



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento

**ESTRATEGIAS PARA REDUCCIÓN DE FALLAS ESTRUCTURALES QUE PUEDEN
PRESENTARSE EN LOS EQUIPOS DE ARRASTRE TIPO SEMIRREMOLQUE**

Ing. Luis Alberto Calmo Galindo

Asesorado por el Mtro. Ing. Ángel Rodrigo Recinos Castellano

Guatemala, mayo de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTRATEGIAS PARA REDUCCIÓN DE FALLAS ESTRUCTURALES QUE PUEDEN
PRESENTARSE EN LOS EQUIPOS DE ARRASTRE TIPO SEMIRREMOLQUE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. LUIS ALBERTO CALMO GALINDO

ASESORADO POR EL MTR. ING. ÁNGEL RODRIGO RECINOS
CASTELLANO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUATEMALA, MAYO DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE
DEFENSA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Rocío Carolina Medina Galindo
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Walter Emilio Ramirez Córdoba
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTRATEGIAS PARA REDUCCIÓN DE FALLAS ESTRUCTURALES QUE PUEDEN PRESENTARSE EN LOS EQUIPOS DE ARRASTRE TIPO SEMIRREMOLQUE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 6 de noviembre de 2022.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Luis Alberto Calmo Galindo', written in a cursive style.

Ing. Luis Alberto Calmo Galindo

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.164.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTRATEGIAS PARA REDUCCIÓN DE FALLAS ESTRUCTURALES QUE PUEDEN PRESENTARSE EN LOS EQUIPOS DE ARRASTRE TIPO SEMIRREMOLQUE**, presentado por: **Ing. Luis Alberto Calmo Galindo**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Ingeniería de mantenimiento después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANO a.i.
Facultad de Ingeniería

Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.

Guatemala, mayo de 2024

JFGR/gaac



Guatemala, mayo de 2024

LNG.EEP.OI.164.2024

En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“ESTRATEGIAS PARA REDUCCIÓN DE FALLAS ESTRUCTURALES QUE PUEDEN PRESENTARSE EN LOS EQUIPOS DE ARRASTRE TIPO SEMIRREMOLQUE”

presentado por **Ing. Luis Alberto Calmo Galindo** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Ingeniería de mantenimiento** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 9 de octubre de 2023

M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **ESTRATEGIAS PARA REDUCCIÓN DE FALLAS ESTRUCTURALES QUE PUEDEN PRESENTARSE EN LOS EQUIPOS DE ARRASTRE TIPO SEMIRREMOLQUE.** del estudiante **Luis Alberto Calmo Galindo** quien se identifica con número de carné **201114249** del programa de Maestria En Ingenieria De Mantenimiento.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014.** Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.




Msc. Inga. Rocio Carolina Medina Galindo
Coordinador
Maestria En Ingenieria De Mantenimiento
Escuela de Estudios de Postgrado

Oficina Virtual



Guatemala, 9 de octubre de 2023

M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"ESTRATEGIAS PARA REDUCCIÓN DE FALLAS ESTRUCTURALES QUE PUEDEN PRESENTARSE EN LOS EQUIPOS DE ARRASTRE TIPO SEMIRREMOLQUE."** de el/la estudiante **Luis Alberto Calmo Galindo** del programa de **Maestría En Ingeniería De Mantenimiento** identificado(a) con número de carné 201114249.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Angel Rodrigo Recinos Castellanos
Ingeniero Mecánico
Colegiado No. 13,946

Mtro. Ing. Angel Rodrigo Recinos Castellanos
Colegiado No. 13946
Asesor de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por sus constantes bendiciones y presencia en mi vida.
Mis padres	Luis Calmo y Olga Galindo por su gran amor, enseñanzas y respaldo.
Mis hermanos	Estuardo y Cecilia Calmo por su apoyo y palabras de motivación.
Mi familia en general	Por sus oraciones, buenos deseos y palabras de aliento.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la mejor casa de estudios superiores y en donde siempre se aprende algo nuevo.
La Escuela de Estudios de Postgrado (EEP)	Por facilitar el acceso de postgrados a los profesionales que deseen superarse.
Los maestros de la EEP	Por brindar sus conocimientos y facilitar la información en los diferentes cursos.
Mi asesor	Mtro. Ing. Ángel Recinos por su buena disposición y consejos para realizar este proyecto.
LUBISA S.A.	Por permitirme obtener datos e información relevante para la realización de mi proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Equipos de arrastre	3
2.1.1. Equipos montados sobre chasis	4
2.1.2. Equipos de tipo remolque	5
2.1.3. Equipos de tipo semirremolque	7
2.1.3.1. Caja seca y caja refrigerada	10
2.1.3.2. Plataformas.....	11
2.1.3.3. Cama baja o <i>lowboy</i>	12
2.1.3.4. Cisterna de líquidos	13
2.1.4. Mantenimiento de semirremolques.....	15
2.1.4.1. Sistema de frenos neumático	15
2.1.4.2. Sistema eléctrico	15
2.1.4.3. Sistema de suspensión.....	16
2.1.4.4. Estructura del semirremolque	16

2.2.	Estructuras de acero	17
2.2.1.	Tipos de acero estructural.....	18
2.2.2.	Fallas en estructuras de acero.....	19
2.3.	Diseño CAD y análisis de elementos finitos	22
2.3.1.	<i>Software CAD SolidWorks</i>	22
2.3.2.	Análisis de elementos finitos en <i>SolidWorks</i>	23
3.	RESULTADOS.....	27
3.1.	Revisión documental.....	27
3.1.1.	Selección del equipo a analizar.....	28
3.1.2.	Parámetros para análisis de material de fabricación	29
3.1.3.	Parámetros para el análisis de uniones.....	30
3.2.	Resultados	31
3.2.1.	Análisis de material de fabricación	31
3.2.1.1.	Acero ASTM A36.....	31
3.2.1.2.	Acero ASTM A572 G50.....	47
3.2.1.3.	Acero <i>Strenx 700 MC</i>	48
3.2.2.	Análisis de tipos de uniones	49
3.2.2.1.	Unión de control	49
3.2.2.2.	Unión soldada, viga y travesaños.....	58
3.2.2.3.	Unión soldada / atornillada.....	60
3.2.2.4.	Unión atornillada con platina 'L'.....	61
3.2.2.5.	Unión atornillada desplazada	63
3.2.2.6.	Unión soldada / atornillada y platina 'L'	64
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	67
4.1.	Análisis de material de fabricación	67
4.2.	Análisis de tipo de unión	75

5.	ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCIÓN DE FALLAS EN EQUIPOS TIPO SEMIRREMOLQUE, CONSIDERACIONES DE SU DISEÑO Y MANTENIMIENTO.....	81
5.1.	Elección adecuada del material de fabricación.....	81
5.2.	Evaluar el tipo de unión entre miembros estructurales.....	81
5.3.	Rutinas de inspección de la estructura del semirremolque.....	82
5.4.	Consideraciones de diseño para equipos semirremolques	82
5.5.	Mantenimiento básico para la estructura de un semirremolque.....	84
	CONCLUSIONES	87
	RECOMENDACIONES.....	89
	REFERENCIAS	91
	APÉNDICES	95
	ANEXOS.....	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Camión cisterna.....	5
Figura 2.	Remolque con dolly	7
Figura 3.	Dolly con quinta rueda	9
Figura 4.	Semirremolque de tres ejes	10
Figura 5.	Semirremolque caja refrigerada.....	11
Figura 6.	Semirremolque plataforma plana.....	12
Figura 7.	Semirremolque cama baja	13
Figura 8.	Semirremolque cisterna	14
Figura 9.	Falla por corrosión	18
Figura 10.	Falla por cambio de geometría y mala reparación.....	20
Figura 11.	Fractura de chasis y su reparación.....	21
Figura 12.	Proceso típico del diseño.....	23
Figura 13.	Proceso de análisis de elementos finitos	24
Figura 14.	Presentación de resultados finales FEA	25
Figura 15.	Modelo seleccionado para análisis	28
Figura 16.	Esfuerzo en vigas principales, condición 1	32
Figura 17.	Acercamiento del esfuerzo en condición 1	33
Figura 18.	Deformación máxima en vigas, condición 1.....	34
Figura 19.	Factor de seguridad mínimo en vigas, condición 1	35
Figura 20.	Distribución del factor de seguridad, condición 1.....	36
Figura 21.	Daño por fatiga, condición 1	37
Figura 22.	Ciclos de vida por fatiga, condición 1	38
Figura 23.	Factor de carga en chasis, condición 1.....	39

Figura 24.	Esfuerzo en vigas principales, condición 2.....	40
Figura 25.	Deformación máxima en vigas, condición 2	41
Figura 26.	Factor de seguridad mínimo en vigas, condición 2	42
Figura 27.	Distribución del factor de seguridad, condición 2	43
Figura 28.	Daño por fatiga, condición 2.....	44
Figura 29.	Ciclos de vida por fatiga, condición 2	45
Figura 30.	Factor de carga en chasis, condición 2	46
Figura 31.	Unión de control, sin especificaciones de norma	50
Figura 32.	Refuerzos del lado contrario de la viga	50
Figura 33.	Esfuerzo en unión de control.....	51
Figura 34.	Deformación máxima en la unión de control	52
Figura 35.	Factor de seguridad mínimo en unión de control	53
Figura 36.	Distribución del factor de seguridad en unión de control	54
Figura 37.	Daño por fatiga, unión de control	55
Figura 38.	Ciclos de vida, unión de control.....	56
Figura 39.	Factor de carga, unión de control.....	57
Figura 40.	Unión soldada entre viga y travesaños.....	59
Figura 41.	Unión soldada / atornillada	60
Figura 42.	Unión atornillada con platina ‘L’	62
Figura 43.	Unión atornillada desplazada	63
Figura 44.	Unión soldada / atornillada con platina ‘L’	65
Figura 45.	Esfuerzo y factor de seguridad, condición 1	68
Figura 46.	Deformación y puntos críticos, condición 1	69
Figura 47.	Gráfica de fatiga en materiales, condición 1.....	70
Figura 48.	Gráfica de esfuerzo y factor de seguridad, condición 2.....	72
Figura 49.	Gráfica de deformación y puntos críticos, condición 2	73
Figura 50.	Resultados de fatiga, condición 2 (en nodos).....	74
Figura 51.	Gráfica de esfuerzo y factor de seguridad – Uniones.....	76
Figura 52.	Gráfica de deformación y puntos críticos – Uniones	77

Figura 53.	Gráfica de daño en fatiga (%) – Uniones.....	78
Figura 54.	Gráfica de la vida en fatiga (ciclos) – Uniones.....	79
Figura 55.	Gráfica de factor de carga en fatiga – Uniones.....	80

TABLAS

Tabla 1.	Variables de investigación	XXI
Tabla 2.	Resultados en chasis con acero ASTM A36.....	47
Tabla 3.	Resultados en chasis con acero ASTM A572 G50	48
Tabla 4.	Resultado en chasis con acero Strenx 700 MC	49
Tabla 5.	Resultado de la unión de control	58
Tabla 6.	Resultados en unión soldada.....	59
Tabla 7.	Resultados en unión soldada / atornillada	61
Tabla 8.	Resultados en unión atornillada con platina ‘L’	62
Tabla 9.	Resultados en unión atornillada desplazada	64
Tabla 10.	Resultados en unión soldada / atornillada a ‘L’	65
Tabla 11.	Lista de inspección estructural de un semirremolque	85

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°	Grados
%	Porcentaje

GLOSARIO

AHSS	Aceros avanzados de alta resistencia.
AISC	Instituto americano de construcción en acero.
ANSI	Instituto nacional americano de estándares.
ASTM	Instituto estadounidense para prueba de materiales.
Basculante	Elemento que puede rotar desde un punto diferente a su centro geométrico para alcanzar una posición diferente.
Caballote	Nombre que se le da a la estructura central que recorre de forma longitudinal la plataforma de un semirremolque.
CAD	<i>Computer Aided Design</i> , diseño asistido por computadora.
Croquis	Dibujo básico para el inicio de un diseño.
Dolly	Tipo de remolque para unir al remolcador.
FEA	<i>Finite Elements Analysis</i> , análisis de elementos finitos.

GLP	Gas licuado de petróleo.
ITEA	Instituto técnico de la estructura en acero.
m	Metro
MPa	Megapascal
Pallet	Forma mundialmente conocida de estibar productos para su transporte, normalmente con medidas estándar.
Perno rey	Elemento estándar de enganche frontal de un semirremolque.
Quinta rueda	Elemento de enganche especialmente usado para semirremolques.
s	Segundo
Software	Programa o conjunto de programas de cómputo.
SolidWorks	<i>Software</i> de diseño asistido por computadora.
SSAB	Empresa nórdica siderúrgica formada en 1978 especializada en acero.
Statica Connection	<i>Software</i> de diseño de uniones de acero.

<i>Strenx</i>	Acero avanzado de alta resistencia de la empresa SSAB.
Tornamesa	Elemento giratorio que sirve de unión entre dos remolques.
Trocha	Distancias entre los extremos de un eje donde encaja el aro de una rueda.

RESUMEN

Los equipos de arrastre tipo semirremolque son utilizados mundialmente para transportar diversos productos o materiales, por lo tanto, es de suma importancia que estructuralmente sean seguros y durables. Las fallas en estos equipos pueden ocasionar incidentes con pérdidas materiales y hasta de vidas humanas. Para esta investigación se utilizó el análisis de elementos finitos, el cual, por medio de software CAD, calcula los efectos de las cargas aplicadas a un modelo digital de un semirremolque.

De estos análisis se obtuvo el comportamiento de la estructura principal del equipo tipo semirremolque seleccionado, al variar el material de fabricación. Así también el efecto de usar determinados tipos de uniones entre los miembros que conforman la estructura. Con ello se plantean distintas estrategias que permitan reducir las pérdidas que puedan ocasionar una falla importante que afecte a transportistas, fabricantes y demás personas que se vean involucradas en un posible percance de índole variada.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema deriva de la importancia que representan las fallas en la estructura de los equipos de arrastre tipo semirremolque, dichas fallas pueden comprometer la integridad completa de este tipo de equipos, al romperse o fracturarse cualquiera de los miembros que conforman la estructura, puesto que el transporte es normalmente en carreteras a velocidades relativamente altas. Este problema afecta principalmente a los conductores que transitan por las carreteras de Guatemala, ya que las fallas pueden generar accidentes de consecuencias económicas, detención del tráfico vehicular, daños a la salud, o hasta el deceso de personas involucradas.

La pregunta central es entonces:

- ¿Qué estrategias pueden reducir la aparición de fallas estructurales en equipos de arrastre tipo semirremolque?

Lo que nos deriva a tres preguntas auxiliares:

- ¿Cuáles son los motivos que generan fallas estructurales en los semirremolques?
- ¿Cuáles son los tipos de fallas que suelen presentarse en la estructura de los equipos de tipo semirremolque?
- ¿Qué escenarios de fallas estructurales pueden ser simulados en un software CAD con análisis de elementos finitos (FEA)?

OBJETIVOS

General

Proponer estrategias para la reducción de fallas estructurales que pueden presentarse en los equipos de tipo semirremolque, de una empresa dedicada a diseño y manufactura de equipos de arrastre.

Específicos

1. Describir las causas que originan fallas estructurales en equipos de arrastre tipo semirremolque.
2. Categorizar los tipos de fallas estructurales que suelen presentarse en equipos de arrastre de tipo semirremolque.
3. Simular los escenarios de fallas estructurales en equipos de arrastre de tipo semirremolque mediante un *software* CAD.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El estudio fue realizado en una ruta de tipo cuantitativa, con un diseño experimental de alcance descriptivo. El diseño es preexperimental de preprueba – posprueba, en donde se creó el modelo de un semirremolque tomando las medidas y estructura similar a otros con especificaciones similares, se realizaron cambios en el tipo de material de fabricación para cada una de las pruebas, con ello obtener diferentes mediciones de las variables, así mismo se evaluaron diferentes tipos de uniones entre los miembros que conforman la estructura. El alcance es de tipo descriptivo porque analiza un equipo de tipo semirremolque, que cuenta con varias especificaciones, y con las cuales se halla el comportamiento en diferentes escenarios. Así mismo por encontrar algunos de los motivos de fallas estructurales en los semirremolques y los efectos que tienen las modificaciones en su estructura.

Tabla 1.

Variables de investigación

No.	Variable independiente	Variable dependiente
1	Material	Esfuerzo (MPa)
2	Tipo de unión	Factor de seguridad
3		Deformación (mm)
4		Puntos críticos
5		Daño (%)
6		Vida (ciclos)
7		Factor de carga

Nota. Tabla con las variables dependientes e independientes. Elaboración propia, realizado en Word 2019.

Las fases del estudio fueron:

- Revisión documental: se utilizó principalmente la plataforma de Google Académico, para hacer la búsqueda de documentos de carácter profesional relacionados con el tema de la investigación. Entre ellos se encuentran tesis, trabajos de graduación, documentos académicos, artículos científicos, normas, libros, fichas técnicas, manuales de operación y mantenimiento, historial de datos.
- Trabajo de campo: se recopiló información sobre los tipos de fallas que suelen presentarse en la estructura de los semirremolques, así también se realizaron mediciones de equipos con especificaciones similares al equipo diseñado. En campo, se determinó los tipos de aceros más comerciales para la fabricación de semirremolques.
- Trabajo de gabinete: con la información recopilada, se generaron las bases para definir los escenarios o condiciones en las pruebas de elementos finitos (FEA). Se utilizó el *software SolidWorks 2020* para realizar el modelo de semirremolque, y así también el mismo *software* se empleó para hacer los FEA. Mediante distintas pruebas se encontraron datos del comportamiento de la estructura del semirremolque, estos fueron ordenados y tabulados para su mejor comprensión y análisis.
- Redacción de documento: con la información y resultados obtenidos, se procedió a redactar este documento, en el cual están incluidas las Tablas 2, 3 y 4, cuyo contenido muestra las variables dependientes de los análisis del tipo de material de fabricación. Por su parte, las Tablas 5 a la Tabla 10 contiene los datos del comportamiento de las variables dependientes en los distintos tipos de unión.

INTRODUCCIÓN

El trabajo presentado a continuación es una innovación en cuanto al tema de semirremolques, ya que la bibliografía e investigaciones respecto a fallas en este tipo de equipos es muy limitada, y la mayoría de veces las ocurrencias de estas son analizadas en un carácter privado sin ser publicadas. El problema que se presenta es, la ocurrencia de fallas estructurales en equipos de tipo semirremolque utilizados en el transporte de carga en Guatemala. Este inconveniente afecta a transportistas, fabricantes de los equipos, a los conductores e incluso a peatones que se encuentren en los alrededores. Puede generar inconvenientes de tipo monetario, de la imagen pública de las empresas de transporte, pero principalmente daños a la integridad física de las personas.

La importancia de la solución recae en que los equipos de arrastre tipo semirremolque son muy utilizados para trasladar y distribuir gran variedad de bienes a lo largo del territorio, es por esto que esta investigación analiza y plantear estrategias que ayuden a reducir las fallas que suelen presentarse en este tipo de equipos. Con esto, se plantean también criterios de diseño para evitar una falla que pueda generar inconvenientes en el transporte de carga. El aporte de esta investigación es presentar estrategias para reducir la presencia de fallas en la estructura de los equipos de arrastre tipo semirremolque, con ello reducir las reparaciones que tienden a ser de alto costo, tratándose de la estructura principal de los equipos.

En el Capítulo 1 se encuentran los antecedentes, los cuales aportaron ciertos criterios como base para el desarrollo de esta investigación; cuyo contenido hace referencia a distintos temas involucrados, como lo es el material

de fabricación de los semirremolques, métodos de análisis, parámetros de diseño, entre otros.

El Capítulo 2, marco teórico se fundamenta en tres ejes temáticos que son la comprensión de qué es un equipo de arrastre de tipo semirremolque, la utilización y características de construcción de estructuras con acero, por último, la creación y análisis de modelos CAD por medio del uso del uso de *software* computacional especializado.

En el Capítulo 3 se presentan los resultados, estos están conformados por imágenes de las representaciones de los FEA en la estructura principal del chasis, así mismo se incluyen tablas que contienen los datos recopilados de los distintos análisis. Los análisis de los tipos de uniones también están incluidos en este capítulo, a modo de gráficas y tablas ordenadas según las distintas variables evaluadas.

El Capítulo 4 es en donde se analizan y discuten los resultados, por medio de gráficas se visualiza la manera en que se relacionan las variables resultantes, con ello se pueden hacer comparativas para hallar el mejor comportamiento de la estructura al variar el tipo de material de fabricación y también el tipo de unión entre los miembros que la conforman.

En el Capítulo 5, se presentan las estrategias para la reducción de fallas en los semirremolques, así como algunos criterios de diseño y mantenimiento para los equipos de arrastre tipo semirremolque, específicamente para el tipo elegido en este análisis. En este capítulo brinda información muy específica, pero dependiendo del tipo de semirremolque, así también va a ser la complejidad de su diseño y mantenimiento.

1. ANTECEDENTES

J. Romero (2021) realizó un análisis de elementos finitos a uniones metálicas, donde utilizó normas internacionales por medio del *software Idea Statica Connection*. Para alcanzar un correcto estudio de las uniones, analizó cada unión individualmente lo que hizo que los resultados no se vieran afectados por la rigidez de otras uniones en función de su deformación. Con esto, se logró determinar distintos resultados, como, por ejemplo, que las uniones atornilladas pueden presentar mejores rendimientos respecto a las uniones soldadas, así mismo que es importante establecer el tipo de uniones en la estructura, para definir el método de su análisis. El aporte práctico fue utilizar el concepto de individualizar las uniones para realizar análisis de fallas de los semirremolques en estos puntos, ya sean soldadas, atornilladas o combinaciones de ambos métodos.

Velásquez y Rojas (2020) hicieron la optimización de la estructura de un semirremolque mediante el uso de acero de alta resistencia para el transporte de GLP. Los resultados de los cálculos realizados lograron mostrar que la utilización de metales de alta resistencia puede ser beneficioso para mejorar los factores mínimos de seguridad. También reducir peso a los equipos al utilizar espesores de menor calibre respecto a un diseño convencional. Esto demuestra que materiales de mayor resistencia pueden reducir la ocurrencia de fallas en los semirremolques, adicionalmente reducir en cierto porcentaje el peso de los equipos. El aporte metodológico fue el uso del *software SolidWorks* para analizar distintos materiales, con ello obtener resultados del comportamiento de la estructura y las variables dependientes que de este se logran apreciar.

F. Romero (2019) realizó un estudio de soldabilidad para reemplazar los aceros ASTM A36 y ASTM A572 por acero *Strenx 700* como material base en juntas de semirremolques. En este estudio, realizaron distintos ensayos de materiales destructivos y no destructivos, donde obtuvo resultados muy favorables en el acero *Strenx 700*. Así también se hicieron análisis FEA (análisis de elementos finitos por sus siglas en inglés) con factores de seguridad cercanos que mostraron una mayor capacidad de carga con el nuevo material *Strenx 700*. El aporte práctico de los resultados fue, confirmar que emplear aceros de mayor resistencia como el *Strenx 700* presentan beneficios para la fabricación de semirremolques.

Gavidia y Subía (2015) muestran en detalle los procedimientos técnicos y requerimientos que deben cumplir el personal, materiales, equipos que intervienen en la fabricación y montaje de una estructura de acero para un edificio. En dicho documento se presenta una guía práctica de recomendaciones en el montaje de estructuras metálicas, donde se aplicó normas vigentes. El aporte práctico fue utilizar información que es aplicable en los procesos de fabricación de estructuras de acero basados en normas para ser replicados en los semirremolques.

Franck *et al.* (2009) realizaron un análisis dinámico a un chasis de semirremolque de servicio pesado. Por medio de *software* FEA se determinó el comportamiento del chasis al aplicar dos cargas distintas para simular una condición estática y otra dinámica, en donde se obtuvieron resultados de concentración de tensiones y frecuencias naturales. De los resultados se concluyó, que el chasis cumple con los valores aceptables según los materiales utilizados y las tolerancias permitidas. El aporte metodológico fue establecer dos escenarios de análisis, con diferentes parámetros para obtener el comportamiento en una situación óptima y otra adversa para los semirremolques.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Equipos de arrastre

El transporte terrestre puede decirse que es el tipo de transporte más común o con el que más familiarizados estamos día con día. Por medio de los vehículos terrestres se movilizan personas, productos, materiales, alimentos y una gran variedad de bienes; es por esto que es indispensable una categorización de los distintos tipos de equipos que se utilizan para transportar las cargas por las carreteras. Por el enfoque de este documento solamente se va a tratar con transporte de tipo tractocamión y los vehículos de arrastre que estos utilicen, excluyendo trenes y otros transportes, es importante también enfatizar que tampoco se va a enfocar en transporte de personas como autobuses, microbuses, entre otros.

Con el enfoque entonces en los transportes de carga, se hace notar que el principal vehículo automotor que se utiliza es el camión, habiendo una gran variedad de los mismos, pero cuya función principal es arrastrar o transportar las cargas por medio de algún implemento que se los permita. Se pueden diferenciar dos principales tipos de camiones, los que pueden ser utilizados para montar sobre el chasis y cuya función puede ser muy específica, por ejemplo, los camiones cisterna, camiones de basura, camión tipo furgón, entre otros. El otro tipo de camión serían los cabezales o tractocamiones, como también se les puede llamar. Una de las diferencias más importantes de estos últimos es que cuentan con un enganche especial en su parte posterior conocido como quinta rueda. Este accesorio permite el acoplamiento de un semirremolque por medio de otro accesorio conocido como perno rey o perno maestro.

Según lo visto previamente, se puede definir que: un equipo de arrastre es todo aquel implemento que es montado o enganchado a un vehículo para transportar un tipo de carga específica por las carreteras o caminos terrestres. Tomando esto en cuenta se pueden definir tres tipos de equipos de arrastre.

2.1.1. Equipos montados sobre chasis

Los equipos montados sobre chasis, como su nombre lo indica, son todos aquellos que no cuentan con algún tipo de eje y que necesariamente van acoplados de alguna manera sobre el chasis de un camión. Estos equipos normalmente cumplen una función específica o especializada, la cual debe estar vinculada directamente con la capacidad de carga y dimensiones del camión.

Dentro de los equipos montados sobre chasis se pueden mencionar: camiones cisterna, camiones de volteo, camiones recolectores de basura, camión furgón, camiones grúa, entre otros. Todos estos equipos deben cumplir las medidas de un ancho máximo de 2.6 metros y una altura máxima de 4.15 metros, pero esto no solamente aplica para los equipos montados sobre chasis, sino que incluye a todos los vehículos que circulan en las carreteras del territorio guatemalteco (Acuerdo gubernativo 379-2010, 2010).

Figura 1.

Camión cisterna



Nota. Fotografía de un tipo de camión cisterna para agua. Obtenida de Mine Safety Institute (2019). *Water Truck Safety – For Surface Mines* [Camión de agua de seguridad – Para superficie de minas] (<https://minesafetyinstitute.org/water-truck-safety/>), consultado el 6 de agosto del 2022. De dominio público.

2.1.2. Equipos de tipo remolque

Se puede definir un equipo de tipo remolque a todo aquel vehículo que puede soportar total o casi por completo su propio peso sobre sus ejes, además estos deben ser halados por algún tipo de vehículo automotor. Hay que destacar que los equipos de tipo remolque pueden ser combinados con los ya anteriormente mencionados montados sobre chasis, con el propósito de aumentar la carga a transportar por un solo automotor, así con ello disminuir la cantidad de viajes necesarios para el transporte completo del producto.

Al igual que los primeros tipos de equipo de arrastre, los remolques cuentan con funciones especiales según el tipo de carga que requieran transportar. Se debe considerar que los equipos de tipo remolque deben contar con iluminación y señalización propia, ya que al ser remolcados por un camión impiden que los conductores puedan ver las luces de estos mismos, así también según sea el caso y las dimensiones de la carga resulta necesario que los remolques cuenten con un sistema de frenos para brindar un respaldo extra a los frenos propios del camión.

Normalmente un remolque cuenta con sistema de acople frontal que coincide con el acoplador posterior de los camiones o en algunos casos picops, así mismo por lo regular en los remolques de mayor tamaño cuentan con un *dolly* unido por medio de un elemento llamado tornamesa, el cual permite el giro del eje frontal del remolque al momento de tomar curvas en las carreteras (ONSET, 2020).

Figura 2.

Remolque con dolly



Nota. Fotografía de un equipo de arrastre tipo remolque con *dolly* incorporado. Obtenido de India Mart (2022). *Mild Steel Four Wheel HYD Tractor Trailer* [Remolque de cuatro ruedas hidráulico para tractor de acero dulce] (<https://m.indiamart.com/proddetail/four-wheel-hyd-tractor-trailer-25873862430.html>), consultado el 7 de agosto de 2022. De dominio público.

2.1.3. Equipos de tipo semirremolque

Los equipos de tipo semirremolque al igual que los remolques, son vehículos no motorizados que necesitan ser arrastrados por un camión, y en este caso en específico los camiones son los conocidos como tractocamiones o cabezales, los cuales cuentan con un componente de anclaje especial llamado quinta rueda. Los semirremolques deben contar con un componente que encaje con la quinta rueda del camión que es llamado perno rey o perno maestro, entonces puede decirse que los semirremolques son los equipos de arrastre

especialmente diseñados para ser acoplados con los camiones tipo cabezal (González y Guerra, 2020).

En el caso que sea necesario, el transporte de dos semirremolques se hace uso de un equipo llamado *dolly*, cuya función es hacer de eslabón entre el primer semirremolque acoplado directamente al camión y el segundo semirremolque, permitiendo un movimiento de cadena al momento de que se tome una curva. El *dolly* como es de imaginar también cuenta con una quinta rueda para que el segundo semirremolque se acople con seguridad. Normalmente un *dolly* puede ser de uno o dos ejes, pero puede haber casos especiales en donde sea necesario implementar más ejes para soportar mayores cargas.

Figura 3.

Dolly con quinta rueda



Nota. Ejemplo de un *dolly* con quinta rueda y dos ejes. Obtenido de Glasvan Great Dane (2022). *Great Dane converter dollies* [Dollies convertidores Gran Danés]. (<https://glasvangreatdane.com/greatdane/converter-dollies/>). Consultado el 7 de agosto de 2022. De dominio público.

Cabe mencionar que, en la legislación guatemalteca de transporte, solamente están permitidos dos semirremolques por cabezal, esto en las carreteras nacionales, pero puede darse el caso que en carreteras internas de industrias como ingenios azucareros se lleguen a encontrar tres, cuatro o hasta más semirremolques acoplados.

Dadas sus particularidades, los equipos de tipo semirremolque pueden ser muy variados en cuanto a su forma y función, yendo desde plataformas completamente planas hasta equipos complejos que hagan funciones de volteo y descarga de materiales. Por lo general, se podría decir que los semirremolques son de mayores dimensiones y capacidades que los remolques anteriormente mencionados.

Figura 4.

Semirremolque de tres ejes



Nota. Equipo de tipo semirremolque con cortinas laterales corredizas y tres ejes. Obtenido de Autoline Linemedia (2022). *Wielton 2016 curtain side semi-trailer*. [Semirremolque de cortina lateral Wielton 2016]. (<https://autoline.info/-/sale/curtain-side-semi-trailers/Wielton/STANDARD-SAF-DISC-COIL-MULDE-9m-2016--23112411111662506000>). Consultado el 7 de agosto de 2022. De dominio público.

Hay variedad de semirremolques según su forma y uso específico, dentro de algunos de los tipos se encuentran los siguientes:

2.1.3.1. Caja seca y caja refrigerada

Estos tipos de semirremolques son utilizados para transportar principalmente productos que necesitan protección de las condiciones del ambiente, también son conocidos como furgones y como se indica pueden ser secos o refrigerados, siendo básicamente la diferencia que unos cuentan con las características para mantener los productos a baja temperatura gracias a un equipo de refrigeración.

Figura 5.

Semirremolque caja refrigerada



Nota. Semirremolque de tipo caja refrigerada ligera. Obtenido de Zubiria Remolques (2022). *Cajas refrigeradas.* (<https://remolqueszubiria.com/cajas-refrigeradas/>), consultado el 7 de septiembre de 2022. De dominio público.

2.1.3.2. Plataformas

Los semirremolques tipo plataforma se suelen utilizar para transportar cargas que no requieren una protección al ambiente tan exigente, además, las cargas generalmente se cubren con lonas y se aseguran con fajas para evitar que algo llegue a desprenderse y salirse de la plataforma. Por su forma, tienen una gran versatilidad para transportar cargas de distintas formas y tamaños, siendo más común materiales de construcción o de grandes longitudes.

Ya que las plataformas tienden a ser utilizadas para llevar cargas muy pesadas y de gran longitud, su estructura principal o chasis debe contar con gran resistencia a las condiciones del camino.

Figura 6.

Semirremolque plataforma plana



Nota. Semirremolque de tipo plataforma plana. Obtenido de China CIMC (2022). CIMC 40ft Flatbed Trailer [Remolque plataforma plana 40pies CIMC] (<https://chinacimc.com/product/3-axle-40ft-flatbed-trailers-.html>). Consultado el 7 de septiembre de 2022. De dominio público

2.1.3.3. Cama baja o *lowboy*

Los semirremolques tipo cama baja o también conocidos como *lowboy* son utilizados para transportar cargas pesadas y que cuentan con una altura relativamente alta, la forma frontal de la cama baja suele conocerse como cuello de ganso, lo que permite que la superficie de carga esté a una menor altura del piso. Estos semirremolques transportan maquinaria de tipo agrícola, de movimiento de tierras, o alguna otra máquina que implique un desplazamiento lento y no permitido en las carreteras. Cuentan con distintas formas, capacidades y métodos de carga, ya sea por la parte frontal o posterior.

Figura 7.

Semirremolque cama baja



Nota. Cama baja o *lowboy* de cuello desmontable con tres ejes. Obtenido de Panda Mech (2022). *60 Ton hydraulic detachable gooseneck trailer* [Remolque hidráulico con cuello de ganso desmontable para 60 toneladas] (<https://www.pandamech.com/product/hydraulic-detachable-gooseneck-lowboy-trailer/>). Consultado el 8 de septiembre de 2022. De dominio público.

2.1.3.4. Cisterna de líquidos

Las cisternas son ampliamente usadas para el transporte de líquidos como combustibles, químicos o algún otro. Cada semirremolque de este tipo debe ser utilizado específicamente para el tipo de líquido que fue diseñado.

Las especificaciones de fabricación dependen mucho del tipo de líquido que estas van a transportar, en algunos casos, será necesario utilizar acero inoxidable o aluminio cuando se trate de productos alimenticios, químicos o combustibles. Es normal que, en caso de agua que no sea potable para uso de riego o contra incendios, sea suficiente utilizar acero laminado con un recubrimiento anticorrosivo.

Figura 8.

Semirremolque cisterna



Nota. Semirremolque cisterna de aluminio y acero inoxidable. Obtenido de China CIMC (2022). 35000 liters-50000 liters Aluminum Alloy Tanker Trailer [Remolque petrolero de aleación de aluminio 3500 litros – 5000 litros]. (<https://www.chinacimc.com/product/3-axle-fuel-semi-tanker-trailer.html>), consultado el 12 de agosto de 2022. De dominio público.

Existe más variedad de tipos de semirremolques, pero los anteriormente presentados son los que comúnmente se pueden encontrar en las carreteras de Guatemala, además sería demasiado extenso mencionar todas y cada una de las distintas variedades de semirremolques que pueden fabricarse.

2.1.4. Mantenimiento de semirremolques

Como todo medio de transporte, los semirremolques también deben contar con su respectivo mantenimiento, con el fin de conservar su funcionalidad e integridad durante el mayor tiempo posible. El mantenimiento en los semirremolques debe ser tomado seriamente en el manejo de flotas, ya que si alguno de sus sistemas llegara a fallar podría ocasionar accidentes en las carreteras. Es común que el mantenimiento asignado a estos equipos sea del tipo preventivo planificado y tipo correctivo, difícilmente se podría encontrar mantenimiento basado en condición ya que las flotas pueden llegar a ser muy grandes y la inversión sería bastante alta.

De manera general, se puede dividir los diferentes sistemas de un semirremolque para su mantenimiento de la siguiente manera:

2.1.4.1. Sistema de frenos neumático

El sistema de frenos es accionado por medio de aire comprimido brindado por el camión, cuenta con diferentes válvulas y accionadores que mueven las balatas de freno permitiendo la fricción que desacelera el vehículo.

El mantenimiento básico a los frenos suele ser la verificación de fugas de aire, la verificación del espesor de la pasta de freno y su graduación, y el cambio de piezas dañadas o desgastadas.

2.1.4.2. Sistema eléctrico

El sistema eléctrico comprende principalmente al sistema de iluminación y señalización del semirremolque. Todos los semirremolques deben contar con un

sistema de iluminación que permita su completa visualización durante el día y la noche.

A este sistema se le suele hacer un mantenimiento de verificación de conexiones, funcionamiento correcto de las lámparas y reemplazo en el caso de que sea necesario.

2.1.4.3. Sistema de suspensión

La suspensión de los semirremolques puede ser mecánica o neumática, aunque puede haber algunos casos especiales, estas dos son las más comunes. Como su nombre lo indica las suspensiones mecánicas suelen usar elementos de contacto como resortes que absorben las vibraciones, así mismo las suspensiones neumáticas se valen del sistema neumático del semirremolque y utilizan cámaras de aire para absorber más suavemente las vibraciones del camino.

En las suspensiones neumáticas se verifican fugas de aire, estado de las bolsas, bujes de polímero, alineación y reapriete de tornillos. Para las suspensiones mecánicas también se revisa bujes de polímero, desgaste de piezas, estado de los resortes, estado de soldaduras y apriete de tornillos.

2.1.4.4. Estructura del semirremolque

La estructura conforma todos los elementos que brindar soporte a los sistemas del semirremolque y que también pueden cumplir un propósito especial en el transporte de la carga. Por lo general, la estructura principal cuenta con perfiles de acero basados en normas internacionales como las de la ASTM.

El mantenimiento que se puede aplicar a la estructura sería, por ejemplo, revisión de corrosión, grietas en soldaduras y cuerpo del perfil, deformación excesiva, apriete de tornillos y desgaste por fricción.

2.2. Estructuras de acero

Las estructuras construidas en acero son fácilmente vistas en nuestro diario vivir, por mencionar algunos ejemplos como puentes, andamios, edificios, bodegas, torres eléctricas y de telefonía, vehículos, entre otros. El acero forma parte importante de la estructura de la sociedad desde hace ya bastante tiempo, hoy en día es muy difícil imaginar el avance de la humanidad sin el uso de este tan común pero tanpreciado material.

Dentro de las ventajas que presenta el uso del acero, se pueden mencionar su alta resistencia, uniformidad, elasticidad, durabilidad, ductilidad, tenacidad y relativa facilidad para trabajar con él. Cada una de estas características son propiedades que pueden ser modificadas de acuerdo a los elementos que se combinen para conforman el acero (McCormac & Csernak, 2012).

Así como existen ventajas también pueden presentarse desventajas en el uso del acero, aunque no necesariamente para todos los casos, por ejemplo: corrosión galvánica, corrosión por oxidación, costo de protección contra el fuego, susceptibilidad al pandeo, fatiga, fractura frágil. Se podría decir que otra desventaja es la variabilidad de su precio, ya que al ser un material utilizado mundialmente puede ser afectado en gran medida por alguna crisis global o algún megaproyecto de construcción.

Figura 9.

Falla por corrosión



Nota. Falla en un chasis de vehículo afectado por la corrosión y una previa soldadura. Obtenido de 355Nation.net (2020). *Cracked frame on GM weld* [Quebradura en soldadura de chasis de GM]. (<https://www.355nation.net/threads/cracked-frame-on-gm-weld.210828/>), consultado el 14 de agosto de 2022. De dominio público.

2.2.1. Tipos de acero estructural

Existe una gama muy variada de tipos de acero, esto debido a que un pequeño porcentaje de un elemento mezclado con el hierro genera propiedades distintas, pero no todos los aceros pueden o son recomendados para ser utilizados estructuralmente. La Sociedad Estadounidense para Pruebas de Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) se encarga de especificar los porcentajes de elementos como carbono, manganeso, magnesio, silicio, entre otros, que pueden permitirse en la fabricación de aceros estructurales.

La AISC recomienda diferentes tipos de acero para fabricar las diferentes formas de perfiles utilizados para las estructuras de acero. Los aceros recomendados son los clasificados por la norma ASTM y se pueden encontrar en una tabla del manual especificaciones de construcción en acero, ver Anexo 1. Como se puede observar en el anexo antes mencionado para la mayoría de perfiles se recomienda el acero al carbono A36, este acero tiene ya bastante tiempo en el mercado, pero se ha ido reemplazando por aceros de mejores características como el acero de baja aleación y alta resistencia A572 G50, así mismo el acero recomendado para perfiles huecos como tubos cuadrados y rectangulares se ha ido inclinando más al acero A500 B (McCormac & Csernak, 2012).

En la actualidad, se ha promovido la utilización de aceros de mejores prestaciones que permitan la construcción de estructuras más ligeras pero que conserven una buena resistencia estructural. Una de las empresas que fabrican estos aceros es la SSAB, que los designa como aceros avanzados de alta resistencia (AHSS por sus siglas en inglés), dentro de los cuales se puede mencionar el acero *Strenx* y que, según el fabricante, con un buen diseño se pueden alcanzar reducciones de peso hasta el 50% comparado con un acero A572 G50 (SSAB, 2015).

2.2.2. Fallas en estructuras de acero

La teoría dice que una de las principales causas de fallas en estructuras de acero es la fatiga, la que se puede definir como la reducción de resistencia en puntos en donde se localizan esfuerzos cíclicos y que pueden ser afectados por distintos factores como el tipo de unión, propiedades del material, el tipo de carga, acabado superficial, geometría de las piezas, entre otros (Instituto Técnico de la Estructura en Acero [ITEA], 1997).

Figura 10.

Falla por cambio de geometría y mala reparación



Nota. Falla localizada en el cambio de geometría de un chasis, se observa una previa reparación sin ningún tipo de refuerzo para contrarrestar ese punto crítico. Obtenido de ARTSA Institute (2014). *Chassis maintenance* [Mantenimiento de chasis] (<https://www.artsa.com.au/conferences/tmc/2014/index.html>), consultado el 14 de agosto de 2022. De dominio público.

La estructura de los semirremolques está sometida siempre a cargas cíclicas que generan distintas frecuencias y vibraciones, creando el riesgo de sufrir fatiga, es entonces que se hace notar la concentración de tensiones en puntos con cambio de geometría, perforaciones, uniones soldadas y pernadas, todos estos factores tienden a ir en aumento cuanto más compleja y grande sea la estructura. (Andrew & Singer, 2008, p.420)

Es muy importante recalcar que los equipos de tipo semirremolque pueden haber sido diseñados y calculados para soportar las cargas y ciclos de trabajo solicitados, pero pueden presentarse situaciones que modifiquen

en cierta manera los parámetros iniciales de diseño, por tal motivo es normal diseñarlos con cierto factor de seguridad para tratar de cubrir estos imprevistos en la fabricación u operación. (Budynas & Keith, 2008, p.17)

Figura 11.

Fractura de chasis y su reparación



Nota. Ejemplo de fractura en un chasis justo en un punto de concentración de tensiones y su posterior reparación. Obtenido de Miller Electric Forums (2010). *Trailer cracked frame repair* [Reparación de fractura en chasis de remolque] (<https://forum.millerwelds.com/forum/welding-projects/23980-trailer-cracked-frame-repair>), consultado el 14 de agosto de 2022. De dominio público.

2.3. Diseño CAD y análisis de elementos finitos

El diseño asistido por computadora o solamente CAD por sus siglas en inglés, ha tomado un gran auge gracias al avance de la tecnología y la creación de *hardware* con mucha potencia y menor tamaño. El CAD es básicamente una técnica de análisis que permite la creación del modelo de un producto incluso antes de que sea fabricado, esto con el propósito de ver su comportamiento, cuantificación de materiales y viabilidad (Rojas y Rojas, 2006).

La utilización de un *software* CAD puede presentar ventajas sobre el diseño tradicional de dibujo técnico en papel como, por ejemplo:

- Realizar y modificar croquis en tiempo real de forma precisa.
- Modificación de modelos más fácilmente.
- Calcular propiedades como el peso de un componente o un equipo completo.
- Visualización de interferencias entre piezas antes de la fabricación.
- Posibilidad de calcular deformaciones o fallas.
- Generación de planos de producción y fabricación más rápida y dinámica.
- Visualización de los productos con calidad de fotorrealismo.

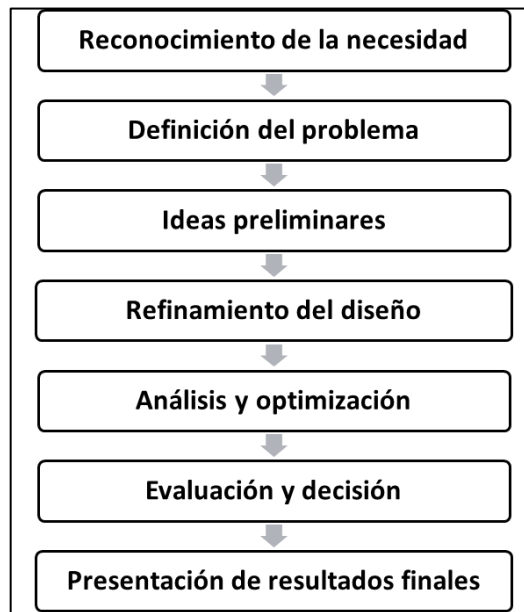
2.3.1. Software CAD SolidWorks

SolidWorks es un *software* CAD de la empresa Dassault Systèmes mundialmente conocido por ofrecer un gran abanico de soluciones para diferentes industrias. Dichas soluciones cuentan con gran precisión, interfaz intuitiva y con una curva de aprendizaje amigable para el usuario. Este *software* tiene la posibilidad de acompañar y generar la información en todo el proceso de

diseño, lo que es muy útil al momento de iniciar un proyecto desde la concepción de la idea inicial.

Figura 12.

Proceso típico del diseño



Nota. Esquema del procedimiento típico para la elaboración de un diseño. Elaboración propia, realizado en Microsoft Word.

2.3.2. Análisis de elementos finitos en *SolidWorks*

Dassault Systèmes también cuenta con el *software* de simulación y análisis de elementos finitos que trabaja en conjunto con *SolidWorks*, básicamente un análisis de elementos finitos consiste en dividir un modelo de tres dimensiones en pequeñas partes, por medio de cálculos complejos y muy pesados se obtienen las deformaciones en cada uno de estos pequeños

elementos, para así posteriormente representarlos de manera gráfica para su posterior análisis.

Figura 13.

Proceso de análisis de elementos finitos

1. Selección del tipo de análisis	• Hay análisis estáticos, de frecuencia, fatiga, etc.
2. Carga del modelo a analizar	• Se carga el modelo en 3D para su análisis.
3. Restricciones de movimiento	• Se establece el movimiento permitido o previsto del modelo.
4. Ingreso de cargas	• Se agregan las cargas que estarían afectando a la pieza.
5. Selección del material	• Se aplica el material con todas las propiedades necesarias.
6. Selección y trazado de mallado	• Se define el tamaño de los elementos que conforman la malla.
7. Correr la simulación	• Se inicial el cálculo con todas las condiciones ya establecidas.
8. Presentación gráfica de resultados	• Se presentan con una paleta de colores para identificar los resultados.
9. Análisis y toma de decisiones	• Se toma la decisión de continuar con el diseño o realizar cambios.

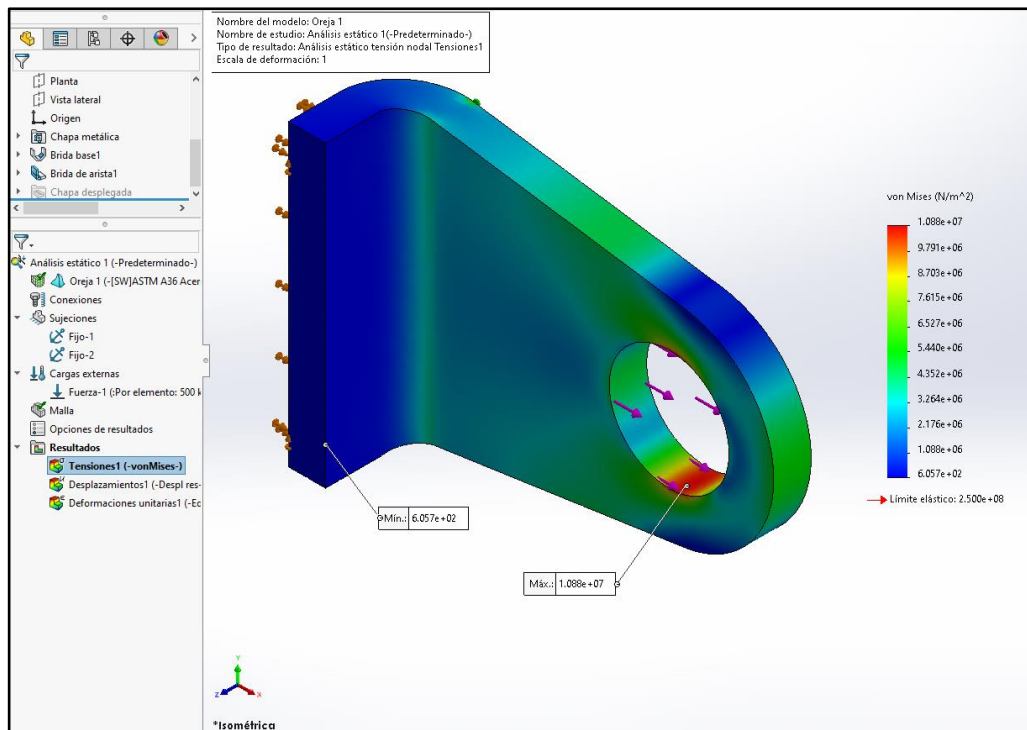
Nota. Diagrama del proceso simple para realizar un análisis de elementos finitos (FEA).
Elaboración propia, realizado en Microsoft Word.

La presentación final de resultados típicamente se observa en una paleta de colores que permitan la identificación de las condiciones que se quieren encontrar en el modelo. Es importante ajustar los rangos de los resultados para que puedan ser interpretados adecuadamente, ya que una visualización pobre

de los resultados va a dificultar el análisis y las conclusiones a las que se quiere llegar.

Figura 14.

Presentación de resultados finales FEA



Nota. Ejemplo de los resultados de un análisis de elementos finitos en una pieza de soporte.
Elaboración propia, realizado en *SolidWorks 2020*.

3. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de los distintos análisis realizados al equipo de tipo semirremolque seleccionado. Dichos resultados incluyen gráficas, tablas e imágenes que hacen más comprensible la interpretación y así con esto obtener mejores conclusiones.

La interpretación de resultados se encuentra en su respectiva sección, y es en donde se da una explicación más detallada de la información obtenida en los diferentes casos de análisis.

3.1. Revisión documental

Durante la revisión documental, se determinó que los aceros más utilizados para la fabricación de semirremolques son: el ASTM A36 y ASTM A572 G50 para láminas y ciertos perfiles; además, se encuentra el acero ASTM A500 B que se emplea principalmente para perfiles cerrados cuadrados y rectangulares. Por su parte, el acero *Strenx 700 MC* abarca en su mayoría formatos de láminas de varios espesores (Vargas, 2018).

La documentación referente a la construcción en estructuras de acero presenta distintos tipos de uniones, para efectos de esta investigación se consideraron cinco y una prueba de control que define el modelo completamente unido (Celigüeta, 2021).

3.1.1. Selección del equipo a analizar

El equipo seleccionado para el análisis es un semirremolque tipo plataforma plana con un sistema de cortinas laterales para proteger la carga. Este equipo está enfocado a transportar pallets de bebidas. Cuenta con tres ejes y suspensiones neumáticas.

La elección de este equipo viene dada a que la mayoría de estos productos son importados de diferentes países, por lo que hay una oportunidad de incursionar en este mercado y mejorar la presencia de los productos de fabricación nacional. Este tipo de equipos difieren en la fabricación respecto a los equipos de tipo agrícola, en el sentido de que deben ser lo menos pesados posible y tener gran capacidad de carga, por lo que no deben ser tan robustos como los de tipo agrícola que se transportan en caminos rústicos.

Figura 15.

Modelo seleccionado para análisis



Nota. Equipo seleccionado para realizar los diferentes FEA, se trata de un semirremolque tipo plataforma plana para transporte de bebidas. Elaboración propia, realizado en *SolidWorks* 2020.

3.1.2. Parámetros para análisis de material de fabricación

Para realizar un análisis de elementos finitos, es necesario establecer los parámetros y condiciones a los que se va a ser sometido el modelo CAD. Dichos parámetros pueden variar de acuerdo al tipo de análisis que se necesite hacer. En este equipo se realiza un análisis estático al ensamble principal del chasis, ya que la recomendación del soporte técnico del *software* es simplificar el modelo para que no se presenten errores con demasiada frecuencia. Para complementar el análisis estático se efectuó también un FEA de fatiga a 100,000 ciclos, con el cual se obtienen datos importantes para ver el desempeño de los elementos cuando se aplica la carga una cantidad de ciclos. El análisis cuenta con dos escenarios o condiciones:

- Escenario 1
 - Se considera una masa distribuida de 30 000 kg en todos los travesaños que soportan el piso de aluminio del equipo.
 - Se activa la aceleración de la gravedad para que el peso del equipo también afecte el análisis.
 - Se establece una sujeción de tipo bisagra fija en la posición del perno rey, para simular la quinta rueda del camión de remolque.
 - Se establecen soportes elásticos de ambos lados en las platinas, en donde se instalan las suspensiones para simular amortiguamiento de esta zona.
 - Todos los elementos son considerados como sólidos.
 - La malla utilizada es la basada en curvatura.

- Escenario 2
 - Se considera una masa distribuida de 30 000 kg en todos los travesaños que soportan el piso de aluminio del equipo.
 - Se activa la aceleración de la gravedad para que el peso del equipo también afecte el análisis.
 - Se establece una sujeción de tipo bisagra fija en la posición del perno rey, para simular la quinta rueda del camión de remolque.
 - Se establecen soportes elásticos de un solo lado del chasis, esto para simular una fuerte torsión que pueda generar un efecto muy desfavorable para el equipo.
 - Todos los elementos son considerados como sólidos.
 - La malla utilizada es la basada en curvatura.

3.1.3. Parámetros para el análisis de uniones

Para analizar los diferentes tipos de uniones, se creó un ensamble de un lado de las vigas principales con tres travesaños de refuerzo, con esto se obtienen resultados de esta zona en particular. Para aplicarle las cargas, se utilizaron las reacciones en los travesaños del FEA del chasis en el escenario 2, con el propósito de apreciar el comportamiento de la unión en una condición desfavorable.

3.2. Resultados

A continuación, se encuentran los resultados de los tres materiales elegidos para su análisis, en los dos escenarios previamente establecidos, los cuales afectan de diferente manera el comportamiento del modelo.

3.2.1. Análisis de material de fabricación

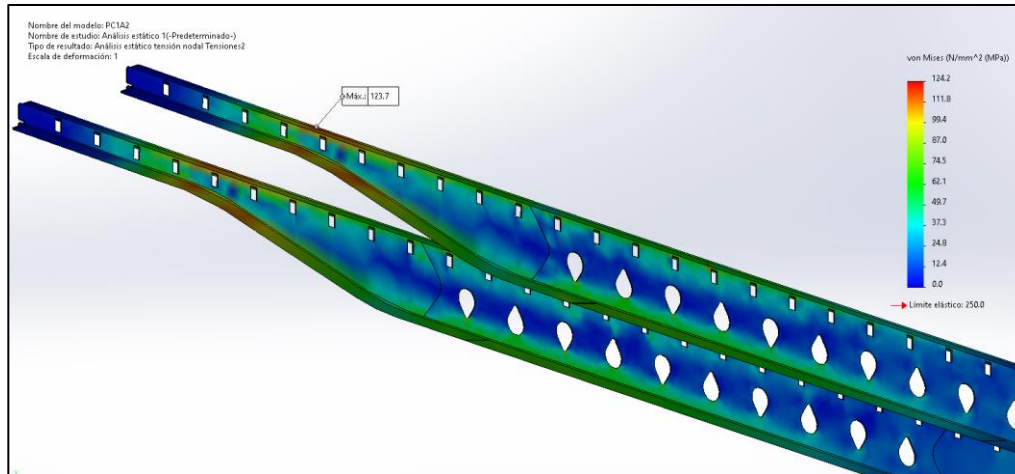
En el siguiente apartado se incluyen distintas imágenes, las cuales muestran la manera que el *software SolidWorks* presenta los resultados FEA, al final se incluye también una tabla en donde se encuentran los datos numéricos en orden. Para efectos de no hacer tan extensa la presentación por cada tipo de material, solamente se incluyen las imágenes para el acero ASTM A36, de los otros materiales se incluye la tabla respectiva con los resultados numéricos.

3.2.1.1. Acero ASTM A36

Este material está aplicado a la mayoría de componentes que se analizan en esta estructura del chasis. Las imágenes muestran los datos de las vigas principales y algunos en donde no se puede hacer una selección solo de estos elementos por limitaciones del *software*. El límite elástico de este acero es de 250 MPa (Altos Hornos de México, 2013).

Figura 16.

Esfuerzo en vigas principales, condición 1

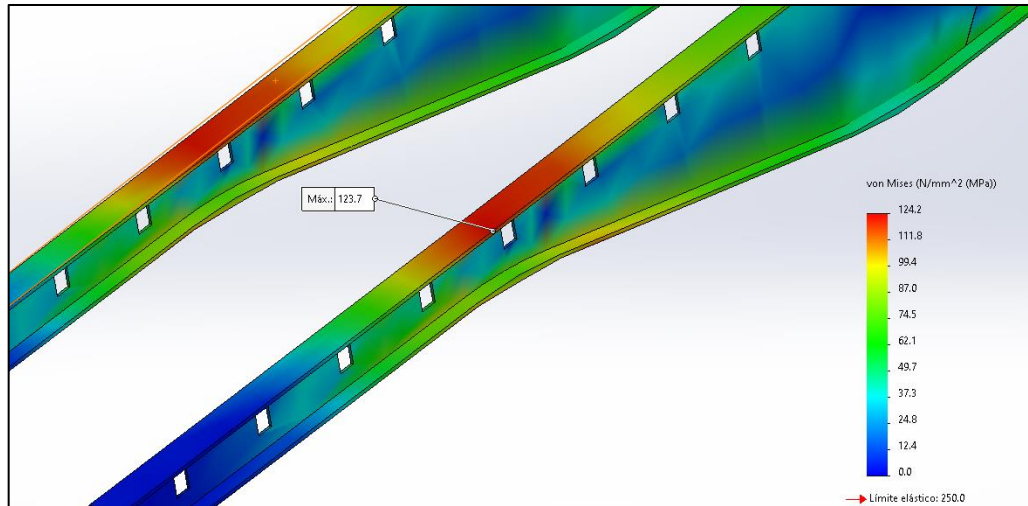


Nota. Esfuerzo resultante en las vigas principales del chasis aplicando la condición 1. Elaboración propia, realizado en *SolidWorks 2020*.

La imagen anterior muestra los esfuerzos generados por las cargas y sujeciones previamente aplicadas para realizar el FEA. Del lado derecho, se observa la escala de colores que facilita la identificación de las zonas con esfuerzos altos de color rojo y azul las de menor esfuerzo, así mismo se indica el punto en donde se presenta el máximo esfuerzo y el límite elástico del material elegido.

Figura 17.

Acercamiento del esfuerzo en condición 1

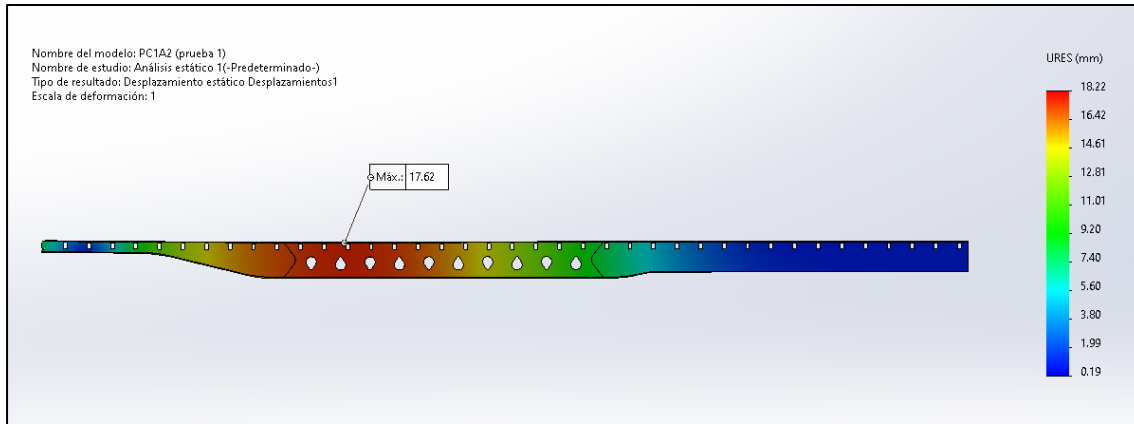


Nota. Acercamiento a la zona con mayor esfuerzo en condición 1. Elaboración propia, realizado en *SolidWorks 2020*.

En la imagen se puede apreciar mejor la zona con mayor esfuerzo y la escala con el indicativo del límite elástico del material, ASTM A36 en este caso. La escala de los esfuerzos está configurada para mostrar las cantidades en megapascuales, para que sea más fácil de visualizar y comprender las cifras. La imagen muestra solamente el esfuerzo en las vigas principales, que es de 123.7 MPa. Se observa cómo el patín superior es el que más esfuerzos presenta.

Figura 18.

Deformación máxima en vigas, condición 1

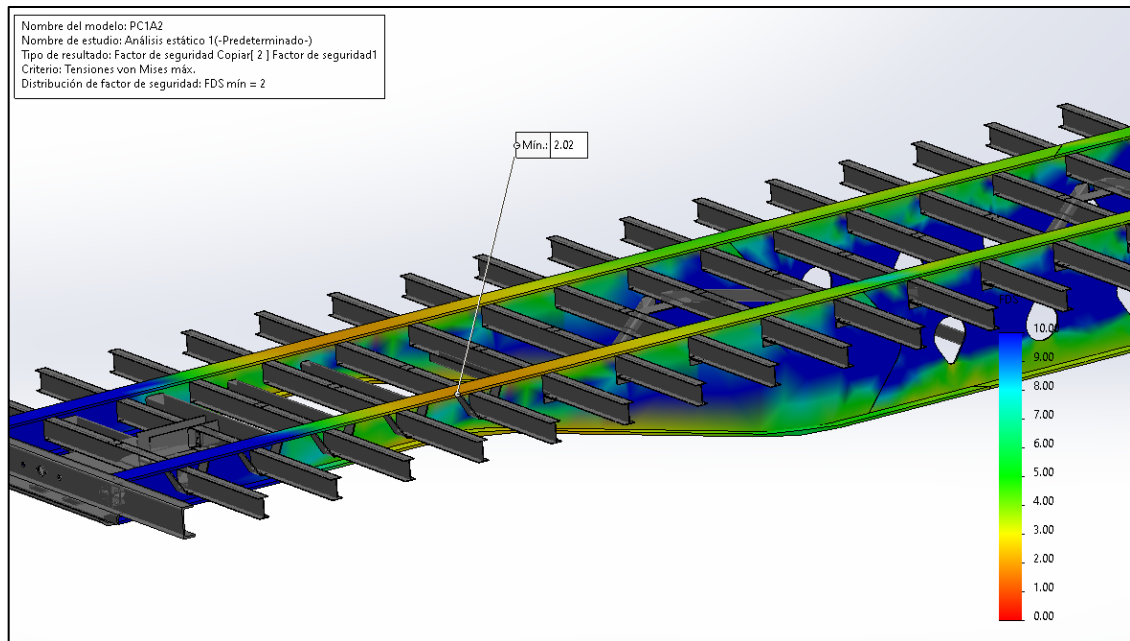


Nota. Deformación máxima en las vigas principales del chasis aplicando la condición 1. Elaboración propia, realizado en *SolidWorks* 2020.

La imagen anterior muestra la deformación máxima en las vigas principales del chasis en la condición 1, siendo este desplazamiento de 17.62 mm o lo que es lo mismo 1.76 cm. Hay que destacar que esta deformación es la calculada al aplicar la carga establecida, más el peso del ensamble analizado.

Figura 19.

Factor de seguridad mínimo en vigas, condición 1

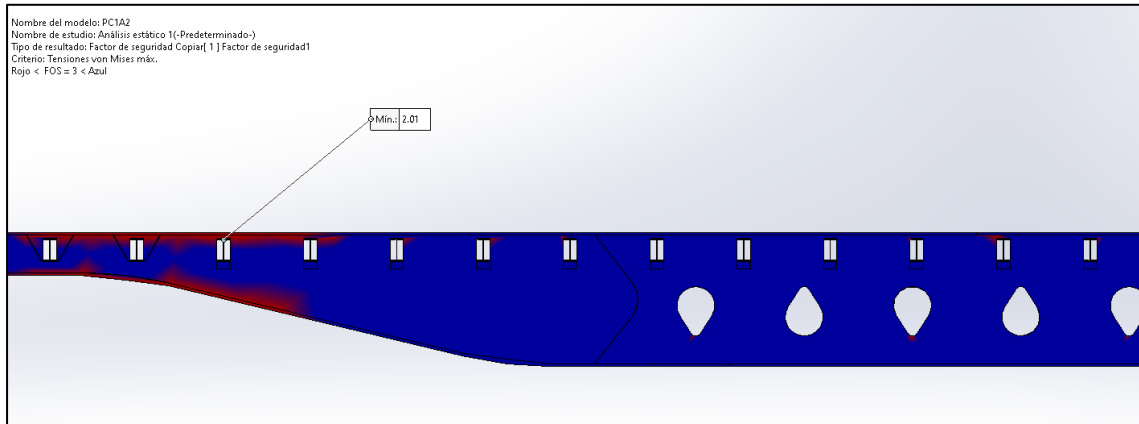


Nota. Indicación del factor de seguridad mínimo en las vigas principales del chasis aplicando la condición 1. Elaboración propia, realizado en *SolidWorks* 2020.

En esta figura previa se encuentra el factor de seguridad mínimo soportado por las vigas principales del chasis bajo la condición 1, en estos resultados el número que importa es el mínimo, ya que representa cuántas veces más podría soportar la carga el equipo, cuanto más alto sea el factor mínimo mejor soporta la carga. Se puede apreciar en este resultado un factor mínimo de 2.02 para el acero ASTM A36.

Figura 20.

Distribución del factor de seguridad, condición 1

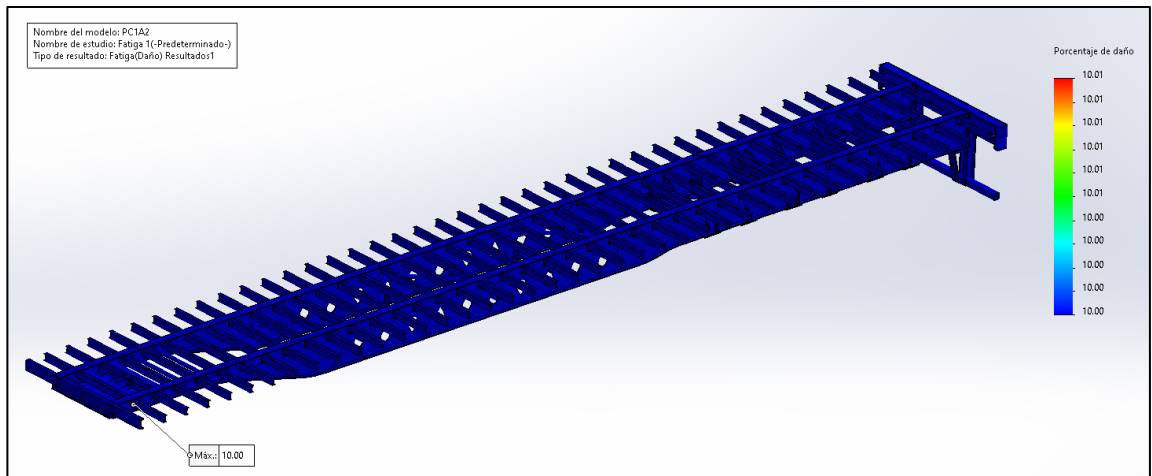


Nota. Áreas o puntos en donde se concentran los mayores esfuerzos en la condición 1.
Elaboración propia, realizado con *SolidWorks* 2020.

La imagen anterior muestra las zonas y puntos en donde el factor de seguridad que es superior a 3 es representado de color azul, y en color rojo un factor de seguridad inferior al mismo número. El número 3 se utilizó precisamente para resaltar un factor de seguridad cercano al obtenido en el análisis, esto con el fin de identificar puntos de concentración de tensiones o de esfuerzos altos.

Figura 21.

Daño por fatiga, condición 1

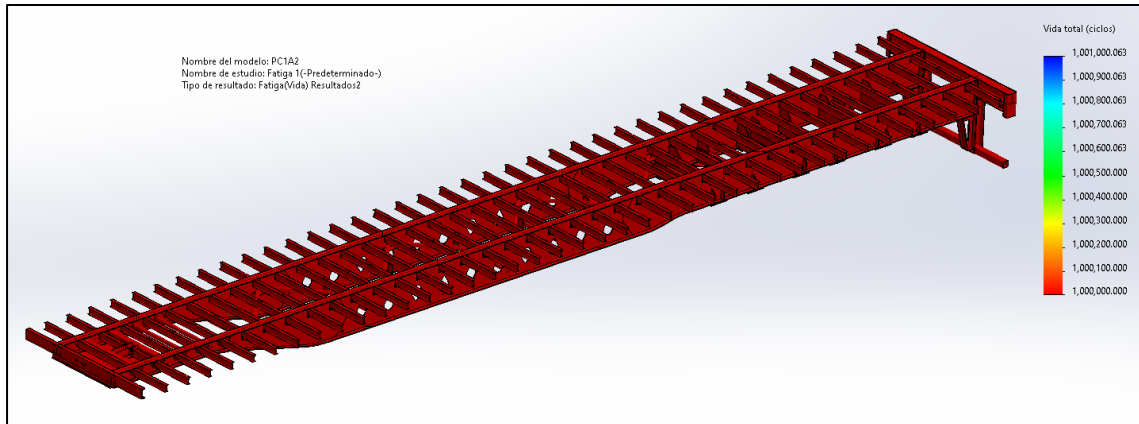


Nota. Daño máximo dentro de la estructura calculada por fatiga aplicando la condición 1. Elaboración propia, realizado con *SolidWorks* 2020.

El daño por fatiga representado en la imagen previa es un indicativo del porcentaje máximo que sufre el ensamble de chasis analizado, los resultados de fatiga no se pueden mostrar solamente en las vigas principales del chasis por limitaciones del *software*, ya que no cuenta con esa opción es posible que una versión más reciente este inconveniente si haya sido corregido. En la imagen, se muestra un daño máximo de 10.01 % para 100,000 ciclos de estudio.

Figura 22.

Ciclos de vida por fatiga, condición 1

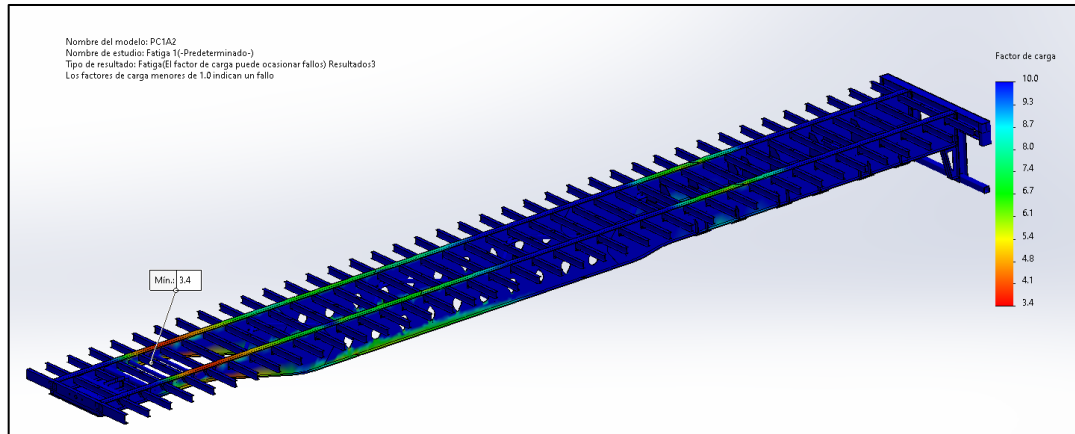


Nota. Ciclos mínimos calculados por fatiga aplicando la condición 1. Elaboración propia, realizado con *SolidWorks 2020*.

La imagen antes vista muestra la representación de la vida mínima obtenida en el análisis de fatiga, el valor se muestra en ciclos y en donde un valor de 1,000,000 indica un desempeño muy duradero en condiciones ideales.

Figura 23.

Factor de carga en chasis, condición 1

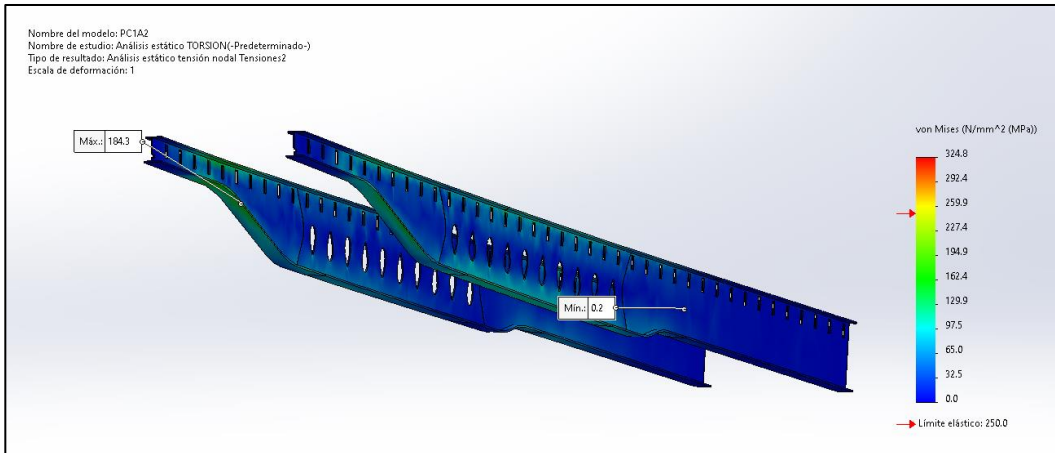


Nota. Factor de carga mínimo en el chasis calculado por fatiga aplicando la condición 1. Elaboración propia, realizado con *SolidWorks* 2020.

La imagen antes presentada indica el factor de carga mínimo que se obtiene en el chasis por medio del análisis de fatiga, un valor igual o menor de 1 indica una falla en ese punto. Por medio de la coloración de la escala, se pueden encontrar más fácilmente las zonas afectadas.

Figura 24.

Esfuerzo en vigas principales, condición 2

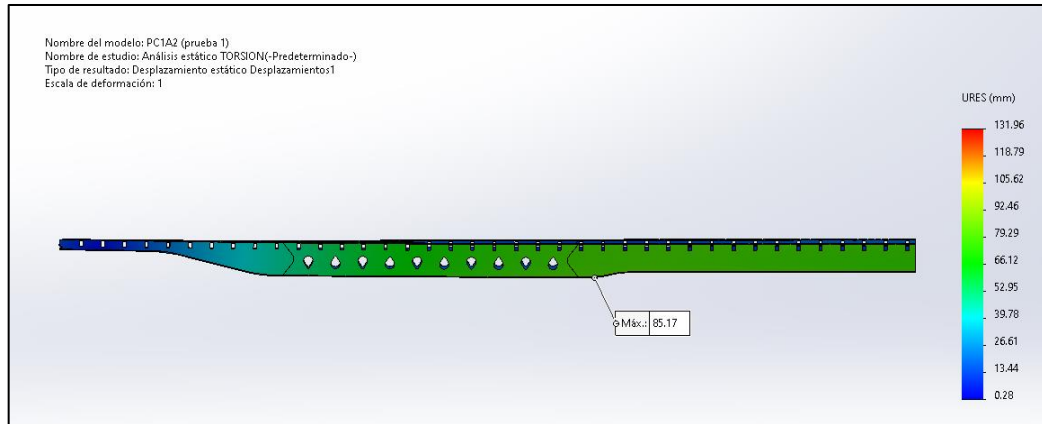


Nota. Esfuerzo resultante en las vigas principales del chasis aplicando la condición 2. Elaboración propia, realizado con *SolidWorks 2020*.

En la imagen previa se encuentra el resultado del esfuerzo en las vigas bajo la condición 2, se aprecia cómo el punto con el valor máximo cambia de ubicación al cambiar los parámetros del análisis.

Figura 25.

Deformación máxima en vigas, condición 2

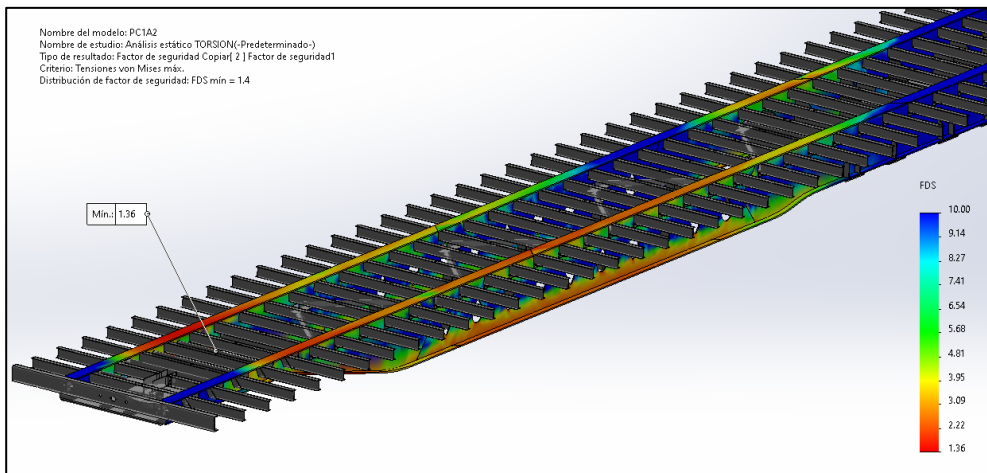


Nota. Deformación máxima en las vigas principales del chasis aplicando la condición 2. Elaboración propia, realizado con *SolidWorks* 2020.

El desplazamiento de la imagen anterior se eleva ya que la condición 2 excluye los soportes de un lado del chasis, de lo cual se puede notar que la viga principal de ese lado se mueve de manera significativa respecto a la del lado con soportes.

Figura 26.

Factor de seguridad mínimo en vigas, condición 2

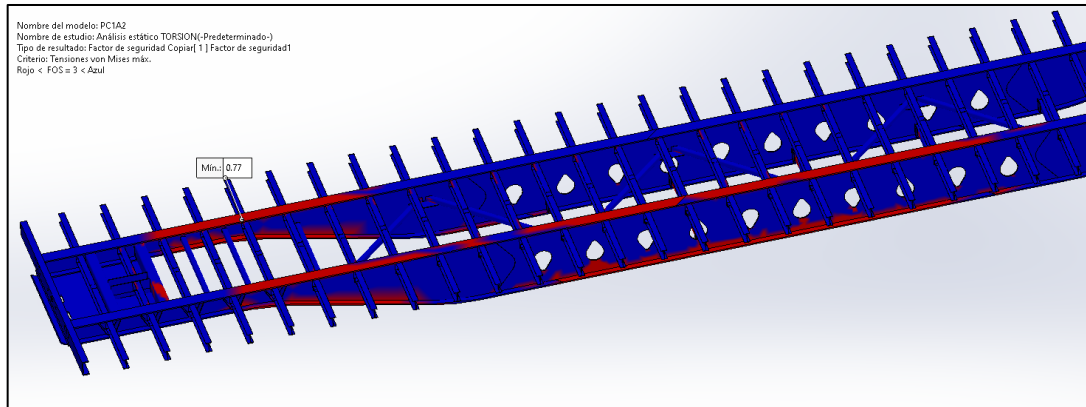


Nota. Indicación del factor de seguridad mínimo en las vigas principales del chasis aplicando la condición 2. Elaboración propia, realizado con *SolidWorks* 2020.

En la anterior imagen se ve como el factor de seguridad va cambiando de manera diferente en las dos vigas principales, lo que es de espera ya que cada una sufre de diferente manera los esfuerzos debidos a los parámetros establecidos en la condición 2.

Figura 27.

Distribución del factor de seguridad, condición 2

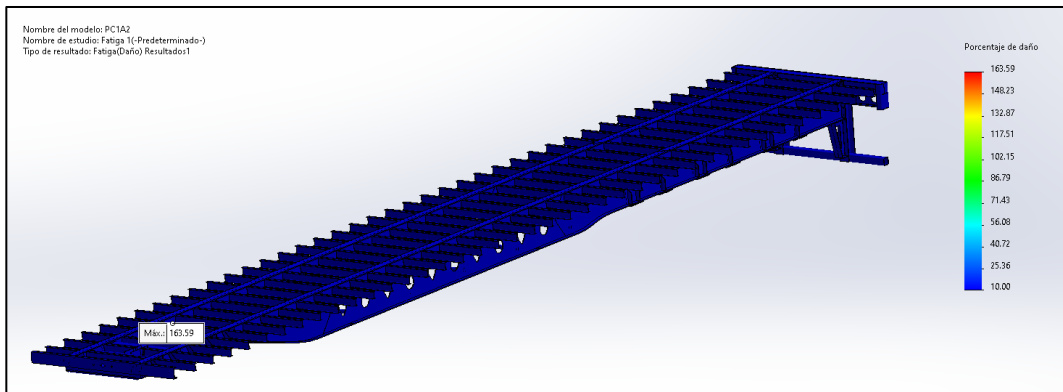


Nota. Áreas o puntos en donde se concentran los mayores esfuerzos en la condición 2.
Elaboración propia, realizado con *SolidWorks* 2020.

Se puede apreciar de mejor manera el efecto del cambio de soportes de la condición 2 en la imagen anterior, en donde las zonas rojas son áreas con mayor concentración de tensiones. La figura muestra la distribución del factor de seguridad en la estructura analizada.

Figura 28.

Daño por fatiga, condición 2

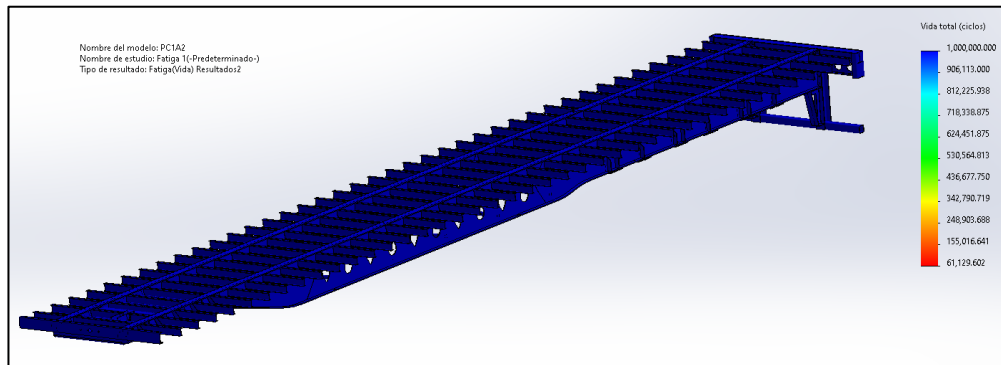


Nota. Daño máximo dentro de la estructura calculada por fatiga aplicando la condición 2.
Elaboración propia, realizado con *SolidWorks 2020*.

El daño mostrado por la imagen anterior está expresado en porcentaje e indica el porcentaje de la vida de la estructura perdido por los efectos de la fatiga. Entonces, el daño no representa el porcentaje de la estructura que falla, sino el porcentaje calculado de la vida perdida que duraría la estructura bajo la condición 2.

Figura 29.

Ciclos de vida por fatiga, condición 2

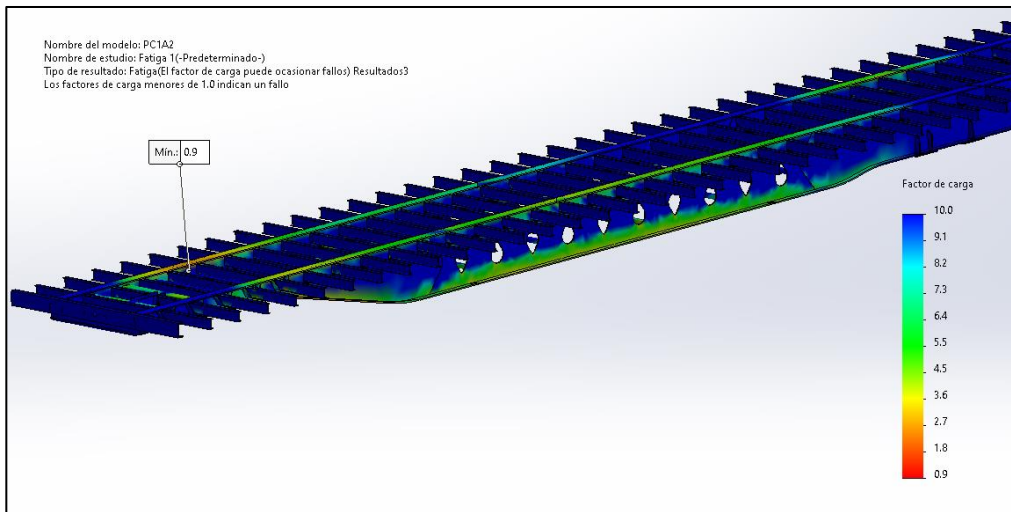


Nota. Ciclos mínimos calculados por fatiga aplicando la condición 2. Elaboración propia, realizado con *SolidWorks* 2020.

La anterior imagen presenta los ciclos de vida que el chasis soportaría según el análisis de fatiga bajo la condición 2, se encuentra el valor máximo y un valor mínimo, el que importa realmente es el valor mínimo, ya que es la cantidad de ciclos que soportaría antes de fallar, en este caso llega a 61,129.

Figura 30.

Factor de carga en chasis, condición 2



Nota. Factor de carga mínimo en el chasis calculado por fatiga aplicando la condición 2.
Elaboración propia, realizado con *SolidWorks 2020*.

Al igual que el factor de seguridad, el factor de carga indica la capacidad de la estructura de soportar las cargas generadas por la condición 2, por lo que si el factor de carga presenta una cantidad inferior a 1 es un indicativo de falla.

Tabla 2.

Resultados en chasis con acero ASTM A 36

Tipo de resultado	Variable	Condición 1	Condición 2
Esfuerzo máximo en vigas	MPa	123.7	184.30
Factor de seguridad mínimo	Adimensional	2.02	1.36
Deformación máxima	mm	17.62	85.17
Puntos críticos	Adimensional	24	32.00
Daño (fatiga)	%	10	163.59
Vida (fatiga)	Ciclos	1,000,000	61,129.00
Factor de carga (fatiga)	Adimensional	3.4	0.90

Nota. Tabla con resultados de las dos condiciones establecidas para los FEA en el acero ASTM A36. Elaboración propia, realizado con Word 2019.

3.2.1.2. Acero ASTM A572 G50

Al igual que en el material anterior, la mayoría de elementos que conforman el chasis están ahora con el acero estructural ASTM A572 G50, a excepción de elementos como perfiles rectangulares o cuadrados que tienen su propia norma de material. El límite elástico de este acero es de 345 MPa (Altos Hornos de México, 2013).

“El acero ASTM A572 G50 cuenta con propiedades intermedias entre el acero ASTM A36 y el acero *Strenx 700 MC*” (Cházaro, 2019a, p.16).

En la Tabla 2, se presenta los resultados de las mismas pruebas expuestas en la sección del acero ASTM A36.

Tabla 3.

Resultados en chasis con acero ASTM A572 G50

Tipo de resultado	Variable	Condición 1	Condición 2
Esfuerzo máximo en vigas	MPa	122.6	187.70
Factor de seguridad mínimo	Adimensional	2.81	1.89
Deformación máxima	mm	17.63	85.29
Puntos críticos	Adimensional	6	25.00
Daño (fatiga)	%	10	15.95
Vida (fatiga)	Ciclos	1,000,000	627,035.00
Factor de carga (fatiga)	Adimensional	3.6	1.36

Nota. Tabla con resultados de las dos condiciones establecidas para los FEA en el acero ASTM A572 G50. Elaboración propia, realizado con Word 2019.

3.2.1.3. Acero *Strenx* 700 MC

El acero *Strenx* se aplica en este caso en los elementos de tipo chapa metálica, por lo que los componentes como perfiles de vigas 'C' u otro tipo se mantendrán según su norma, ya sea ASTM A572 G50 o ASTM A500 B.

De cualquier manera, el acero *Strenx* conforma las vigas principales del chasis y también los refuerzos en estas. El límite elástico de este acero es de 700 MPa.

Tabla 4.

Resultado en chasis con acero Strenx 700 MC

Tipo de resultado	Variable	Condición 1	Condición 2
Esfuerzo máximo en vigas	MPa	123.9	184.58
Factor de seguridad mínimo	Adimensional	5.65	3.71
Deformación máxima	mm	17.62	86.60
Puntos críticos	Adimensional	0	1.00
Daño (fatiga)	%	10	37.10
Vida (fatiga)	Ciclos	1,000,000	268,788.00
Factor de carga (fatiga)	Adimensional	3.72	1.19

Nota. Tabla con resultados de las dos condiciones establecidas para los FEA en el acero *Strenx 700 MC*. Elaboración propia, realizado con Word 2019.

3.2.2. Análisis de tipos de uniones

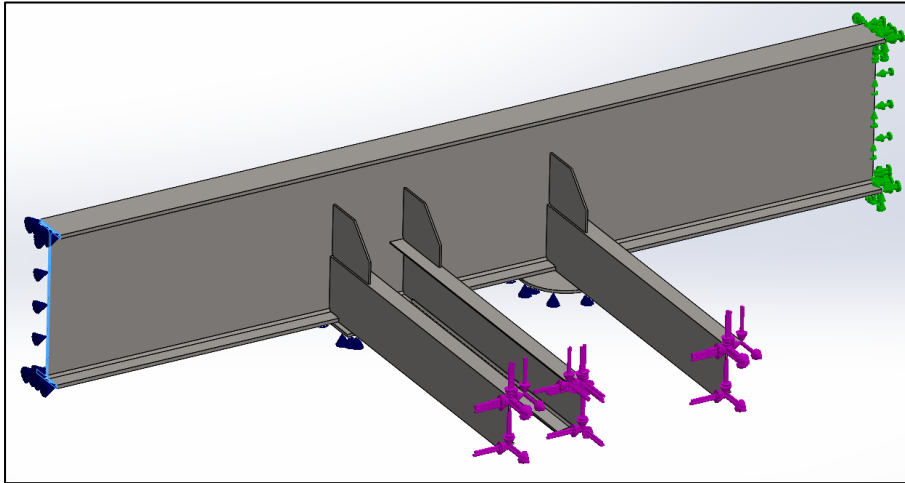
En esta sección se muestran los resultados de analizar distintas formas de unir las dos vigas principales del chasis. Para las diferentes uniones se siguió como guía de la norma ANSI/AISC 360-16, la cual se encuentra incluida dentro del manual de construcción en acero de esta misma asociación (AISC Committee on Manuals, 2017).

3.2.2.1. Unión de control

Tipo de unión sin aplicar especificaciones de la norma y un análisis con los parámetros estándar del *software* de análisis. El *software* en esta condición considera todo el ensamble como unión rígida.

Figura 31.

Unión de control, sin especificaciones de norma

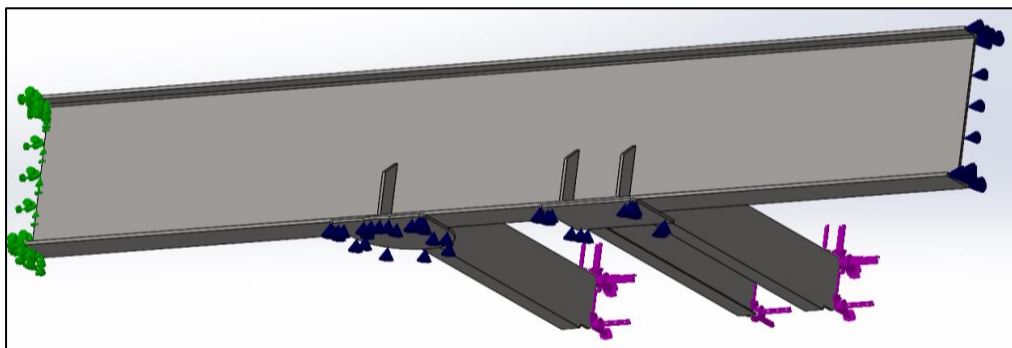


Nota. Unión de control, sin mayores cambios en los parámetros de análisis ni especificaciones de normas. Elaboración propia, realizado con SolidWorks 2020.

La unión de control sin condiciones especiales para el análisis, solamente cuenta con las sujeciones y cargas establecidas.

Figura 32.

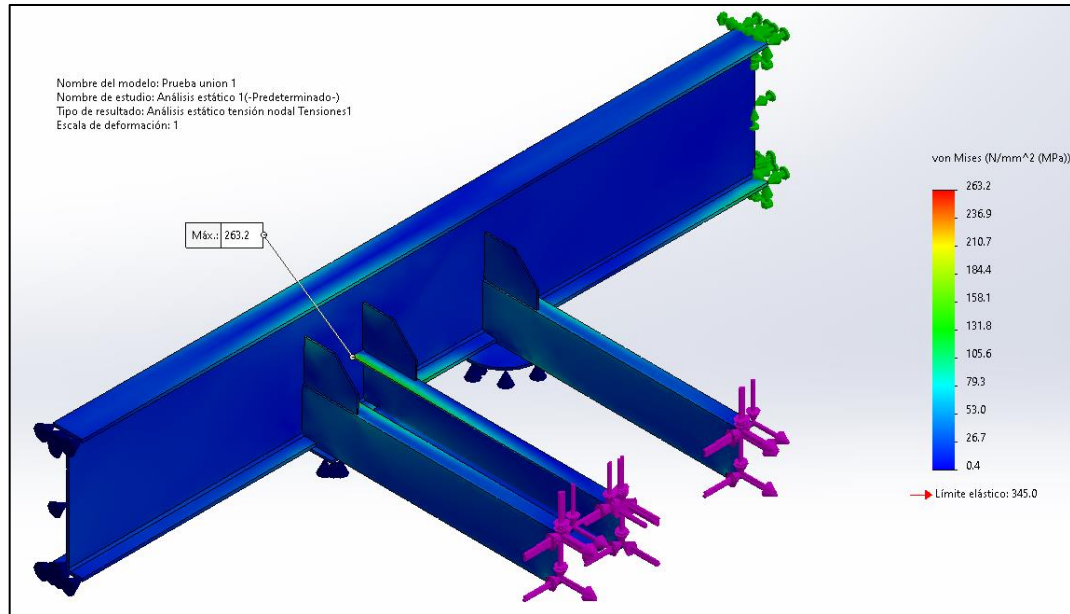
Refuerzos del lado contrario de la viga



Nota. Refuerzos del lado inverso de la viga, estos son iguales en los distintos tipos de unión analizada. Elaboración propia, realizado con SolidWorks 2020.

Figura 33.

Esfuerzo en unión de control

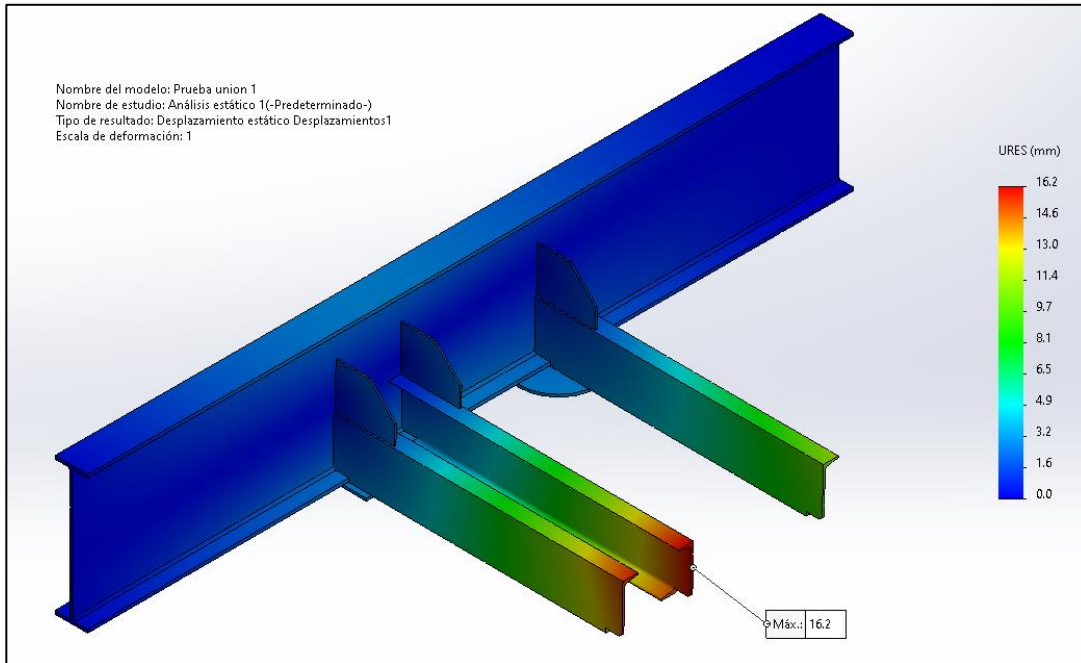


Nota. Esfuerzo máximo presentado en la unión de control. Elaboración propia, realizado con SolidWorks 2020.

Imágenes de los esfuerzos y la deformación resultantes en la unión de control.

Figura 34.

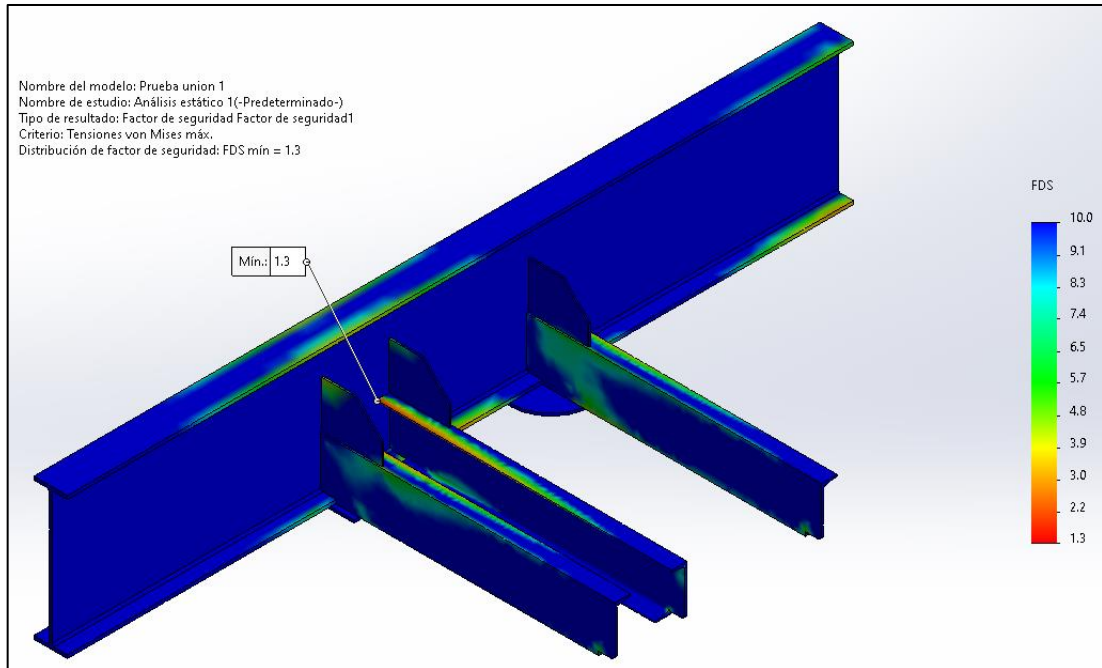
Deformación máxima en la unión de control



Nota. Deformación presentada en la unión de control. Elaboración propia, realizado con SolidWorks 2020.

Figura 35.

Factor de seguridad mínimo en unión de control

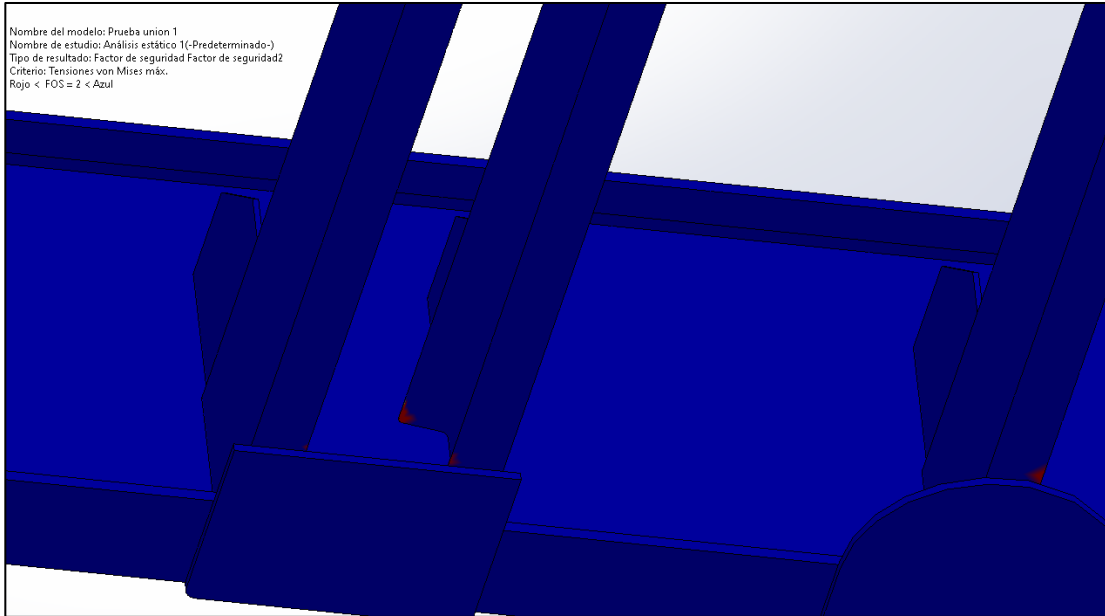


Nota. Factor de seguridad mínimo soportado en la unión de control. Elaboración propia, realizado con SolidWorks 2020.

El factor de seguridad mínimo y los puntos críticos presentes en la prueba de control.

Figura 36.

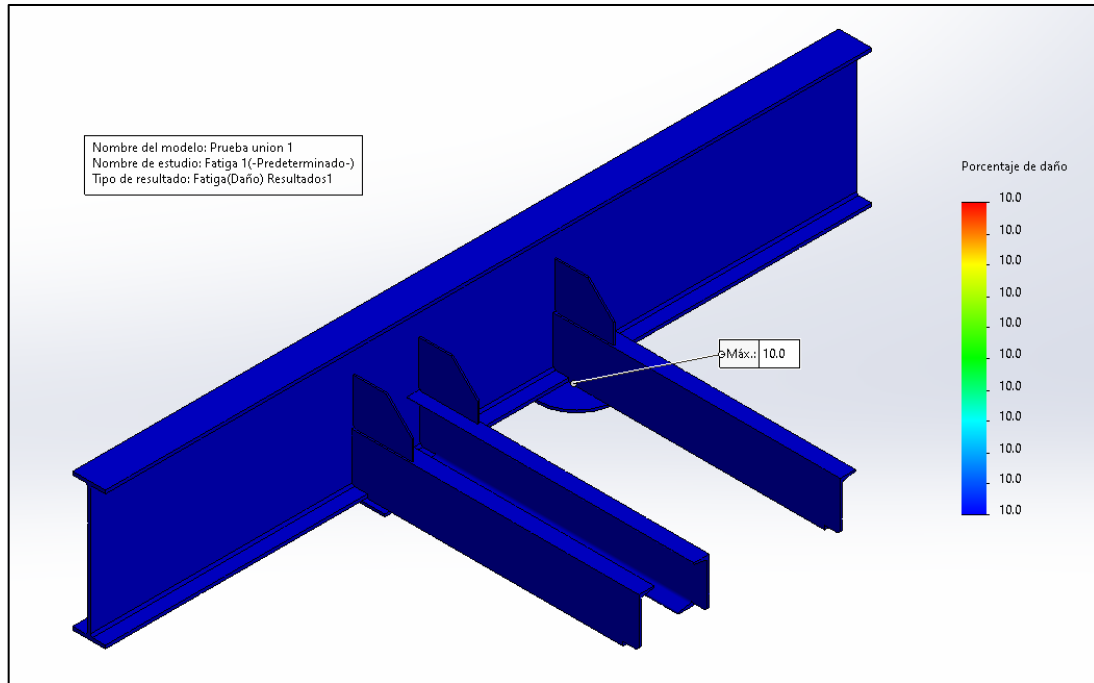
Distribución del factor de seguridad en unión de control



Nota. Distribución del factor de seguridad mínimo en la unión de control, refleja los puntos de concentración de tensión. Elaboración propia, realizado con SolidWorks 2020.

Figura 37.

Daño por fatiga, unión de control

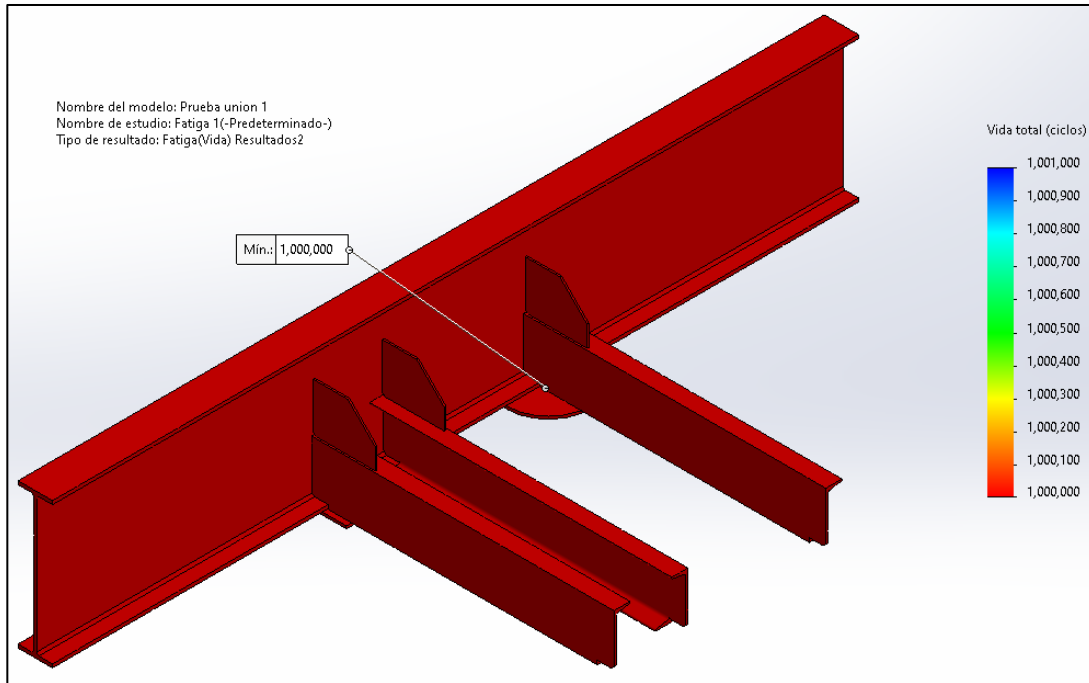


Nota. Daño máximo de la unión de control calculada por fatiga. Elaboración propia, realizado con SolidWorks 2020.

Resultados del análisis de fatiga en la unión de control, los datos muestran un buen comportamiento frente los parámetros establecidos.

Figura 38.

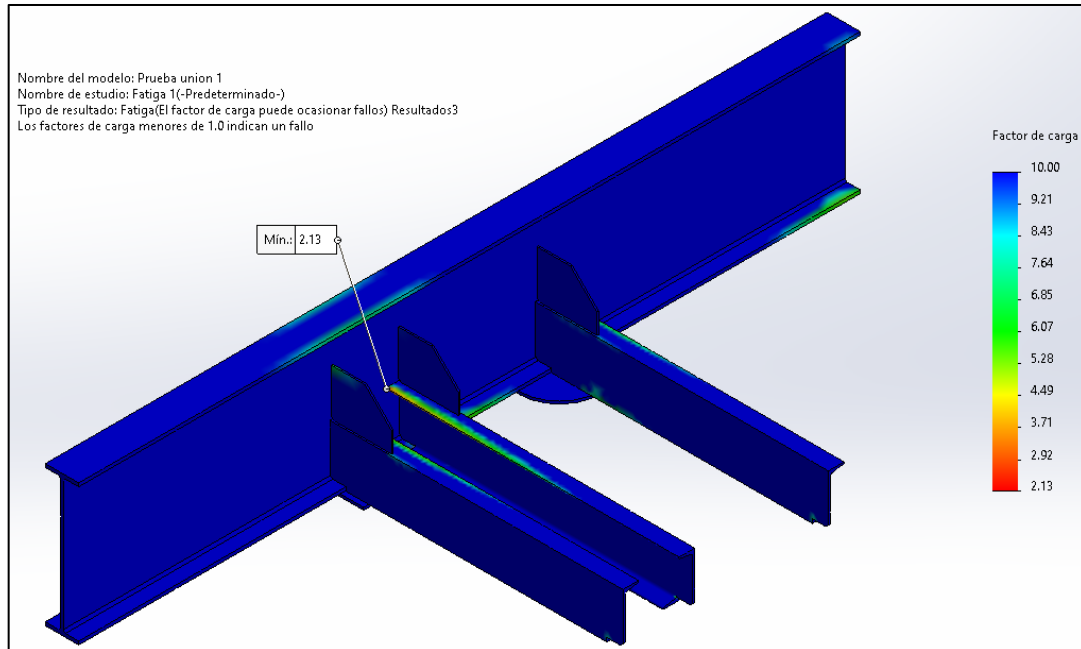
Ciclos de vida, unión de control



Nota. Ciclos de vida mínimos de la unión de control calculada por fatiga. Elaboración propia, realizado con SolidWorks 2020.

Figura 39.

Factor de carga, unión de control



Nota. Factor de carga mínimo de la unión de control calculada por fatiga. Elaboración propia, realizado con SolidWorks 2020.

Imagen con el factor de carga y la tabla recopilatoria de los resultados en la unión de control.

Tabla 5.*Resultado de la unión de control*

Tipo de resultado	Variable	Valor
Esfuerzo máximo	MPa	263.20
Factor de seguridad mínimo	Adimensional	1.30
Deformación máxima	mm	16.20
Puntos críticos	Adimensional	4.00
Daño (fatiga)	%	10.00
Vida (fatiga)	Ciclos	1,000,000.00
Factor de carga (fatiga)	Adimensional	2.13

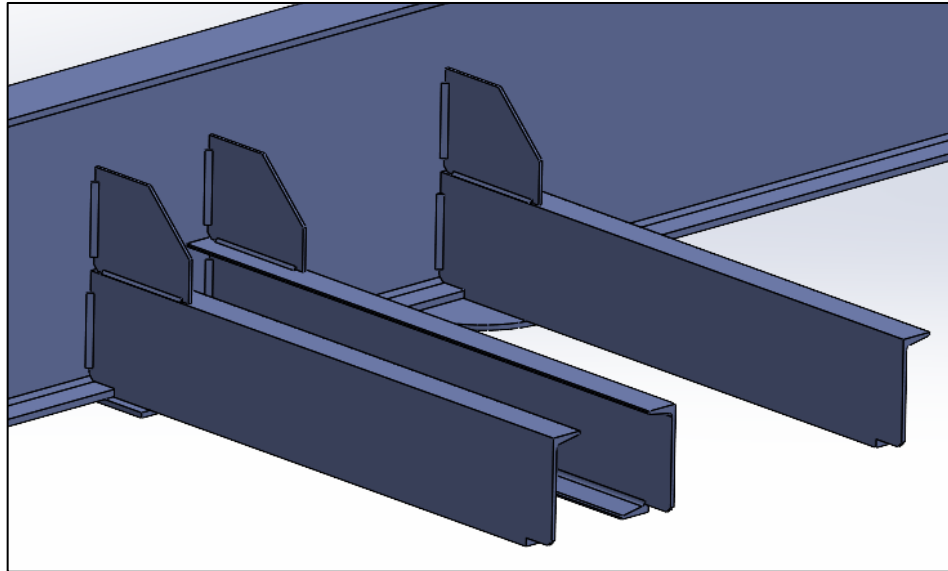
Nota. Tabla con resultados de la unión de control con las condiciones establecidas para los FEA. Elaboración propia, realizado con Word 2019.

3.2.2.2. Unión soldada, viga y travesaños

La unión entre la viga principal y los travesaños realizada únicamente con cordones de soldadura verticales. Los travesaños están soldados al alma y a las placas de soporte para la suspensión, así también a una platina de refuerzo. Los cordones de soldadura no llegan a los extremos según recomendaciones de fabricación en estructuras de acero. (Cházaro, 2019b, pág. 12)

Figura 40.

Unión soldada entre vigas y travesaños



Nota. Unión soldada, se observan los cordones de soldadura agregados al ensamble para que el *software* los pueda analizar adecuadamente. Elaboración propia, realizado con SolidWorks 2020.

Tabla 6.

Resultados en unión soldada

Tipo de resultado	Variable	Valor
Esfuerzo máximo	MPa	438.70
Factor de seguridad mínimo	Adimensional	0.80
Deformación máxima	mm	17.90
Puntos críticos	Adimensional	7.00
Daño (fatiga)	%	645.80
Vida (fatiga)	Ciclos	15,848.00
Factor de carga (fatiga)	Adimensional	0.70

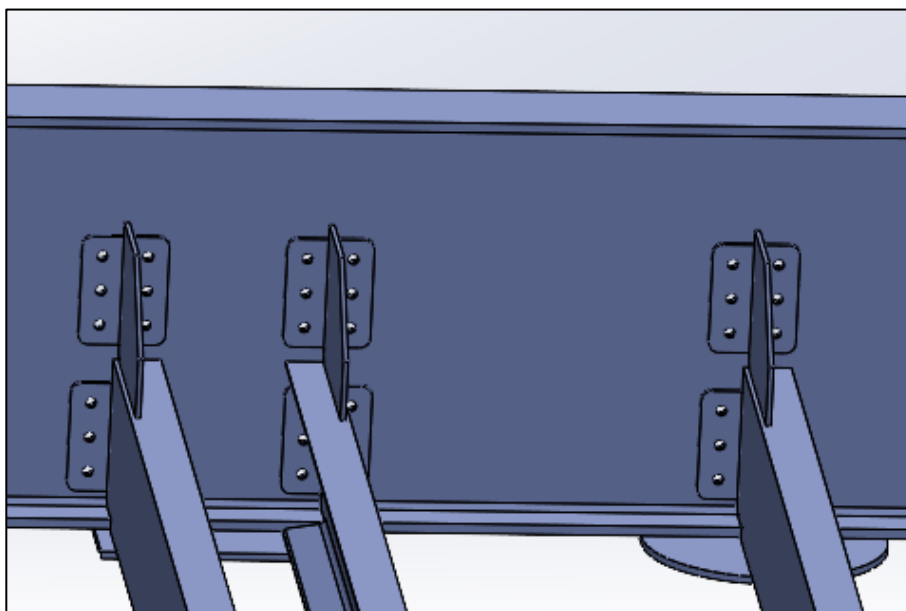
Nota. Tabla con resultados de la unión soldada entre la viga principal y los travesaños. Elaboración propia, realizado con Word 2019.

3.2.2.3. Unión soldada / atornillada

En este tipo de unión se suelda la platina de unión al alma del travesaño por ambos lados y se atornilla al alma de la viga principal por medio de tornillos de alto grado. Los tornillos son agregados al análisis por medio de la opción de sujeciones del mismo *software*, por lo que no es necesario agregarlos al ensamble de la unión como otro elemento.

Figura 41.

Unión soldada / atornillada



Nota. Unión soldada / atornillada, se observan las platinas que van atornilladas a la viga principal y soldadas a los travesaños con sus platinas de refuerzo. Elaboración propia, realizado con SolidWorks 2020.

Tabla 7.

Resultados unión soldada / atornillada

Tipo de resultado	Variable	Valor
Esfuerzo máximo	MPa	290.50
Factor de seguridad mínimo	Adimensional	1.20
Deformación máxima	mm	21.70
Puntos críticos	Adimensional	5.00
Daño (fatiga)	%	10.70
Vida (fatiga)	Ciclos	934,793.30
Factor de carga (fatiga)	Adimensional	1.43

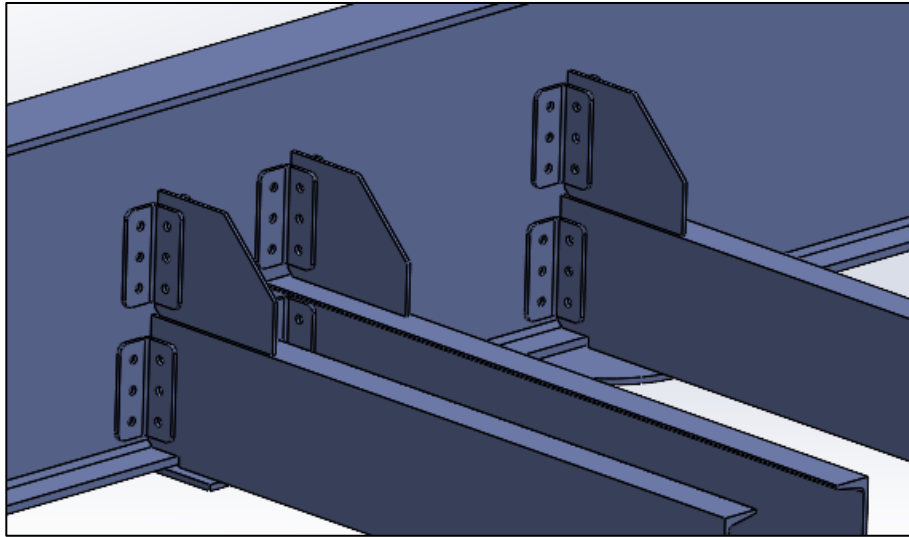
Nota. Tabla con resultados de la unión soldada a los travesaños y atornillada al alma de la viga principal. Elaboración propia, realizado con Word 2019.

3.2.2.4. Unión atornillada con platina 'L'

En esta unión se utiliza una platina con un dobléz a modo que forme un ángulo de 90°, el propósito de esta forma es que se pueda sujetar por medio de tornillos ambos lados del alma del travesaño con el alma de la viga principal, y así evitar una unión soldada entre estos dos miembros.

Figura 42.

Unión atornillada con platina 'L'



Nota. Unión atornillada con platinas en forma de 'L', las platinas van atornilladas a la viga principal y al alma de los travesaños con sus platinas de refuerzo. Elaboración propia, realizado con SolidWorks 2020.

Tabla 8.

Resultados en unión atornillada con platina 'L'

Tipo de resultado	Variable	Valor
Esfuerzo máximo	MPa	318.80
Factor de seguridad mínimo	Adimensional	1.10
Deformación máxima	mm	21.80
Puntos críticos	Adimensional	9.00
Daño (fatiga)	%	34.00
Vida (fatiga)	Ciclos	294,063.50
Factor de carga (fatiga)	Adimensional	1.21

Nota. Tabla con resultados de la unión atornillada a los travesaños al alma de la viga principal. Elaboración propia, realizado con Word 2019.

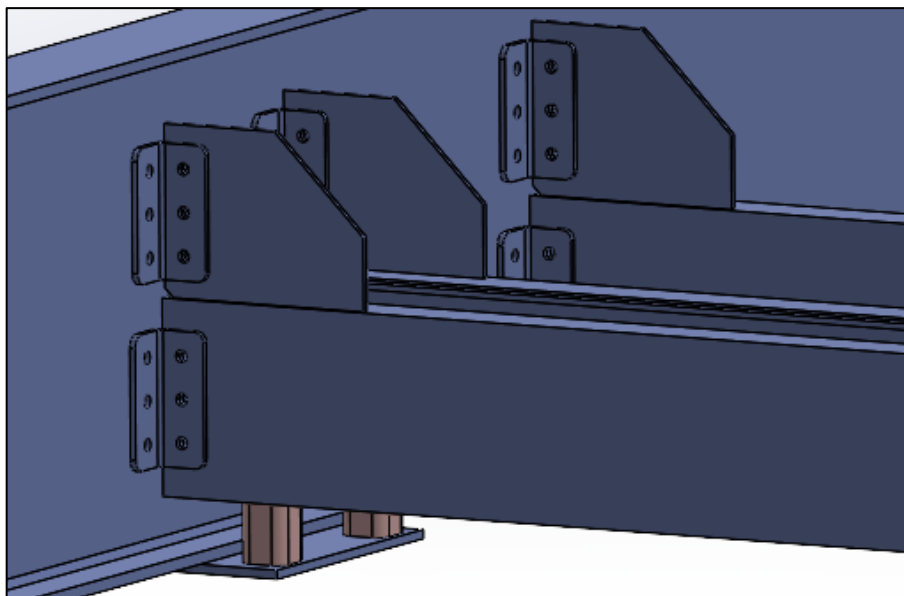
3.2.2.5. Unión atornillada desplazada

En esta unión se separaron los travesaños del patín inferior de la viga principal, con el propósito de determinar el comportamiento de la unión al trasladar los esfuerzos al centro del alma en la viga principal.

La placa de soporte para la suspensión está igualmente unida a los travesaños por medio de un perfil estructural, este soporte permite que las cargas sigan siendo soportadas en cierto porcentaje por los travesaños y no solamente por el patín inferior de la viga principal.

Figura 43.

Unión atornillada desplazada



Nota. Unión atornillada con platinas en forma de 'L', los travesaños están desplazados hacia arriba y unidos a la placa de soporte de la suspensión con un perfil estructural. Elaboración propia, realizado con SolidWorks 2020.

Tabla 9.*Resultados en unión atornillada desplazada*

Tipo de resultado	Variable	Valor
Esfuerzo máximo	MPa	309.60
Factor de seguridad mínimo	Adimensional	1.00
Deformación máxima	mm	21.2.0
Puntos críticos	Adimensional	11.00
Daño (fatiga)	%	31.80
Vida (fatiga)	Ciclos	314,204.60
Factor de carga (fatiga)	Adimensional	1.22

Nota. Tabla con resultados de la unión atornillada, desplazada al centro de la viga principal. Elaboración propia, realizado con Word 2019.

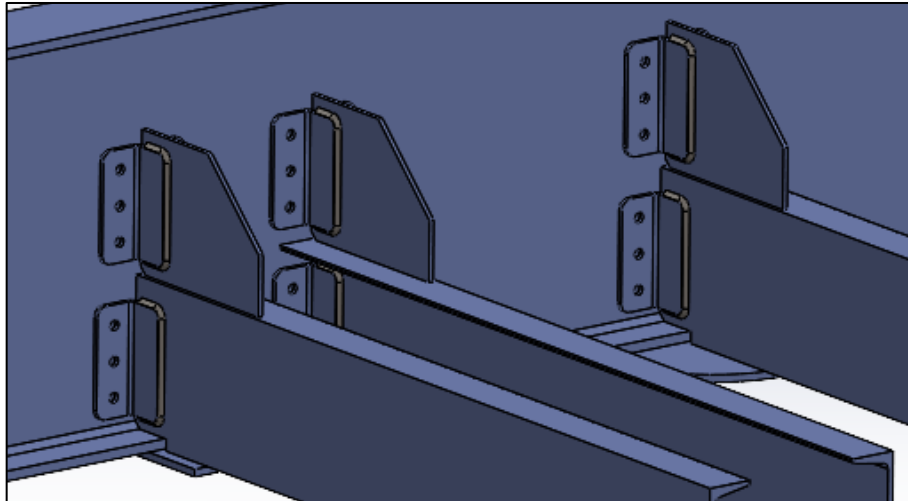
3.2.2.6. Unión soldada / atornillada y platina 'L'

La unión está atornillada al alma de la viga principal por medio de la platina en forma de 'L' de las uniones anteriores, pero con la diferencia que el alma del travesaño ahora está soldado a esta platina y ya no atornillado.

En este caso, el cordón de soldadura está aplicado en todo el borde de la platina 'L' que tiene contacto con los travesaños y su refuerzo, así mismo el travesaño está soldado únicamente a la platina de soporte de la suspensión y no al patín de la viga principal.

Figura 44.

Unión soldada / atornillada con platina 'L'



Nota. Unión atornillada con platinas en forma de 'L' al alma de la viga principal, pero los travesaños ahora están unidos por medio de un cordón de soldadura. Elaboración propia, realizado con SolidWorks 2020.

Tabla 10.

Resultados unión soldada / atornillada a 'L'

Tipo de resultado	Variable	Valor
Esfuerzo máximo	MPa	377.70
Factor de seguridad mínimo	Adimensional	0.90
Deformación máxima	mm	20.60
Puntos críticos	Adimensional	9.00
Daño (fatiga)	%	159.90
Vida (fatiga)	Ciclos	62,544.70
Factor de carga (fatiga)	Adimensional	0.92

Nota. Tabla con resultados de la unión atornillada, desplazada al centro de la viga principal. Elaboración propia, realizado con Word 2019.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se discuten e interpretan los resultados de las distintas pruebas realizadas al equipo seleccionado. Para hacer más comprensible el análisis de los resultados, se hace uso de gráficas comparativas para visualizar los distintos puntos evaluados.

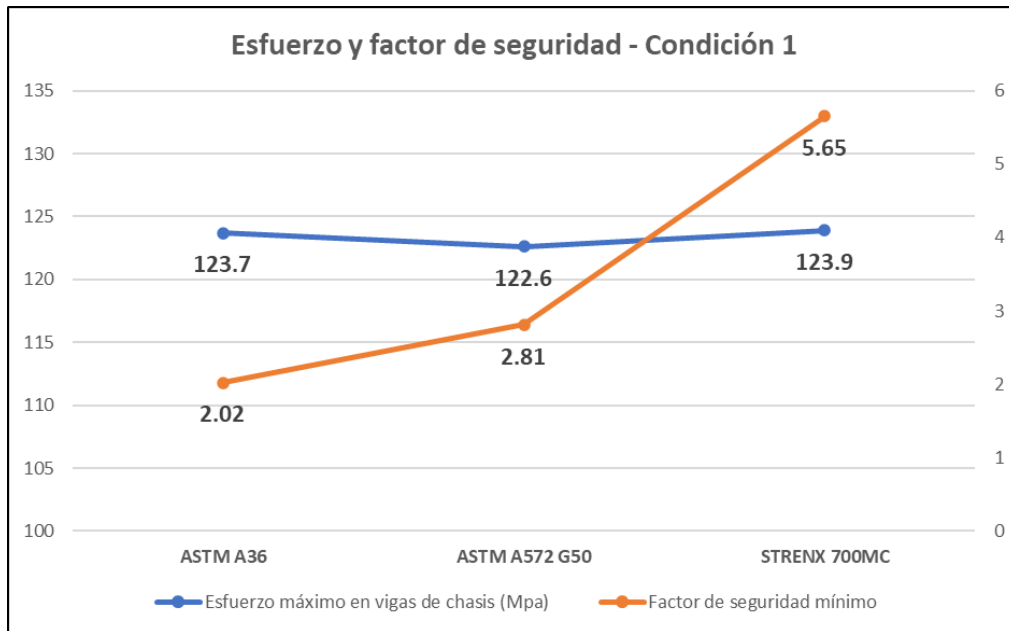
4.1. Análisis de material de fabricación

La siguiente figura muestra una gráfica comparativa entre el esfuerzo y el factor de seguridad de los tres materiales de fabricación analizados. En esta comparación se puede observar como a pesar de que utilizando las mismas condiciones de análisis hay pequeñas variaciones en los datos, como en este caso en el esfuerzo máximo de cada uno, no obstante, es interesante ver que, a pesar de haber cambiado el material en cada prueba, el esfuerzo máximo se mantiene prácticamente en el mismo punto y en la misma magnitud.

El esfuerzo máximo promedio en los tres materiales es de 123.4 MPa, ubicándose en un rango seguro dentro de los límites elásticos de cada material, dato que se puede comprobar con el factor de seguridad mostrado en la misma gráfica. Si bien el acero ASTM A36, al tener un límite elástico menor a los otros dos aceros, presenta un factor de seguridad de 2.02 que indica una buena resistencia a la carga en la condición 1. Por su parte, el acero ASTM A572 G50, que presenta un factor de seguridad de 2.81, es superado por más del doble del acero *Strenx* 700 MC con un factor de seguridad de 5.65, que muestra una superior capacidad frente a la condición 1.

Figura 45.

Esfuerzo y factor de seguridad, condición 1



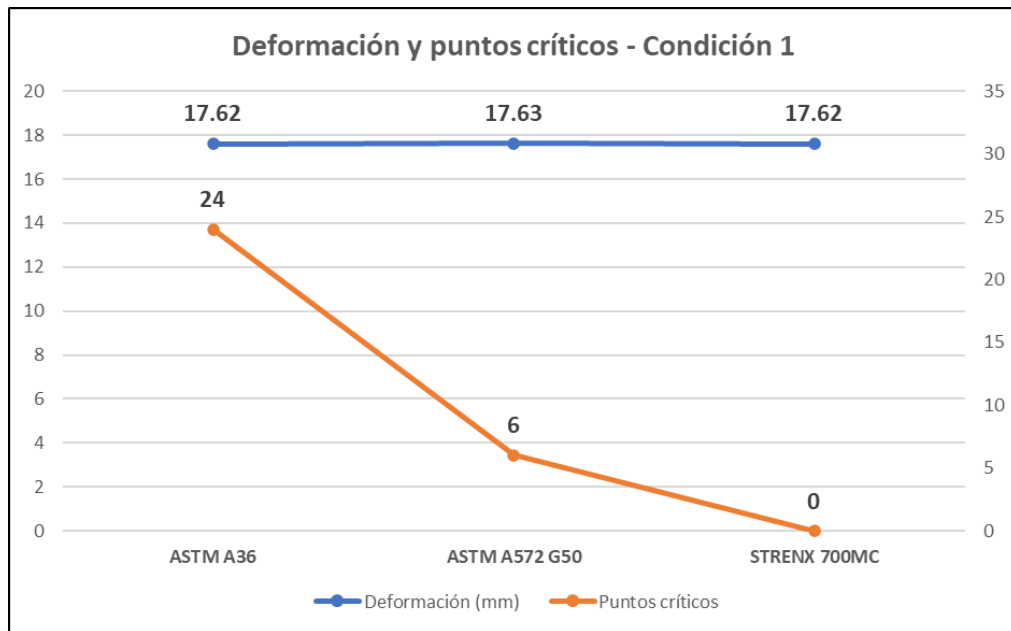
Nota. Gráfica comparativa de esfuerzo y factor de seguridad en la condición 1. Elaboración propia, realizado con Excel 2019.

La gráfica de deformación y puntos críticos siguiente se observar la similitud de la línea de la deformación con la del esfuerzo en la gráfica anterior, esto demuestra que a pesar de ser aceros diferentes en su composición química tienen comportamientos muy similares frente a las cargas, con la diferencia que unos pueden soportar mejor los esfuerzos que otros sin presentar una deformación permanente. En la misma gráfica se ve representada la cantidad de puntos en donde el factor de seguridad estaba muy cercano a 2, o lo que es el factor de seguridad mínimo del acero ASTM A36, se observa cómo la cantidad de puntos afectados con este factor es muy alta en el acero antes mencionado, pero esta cantidad disminuye considerablemente al cambiar al acero ASTM A572

G50 con solamente 6 puntos críticos, y siendo prácticamente 0 con el acero *Strenx 700 MC*.

Figura 46.

Deformación y puntos críticos, condición 1



Nota. Gráfica comparativa de la deformación y puntos críticos en la condición 1. Elaboración propia, realizado con Excel 2019.

En la siguiente gráfica se observa la comparativa de los resultados en el análisis de fatiga para los 3 materiales seleccionados, los datos muestran como en la condición 1 a pesar de que los aceros tienen diferentes capacidades para soportar los esfuerzos, todos tienen un excelente comportamiento a la fatiga.

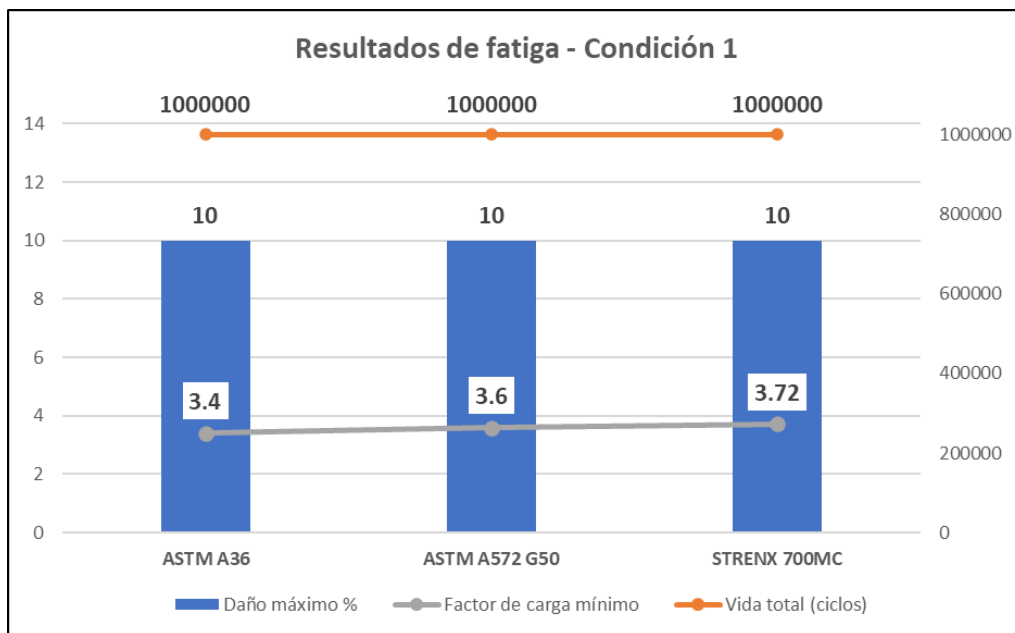
Los tres resultados exponen una vida en ciclos de 1 000 000, lo cual indica una vida prolongada del equipo, así mismo el daño máximo es de 10 % en toda la estructura, esto obviamente en condiciones ideales significa que el equipo

nunca presentaría daños significativos y nunca necesitaría algún tipo de reparación.

Ahora en el factor de carga sí se ve una diferencia, aunque no tan marcada como el factor de seguridad en el análisis estático, puede notarse que el límite elástico del acero *Strenx 700 MC* le permite tener un factor de carga superior a los otros dos aceros. Al igual que el factor de seguridad, el factor de carga indica qué tanto más podría soportar la condición establecida para el análisis de fatiga, un valor cercano a 1 indicaría un fallo.

Figura 47.

Gráfica de fatiga en materiales, condición 1



Nota. Gráfica de resultados de fatiga en condición 1 para los tres aceros. Elaboración propia, realizado con Excel 2019.

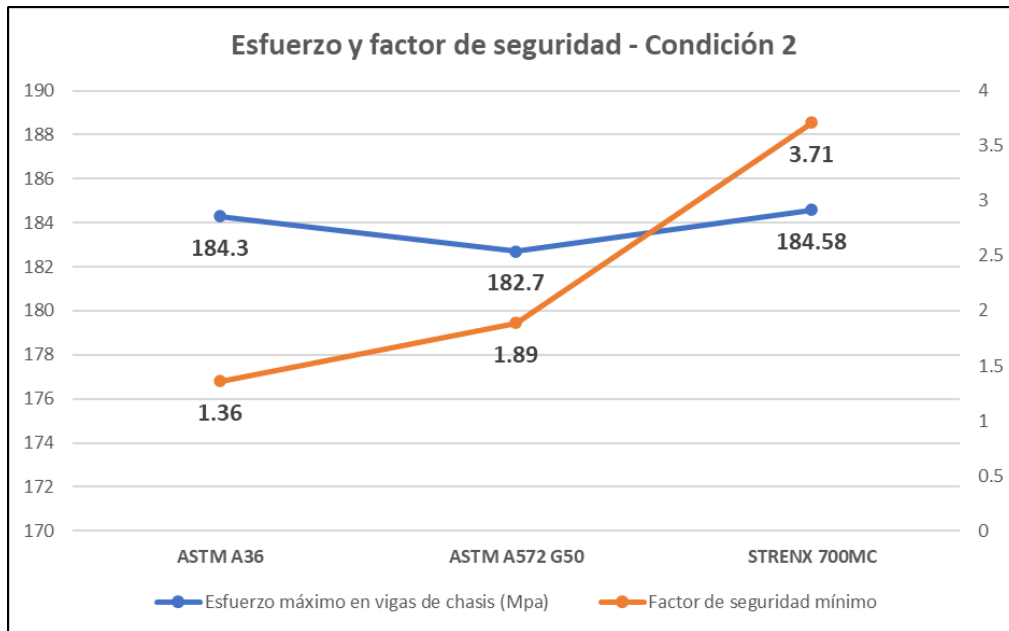
En la gráfica mostrada a continuación se puede apreciar nuevamente la comparativa del esfuerzo y el factor de seguridad, pero ahora en la condición 2, en donde se le quita el soporte inferior a un lado del chasis, esto genera esfuerzos mayores y por ende el factor de seguridad tiende también a disminuir. La condición 2 está definida para simular una situación desfavorable en el uso del semirremolque, por ejemplo, que un lado completo se vaya dentro de una cuneta, o que transite en un terreno muy accidentado que genere mucha torsión en el chasis.

Se puede evidenciar cómo el factor de seguridad del acero ASTM A36 llega a un valor de 1.36, dato menor de lo que se considera un factor aceptable de 1.5 y que idealmente fuera de 2. Por su parte, el acero ASTM A572 G50 mantiene un factor de seguridad aceptable de 1.89, y el acero *Strenx 700 MC* con un factor de seguridad mínimo de 3.71.

El esfuerzo con un promedio de 183.86 MPa, aunque pareciera que no aumentó en gran medida, sí es determinante al momento de tener en consideración el factor de seguridad, además que por la misma condición 2 los esfuerzos se ven concentrados en zonas que en la condición 1 no se consideran críticas, por lo que llegan a afectar de otra manera a las vigas del chasis.

Figura 48.

Gráfica de esfuerzo y factor de seguridad, condición 2



Nota. Gráfica de resultados de esfuerzo y factor de seguridad en condición 2 para los tres aceros. Elaboración propia, realizado con Excel 2019.

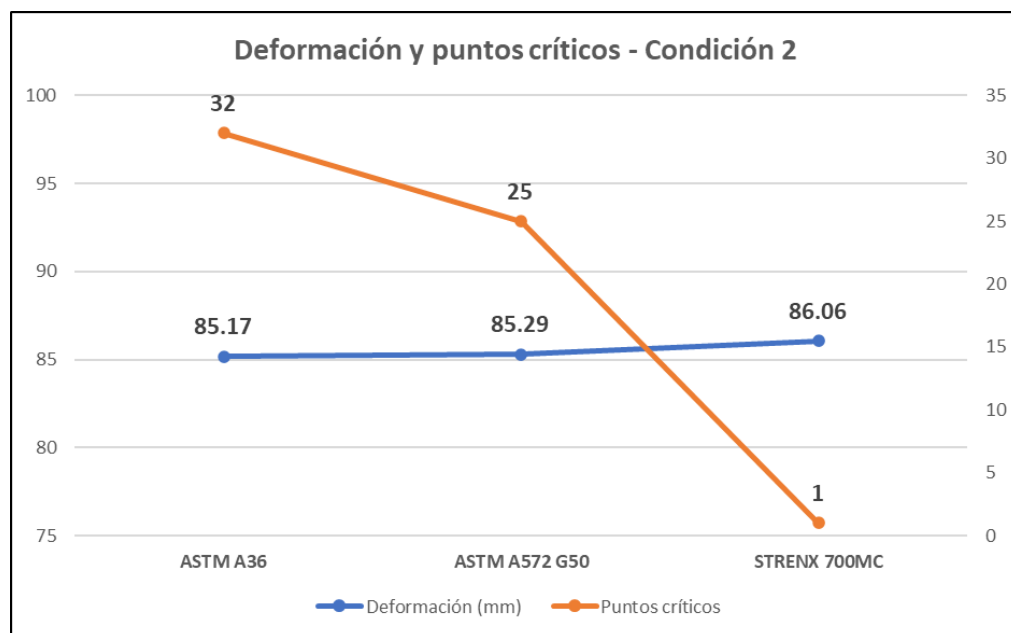
La gráfica de deformación y puntos críticos en la condición 2, muestra un desplazamiento mayor respecto al de la condición 1, donde alcanza un promedio de 85.51 mm para los tres materiales, que, si se toman en cuenta los parámetros de la condición 2, la deformación es relativamente baja, ya que prácticamente en un lado del chasis carece del soporte en la suspensión y se tiene una masa distribuida de 30 000 kg, más el peso del propio equipo.

La cantidad de puntos críticos en las vigas del chasis también aumenta, principalmente por el efecto de torsión que afecta al chasis en la condición 2. Si bien el límite elástico del acero ASTM A36 no llega a ser menor de 1, los puntos o áreas críticas en donde se puede presentar es mayor, por lo que aumenta la

posibilidad de algún fallo en las vigas principales del chasis. Nuevamente el acero que tiene mejor comportamiento ante esta deformación es el acero *Strenx 700 MC*, en donde presenta únicamente un solo punto crítico.

Figura 49.

Gráfica de deformación y puntos críticos, condición 2



Nota. Gráfica de resultados de deformación y puntos críticos en condición 2 para los tres aceros. Elaboración propia, realizado con Excel 2019.

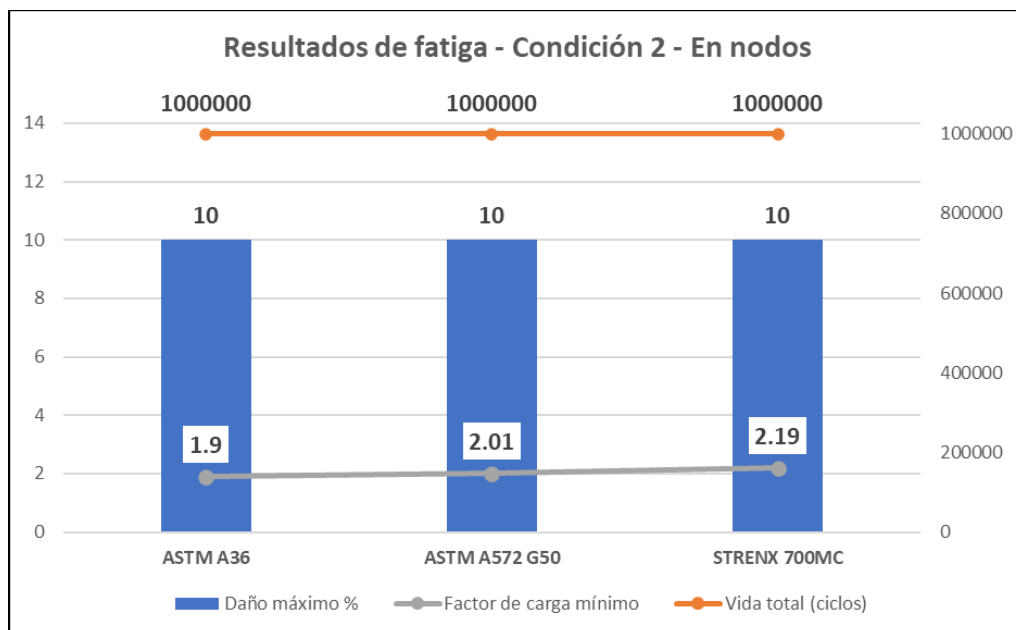
Al revisar las Tablas 2, 3 y 4, se puede notar que los resultados del análisis de fatiga para los tres materiales en la condición 2 no tienen mucha congruencia, ya que los datos presentan mucha variación y no tienen un comportamiento parecido a los que se han obtenido en los análisis anteriores; esto se debe a que al momento de realizar el análisis de fatiga el *software* toma en cuenta todos los componentes que conforman el ensamblaje del modelo, lo que hace que los resultados se desplacen a otras piezas que no son las vigas principales del

chasis. Para corregir este inconveniente, se buscó el modo, en donde se presenta el mayor esfuerzo en la condición 2 de cada material. Con esto, se logró generar datos más confiables del análisis de fatiga.

Con los datos de fatiga corregidos se presentó la siguiente gráfica, en donde se ve la similitud con los datos obtenidos del análisis de fatiga en la condición 1. El daño y la vida de las vigas principales se mantienen constantes en los tres tipos de acero, sin embargo, el factor de carga sí tiene variación con una tendencia a ser mejor en el acero *Strenx 700 MC* con un valor de 2.19, aunque los otros dos aceros tampoco tienen tan mal comportamiento ante esta condición.

Figura 50.

Resultados de fatiga, condición 2 (en nodos)



Nota. Gráfica de resultados corregidos del análisis de fatiga en condición 2, para los tres aceros. Elaboración propia, realizado en Excel 2019.

4.2. Análisis de tipo de unión

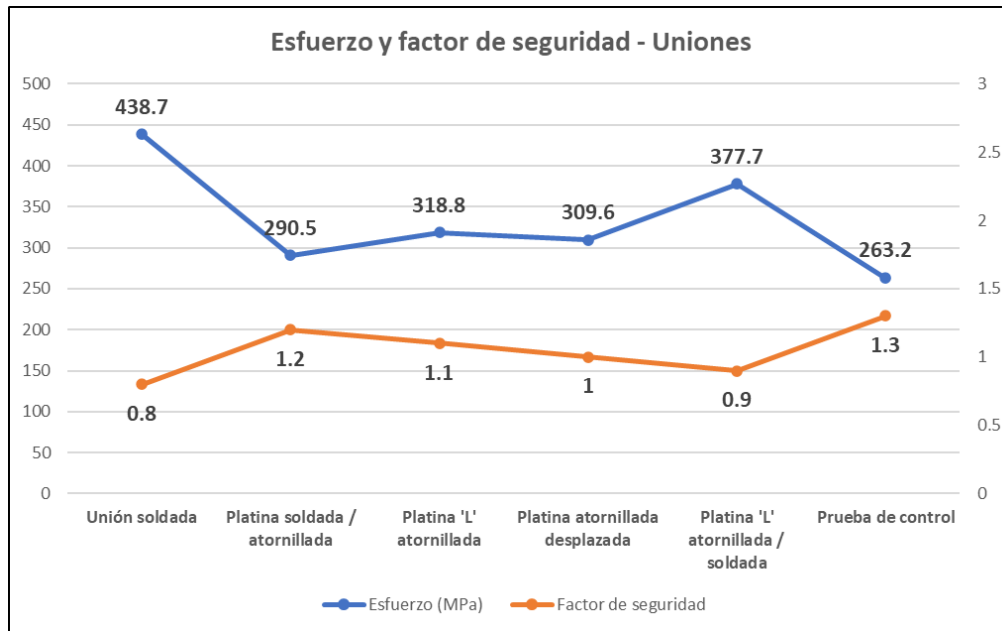
Los resultados del análisis de uniones muestran cantidades o magnitudes que se pueden considerar muy altas, pero esto se debe a que se utilizaron las reacciones en los travesaños de la prueba del análisis de los materiales en la condición 2, hay que recordar que la condición 2 está diseñada para someter la estructura del chasis a un estado desfavorable en el análisis, y con esto encontrar una comparativa de los resultados más significativa.

Cabe mencionar que el material utilizado en los análisis de las uniones es el acero ASTM A572 G50, para tener mejor visibilidad de los resultados, puesto que si se utiliza el acero *Strenx 700 MC* no muestra fácilmente una falla, debido a su alto límite elástico.

En la siguiente gráfica se observa la comparativa de los esfuerzos y el factor de seguridad resultantes de cada una de las uniones analizadas, nótese cómo las 'unión soldada' y la 'unión con platina 'L' atornillada / soldada' presentan los más altos esfuerzos, y por ende los factores de seguridad más bajos, esto se debe a que las piezas al estar soldadas se rigidizan y concentran mayor cantidad de esfuerzo en los cambios de geometría de las mismas. Sin tomar en cuenta la prueba de control se nota que el mejor desempeño lo obtiene la 'unión con platina soldada / atornillada', al estar la platina atornillada al alma de la viga principal y soldada al alma del travesaño, le permite mantener una mejor flexibilidad a la unión y no la hace tan rígida disminuyendo el esfuerzo concentrado.

Figura 51.

Gráfica de esfuerzo y factor de seguridad – Uniones



Nota. Gráfica que muestra el comportamiento del esfuerzo y el factor de seguridad en las uniones entre miembros del chasis, al ser sometidas a las fuerzas resultantes de la condición 2 del análisis de materiales. Elaboración propia, realizado con Excel 2019.

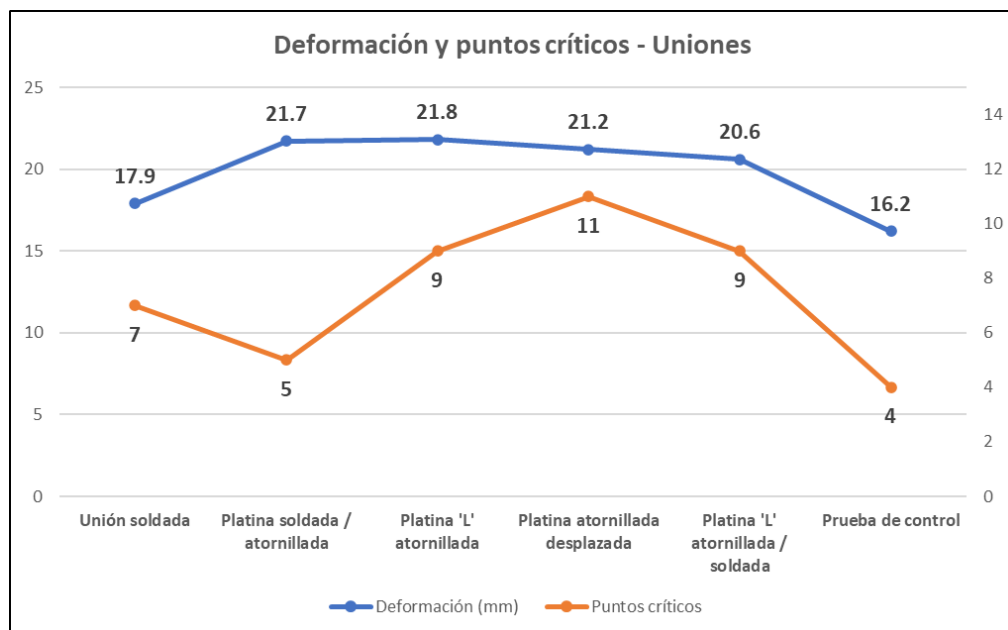
En la siguiente gráfica se puede apreciar la comparativa de la deformación y la aparición de puntos críticos en las distintas uniones analizadas; en donde destaca nuevamente la 'unión con platina soldad y atornillada', al tener la segunda deformación más alta, pero la que menos puntos críticos presenta sin tomar en cuenta la prueba de control; si bien la 'unión soldada' no tiene una alta deformación y relativamente pocos puntos críticos, es en donde mayor esfuerzo se presentaba, por lo que en esos puntos es más seguro que llegue a fallar; la 'unión atornillada desplazada' al agregarle un elemento que conecte el travesaño con el soporte de la suspensión hace que se concentren más esfuerzos en

nuevos puntos, por lo que aunque la deformación es media presenta la mayor cantidad de puntos críticos.

En este caso, la unión con platina soldada / atornillada es nuevamente la de mejor comportamiento, esto se debe a que permite admite una unión más libre respecto al travesaño y la viga principal del chasis.

Figura 52.

Gráfica de deformación y puntos críticos - Uniones

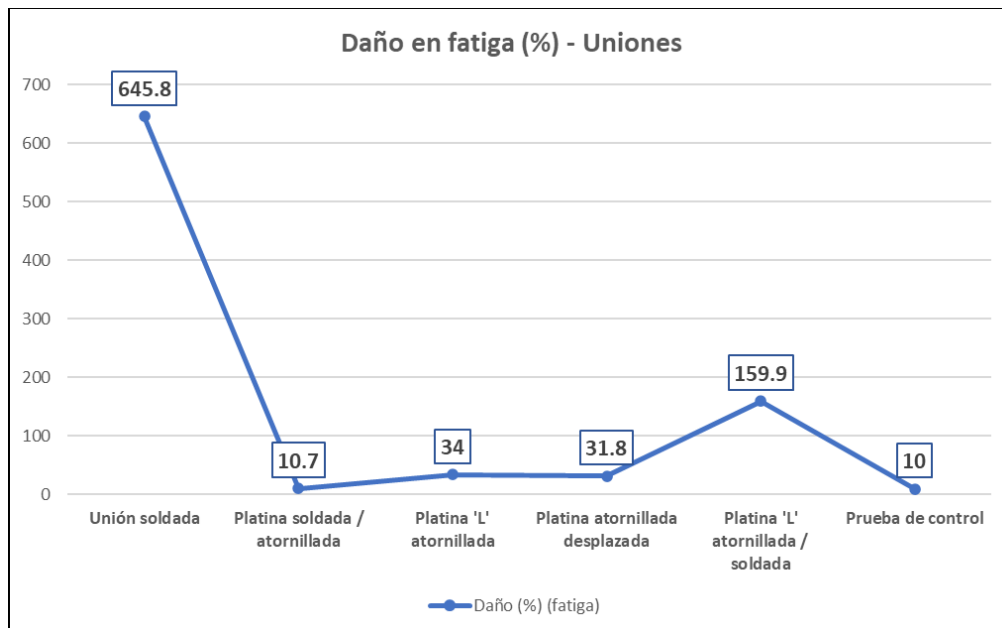


Nota. Gráfica que muestra el comportamiento de la deformación y los puntos críticos las uniones entre miembros del chasis, al ser sometidas a las fuerzas resultantes de la condición 2 del análisis de materiales. Elaboración propia, realizado con Excel 2019.

Al realizar el análisis de fatiga en cada una de las uniones se observa nuevamente la tendencia de mejores resultados en la unión con platina soldada / atornillada; el daño máximo llega a 10.7 muy cercano al de la prueba de control y en general muy buen resultado para este aspecto.

Figura 53.

Gráfica de daño en fatiga (%) – Uniones

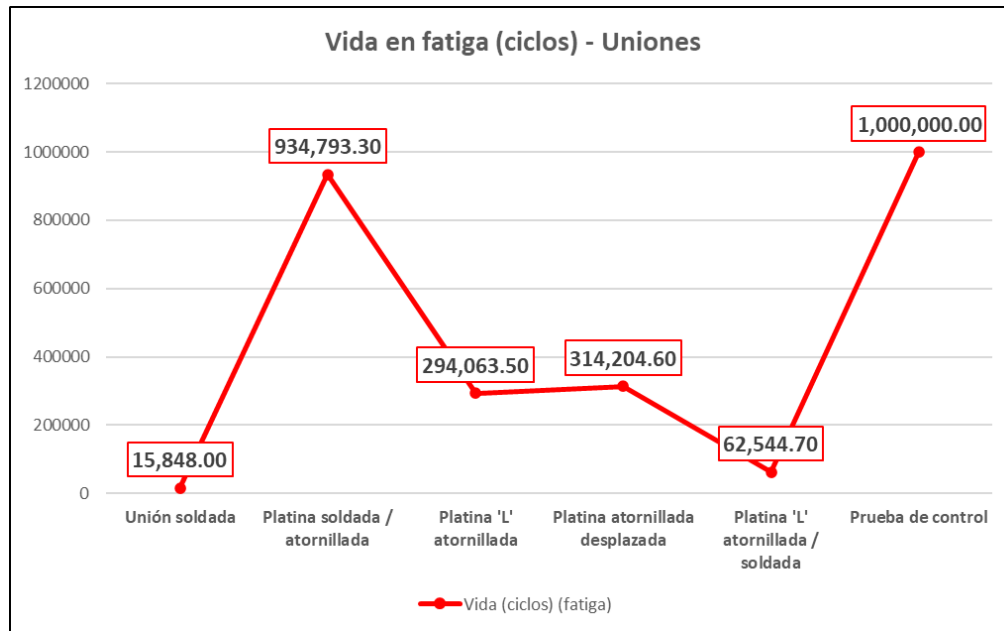


Nota. Gráfica con los resultados del daño presentado en las uniones al ser sometidas a un análisis de fatiga. Elaboración propia, realizado con Excel 2019.

El mismo comportamiento se ve en la gráfica siguiente en donde se presenta la vida mínima en ciclos alcanzada por cada unión, y la que mejor resultado obtiene es la 'unión de platina soldada / atornillada' con un valor de 934,793.30 ciclos, muy cercano al de la prueba de control.

Figura 54.

Gráfica de la vida en fatiga (ciclos) – Uniones

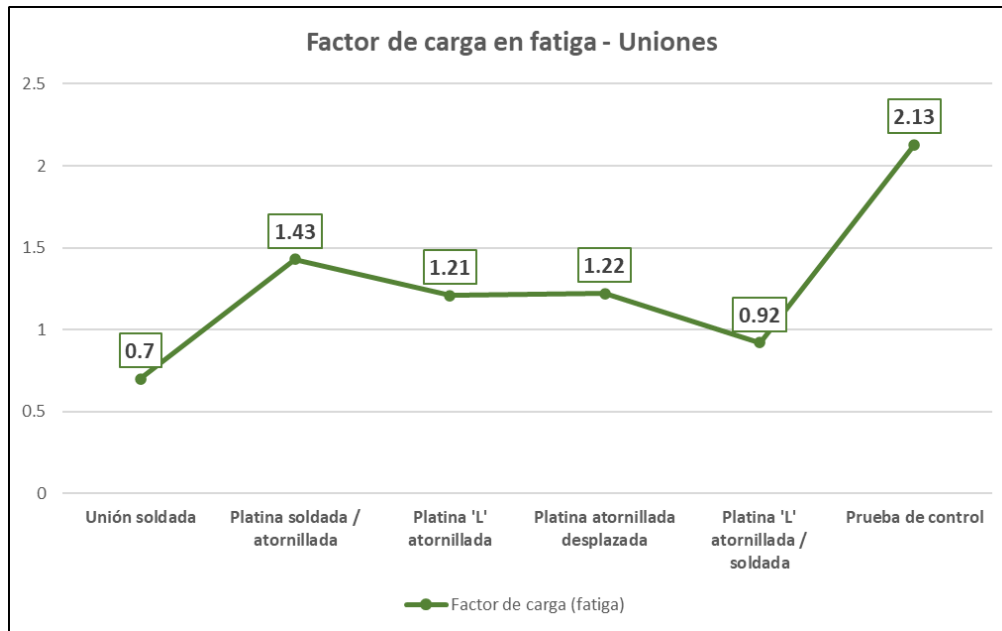


Nota. Gráfica con los resultados de la vida mínima en ciclos alcanzada en las uniones al ser sometidas a un análisis de fatiga. Elaboración propia, realizado con Excel 2019.

En la última gráfica de esta sección, las uniones más destacadas son la 'unión soldada' y la 'unión con platina soldada / atornillada', siendo las que peor y mejor comportamiento mostraron respectivamente, la primera de ellas con un valor de 0.7 que indica una falla segura, y la segunda con el factor de carga más alto de 1.43. La unión con platina soldada / atornillada, es la que mejor factor de cargar consigue, sin tomar en cuenta la prueba de control, lo que a priori demuestra que a pesar de las condiciones adversas de la condición 2 establecida al inicio de este capítulo, es capaz de tener el mejor desempeño para este equipo elegido.

Figura 55.

Gráfica de factor de carga en fatiga – Uniones



Nota. Gráfica con los resultados del factor de carga mínimo en las uniones al ser sometidas a un análisis de fatiga; un valor inferior a 1 indica una falla. Elaboración propia, realizado con Excel 2019.

5. ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCIÓN DE FALLAS EN EQUIPOS TIPO SEMIRREMOLQUE, CONSIDERACIONES DE SU DISEÑO Y MANTENIMIENTO

Tomando como base los resultados obtenidos y las consultas literarias para esta investigación, se plantean tres estrategias para la reducción de fallas estructurales en los semirremolques. Las estrategias en lo posible no deben considerarse como individuales o que una sea mejor que otra, por el contrario, lo recomendable es que sean implementadas en conjunto y así fabricar semirremolques más seguros estructuralmente.

5.1. Elección adecuada del material de fabricación

Según observado en los análisis realizados, es importante seleccionar el acero estructural que cumpla con los requerimientos del cliente, así también con las cargas a las que será sometida su estructura, siendo de gran relevancia el límite elástico, ya que este determina el esfuerzo que el acero soportará antes de deformarse completamente y fallar. Los aceros ASTM A36, ASTM A572 G50 y el *Strenx 700 MC*, son los que se suelen encontrar o recomendarse en nuestra región para fabricar perfiles o estructuras metálicas.

5.2. Evaluar el tipo de unión entre miembros estructurales

El manual de construcción en acero de la AISC brinda una amplia información respecto a los parámetros que se deben considerar para fabricar estructuras de acero, dentro de los cuales se encuentran distintos tipos de

uniones a usar entre los miembros. Con esto en mente es importante evaluar la unión que mejor se adapte a los equipos de tipo semirremolque, tomando énfasis en las uniones de la estructura principal (AISC Committee on Manuals, 2017).

5.3. Rutinas de inspección de la estructura del semirremolque

El propósito de la inspección periódica de la estructura del semirremolque es básicamente, encontrar indicios de fallas importantes antes de que éstas se presenten, así también si la falla ya se produjo realizar las acciones de mantenimiento adecuadas para mitigar su efecto en la estructura completa. (Norton, 2011, p. 236)

Por los resultados ya vistos las rutinas de inspección se deben enfocar principalmente en los puntos de concentración de tensiones, como lo son las uniones soldadas, cortes y perforaciones con aristas vivas y cambios de geometría, así mismo buscar la presencia de corrosión.

5.4. Consideraciones de diseño para equipos semirremolques

Los equipos de tipo semirremolque suelen estar sometidos a condiciones cambiantes, esto debido a que estructuralmente no se pueden considerar estáticos, es por ello que su diseño y mantenimiento difiere en algunos aspectos respecto a estructura metálicas estáticas como lo son puentes o construcciones civiles. SSAB (2015) presenta algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta respecto al diseño y mantenimiento de equipos de arrastre, especialmente en los semirremolques:

- Estabilidad: para asegurar que un semirremolque sea estable, se debe considerar el ángulo que formaría una línea que parta desde el centro de gravedad hasta el punto del suelo en donde termina la trocha del eje, siendo visto desde la parte trasera del remolque. Dicho ángulo debe ser menor de 70° (Vargas, 2018).
- Reducción de torsión: para equipos que estén sometidos a altas cargas de torsión como equipos basculantes, es recomendable utilizar travesaños de perfil cerrado y aplicar un arriostramiento superior en la zona del chasis que se vea más afectada por este esfuerzo (SSAB, 2015).
- Fatiga en soldadura: está comprobado que las uniones soldadas tienen menor resistencia a la fatiga en comparación al material base utilizado, formando puntos críticos. Hay que considerar la aplicación de soldadura de forma continua en puntos que podrían concentrar esfuerzos, también evitar en lo posible soldar en la zona del patín inferior de las vigas principales, ya que este está principalmente sometido a tensión; no es recomendable soldar una platina de refuerzo en la parte inferior del patín, esto provoca una alta rigidez que reduce considerablemente su resistencia a la fatiga. Para fijar las patas de soporte es recomendable soldar en la fibra neutra de la viga, y aun mejor sería utilizar una unión atornillada que evite la soldadura.
- Soldadura en acero *Strenx 700 MC*: hay ciertos puntos a los que hay que prestar especial atención del acero *Strenx 700 MC* para evitar la distorsión causada por la soldadura.
 - Utilizar la mínima aportación de energía posible para soldar.

- Minimizar la sección transversal del cordón, los cordones más gruesos causaran una mayor distorsión.
- Hacer pliegues, sujetar con prensas o colocar en ángulo las piezas antes de aplicar la soldadura para compensar la contracción.
- Tratar de realizar soldaduras simétricas para evitar la distorsión a un solo lado.
- Empezar a soldar desde las zonas más rígidas hacia los extremos libres de la pieza.
- No es recomendable hacer un enderezamiento en caliente del acero *Strenx*, ya que esto puede alterar la garantía de sus propiedades. La temperatura máxima a la que puede calentarse el acero *Strenx* 700 MC es de 650 °C (SSAB, 2015).

5.5. Mantenimiento básico para la estructura de un semirremolque

El mantenimiento de los semirremolques suele centrarse en los distintos sistemas que lo componen, como el sistema de frenos, sistema eléctrico, ejes, sistemas hidráulicos, entre otros que pueden encontrarse en estos equipos. Se le suele prestar poca atención al estado de la estructura en las inspecciones rutinarias, y solamente se les da importancia cuando estas ya presentan una falla significativa que afecta la integridad estructural. Por la magnitud y región de la falla en la estructura pueden verse afectados otros sistemas, lo que provoca una reacción en cadena hasta que se llegué a darse una falla catastrófica del equipo.

A continuación, se incluye una lista de inspección con las consideraciones básicas para el mantenimiento en la estructura de un semirremolque de transporte de bebidas. Cada tipo de semirremolque puede tener características únicas que requieran un mantenimiento específico en su estructura.

Tabla 11.

Lista de inspección estructural de un semirremolque

No.	Tipo de resultado	Sí cumple	No cumple	Observación
1	Estado del perno rey y la plancha de soporte.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	Fracturas en el cuello	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	Soportes de las patas de apoyo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	Uniones de los travesaños centrales	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	Uniones de los travesaños de la suspensión	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	Bases de la suspensión	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	Estado de las vigas principales	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	Soldadura de los ejes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	Estructura base de carga de producto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	Bases y uniones de mamparas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	Estructura de caballete	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	Estado del techo y los rieles de la cortina	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13	Estado del parachoques trasero.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
14	Torque de todas las uniones atornilladas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Nota. Tabla de ejemplo para lista de inspección de la estructura de un semirremolque de bebidas. Elaboración propia, realizado con Word 2019.

Un aspecto importante a controlar es la corrosión, ya que esta afecta las propiedades mecánicas del acero proporcionalmente (Chiriboga *et al.*, 2022).

CONCLUSIONES

1. Las causas que originan fallas estructurales en un semirremolque pueden ser:
 - La elección correcta del acero para la fabricación de la estructura puede marcar la diferencia en la vida útil del semirremolque.
 - La fatiga es una de las principales causas por las que un equipo puede llegar a fallar, ya que los efectos de esfuerzos en un análisis estático pueden incrementarse al aplicar cargas cíclicas.
 - El tipo de unión afecta en gran medida como se transmiten los esfuerzos entre cada uno de los miembros que conforman el semirremolque.
 - Un deficiente o nulo mantenimiento a la estructura puede dar origen a fallas que pudieron ser reparadas antes de extenderse.

2. Las fallas que más se presentan en la estructura de un semirremolque pueden ser las siguientes:
 - Causadas por fatiga, que se ven concentradas en puntos críticos de tensiones.
 - Fallas por mal diseño, lo que incluye la elección del material de fabricación, y las dimensiones necesarias para soportar los esfuerzos en las vigas principales del chasis.
 - También fallas por agentes externos como la corrosión, muy común en ambientes con atmósferas salinas, húmedas o con presencia de sustancias corrosivas.

- Sobrepasar las capacidades establecidas por el fabricante, aunque los equipos se diseñan con un factor de seguridad, al superar la carga para la que fueron diseñados corren el riesgo de fallar.
3. La utilización de software CAD permitió simular distintos escenarios a los que se vería sometido un semirremolque, en el caso del tipo de material, se simularon dos escenarios, en donde se buscaba una condición favorable y una desfavorable para la estructura. También permitió analizar distintos tipos de uniones entre los miembros transversales de la estructura.
 4. Las estrategias propuestas para la reducción de posibles fallas estructurales en equipos de tipo semirremolque, fueron planteadas basándose en los FEA realizados y la información de referencia investigada. Estas estrategias pueden aplicarse también a los equipos de tipo remolque y no solamente a los semirremolques.

RECOMENDACIONES

1. Para el fabricante, considerar las condiciones bajo las cuales operará el semirremolque, así mismo permitirse hacer uso de aceros de alta resistencia para mejorar el rendimiento en cuanto a pesos y capacidades se refiere.
2. Para el fabricante, realizar un diseño que asegure la integridad y durabilidad del equipo, prestar especial atención a las uniones entre los distintos elementos que conforman su estructura. Durante el proceso de fabricación, revisar la correcta aplicación y terminación de soldaduras.
3. Para el cliente, implementar rutinas de inspección de la estructura en el plan de mantenimiento de los semirremolques. Estas inspecciones se deben realizar de forma periódica, de ser posible antes y después de cada viaje. También una revisión de corrosión presente en piezas y uniones para evitar la extensión y empeoramiento de este efecto en el acero.
4. Para el analista, en lo posible implementar el uso de un segundo software FEA para cotejar los resultados obtenidos. Es adecuado mantener actualizado el software de análisis, puesto que con cada nueva edición pueden ser agregadas correcciones al motor matemático, condiciones de análisis y funciones que mejoren los resultados.

REFERENCIAS

- Acuerdo gubernativo 379-2010. Reglamento para el control de pesos y dimensiones de vehículos automotores de carga y sus combinaciones. (23 de diciembre de 2010). Ministerio de comunicaciones, infraestructura y vivienda Guatemala. Diario de Centroamérica. Guatemala. <https://caminos.gob.gt/files/Desc-Reglamento-CtrlPesosyDim-AG3792010.pdf>
- AISC Committee on Manuals (2017). *Steel Construction Manual* [Manual de construcción de acero]. Estados Unidos de América: AISC.
- Altos, Hornos de México. (2013). *Manual de diseño para la construcción con acero*. AHMSA. <https://www.ahmsa.com/nuestros-productos/folletos-y-manuales/manual-de-construccion-ahmsa.html>
- Andrew, P., & Singer, F. (2008). *Resistencia de materiales*. Alfaomega Grupo Editor.
- Budynas, R., & Keith J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. McGraw-Hill Interamericana.
- Celigüeta, J. (2021). *Diseño de estructuras de acero*. Uniones. Tecún, 629. <https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/57936/5/Dise%c3%b1o%20de%20estructuras%20de%20acero%20-%20Uniones.pdf>

- Cházaro, C. (2019a). *Diseño básico de estructuras de acero / métodos DPE y DFCR*. GERDAU CORSA.
[https://www.gerdaucorsa.com.mx/sites/mx_gerdau/files/PDF/COLECCION DISEN%CC%83O BASICO DE ESTRUCTURAS ACERO 2019 Versi%C3%B3n Actualizada..pdf](https://www.gerdaucorsa.com.mx/sites/mx_gerdau/files/PDF/COLECCION%20DISEN%CC%83O%20BASICO%20DE%20ESTRUCTURAS%20ACERO%202019%20Versi%C3%B3n%20Actualizada..pdf)
- Cházaro, C. (2019b). *Procedimiento de fabricación de estructuras de acero para el aseguramiento de la calidad*. GERDAU CORSA.
[https://www.gerdaucorsa.com.mx/sites/mx_gerdau/files/PDF/AT PROCEDIMIENTO%20DE%20FABRICACION%20DE%20ESTRUCTURAS%20DE%20ACERO%20PARA%20EL%20ASEGURAMIENTO%20DE%20LA%20CALIDAD.pdf](https://www.gerdaucorsa.com.mx/sites/mx_gerdau/files/PDF/AT_PROCEDIMIENTO%20DE%20FABRICACION%20DE%20ESTRUCTURAS%20DE%20ACERO%20PARA%20EL%20ASEGURAMIENTO%20DE%20LA%20CALIDAD.pdf)
- Chiriboga, C., Maldonado, J., & Chiriboga, B. (2022). Influencia de la corrosión en varillas de acero de refuerzo y sus efectos en la resistencia estructural de edificaciones. *MQR Investigar*, 6 (4), 968.
<https://www.investigarmqr.com/ojs/index.php/mqr/article/view/119/435>
- Franck, G., Gennaro, S., Lonardi, B., Eichhorn, J., & Bruno, A. (2009). Análisis dinámico de un chasis de semirremolque de servicio pesado. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, 28(7), 503-517.
<http://venus.ceride.gov.ar/ojs/index.php/mc/article/view/2746/2687>
- Gavidia, A., y Subía, A. (2015). *Elaboración de los procedimientos de fabricación y montaje de una estructura de acero para un edificio tipo* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional de Ecuador]. Repositorio digital EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10578/1/CD-6256.pdf>

González, B., y Guerra, D. (2020). *Estudio de los semirremolques* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio digital USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/48535>

Instituto Técnico de la Estructura en Acero ITEA (1997). *Guía de Diseño para Edificios con Estructura de Acero*. ITEA. <https://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/estructuras.htm>

McCormac, J., & Csernak, S. (2012). *Diseño de estructuras de acero*. Alfaomega Grupo Editor.

Norton, R. (2011). *Diseño de máquinas un enfoque integrado*. McGraw-Hill Interamericana.

ONSET (2020). *Glosario de Tipología Vehicular*. Departamento de tránsito de la PNC. https://transito.gob.gt/wp-content/uploads/2021/01/GLOSARIO-DE-TIPOLOGIA-VEHICULAR-3ra-edici%C3%B3n_compressed-1.pdf

Rojas, O., y Rojas, L. (2006). Diseño asistido por computador. *Industrial Data*, 9(1), 7-15. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81690102>

Romero, F. (2019). *Estudio de soldabilidad para reemplazo de los aceros a36 y a572 por acero strenx 700 como material base en juntas de semirremolques* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio digital UCV. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/64409/Romero_GFR-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Romero, J. (2021). *Análisis de elementos finitos en uniones metálicas de acuerdo a las normas internacionales utilizando el software Idea Statica connection* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Santa]. Repositorio digital UNS. <https://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14278/3651/15167.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- SSAB (2015). *Directrices de diseño para remolques*. Centro de descargas SSAB. [https://www.ssab.com/en/download-center#sort=%40customorder%20descending&f:industries=\[a3e7446ae b2f4450934ac36b6981e765\]](https://www.ssab.com/en/download-center#sort=%40customorder%20descending&f:industries=[a3e7446ae b2f4450934ac36b6981e765])
- Vargas, V. (2018). *Diseño de un semirremolque furgón de transporte de bebidas para alcanzar una carga útil mayor a 30Tn Aje - Lima* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio digital UNCP. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4509>
- Velásquez, H., y Rojas, B. (2020). *Optimización de la estructura del semirremolque usando acero de alta resistencia para el transporte de GLP* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Santa]. Repositorio digital UNS. <https://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14278/3601/51132.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

APÉNDICES

Apéndice 1.

Matriz de consistencia

No.	Objetivo	Conclusión	Recomendación
1	Describir las causas que originan fallas estructurales en equipos de arrastre tipo semirremolque.	Las causas que originan fallas estructurales en un semirremolque: la elección de un material de fabricación con el límite elástico inadecuado para el uso del equipo; la fatiga causada por los esfuerzos cíclicos en puntos críticos; un diseño de uniones sin considerar el comportamiento de la estructura.	Es importante considerar el uso y las condiciones bajo las cuales va a operar el equipo, así con ello elegir el material adecuado y realizar un diseño que permita una larga vida útil del semirremolque.
2	Categorizar los tipos de fallas estructurales que suelen presentarse en equipos de arrastre tipo semirremolque.	Las fallas más frecuentes son las causadas por fatiga en puntos críticos de tensiones, por ejemplo; final de cordón de soldadura, cambios bruscos de geometría, uniones demasiado rígidas. También se presentan fallas por mal diseño. Fallas por agentes externos como la corrosión. Fallas por sobrepasar capacidades del equipo.	Antes de la fabricación es importante realizar un buen diseño; durante la fabricación hay que revisar las soldaduras y que estén correctamente aplicadas; después de la fabricación hay que realizar el respectivo mantenimiento a los equipos.

Continuación de Apéndice 1.

No.	Objetivo	Conclusiones	Recomendación
3	Simular los escenarios de fallas estructurales en equipos de arrastre tipo semirremolque mediante un software CAD.	El software CAD permite simular escenarios con distintos parámetros, con lo cual se obtienen resultados de gran importancia como esfuerzos, puntos críticos, factor de seguridad y demás datos.	Es recomendable en lo posible, contar con otro software de análisis de elementos finitos para darle una segunda comprobación a los resultados, y así con esto aumentar el nivel de confianza del equipo final.
G	Proponer estrategias para la reducción de fallas estructurales que pueden presentarse en los equipos de tipo semirremolque de una empresa dedicada a diseño y manufactura de equipos de arrastre.	Las estrategias propuestas para reducción de posibles fallas estructurales en equipos de tipo semirremolque de una empresa dedicada a diseño y manufactura de equipos de arrastre son selección adecuada del material de fabricación del semirremolque conforme los requerimientos, selección de tipo de unión adecuada de elementos estructurales conforme requerimiento de uso, y la creación de rutinas de inspección del estado de elementos y uniones.	Para realizar las inspecciones de estado de condición, colocar énfasis en los puntos clave de concentración de esfuerzo para prevención de fatiga, cortes y tensiones inducidas, y monitoreo de condición de corrosión en piezas y uniones.

Nota. Matriz de consistencia en donde se encuentran los objetivos, conclusiones y recomendaciones. Elaboración propia, realizado con Word 2019.

ANEXOS

Anexo 1.

Tabla de especificaciones aplicables ASTM

TABLA 1.1 Especificaciones aplicables de la ASTM a diversos perfiles estructurales.

Tipo de acero	Designación de la ASTM	Esfuerzo mínimo de fluencia F_y (klb/plg ²)	Esfuerzo* de tensión F_u (klb/plg ²)	Serie de perfiles aplicables														
				w	M	S	HP	C	MC	L	Rect.	HSS		Tubo				
				Rect.		Redondo												
Al carbono	A36	36	58-80 ^b															
	A53 Gr. B	35	60															
	A500	Gr. B	42	58														
			46	58														
		Gr. C	46	62														
			50	62														
	A501	Gr. A	36	58														
		Gr. B	50	70														
	A529 ^f	Gr. 50	50	65-100														
		Gr. 55	55	70-100														
Baja aleación alta resistencia	A572	Gr. 42	42	60														
		Gr. 50	50	65 ^d														
		Gr. 55	55	55														
		Gr. 60 ^e	60	60														
		Gr. 65 ^e	65	65														
	A618 ^f	Gr. I & II	50 ^g	70 ^g														
		Gr. III	50	50														
	A913	50	50 ^h	60 ^h														
		60	60	75														
		65	65	80														
70		70	90															
A992	50	65 ⁱ																
Baja aleación alta resistencia resistente a la corrosión	A242	42 ^j	63 ^j															
		46 ^k	67 ^k															
		50 ^l	70 ^l															
	A588	50	70															
A847	50	70																

■ = Especificación recomendada para el material
 □ = Otra especificación de material aplicable, cuya disponibilidad deberá confirmarse antes de la especificación
 □ = La especificación de material no aplica

^a Mínimo a menos que se muestre un rango.
^b Para perfiles arriba de 426 lb/pie, sólo aplica el mínimo de 58 klb/plg².
^c Para perfiles con un espesor de patín menor que o igual a 1 1/2 plg solamente. Para mejorar la soldabilidad, puede especificarse un máximo de carbono (de acuerdo con el Requisito suplementario S78 de la ASTM). Si se desea, puede especificarse el esfuerzo máximo de tensión de 90 klb/plg² (de acuerdo con el Requisito suplementario S79 de la ASTM).
^d Si se desea, puede especificarse el esfuerzo máximo de tensión de 70 klb/plg² (de acuerdo con el Requisito suplementario S91 de la ASTM).
^e Para perfiles con un espesor de patín menor que o igual a 2 plg solamente.
^f A618 de la ASTM también puede especificarse como resistente a la corrosión; véase A618 de la ASTM.
^g El mínimo aplica a muros de un espesor nominal de 3/4 plg y menor. Para espesores de muro mayores que 3/4 plg, $F_y = 46$ klb/plg² y $F_u = 67$ klb/plg².
^h Si se desea, puede especificarse un esfuerzo máximo de fluencia de 65 klb/plg² y una relación de resistencia máxima a la fluencia entre la de tensión de 0.85 (de acuerdo con el Requisito suplementario S75 de la ASTM).
ⁱ Se incluyen como obligatorias en A992 de la ASTM una relación de resistencia máxima a la fluencia entre la de tensión de 0.85 y una fórmula equivalente para el carbono.
^j Para perfiles con un espesor de patín mayor que 2 plg solamente.
^k Para perfiles con un espesor de patín mayor que 1 1/2 plg y menor que o igual a 2 plg solamente.
^l Para perfiles con un espesor de patín menor que o igual a 1 1/2 plg solamente.

Fuente: Manual de la AISC, Tabla 2-4, p. 2-48, 14ava. Ed., 2011. Derechos reservados © American Institute of Steel Construction. Reproducido con autorización. Todos los derechos reservados.

Nota. Tabla con las diferentes aplicaciones de los aceros ASTM. Obtenido de McCormac, J. C. & Csernak, S. F. (2012). *Diseño de estructuras de acero*. (p. 23) Alfaomega Grupo Editor.