

**Evaluación del comportamiento mecánico y costos de montaje
para una conexión desmontable versus una conexión
convencional de sección reducida “Hueso de Perro” propuesta
para pórticos en acero resistentes a momento.**



AUTORES:

SANTIAGO GONZALEZ CARDONA
ESTEBAN DAVID PINTO ROMERO

DIRECTOR:

FEDERICO ALEJANDRO NUÑEZ MORENO

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERIA

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

BOGOTA D.C, 2021

CONTENIDO

1. <i>Resumen</i>	5
2. <i>Planteamiento del problema, justificación del problema e hipótesis de investigación</i> ..	6
3. <i>Palabras clave</i>	9
4. <i>Objetivos</i>	10
5. <i>Marcos de Referencia</i>	10
6. <i>Metodología</i>	18
7. <i>Resultados y Discusión</i>	25
8. <i>Conclusiones y Recomendaciones</i>	44
9. <i>Referencias</i>	46

LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1 - Criterios de Diseño para Conexiones RBS.....</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 2 - Montaje en Laboratorio a escala Real. Conexión RBS Convencional.....</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 3 - Fallas presentadas en elementos tipo RBS.....</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 4 - Detalle Conexión RBS-Columna</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 5 - Detalle Conexión Viga-RBS</i>	<i>21</i>
<i>Ilustración 6 - Esquema RBS.....</i>	<i>25</i>
<i>Ilustración 7 - Influencia del parámetro "a" en el Mf.....</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 8 - Influencia del parámetro "b" en el Mf.....</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 9 - Influencia del parámetro "c" en el Mf.....</i>	<i>27</i>
<i>Ilustración 10 - Parámetros Geométricos RBS en pulgadas (in).....</i>	<i>27</i>
<i>Ilustración 11 - Ensamble RBS de sección reducida. Autodesk – Inventor.</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 12 - Modelación Software ANSYS. Elementos Finitos TET10.....</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 13 - Resultados, simulación ANSYS. RBS Desmontable</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 14 - Valores de Π para Viga en voladizo con carga en el extremo.</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 15 - Variación Π Vs Parámetros Principales Sección en Cartón Paja.</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 16 – Proceso de construcción Probetas RBS Des. y RBS Conv.</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 17 - Ensamble RBS Desmontable. Montaje Final Maquina INSTRON 5900....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 18 - Fallas obtenidas en laboratorio RBS Desmontable</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 19 – Ruptura Material Base.....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 20 - Diagrama Esfuerzo vs Deformación. 5 RBS Desmontable - 3 RBS Convencional.....</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 21 - Diagrama Esfuerzo vs Deformación. 5 RBS Desmontable - 1 RBS Convencional.....</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 22 - Esquema representativo para evaluación de daños y escenarios.</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 23- Relación No. Probetas Vs Costos</i>	<i>43</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 - Parámetros principales y Factor de Forma Perfil W8X24</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 2 - Valores de Π Viga Acero</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3 - Opciones de geometría para modelos a escala en cartón paja.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 4 - Revisión fluencia y material base para el acero estructural</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 5 - Resumen indicadores de montaje, ensayo y rehabilitación</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 6 - Escenarios de Daño – Costos de Rehabilitación.....</i>	<i>42</i>

1. Resumen

Colombia (zona sísmica de alta vulnerabilidad) puede tener riesgos similares a los presentados en el terremoto de Kobe (1995) y Northridge (1994) los cuales dejaron daños a nivel estructural por el bajo uso de conexiones precalificadas, por ejemplo, el tipo de sección reducida (RBS por sus siglas en inglés) en edificaciones de estructura metálica. Resultados experimentales demuestran que a pesar de la reingeniería realizada donde se generan cortes con temperaturas elevadas muestran problemas a nivel microestructural lo cual afecta su resistencia, por tanto, a nivel sísmico se generar problemas por pandeo en el alma y la torsión lateral por la reducción de rigidez en las aletas del perfil. (Lignos et al., 2010).

El propósito del presente proyecto es analizar el comportamiento de una conexión adaptada tipo RBS (reduced beam section) o también llamadas “Hueso de Perro” a partir de una propuesta que cumpla con la normativa vigente y manuales de diseño, comparada con una RBS convencional con el fin de evaluar su comportamiento y costos asociados a la rehabilitación de estructuras. Para el diseño se tuvo en cuenta el cumplimiento de las normativas y manuales vigentes para el diseño en Colombia (NSR-10, AISC-358). Se elaboró la planimetría para los tipos de conexiones propuestas (W8x24 para los elementos tipo viga y W8x31 para los elementos tipo columnas). Posteriormente, se realizaron modelos y simulaciones en los programas Inventor y ANSYS, con lo cual se realizaron modelos a escala en cartón paja los cuales simularon la conexión previamente modelada y validada con el fin de poder obtener resultados hacia una aproximación física a lo obtenido en las etapas anteriores utilizando la teoría de Π -Buckingham. Por último, se establecieron escenarios de daño e indicadores de control con el fin de evaluar los costos asociados a la rehabilitación de estructuras con cada opción.

2. Planteamiento del problema, justificación del problema e hipótesis de investigación

El bajo uso de conexiones precalificadas, por ejemplo, el tipo de sección reducida (RBS por sus siglas en inglés) en edificaciones de estructura metálica en Colombia (zona sísmica de alta vulnerabilidad) puede tener riesgos similares a los presentados en el terremoto de Kobe (1995) y Northridge (1994) los cuales dejaron daños a nivel estructural y obligaron a una reingeniería de las conexiones de pórticos resistentes a momento en estructura metálica. Resultados experimentales demuestran que realizar cortes con temperaturas elevadas genera problemas a nivel microestructural lo cual afecta su resistencia, por tanto, a nivel sísmico se generan problemas por pandeo en el alma y torsión lateral por la reducción de rigidez en las aletas del perfil. (Lignos et al., 2010).

Según los resultados recopilados de pruebas realizadas a conexiones tipo “Hueso de Perro” (Uang et al., 2000), se demuestran los siguientes argumentos que desmienten los problemas por pandeo y torsión lateral en conexiones de viga con sección reducida. 1) Los resultados de los ensayos muestran un desempeño óptimo sin importar que no se cuenta con un arriostramiento lateral cerca de la sección reducida. 2) Los requerimientos de arriostramiento lateral establecidos en la norma AISC Seismic Provisions (AISC 341-10) son muy conservadores y 3) La placa de concreto que existe en la mayoría de los casos beneficia en gran parte para controlar el pandeo lateral torsional.

Como se menciona en (Chambers et al., 2003), luego de los terremotos mencionados previamente, una conexión convencional de junta de penetración completa, aletas soldadas y una red pernada se convirtió en una conexión inaceptable para su uso en áreas de alta sismicidad porque tal conexión no puede desarrollar suficiente ductilidad en la conexión viga columna antes de que se produzca la fractura.

De manera similar, el análisis realizado por (Sofias & Tzourmakliotou, 2018) evidencia que la incapacidad de los edificios de PRM (pórticos resistentes a momento por sus siglas y lo cual hace referencia a un pórtico espacial en cual todos sus miembros y nudos son resistentes a momento y son estables ante las solicitaciones de fuerzas horizontales) para funcionar al nivel de respuesta deseado durante los eventos Northridge (EE.UU.) y Kobe (Japón) se atribuye a un fallo temprano de las conexiones entre la viga y la columna. Las fallas inesperadamente graves que se produjeron en estas conexiones dieron lugar a la inhibición de las rotulas plásticas, dando lugar a una ductilidad y capacidad de absorción de energía limitadas de las conexiones y, por lo tanto, al bloqueo de la redistribución de los momentos flectores sobre los PRM. Adicionalmente, la RBS (por sus siglas en inglés, lo cual se logra mediante cortes en los patines del perfil de la viga para debilitarlos y generar la concentración de esfuerzos en una zona deseada) reduce la capacidad de momento de la viga a una distancia determinada de la cara de la columna que obliga a que ocurran grandes deformaciones en lugares más deseables que pueden soportar grandes deformaciones inelásticas y a la vez limita el desarrollo de esfuerzos en una zona menos dúctil al frente de la columna.

Ahora bien, (Chen & Tu, 2004) concluyen en sus estudios que las fallas frágiles de conexiones a momento indican que los materiales dúctiles no garantizan estructuras dúctiles, pero la geometría, tipo de carga y propiedades del material pueden afectar el comportamiento estructural. La solución conocida como método de sección reducida de viga, genera rotulas plásticas sobre la luz de la viga alejándolas de la unión con la columna, generando así reducciones en la concentración de esfuerzos en la conexión viga-columna.

Según afirman (Montuori & Sagarese, 2018), de acuerdo con la filosofía de diseño de las estructuras en una zona sísmica, las estructuras deben permanecer en un rango elástico durante los eventos sísmicos frecuentes, es decir, aquellos que tienen un período de retorno similar a la vida útil de la estructura. Por el contrario, en el caso de terremotos severos, es decir, aquellos con baja

probabilidad de ocurrencia, se aceptan los daños tanto de los elementos estructurales como de los no estructurales provenientes del desarrollo de mecanismos disipativos. Por lo tanto, sólo en el caso de los terremotos destructivos, se debe aprovechar la ductilidad disponible de la estructura para disipar la energía de entrada sísmica. Obviamente, la disipación debe involucrar sólo zonas particulares de la estructura, llamadas zonas disipativas, que deben ser elegidas y diseñadas adecuadamente.

Por otro lado, investigaciones realizadas afirman que es posible llevar a cabo un escalamiento de estructura metálica en cartón paja, en sistemas de vigas estáticamente determinadas, donde las leyes estáticas llegan como máximo a un 75% de representación de los esperados teóricos, se debe tener en cuenta que existen términos P que no presentan una sensibilidad relevante y otros que poseen nula sensibilidad para el desarrollo de una ley de escala por medio del teorema de II-Buckingham, de esa manera se puede evidenciar que variables físicas son de mayor relevancia. (Fuentes,2020).

Finalmente, como resultado de reducir la sección de la viga dentro de una zona sensible, se generan rotulas plásticas lejos de la cara de la columna, lo cual resulta en una reducción en la concentración de esfuerzos, sin embargo, estos cortes en la viga pueden generar que sea más propensa al pandeo y torsión lateral (Rahnavard et al., 2015).

Es importante aclarar que en el momento que las conexiones RBS se plastifiquen, es necesario desmontar la totalidad del elemento horizontal (viga), debido a la gran cantidad de daño acumulado. Esto incurre no solo en costos elevados (demoliciones, montaje y desmontaje, etc..), sino también en tiempos mayores para el desmonte de estos elementos horizontales.

Con base en los estudios previos se plantea el interrogante: ¿Qué variaciones se pueden presentar en el comportamiento de una conexión "hueso de perro" adaptada para desmontar,

comparado con el comportamiento sismorresistente de una conexión convencional? El planteamiento del análisis numérico busca apoyar un análisis de capacidad entre una conexión "hueso de perro" desmontable versus una conexión convencional, donde se busca una similitud en comportamiento a nivel estructural en la sección de la viga.

3. **Palabras clave**

- *Viga con Sección Reducida -RBS (Reduced Beam Section)*
- *Hueso de Perro – Dog Bone*
- *Rotulas Plásticas- Plastic Hinges*
- *Disipación de Energía – Energy Dissipation*
- *Conexiones Pre Calificadas- Prequalified Connections*
- *Conexiones a Momento – Moment Connections*
- *Estructura Metálica - Steel Structure*
- *Costos Asociados - Associated Costs*
- *Control de recursos – Resource Management*
- *Pórticos Resistentes a Momento- Moment Resistant Frames*
- *Ley de Escala – Scaling Law*
- *Teorema de II Buckingham – II Buckingham Theorem*

4. **Objetivos**

Objetivo General:

Evaluar el comportamiento mecánico y costos de montaje de una conexión desmontable versus una convencional de sección reducida, propuesta para pórticos en acero resistentes a momento: “Hueso de Perro”.

Objetivos Específicos:

- Proponer una conexión desmontable de sección reducida tipo “Hueso de Perro” cumpliendo con lo establecido en la normativa vigente para conexiones precalificadas (AISC 358, 2016).
- Simular la conexión desmontable de sección reducida por medio de un modelo matemático de elementos finitos como base para las solicitaciones de diseño en pórticos resistentes a momento.
- Validar el comportamiento estructural de la conexión propuesta sometida a un momento a través de modelos a escala en cartón paja ensayados en laboratorio.
- Evaluar los costos de montaje por medio de indicadores de gestión establecidos, para la conexión propuesta versus la conexión precalificada estándar de sección reducida.

5. **Marcos de Referencia**

Marco de Antecedentes

Diferentes investigadores han desarrollado estudios en los últimos años sobre las conexiones en estructuras de acero. Para el presente trabajo de grado se recopilaron los aportes más relevantes

divididos en las dos últimas décadas, en la década del año 2000 a 2010 se lograron aportes que permiten realizar un análisis estadístico para la inestabilidad de las conexiones RBS (Uan, Fan. 2001.) y estudios donde las conexiones viga columnas son propensas a la falla por pequeñas derivas debido a la susceptibilidad a la fractura en la conexión patín-columna. (Chen, Tu. 2004).

Posteriormente en el periodo 2011 a 2020, las investigaciones realizadas obtuvieron como resultados aportes que se tuvieron en cuenta para el presente trabajo de grado, donde el desarrollo de modelos computacionales permitió observar aproximaciones del comportamiento de una estructura sometida a cargas sísmicas, y a cargas que no se consideraron inicialmente en el diseño (Nuñez F et al, 2019). De igual manera, la demostración donde es posible llevar a cabo un escalamiento de estructura de acero en cartón paja, llegando como máximo a un 75 % de precisión de replicabilidad de respuesta (Fuentes, J. 2020) permitió establecer los parámetros para el desarrollo de los ensayos aproximados en laboratorio, teniendo en cuenta que los modelos de cartón paja fallaban de manera similar al acero sometido bien a flexión, compresión o tensión en elementos pernados (Nuñez F. et al, 2016). A continuación, se presenta un resumen de los aportes más relevantes en las investigaciones recopiladas para los periodos de tiempo mencionados previamente.

Año	Autores	Título	APORTES
2004	Sheng-Jin Chen Chin-Te Tu	Experimental Study of Jumbo Size Reduced Beam Section Connections Using High-Strength Steel	Las conexiones viga columnas son propensas a la falla por pequeñas derivas debido a la susceptibilidad a la fractura en la conexión patín-columna.
2011	Yongjiu Shi Meng Wang Yuanqing Wang	Analysis of Seismic Behaviour of Welded Steel Connections and Frames with Differently Constructed Connections	Muestra el comportamiento sísmico de diferentes conexiones a momento. Muestra los diferentes mecanismos de falla de las conexiones a momento. Muestra como es la disipación de energía en las diferentes conexiones a momento
2010	Dimitrios G. Lignos Dimitrios Kolios Eduardo Miranda	Fragility Assessment of Reduced Beam Section Moment Connections	Se proponen funciones de fragilidad para estimar los daños en las conexiones de RBS a columnas
2003	Janice J. Chambers Shaheed Almudhafar Frank Stenger	Effect of Reduced Beam Section Frame Elements on Stiffness of Moment Frames	Efectos de las conexiones de sección reducida en cuanto a rigidez en los pórticos resistentes a momento.
2018	Christos E. Sofias Dimitra C. Tzourmakliotou	Reduced Beam Section (RBS) Moment Connections-Analytical	Se realizan diferentes modelos experimentales y de EF en los cuales se observan buenos resultados y comportamientos estructurales óptimos.

		Investigation Using Finite Element Method	
2018	R. Montuori V. Sagarese	The use of steel RBS to increase ductility of wooden beams	El mismo comportamiento de una RBS en un pórtico metálico se pudo observar en un pórtico de madera, se logró llevar al rango plástico la RBS mientras los demás elementos del pórtico se mantenían en el rango elástico.
2001	Chia-Ming Uang Chao-Chin Fan	Cyclic stability criteria for steel moment connections with reduced beam section	Datos recopilados de varios ensayos permiten realizar un análisis estadístico para la inestabilidad de las conexiones RBS
2014	Swati Ajay Kulkarni & Gaurang Vesmawala	Study of steel moment connection with and without reduced beam section	Se realizan ensayos del uso de RBS versus la ausencia de este, donde los resultados muestran fracturas en la soldadura cuando hay ausencia de RBS
2017	(Morshedi, Mohamad A. Dolatshahi, Kiarash M. Maleki, Shervin)	Double reduced beam section connection	Se encuentran resultados de la redistribución de los esfuerzos en ambos extremos de la viga, los cuales aumentan la ductilidad de la sección
2019	(Mohsen Ghaderi, Mohsen Gerami, Reza Vahdani)	A comparison of seismic low cycle fatigue and extremely low cycle fatigue on steel moment frames with reduced beam section connection (RBS)	Se muestran los efectos generados en las conexiones por fatiga luego de cargas cíclicas bajas y extremos, relacionados con los efectos generados en sismos reales
2020	Fuentes Paez Javier Alfonso	Aplicación del teorema de π buckingham en la calibración de modelos físicos a escala, de comportamientos elásticos en componentes aislados de estructura metálica	Se demostró que si es posible llevar a cabo un escalamiento de estructura metálica en cartón paja, llegando como máximo a un 75 % de precisión de replicabilidad de respuesta.
2019	O. Contreras, F. Núñez	Análisis del estado de la estructura de un paradero de buses sometido a cargas ejercidas por un techo verde, caso de estudio: Bogotá, Colombia	El desarrollo de modelos computacionales permite observar aproximaciones del comportamiento de una estructura sometida a cargas sísmicas, y cargas que no se consideraron inicialmente en el diseño
2016	González Rincón Maria Camila, Mariño Salamanca Mauricio Alexander, Hurtado Tinoco Jeisson Dubier y	Modelación de Fenómenos Elásticos e Inelásticos en Miembros de Acero, sin Acero.	Simulación acertada de los fenómenos elásticos, inelásticos y avances de cabezas de fractura comparando los resultados con ensayos hechos en elementos a escala real en diferentes universidades del mundo, especialmente los resultados en platinas de unión reportados por (Bjorhovde & Hardash, 1984).

	Núñez Moreno Federico Alejandro.		Se logró al observar la manera en la que los modelos de cartón paja fallaban de manera similar al acero sometido bien a flexión, compresión o tensión en elementos pernados.
--	-------------------------------------	--	--

Marco Teórico

Las conexiones de sección reducida o RBS (reduced beam section) se empezaron a implementar luego de los Sismos de Kobe y Northridge ya que se observaron fallas frágiles y súbitas de las conexiones viga-columna de los pórticos.

En estos tipos de conexiones, porciones de las aletas de la viga son recortadas en la zona adyacente a la conexión viga-columna para debilitar esa zona y permitir la creación de rótulas plásticas, las cuales son zonas de disipación de energía que concentran y alejan los esfuerzos de la cara de la columna. Esto permite deformaciones y rotaciones inelásticas de esa sección mientras que la columna y la otra parte de la sección de la viga siguen trabajando en el rango elástico, permitiendo así que la falla que se produzca sea del tipo dúctil y no frágil como se observó en los sismos de Kobe y Northridge. Por lo tanto, se debe cumplir con los criterios establecidos en las ilustraciones 1 y 2:

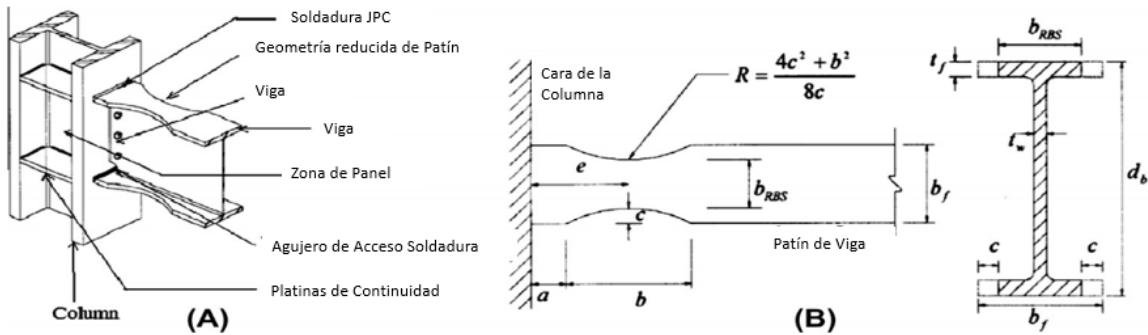


Fig. 1. (A) Detalle Conexión RBS (B) Detalles Típicos Geometría RBS

Ilustración 1 - Criterios de Diseño para Conexiones RBS

Fuente: Swati & Gaurang, 2014

Para definir la geometría de la sección de la viga, columna y la conexión de sección reducida se debe cumplir con los siguientes criterios en la zona de reducción de la sección transversal:

$$0.5b_{bf} \leq a \leq 0.75b_{bf}$$

$$0.65d \leq b \leq 0.85d$$

$$0.1b_{bf} \leq c \leq 0.25b_{bf}$$

donde,

a: distancia horizontal desde la cara de la columna hasta el inicio de la sección reducida (mm).

b: longitud del corte de la sección reducida (mm).

bbf: ancho del patín de la viga (mm).

c: profundidad de corte en el centro de la sección reducida (mm).

d: profundidad de la viga (mm).

Para el diseño básico de Conexiones Precalificadas se deben verificar y calcular los siguientes criterios:

- Cálculo del momento plástico probable en las rotulas plásticas “Mpr”
- Ubicación de rotulas plásticas “Sh”
- Cálculo de la fuerza cortante probable en rotulas plásticas “Vp”
- Determinar la demanda de resistencia de cada sección crítica “Mf”
- Cálculo del momento resistente nominal de la columna proyectado a los ejes de la intersección Viga-Columna.

A continuación, se presentan algunos ejemplos de fallas en conexiones tipo RBS, donde se evidencia el daño que se presentan en estos elementos, debido a la acción de cargas altas simulando acciones sísmicas reales en el laboratorio. En la ilustración 3 se observa el pandeo en la zona de compresión, mientras que en la ilustración 4, se puede observar la unión de una viga columna atiesada generando un panel resistente.

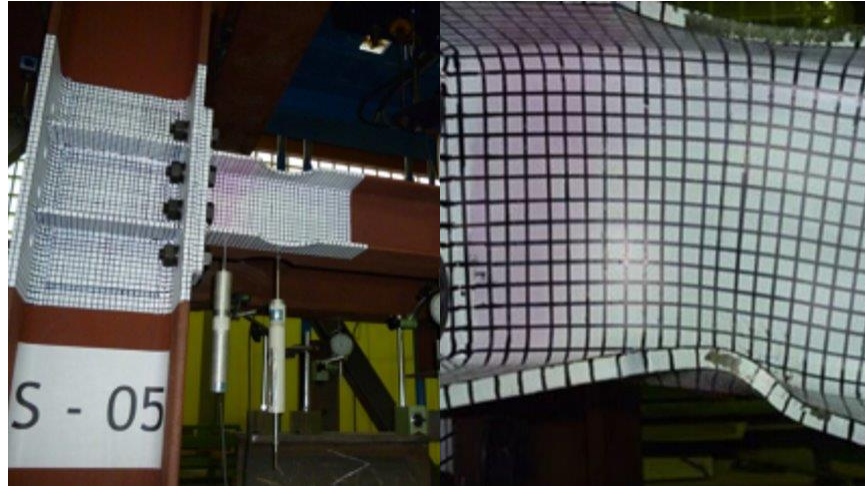


Ilustración 2 - Montaje en Laboratorio a escala Real. Conexión RBS Convencional

Fuente: Sofias, C. E., & Pachoumis, D. T. (2020).



Ilustración 3 - Fallas presentadas en elementos tipo RBS

Fuente: Lee, C. H., & Jeon, S. W. (2004).

Marco Conceptual

A continuación, se definen algunos conceptos claves para entender la investigación.

- Rotulas plásticas: Zona de disipación de energía la cual se genera después de que el elemento supera su rango elástico.
- Fallas dúctiles: Fallas que se presentan por medio de deformaciones plásticas las cuales pueden ser apreciadas durante la aplicación de esfuerzos que superan el rango elástico.

- Fallas frágiles: Fallas que se presentan sin mostrar grandes deformaciones elásticas, se caracterizan por ser fallas que ocurren de manera súbita
- Fusibles desmontables: Elemento que ayuda a incrementar la posibilidad de predecir el comportamiento de los edificios con el fin de disipar energía durante un sismo. Tiene como propósito que los elementos permanezcan dúctiles.
- Conexiones Precalificadas: Son conexiones que han sido verificadas y validadas en forma experimental, en ensayos previos que se encuentran debidamente documentados.
- Ley de escala: Son leyes que se rigen por medio de teorías matemáticas las cuales simplifican modelos de escala real a un modelo de escala más pequeño en el cual es posible obtener mismos comportamientos o comportamientos aproximados.
- Teorema de Π Buckingham: Establece que dada una relación física expresable mediante una ecuación en la que están involucradas n magnitudes físicas o variables, y si dichas variables se expresan en términos de k cantidades pertenecientes a las magnitudes fundamentales, longitud, masa, tiempo, entonces la ecuación original puede escribirse equivalentemente como una ecuación con una serie de $n - k$ números adimensionales contruidos con las variables originales.

Marco Normativo

La norma AISC 360-16 “Especificaciones para Edificios en Acero Estructural” establece criterios para diseño, fabricación y el montaje de edificios de acero estructural y otras estructuras, donde otras estructuras se definen como aquellas estructuras diseñadas, fabricadas y montadas de manera similar a los edificios, de esta manera, sus elementos resistentes a cargas verticales y

horizontales son similares a los sistemas resistentes de los edificios. Este estándar permitió definir los elementos básicos de diseño, para acciones tales como la resistencia de las soldaduras.

La norma AISC 358-16 “Conexiones precalificadas para pórticos especiales e intermedios metálicos de momento para aplicaciones sísmicas” especifica el diseño, detallado, fabricación y criterios de calidad para conexiones que son precalificadas según la AISC 341-16 “Provisiones Sísmicas para Edificios de Acero Estructural”. Todas las conexiones contenidas dentro de esta norma son precalificadas para cumplir con los requerimientos con la norma AISC Provisiones Sísmicas para Edificios de Acero Estructural, únicamente cuando son diseñadas y construidas bajo los requerimientos de la norma AISC 358-16. Todas las ecuaciones y relaciones mecánicas necesarias para entender y predimensionar la RBS convencional, se encuentran en este documento.

La norma AISC 341-16 “Provisiones Sísmicas para Edificios de Acero Estructural” gobierna el diseño, fabricación y montaje de elementos en acero estructural y conexiones en los pórticos resistentes a momento, juntas y bases de columnas en pórticos a gravedad de edificios y otras estructuras con pórticos a momento.

La normativa colombiana de Construcción Sismo Resistente del año 2010, NSR-10, tiene como objetivo principal el diseño, construcción y supervisión técnica de edificaciones en todo el territorio de la República de Colombia. La normativa vigente para el diseño de estructuras metálicas en Colombia se puede observar en el título F de la NSR-10, la cual es aplicable al diseño de estructuras conformadas por elementos de acero o de aluminio, soldados, atornillados o remachados. (NSR,2010). En el capítulo F.2, se adoptan las especificaciones del AISC 360-10 y en el capítulo F.3, se adoptan las provisiones sísmicas del AISC 341-10.

El FEMA-350 “Criterios Recomendados para el Diseño Sísmico de Nuevos Edificios con Pórticos en Acero Estructural”.

El FEMA-352 “Criterios Recomendados para Reparación y Evaluación para Edificaciones con Pórticos Soldados Resistentes a Momento después de un Sismo”.

El FEMA-353” Especificaciones Recomendadas y Aseguramiento de los Lineamiento de Calidad de Construcciones con Pórticos Resistentes a Momento para aplicaciones Sísmicas”.

El FEMA-354 “Guía de Políticas para la Construcción de Pórticos Resistentes a Momento en Acero”.

La Ley 842 de 2003 en uno de sus capítulos contiene el Código de Ética Profesional en el cual se regula y sanciona el ejercicio de la Ingeniería en general y sus profesiones afines y auxiliares.

La importancia de la normativa mencionada previamente radica en los criterios que rigen el diseño a nivel internacional para pórticos resistentes a momento. Lo anterior, garantizando el correcto desempeño de las estructuras y por ende la seguridad de las personas que habiten la estructura durante la vida útil de las mismas.

6. Metodología

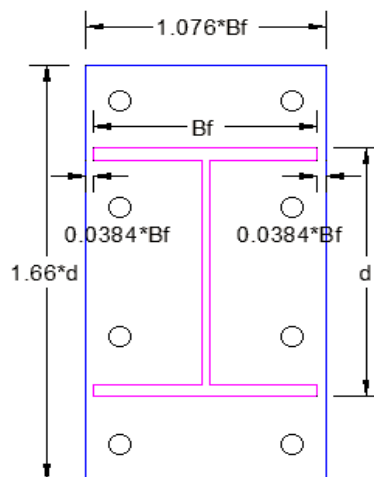
El desarrollo experimental y matemático, con base en elementos mecánicos del comportamiento estructural del acero para una conexión novedosa a momento, seguirá la metodología presentada a continuación dividida por etapas. El resumen de la metodología se encuentra en la Tabla No 2.

ETAPA 1

Para la primera etapa de la investigación se propone plantear la geometría de una conexión desmontable de sección reducida cumpliendo con los criterios de diseño establecidos en la AISC 358:

1. Cálculo del momento plástico probable en las rotulas plásticas “M_{pr}”
2. Ubicación de rotulas plásticas “Sh”
3. Cálculo de la fuerza cortante probable en rotulas plásticas “V_p”
4. Determinar la demanda de resistencia de cada sección crítica “M_f”
5. Cálculo del momento resistente nominal de la columna proyectado a los ejes de la intersección Viga-Columna.

Teniendo los parámetros verificados para la conexión desmontable se puede realizar el diseño de las conexiones de la RBS a la columna y de la RBS a la viga. Con el fin de generar una conexión a momento en la conexión RBS a la columna, se va a realizar una conexión mediante una placa de unión tipo “Endplate” la cual va soldada a la RBS y pernada a la columna. Dejando la geometría de la placa de unión en función de los parámetros “B_f” y “d” de la viga se pudo definir los valores y geometría de la placa de unión. Esta conexión va a contar con 8 pernos de diámetro 5/8”, siguiendo la geometría parametrizada a continuación;



DETALLE CONEXION
COLUMNA-RBS

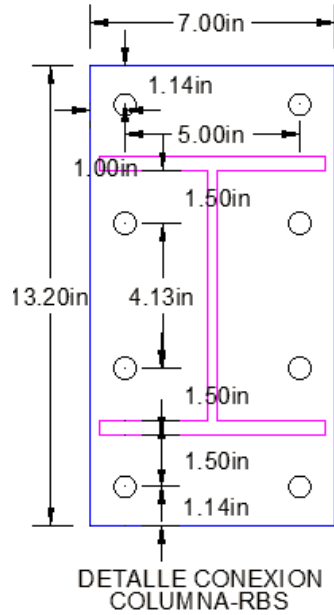
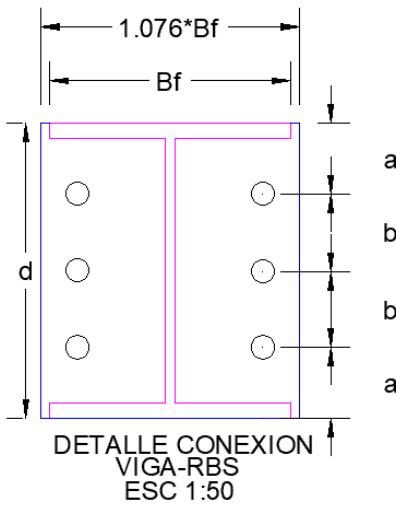


Ilustración 4 - Detalle Conexión RBS-Columna

Fuente: Propia

Para la conexión RBS-Viga se propone el uso de placas de unión tipo “Endplate” las cuales van soldadas al extremo de la RBS y la viga, estos dos elementos se unen por medio de 3 pernos A325 de 5/8”, los cuales ayudan a transmitir el momento. Todos los elementos descritos previamente deben cumplir con las diferentes solicitaciones teóricas por la cuales se van a ver afectados.



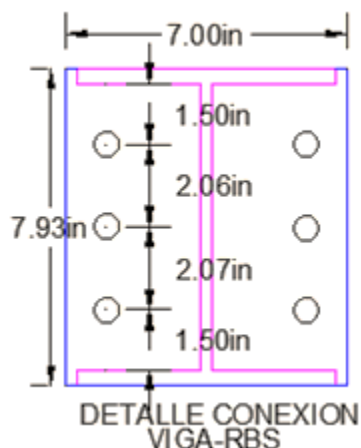


Ilustración 5 - Detalle Conexión Viga-RBS

Fuente: Propia

Finalmente, para esta etapa se considerarán satisfactorios los resultados obtenidos después de planteadas las geometrías de la RBS, viga y columna que cumplen con las condiciones de diseño planteadas inicialmente, bajo la normativa establecida como guía para el diseño y verificación de elementos en acero estructural (AISC 358 y 341).

Esta etapa se puede considerar como un método inductivo, en razón a que establece un principio de diseño que rige todas las conexiones diseñadas y aplica a todos los casos que comparten esas mismas características, mediante una geometría paramétrica.

ETAPA 2

Para la segunda etapa del proyecto de investigación se va a modelar en el programa “Inventor” la conexión propuesta en la etapa 1, así como la conexión convencional. Se empleará utilizando guías de manejo de software para poder modelar una situación previamente definida (cargas, materiales, dimensiones), con el fin de analizar la concentración de esfuerzos de la conexión propuesta y de la conexión convencional. Luego, se procederá a importar el modelo de inventor en el programa ANSYS con el cual se busca simular la acción mecánica de los elementos que componen

las partes de la conexión. Los resultados obtenidos serían preliminares en caso de que estas sean sometidas a solicitudes de diseño.

De manera similar a la etapa 1, se puede considerar un método inductivo. Al tratarse de una modelación en un software donde las condiciones iniciales no varían entre modelos, los resultados para todos los casos son iguales, pues establecen modelos para cada una de las conexiones (convencional y desmontable) el cual representa todas las conexiones diseñadas y aplica a todos los casos que comparten esas mismas características.

ETAPA 3

En la tercera etapa del proyecto de investigación se validó el comportamiento estructural. Tanto, la conexión propuesta como la convencional fueron ensayadas en modelos a escala elaborados en cartón paja en laboratorio según la geometría y cargas, propuestas previamente.

Se utilizó cartón paja como material principal para los modelos a escala teniendo en cuenta los resultados de investigaciones previas (González et al 2016)(Contreras et al 2019) y (Fuentes, J. 2020). Se evidenció que el comportamiento mecánico y fallas en cartón paja presentan un comportamiento al de las estructuras metálicas representando los resultados hasta con un 75% de similitud.

Para poder producir los modelos a escala en cartón paja fue necesario aplicar el teorema de Π -Buckingham, con el fin de obtener unos modelos que fueran precisos y poder simular las condiciones iniciales propuestas.

El teorema de Π -Buckingham busca analizar los modelos que están formulados bajo una función matemática dependiente de variables dimensionales y expresar una solución adimensional de dicha función, en términos de las mismas variables. (Fuentes, J. 2020). Conociendo los diferentes valores para cada uno de los Π y un factor de forma en el elemento que depende de su geometría, se

debe proponer una geometría que genere valores Π y factores de forma iguales a los del modelo a escala. Utilizando la relación de aspecto, se procede a escalar cada una de las medidas originales para obtener las nuevas medidas escaladas y así poder fabricar el modelo en cartón paja.

Se realizaron 14 montajes en total, 10 de la conexión propuesta y 4 montajes de la conexión convencional, ambos montajes fueron sometidos a fuerzas puntuales simuladas en la maquina INSTRON 5900 ubicada en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, la cual es capaz de aplicar hasta 10 kN de carga.

Después de ensayados los montajes de ambas conexiones y recopilados los resultados, se logró verificar y comparar los resultados obtenidos en la etapa dos con los de la fase experimental. Estos resultados fueron procesados, cuantificados y graficados para obtener conclusiones con respecto a la hipótesis planteada.

Esta etapa se puede validar usando un método deductivo donde se toma un principio general (resultados de diseño, modelación de etapa uno y etapa dos) y se prueba en casos generales (diferentes probetas propuestas para ensayar en el laboratorio) para reforzar, corregir o rechazar los resultados obtenidos en las etapas anteriores.

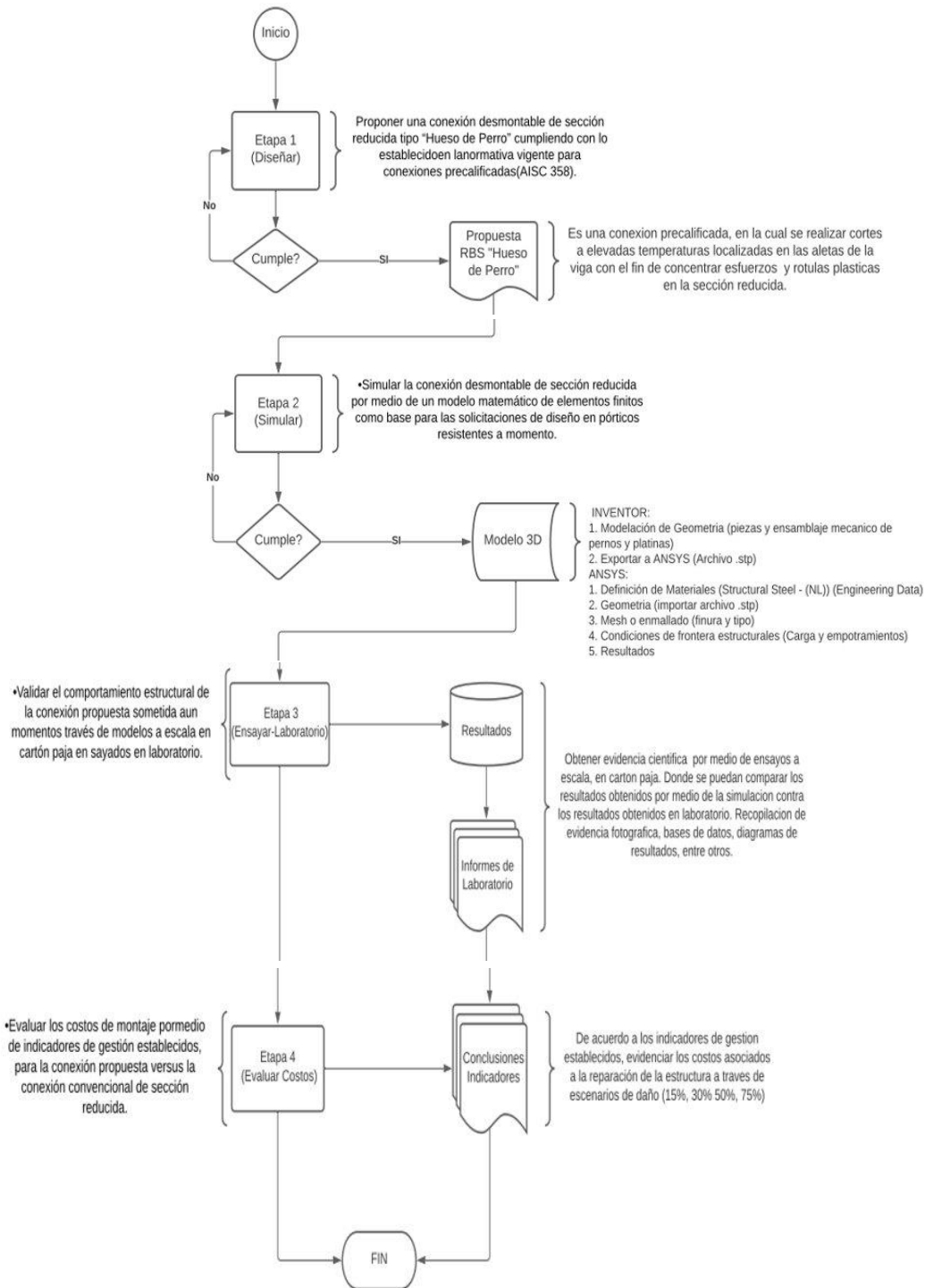
ETAPA 4

Como etapa final del trabajo de grado, se presenta la evaluación de costos de montaje por medio de indicadores de gestión establecidos para control durante la ejecución de los ensayos e indicadores asociados a los escenarios de daño planteados, para un edificio de control.

Teniendo en cuenta lo anterior, se establece como parámetro inicial un edificio de 10 pisos de geometría cuadrada, es decir 8 conexiones RBS por piso, con un costo de \$ 483.648 y \$ 442.584 para probeta desmontables y probetas convencionales respectivamente. Adicionalmente, se plantean

escenarios de daño para el 15, 30, 50 y 75% con el fin de evaluar los costos asociados a la rehabilitación de la estructura.

Diagrama de Flujo de las Etapas:



7. Resultados y Discusión

ETAPA 1

Para definir los valores óptimos de los parámetros “a”, “b” y “c” de la geometría de la RBS que cumplen los requerimientos a cortante y momento de la conexión, fue necesario realizar un análisis de sensibilidad, en los parámetros “a”, “b” y “c”

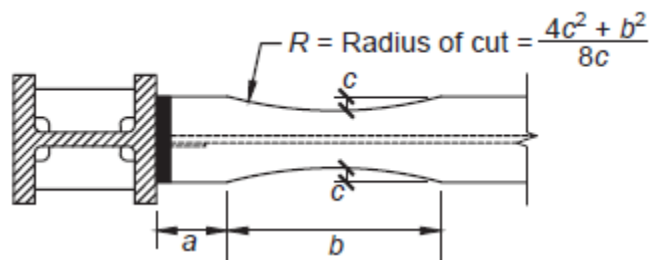


Ilustración 6 - Esquema RBS

Fuente: AISC 358-16

El análisis de sensibilidad constaba en verificar para diferentes tipos de proyectos similares, pero con variación en la luz de la viga principal (5,6,7,8,9 y 10 m) la manera en que se afecta el M_f o momento probable en la cara de la columna cuando se varía el parámetro “a” dejando constante los parámetros b y c; luego se repite lo mismo, pero para el parámetro b, fijando a y c, por último, variando c, fijando a y b.

Para las diferentes longitudes se obtuvieron los siguientes comportamientos en el momento probable disponible, verificando que los valores de los parámetros se encontraran entre los límites definidos en las ecuaciones previamente mencionadas de la AISC 358-16:

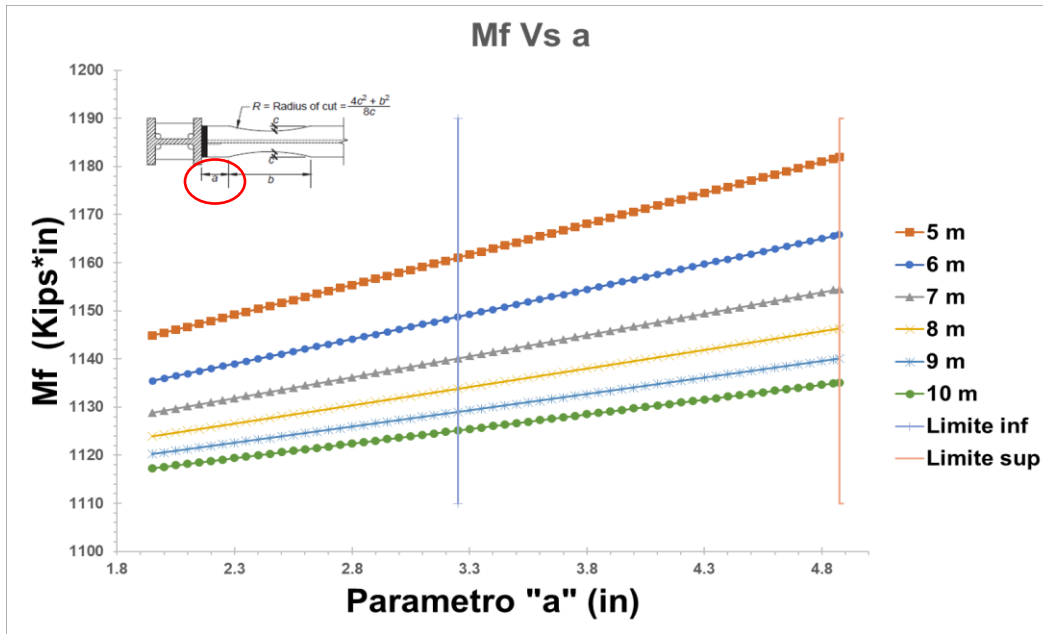


Ilustración 7 - Influencia del parámetro "a" en el Mf

Fuente: Propia

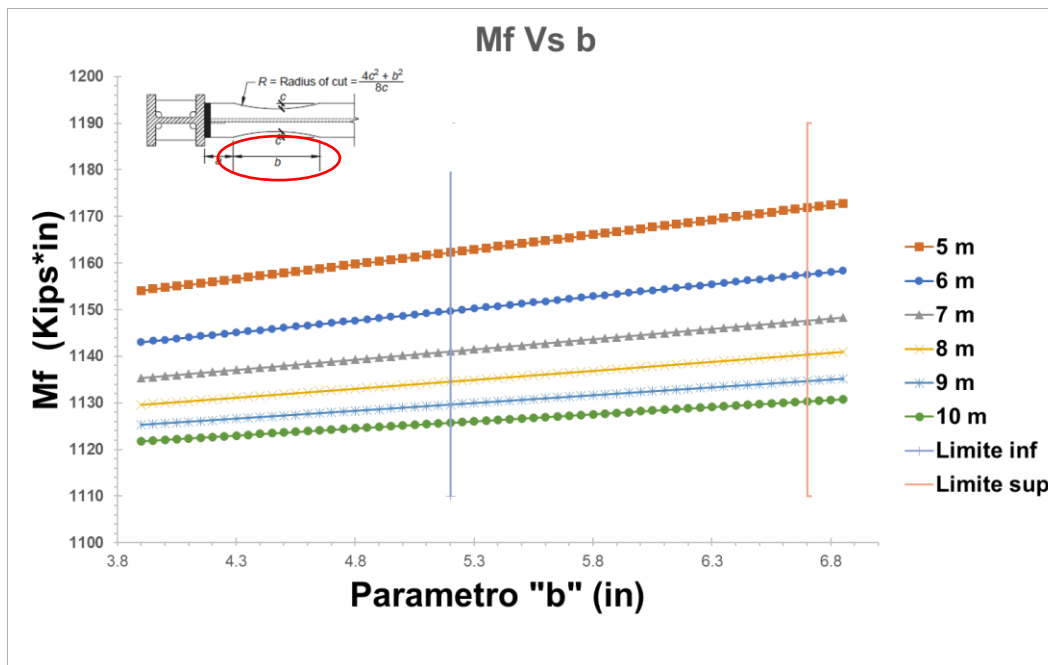


Ilustración 8 - Influencia del parámetro "b" en el Mf

Fuente: Propia

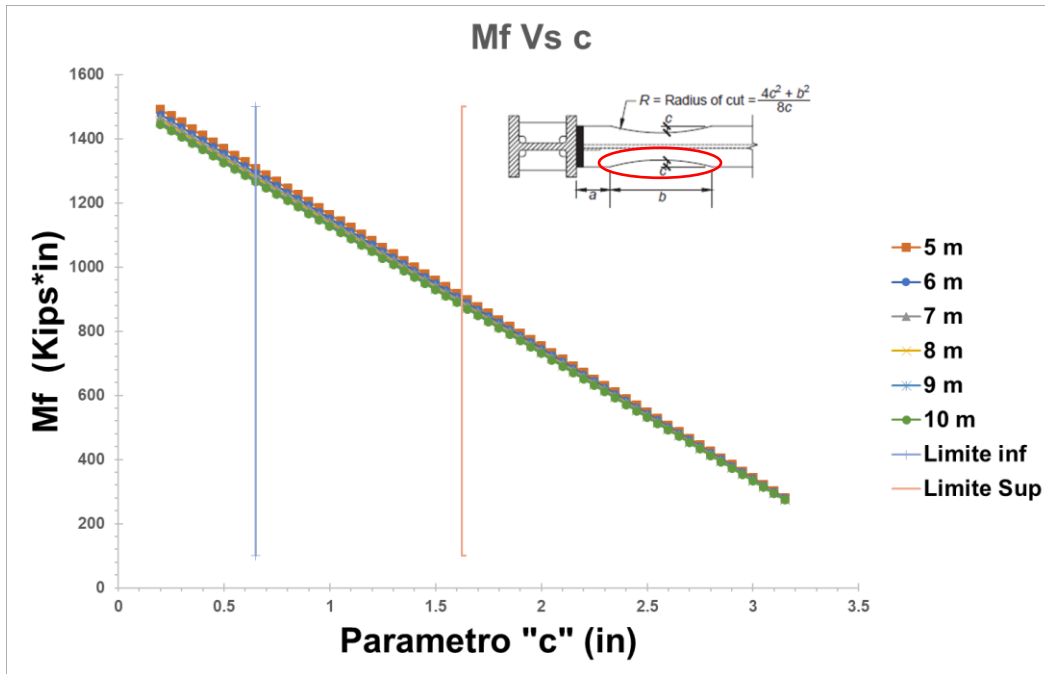


Ilustración 9 - Influencia del parámetro "c" en el Mf

Fuente: Propia

Con la información simulada, para las variables principales de la conexión se procedió a variar los valores de a, b y c de forma que se obtuviera el momento máximo probable en la columna, de tal manera que fuera menor que el momento plástico de la viga. Los valores que cumplieron con el objetivo propuesto fueron los siguientes:

a=	3.9
b=	6
c=	0.65

Ilustración 10 - Parámetros Geométricos RBS en pulgadas (in)

Fuente: Propia

Terminada la etapa de prediseño y geometrías de la RBS se procedió a realizar planos en AutoCAD para luego poder construir el modelo 3D de una manera detallada en Inventor y posteriormente utilizar ese modelo 3D y exportarlo a ANSYS.

ETAPA 2

Una vez definida la sección geométrica de la conexión RBS se procedió a realizar la simulación de la zona de interés en el programa Inventor de Autodesk, en cual se ilustran a detalle las conexiones entre la viga de sección reducida (RBS) y la Columna de perfil W8X31. De igual manera, se realizó el montaje de la conexión de viga de sección reducida (RBS) y la viga de perfil W8x24. Se utilizaron estos perfiles ya que son los más comerciales y por tal motivo más fáciles de conseguir en Colombia.

A continuación, se evidencian las ilustraciones obtenidas en el software del ensamblaje presentado (Ver ilustración 12), el cual posteriormente se exportó al software ANSYS para realizar la correspondiente simulación del montaje experimental en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana.



Ilustración 11 - Ensamble RBS de sección reducida. Autodesk – Inventor.

Fuente: Propia

Para los parámetros de simulación, el programa ANSYS tuvo en cuenta el criterio de falla para estimar los esfuerzos, correspondiente al criterio de Von Mises (Esfuerzos Tridimensionales y máxima energía de distorsión) el cual es un indicador de qué tan dúctil es un elemento durante su diseño. De igual manera, se definió la interacción Platina – Perno con un coeficiente de fricción de Arandela-Tensada-Pernada (obtenido de la AISC 360) el cual permite que en la matriz de rigidez de los elementos únicamente se tengan esfuerzos de compresión. Por último, el software contempló para el cálculo de esfuerzos del modelo propuesto, la ley de esfuerzos planos y no deformación plana por los bajos espesores que presentan los perfiles de estructura metálica utilizados.

Cabe resaltar que los modelos constitutivos que contempla el programa corresponden a elasticidad en acero para los pernos y arandelas, mientras para el resto de la estructura (elementos horizontales, verticales y rigidizadores) un modelo de acero tipo A50 no lineal con endurecimiento. Así mismo, se estableció para la modelación los elementos finitos el uso de elementos TET10, o tetraedros de 10 nodos, lo cuales al tener más nodos pueden obtener mayor información y adicionalmente no son tan rígidos, permitiendo deformaciones más detalladas, recopilación de datos, cálculo de esfuerzos en 3D, además con un mayor nivel de exactitud. Adicionalmente se usaron elementos finitos HEX20, o hexaedros de 20 nodos en los cuales se permite un mayor nivel de análisis; pero como desventaja, requiere más recursos computacionales para realizar el análisis. (Ver ilustración 13.) Estos elementos tipo HEX20 fueron usados en los elementos del tipo pernos y tuercas.

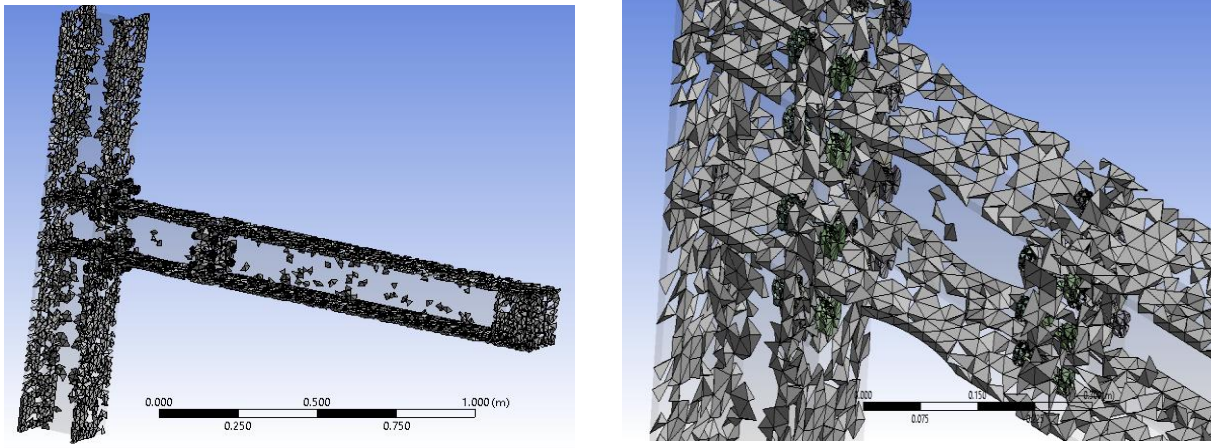


Ilustración 12 - Modelación Software ANSYS. Elementos Finitos TET10.

Fuente: Propia

Posteriormente, se realizó la definición del enmallado, teniendo en cuenta que al ser del tipo triangular se logró obtener la figura geométrica más básica y por ende una recopilación de datos mayor al asignar una finura del 0.025m. Finalmente, para la simulación de las cargas se establecieron diferentes condiciones de frontera, donde se estableció en los extremos de la columna empotramientos y que su aplicación de fuerza puntual en el extremo de la viga correspondía a 85 kN.

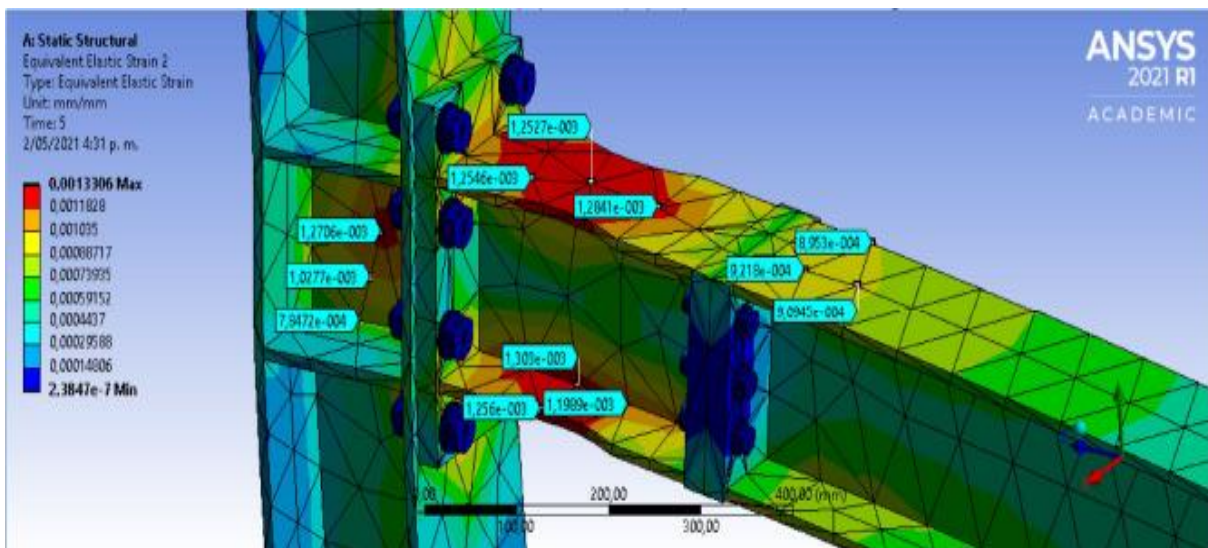


Ilustración 13 - Resultados, simulación ANSYS. RBS Desmontable

Fuente: Propia

Como se puede observar en la ilustración 14, una vez realizada la simulación en el software ANSYS, aplicadas las cargas y definidas las condiciones de frontera, se obtuvieron los resultados de las zonas de concentración de esfuerzos y deformación unitaria en las regiones de mayor debilidad, por ende, más propensas a la plastificación. Validando las zonas de mayor concentración esperada, se evidenciaron zonas rojas, sugiriendo la localización de las fallas en las aletas de las probetas y evitando afectaciones en los demás elementos del montaje.

ETAPA 3

En el año 2020 Fuentes llevo a cabo una serie de experimentos para calcular los diferentes valores adimensionales (Π) para una viga en voladizo sometida a una carga puntual en su extremo, encontrando así las diferentes ecuaciones para obtener los valores Π como se observa en la ilustración 15.


Tipo de Viga	Deflexion Maxima	# de factores π	π_1	π_2	π_3
	$\Delta_m = \frac{PL^3}{3EI}$	3	$\pi_1 = \sqrt{\frac{E}{P}} * \Delta_m$	$\pi_2 = \sqrt{\frac{E}{P}} * L$	$\pi_3 = \left(\frac{E}{P}\right)^2 * I$

Ilustración 14 - Valores de Π para Viga en voladizo con carga en el extremo.

Fuente: (Fuentes, J. 2020)

Donde,

E= Modulo de elasticidad del Acero.

P= Carga puntual a la cual va a estar sometida la viga.

L= Longitud total de la viga.

I= Inercia de la viga.

Δm = Deflexión máxima esperada en el punto más alejado del empotramiento.

Conociendo los valores de carga en el voladizo, longitud, módulo de elasticidad e inercia del perfil y con la sección geometría del perfil W8X24 se procedió a hallar el factor de forma de dicha sección (Tabla 1).

P	84732	N
L	1582.42	mm
E	200000	N/mm ²
I	34422340	mm ⁴
Δm	30.952	mm
d (in)	7.93	
bf (in)	6.5	
d/bf	1.22	

Tabla 1 - Parámetros principales y Factor de Forma Perfil W8X24

Se obtuvieron los siguientes valores de Π (Tabla 2);

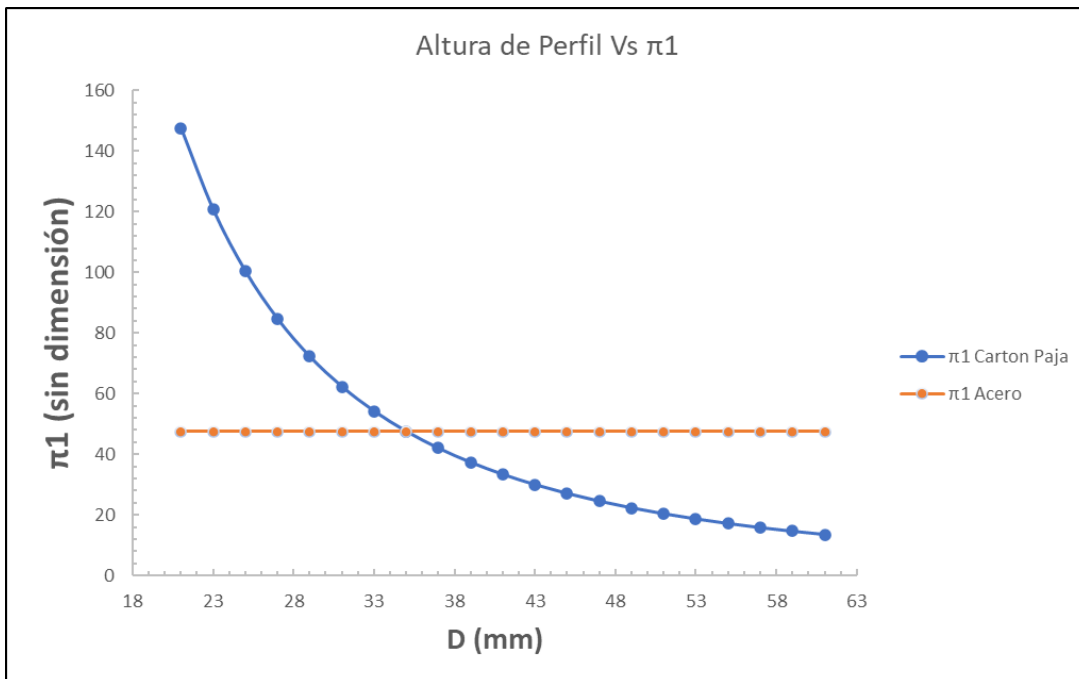
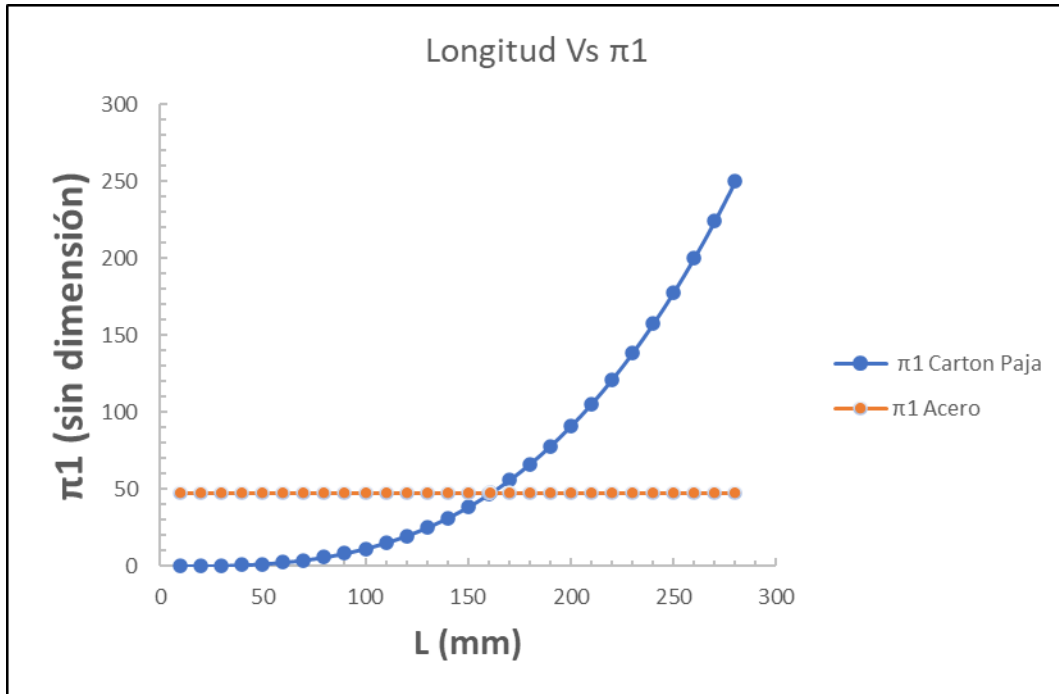
$\pi 1$	47.55
$\pi 2$	2431.157
$\pi 3$	1.92E+08

Tabla 2 - Valores de Π Viga Acero (adimensionales)

Para el alcance de este trabajo el valor de Π que se debe igualar en el modelo a escala es el del $\Pi 1$ ya que este es el que relaciona la deflexión de la viga en voladizo, en su punto mas alejado del empotramiento.

Con el fin de definir los valores óptimos de Longitud (L), Altura total de la sección (D) y ancho de aletas (Bf) que posteriormente se utilizarían para encontrar el valor de $\Pi 1$ y el factor de

forma, fue necesario realizar varios escenarios en los cuales se variaban cada uno de los parámetros y se registraba la variación de valor de Π_1 . Esto quedó registrado en la ilustración 16 como se observa a continuación.



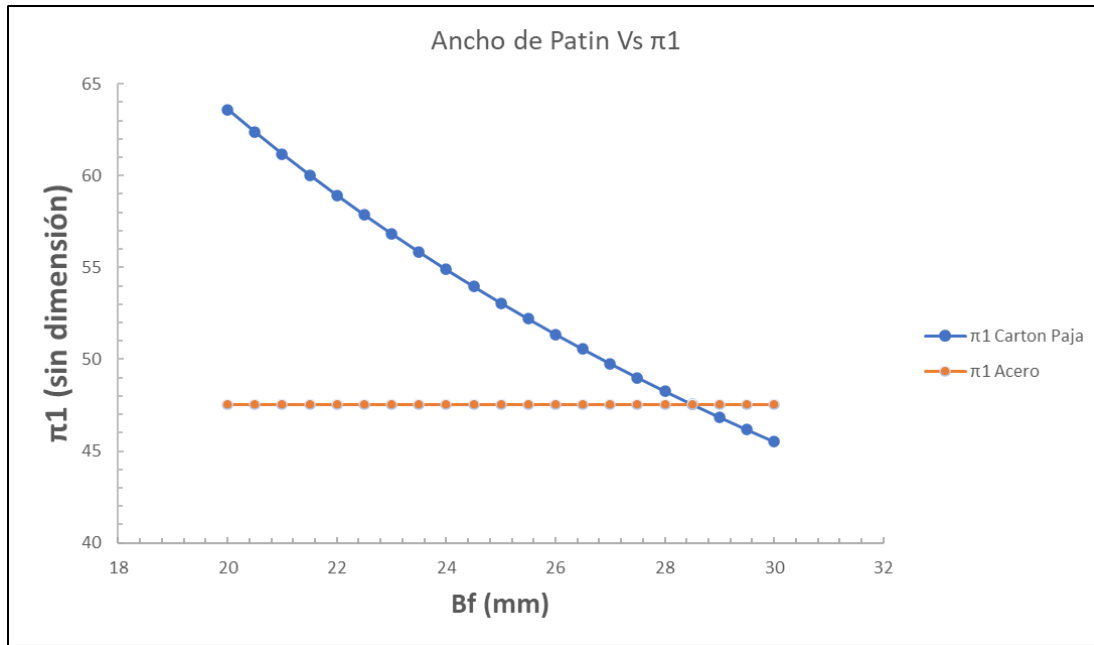


Ilustración 15 - Variación π_1 Vs Parámetros Principales Sección en Cartón Paja.

Fuente: Propia

Con estos valores definidos se propusieron dos diferentes opciones de geometría (Tabla 3) para los modelos a escala en cartón paja.

Opción 1				Opción 2			
P	9.17 N	π_1	47.55	P	19.37 N	π_1	47.55
L	161 mm	π_2	460.5443	L	222.000 mm	π_2	436.8815
E	75 N/mm ²	π_3	1303778	E	75 N/mm ²	π_3	1112962
I	19472.5 mm ⁴			I	74205.75 mm ⁴		
Δm	16.62 mm			Δm	24.16 mm		
Bf (mm)	28.5			Bf (mm)	37		
tf (mm)	1			tf (mm)	2		
d (mm)	35			d (mm)	45		
tw (mm)	1			tw (mm)	1		
Yc (mm)	17.5			Yc (mm)	22.5		
d/bf	1.228			d/bf	1.216		
L/d	4.6			L/d	4.93		

Tabla 3 - Opciones de geometría para modelos a escala en cartón paja.

La opción 1 y 2 presentan el mismo valor de Π_1 pero para el trabajo de investigación se decidió utilizar la opción 1 ya que el factor de forma d/bf , se aproximaba más al del acero registrado en la tabla 2. Con las geometrías definidas para el cartón paja se obtiene un factor de relación de aspecto, el cual, multiplicado por las geometrías originales, se sugiere las nuevas geometrías escaladas.

Partiendo de la geometría escalada, se dibujó en AutoCAD las piezas para el ensamble de la RBS Desmontable y RBS Convencional, 10 probetas y 4 probetas respectivamente, con el fin de poder realizar el corte laser en cartón paja. Posteriormente, para la elaboración de los modelos a escala se siguieron las recomendaciones de armado indicadas en el documento (Fuentes, J. 2020), se realizó el ensamble de cada una de las probetas, simulando el cordón de soldadura con colbón, y usando un par pernos, tornillos milimétricos de diámetro de 2.5 mm, simulando platinas de diferente calibre, uniendo varias láminas de cartón paja unidas por capas de colbón. Estas labores se hicieron con el apoyo del grupo estudiantil Ingeniería Sin Fronteras- ASCE.



Ilustración 16 – Proceso de construcción Probetas RBS Des. y RBS Conv.

Fuente: Propia



Ilustración 17 - Ensamble RBS Desmontable. Montaje Final Maquina INSTRON 5900

Fuente: Propia

Como se puede observar en la ilustración 18, se realizó un montaje que permitió adaptar la máquina INSTRON 5900 a la prueba de carga y realizar el cambio de probetas cuando culminara el ensayo. Inicialmente, se estableció una velocidad de 0.5 mm/min para la primera probeta como prueba, donde se validó el comportamiento del ensayo. Posteriormente, se incrementó la velocidad de carga a 1.5 mm/min. Los ensayos realizados fueron grabados en video para su posterior análisis en las fallas.



Ilustración 18 - Fallas obtenidas en laboratorio RBS Desmontable

Fuente: Propia

Dos de las probetas RBS Desmontables, (el 14.28% de las probetas ensayadas) evidenciaron un comportamiento similar, presentando fallas similares, a las de la simulación del Software ANSYS (ETAPA 2) donde la falla se presentó en la aleta inferior por su concentración de esfuerzos a flexión, generando una zona de plastificación por pandeo local.



Ilustración 19 – Ruptura Material Base

Fuente: Propia

En la ilustración 19 se puede observar 2 tipos de fallas adicionales que se presentaron durante los ensayos, estas fallas están asociadas a la ruptura de material base. La imagen izquierda presenta la falla en la platina y la conexión con la viga en una probeta (7.14%) y en la imagen derecha se observa la falla sobre la platina, de la cara de la columna para 11 probetas (78,58%).

Teniendo en cuenta lo anterior se realizó una validación en la fluencia y ruptura del material base por la soldadura y se pudo evidenciar que este tipo de falla no se presentara en condiciones reales (modelo a escala real en estructura metálica).

Propiedades Acero	
Espesor End Plate	1 in
Fy	50.76 Ksi
Fu	65.67 Ksi

Propiedades Perfil	
Bf	6.5 in
d	7.93 in
K	0.794 in

Longitud Cordon	29.95 in
-----------------	----------

Mpr	1224.28 Kips*in
Vu	18.84 Kips

Ru	173.23 Kips
----	-------------

$$\phi Rn = 1 * [0.6 * Fy * t * l]$$

$$\phi Rn = 0.75 * [0.6 * Fu * t * l]$$

Fluencia	912.28 Kips	>	173.23	Ok
Ruptura	885.19 Kips			Ok

Tabla 4 - Revisión fluencia y material base para el acero estructural

Finalmente, se pudieron obtener graficas aproximadas de esfuerzo a flexión vs deformación unitaria, en el software de carga de la máquina INSTRON 5900, de la cual se puede resaltar el comportamiento de la probeta 4 convencional, donde su grafica de esfuerzo vs. deformación es muy similar a la gráfica típica para el acero estructural.

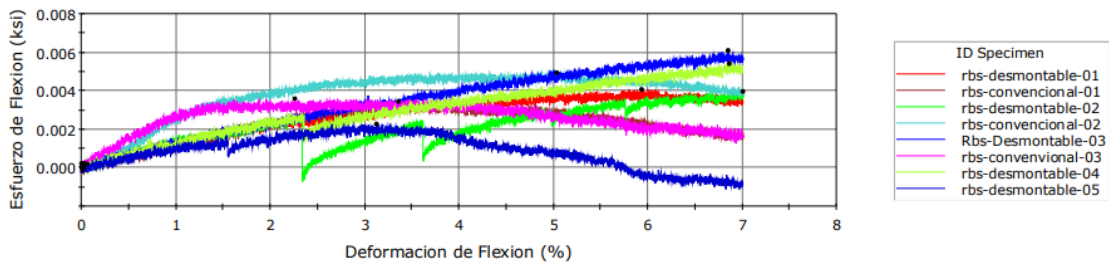


Ilustración 20 - Diagrama Esfuerzo vs Deformación. 5 RBS Desmontable - 3 RBS Convencional

Fuente: Software Máquina Instron 5900

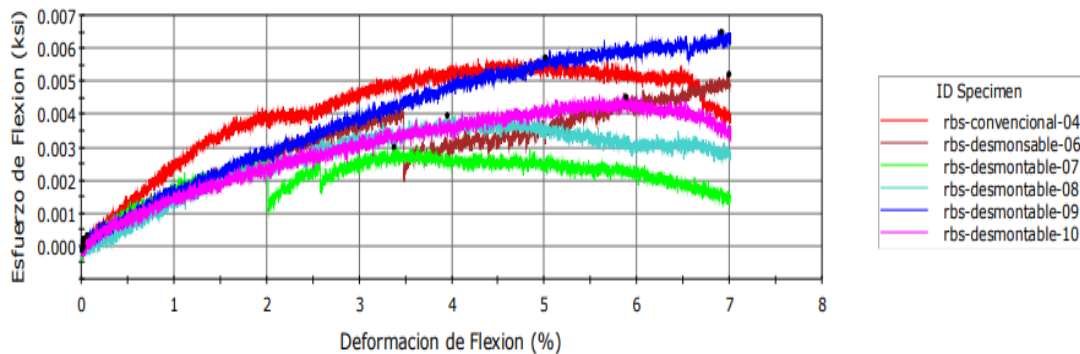


Ilustración 21 - Diagrama Esfuerzo vs Deformación. 5 RBS Desmontable - 1 RBS Convencional

Fuente: Software Máquina Instron 5900

ETAPA 4

Se establecieron los siguientes indicadores de gestión, con el fin de evidenciar la importancia de la propuesta presentada y los ahorros significativos que se pueden obtener en los diferentes escenarios de daño a los cuales se puede enfrentar una estructura después de un sismo. Estos indicadores se encuentran relacionados con el avance que se desarrolló durante el montaje, ensayo y rehabilitación requerida para la estructura una vez se obtuvieron los resultados.

Indicadores:

1. Etapa de Montaje:

1.1. Número de elementos montados:

$$\frac{\# \text{ elemnt. montados}}{\# \text{ elemnt. disponibles}}$$

2. Etapa de Ensayo:

2.1. Número de probetas ensayadas:

$$\frac{\# \text{ probetas ensayadas}}{\# \text{ probetas totales}}$$

2.2. Número de conexiones afectadas

$$\frac{\# \text{ conexiones afectadas}}{\# \text{ total de conexiones ensayadas}}$$

2.3. Número de Vigas afectadas (desmontable)

$$\frac{\# \text{ vigas afectadas RBS desmontable}}{\# \text{ total de vigas RBS desmontable}}$$

2.4. Número de Vigas afectadas (convencional)

$$\frac{\# \text{ vigas afectadas RBS convencional}}{\# \text{ total de vigas RBS convencional}}$$

2.5. Numero de RBS afectadas:

$$\frac{\# \text{ RBS afectadas}}{\# \text{ total de RBS ensayadas}}$$

2.6. Número columnas afectadas

$$\frac{\# \text{ Columna afectadas}}{\# \text{ Total de columnas ensayadas}}$$

3. Etapa de Rehabilitación:

3.1. Peso recuperable de viga Vs Peso desmontable

$$\frac{\text{Kg recuperables de viga RBS desmontable}}{\text{Kg recuperables de viga RBS convencional}}$$

3.2. Costo de rehabilitar (desmontable)

$$\frac{\text{Costo de Rehabilitar (RBS desmontable)}}{\text{Costo total de la viga}}$$

3.3. Costo de rehabilitar (convencional)

$$\frac{\text{Costo de Rehabilitar (RBS convencional)}}{\text{Costo total de la viga}}$$

3.4. Costo Rehab. Des. Vs Costo Rehab. Conv:

$$\frac{\text{Costo de Rehabilitar (RBS convencional)}}{\text{Costo de Rehabilitar (RBS desmontable)}}$$

De esta forma se realizó la siguiente tabla

	Nombre	Formula	Vlr. Esperado	Especificaciones	Resultado
Ensayo	N° probetas ensayadas	$\frac{\# \text{ probetas ensayadas}}{\# \text{ probetas totales}}$	NA	DIA/HORA	NA
	N° de conexiones afectadas	$\frac{\# \text{ conexiones afectadas}}{\# \text{ total de conexiones ensayadas}}$	0	Conexión Col/RBS y RBS/Viga	0
	N° de Vigas afectadas (desmontable)	$\frac{\# \text{ vigas afectadas RBS desmontable}}{\# \text{ total de vigas RBS desmontable}}$	0	Elemento Horizontal	0
	N° de Vigas afectadas (convencional)	$\frac{\# \text{ vigas afectadas RBS convencional}}{\# \text{ total de vigas RBS convencional}}$	0	Elemento Horizontal	0
	N° RBS Afectadas	$\frac{\# \text{ RBS afectadas}}{\# \text{ total de RBS ensayadas}}$	1	RBS	0,14
	N° columnas afectadas	$\frac{\# \text{ Columna afectadas}}{\# \text{ Total de columnas ensayadas}}$	0	Elemento Vertical	0

Tabla 5 - Resumen indicadores de montaje, ensayo y rehabilitación

Con base en esto, se establecieron escenarios de daño de acuerdo con el porcentaje de daño para una estructura metálica bajo los siguientes parámetros:

1. Edificio de 10 pisos en acero estructural con entrepiso compuesto por viguetas metálicas y lámina colaborante Steel Deck.
2. 4 columnas 8 conexiones por piso
3. Altura de piso de 3 m
4. Longitud de vigas de 10 m
5. Columnas en perfil W8x31
6. Precio perfil Des. W8x24 1m= \$ 483.648
7. Precio Perfil Conv. W8x24 1m=\$ 442.584

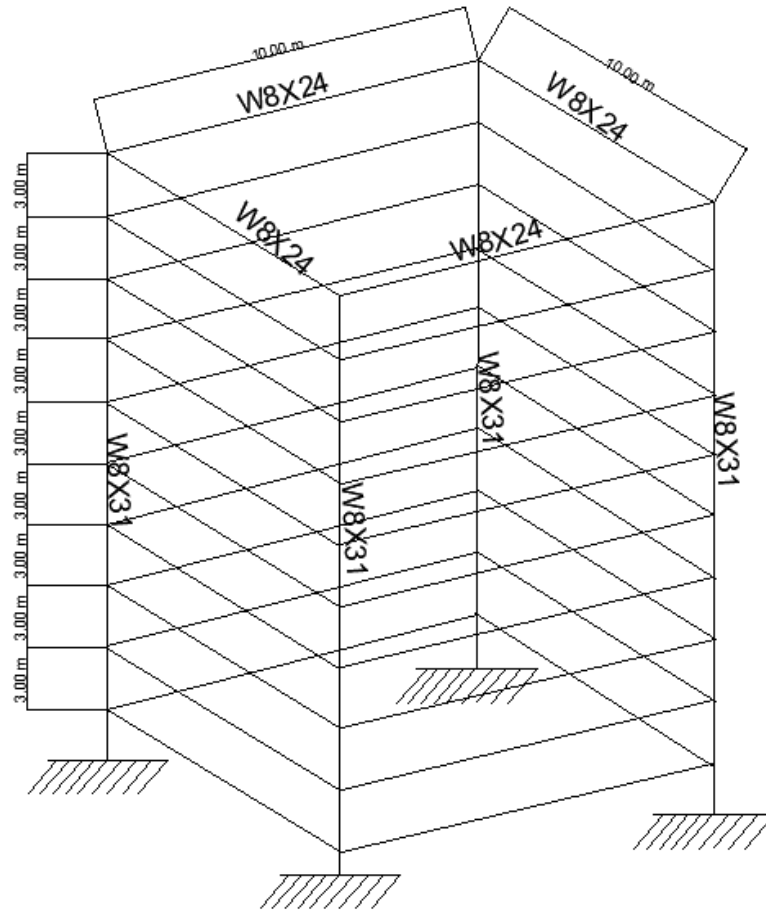


Ilustración 22 - Esquema representativo para evaluación de daños y escenarios.

Fuente: Propia

Los escenarios de daño se presentan en la siguiente tabla, la cual muestra los costos asociados a los escenarios de acuerdo con la cantidad de probetas afectadas para en el modelo RBS Desmontable y Convencional:

	Escenario Daño	Probetas	Long. Des	COSTO DES.	Long Conv.	COSTO CONV.	Resultados
Rehabilitacion	15%	12	0.33	\$ 1,915,246.08	1.6	\$ 8,497,612.80	RBS
	30%	24	0.33	\$ 3,830,492.16	1.6	\$ 16,995,225.60	RBS
	50%	40	0.33	\$ 6,384,153.60	1.6	\$ 28,325,376.00	RBS
	75%	60	0.33	\$ 9,576,230.40	1.6	\$ 69,043,104.00	RBS

Tabla 6 - Escenarios de Daño – Costos de Rehabilitación.

Donde:

- **% Daño:** Representa los escenarios de acuerdo con el daño presentado en la estructura y la cantidad de conexiones RBS afectadas.
- **Costo Rehabilitación RBS – Desmontable:** Representa los costos asociados a la rehabilitación de la estructura con RBS desmontables
- **Costo Rehabilitación RBS – Convencional:** Representa los costos asociados a la rehabilitación de la estructura con RBS Convencional

A continuación, se presenta una gráfica en la cual se puede observar la relación entre los costos versus el número de probetas tanto para la conexión desmontable y la convencional. En todos los escenarios de daño y para mayores cantidades de probetas se observa un incremento considerable en los costos de rehabilitación.

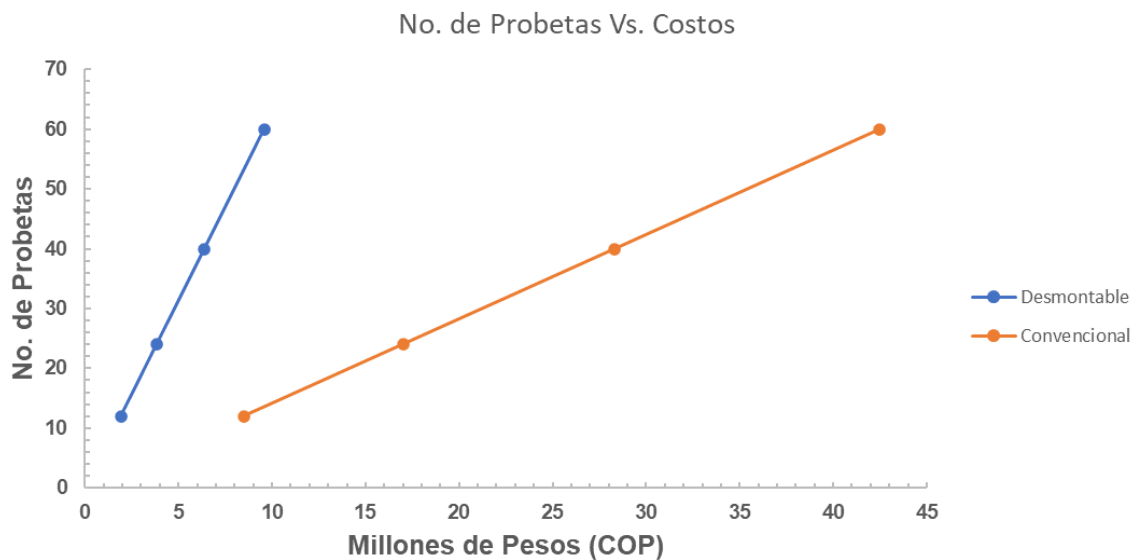


Ilustración 23- Relación No. Probetas Vs Costos

Fuente: Propia

8. Conclusiones y Recomendaciones

- Para obtener la mayor capacidad a momento de la conexión hueso de perro, es necesario aumentar al máximo los parámetros a, b y disminuir el parámetro c.
- La conexión propuesta es viable. Presenta un comportamiento mecánico adecuado, de acuerdo con los resultados simulados en el software ANSYS, ya que durante la etapa de diseño se cumplieron con los criterios mínimos requeridos por la norma y en la etapa práctica se obtuvieron resultados iguales a los obtenidos durante la simulación.
- Dentro de las limitaciones del trabajo de investigación se encontraron factores como las licencias estudiantiles (ANSYS), y factores económicos a raíz de la pandemia que no permitieron realizar los ensayos inicialmente planteados.
- Dos de los modelos físicos representaron exactamente los mismos resultados de deformaciones que ANSYS, es decir pandeo por flexión en la aleta inferior de la conexión RBS, dándole una aproximación física real al problema abordado.
- Es posible que el fenómeno de ruptura del material base no se presentaría en el modelo propuesto de estructura metálica a escala real, teniendo en cuenta el factor de seguridad obtenido en el cálculo realizado.
- El proceso constructivo de los modelos en cartón paja presenta incertidumbre e involucra variables que pueden afectar los resultados esperados (precisión en cortes y armado de probetas).
- A pesar de que los modelos en cartón paja son rigurosos en sus geometrías, se obtuvieron fallas que no se contemplan durante el diseño de conexiones precalificadas. Por lo cual, se recomienda realizar estas validaciones que no son explícitas en la normativa para futuras investigaciones, o bien para ensayos a escala real.

- De los resultados de los ensayos en laboratorio se evidencian posibles mejoras en cuanto a la implementación de JPC en los modelos a escala presentados en el cartón paja. Por lo cual, se recomienda para una futura ampliación simular la penetración de la soldadura en los materiales de una mejor manera.
- Teniendo en cuenta los escenarios de daño establecidos, es evidente que, para los escenarios más críticos (80%), la RBS desmontable refleja un mayor costo/beneficio, siempre y cuando la edificación mantenga sus capacidades estructurales de diseño mediante la metodología de columna fuerte viga débil. Lo anterior, teniendo en cuenta que para este escenario normalmente se decide realizar la demolición local del elemento afectado de la estructura, mientras que empleando conexiones RBS desmontables es viable considerar la rehabilitación.

9. Referencias

- AISC 358. (2006). Aisc 358. *Structures Congress 2006@ SStructural Engineering and Public Safety*, 1, 1–8. [https://doi.org/10.1061/40889\(201\)5](https://doi.org/10.1061/40889(201)5)
- Chambers, J. J., Almudhafar, S., & Stenger, F. (2003). Effect of reduced beam section frame elements on stiffness of moment frames. *Journal of Structural Engineering*, 129(3), 383–393. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:3\(383\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:3(383))
- Chen, S. J., & Tu, C. Te. (2004). Experimental study of jumbo size reduced beam section connections using high-strength steel. *Journal of Structural Engineering*, 130(4), 582–587. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:4\(582\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:4(582))
- Ghaderi, M., Gerami, M., & Vahdani, R. (2019). A comparison of seismic low cycle fatigue and extremely low cycle fatigue on steel moment frames with reduced beam section connection (RBS). *International Journal of Fatigue*, 119(September 2018), 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.09.010>
- Lignos, D. G., Kolios, D., & Miranda, E. (2010). Fragility assessment of reduced beam section moment connections. *Journal of Structural Engineering*, 136(9), 1140–1150. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000214](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000214)
- Montuori, R., & Sagarese, V. (2018). The use of steel rbs to increase ductility of wooden beams. *Engineering Structures*, 169(October 2017), 154–161. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.024>
- Morshedi, M. A., Dolatshahi, K. M., & Maleki, S. (2017). Double reduced beam section connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 138, 283–297.

<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.07.013>

Rahnavard, R., Hassanipour, A., & Siahpolo, N. (2015). Analytical study on new types of reduced beam section moment connections affecting cyclic behavior. *Case Studies in Structural Engineering*, 3, 33–51. <https://doi.org/10.1016/j.csse.2015.03.001>

Sofias, C., & Tzourmakliotou, D. (2018). Reduced Beam Section (RBS) Moment Connections- Analytical Investigation Using Finite Element Method. *Civil Engineering Journal*, 4(6), 1240. <https://doi.org/10.28991/cej-0309170>

Swati, A. K., & Gaurang, V. (2014). Study of steel moment connection with and without reduced beam section. *Case Studies in Structural Engineering*, 1(1), 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.csse.2014.04.001>

Uang, B. C., Yu, Q. K., Member, S., Noel, S., & Gross, J. (2000). *Cyclic Testing of Steel Moment Connections With Rbs or Welded Haunch*. 126(January), 57–68.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. AISC. Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications or Steel Buildings. Ed 2010. Chicago, Illinois: AISC. 2010.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, FEMA. *Recommended Seismic Design Criteria for new Steel Moment-Frame Buildings*. FEMA 350. Federal Emergency Management Agency, SAC Joint Venture, Washington, EU, 2000.