístico de Levene</u>	<u>gl1</u>	<u>gl2</u>	<u>Sig (significancia)</u>
Promedio momento último kNm	Se basa en la media	2.175	7	16	0.094
	Se basa en la mediana	0.708	7	16	0.666
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	0.708	7	8.099	0.669
	Se basa en la media recortada	2.037	7	16	0.113
Promedio del ángulo de Rotación (Rad)	Se basa en la media	1.930	7	16	0.131
	Se basa en la mediana	0.368	7	16	0.908
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	0.368	7	6.154	0.892
	Se basa en la media recortada	1.756	7	16	0.166

El tipo de prueba paramétrica seleccionada en la presente investigación es *Anova unifactorial* teniendo en cuenta que son muestras independientes y que son dos grupos.

Tabla 3-4 Anova unifactorial.		Sig.
MOMENTO	Entre grupos	0.000
	Dentro de grupos	
	Total	
ÁNGULO DE ROTACIÓN	Entre grupos	0.016
	Dentro de grupos	
	Total	

El ANOVA observado en Tabla 3-4, indica que hay diferencias entre los grupos que representan el ángulo de rotación y el momento flector, de acuerdo con los diferentes grupos dentro de los cuales se toman como variantes la cantidad de puntos de contacto, separación y tipo de contacto. Lo anterior está soportado con el valor de significancia o p valor, el cual está por debajo <0.02 .

Por esta razón, se procede a realizar el análisis estadístico de HDS de Tukey entre grupos, de los cuales en primera instancia se presentan los resultados relacionados con la variación del momento flector, para finalizar con la presentación de las diferencias entre los ángulos de rotación.

Tabla 3-5
Diferencias entre grupos ángulo de rotación

variable dependiente	Diferencia entre grupos.	Sig(significacnia).
	3BS- 4B	0.017
	3BS-4TS	0
	3BS-4T	0
	3TS-4TS	0
	3T-4TS	0
	4BS-4TS	0
MOMENTO	4BS-4T	0.09
	4B-4TS	0
	3B-4TS	0
	4T-4B	0.041
	4T-3T	0.01
	4T-3B	0.01
	3TS-4T	0

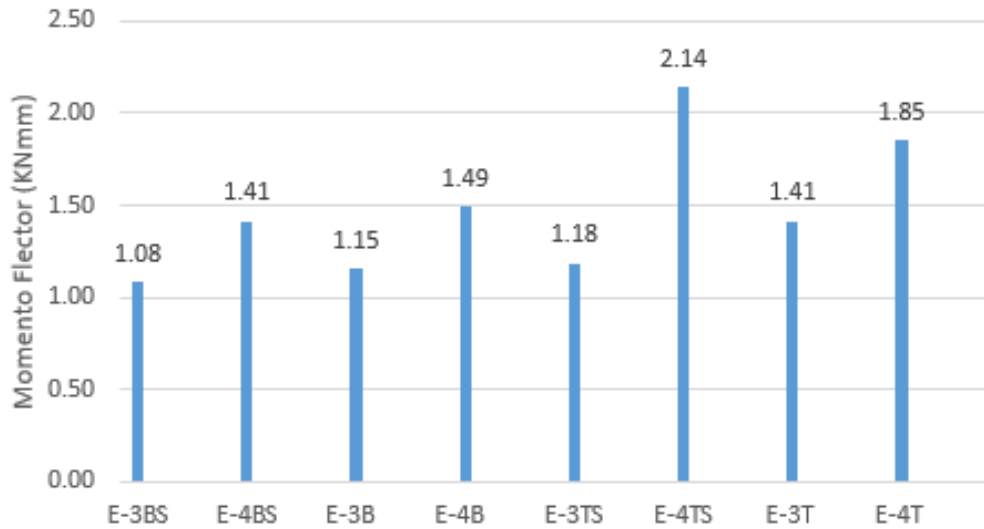
Como se puede observar en la Tabla 3-5, las diferencias se presentan en trece combinaciones diferentes, siendo importante destacar que se debe hacer un análisis por separado entre tipo de conexión (troquel-botón), entre grupos con separación y sin separación y por último entre cantidad de puntos de contacto.

Al comparar entre grupos, se puede indicar que en el caso de las conexiones tipo botón, solo se puede encontrar una diferencia significativa entre el grupo de tres botones con separación con la conexión de cuatro botones, teniendo estas un promedio de 1.08 kNm y 1.49 kNm respectivamente como carga máxima.

Por su parte, al analizar entre los grupos de troqueles, se puede evidenciar una clara diferencia tanto en las configuraciones con y sin separación (3TS-4T, 3T-4TS), como entre cantidad de puntos de contacto tres y cuatro troqueles (3T-4T, 3TS-4TS), y separación con cantidad de puntos de contacto (3T-4TS, 3TS-4T). Datos que difieren en comportamiento en comparación con los de botones, en los cuales no se cuentan con este tipo de comportamiento de diferencias significativas.

Para finalizar con las comparaciones, se tendrían las relacionadas entre tipos de conectores (botón y troquel), las cuales muestran que existen diferencias entre los grupos con la misma cantidad de puntos de contacto, la variación de separación y sus respectivas combinaciones (4BS-4TS, 4T-4B, 4BS-4T, 4B-4TS). En cuanto a las combinaciones entre cantidad de conectores y su separación, se puede observar que existe diferencia en todas las posibles combinaciones (3B-4TS, 4T-3B, 3BS-4TS, 3BS-4T).

Figura 3-3 Resumen de capacidad de momento flector por grupo



En la Figura 3-3 se puede observar la comparación entre los diferentes grupos analizados en relación con la media de la capacidad de momento flector entre los mismos.

En cuanto a las diferencias obtenidas respecto a la media del ángulo de rotación de los diferentes grupos, se debe especificar que este análisis mostró diferencias significativas entre 3TS-3T y 4B-3T; sin embargo, no se considera un análisis relevante, puesto que cada una de las pruebas termina cuando la junta no es capaz de soportar un incremento paulatino de carga, condición que en todos los casos está cercano a 0.12 radianes (ángulo de rotación) y dicha medición se realiza de forma manual.

Uno de los aspectos que si se consideran dentro de este primer análisis entre grupos, es que las mediciones de 4TS pueden presentar algún tipo de error en la medición porque el valor está por encima de las mediciones realizadas al 4T.

Para establecer el modelo que mejor se ajusta a todas las repeticiones y las variables presentes en la investigación, se inició realizando pruebas con modelos de tipo lineales y se hizo ajustes con modelos cuadráticos, encontrando que se ajustaban a los datos; sin embargo, al realizar la validación del modelo (pruebas de normalidad, homocedasticidad e igualdad de residuos), no presentaban dichas tendencias, razón por la cual fue necesario validar por medio de modelos no lineales, dentro de los cuales se combinaron modelos exponenciales, logarítmicos y logísticos. Posterior a la iteración de los mismos, se pudo establecer que el modelo que mejor se ajustaba y con el mínimo error cuadrado medio, es la una curva de degradación de Ruminal y en particular el establecido por Ørskov y McDonald, dicho modelo estadístico está definido como:

Ecuación 5.1 Modelo Ørskov y McDonald 1979

$$D = a + b(1 - e^{-kd(t)})$$

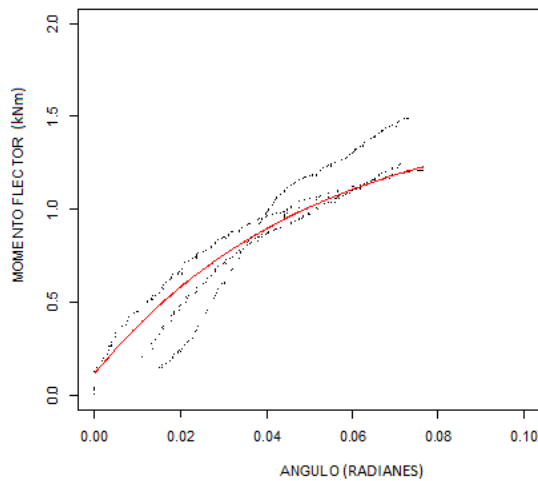
Como parámetros dentro de la ecuación 5.1, se puede establecer que D es el momento flector para un ángulo de rotación determinado t , en cuanto a los factores a, b y d son obtenidos de las diferentes iteraciones para cada modelo determinado.

Con el modelo mostrado en la ecuación anterior, se realizaron las diferentes iteraciones y análisis de convergencia para cada uno de los grupos analizados y sus respectivas repeticiones como se muestra en los siguientes numerales.

3.2.1 Modelo tres troqueles (3T)

El modelo ajustado para 3T obtenido posterior a 14 iteraciones, y cuyos errores estándar para los coeficientes a, b y d son 0.011, 0.031 y 1.03 respectivamente está definido por $Momento = 0.1179 + 1.4273(1 - e^{(-19.7313 \times \text{Ángulo})})$. La verificación del error estándar residual es de 0.067 con 552 grados de libertad, en cuanto a la representación gráfica se muestra en la Figura 3-4.

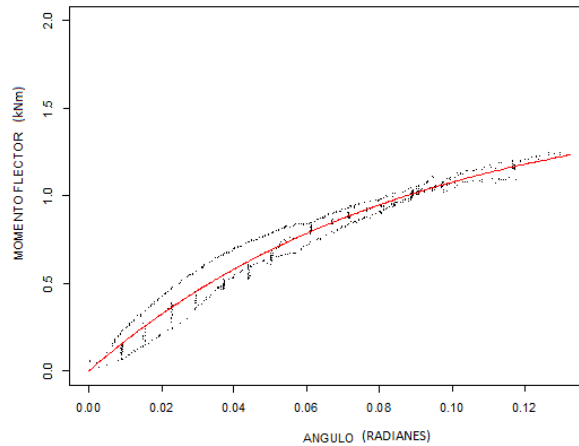
Figura 3-4 Modelo característico tres troqueles sin separación (3T)



3.2.2 Modelo tres botones (3B)

El modelo ajustado para 3B obtenido posterior a 10 iteraciones, y cuyos errores estándar para los coeficientes a, b y d son $5.59e-03$, $2.088e-02$ y $3.12e-01$ respectivamente, está definido por $Momento = 2.41e - 04 + 1.576(1 - e^{(-1.152e1 \times \text{Ángulo})})$. La verificación del error estándar residual es de 0,060 con 1538 grados de libertad, en cuanto a la representación gráfica se muestra en la Figura 3-5.

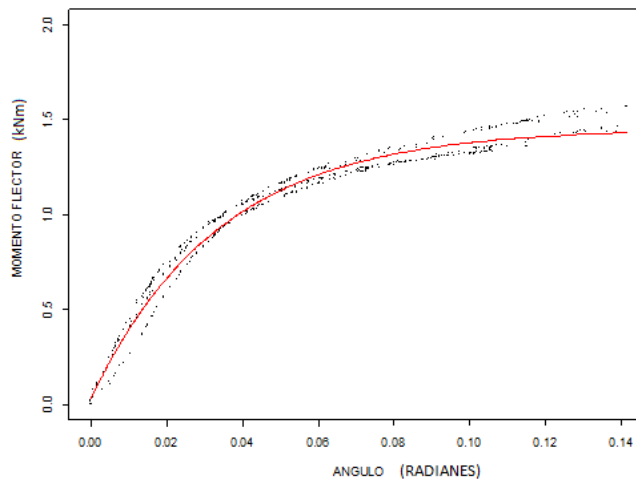
Figura 3-5 Modelo característico tres botones sin separación (3B)



3.2.3 Modelo cuatro botones (4B)

El modelo ajustado para 4B obtenido posterior a 12 iteraciones, y cuyos errores estándar para los coeficientes a, b y d son 0.0054, 0.0052 y 0.27 respectivamente, está definido por $Momento = 0.027 + 1.426(1 - e^{(-29.442 \times \text{Angulo})})$. La verificación del error estándar residual es de 0.053 con 1744 grados de libertad, en cuanto a la representación gráfica se muestra en la Figura 3-6.

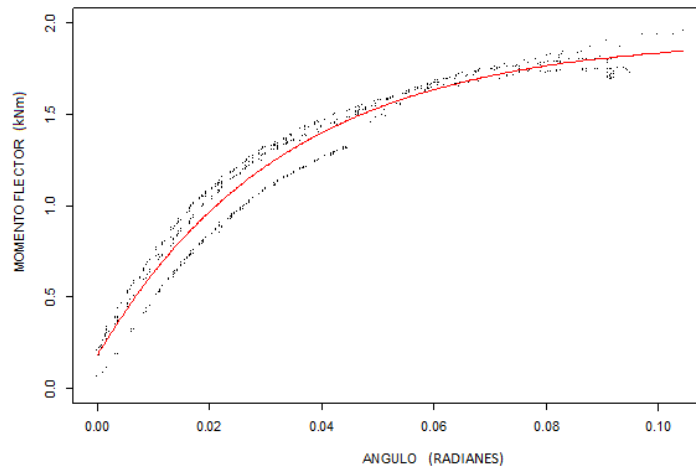
Figura 3-6 Modelo característico cuatro botones sin separación (4B)



3.2.4 Modelo cuatro troqueles (4T)

El modelo ajustado para 4T obtenido posterior a 12 iteraciones, y cuyos errores estándar para los coeficientes a, b y d son 0.0084, 0.00588 y 0.47 respectivamente, está definido por $Momento = 0.1758 + 1.746(1 - e^{(-30.1 \times \text{Angulo})})$. La verificación del error estándar residual es de 0.085 con 1666 grados de libertad, en cuanto a la representación gráfica se muestra en la Figura 3-7.

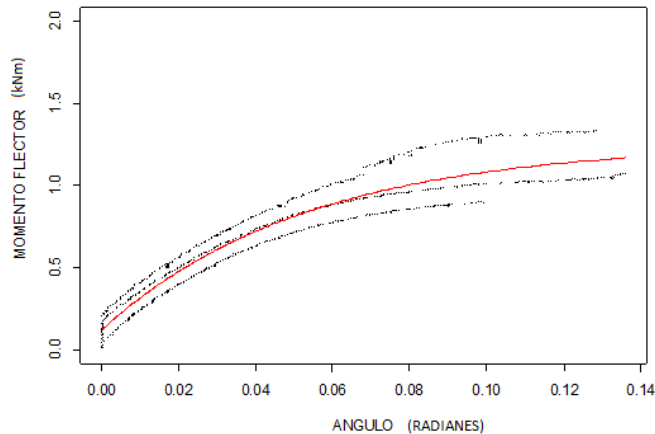
Figura 3-7 Modelo característico cuatro troqueles (4T)



3.2.5 Modelo tres troqueles con separación (3TS)

El modelo ajustado para 3TS obtenido posterior a 12 iteraciones, y cuyos errores estándar para los coeficientes a, b y d son 0.0077, 0.011 y 0.55 respectivamente, está definido por $Momento = 0.1216 + 1.133(1 - e^{-18.82x \text{ Angulo}})$. La verificación del error estándar residual es de 0.10 con 2393 grados de libertad, en cuanto a la representación gráfica se muestra en la Figura 3-8.

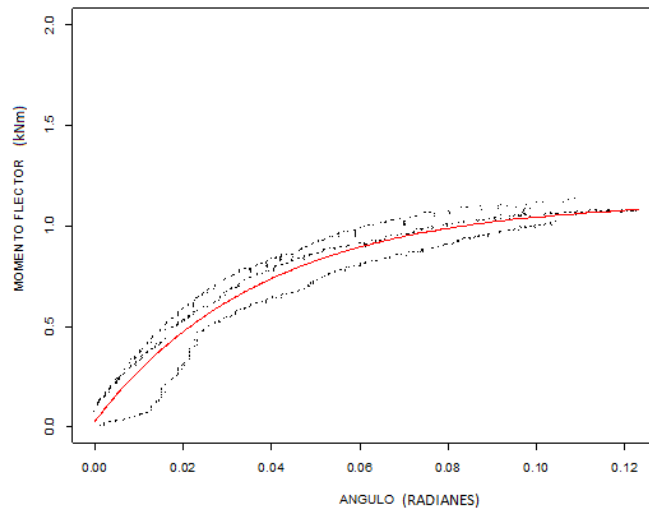
Figura 3-8 Modelo característico tres troqueles con separación (3TS)



3.2.6 Modelo tres botones con separación (3BS)

El modelo ajustado para 3BS obtenido posterior a 13 iteraciones, y cuyos errores estándar para los coeficientes a, b y d son 0.0069, 0.0075 y 0.542 respectivamente, está definido por $Momento = 0.0245 + 1.099(1 - e^{-26.052x \text{ Angulo}})$. La verificación del error estándar residual es de 0.087 con 2046 grados de libertad, en cuanto a la representación gráfica se muestra en la Figura 3-9.

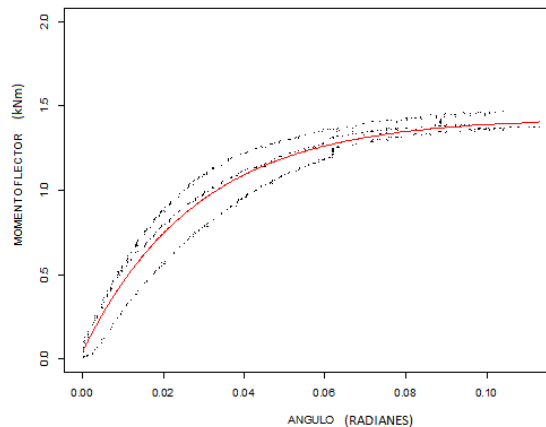
Figura 3-9 Modelo característico tres botones con separación (3BS)



3.2.7 Modelo cuatro botones con separación (4BS)

El modelo ajustado para 4BS obtenido posterior a 11 iteraciones, y cuyos errores estándar para los coeficientes a, b y d son 0.0073, 0.0073 y 0.5227 respectivamente, está definido por $Momento = 0.0415 + 1.3889(1 - e^{(-35.278x \text{Ángulo})})$. La verificación del error estándar residual es de 0.086 con 1882 grados de libertad, en cuanto a la representación gráfica se muestra en la Figura 3-10.

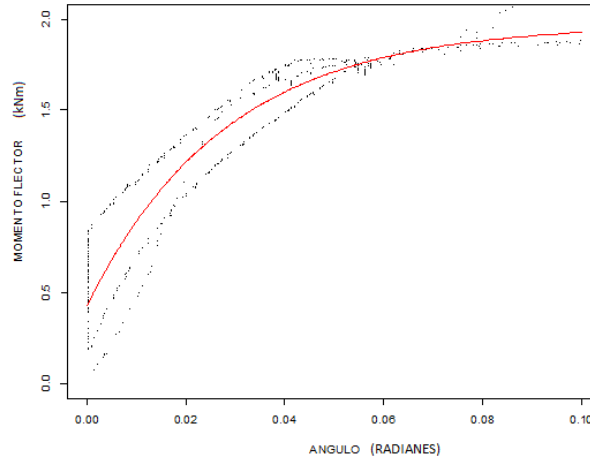
Figura 3-10 Modelo característico cuatro botones con separación (4BS)



3.2.8 Modelo tres troqueles (4TS)

El modelo ajustado para 4TS obtenido posterior a 15 iteraciones, y cuyos errores estándar para los coeficientes a, b y d son 0,012, 0,02 y 1,248 respectivamente, está definido por $Momento = 0.426 + 1.543(1 - e^{(-35.70 x \text{Ángulo})})$. La verificación del error estándar residual es de 0.169 con 1088 grados de libertad, en cuanto a la representación gráfica se muestra en la Figura 3-11. Es importante mencionar que uno de los ensayos mostró un comportamiento atípico en la primera fase, el cual está relacionado con el deslizamiento del conector con la columna.

Figura 3-11 Modelo característico cuatro troqueles con separación (4TS)



El resumen general de los diferentes modelos, junto con el error cuadrado medio de los diferentes coeficientes y el valor del log-verosimilitud se presenta en la Tabla 3-6.

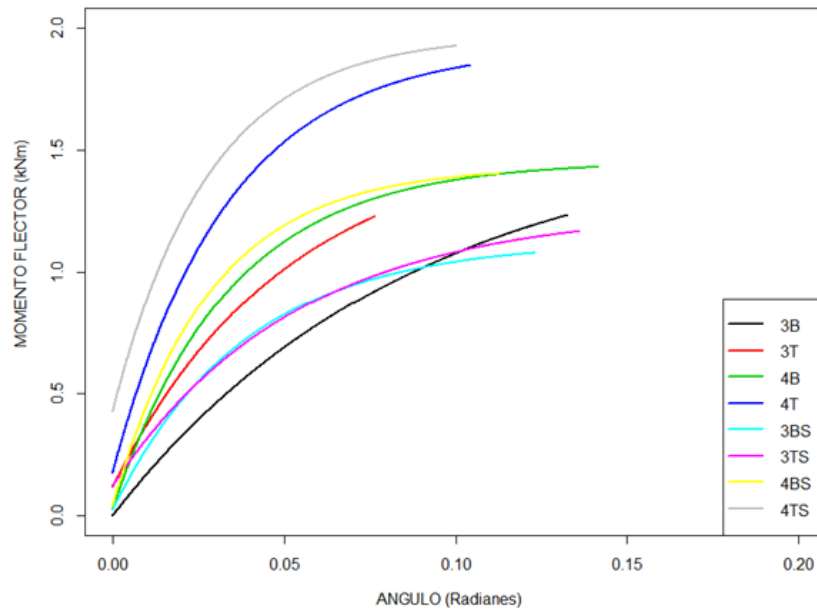
Tabla 3-6
Resultados definitivos por tratamiento

Tratamiento	a	b	d	MSE Error Cuadrático medio	log_lik
3T	0.1179	1.4273	19.7313	0.0046	710.1008
3B	0.0002	1.5760	11.5167	0.0037	2138.4393
4B	0.0272	1.4260	29.4420	0.0030	2638.7424
4T	0.1758	1.7469	30.1002	0.0073	1738.7663
3BS	0.0246	1.0993	26.0526	0.0077	2076.4719
4BS	0.0415	1.3889	35.2776	0.0079	1894.2978
4TS	0.4265	1.5435	35.7089	0.0286	392.3679
3TS	0.1217	1.1335	18.8229	0.0118	1916.9379

En la Tabla 3-6 se muestran los coeficientes de todos los modelos analizados, a su vez, se observa que el error cuadrado medio más desfavorable es del 2.8%, condición que permite inferir que el ajuste realizado y el modelo tomado es pertinente para representar el comportamiento de este tipo de conexiones en estanterías.

En cuanto a la representación de los diferentes modelos establecidos para el comportamiento de las conexiones de estantería evaluadas, se muestra en la Figura 3-12.

Figura 3-12 Modelos definidos para conexiones



3.2.9 Análisis de modos de falla.

Debido a las variables presentes en cada uno de los grupos analizados (cantidad de puntos de contacto, separación, tipo de conector y condiciones propias de la geometría de cada conexión), se pudo establecer que los mecanismos de falla y el elemento de mayor contribución en la misma cambia según sea el caso, por tal razón, a continuación se muestran en función de los grupos y los tipos de conexión los hallazgos más significativos de la investigación en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7
 Modos de falla en conexión de estantería tipo botón y troquel ensayadas.

IMAGEN DE FALLA	DESCRIPCIÓN GENERAL
	<p>Ensayos en conexiones de 4 botones (4B y 4BS):</p> <p>En el ensayo de 4 botones sin separación se presenta un modo de falla en la columna, la cual muestra deformación en los ojales 1 y 4 (imagen 1). Siendo el primero producto de esfuerzos en tensión y el último de compresión, asociados a flexión local sobre toda la conexión.</p> <p>La deformación permanente de la junta muestra sus primeros indicios en el primer ojal, puesto que la deformación por cortante y momento de traslado genera aplastamiento. Lo que a su vez, libera el primer botón (imagen 2). Posterior a esto, el contacto del extremo de la viga (chapeta), empieza a generar deformación en el cordón inferior de soldadura de la conexión entre viga y extremo (imagen 3).</p> <p>Se puede indicar que los factores que causan mayores deformaciones en la junta, están relacionados con la falla de la columna (deformaciones plásticas por flexión local) y que es el factor determinante en el ángulo de rotación de este tipo de junta (imagen 4).</p> <p>Al terminar el ensayo, solo se observa en el primer conector (botón) deformaciones laterales, las cuales se repiten en el primer y último punto de contacto de la columna. En cuanto a la lengüeta, se tiene deformación en la parte inferior del punto de soldadura con el extremo. Las diferencias existentes entre los ensayos practicados con y sin separación están relacionados con el grado de deformación en la columna, puesto que en el caso de los ensayos sin separación desde las primeras etapas ya se evidencian deformaciones localizadas en los puntos de contacto de la columna.</p> <p>La columna no presentó ningún tipo de pandeo lateral o lateral torsional en ninguno de los ensayos, esto indica que la rigidez de la misma es más alta y que el momento se transmite completamente a los botones de la conexión.</p>
<p>Imagen 1. Ensayo referencia ED-4B-03</p> 	
<p>Imagen 2. Deformación lateral de conector.</p>	



IMAGEN DE FALLA	DESCRIPCIÓN GENERAL
 <p data-bbox="228 982 829 1045">Imagen 3. Deformación plástica por doblado en extremo de la viga.</p>  <p data-bbox="220 1390 837 1486">Imagen 4. Deformación plástica de los ojales de la columna por aplastamiento y flexión local de lámina, bajo fuerza cortante de los botones.</p>	
	<p data-bbox="870 1640 1406 1671">Ensayos en conexiones de 3 botones (3B y 3BS):</p> <p data-bbox="870 1703 1406 1879">En los ensayos practicados para este tipo de conexiones con y sin separación, se observó el mismo modo de falla por deformación plástica en la columna, visto en el de 4 botones; sin embargo, se tienen mayores deformaciones en el primer punto de contacto (imagen 5) y marcas frontales en</p>

IMAGEN DE FALLA	DESCRIPCIÓN GENERAL
 <p data-bbox="284 955 771 982">Imagen 5 conexión 3 botones con separación.</p>	<p data-bbox="868 247 1412 304">la columna por deformaciones causadas por el botón sobre la columna (imagen 6).</p> <p data-bbox="868 336 1412 457">En cuanto a los conectores (botones), se observa la misma tendencia de deformación plástica lateral, junto con la deformación de una de las caras del extremo de la viga (imagen 7).</p> <p data-bbox="868 489 1412 762">Al final del ensayo se puede observar que el ensamble compuesto por el extremo de la viga (chapeta) y la viga presentan mínimos daños independiente de que se esté evaluando con separación (imagen 5) o sin separación (imagen 8). La falla por deformación plástica se concentra en la columna con una alta deformación sobre la misma en el primer punto de contacto (aplastamiento).</p>
 <p data-bbox="212 1575 771 1633">Imagen 6 y 7, fallas en los botones y en el ojal de la columna.</p>	<p data-bbox="868 793 1412 1003">En cuanto al grado de deformación de las conexiones con y sin separación, se estableció que en el primer caso se generaban mayor flexión local de lámina de columna al comienzo de la prueba; sin embargo, luego de hacer contacto la chapeta con la cara frontal de la columna (imagen 8) no se percibieron diferencias entre ensayos.</p>


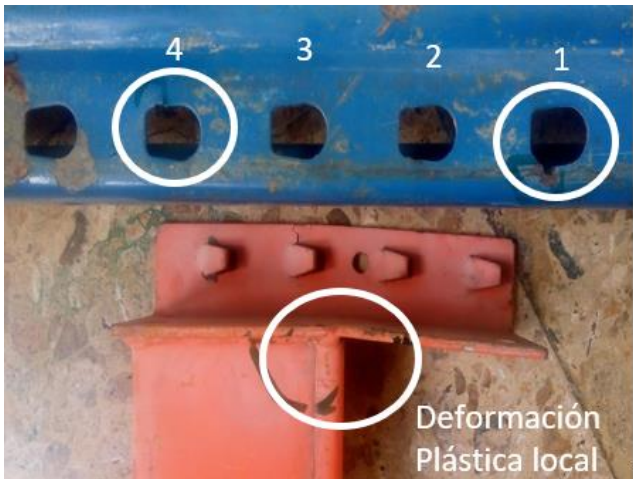
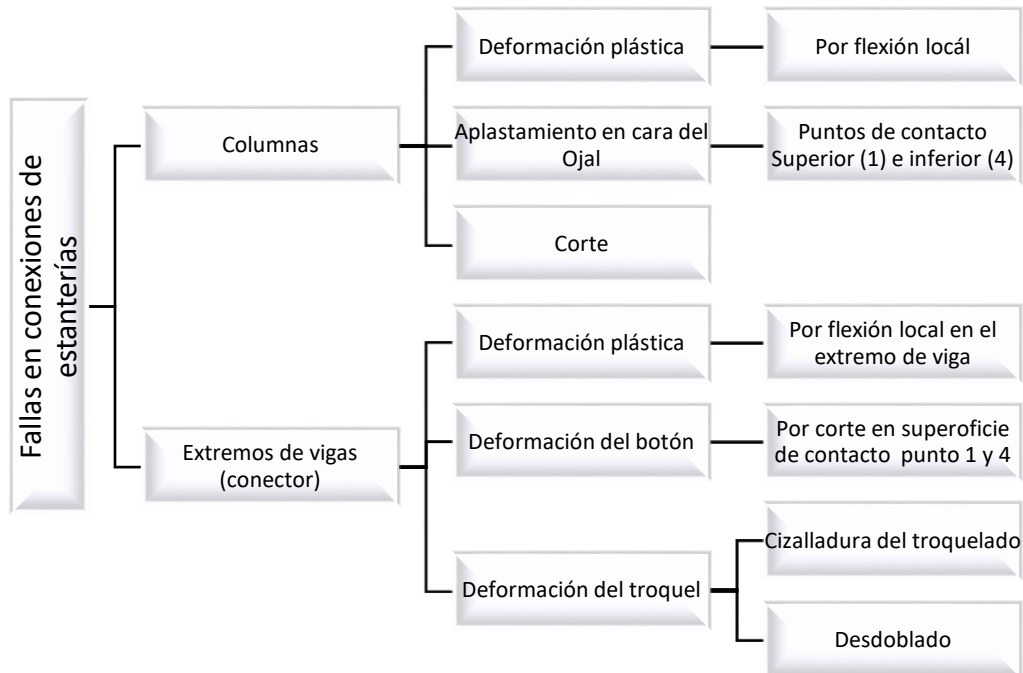
IMAGEN DE FALLA	DESCRIPCIÓN GENERAL
 <p data-bbox="212 800 846 856">Imagen 8. Conexión 3 botones sin separación.</p>	
<i>Ensayos en conexiones tipo troquel</i>	
 <p data-bbox="212 1415 841 1890">Imagen 9. Falla en conexión ED-ET-02</p>	<p data-bbox="868 913 1412 955">Ensayo 4 troqueles (4T y 4TS).</p> <p data-bbox="868 976 1412 1123">Los ensayos practicados a las conexiones con cuatro puntos de contacto en conectores tipo troquel, mostraron una falla más localizada (imagen 9), en comparación con los de cuatro botones.</p> <p data-bbox="868 1134 1412 1281">Se puede observar que el extremo del conector de la columna presentó deformación, aplastamiento en caras de ojal y flexión local de lámina en la zona donde termina la soldadura con la viga, de manera similar a la de cuatro botones.</p> <p data-bbox="868 1459 1412 1617">Durante la aplicación de la carga a la conexión, se presenta una deformación por aplastamiento y flexión local de la pestaña troquelada, lo cual genera un desalineamiento lateral entre la columna y la chapeta (imagen 10).</p> <p data-bbox="868 1648 1412 1858">A pesar de presentar deformación plástica en los puntos de contacto de la columna, se encontró que es inferior al evidenciado en conexiones tipo botón (imagen 4). La razón principal de este fenómeno es la deformación que sufre el conector troquelado (imagen 9) y la deformación de la columna (imagen 12).</p>

IMAGEN DE FALLA	DESCRIPCIÓN GENERAL
 <p>Conector deformado</p> <p>1 2 3 4</p> <p>Imágenes 10 y 11. Falla en el conector y columna</p>  <p>Imagen 12. Deformación de la columna</p>	<p>Para los ensayos en conexiones tipo troquel, se usó una columna sencilla y se ancló con el método alternativo citado en el numeral 1.5, con el fin de evitar que la columna fallara por pandeo; sin embargo, con la aplicación de la carga en el extremo de la viga se genera una deformación plástica por flexión local de lámina en la columna (imagen 12), producto de la falta de transferencia de carga sobre toda la sección transversal de la columna, lo cual produce un pandeo lateral torsional, que favorece que el conector superior empiece a deslizarse e intentar des encajar la conexión.</p> <p>Las diferencias en cuanto a comportamiento de la junta con separación (4TS) y sin separación (4T), está relacionada con el deslizamiento de los conectores hasta realizar contacto de la chapeta con la superficie de la columna.</p>
 <p>3 2 1</p> <p>51-31-02</p> <p>21-31-02</p>	<p>En el caso de las conexiones con tres puntos de contacto, con y sin separación se tienen deformaciones plásticas, aplastamiento y flexión localizada en los dos primeros puntos de contacto, como se muestra en la imagen 13.</p> <p>Tomado en consideración algunos autores, y producto de la observación, se ubicó un sensor de tipo giroscopio para determinar la desviación</p>

IMAGEN DE FALLA	DESCRIPCIÓN GENERAL
<p data-bbox="212 247 686 275">Imagen 13. Conector y columna 3 troqueles</p>  <p data-bbox="212 989 821 1045">Imagen 14 instrumentación para desviación vertical de la columna</p>	<p data-bbox="872 247 1409 304">vertical de la columna en el transcurso del ensayo (imagen 14).</p> <p data-bbox="872 306 1409 363">Los resultados mostrados por el sensor descartan deformaciones verticales representativas.</p>
 <p data-bbox="212 1579 557 1606">Imagen 15. Falla de conector.</p>	<p data-bbox="862 1056 1403 1171">Los conectores de las conexiones tipo troquel muestran una deformación plástica por aplastamiento y flexión local de lámina, tanto del extremo de la viga como de la columna.</p> <p data-bbox="862 1207 1403 1446">Las deformaciones del conector generan un aumento del ángulo de rotación global de la junta, condición que termina modificando la capacidad de carga de la misma. Una muestra de este fenómeno se observa en la imagen 15, en la cual se deformó el primer conector, condición que aumentó el desplazamiento angular de toda la conexión.</p>

Posterior a la verificación de los modos de falla en las conexiones evaluadas y mostradas en la Tabla 3-7, se definió un resumen de las afectaciones en los componentes que conforman la conexión, como lo es el extremo de la viga y la columna, establecidos en la Figura 3-13.

Figura 3-13 Modos de falla en Conexiones.



En la Figura 3-13 se observa un resumen general de los modos de falla de las estanterías, en la cual se tienen discriminados por elemento afectado (columna y conector); a su vez, se establece las afectaciones específicas para cada componente, es de resaltar que las fallas se pueden presentar tanto en las columnas como en las vigas y son de tipo local, lo que hace complejo detectar en una posible condición de falla en estructuras de grandes superficies.

4 SIMULACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS

En el presente apartado se definen los parámetros, propiedades de materiales y las restricciones en general para el método de los elementos finitos (FEM). El programa usado para realizar el modelo en 3D es Solidworks y el análisis por elementos finitos se realiza en ANSYS. El tipo de análisis usado es no lineal de grandes deformaciones, usando el criterio de plasticidad de Von Mises y se resuelve el sistema de ecuaciones con el método de Newton Raphson. Para el análisis se toma como punto de partida los mismos modelos y por ende las geometrías mostradas en el capítulo 1; por su parte, los tipos de elementos y mallas se toman como punto de partida lo establecido en el numeral 1.6.

En el desarrollo del capítulo se muestran ocho modelos diferentes, los cuales cuentan con las mismas dimensiones de los ensayados. A su vez, se realiza una comparación entre los datos obtenidos y las limitaciones encontradas durante el proceso de mallado, generación de restricciones y simulación.

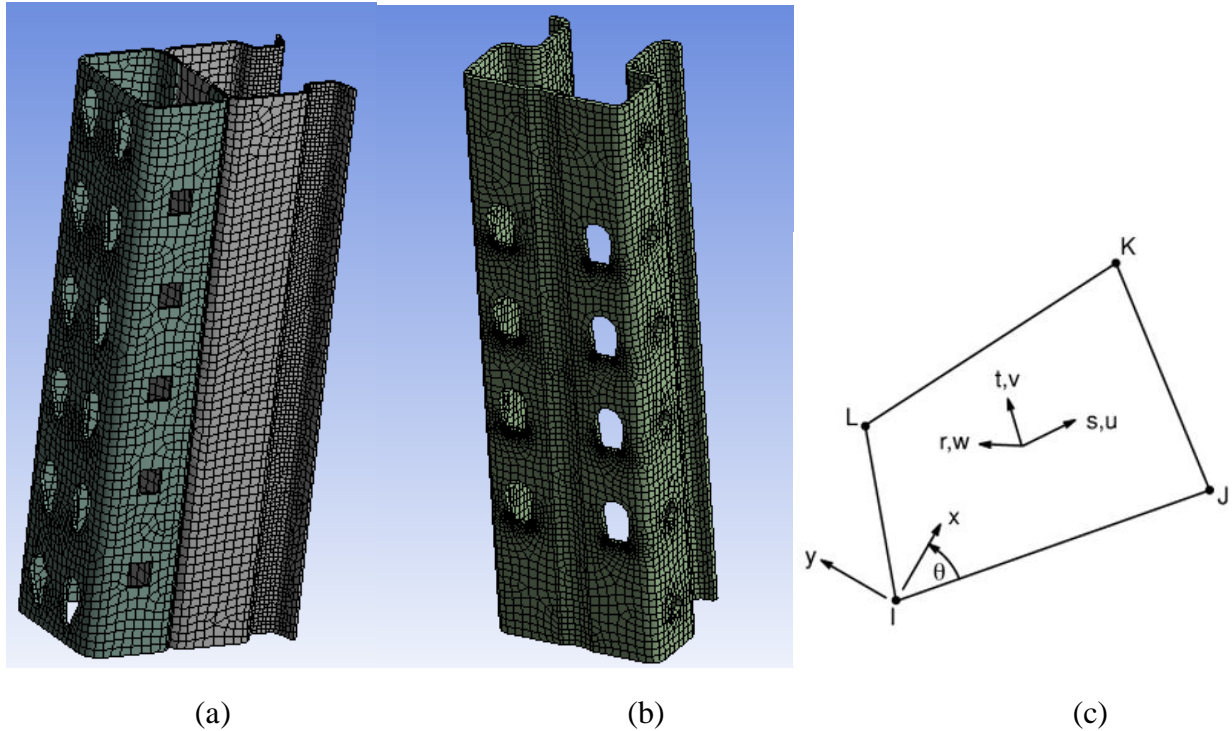
4.1 MALLADO Y TIPO DE ELEMENTOS USADOS

Las conexiones de las estanterías de lámina delgada cuentan con diferentes tipos de componentes, los cuales deben ser discretizados de una manera diferente por el comportamiento general. A su vez, las interacciones entre los mismos modifican el comportamiento propio del componente y deben ser definidos para el caso particular.

Para el mallado de las columnas se ha utilizado elementos de tipo cascaron, denominado en ANSYS (Shell 181)[26][55][9]. En cuanto a los tamaños de los elementos usados se reportan entre 5 y 8 mm para la verificación de comportamiento a compresión de columnas. Sin embargo, no se encuentran investigaciones al respecto para las conexiones, puesto que algunos autores realizan una simplificación de la columna cuando realizan la simulación de la conexión completa.

En cuanto al elemento cascaron de ANSYS Shell 181, tiene 4 nodos y 6 grados de libertad en cada nodo; desplazamientos en tres direcciones y rotaciones en los tres planos (como se observa en la Figura 4-1 (c)). El uso más común de este elemento está relacionado con aplicaciones donde se tengan grandes desplazamientos, tanto en análisis lineal como no lineal, en perfiles de láminas delgadas.

Figura 4-1 Modelo Mallado y elemento181: (a) Columna tipo Botón, (b) columna tipo troquel (c) elemento cascaron de ANSYS Shell 181

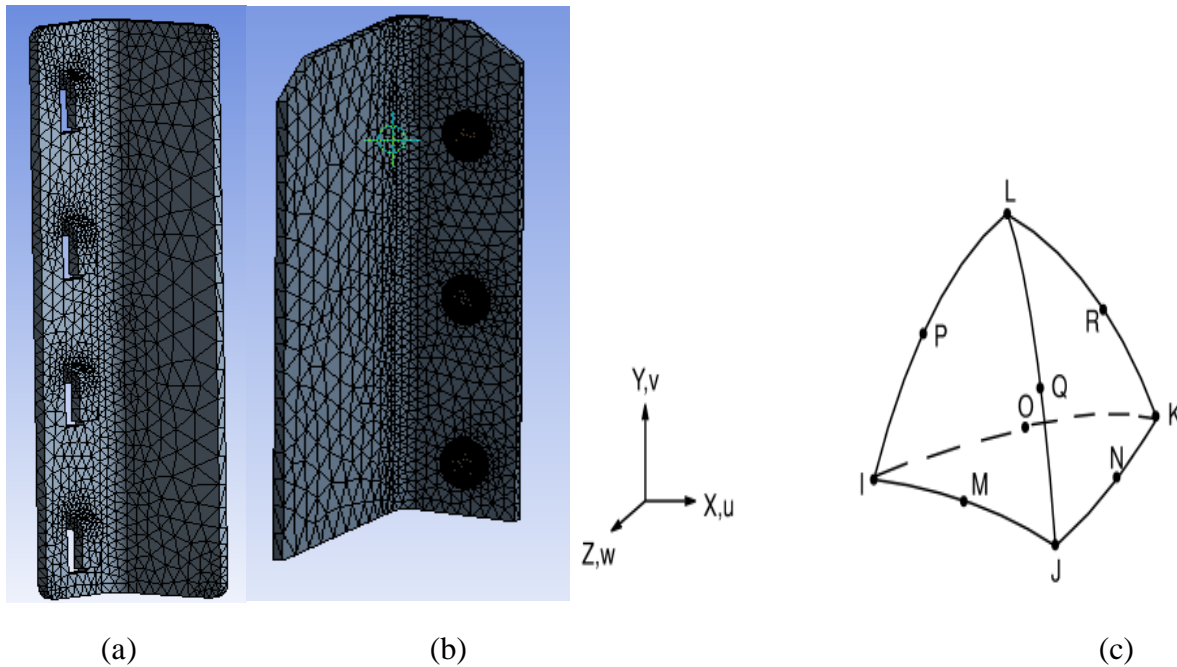


Como se observa en la Figura 4-1, tanto para el modelo de columna tipo botón (a), como la columna tipo troquel (b), fue usado un mallado con tetraedros y hexaedros, con el propósito de mejorar el desempeño de las geometrías en zonas de curvas y cambios de sección. El método usado por el programa varía el tamaño dependiendo las zonas de refinamiento particular en los puntos de contacto con otros elementos.

La chapeta o conector se representa en ANSYS con elementos SOLID187, los cuales se definen como elementos solidos tetraédricos de lados curvos con función de aproximación cuadrática, muy adecuado para modelar geometrías irregulares.

En cuanto a las características del elemento, este cuenta con 10 nodos que tienen tres grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones nodal X, Y y Z (el elemento tiene gran capacidad de deformación). La representación gráfica se muestra en la Figura 4-2 (c)

Figura 4-2 Representación de chapeta (a) Chapeta tipo botón, (b) troquel y (c) elemento Solid 187.



La Figura 4-2 muestra el mallado respectivo para las geometrías importadas desde el programa CAD tanto de lengüeta tipo troquel (a), como tipo botón (b), en cuanto al tamaño de los elementos y su respectivo refinamiento depende específicamente de cada tipo de conexión. Por otro lado, se utilizó el criterio de convergencia de energía de deformación con una tolerancia del 10%.

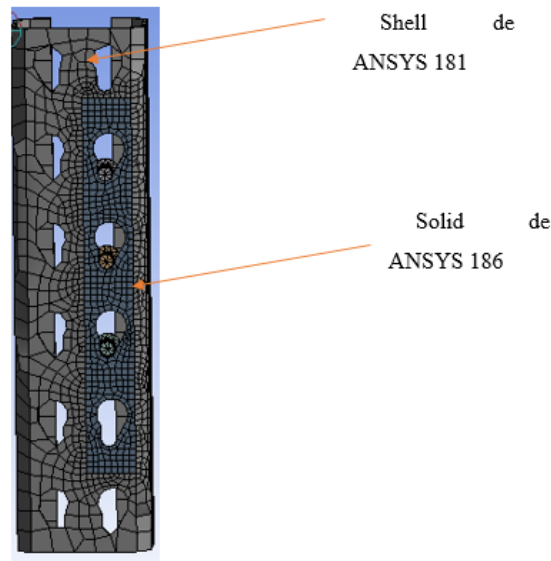
4.2 DEFINICIÓN DEL TIPO DE CONTACTO.

Para la definición del contacto específico de la aplicación, se debe mencionar que las conexiones de las estanterías tienen la facilidad de unir la viga y la columna de forma rápida mediante los conectores y la viga, generándose fuerzas de fricción entre los componentes y el fenómeno de enganche entre las dos piezas. Por tal razón, se debe tener en cuenta la fricción entre los conectores y la superficie de contacto de la columna.

La fricción es una fuerza no conservativa, la cual depende de la trayectoria y dificulta la convergencia del modelo, porque se necesita un historial de cargas y un aumento paulatino de la misma. ANSYS permite la definición de diferentes leyes y modelos todos estos de tipo no lineal, condición que afecta más la convergencia del modelo en general.

En las primeras iteraciones realizadas se encuentra que al usar el elemento tipo cascaron Shell de ANSYS 181 para la columna, presenta problemas de convergencia en los contactos de fricción, por tratarse de la interacción entre un borde y una superficie (ya sea del tipo troquel o botón), condición que hizo necesario realizar una modificación al modelo de la columna, insertando un elemento sólido el cual fue definido en ANSYS con SOLID 186 como se muestra a continuación:

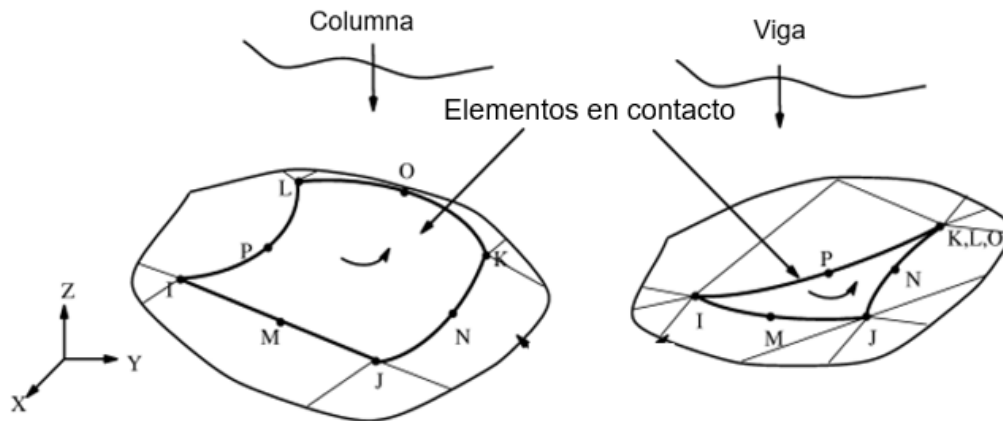
Figura 4-3 Elemento SHELL 181 y elemento SOLID186

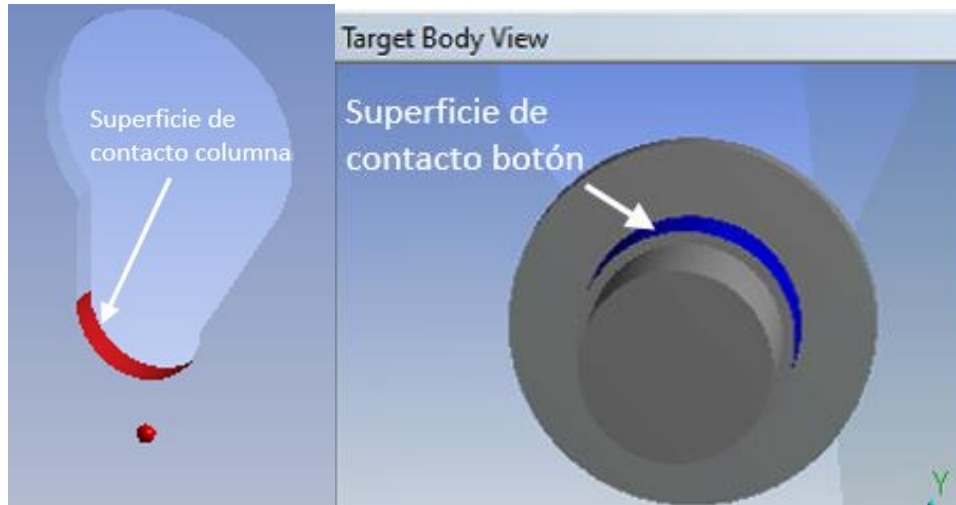


Como se muestra en la Figura 4-3, fue necesario realizar un elemento mixto para representar la columna, con el propósito de definir el contacto de fricción entre el conector y la columna, en la cual se tenga un contacto superficie –superficie y presente una condición favorable en términos de convergencia.

Para los contactos entre los elementos de la conexión algunos autores como [53][49], definen el uso de CONTACT 173; sin embargo, por las modificaciones hechas a la columna se propone para la presente investigación el CONTACT 174, el cual se utiliza para representar el deslizamiento entre las superficies tridimensionales de la columna y el botón. En la conexión se tendría botón como SOLID 187, al cual se le nombra como "objetivo" (TARGE170) y una superficie deformable, que en este caso es la columna modificada (SOLID 186) en la zona de contacto con el botón, como se muestra en la Figura 4-4.

Figura 4-4 Contacto conector -columna y representación CONTACT 174.

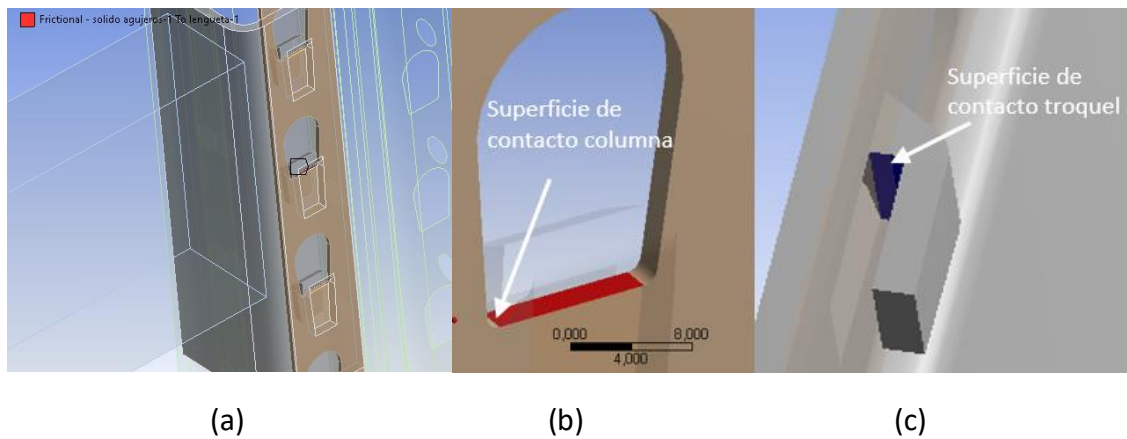




Como se muestra en la Figura 4-4, los contactos que se presentan entre la columna y el conector independiente del tipo (botón o troquel), se definen entre el borde de la columna (color rojo) y el perímetro del botón (color azul). A la derecha de la imagen se observa la interacción entre el elemento tipo Quads o columna y el elemento SOLID 187 (botón).

Por su parte las conexiones tipo troquel y sus condiciones de frontera, se presentan de la misma manera que las mostradas en las conexiones tipo botón, con la diferencia es que se realizaron contactos separados para las partes laterales e inferior de cada troquel, esto con el fin de habilitar el refinado de contactos de las paredes laterales, que son las zonas en la cuales se presenta penetración de la chapeta a la columna, como se visualiza en la Figura 4-5.

Figura 4-5 Contacto conector tipo troquel: (a) conexión, (b) superficie de columna y (c) superficie de chapeta.



4.3 MÉTODO DE RESOLUCIÓN.

Entre las diferentes metodologías de resolución de problemas no lineales que contempla ANSYS se destacan:

Penalty Method. En este método se asume la fuerza de contacto a partir de la rigidez de contacto, definida por la constante FKN (factor de penalización a la rigidez normal), en los elementos de contacto correspondientes, y de la distancia que existe entre dos nodos pertenecientes a dos cuerpos separados (gap). La ventaja de este método es que incluye las restricciones de penetración directamente en la formulación, de manera que se puede formular el problema sin restricciones. El principio de funcionamiento consiste en aplicar valores elevados a las restricciones, penalizándolas cuando se acercan a la frontera de la región admisible, región que delimita las restricciones.

Lagrange Multiplier Method. Este método se caracteriza fundamentalmente por su sentido físico. En este caso, la fuerza de contacto se trata como un grado de libertad separado del resto, lo que significa que se resuelven fuerzas de contacto directamente de la formulación. Dicha formulación tiene como ventaja que se puede satisfacer la condición de impenetrabilidad sin tener que trabajar con rigideces de contacto o penetraciones impuestas. En este caso se usan el límite de penetración o el límite de deslizamiento elástico para calcular las tensiones de contacto. El método impone restricciones de impenetrabilidad entre los cuerpos, además de deslizamiento nulo cuando se encuentran en estado de adhesión. De este modo, las soluciones que se obtienen (multiplicadores de Lagrange) corresponden físicamente a las presiones de contacto necesarias para impedir la penetración de los cuerpos.

Augmented Lagrange Method. Este algoritmo se puede definir como el PENALTY METHOD con control de la penetración. Las iteraciones de Newton-Raphson empiezan igual que en el PENALTY METHOD y, al igual que en el LAGRANGE MULTIPLIER METHOD, la constante real TOLN determina la máxima penetración. Si la penetración en una iteración excede la máxima permitida la rigidez de contacto para cada elemento será aumentada con los multiplicadores de Lagrange. Es decir, si la penetración es mayor que la fuerza permitida. Por ello este método es igual que el PENALTY METHOD salvo en la rigidez de contacto, que se va actualizando para cada elemento de contacto. Este hecho se repite hasta que la penetración sea menor que la máxima permitida.

En cuanto al modelo matemático establecido se puede indicar que el contacto de presión es:

Ecuación 4-1 Modelo de presión de contacto Lagrange Augmented

$$P = \begin{cases} 0 & \text{if } u_n > 0 \\ K_n u_n + \lambda_{i+1} & \text{if } u_n \leq 0 \end{cases}$$

Donde:

Ecuación 4-2 Multiplicador de modelo

$$\lambda_{i+1} = \begin{cases} \lambda_i + K_n u_n & \text{if } |u_n| > \varepsilon \\ \lambda_i & \text{if } |u_n| < \varepsilon \end{cases}$$

$\varepsilon = \text{tolerancia de compatibilidad}$

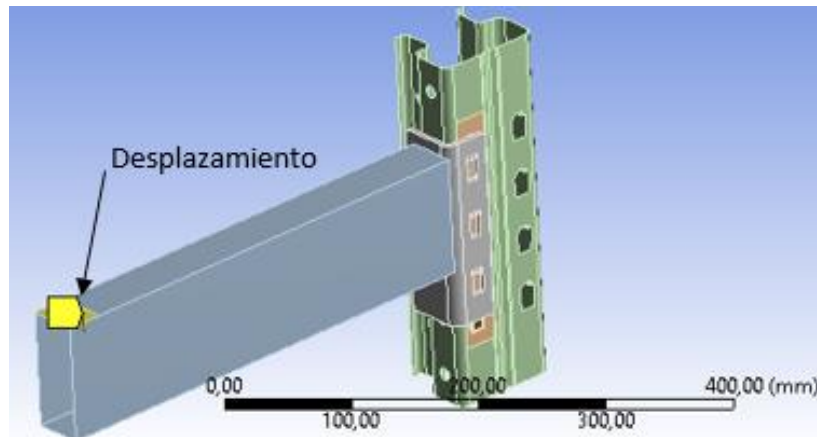
$\lambda_i = \text{componente multiplicador de Lagrange en la iteración } i$

En la presente investigación se usó el contacto de fricción, se definió desde el contact manager un comportamiento de tipo asimétricos y el algoritmo de contacto Augmented Lagrangian Method. En cuanto al coeficiente de fricción, se puede concluir en las investigaciones consultadas que su influencia sobre el comportamiento rotacional de la junta es mínima y para la presente investigación se usó 0,5.

4.4 APLICACIÓN DE LA CARGA.

Se estableció un desplazamiento de 40 mm ubicado a 400 mm de la conexión (Figura 4-6) y aplicada de forma gradual (varios pasos), con el fin de mejorar la convergencia. La magnitud está definida para garantizar la rotación 0,1 radianes (datos reportados para este tipo de conexiones), la cantidad de pasos difiere entre modelo y fue modificada según las recomendaciones del programa. El control de carga se realiza por la medición de la reacción en el punto de aplicación de la misma.

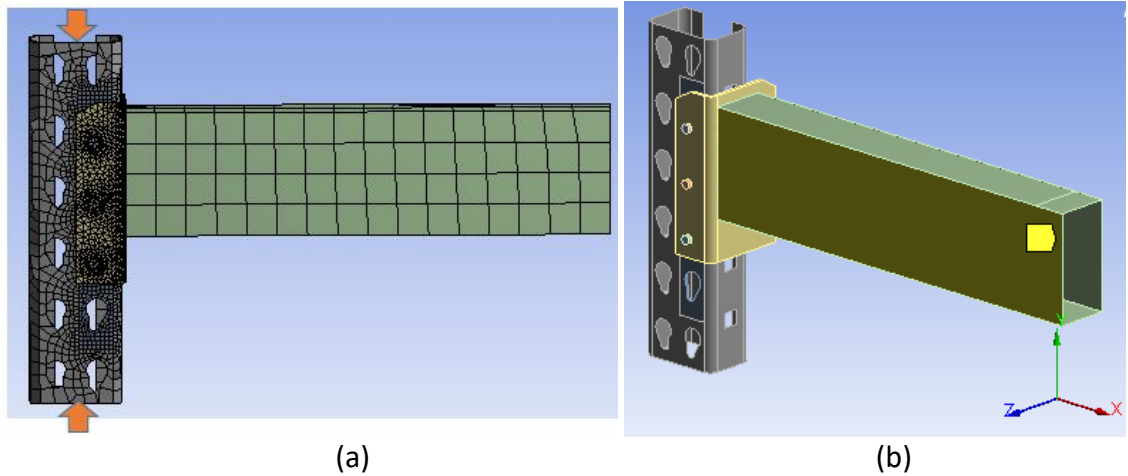
Figura 4-6 Desplazamientos aplicados a la conexión



4.5 CONDICIONES CONTORNO.

Para la simulación de los ocho modelos, se consideró las caras externas de la columna ubicación de marcas Figura 4-7 (a) como soportes fijos. Para evitar el deslizamiento lateral de la viga se adicionó una restricción sobre el plano Z, como se puede observar en la Figura 4-7 (b).

Figura 4-7 Apoyos usados en la conexión: (a) Restricciones rígidas de la columna y (b) restricción de desplazamiento en eje Z.



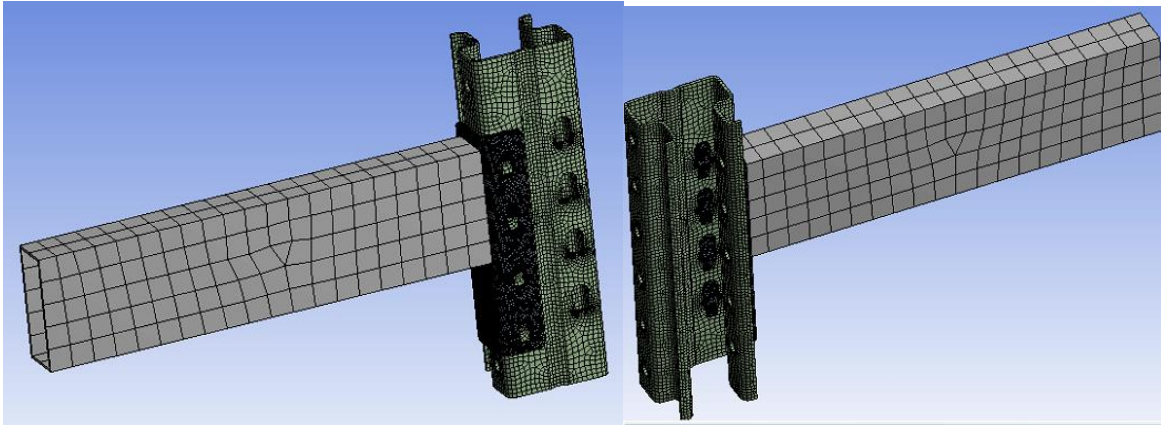
4.6 CASOS EVALUADOS.

Para los casos evaluados, se presentarán de forma resumida los resultados obtenidos de la relación ángulo de rotación respecto a momento flector y se realizan las respectivas comparaciones entre grupos por simulación.

4.6.1 Conexiones con tres y cuatro troqueles

Las conexiones de todos los grupos evaluados, con y sin separación fueron discretizados con las características mencionadas en el numeral 4.1 al 4.5, sin embargo, fue necesario realizar refinamientos sobre las superficies de contacto, con el propósito de mejorar la convergencia de los resultados y evitar errores en el modelo; las geometrías generales usadas para las partes que componen la junta se observan en la Figura 4-8.

Figura 4-8 Malla de las conexiones tipo troquel

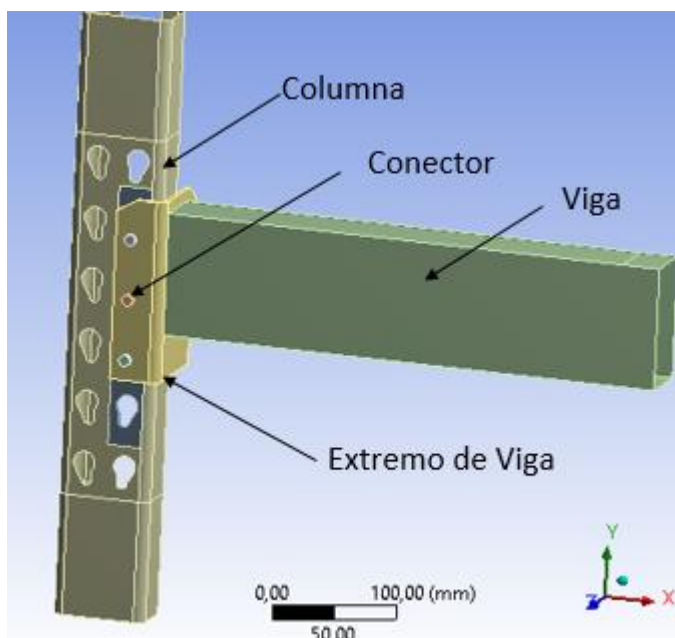


Las geometrías y la separación entre componentes se definen desde el modelo CAD, garantizando las dimensiones propias de las probetas ensayadas. En cuanto al método de independencia de malla usada, se consideró el refinamiento iterativo sobre las zonas de mayor interés (contacto entre viga y conector). El criterio de convergencia usado en la presente investigación es el de energía de deformación, el cual se establece para cada modelo, en el presente apartado se muestran los resultados más relevantes, enfocado en el comportamiento a la falla de los elementos que componen la conexión.

Para todas las conexiones analizadas se colocó 40 mm de desplazamiento en el extremo de la viga, esto se establece por ser una rotación de 0,1 radianes, valor que es reportado para este tipo de conexiones como crítico y a su vez el obtenido en los diferentes ensayos experimentales.

Cada uno de los componentes de la conexión tiene condiciones de frontera específicos que se definen con las propiedades de material, contacto y restricciones de movimiento; sin embargo, se cuenta con la misma distribución y componentes en todas las simulaciones como se muestra en Figura 4-9.

Figura 4-9 Geometría general conexiones analizadas



A partir de las modificaciones planteadas en el numeral 4.2, se empezaron a realizar modelos en los cuales se cambió el tamaño de malla en la zona de interés (contacto entre botones y columna o troqueles y columna), las cuales empezaron en un tamaño de 4 mm hasta 1 mm, en donde se logró estabilizar los resultados en todos los modelos y se obtuvo el punto de independencia de malla.

En cuanto a las relaciones existentes entre componentes en todos los modelos y como se estableció en el numeral 4.2, los contactos se generan por fricción, tanto entre los botones y el extremo de la viga como los botones y los ojales de la columna, para el caso de modelos tipo botón. Por su parte, los modelos de tipo troquel tiene contactos de fricción entre extremo de la viga y los ojales de la columna. Las características generales del mismo se pueden observar en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1
Parámetros de contactos en modelos

<u>Regiones de contacto</u>	<u>Tipo de contacto</u>	<u>Algoritmo</u>
Columna – Extremo de viga	Superficie – superficie Asimétrico $\mu=0.5$	Augmented Lagrangian method.
Botón – Columna	Superficie – superficie Asimétrico $\mu=0.5$	Augmented Lagrangian method.
Botón – Extremo de viga	Superficie – superficie Asimétrico $\mu=0.5$	Augmented Lagrangian method.
Troquel – Columna	Superficie – superficie Asimétrico $\mu=0.5$	Augmented Lagrangian method.

Para el modelos de tres troqueles con y sin separación, se tiene como resumen general los datos mostrados en la

Tabla 4-2, en la cual se muestra los datos de los modelos posterior al análisis de independencia de malla en relación con su condición de tamaño de elementos y cantidad. Es de destacar que solo se citan los datos de la última malla realizada para el modelo 3BS.

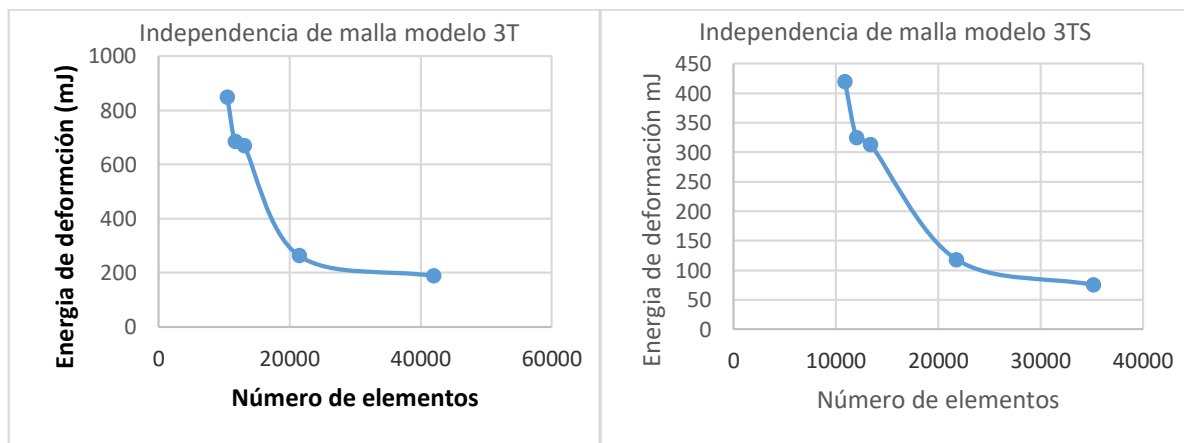
Tabla 4-2
Tamaño de malla tres troqueles con y sin separación

Regiones	Tamaño de elemento (mm) 3T	Tamaño de elemento (mm) 3TS
Viga.	25	25
Columna	12	12
Extremo de viga	8	8
Troqueles	0.7	0.8
Sección solido Columna	0.7	0.8

Entidades	Cantidad 3T	Cantidad 3TS
Elementos	41896	35158
Nodos	168947	135208

En cuanto Al análisis realizado a los valores reportados de cantidad de nodos, tamaños de malla y por ende resultados de la simulación, fue necesario hacer iteraciones sucesivas de refinamiento en las zonas de interes y evaluar su respectiva independencia de malla con el criterio de energia de deformación como se muestra en Figura 4-10.

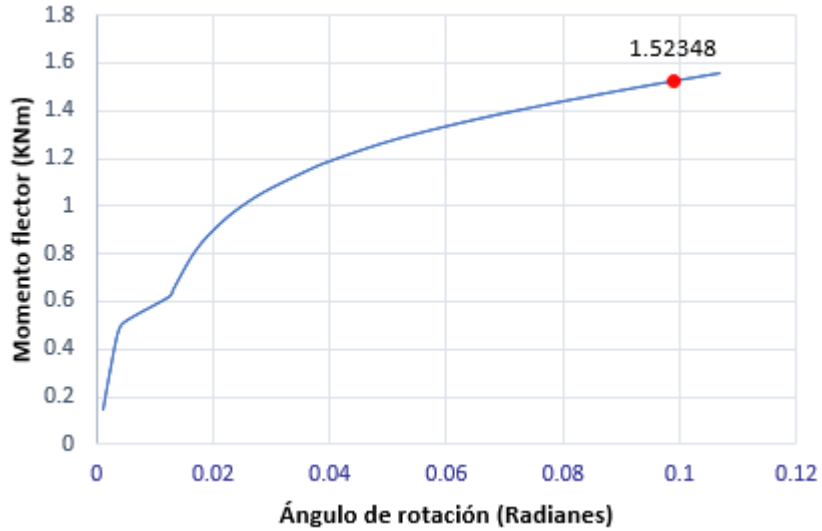
Figura 4-10 Independencia de malla para modelo 3T y TS



En la Figura 4-10 se muestra las iteraciones realizadas a los modelos 3T y 3TS, en los cuales se presentaron 5 refinamientos sobre las zona de interes (contacto entre troqueles y viga) hasta lograr diferencias menores al 10%. Para los demás modelos evaluados se usó el mismo criterio de convergencia y las condiciones mostradas, con el proposito de minimizar las graficas presentes en el documento, solo se define el resumen de la última iteración como se establecio en la Tabla 4-2.

Para el modelo de tres troqueles sin separación, se obtiene un comportamiento de tipo parabólico con un momento flector de 1.52 kNm en un ángulo de rotación de 0.1 radianes como se muestra en la Figura 4-11

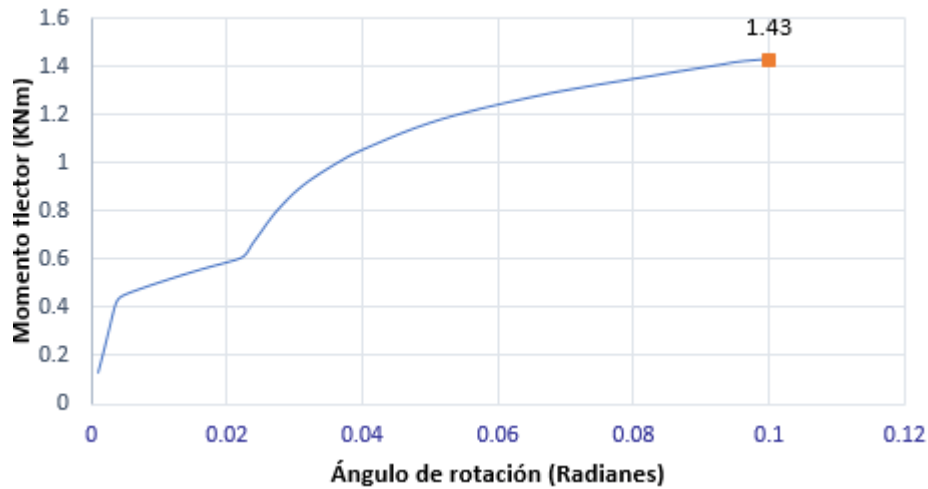
Figura 4-11 Comportamiento de simulación conexión 3T (tres troqueles sin separación)



El modelo de tres troqueles con separación se evaluó desde tamaños de elementos en la zona de contacto desde 5 hasta 0.8 mm, encontrando en la última un independencia de malla por el criterio de energía de deformación, medida en la zona de contacto entre los troqueles y la superficie de la columna. El resumen general del modelo se presenta en la Tabla 4-2

En cuanto al comportamiento encontrado en la conexión de tres troqueles con separación (3TS), se presentaron problemas de convergencia en los primeros pasos, debido a la separación entre la columna y la chapeta, lo que a su vez se ve reflejado en desplazamientos sin incremento de carga; por tal razón, fue necesario colocar pasos cortos en dicho segmento, zona de la gráfica de ángulo de rotación entre 0 y 0,002 radianes como se muestra en la Figura 4-12. Para el punto de interés evaluado a 0,1 radianes se obtuvo un momento flector de 1,43 kNm.

Figura 4-12 Comportamiento conexión tres troqueles con separación (3TS).



Modelos cuatro troqueles con y sin separación

El modelo fue analizado con tamaños de malla fija para la columna y viga, las zonas de interés se realizaron refinamientos hasta 1 mm, con un resumen general del modelo mostrado en la Tabla 4-3.

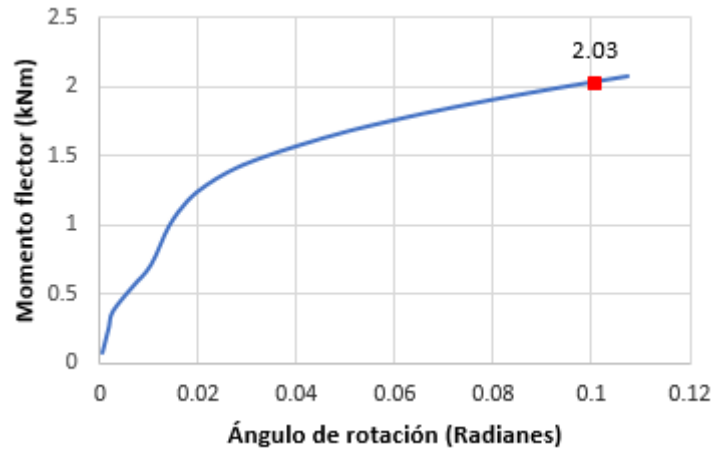
Tabla 4-3
Resumen general de modelos cuatro troqueles con y sin separación

<u>Regiones</u>	<u>Tamaño de elemento (mm) 4T</u>	<u>Tamaño de elemento (mm) 4TS</u>
Viga.	25	25
Columna	12	12
Extremo de viga	8	8
Troqueles	1.0	1.0
Sección solido Columna	1.0	1.0

<u>Entidades</u>	<u>Cantidad 4T</u>	<u>Cantidad 4TS</u>
Elementos	33238	23699
Nodos	90177	77417

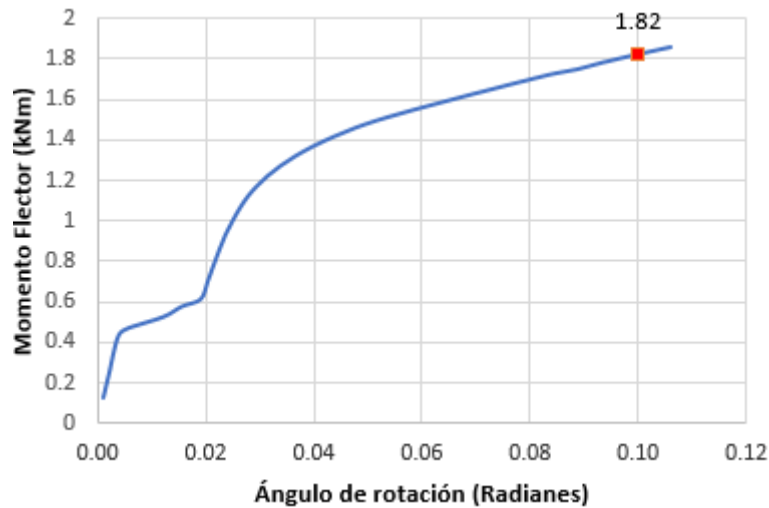
Para el modelo de cuatro troqueles sin separación, se obtuvo un momento flector máximo de 2.03 kNm, a un ángulo de rotación de 0.1 radianes, el comportamiento muestra una tendencia similar a la obtenida con el modelo de tres troqueles sin separación, como se muestra en la Figura 4-13

Figura 4-13 Comportamiento conexión cuatro troqueles sin separación (4T).



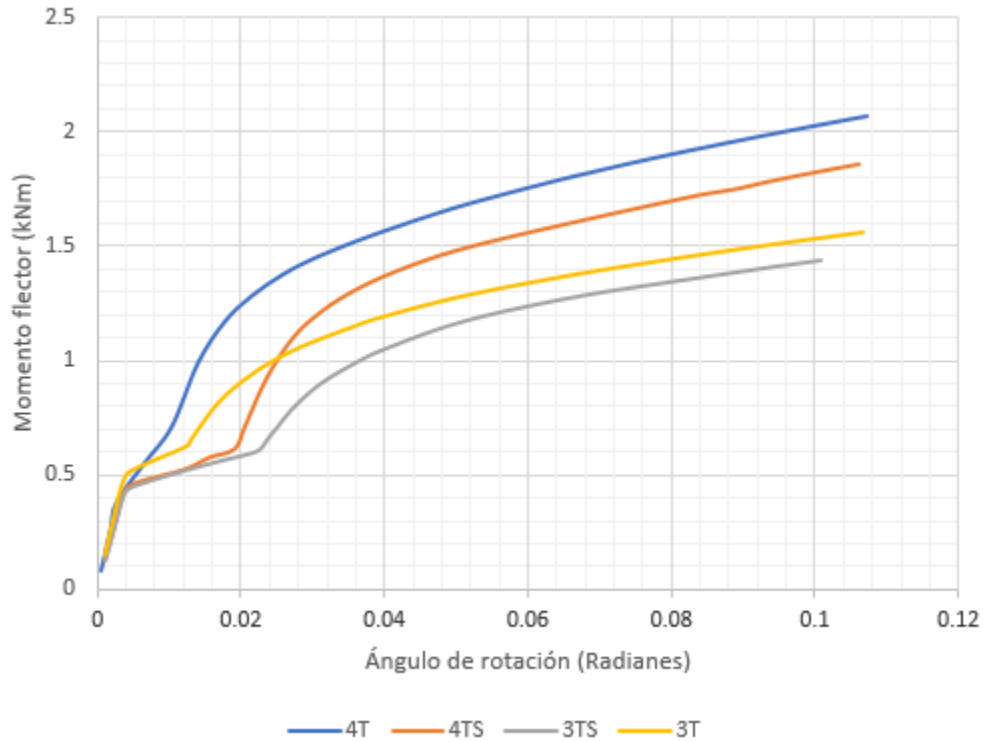
En la conexión con cuatro troqueles con separación se obtuvo un momento flector máximo de 1.82 kNm a 0.1 radianes, como se muestra en la Figura 4-14. En cuanto al comportamiento presentado en la simulación en las primeras etapas, coinciden con los de la conexión 3TS. La zona entre 0 y 0.02 radianes muestra que la conexión no genera mayor restricción hasta que la chapeta toca la columna.

Figura 4-14 Comportamiento conexión cuatro troqueles con separación (4TS).



Como resumen general de los modelos analizados de tipo troquel (3T, 3TS, 4T, 4TS), en los cuales se evaluaron la cantidad de puntos de contacto y la separación, se puede determinar que la condición de la separación modifica la capacidad de la conexión para un ángulo de 0.1 radianes en un máximo 9%, y que la cantidad de puntos de contacto entre la viga y la columna modifican la capacidad de carga hasta en un 30%, medidas en conexiones sin separación, como se muestra en la Figura 4-15.

Figura 4-15 Comparación modelos tipo troquel.

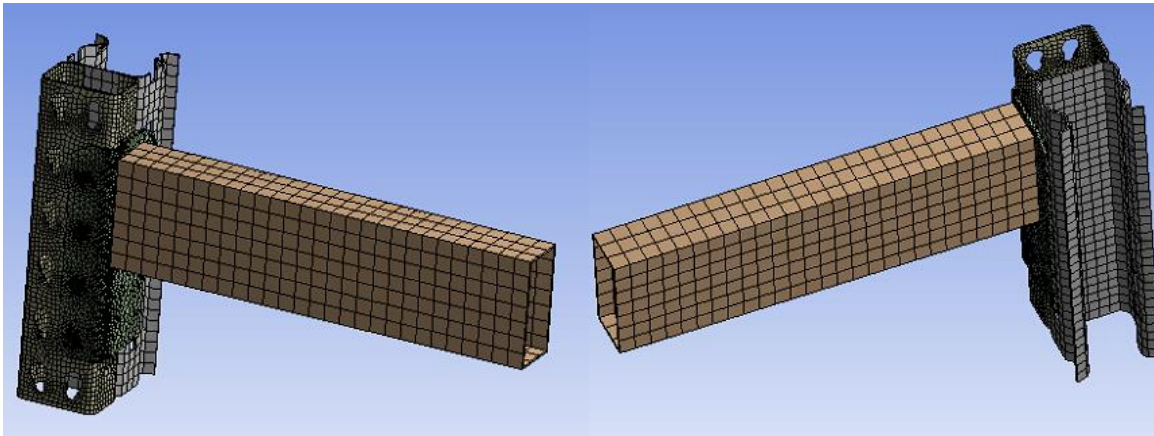


Los modelos simulados de 3TS y 4TS muestran una transmisión de carga menor hacia la conexión en el rango de 0 a 0.02 radianes, dicha condición es causada por la separación de la chapeta respecto a la columna y sus respectivos movimientos relativos hasta el contacto permanente entre superficies.

4.6.2 Conexiones con tres y cuatro botones

Las conexiones de tres y cuatro botones, con y sin separación fueron discretizadas con las características mencionadas en el numeral 4.1 al 4.5, sin embargo, fue necesario realizar refinamientos sobre las superficies de contacto, con el propósito de mejorar la convergencia de los resultados y evitar errores en el modelo. Las geometrías generales usadas para las partes que componen la conexión se observa en la Figura 4-16.

Figura 4-16 Modelos tipo botón.



Las geometrías fueron tomadas según el levantamiento dimensional realizado sobre las muestras ensayadas y definida en el apartado 2. A su vez, fue necesario suprimir del modelo de simulación la parte posterior de la columna (refuerzo), puesto que al realizar el análisis de convergencia (mismo criterio de modelos tipo troquel), los modelos presentaban tiempos de simulación muy largos sin mayor aporte por parte de dicha pieza, puesto que los puntos de anclaje de la columna evita desplazamientos de la misma o comportamientos de tipo pandeo lateral torsional o flexión local sobre la columna.

Modelos de cuatro botones con y sin separación

Los modelos 4B y 4BS fueron analizados con tamaños de malla fija para la columna y viga y las zonas de interés se realizaron refinamientos desde 5mm hasta 1 mm, con un resumen general de los modelos mostrados en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4
Resumen modelos cuatro botones con y sin separación.

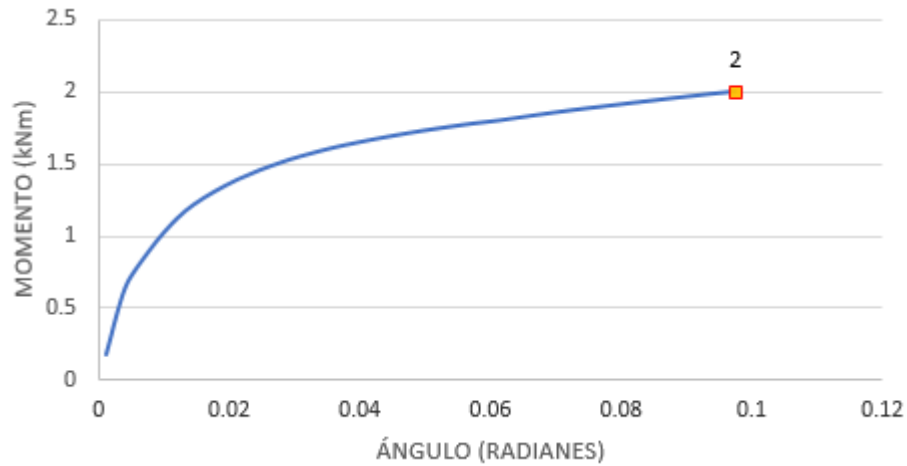
<u>Regiones</u>	<u>Tamaño de elemento (mm) 4B</u>	<u>Tamaño de elemento (mm) 4BS</u>
Viga.	25	25
Columna	12	12
Extremo de viga	Automático	Automático
Botones	0.85	1.0
Sección solido Columna	0.85	1.0

<u>Entidades</u>	<u>Cantidad 4B</u>	<u>Cantidad 4BS</u>
Elementos	84432	59157
Nodos	186067	133122

Para la conexión con cuatro botones sin separación se obtuvo un momento flector máximo de 2 kNm a un ángulo de rotación de 0,1 radianes, como se muestra en la

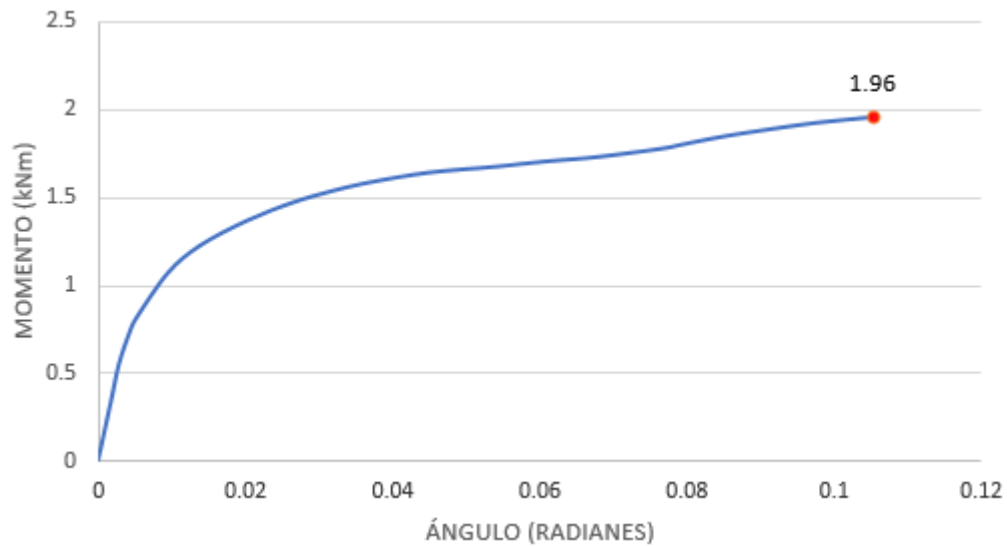
Figura 4-17. El modelo presenta en su primeras etapas una distribución de esfuerzos homogénea entre la chapeta y los contactos de los conectores y la zona de la chapeta y la columna, condición que se ve reflejada en la pendiente de la gráfica. Posterior a esto la chapeta en la parte inferior del contacto con la viga presenta deformaciones plásticas que generan un cambio de comportamiento de la conexión y en consecuencia una modificación de la pendiente.

Figura 4-17 Comportamiento conexión cuatro botones sin separación 4B.



El comportamiento presentado en las simulaciones realizadas a las conexiones de cuatro botones con separación (4BS) no difiere en grandes proporciones frente al modelo sin separación. Se puede establecer que con un total de 40 mm de desplazamiento vertical, correspondientes a un ángulo de rotación de 0.1 radianes, se obtuvo un momento flector de 1.96 kNm, como se muestra en la Figura 4-18.

Figura 4-18 Comportamiento conexión cuatro botones con separación 4BS.



El comportamiento general de la conexión muestra que la pendiente en las primeras etapas es inferior a la presentada en la 4B, en este caso producto de la distribución de carga sobre los

conectores solamente; sin embargo, al realizar el contacto entre la chapeta y la columna la pendiente cambia, lo que al final muestra una capacidad de carga similar entre los dos tipos de conexiones.

Modelos tres botones con y sin separación

Los modelos 3B y 3BS fueron analizados con tamaños de malla fija para la columna y viga y las zonas de interés se realizaron refinamientos hasta de 0.9 mm, con un resumen general de los modelos mostrados en la Tabla 4-5.

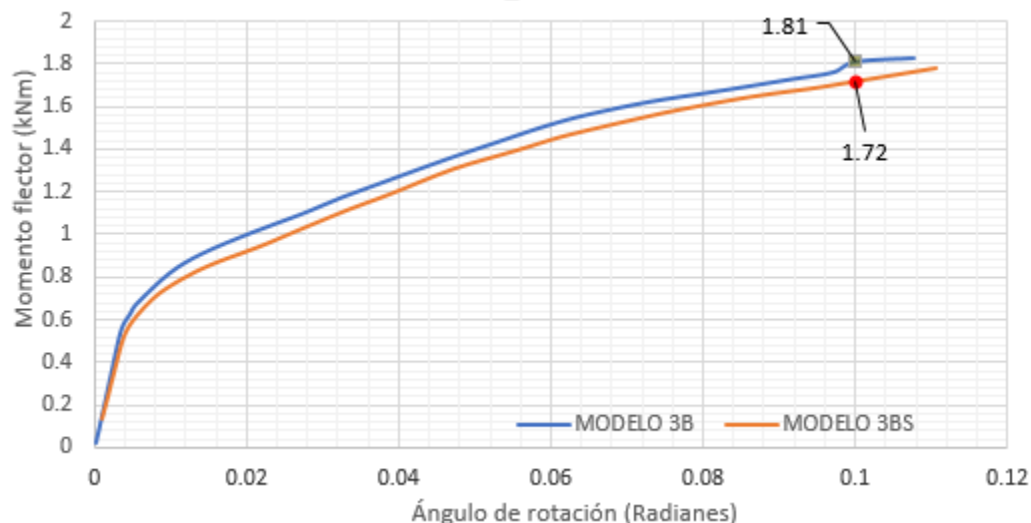
Tabla 4-5
Resumen general tres botones con y sin separación

<u>Regiones</u>	<u>Tamaño de elemento (mm) 3B</u>	<u>Tamaño de elemento (mm) 3BS</u>
Viga.	25	25
Columna	12	12
Extremo de viga	8	8
Botones	1.5	0.9
Sección solido Columna	1	0.9

<u>Entidades</u>	<u>Cantidad 3B</u>	<u>Cantidad 3BS</u>
Elementos	23274	55086
Nodos	78512	133535

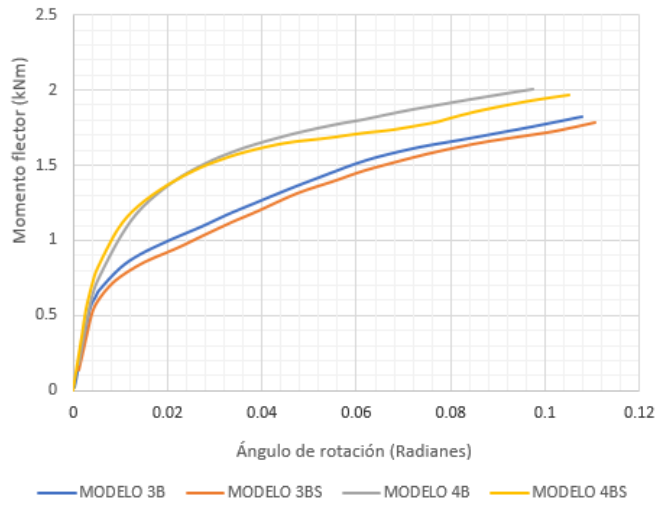
Simulaciones realizadas con las conexiones de tres botones con y sin separación, presentaron un patrón similar al monitoreado en las homólogas de cuatro puntos de contacto, en las cuales la carga medida a un ángulo de rotación de 0.1 radianes es similar en lo referente al comportamiento general, su diferencia está en la primera etapa, en la cual la pendiente cambia por la separación de la chapeta y la columna y la deformación plástica de los contactos de los botones como se muestra en la Figura 4-19.

Figura 4-19 Comportamiento conexión tres botones sin separación 3B.



El comportamiento general presentado por los modelos de tipo botón, muestra que la separación no cambia el comportamiento global de la conexión de manera significativa. En cambio, las conexiones con 4 puntos de contacto presentan 13% de mayor capacidad a la flexión en comparación con las conexiones de 3 puntos, como se muestra en la Figura 4-20.

Figura 4-20 Comparación de modelos tipo Botón.

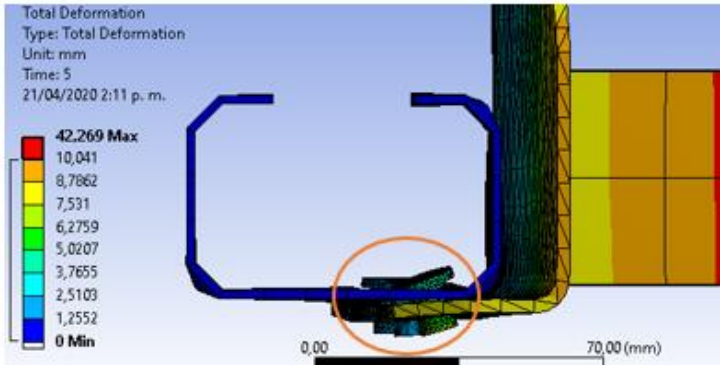
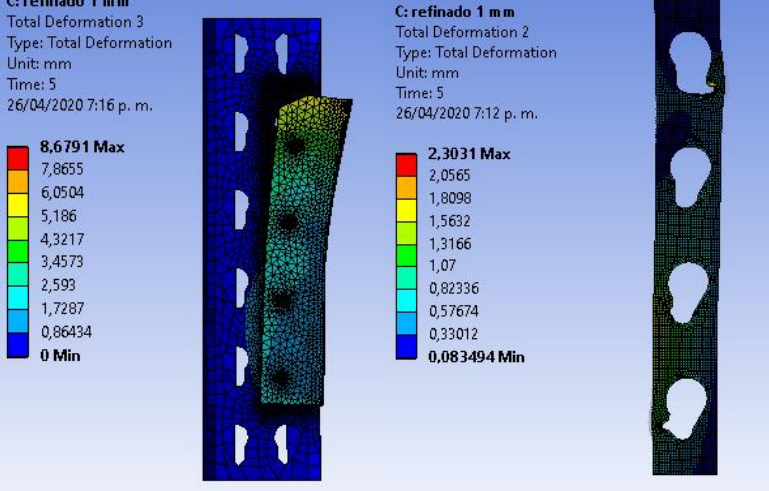
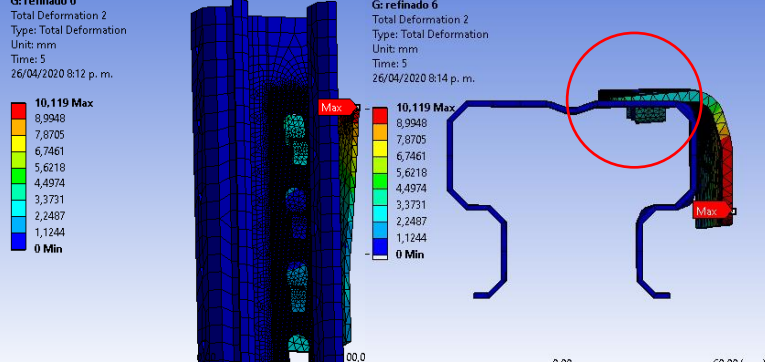


Otro de los aspectos a destacar en el comportamiento analizado en las diferentes simulaciones y mostrado en las Figura 4-15 y Figura 4-20 está relacionado con la separación y su capacidad medida a 0.1 radianes. Para el caso de tipo troquel, se observa que la separación afecta el comportamiento global de la junta, mientras que la tipo botón no se ven afectadas con dicha modificación.

4.7 Modos de falla en simulación

Como objetivo de la presente investigación se plantea en análisis del modo de falla de las conexiones de estantería y como se mostró en el apartado 3.2.1, dependiendo del tipo de conector y de la cantidad de puntos de contacto, la contribución a la falla cambia del conector a la columna. Para el caso de las simulaciones realizadas, se verificó dicho comportamiento y se resumió en la tabla 4.6.

Tabla 4-6
Modos de falla observado en la simulación

Imagen de falla	Descripción general
 <p style="text-align: center;">Deformación de botones (3B)</p>	<p>La deformación mostrada en la zona de interés (contacto de botones con columna), en los modelos de tres botones con y sin separación, permite establecer que los contactos de fricción entre el extremo de la viga y los botones, genera un movimiento aproximado al observado en la experimentación; sin embargo, no es comparable con respecto al evidenciado con las muestras físicas. La deformación presentada en la experimentación permite que el botón de la parte superior se desensamble como causa de la deformación plástica de la columna.</p>
 <p style="text-align: center;">Deformación en columna conexión 4B</p>	<p>Las deformaciones presentes en el modelo de cuatro botones con y sin separación evidencian una correlación con el comportamiento observado en la experimentación. Tanto el ojal superior como el inferior presentan deformaciones en los mismos órdenes de magnitud; sin embargo, la diferencia está en el extremo de la viga, la cual no se deforma de la misma manera a lo evidenciado en la experimentación. El extremo de la viga presenta deformaciones en la parte superior como consecuencia del aplastamiento del ojal; sin embargo, no presenta deformaciones plásticas en la unión con la viga como se evidencia en las muestras ensayadas.</p>
	<p>Las deformaciones mostradas en los modelos de cuatro troqueles con y sin separación evidencian el mismo comportamiento en la columna de la junta y la falla por aplastamiento en el primer ojal.</p> <p>En cuanto a la interacción entre la chapeta y la columna, se observa que en el modelo de experimentación empieza un proceso de desenganche del extremo de la viga en sus etapas finales (Imagen 10 tabla 3-7) condición que no se presenta en la simulación realizada.</p>

<u>Imagen de falla</u>	<u>Descripción general</u>
<p style="text-align: center;">Deformaciones modelo 4T.</p>	
<p style="text-align: center;">Deformación en modelos 3T</p>	<p>La distribución de deformaciones en las conexiones de tres troqueles con y sin separación presentan una diferencia el comportamiento entre el extremo de la viga y la columna, reportadas en la tabla 3.7</p>

En la Tabla 4-6 se muestran los modos de falla encontrados en las simulaciones realizadas, junto con las respectivas similitudes con las muestras ensayadas, en las cuales es evidente que la diferencia de la parte experimental frente al comportamiento obtenido en la simulación está asociada con el desplazamiento lateral que se presenta en las conexiones tipo botón y troquel.

En el caso de las conexiones tipo botón se evidencia una diferencia superior, lo que en términos de comportamiento global modifica la capacidad de carga y subestima el comportamiento real de la misma.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En el presente apartado se realiza un análisis de los resultados obtenidos en los dos capítulos antes presentados, dichas relaciones buscan determinar las ventajas, desventajas, modos de falla particulares y condiciones que afectan a cada una de las conexiones examinadas.

Uno de los propósitos de la presente investigación es la correlación de los datos obtenidos mediante la experimentación y el comportamiento evidenciado mediante la simulación por elementos finitos. En este sentido, se debe indicar que cada uno de los modelos fue comparado por separado con el fin de determinar si la simulación subestimaba o por el contrario es más conservador que el modelo estadístico obtenido.

Para la comparación de los modelos de tres troqueles con y sin separación, se determinó que bajo las condiciones analizadas, junto con sus respectivos contactos, aplicación de carga y análisis de convergencia, los modelos por elementos finitos subestiman la capacidad de momento flector desde un 2 a un 15% respectivamente para 3T y 3TS, como se muestra Figura 5-1.

Figura 5-1 Comparación modelos 3T y 3TS.

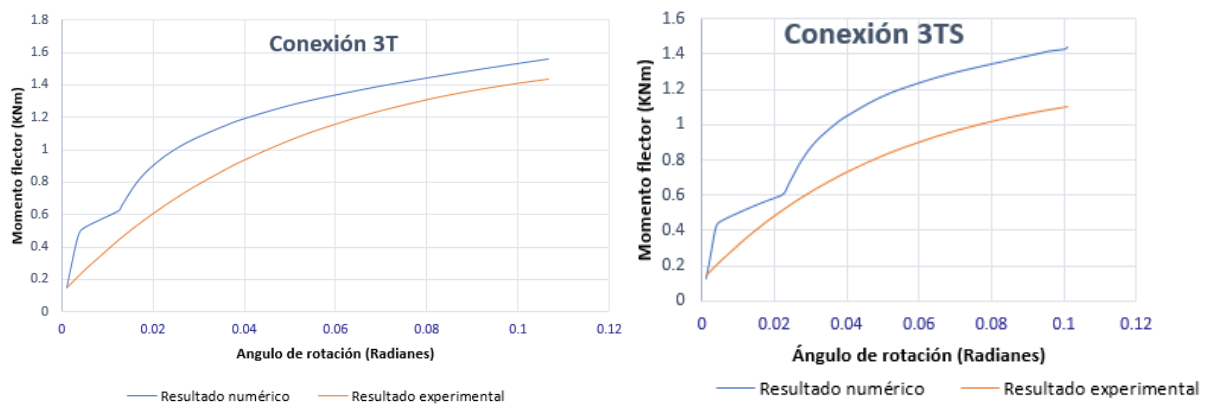
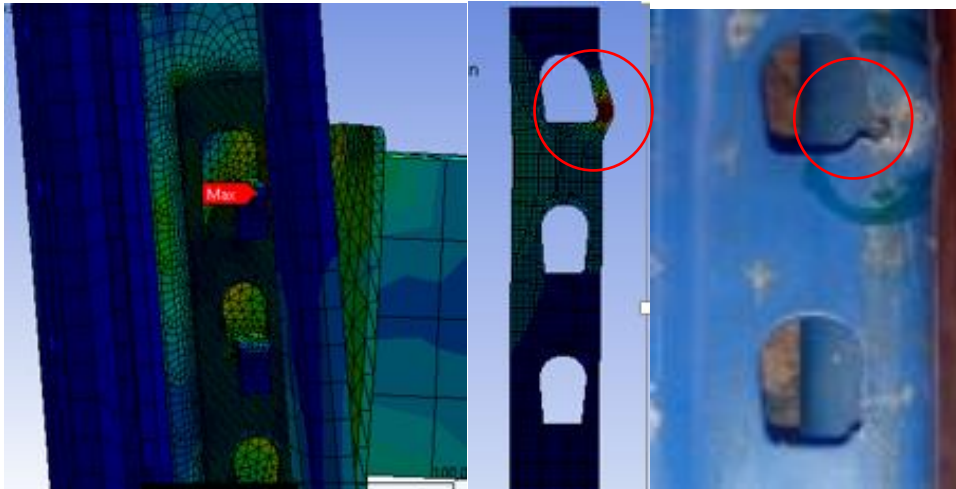


Figura 5-2 puntos de penetración en columna modelo-experimentación.

Verificando el comportamiento de las dos gráficas, se podría indicar que la comparación entre modelos experimentales y numéricos medidos a 0.1 radianes es de 0.12 KNm para la conexión 3T y de 0.42 KNm para la conexión 3TS, para los dos casos subestimando el comportamiento desde las mediciones obtenidas en ANSYS.

Las razones por las cuales el modelo de ANSYS presenta dicho comportamiento, se puede determinar a partir de las deformaciones máximas del modelo y la forma en que la columna genera condiciones de penetración en el primer punto de conexión (Figura 5-3), puesto que al comparar los valores obtenidos por la simulación y medir la penetración de la columna se encuentra una diferencia que oscila entre 0.5 y 1.2 mm entre los modelos y la experimentación. Con variaciones en este punto particular, la medición de la carga respecto a la deformación cambia y modifica el comportamiento global de la junta.

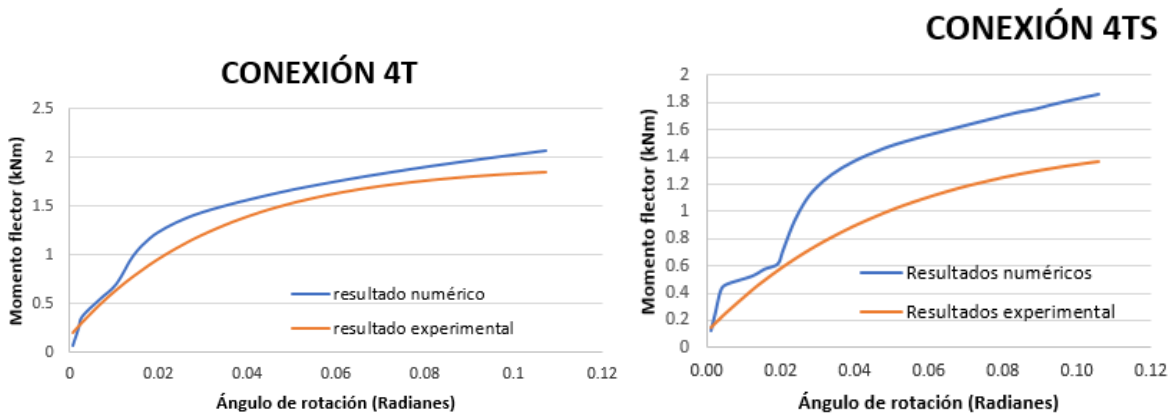
Figura 5-3 Diferencias en modelos de simulación y experimentación 3T 3TS



La condición general que modifica el comportamiento en el modelo, está relacionado con la forma en la que se distribuye los esfuerzos sobre la zona de contacto, cada elemento se empieza a deformar y a distribuir la deformación en los nodos cercanos, sin buscar que el nodo se fracture, puesto que esta condición generaría una no convergencia en el modelo. Sin embargo, en condiciones de experimentación se observa una falla por aplasamiento de la columna en los mismos puntos.

El análisis entre modelos de 4 troqueles con y sin separación presenta un comportamiento en el cual los estimados estadísticos son más conservadores en comparación con los resultados obtenidos en elementos finitos, con porcentajes del 6% al 24% medido a 0.1 radianes de deformación como se muestra en la Figura 5-4.

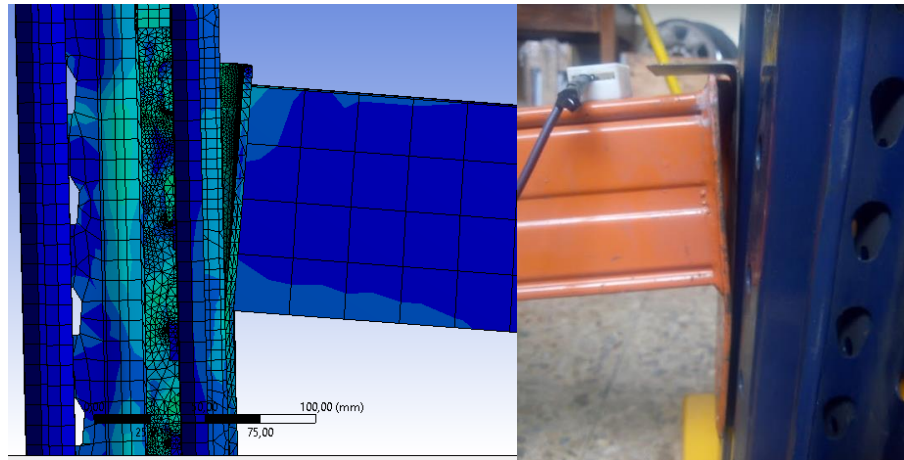
Figura 5-4 Comparación modelos 4T y 4TS



La aproximación entre modelos tiene como factores adicionales la distribución de desplazamientos a lo largo de la lengüeta y sus cuatro puntos de contacto, tanto en el modelo como en la estructura física se observa que la deformación durante la aplicación de la carga se reparte entre los puntos de contacto y la deformación de la lengüeta en la parte inferior de la junta con la viga; sin embargo, en el caso de las probetas usadas para la experimentación la deformación en la lengüeta aporta

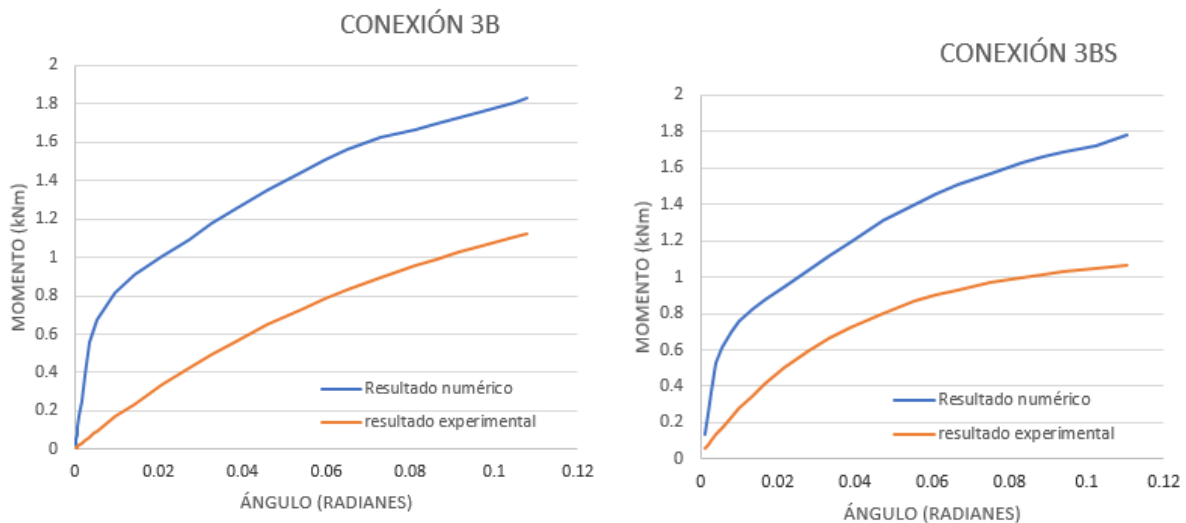
mayor ángulo de rotación a la condición global de la junta, lo cual termina modificando el comportamiento de la misma, como se muestra en la Figura 5-5.

Figura 5-5 Comparación deformación modelo-experimentación.



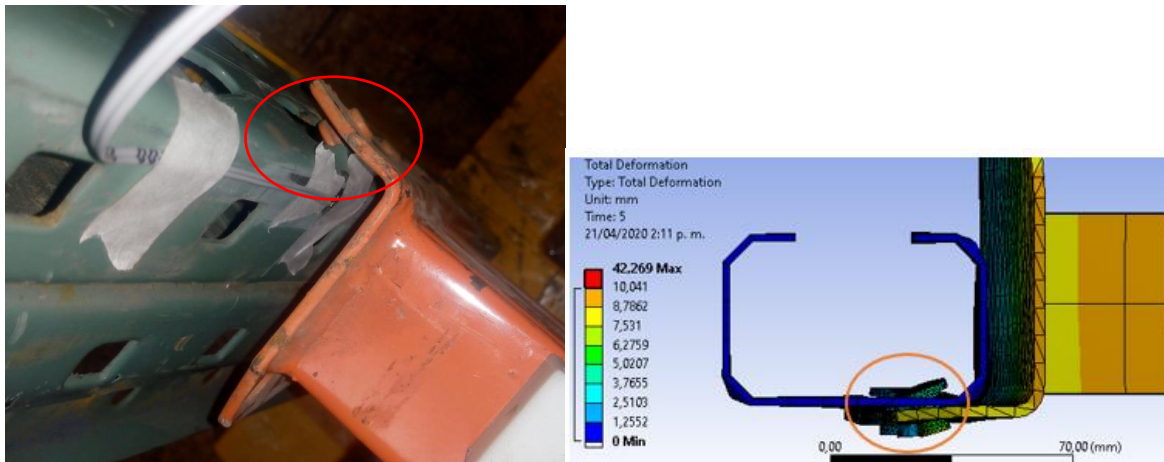
Al realizar una comparación para los modelos estadísticos de las conexiones de tres botones con y sin separación, se observa que la capacidad obtenida mediante el modelo de simulación es superior, en los dos casos es del 60% superior, medida a 0.1 radianes de deformación de la junta, como se observa en la Figura 5-6.

Figura 5-6 Comparación de modelos tres botones.



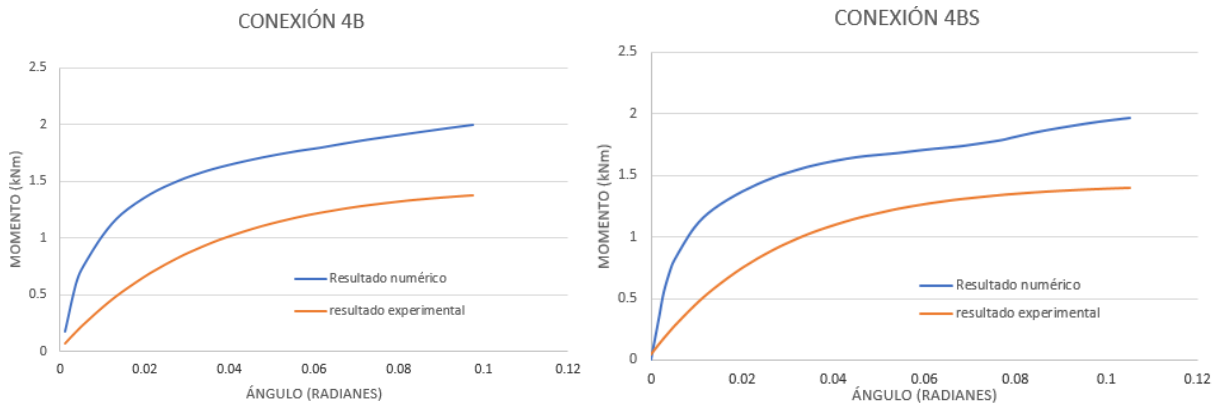
La diferencia entre modelos de tres botones medidos en la experimentación y los obtenidos en la simulación por elementos finitos, está relacionado con la deformación existente entre las la columna y los botones, la deformación relativa entre los dos componentes no se replica de la misma forma, en el caso de la experimentación se presentan cargas laterales que desenganchan el primer conector y aumenta la rotación de la viga, dicho fenómeno se muestra en la Figura 5-7.

Figura 5-7 Deformación de la chapeta y el conector.



En el caso de las conexiones de cuatro puntos de contacto (4B y 4BS), la comparación entre modelos estadísticos y de simulación mantiene el mismo comportamiento de tres botones, como se puede observar en la Figura 5-8; sin embargo, el valor porcentual entre modelos es más cercano entre sí, teniendo valores de dispersión medidos en 0.1 radianes de rotación del 40%,

Figura 5-8 Comparación de modelos cuatro botones.



Los modelos de cuatro botones predicen mejor el comportamiento en comparación con los de tres botones, el fenómeno evidenciado en los anteriores modelos afecta de una manera más moderada, debido a la distribución de carga sobre una superficie más grande de la lengüeta y un punto de apoyo adicional (botón), lo que impide que se desenganche el contacto superior.

Como conclusión general del presente apartado, se puede indicar que los modelos no lineales de degradación de Ruminal definen el comportamiento de este tipo de conexiones de manera acertada con bajos niveles de error frente a los datos obtenidos en la experimentación, lo que permite realizar una comparación más acertada frente a las simulaciones en ANSYS.

En cuanto los valores obtenidos de las simulaciones, se puede determinar que las condiciones tenidas en cuenta con las conexiones tipo troquel definen el comportamiento obtenido en la experimentación; sin embargo, en la medida en que se tengan más puntos de contacto, se debe restringir de manera más eficiente el comportamiento lateral de las probetas porque modifica el comportamiento global de la junta frente a los resultados de la simulación.

6. CONCLUSIONES

El objetivo general de la presente investigación consistió en determinar los modos de falla por sobrecarga de las conexiones de estantería tipo botón y troquelada, esto con el propósito de contrastar el comportamiento bajo condiciones de experimentación y las posibles diferencias con las simulaciones de los mismos fenómenos. Es así, como el análisis de las diferentes metodologías usadas a nivel internacional para la medición de la capacidad de la junta por sobre carga, la selección de las juntas usadas en el mercado local, el plan de experimentación y la simulación permiten concluir lo siguiente:

El comportamiento de los componentes de la conexión de una estantería, como los son: la columna, viga y conectores, están definidos y estudiados siguiendo lineamientos como los de la RMI 2012 o la EN-15512 y sus variaciones en los diferentes países, como lo es en Colombia la NTC 5689; sin embargo, desde el punto de vista del fenómeno y los modos de falla, no se cuenta con una clasificación en función de las características propias de cada conexión usada, como el espesor, dimensiones y forma del conector, cantidad de puntos de contacto, forma y espesor de la columna, geometría de la viga y punto de aplicación de la carga.

Dada la ausencia de investigaciones específicas se determina la necesidad de un marco de carga; el diseño estructural e instrumentación del marco diseñado y construido para la presente investigación, permitieron obtener los resultados de manera confiable, lo cual se verifica al comparar las repeticiones de los experimentos y el ajuste de la curva de los modelos estadísticos establecidos para cada configuración. A su vez, se considera un adelanto en el entorno local, en el cual no existía un banco de prueba con las características necesarias que garantizaran la repetitividad del ensayo.

Los resultados obtenidos de los modelos evaluados en ANSYS, para las conexiones tipo troquel se ajustan a las ecuaciones matemáticas establecidas a partir de la experimentación realizada; sin embargo, los modelos para las conexiones tipo botón, difieren de los resultados de la experimentación por no representar de manera eficiente el comportamiento entre el botón y la chapeta.

Al estudiar la literatura se encontró que los modelos usados para estudiar las conexiones tipo botón no se ajustan a los resultados experimentales porque realizan simplificaciones que no pueden representar el comportamiento real de los botones con la chapeta. Con este estudio se determinó que para la conexión tipo troquel es posible ajustar las simulaciones para obtener resultados coherentes con la experimentación. Sin embargo, para las conexiones tipo botón, la simplificación y los parámetros usados no permiten lograr simulaciones que se ajusten a la experimentación con resultados acordes y porcentajes de error inferiores al 10 por ciento.

Con el marco de carga y la instrumentación usada se pudo establecer que existen varios factores que solo pueden ser evaluados de forma parcial a través de enfoques numéricos o analíticos dentro del comportamiento de las conexiones de las estanterías, tales como: el contacto de los elementos troquelados o los botones con las perforaciones de la columna, la influencia directa de las

tolerancias en el espesor de la chapeta y la columna, las deformaciones relativas entre los conectores y la chapeta y en general la geometría de los componentes involucrados en la junta.

Las conexiones de tipo troquel mostraron una mayor capacidad para soportar carga en comparación con las de tipo botón, en particular las de cuatro troqueles con separación son las que soportan mayor cantidad de esfuerzo sin llegar a la falla.

En el caso particular de las juntas tipo botón, se pudo establecer que la capacidad de carga obtenida en los ensayo experimentales es inferior al mostrado en las simulaciones. La causa de la misma está relacionada con el movimiento relativo entre el pasador y la chapeta, parámetro que se contempla de forma parcial dentro de la simulación.

Los modelos de simulación como herramientas de predicción del comportamiento de las conexiones de estantería no se encuentran completamente definidas, los autores consultados definen los contactos entre viga y columna con resortes y elementos tipo viga para mantener entre ellas. En la presente investigación se definieron los contactos de tipo fricción con condiciones de frontera aproximadas a las ensayadas, encontrando que en la mayoría de los casos subestimaba el comportamiento real de la conexión.

Los modos de falla coinciden entre el modelo establecido en ANSYS y las pruebas experimentales realizadas. El grado de deformación de las juntas se modifica dependiendo el tipo de conector y la cantidad de puntos de contacto.

Los modos de falla para las conexiones tipo troquel, están directamente relacionadas con el grado de deformación en la chapeta y la cantidad de puntos de contacto. A una mayor cantidad de puntos de contacto (cuatro), se presentan deformaciones localizadas en la columna en los puntos de contacto superior e inferior. Sin embargo, con menos puntos de contacto (tres), la deformación se distribuye en la chapeta (superficies troqueladas) y la columna sufre menor cantidad de daños.

7. TRABAJOS A FUTURO.

Las conexiones entre los parales y las vigas de las estructuras tipo estanterías se consideran en muchos casos como rígidas, dicho comportamiento se presume por la falta de modelos de caracterización estándar; sin embargo, esto no es preciso, debido la deformación de los elementos que conforman la junta como lo son: los botones, la chapeta, el espesor de los componentes, la separación e incluso la geometría columna. Esta particularidad influye de manera muy significativa y por tal razón, se debe evaluar de manera experimental para cada configuración con variaciones no solo de puntos de contacto y separación de viga y columna. Es por esto, que se plantea como trabajos a futuro realizar un plan de experimentación en el cual se consideren factores como la resistencia de diferentes materiales, espesores y geometrías de columnas y vigas.

Como otro trabajo a futuro, se plantea la evaluación del comportamiento de las juntas y extrapolar los datos a modelos de estanterías completas en el cual se considere la caracterización encontrada para las juntas de tres y cuatro puntos de contacto tipo botón y troqueladas.

Otra de las áreas de interés para este tipo de conexiones está relacionada con su comportamiento con variaciones de temperatura, razón por la cual se plantea realizar un estudio en el cual se evalúen condiciones de termo fluencia en la junta.

8. BIBIOGRAFÍA

- [1] J. Murcia, D. Amezquita, y H. Fuentes, “Localización de la industria en Bogotá.”, *Ud y la Geomática*, n° 9, pp. 75–86, 2014.
- [2] A. P y P. D, “Propuesta metodológica para la evaluación del desempeño estructural de una estantería metálica.”, *Rev. EIA*, vol. 12, pp. 139–154, 2009.
- [3] I. C. de normas técnicas de certificación ICONTEC, *NTC 5688 Especificación para el Diseño, ensayo y utilización de estanterías industriales de acero*. Bogotá D.C, 2009 (ICONTEC), *NTC 5689*. 2009.
- [4] Comité técnico AEN/ CTN 58, *UNE-EN 15512*, 2010^a ed. 2009.
- [5] S. L. Chan, W. F. Chen, L. H. Han, y D. Lam, “Desing by testing of industrial rack”, *Adv. Steel Constr.*, vol. 7 Number 1, pp. 27–47, 2011.
- [6] Corporación instituto Chileno del acero, “Especificación para el diseño de miembros estructurales de acero conformados en frío.”, 2009^a ed., R. L. L. Concha, Ed. Instituto Chileno de Acero, 2009.
- [7] A. Mh, “Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks”, vol. 2012, 2012.
- [8] M. Casafont Ribera, G. Reyes Pozo, F. Ferrando Piera, F. Roure Fernandez, y J. Bonada Bo, “Anàlisi del comportament a compressió de perfils prims oberts d’acer conformats en fred”.
- [9] F. Roure, M. M. Pastor, M. Casafont, y M. R. Somalo, “Thin-Walled Structures Stub column tests for racking design : Experimental testing , FE analysis and EC3”, *Thin Walled Struct.*, vol. 49, n° 1, pp. 167–184, 2011.
- [10] B. P. Gilbert y K. J. R. Rasmussen, “Stiffness tests, failure tests and load transfer in steel drive-in storage racks”, *Res. Rep. - Univ. Sydney, Dep. Civ. Eng.*, n° 900, pp. 1–103, 2009.
- [11] V. Ungureanu y D. Dubina, “Sensitivity to imperfections of perforated pallet rack sections”, *Mech. Mech. Eng.*, vol. 17, n° 2, pp. 207–220, 2013.
- [12] B. P. Gilbert, “Drive-in steel storage racks I: Stiffness tests and 3D load transfer mechanisms”, n° 1, 2006.
- [13] B. Cheng y Z.-Y. Wu, “Simplified Method for Calculating the Lateral Stiffness of Drive-In Storage Racks”, *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, vol. 21, n° 1, 2016.
- [14] B. P. Gilbert, K. J. R. Rasmussen, y K. J. R. Rasmussen, “School of Civil Engineering Sydney NSW 2006 Centre for Advanced Structural Engineering Stiffness tests , failure tests and load transfer in steel drive-in storage racks Research Report No R900”, n° October, 2009.
- [15] B. P. Gilbert, K. J. R. Rasmussen, B. P. Gilbert, y K. J. R. Rasmussen, “School of Civil Engineering Sydney NSW 2006 Centre for Advanced Structural Engineering Finite

- Element modelling of steel drive-in rack structures Research Report No R901”, n° October, 2009.
- [16] C. L. G. M. C, “Análisis sismo resistente de estanterías metálicas para almacenamiento (racks) de acuerdo con la nsr-10”, 2009.
- [17] S. N. R. Shah, N. H. R. Sulong, M. Z. Jumaat, y M. Shariati, “State-of-the-art review on the design and performance of steel pallet rack connections”, *Eng. Fail. Anal.*, vol. 66, pp. 240–258, 2016.
- [18] F. D. Markazi, R. G. Beale, y M. H. R. Godley, “Numerical modelling of semi-rigid boltless connectors”, *Comput. Struct.*, vol. 79, n° 26–28, pp. 2391–2402, 2001.
- [19] L. C. A. P. del R. de C. S. Resistentes, “Titulo B Cargas NSR-10”, p. 88, 2010.
- [20] RMI “North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members”, 2007.
- [21] RMI, “Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks”, *RMI Specif.*, vol. 2012, 2012.
- [22] V. J. Armendáriz, A. Ortiz-Prado, y R. Schouwenaars-Franssens, “SEAFEM: Herramienta computacional para la determinación de causas de falla en elementos mecánicos metálicos”, *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 2007, pp. 261–280, 2007.
- [23] M. S. Freitas, F. T. Souza, y M. S. R. Freitas, “Analysis and behavior of steel storage drive-in racks”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 48, n° 2, pp. 110–117, 2010.
- [24] M. M. Pastor, J. Bonada, F. Roure, y M. Casafont, “Residual stresses and initial imperfections in non-linear analysis”, *Eng. Struct.*, vol. 46, pp. 493–507, 2013.
- [25] J. Bonada, M. M. Pastor, F. Roure, y M. Casafont, “Influence of the cold work effects in perforated rack columns under pure compression load”, *Eng. Struct.*, vol. 97, pp. 130–139, 2015.
- [26] B. W. Schafer, Z. Li, y C. D. Moen, “Computational modeling of cold-formed steel”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 48, n° 10–11, pp. 752–762, 2010.
- [27] L. H. Teh, G. J. Hancock, y M. J. Clarke, “Analysis and Design of Double-Sided High-Rise Steel Pallet Rack Frames.”, *J. Struct. Eng.*, vol. 130, n° 7, pp. 1011–1021, 2004.
- [28] J. Vican y P. Janik, “Experimental and numerical analysis of beam-column resistance”, *Procedia Eng.*, vol. 91, n° TFoCE, pp. 280–285, 2014.
- [29] C. Pastor, R Peköz “Design steel storage rack columns via direct strength method”, 2013.
- [30] B. W. Schafer, “Local, Distortional, and Euler Buckling of Thin-Walled Columns”, *J. Struct. Eng.*, vol. 128, n° 3, pp. 289–299, 2002.
- [31] J. Bonada, M. M. Pastor, F. Roure, y M. Casafont, “Distortional Influence of Pallet Rack Uprights Subject to Combined Compression and Bending”, *Structures*, vol. 8, pp. 275–285,

- 2016.
- [32] R. Schardt "Análisis de perfiles de sección abierta y pared delgada mediante la Teoría de la Viga Generalizada". pp. 1–107.
 - [33] N. Baldassino y P. Milano, "Performance of joints in steel storage", *ResearchGate*, n° May 2016, 2016.
 - [34] S. N. R. Shah, N. H. R. Sulong, M. Shariati, y M. Z. Jumaat, "Steel Rack Connections: Identification of Most Influential Factors and a Comparison of Stiffness Design Methods", *PLoS One*, vol. 10, n° 10, p. e0139422, 2015.
 - [35] P. A. Król, M. Papadopoulos-Woźniak, y J. Wójt, "Experimental investigation on shear strength of hooking-type beam-to-column joints, applied in one of high storage pallet racking systems", vol. 91, n° TFOCE, pp. 232–237, 2014.
 - [36] F. Muftah, "Assessment of Connection Arrangement of Built-up Cold-formed Steel Section under Axial Compression.", *Adv. Mater. Res.*, vol. 1043, n° 1043, pp. 252–257, 2014.
 - [37] J. Michael Davies, P. Leach, y A. Taylor, "The design of perforated cold-formed steel sections subject to axial load and bending", *Thin-Walled Struct.*, vol. 29, n° 1–4, pp. 141–157, 1997.
 - [38] Y. H. Lee, C. S. Tan, S. Mohammad, M. Md Tahir, y P. N. Shek, "Review on cold-formed steel connections", *Sci. World J.*, vol. 2014, 2014.
 - [39] T. Structures y T. Bombay, "Determination of flexibility of beam-to-column connectors used in thin walled cold-formed steel pallet racking systems Determination of flexibility of beam-to-column connectors used in thin walled cold-formed steel pallet racking systems", n° May, 2016.
 - [40] V. Mohan y P. P. J. Rajasankar, "Cold-formed steel pallet rack connection: an experimental study", pp. 55–68, 2015.
 - [41] S. N. R. Shah, N. H. Ramli Sulong, R. Khan, M. Z. Jumaat, y M. Shariati, "Behavior of Industrial Steel Rack Connections", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 70–71, pp. 725–740, 2016.
 - [42] F.D. Markazi, "Experimental Analysis of Semi-Rigid Boltless Connectors", vol. 28, n° 1, pp. 57–87, 1997.
 - [43] K. M. Bajoria, K. K. Sangle, y R. S. Talicotti, "Modal analysis of cold-formed pallet rack structures with semi-rigid connections", *J. Constr. Steel Res.*, vol. 66, n° 3, pp. 428–441, 2010.
 - [44] B. P. Gilbert y K. J. R. Rasmussen, "Experimental test on steel storage rack components", *Civ. Eng.*, n° October, pp. 1–61, 2009.
 - [45] M. Shariati, M. M. Tahir, T. C. Wee, S. N. R. Shah, y A. Jalali, "PT US CR", *Eng. Fail. Anal.*, 2017.

- [46] W. Michigan, A. Chicago, R. Bjorhovde, F. S. K. Bijlaard, y L. F. Geschwindner, *Connections in Steel Structures VI*. 2008.
- [47] A. Koz, “experimental and theoretical investigations of pallet racks connections”, *Adv. Steel Constr.*, vol. 3, n° 2, pp. 607–627, 2007.
- [48] A. . Fallis, “Estudio teórico y experimental de los modos de pandeo de perfiles estructurales de acero de chapa delgada, conformados en frío, de sección abierta y con perforaciones sometidos a compresión.”, universidad Politecnica de catluña, 2013.
- [49] S Naveed “Behavior of steel pallets racks”, Universidad de Malaya Kuala Lumpur, 2016.
- [50] F. D. Markazi, R. G. Beale, y M. H. R. Godley, “Experimental analysis of semi-rigid boltless connectors”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 28, n° 1, pp. 57–87, 1997.
- [51] C. Bernuzzi y C. a. Castiglioni, “Experimental analysis on the cyclic behaviour of beam-to-column joints in steel storage pallet racks”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 39, n° 10, pp. 841–859, 2001.
- [52] A. Filiatrault, M. Asce, P. S. Higgins, M. Asce, y A. Wanitkorkul, “Experimental Stiffness and Seismic Response of Pallet-Type Steel Storage Rack Connectors”, n° August, pp. 161–170, 2006.
- [53] K. M. Bajoria y R. S. Talikoti, “Determination of flexibility of beam-to-column connectors used in thin walled cold-formed steel pallet racking systems”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 44, n° 3, pp. 372–380, 2006.
- [54] C. Moen, “Direct strength design of cold-formed steel members with perforation”, The Johns Hopkins University, July, 2008.
- [55] P. Prabha, V. Marimuthu, M. Saravanan, y S. Arul Jayachandran, “Evaluation of connection flexibility in cold formed steel racks”, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 66, no 7, pp. 863–872, 2010.
- [56] T. Wang, X. Zhao, y Y. Chen, “Experimental analysis of beam-to-upright connections in cold-formed steel storage pallet racks”, pp. 455–471, 2012.
- [57] A. Stella, “Seismic Performance of Steel Pallet Racks”, National Technical University of Athens, October, 2012.
- [58] J. Urbano, “Estimación de la capacidad portante de perfiles de lámina delgada reforzados con barras de acero solicitados a compresión de uso en estanterías”, Universidad nacional, 2017.
- [59] J. A. P. B. L.H. Martin Bsc, *Structural Design of Steelwork to EN 1993 and EN 1994*, Third edit. Elsevier, 2008.
- [60] I. C. de normas técnicas de certificación ICONTEC, *NTC 5689 Especificación para el Diseño, ensayo y utilización de estanterías industriales de acero*. Bogotá D.C, 2009.
- [61] V. Mohan *et al.*, “Cold-formed steel pallet rack connection: an experimental study”, *Int. J.*

- Adv. Struct. Eng.*, vol. 7, n° 1, pp. 55–68, 2015.
- [62] EN15512. 2009. “Steel static storage systems—adjustable pallet racking systems—principles for structural design, CEN European Committee for Standardization”, 2009.
- [63] R. Martín, “Análisis mediante elementosfinitos de estructuras de acero con uniones semirrígidas”, Universidad de Sevilla, 2019.
- [64] M. Casafont Ribera, G. Reyes Pozo, F. Ferrando Piera, F. Roure Fernandez, y J. Bonada Bo, “Anàlisi del comportament a compressió de perfils primos oberts d’acer conformats en fred”, 2013.
- [65] C. Chen, L. Shi, M. Shariati, y A. Toghroli, “Behavior of steel storage pallet racking connection - A review”, vol. 5, pp. 457–469, 2019.
- [66] L. Dai, “Experimental Investigation into Steel Storage Rack Beam-to-Upright Bolted Connections”, 2016.
- [67] N. M. Razali y B. W. Yap, “Power Comparisons of Shapiro-Wilk , Kolmogorov-Smirnov , Lilliefors and Power comparisons of Shapiro-Wilk , Kolmogorov-Smirnov , Lilliefors and Anderson-Darling tests”, n° January 2011, 2014.