

**MEJORAMIENTO ESTRUCTURAL DE UN SEMI-REMOLQUE DE TIPO  
PLATAFORMA 3S3 IMPLEMENTANDO ACEROS DE ALTA RESISTENCIA**

**HENRY ALEXANDER ANAYA PLATARRUEDA  
JOSE AUGUSTO VILLAMIZAR ROJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

**MEJORAMIENTO ESTRUCTURAL DE UN SEMI-REMOLQUE DE TIPO  
PLATAFORMA 3S3 IMPLEMENTANDO ACEROS DE ALTA RESISTENCIA**

**HENRY ALEXANDER ANAYA PLATARRUEDA  
JOSE AUGUSTO VILLAMIZAR ROJAS**

**Trabajo de grado, presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Metalúrgico**

**Director:**

**Ing. YESID ALBERTO MEDINA SIERRA**

**Co- director:**

**Ing. AFRANIO ANTONIO CARDONA GRANADOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	17
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
2. ANTECEDENTES.....	21
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....	24
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	24
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA. ....	25
4.1. ESTRUCTURA DE LOS SEMI-REMOLQUES.....	25
4.1.1. Vigas principales.....	26
4.1.2. Travesaños. ....	27
4.1.3. Suspensiones. ....	28
4.2. LEGISLACIÓN.....	29
4.2.1. Clasificación de los semi-remolques.....	29
4.2.2. Dimensiones de los semi-remolques. ....	30
4.2.4. El eje trídem.....	32
4.3. ACEROS ASTM A36, DOMEX 700 Y HARDOX 450.....	33
4.3.1. Composición química de los aceros ASTM A36, Domex 700 y Hardox 450	34
4.3.2. Soldabilidad del acero Domex 700 .....	36
4.3.2.1. Elaboración de la Junta en el acero Domex 700.....	36
4.3.2.2. Metal de aporte para el acero Domex 700 .....	37
4.4. RESISTENCIA ESTÁTICA DE LAS UNIONES SOLDADAS .....	38

4.4.1. Entrada de calor.....	38
4.4.2. Temperatura entre pases de soldadura. ....	39
4.4.3. Zonas blandas. ....	39
4.4.4. Resistencia al impacto de la unión soldada. ....	41
4.4.5. Resultados de los ensayos mecánicos. ....	43
4.5. FATIGA EN LOS SEMI-REMOLQUES .....	44
4.5.1. Resistencia a la fatiga de la unión soldada. ....	44
5. METODOLOGÍA .....	46
5.1. REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.....	47
5.2. ESTUDIO DE LOS SEMI-REMOLQUES COMERCIALES. ....	47
5.2.1. Dimensionamiento. ....	51
5.3. MODIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES. ....	54
5.3.1. Criterio para la Reducción de espesores. ....	54
5.3.2. Cambios en los espesores de las vigas principales.....	55
5.3.3. Cambios en el modelo de los travesaños. ....	56
5.3.3.1. Modelo del travesaño en el semirremolque marca FALCON.....	57
5.3.3.2. Modelo del travesaño en el semirremolque marca ROMARCO.....	57
5.3.3.3. Modelo del travesaños propuesto para el mejoramiento.....	58
5.4. FORMULACIÓN DEL MEJORAMIENTO .....	59
5.5. SIMULACION 3D .....	61
5.5.1. Protocolo de simulación.....	61
5.5.2. Elementos constitutivos de la malla. ....	62
5.5.3. Teoría del fallo. ....	63
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	64
6.1. DISTRIBUCIÓN DEL PESO ESTRUCTURAL PARA EL DISEÑO PROPUESTO .....	64
6.2. CONDICIONES DE CARGA PARA CADA SEMI-REMOLQUE.....	65
6.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULACIÓN. ....	67

6.3.1.1. Viga principal para el modelo en acero ASTM A36.....	68
6.3.1.1.1. Resultados obtenidos en la simulación con el acero ASTM A36. ....	69
6.3.1.1.2. Momentos de inercia presentes en las vigas elaboradas con el acero ASTM A36.....	72
6.3.1.1.3. Viga principal para el modelo en acero Domex 700.....	73
6.3.1.1.4. Resultados obtenidos en la simulación con el acero Domex 700. ....	75
6.3.1.1.5. Momentos de inercia presentes en las vigas elaboradas en acero Domex 700.....	77
6.3.1.2. Comparación de los resultados obtenidos para las vigas de ambos modelos. ....	78
6.3.1.3. Comparación entre los momentos de inercia presentes en las vigas de ambos modelos.....	80
6.3.1.4. Validación de los resultados para la simulación de las vigas ASTM A36 y Domex 700.....	81
6.3.2. Travesaños para los modelos en acero ASTM A36 y Domex 700.....	83
6.3.2.1. Travesaños elaborados en acero ASTM A36. ....	84
6.3.2.1.1. Resultados de la simulación del travesaño con perfil en C. ....	85
6.3.2.1.2. Resultados obtenidos en la simulación del travesaño con perfil en doble T.....	88
6.3.2.2. Travesaño elaborado en acero Domex 700. ....	91
6.3.2.2.1. Resultados obtenidos en la simulación del travesaño tipo gaviota. ....	92
6.3.2.2.2. Comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones de los travesaños. ....	94
6.3.2.2.3. Validación de los resultados para la simulación de los travesaños.....	96
6.3.3. Ensamblaje para el modelo en acero ASTM A36 y Domex 700. ....	98
6.3.3.1. Resultados obtenidos en la simulación del ensamblaje ASTM A 36.....	99
6.3.3.2. Resultados obtenidos en la simulación del ensamblaje Domex 700.....	100
6.3.3.3. Comparación de los resultados obtenidos para los ensamblajes. ....	103
6.3.3.4. Validación de los resultados para la simulación de los ensamblajes .....	104

7. CONCLUSIONES .....	107
8. RECOMENDACIONES.....	109
BIBLIOGRAFÍA.....	112

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Designación de los semirremolques para el transporte de carga. ....	29
Tabla 2. Dimensiones máximas para los semirremolques en Colombia.....	30
Tabla 3. Peso bruto vehicular de los semirremolques .....	31
Tabla 4. Peso máximo por eje en los semirremolques .....	32
Tabla 5. Propiedades elásticas de los aceros simulados.....	33
Tabla 6. Composición química del acero DOMEX 700 .....	34
Tabla 7. Composición química típica del acero ASTM A36 .....	34
Tabla 8. Composición química del acero Hardox 450.....	35
Tabla 9. Metales de aporte recomendados para soldar el acero Domex 700 .....	37
Tabla 10. Valor de la eficiencia del arco según el método de soldadura. ....	38
Tabla 11. Entradas de calor utilizadas para los diferentes espesores .....	41
Tabla 12. Resultados de los ensayos de resistencia a la tracción y al impacto .....	43
Tabla 13. Características en los semirremolques de las principales marcas.....	48
Tabla 14. Peso de los componentes del semirremolque marca ROMARCO .....	48
Tabla 15. Peso de los componentes del semirremolque marca FALCON .....	49
Tabla 16. Espesores mínimos recomendados para los aceros de alta resistencia.....	55
Tabla 17. Espesores comercializados en Colombia por la firma SSAB Tunnpåt. .	55
Tabla 18. Peso de los componentes en el modelo de semirremolque propuesto..	64
Tabla 19. Carga útil que puede transportar cada uno de los semirremolques. ....	65
Tabla 20. Incrementos de la carga útil del modelo propuesto.....	66
Tabla 21. Fuerzas que actúan sobre las vigas en ambos diseños.....	67
Tabla 22. Especificaciones utilizadas para la simulación de las vigas principales.	68
Tabla 23. Características principales de la viga ASTM A36 .....	69
Tabla 24. Propiedades generales de la viga ASTM A36.....	69
Tabla 25. Principales resultados en la simulación de la viga ASTM A36.....	71

Tabla 26. Características principales para la viga Domex 700 .....	74
Tabla 27. Propiedades generales de la viga Domex 700.....	74
Tabla 28. Principales resultados en la simulación de la viga Domex 700.....	76
Tabla 29. Principales resultados obtenidos en las simulaciones de las vigas ASTM A36 y Domex 700 .....	78
Tabla 30. Determinación del número de elementos de malla para la simulación de la viga ASTM A36 .....	81
Tabla 31. Número de nodos y elementos finitos para la viga ASTM A36 .....	82
Tabla 32. Determinación del número de elementos de malla para la simulación de la viga Domex 700 .....	82
Tabla 33. Número de nodos y elementos finitos para la viga Domex 700 .....	82
Tabla 34. Principales resultados obtenidos para el travesaño con perfil en C.....	88
Tabla 35. Principales resultados obtenidos para el travesaño con perfil doble en T.....	91
Tabla 36. Principales resultados obtenidos para el travesaño tipo gaviota.....	94
Tabla 37. Comparación de los resultados obtenidos para los travesaños .....	94
Tabla 38. Especificaciones de las mallas utilizadas para las simulaciones. ....	98
Tabla 39. Resultado de la simulación para el ensamblaje ASTM A36.....	100
Tabla 40. Resultados de la simulación para el ensamblaje Domex 700 .....	102
Tabla 41. Resultados obtenidos en las simulaciones de los ensamblajes.....	103
Tabla 42. Determinación del número de elementos de malla para la simulación del ensamblaje ASTM A36 .....	104
Tabla 43. Número de nodos y elementos finitos utilizados para la simulación del ensamblaje ASTM A36. ....	104
Tabla 44. Determinación del número de elementos de malla para la simulación del ensamblaje Domex 700 .....	105
Tabla 45. Número de nodos y elementos finitos utilizados para la simulación del ensamblaje Domex 700. ....	105

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Estructura de un semirremolque 3S3.....	25
Figura 2. Conjunto del tracto camión y semirremolque proporcionado por BAF ....	25
Figura 3. Zonas y partes que componen a las vigas principales.....	26
Figura 4. Tipos de perfiles y uniones del travesaño con el alma de la viga principal .....	28
Figura 5. Placa de fijación para las suspensiones con unión atornillada .....	28
Figura 6. Eje trídem utilizado en los semirremolques 3S3. ....	32
Figura 7. Proceso de corte térmico recomendado .....	36
Figura 8. Curva de dureza típica del acero Domex 700 en las uniones soldadas .	39
Figura 9. Entrada de calor máxima recomendada para los aceros Domex .....	40
Figura 10. Zonas de grano grueso presentes en la ZAC .....	42
Figura 11. Número de pasadas según el espesor .....	42
Figura 12. Metodología utilizada para la investigación .....	46
Figura 13. Distribución de los elementos en la estructura del FALCON .....	50
Figura 14. Esquema del modelo de la marca FALCON .....	51
Figura 15. Esquema del modelo de la marca ROMARCO .....	52
Figura 16. Esquema de una viga principal.....	53
Figura 17 Sección transversal de la viga en acero ASTM A 36 y Domex 700 .....	56
Figura 18. Dimensiones del travesaño en el semirremolque marca FALCON.....	57
Figura 19. Dimensiones del travesaño en el semirremolque marca ROMARCO ...	57
Figura 20. Dimensiones del travesaños propuesto para el mejoramiento .....	58
Figura 21. Distribución de la carga sobre los semirremolques .....	60
Figura 22. Vista frontal para la distribución de carga .....	60
Figura 23. Vista lateral para la distribución de carga .....	60
Figura 24. Análisis estático del modelo a mejorar.....	60
Figura 25. Vista previa de la simulación para las vigas principales .....	68

Figura 26. Esfuerzo Equivalente Von Mises para la viga ASTM A36.....	69
Figura 27. Deformación elástica equivalente para la viga ASTM A36 .....	70
Figura 28. Deformación total para la viga en acero ASTM A36 .....	70
Figura 29. Variación de los momentos de inercia para la viga ASTM A36 .....	72
Figura 30. Esquema de las zonas en las vigas principales.....	72
Figura 31. Esfuerzo Equivalente Von Mises para la viga Domex 700.....	75
Figura 32. Deformación Elástica Equivalente para la viga Domex 700.....	75
Figura 33. Deformación total para la viga Domex 700 .....	76
Figura 34. Variación de los momentos de inercia para la viga Domex 700 .....	77
Figura 35. Variación del momento de inercia en las vigas simuladas.....	80
Figura 36. Gráfico de convergencia para la viga ASTM A36 .....	81
Figura 37. Gráfico de convergencia para la viga Domex 700 .....	82
Figura 38. Esquema de la carga sobre el travesaño por sección individual .....	84
Figura 39. Vista previa de la simulación para los travesaños ASTM A36 .....	85
Figura 40. Esfuerzo Equivalente Von Mises para el travesaño con perfil en C.....	85
Figura 41. Deformación elástica equivalente para el travesaño con perfil en C ....	86
Figura 42. Deformación total del travesaño con perfil en C .....	87
Figura 43. Esfuerzo equivalente Von Mises para el travesaño con perfil en doble T.....	88
Figura 44. Deformación elástica equivalente del travesaño con perfil en doble T	89
Figura 45. Deformación total para el travesaño con perfil en doble T.....	90
Figura 46. Vista previa de la simulación del travesaño tipo gaviota.....	91
Figura 47. Esfuerzo equivalente Von Mises para el travesaño tipo gaviota.....	92
Figura 48. Deformación elástica equivalente travesaño tipo gaviota .....	93
Figura 49. Deformación total para el travesaño tipo gaviota .....	93
Figura 50. Gráficos de convergencia para los travesaños .....	96
Figura 51. Determinación de los elementos de malla para los travesaños .....	96
Figura 52. Vista previa de la simulación para los ensamblajes.....	98
Figura 53. Esfuerzo equivalente Von Mises para el ensamblaje ASTM A36. ....	99
Figura 54. Deformación elástica equivalente para el ensamble ASTM A 36 .....	99

Figura 55. Deformación total para el ensamble ASTM A 36 .....	100
Figura 56. Esfuerzo equivalente Von Mises para el ensamble Domex 700 .....	101
Figura 57. Deformación elástica equivalente para el ensamble Domex 700 .....	101
Figura 58. Deformación total para el ensamble en acero Domex 700. ....	102
Figura 59. Gráfico de convergencia para el ensamble ASTM A36.....	104
Figura 60. Gráfico de convergencia para el ensamble Domex 700.....	105

## RESUMEN

**TÍTULO:** MEJORAMIENTO ESTRUCTURAL DE SEMIRREMOLQUES DE TIPO PLATAFORMA 3S3 IMPLEMENTANDO ACEROS DE ALTA RESISTENCIA\*

**AUTORES:** ANAYA PLATARRUEDA, Henry y VILLAMIZAR ROJAS, Jose\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Hardox 450, Domex 700, ASTM A36, semirremolque 3S3, mejoramiento, convergencia y ensamblaje.

### DESCRIPCIÓN:

En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos para el estudio de la viabilidad para un mejoramiento de un semirremolque tipo plataforma 3S3 para vehículos de carga pesada, analizando un modelo proporcionado por la empresa BAF y los prototipos más comerciales en Colombia, se buscó realizar una reducción del peso estructural para así incrementar su capacidad de carga, sin comprometer su integridad estructural. Esto se logra por medio de una reducción de espesores y un cambio en el acero convencional ASTM A36, por aceros de alta resistencia Domex 700 y Hardox 450. El diseño incluyó un análisis mediante elementos finitos del comportamiento estructural estático, por medio del software ANSYS 14.0, para garantizar la funcionalidad del equipo. Se logró un modelo que reduce sustancialmente el peso del semirremolque en un 36,2% sin afectar su resistencia estructural, por el contrario, se obtuvo un mayor factor de seguridad en el modelo con los aceros Domex 700 y Hardox 450 comparado con el modelo en acero ASTM A36, dicho factor de seguridad es de 6,25 para todo el ensamble.

Mediante la comparación de los resultados obtenidos a partir de las respectivas simulaciones de los componentes estructurales presentes en los modelos en acero convencional y el propuesto en aceros de alta resistencia, se pudo establecer la ventajas que proporciona la utilización de los aceros Domex 700 y Hardox 450, al momento de implementar alternativas que permitan incrementar el rendimiento estructural de cada uno de los componentes que conforman el equipo.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: Yesid Medina Sierra.  
Co-director: Afranio Cardona Granados.

## ABSTRACT

**TITLE:** IMPROVEMENT STRUCTURAL OF SEMI-TRAILERS TYPE PLATFORM 3S3 BY IMPLEMENTING HIGH STRENGTH STEELS\*

**AUTHORS:** ANAYA PLATARRUEDA, Henry y VILLAMIZAR ROJAS, Jose.\*\*

**KEYWORDS:** Hardox 450, Domex 700, ASTM A36, semitrailer 3S3, improvement, convergence and assembly.

### DESCRIPTION:

In this paper, are presented the results obtained to study the feasibility of an improved type 3S3 platform semitrailer for heavy vehicles, analyzing a model provided by the company BAF and the most commercial prototypes in Colombia, seeks to realize a reduction of structural weight so as to increase its carrying capacity without compromising its structural integrity. This is achieved through a reduction in thickness and a change in the conventional steel ASTM A36, for high strength steels Domex 700 and Hardox 450. The design included a finite element analysis of the static structural behavior, using the software ANSYS 14.0, to ensure the functionality of the equipment. A model that substantially reduces the weight of the semitrailer by 36,2% without affecting the structural strength was achieved, on the contrary, was obtained higher safety factor in the model with the Domex700 and Hardox 450 compared to ASTM A36 steel model, the safety factor is 6.25 for the entire assembly.

By comparing the results obtained in the simulations of the respective structural components in the models with conventional steel and the model proposed in high strength steels, it was established the advantages provided by the use of Domex 700 and Hardox 450, when are implements as alternatives to increase the structural performance of each of the components that make up the equipment.

---

\* Degree Work

\*\* Physical-Chemical Engineering Depart, School of Metallurgical Engineering. Advisor: Ing. Yesid Medina Sierra. Co-advisors: Ing. Afranio Cardona Granados

## INTRODUCCIÓN

La compañía BAF y Asociados ofrecen una amplia gama de servicios y productos en el sector metalmecánico, entre los que se encuentra el mantenimiento industrial, estructuras y montajes. En el año 2014 la compañía decide ampliar su campo de acción, interesándose por el sector del transporte de carga pesada por carretera, en el cual pretenden comercializar una nueva línea de semirremolques que les permita competir en este mercado.

Para el desarrollo de esta labor se propusieron alternativas viables que se pudieran adaptar a uno de los modelos de semirremolques actuales, con el fin de mejorar algunos aspectos, y convertir a estas alternativas en ventajas características de los semirremolques que serán fabricados por BAF y Asociados.

Una alternativa es la reducción del peso de los semirremolques por medio de la utilización de los aceros de alta resistencia Domex 700 y Hardox 450, en reemplazo del acero ASTM A36, el cual es ampliamente utilizado para la fabricación de estos productos. Los aceros de alta resistencia permiten reducir el peso e incrementar los márgenes de utilidad para las empresas de transporte al disminuir el consumo del combustible y la frecuencia del mantenimiento de los equipos debido a las excelentes propiedades mecánicas de estos aceros.

En este trabajo de investigación se expone los procesos de modelamiento y simulación aplicados a un modelo teórico de semirremolque. Este prototipo tiene como objetivo principal la obtención de una mayor capacidad de carga, sin que se afecte su integridad estructural, y que no sobrepase los límites establecidos por el ministerio de transporte. Para este propósito es analizado el desempeño de este modelo en comparación a otros prototipos de semirremolques ofertados

actualmente en el mercado. Por lo cual, ha sido empleado para el proceso de simulación un software basado en la teoría de elementos finitos (ANSYS 14.0), debido a la difícil obtención de soluciones analíticas para las interacciones de las cargas con los elementos que poseen una sección transversal variable.

## 1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente en Colombia se ha incrementado a un ritmo acelerado el transporte de carga pesada por carretera, lo cual origina una significativa fuente de ingresos y empleo a la economía del país [1]. Sin embargo, las problemáticas presentes en esta creciente industria son variadas y complejas, destacándose entre ellas el hecho de que la creciente movilidad de productos desde las zonas costeras hacia el interior del país no cuenta con la infraestructura vial exigida por esta. Igualmente, en los últimos años se ha incrementado el costo de los combustibles y peajes debido al incremento permanente en el costo del petróleo y al mejoramiento de la infraestructura vial [2], reduciéndose así los márgenes de ganancias e incrementándose los costos operativos para las empresas transportadoras

Por todo lo anterior, se hace necesario contemplar alternativas que le permitan a las empresas de transporte de carga pesada obtener ganancias que aminoren las pérdidas producidas por factores externos. En estos medios de transporte es común la utilización de semirremolques de tipo plataforma y tanques, especialmente los de tipo 3S2 y 3S3 que corresponden a semirremolques de dos y tres ejes respectivamente; los vehículos de tres ejes tienen hasta 52000 kg de peso bruto vehicular [3]. Por ende, se considera al semirremolque como un factor importante en los márgenes de utilidad del transportador, debido a que toda su estructura hace parte del peso bruto vehicular.

Una de las alternativas consiste en el análisis matemático, estructural y computacional de ingeniería, con el fin de desarrollar semirremolques en los cuales se disminuya el peso para así incrementar su capacidad de carga, sin

comprometer la resistencia mecánica de la estructura, todo esto con el propósito de mejorar los márgenes de utilidad en el sector del transporte [4].

## 2. ANTECEDENTES

Los comienzos del transporte terrestre se pueden remontar al inicio de la historia, en la cual ha quedado demostrada la innegable necesidad de trasladar diversos tipos de estructuras, las cuales serían imposibles de transportar solo con la fuerza del hombre, por lo que se tuvieron que desarrollar métodos para el traslado de estas cargas sin dañarlas [5].

En el transcurso de la revolución industrial el transporte consigue un avance espectacular, principalmente por dos motivos: la creación de una vía segura y adecuada para el transporte, y una maquinaria potente y regular. Estas características son propias del ferrocarril, aportando una gran capacidad de carga, acortando significativamente el tiempo de traslado y definiendo el desarrollo socio-económico de la nueva sociedad [6]. Pero, es a principios del siglo XX que se consiguen los primeros derivados del petróleo de manera industrial, y se logra el adecuado tratamiento para el árbol hevea, cuyo propósito es incrementar la eficiencia en la obtención del caucho. Estos y otros aspectos importantes tales como el asfaltado de las carreteras, el motor de combustión interna y la rueda de caucho hizo posible la elaboración un vehículo tan rápido como el tren y seguro, pero mucho más versátil, el cual es totalmente independiente de la vía férrea permitiéndole llegar a todas partes, siendo en esta forma superior al ferrocarril. Los coches fueron aumentando progresivamente su capacidad de carga, hasta que aparecen los camiones, remolques y semirremolques [5,6]. Estos medios de transporte han experimentado adaptaciones y mejorías, de forma constante y significativa con el pasar de los años.

Una de las empresas pioneras en la construcción de semirremolques en Latino América, fue GUERRA S.A fundada por Ángel Francisco Guerra en el año 1970

en la ciudad de Caxias do Sul, estado de Río Grande do Sul, Brasil. En este país empezó la importación de camiones y semirremolques con una mayor potencia. Con el tiempo el mercado empezó a apuntar hacia la necesidad de una mayor capacidad de carga, por lo cual Ángelo Guerra pasa a instalar el sistema del tercer eje, el cual era montado como un mecanismo de rodaje simple, conocido en la época como “eje muerto” [6].

La empresa BAF y Asociados, en el año 2014 abren sus puertas a la posibilidad de ingresar en la industria de los semirremolques de plataforma con tres ejes, buscando hacer de esta una operación mercantil exitosa para su organización. Esta iniciativa es fundamentada en el diseño de ingeniería, para así poder crear productos de óptimo desempeño y que permitan incrementar las ganancias económicas de sus futuros clientes.

El tipo de vehículo seleccionado para este estudio es un semirremolque de plataforma con tres ejes 3S3 (designación bajo la norma NTC 4788) para el transporte de carga, en el cual se emplea el acero ASTM A36 en la elaboración sus componentes estructurales.

En los últimos años, una de las metodologías vanguardistas en la construcción de carrocerías es la utilización de aceros de alta resistencia. Estos materiales incrementan considerablemente la resistencia estructural del vehículo, al mismo tiempo que permiten una considerable disminución del peso final en todo su conjunto. Para que un acero sea considerado de alta resistencia por regla general deben soportar presiones de ruptura por encima de los 210 MPa [7].

El desarrollo de este tipo de aceros empezó en la Primera Guerra Mundial y resurgió con fuerza en la década de los 70, debido a la crisis del petróleo. Por lo que se puede afirmar que estos aceros surgieron como una alternativa para controlar el considerable peso de los vehículos, permitiendo elevar

significativamente la resistencia estructural y el rendimiento en el consumo de combustible [7].

### **3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Estudiar la viabilidad del mejoramiento para un semirremolque tipo 3S3 suministrado por la empresa BAF y asociados, mediante la aplicación de aceros de alta resistencia Domex 700 y Hardox 450, con el fin de aumentar el factor de seguridad y realizar una reducción en peso de sus principales componentes estructurales.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

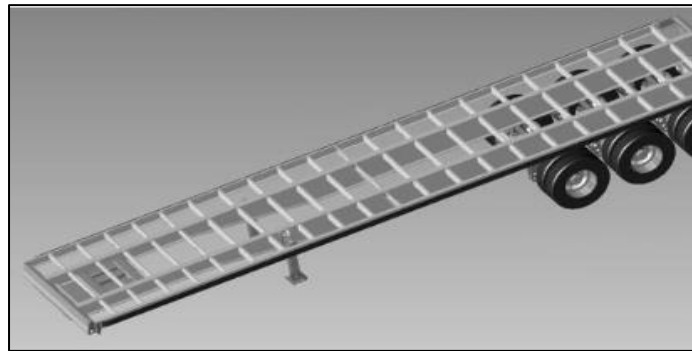
- Realizar una comparación entre el acero utilizado actualmente en Colombia para la fabricación de los componentes estructurales de semirremolques y los aceros de alta resistencia Domex 700 y Hardox 450.
- Establecer las dimensiones y parámetros operacionales para el semirremolque proporcionado por la empresa BAF y asociados.
- Plantear un criterio que permita determinar la reducción de espesores al utilizar aceros de alta resistencia manteniendo la integridad estructural del semirremolque.
- Realizar un análisis estructural para el modelo del semirremolque a mejorar y el propuesto mediante el uso del software ANSYS 14.0.

## 4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

### 4.1. ESTRUCTURA DE LOS SEMI-REMOLQUES

Un semirremolque no es un equipo realmente complicado estructuralmente hablando. Está constituido por varios elementos estructurales, cada uno de ellos presentan medidas específicas de longitud, ancho, espesor y peso. Además, cada elemento desempeña una labor crucial en la estructura.

**Figura 1. Estructura de un semirremolque 3S3**



**Figura 2. Conjunto del tracto camión y semirremolque proporcionado por BAF**



Fuente: BAF y Asociados (2014)

El semirremolque tipo plataforma es el más general de todas la aplicaciones, puede tener incorporados dos o tres ejes traseros y el piso permite transportar una gran diversidad de cargas (Figuras 1 y 2). Las dimensiones máximas permiten llevar contenidos de hasta 35 toneladas [8]. Dada su configuración robusta se convierte en un buen objetivo para ser optimizado con el fin de mejorar la capacidad de carga y disminuir los costos de operación por desgaste de ruedas y el combustible.

Los elementos estructurales más importantes que componen el chasis de los semirremolques son:

**4.1.1. Vigas principales.** Los semirremolques tienen dos vigas longitudinales que son la columna vertebral del mismo. Las vigas tienen un perfil en doble “T”, el cual está conformado por el patín superior, el alma y el patín inferior. La altura del alma puede variar teniendo en cuenta un montaje apropiado sobre el tracto camión, por lo cual en la zona de acople el alma de la viga es más corta que en el resto de su longitud. Esto es permitido, debido a que en esta zona el tracto camión ayuda a soportar en parte el peso del semirremolque [4].

**Figura 3. Zonas y partes que componen a las vigas principales**



Como requisito en la etapa de fabricación de la viga en doble “T” o viga principal utilizando el acero ASTM A36, se recomienda utilizar la soldadura por arco sumergido, debido a que es un método de soldadura automatizado, y no desarrolla

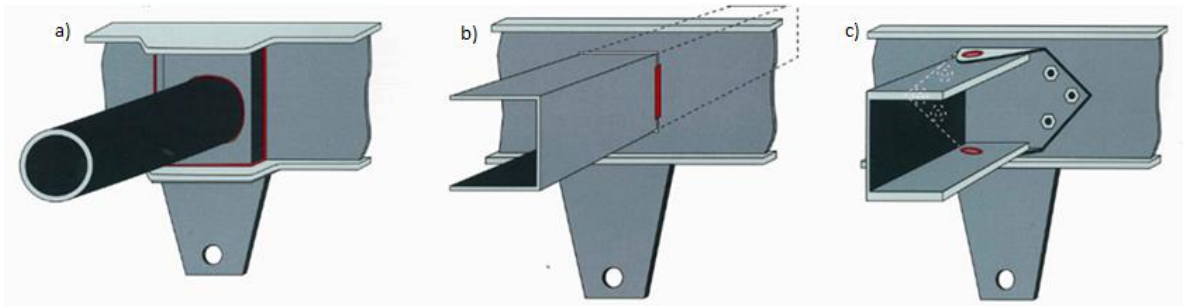
zonas con exceso de tensiones, ya sea por mala penetración u otra falla que se pueda presentar en la manufactura. La soldadura por arco sumergido es el proceso más adecuado para evitar la deformación en la viga [5].

Estas vigas son las que finalmente asumirán toda la carga, y por lo tanto se deben realizar bajo los mejores procedimientos, debido a que las fallas más reconocidas se producen en estos elementos estructurales [5].

**4.1.2. Travesaños.** Los elementos transversales, se pueden encontrar en perfiles abiertos, tubos o perfiles de sección cuadrada, para los trailers en los que el chasis está sometido a cargas de torsión. Por ejemplo: en los semirremolques con volquete, es recomendable el uso de perfiles con una sección transversal cerrada (figura 4a), este tipo de travesaños se deben soldar directamente, sin necesidad de refuerzos adicionales. Para los vehículos pesados se pueden utilizar refuerzos en el alma, los cuales están integrados a los travesaños para aumentar su rigidez y reducir el nivel de estrés en esta área [9].

Los perfiles con secciones transversales abiertas, se utilizan para semirremolques donde los travesaños están sometidos principalmente a la flexión. Por ejemplo, los semirremolque de tipo plataforma. El perfil de los travesaños puede atravesar el alma mediante una abertura y estos se pueden soldar al alma de la viga principal (figura 4b). Sin embargo, otra alternativa es utilizar un soporte de fijación para distribuir las tensiones sobre un área mayor [9]. El soporte de fijación puede ser soldado o atornillado al alma de la viga principal (figura 4c).

**Figura 4. Tipos de perfiles y uniones del travesaño con el alma de la viga principal**

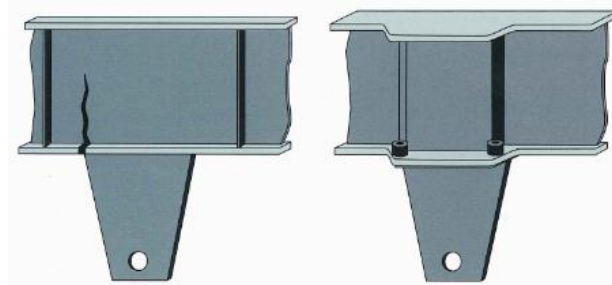


Fuente: SSAB Tunnpått

**4.1.3. Suspensiones.** Los soportes o las suspensiones en los diseos, estn ubicadas en reas cricas de los semirremolques, tales como la regin del cuello en la viga principal donde se introducen especialmente la flexin vertical y las cargas laterales [9]. Por lo tanto, es importante evitar la soldadura en el borde de los patines, debido a que stas son reas de altas tensiones.

A fin de reducir el gradiente de rigidez entre la suspensin y el patn inferior es benfico soldar el soporte a una placa de fijacin, la cual debe tener un espesor igual al del alma de la viga principal, y las soldaduras entre la placa y el patn deben estar situadas como mnimo a 20 mm del borde del patn [9].

**Figura 5. Placa de fijacin para las suspensiones con unin atornillada**








Fuente: SSAB Tunnpått

## 4.2. LEGISLACIÓN

Antes de proponer un modelo de semirremolque, es necesario identificar las restricciones impuestas por el ministerio de Transporte, a través de la resolución 4100 del 2004, en lo que se refiere a dimensiones y pesos máximos de semirremolques para carga pesada.

**4.2.1. Clasificación de los semi-remolques.** La designación para los semirremolques está relacionada con la configuración de sus ejes, como se muestra en la siguiente tabla [3]

**Tabla 1. Designación de los semirremolques para el transporte de carga.**

Designación	Configuración	Descripción
2S1		Tractocamión de dos ejes con semirremolque de un eje
2S3		Tractocamión de dos ejes con semirremolque de tres ejes
3S1		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de un eje
3S2		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes
3S3		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes

Fuente: Ministerio de transporte, resolución 4100 del 2004 (2010)

Los vehículos de carga se designan de la siguiente manera [3]:

- El primer dígito designa el número de ejes del camión o del tracto camión (cabezote).
- La letra S significa semirremolque y el dígito inmediato hace referencia al número de sus ejes.

**4.2.2. Dimensiones de los semi-remolques.** Los vehículos para el transporte de carga que circulan por el territorio nacional, deben cumplir con las dimensiones establecidas en la siguiente tabla [3]:

**Tabla 2. Dimensiones máximas para los semirremolques en Colombia**

Designación	Dimensiones		
	Ancho máximo, m	Altura máxima, m	Longitud máxima, m
2S1	2,60	4,40	18,50
2S2	2,60	4,40	18,50
2S3	2,60	4,40	18,50
3S1	2,60	4,40	18,50
3S2	2,60	4,40	18,50
3S3	2,60	4,40	18,50

Fuente: Ministerio de transporte, resolución 4100 del 2004 (2010)

Esta investigación se realiza teniendo en cuenta que el vehículo proporcionado por la empresa BAF, corresponde a un semirremolque que posee una configuración del tipo 3S3. Por lo cual, el conjunto está conformado por un tracto camión y un semirremolque con 3 ejes cada uno. El semirremolque tiene una longitud de 13 metros y un ancho de 2,60 metros.

**4.2.3. Pesos máximos en los semi-remolques.** El peso bruto vehicular para los vehículos de transporte de carga (semirremolques) a nivel nacional debe ser el establecido en la siguiente tabla [3].

**Tabla 3. Peso bruto vehicular de los semirremolques**

<b>Vehículos</b>	<b>Designación</b>	<b>Máximo PBV, kg</b>
<b>Tracto-camión con semirremolque</b>	2S1	27.000
	2S2	32.000
	2S3	40.500
	3 S1	29.000
	3 S2	48.000
	3S3	52.000

Fuente: Ministerio de transporte, resolución 4100 del 2004 (2010)

Como se puede observar en la tabla 2, las dimensiones máximas para todos los semirremolque son iguales. Siendo las principales diferencias entre ellos: la cantidad de ejes y el peso bruto vehicular permitido para cada prototipo.

Existe una estrecha relación entre el número de ejes y el peso bruto vehicular. Es decir, a mayor número de ejes presentes en el conjunto del tracto camión y semirremolque, mayor es la cantidad de carga que se le permite transportar. En el caso del semirremolque 2S2 y 3S1 que presentan 4 ejes en todo el conjunto. El semirremolque 2S2 presenta una mejor distribución de la carga total, lo cual permite que este pueda transportar una mayor cantidad de carga, como se observa en la tabla 3.

El máximo peso por eje para los vehículos de transporte de carga a nivel nacional, debe ser el establecido por la siguiente tabla:

**Tabla 4. Peso máximo por eje en los semirremolques**

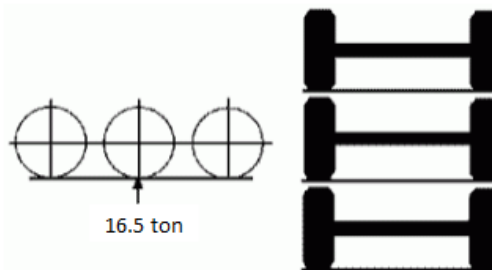
Tipo de eje	Peso máximo por eje, kg
<i>Eje sencillo</i>	
Dos llantas	6.000
Cuatro llantas	11.000
<i>Eje tandem</i>	
Cuatro llantas	11.000
Seis llantas	17.000
Ocho llantas	22.000
<i>Eje trídem</i>	
6 llantas	16.500
8 llantas	19.000
10 llantas	21.500
12 llantas	24.000

Fuente: Ministerio de transporte, resolución 4100 del 2004 (2010)

El semirremolque proporcionado por la empresa BAF es del tipo 3S3, por lo cual según la legislación colombiana no puede superar una carga bruta (peso del tracto camión, semirremolque y carga útil) de 52000 kg. Este semirremolque posee ejes de tipo trídem, en el cual se ensamblan un total de 6 llantas.

**4.2.4. El eje trídem.** Se denomina eje trídem al elemento constituido por tres ejes incorporado al vehículo a través de dispositivos comunes, separados por distancias menores a 2,4 metros, estos distribuyen la carga sobre los tres ejes. El peso máximo admisible para un eje trídem de 6 neumáticos es de 16500 Kg.

**Figura 6. Eje trídem utilizado en los semirremolques 3S3.**



Fuente: Ministerio de transporte, resolución 4100 del 2004 (2010)

### 4.3. ACEROS ASTM A36, DOMEX 700 Y HARDOX 450.

En Colombia es comúnmente utilizado en la fabricación de semirremolques el acero ASTM A36. En este proyecto se busca implementar aceros de alta resistencia en reemplazo del ASTM A36, dichos aceros son el Domex 700 y el Hardox 450. Los cuales son aceros micro aleados desarrollados por la firma sueca SSAB Tunnpåt. El Domex 700 al igual que el ASTM A36 es un acero estructural, pero el Hardox 450 es un acero anti desgaste, el cual simplemente se utilizará como láminas para el piso y en la carrocería del semirremolque.

En el análisis estructural por simulación son tenidos en cuenta únicamente los aceros ASTM A36 y Domex 700, por su capacidad de proporcionar resistencia mecánica a las estructuras, y sus precios son inferiores al del acero Hardox 450.

**Tabla 5. Propiedades elásticas de los aceros simulados**

<b>MATERIAL</b>	<b>Mód. de elasticidad [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Mód. de corte [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Coef. de Poisson</b>	<b>Densidad [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Resist. Mín.- Máx. [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Resist. a la fluencia Mín. [N/mm<sup>2</sup>]</b>
<b>DOMEX 700 MC</b>	210000	80000	0,29	7,85	750-950	700
<b>ASTM A36 HR</b>	210000	80000	0,29	7,85	400-550	250

El Domex 700 ha tenido una amplia acogida debido a que ofrece oportunidades técnicas ilimitadas para la fabricación de estructuras más resistentes, livianas y avanzadas. Pero su mayor fortaleza radica en las ventajas económicas que este proporciona [9].

Este acero permite obtener significativas reducciones de peso, lo cual representaría un menor peso del camión o maquinaria para el transporte de carga y por tanto un aumento en su capacidad. Al mismo tiempo, se reduce el consumo de combustible y el desgaste de la maquinaria. También los costos de reparación

y mantenimiento de este tipo de vehículos se reducen de una forma significativa en comparación con el acero ASTM A36.

**4.3.1. Composición química de los aceros ASTM A36, Domex 700 y Hardox 450.** Los aceros Domex y Hardox, son laminados mediante un proceso termo-mecánico en plantas donde los procesos de calentamiento, rodadura y refrigeración se controlan cuidadosamente, para posteriormente ser trabajados en frío. Estos aceros son fabricados con un límite elástico mínimo de 700 MPa [10,11].

**Tabla 6. Composición química del acero DOMEX 700**

<b>C % Máx.</b>	<b>Si % Máx.</b>	<b>Mn % Máx.</b>	<b>P % Máx.</b>	<b>S % Máx.</b>	<b>Al % Mín.</b>	<b>Nb% Máx.</b>	<b>V% Máx.</b>	<b>Ti% Máx.</b>
0,12	0,10	2,10	0,025	0,010	0,015	0,09*	0,20*	0,15*

(\*)La suma entre el Nb, V y Ti = 0.2 máx.

Fuente: SSAB Tunnpåt

**Tabla 7. Composición química típica del acero ASTM A36**

<b>C % Máx.</b>	<b>Si % Máx.</b>	<b>Mn % Máx.</b>	<b>P % Máx.</b>	<b>S % Máx.</b>
0,26	0,4	1,2	0,025	0,010

Fuente: ASTM standard, (ASTM A36/ A36M -97)

En el análisis químico, el acero Domex 700 posee bajos niveles de carbono y altos niveles de manganeso comparado con el ASTM A36. También se observa la adición de refinadores de grano tales como Niobio, titanio o vanadio en cantidades apropiadas [11]. Todo esto, junto con una estructura limpia de inclusiones, hace del Aceros Domex 700 la alternativa más conveniente para componentes estructurales conformados y soldados en frío.

El ASTM A36 es un acero estructural de buena soldabilidad, adecuado para la fabricación de vigas soldadas en edificios, estructuras remachadas, y atornilladas, bases de columnas, piezas para puentes y depósitos de combustibles [13]. Sin embargo, las estructuras fabricadas con el acero ASTM A36 requieren de un mayor espesor, y en sus diseños necesitan un mayor número de elementos en comparación con las fabricadas con el acero Domex 700, debido a que la resistencia a la fluencia del ASTM A36 es 3 veces menor que la del Domex 700.

El acero Hardox 450 es un acero resistente a la abrasión con una dureza nominal de 450 HV. Cuya principal aplicación es la fabricación de componentes y estructuras sujetas al desgaste [10], las cuales corresponden a las láminas del suelo y la carrocería del semirremolque, debido a que en ellas se ubicarán los elementos abrasivos propios de la carga a transportar.

**Tabla 8. Composición química del acero Hardox 450**

<b>C % Max.</b>	<b>Si % Max.</b>	<b>Mn % Max.</b>	<b>P % Max.</b>	<b>S % Max.</b>	<b>Cr % Max.</b>	<b>Ni % Max.</b>	<b>Mo % Max.</b>	<b>B % Max.</b>	<b>Ti% Máx.</b>	<b>CEV Típico</b>
0,18	0,25	1,30	0,015	0,004	0,10	0,10	0,04	0,003	0,050	0,39

Fuente: SSAB Tunnpåt

Las chapas fabricadas con el acero Hardox 450, presentan una excelente resistencia al desgaste, y una mejor resistencia a la corrosión comparada con las chapas elaboradas en acero ASTM A36, debido a sus contenidos de Cr-Ni-Mo [10]. Siendo el Hardox 450, una alternativa eficaz para el transporte de cargas que poseen una alta dureza y elevados contenidos de humedad superficial o constitucional.

**4.3.2. Soldabilidad del acero Domex 700.** El acero avanzado de alta resistencia Domex 700, posee bajos contenidos de carbono, fósforo y azufre, por lo cual son permitidos en él todos los métodos de soldadura convencionales, sin necesitar un precalentamiento [11].

Sin embargo, la soldadura MAG es el método más recomendable debido a que este tipo de soldadura es muy fácil de automatizar y proporciona una alta productividad [11].

**4.3.2.1. Elaboración de la Junta en el acero Domex 700:** Todos los métodos convencionales para la preparación de la junta podrían ser utilizados fácilmente en el acero Domex 700. La elaboración de la junta en los aceros de alta resistencia Domex es tan fácil de realizar como en los aceros suaves. No es necesario el precalentamiento para el corte de ellos [12].

**Figura 7. Proceso de corte térmico recomendado**



Fuente: SSAB Tunnpåt

Una delgada película de óxido se forma sobre la superficie de la junta producida por el corte térmico, es recomendable retirar esta película antes de aplicar la soldadura. Si el corte se realiza con plasma, se recomienda la utilización del oxígeno como gas para el plasma. La razón, es que el nitrógeno puede ser absorbido por la superficie donde se realiza el corte ocasionando porosidades en el metal de soldadura. La solución está en utilizar oxígeno para el plasma o decapar la superficie de la junta aproximadamente 0,2 mm [12].

**4.3.2.2. Metal de aporte para el acero Domex 700:** Los metales de aporte utilizados para el acero Domex 700 se pueden encontrar a continuación:

**Tabla 9. Metales de aporte recomendados para soldar el acero Domex 700**

Acero	Soldadura MAG		Soldadura MMA con electrodo	Soldadura por Arco Sumergido
	Alambre sólido	Alambre tubular		
Domex 700 MC	AWS: A5.28 ER100S-X	AWS: A5.29 E100T-X	AWS: A5.5 E11018	AWS: A5.23-F11 AX-EX

Fuente: SSAB Tunnpåt

Actualmente, un gran número de alambres sólidos para soldadura MAG están disponibles en el mercado, con límites elásticos para la soldadura que oscilan entre los 700 y 900 MPa. Los alambres tubulares están disponibles con límites elásticos de hasta 800 MPa, mientras que los alambres con núcleo de fundente están disponibles con un límite elástico de hasta 900 MPa [12].

Los alambres tubulares son más fáciles de soldar y normalmente dan un mejor aspecto de la superficie que los alambres con núcleo fundente. Pero los alambres de núcleo fundente son principalmente utilizados si los requisitos de tenacidad e impacto sobre el producto son muy altos [12].

#### 4.4. RESISTENCIA ESTÁTICA DE LAS UNIONES SOLDADAS

Con el fin de alcanzar la resistencia a la tracción requerida en la unión soldada, se necesita que el metal de soldadura y la ZAC, adquieran suficiente resistencia. Hay varios factores que afectan a la resistencia de la unión soldada, tales como: la composición química, el calor de entrada y la temperatura entre pasadas.

**4.4.1. Entrada de calor.** Es la cantidad de calor suministrada al material durante la soldadura. La siguiente fórmula se utiliza generalmente para el cálculo de la entrada de calor:

Dónde:  $E = \text{Entrada de Calor [kJ/mm]}$   
 $U = \text{Tensión [V]}$   
 $I = \text{Corriente [A]}$   
 $V = \text{Velocidad de soldadura [mm/min]}$

(1)  $E = \frac{U \times I \times 60}{v \times 1000} \text{ kJ/mm}$

La siguiente fórmula se utiliza para calcular la entrada de calor considerando el método de soldadura empleado:

$Q = \eta \times E$  (2)      Donde:  $\eta = \text{Eficiencia del Arco.}$

**Tabla 10. Valor de la eficiencia del arco según el método de soldadura.**

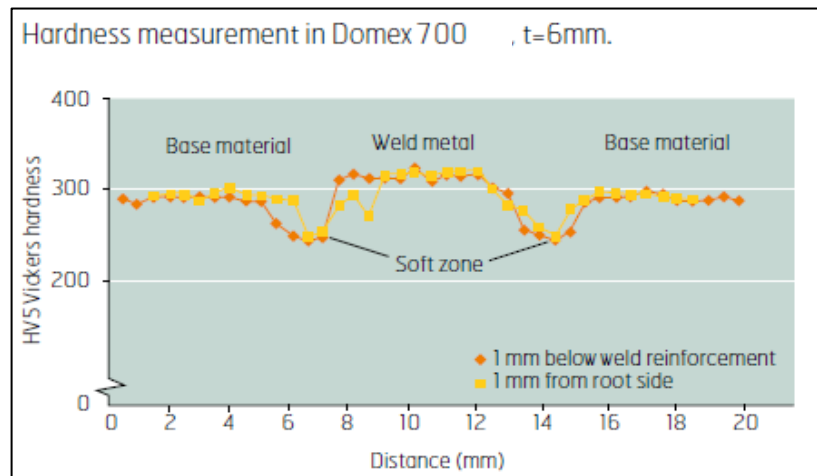
Método de soldadura	Eficiencia del arco ( $\eta$ )
MAG	0,8
MMA	0,8
ARCO SUMERGIDO	1
TIG	0,6

Fuente: SSAB Tunnpåt

**4.4.2. Temperatura entre pases de soldadura.** Se debe emplear una temperatura máxima entre pasadas, para limitar el incremento de la temperatura en la junta, debido a que puede perjudicar la resistencia del material. Es decir, la temperatura en el material durante la realización de los cordones de soldadura no debe exceder un valor específico. El máximo valor recomendado de la temperatura entre pasadas para el acero Domex 700 es de 100°C [12].

**4.4.3. Zonas blandas.** Cuando el acero Domex 700 es soldado, se forman zonas blandas en la ZAC. Esto surge como el resultado de cambios en la microestructura. El ancho y la altura de las zonas blandas se determinan principalmente por el espesor de la chapa y la entrada del calor [12].

**Figura 8. Curva de dureza típica del acero Domex 700 en las uniones soldadas**



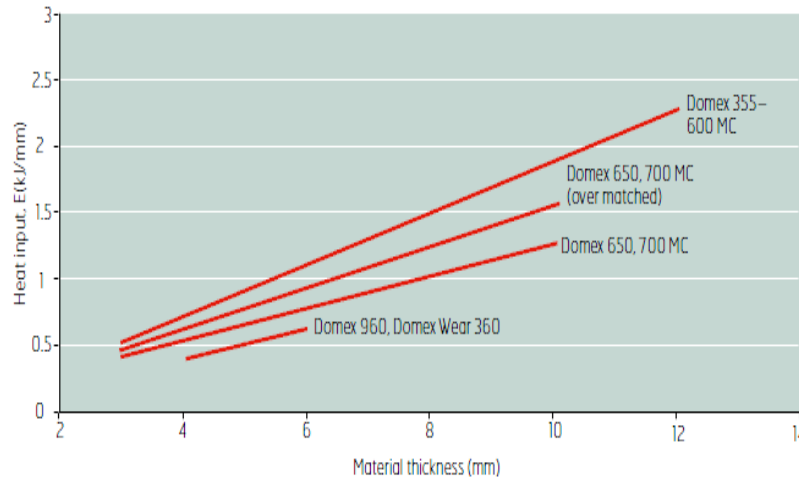
Fuente: SSAB Tunnpåt

En la figura 8 se observan dos gráficos, uno de color rojo que corresponde a los resultados obtenidos un milímetro por debajo del refuerzo de la soldadura, y uno amarillo que son los resultados obtenidos un milímetro al lado de la raíz [12].

Las láminas delgadas y con una elevada tasa de entrada de calor, originan una zona blanda más amplia y de menor resistencia [12]. Lo cual se debe tener en cuenta durante la elaboración de estructuras con este tipo de acero. Sin embargo, se sabe que la resistencia mínima en la zona blanda para el acero Domex es superior a la resistencia máxima del acero convencional ASTM A 36. Es decir, superior a los 250 MPa, lo cual hace que sin importar la presencia de las zonas blandas, el prototipo tendrá un mejor desempeño con el acero Domex 700 que con el acero ASTM A36. Se puede afirmar que las zonas blandas no tienen influencia alguna en la resistencia de la soldadura para el acero Domex 700.

Sin embargo, es posible alcanzar los requisitos mínimos de resistencia a la tracción del material, si no se supera la entrada de calor máxima recomendada por la compañía SSAB Tunnpplåt [12].

**Figura 9. Entrada de calor máxima recomendada para los aceros Domex**



Fuente: SSAB Tunnpplåt

Los valores en la gráfica, se basan en una temperatura entre pasadas de 100 ° C para el acero Domex 700. Si la operación de soldadura se realiza con una sola pasada a la temperatura ambiente (20 ° C), la entrada máxima de calor podría

aumentar de un 10-15% para soldaduras a tope y de un 40-50% en las soldaduras en filete [12].

Como los espesores de las láminas Domex 700 que serán utilizados para el desarrollo de esta investigación son de 3.175, 4.75, 6.25 y 9.525 [mm] el calor de entrada máximo para cada uno de estos es de 0.5, 0.75, 0,8 y 1,25 [kJ/mm] respectivamente, según la figura 9. Debido a los pequeños espesores de lámina, si se realizara la soldadura en una sola pasada desde la temperatura ambiente (20°C), el valor de las entradas de calor máximas se incrementa entre el 10 y 15% en las soldaduras a tope.

**Tabla 11. Entradas de calor utilizadas para los diferentes espesores**

<b>Espesor [mm]</b>	<b>Rangos de entrada de calor Máxima [kJ/mm]</b>
3.175	0.55 – 0.575
4.75	0.825 – 0.8625
6.25	1.1 – 1.15
8	1.375 – 1.4375

Si la soldadura se encuentra en una zona donde el requisito de resistencia al impacto es de menor importancia, pueden utilizarse entradas de calor más altas.

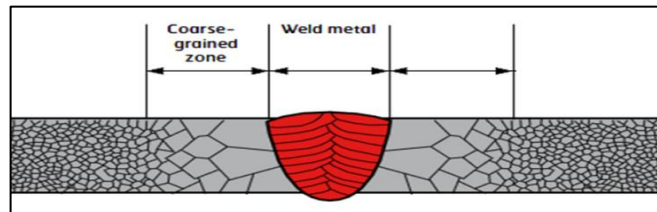
**4.4.4. Resistencia al impacto de la unión soldada.** A fin de evitar la rotura frágil en estructuras soldadas es importante que el metal base, el metal de soldadura y la ZAC tengan una buena resistencia al impacto.

La resistencia al impacto del metal de soldadura se determina principalmente por su microestructura, y la microestructura depende del metal de aporte, el metal base y la entrada de calor [12]. Por lo tanto, es importante utilizar un metal de

aporte que satisfaga estos requisitos. Es recomendable que la soldadura se realice con una entrada de calor baja lo cual asegura:

- Un incremento en la tenacidad del metal de soldadura
- Una mayor dureza en la ZAC
- Un aumento de la resistencia de la unión soldada.

**Figura 10. Zonas de grano grueso presentes en la ZAC**

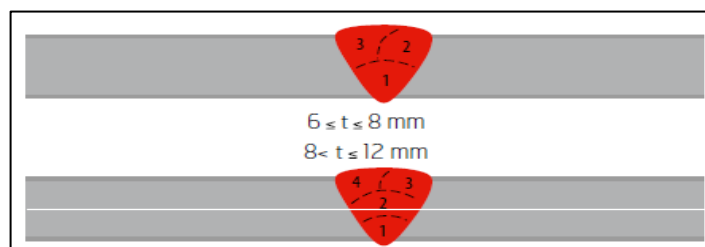


Fuente: SSAB Tunnpåt.

Como se observa en la figura 10, la ZAC más cercana al metal de soldadura es la zona de grano grueso, la cual tiene la menor dureza. La extensión de la zona de grano grueso se puede limitar mediante la soldadura con varias pasadas y una baja entrada de calor. La resistencia al impacto de la ZAC se puede mantener a un nivel satisfactorio cuando se suelda el acero Domex 700 [12].

Con el fin de cumplir con los requisitos mínimos de resistencia al impacto de la unión soldada, se recomienda un número adecuado de pases con los que se va a soldar un determinado espesor [12], véase la figura 11.

**Figura 11. Número de pasadas según el espesor**



Fuente: SSAB Tunnpåt.

Teniendo en cuenta que el máximo espesor de lámina que será utilizado en el desarrollo de esta investigación es de 9,525 mm, el número máximo de pasadas de soldaduras recomendadas es de 4.

**4.4.5. Resultados de los ensayos mecánicos.** La compañía SSAB Tunnpåt permite conocer la calidad de sus productos, proporcionando los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos que le han realizado al acero Domex 700. Las pruebas mecánicas fueron realizadas con probetas elaboradas con el acero Domex 700 y uniones soldadas a tope con soldadura MAG, tanto para el ensayo de resistencia a la tracción como el de resistencia al impacto, obteniéndose los siguientes resultados [12].

**Tabla 12. Resultados de los ensayos de resistencia a la tracción y al impacto**

Grado del Acero Domex (espesor en mm)	Número de pases	Entrada de calor [kJ/mm]	Ensayo de tracción		Ensayo de Impacto (Charpy V)			
			Rm [Mpa]	Ubicación de la Fractura (MS, MB, ZAC) <sup>1</sup>	Dirección de la prueba (L, T) <sup>2</sup>	Posición <sup>3</sup>	Energía de impacto [J/cm <sup>2</sup> ]	
							-20 °C	-40 °C
Dx 700 (3)	1	0.39	846	ZAC				
Dx 700 (6)	1	0.61	825	MB	L	A	130	112
	2	0.41				B	66	35
	3	0.42				C	154	145
Dx 700 (8)	1	0.88	836	MB	L	A	71	52
	2	0.94				B	80	69
	3	0.95				C	156	61
Dx 700 (10)	1	0.57	818	ZAC	L	A	118	74
	2	1.10				B	104	53
	3	1.08				C	118	47
	4	1.09						

- 1) Ubicación de la falla, MS = metal de soldadura, MB= metal base, ZAC = zona afectada por el calor.
- 2) L = longitudinal, T = transversal.
- 3) A = metal de soldadura, B = línea de fusión, C = la línea de fusión + 1mm.

Fuente: SSAB Tunnpåt

## 4.5. FATIGA EN LOS SEMI-REMOLQUES

Todos los semirremolques están sometidos a la fatiga durante el viaje. El historial de las cargas permiten determinar la vida útil del chasis de un semirremolque; este historial está constituido por el número de veces que las cargas son recogidas y la magnitud de éstas. El historial varía principalmente por el tipo de semirremolque, las condiciones de la carretera y el estado de la carga. Al momento de reformar el chasis de un semirremolque con aceros de alta resistencia Domex 700, el espesor de los componentes estructurales puede reducirse considerablemente. Esta reducción en el espesor de la chapa dará lugar a un incremento en el nivel de las tensiones de trabajo en el chasis completo. Pero, debemos considerar que con un material más fuerte se obtiene una mayor resistencia a la fatiga en el conjunto. Sin embargo, para las uniones soldadas, esta influencia es limitada debido a las concentraciones de los esfuerzos y las imperfecciones iniciales introducidas durante la soldadura [9, 12, 14]. Por lo tanto, la resistencia a la fatiga de las uniones soldadas es más una cuestión del diseño y la fabricación que de la selección del material.

En las zonas de alto estrés es importante que las soldaduras tengan una buena resistencia a la fatiga, tales como las soldaduras cargadas en la dirección longitudinal correspondientes a las uniones de los patines con el alma de las vigas y los travesaños con perfil en doble T. Las soldaduras con menos resistencia a la fatiga se deben colocar en áreas de estrés bajos.

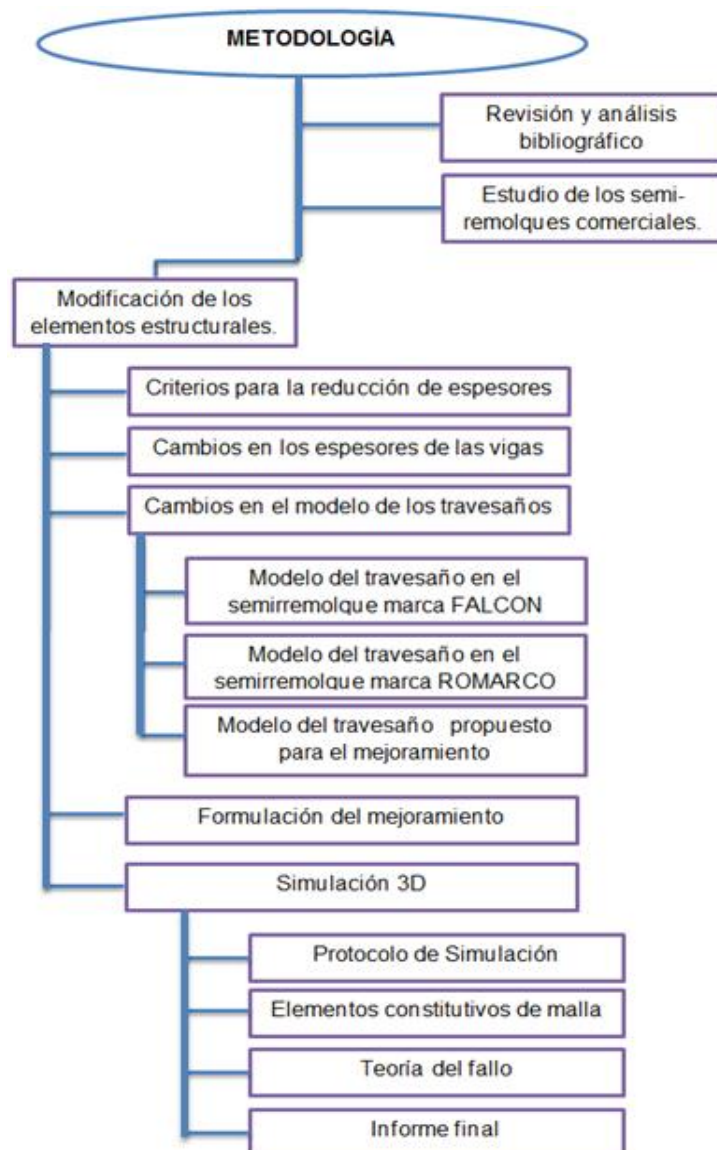
**4.5.1. Resistencia a la fatiga de la unión soldada.** Las juntas soldadas tienen una resistencia a la fatiga considerablemente menor en comparación con el material base, debido a la aguda geometría de la soldadura y a las tensiones residuales introducidas por la entrada de calor durante la soldadura. Es común que la resistencia a la fatiga de las soldaduras esté relacionada con la microestructura, las zonas afectadas por el calor y la dureza. Pero la principal

causa del debilitamiento de la soldadura se debe a la concentración de tensiones locales y defectos [14].

## 5. METODOLOGÍA

En el siguiente diagrama metodológico (figura 12), se encuentran plasmadas las etapas llevadas a cabo durante el desarrollo de esta investigación.

**Figura 12. Metodología utilizada para la investigación**



## **5.1. REVISIÓN Y ANALISIS BIBLIOGRÁFICO**

Durante el proceso de investigación, se recopila información referente a: Normas y guías, para desarrollar los modelos e interpretación de las simulaciones, también especificaciones de soldadura, procesos de soldadura, propiedades mecánicas de los aceros utilizados, entre otros. El desarrollo de la investigación se hace basado en distintas fuentes de información como: Trabajos de grado, páginas web, material audiovisual, publicaciones acerca del tema y libros del área de interés.

## **5.2. ESTUDIO DE LOS SEMI-REMOLQUES COMERCIALES.**

Antes de proponer un modelo de semirremolque tipo plataforma 3S3, fue necesario obtener información relacionada con los proveedores de las marcas más reconocidas presentes en el mercado. Datos relevantes se obtuvieron al observar diferentes modelos de semirremolques para adquirir sus dimensiones, las cuales presentan diferencias entre sus diseños.

Otro tema que se tuvo en cuenta, fue el de indagar sobre las necesidades que los transportistas tenían al momento de trasladar algún cargamento las cuales, dependiendo de sus características, debían ser estudiadas y resueltas a través de un mejor modelo.

Entre las marcas de semirremolques cuyos diseños fueron estudiados, se encuentran la marca ROMARCO S.A y FALCON S.A. las cuales tienen detalles particulares en los diseños de sus estructuras. A pesar de estas diferencias ambos diseños son completamente funcionales.

La siguiente tabla muestra las características generales de los semirremolque estudiados y sus principales dimensiones.

**Tabla 13. Características en los semirremolques de las principales marcas**

CARACTERISTICAS	ROMARCO S.A	FALCON S.A	Unidades
<i>Dist. entre ejes</i>	1,52	1,45	m
<i>Altura</i>	4,0	4,0	m
<i>Ancho</i>	2,6	2,6	m
<i>Largo</i>	13	13	m
<i>Peso con plataforma</i>	3764,5	2990,4	Kg
<i>Sección trans. Viga principal</i>	Perfil en doble T	Perfil en doble T	-
<i>Sección trans. travesaños</i>	Perfil en doble T	Perfil en C	-
<i>Cantidad de travesaños</i>	29	22	-

No solo se tuvieron en cuenta las dimensiones generales de cada uno de los semirremolques estudiados. También se consideró la distribución del peso en los diseños, teniendo en cuenta el peso correspondiente a cada uno de los elementos estructurales presentes en ellos. Los datos obtenidos se muestran a continuación:

**Tabla 14. Peso de los componentes del semirremolque marca ROMARCO**

PARTES	CANTIDAD	PESO POR UNIDAD [Kg]	3S3 ROMARCO	
			MASA [Kg]	% MASA
VIGAS PRINCIPALES	2	704	1408	37,40
TRAVESAÑOS	29	24,3	704,7	18,72
LAMINA DEL PISO	1	1263	1263	33,55
LATERALES	2	194,4	388,8	10,33
<b>TOTAL:</b>	<b>34</b>	<b>2185,7</b>	<b>3764,5</b>	<b>100</b>

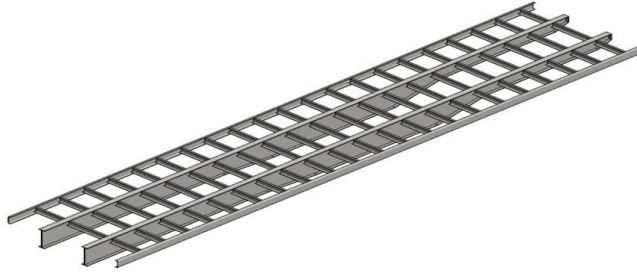
**Tabla 15. Peso de los componentes del semirremolque marca FALCON**

PARTES	CANTIDAD	PESO POR UNIDAD [Kg]	3S3 FALCON	
			MASA [Kg]	% MASA
VIGAS PRINCIPALES	2	636	1272	42,53
TRAVESAÑOS	21	23,2	487,2	16,30
LAMINA DEL PISO	1	842,4	842,4	28,17
LATERALES	2	194,4	388,8	13
<b>TOTAL:</b>	<b>26</b>	<b>1696</b>	<b>2990,4</b>	<b>100</b>

A pesar de que las principales diferencias entre las estructuras de cada una de las marcas estudiadas radican principalmente en la cantidad de los travesaños y la forma de sus perfiles, véase la tabla 13, Se puede considerar que la distribución geométrica de cada uno de los componentes en la parte estructural cumple con el propósito de distribuir eficientemente la carga total a transportar sobre la maquinaria y en ambos casos es completamente funcional cada una de las distribuciones.

Como se puede observar en las tablas 14 y 15, la marca de semirremolque con una menor cantidad de peso estructural es la FALCON. El diseño de esta marca se tendrá en cuenta para el mejoramiento, pudiéndose discernir que al lograr una considerable reducción del peso estructural y adicionalmente a estos se obtiene una excelente funcionalidad para el modelo FALCON, se obtendrá mejores resultados en el nuevo prototipo, a diferencia de haber modificado el modelo ROMARCO.

**Figura 13. Distribución de los elementos en la estructura del FALCON**



Después de realizarse meticulosas observaciones a cada una de las estructuras presentes en las marcas, se procede a definir qué aspectos del modelo FALCON se pueden mejorar. Teniendo en cuenta las respectivas restricciones en el diseño, la normatividad colombiana, las propiedades mecánicas de los aceros utilizados, el análisis estructural y computacional proporcionado por el Software ANSYS 14.0 y Autodesk Inventor professional 2013, en cada uno de los casos.

### 5.2.1. Dimensionamiento.

Figura 14. Esquema del modelo de la marca FALCON

ESQUEMA  
MODELO DE CHASIS  
FALCON S.A.

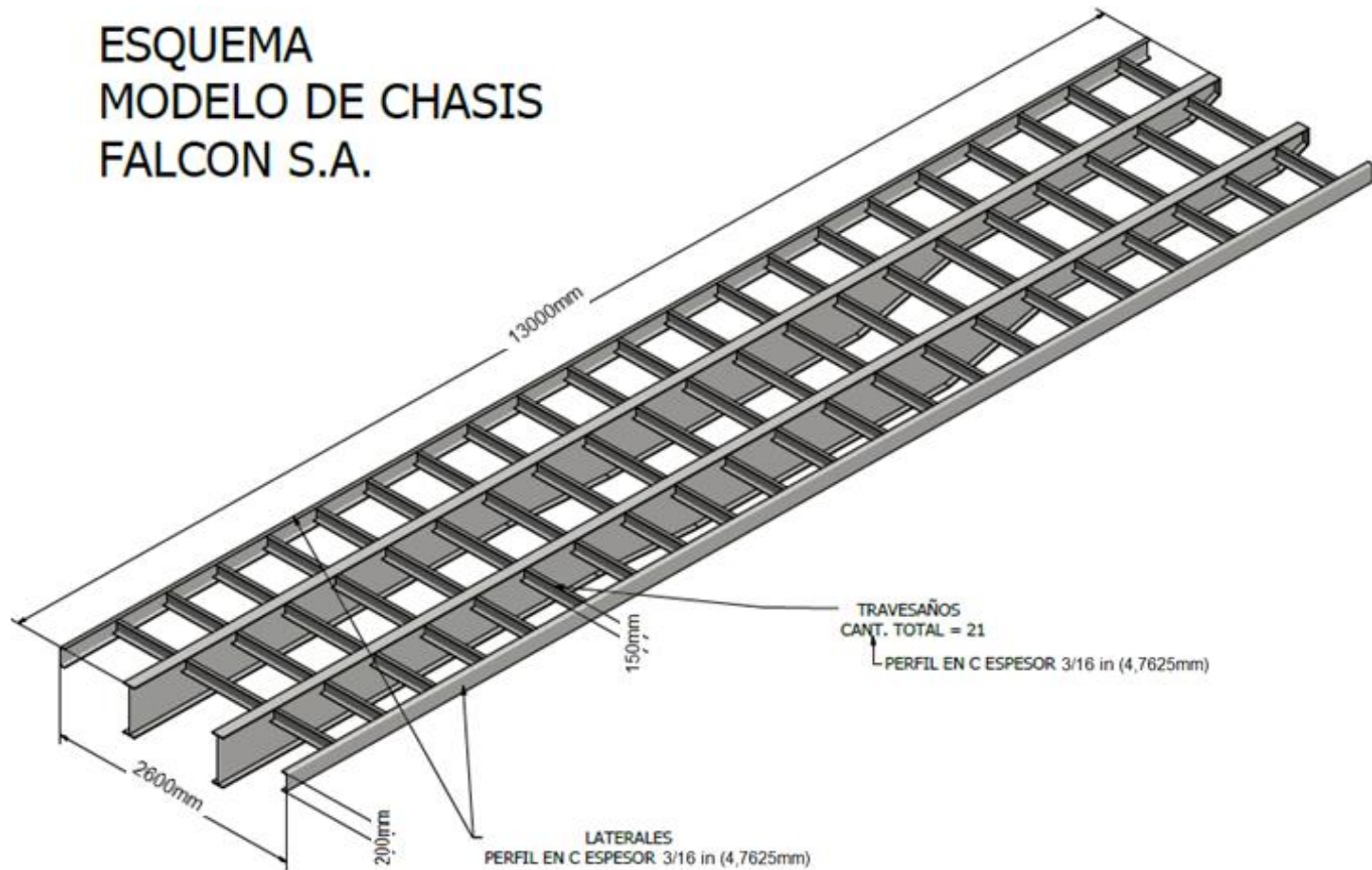


Figura 15. Esquema del modelo de la marca ROMARCO

ESQUEMA  
MODELO CHASIS  
ROMARCO S.A.

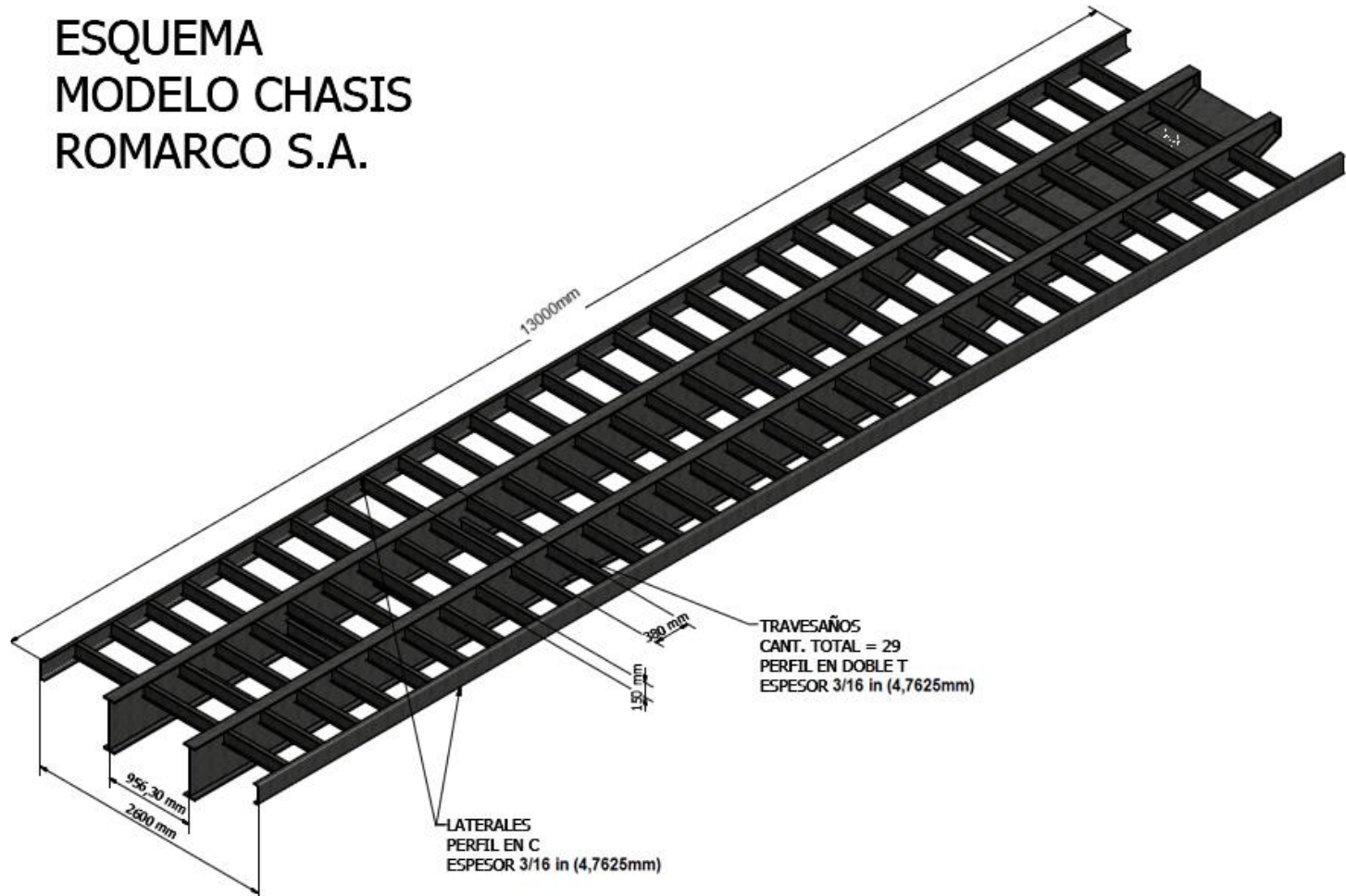
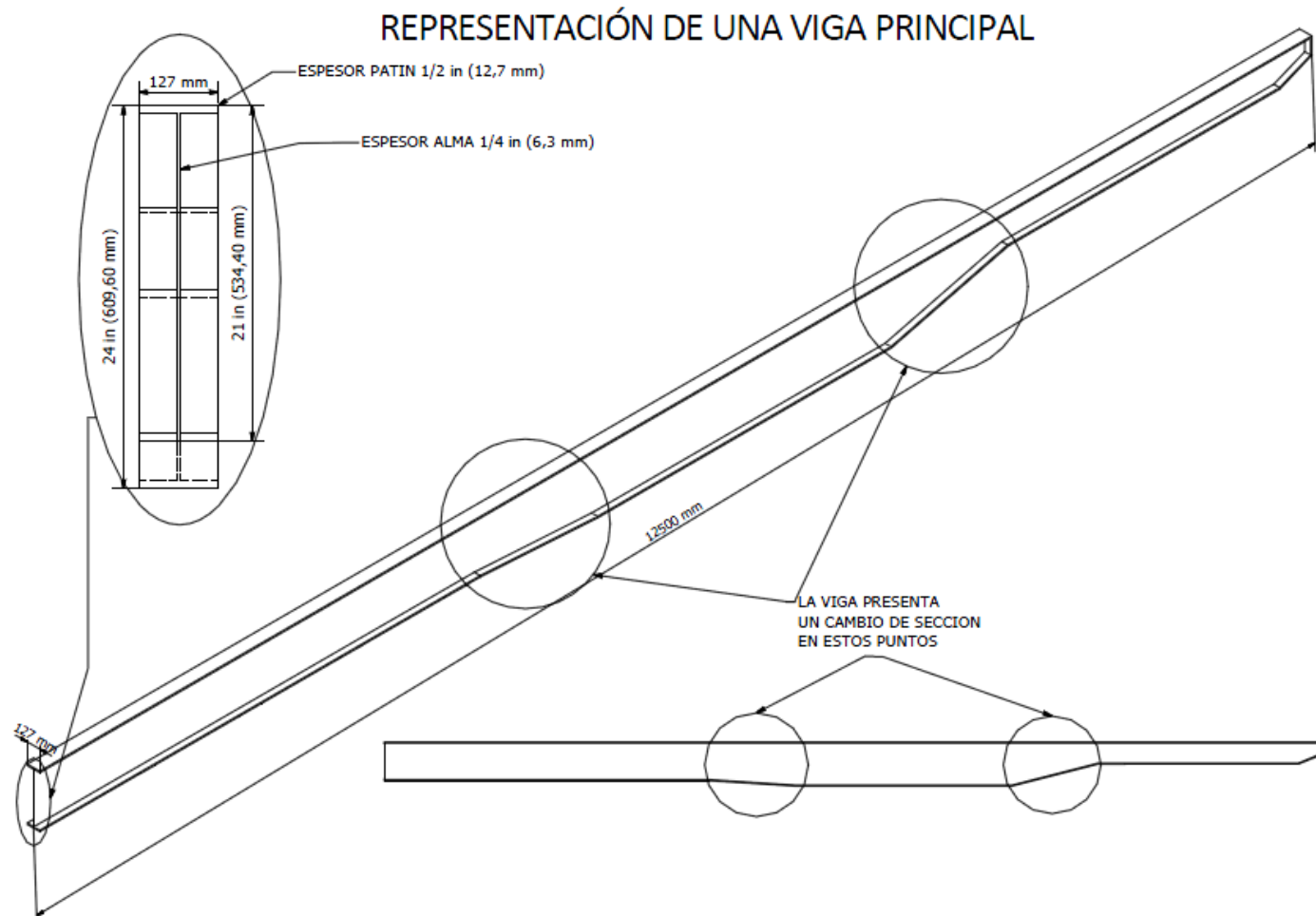


Figura 16. Esquema de una viga principal



### 5.3. MODIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES.

Los modelos de los semirremolques estudiados y el modelo propuesto están integrados por varios elementos estructurales, cada uno de ellos presentan medidas específicas de longitud, ancho, espesor y peso.

Para obtener una reducción del peso, únicamente se varió el espesor y otras dimensiones propias del área transversal de cada elemento, presentándose para el modelo propuesto las mismas dimensiones generales de los prototipos observados.

**5.3.1. Criterio para la Reducción de espesores.** El criterio utilizado para efectuar la reducción de espesores se obtuvo mediante una expresión matemática empírica desarrollada por la compañía SSAB Tunplåt en la cual se relacionan los espesores y límites de fluencia del acero a modificar y el utilizado para efectuar el cambio. Mediante esta relación matemática se determina un espesor mínimo para una igual resistencia mecánica, al cambiar un acero convencional por uno de alta resistencia. Teniendo en cuenta el espesor a reducir y el límite de fluencia de los aceros ASTM A36 y Domex 700, se determina la máxima reducción posible. El espesor mínimo de reducción se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$t_2 = t_1 \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \quad (3)$$

- $t_1$  = Espesor inicial con el acero convencional.
- $t_2$  = Espesor con el acero de alta resistencia.
- $R_1$  = Resistencia a la fluencia del acero convencional.
- $R_2$  = Resistencia a la fluencia del acero de alta resistencia.

Los espesores mínimos calculados mediante la expresión matemática para cada uno de los componentes que se quieren modificar son:

**Tabla 16. Espesores mínimos recomendados para los aceros de alta resistencia.**

		<b>ESPEORES CON EL ACERO ASTM A36 [mm].</b>	<b>ESPEORES MÍNIMOS RECOMENDADOS [mm].</b>
<b>VIGAS PRINCIPALES</b>	<b>PATINES</b>	12,7	7,589
	<b>ALMA</b>	6,35	3,795
<b>TRAVESAÑOS</b>		4,76	2,844
<b>LAMINA DEL SUELO</b>		3,175	1,897
<b>LATERALES</b>		6,35	3,795

Los resultados de la tabla 16, se obtuvieron mediante la información adquirida de los límites de fluencia del acero convencional ASTM A36,  $R_1 = 248,23$  [MPa] y Domex 700,  $R_2 = 700$  [MPa], y los valores de los espesores a modificar para el modelo FALCON.

Los espesores propuestos para este estudio son superiores al mínimo determinado por la expresión matemática, debido a que se utilizaron los espesores de láminas comerciales que distribuye la compañía en Colombia.

**Tabla 17. Espesores comercializados en Colombia por la firma SSAB Tunnpått.**

		<b>ESPEORES MÍNIMOS RECOMENDADOS [mm].</b>	<b>ESPEORES COMERCIALIZADOS [mm].</b>
<b>VIGAS PRINCIPALES</b>	<b>PATINES</b>	7,589	9,525
	<b>ALMA</b>	3,795	4,7625
<b>TRAVESAÑOS</b>		2,844	3,175
<b>LAMINA DEL SUELO</b>		1,897	1,897
<b>LATERALES</b>		3,795	4,7625

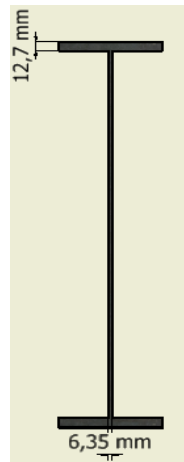
**5.3.2. Cambios en los espesores de las vigas principales.** Las vigas son el componente en el que se presenta el soporte más significativo del peso total de la carga a transportar. Por lo tanto, se deben tener las respectivas consideraciones en el diseño de estas. Las dimensiones de las vigas principales tanto para el

modelo FALCON en acero ASTM A36 y el propuesto en acero Domex 700, varían únicamente en los espesores utilizados para los patines y el alma. Es decir, para ambos modelos las dimensiones generales se mantuvieron iguales.

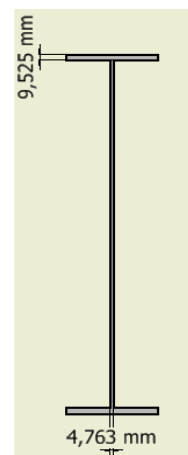
**Figura 17 Sección transversal de la viga en acero ASTM A 36 y Domex 700**

**SECCION TRANSVERSAL DE UNA VIGA PRINCIPAL**

**Viga en acero ASTM A36**



**Viga en acero Domex 700**

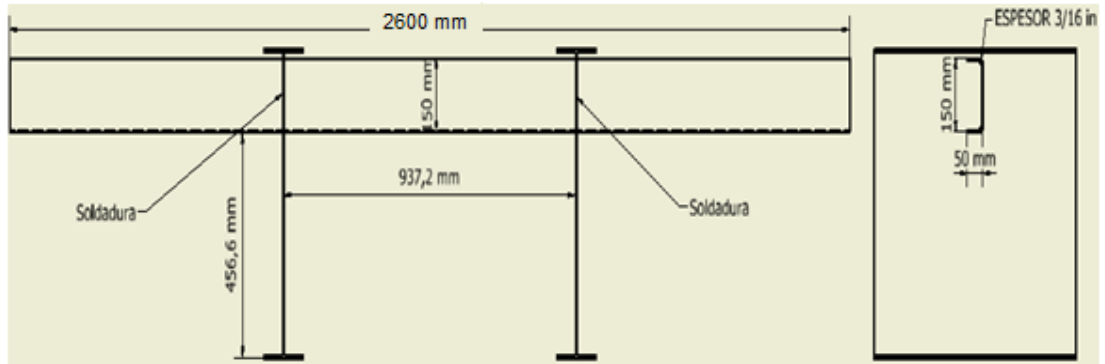


El ancho de los patines es el mismo para ambos modelos, de 50 mm cada uno. Los espesores para el modelo en acero Domex 700 se pueden encontrar en la tabla 17, y la altura del alma a lo largo de la viga varía de igual forma para ambos modelos. Esta se puede apreciar en el figura 16 de la página 31.

**5.3.3. Cambios en el modelo de los travesaños.** Con el fin de mejorar y realizar una reducción significativa en peso, se evalúa el diseño de los travesaños utilizados por las principales marcas productoras de semirremolques, para determinar cuál de ellos presenta las mejores condiciones de operación y mayores ventajas para la reducción en peso.

### 5.3.3.1. Modelo del travesaño en el semirremolque marca FALCON.

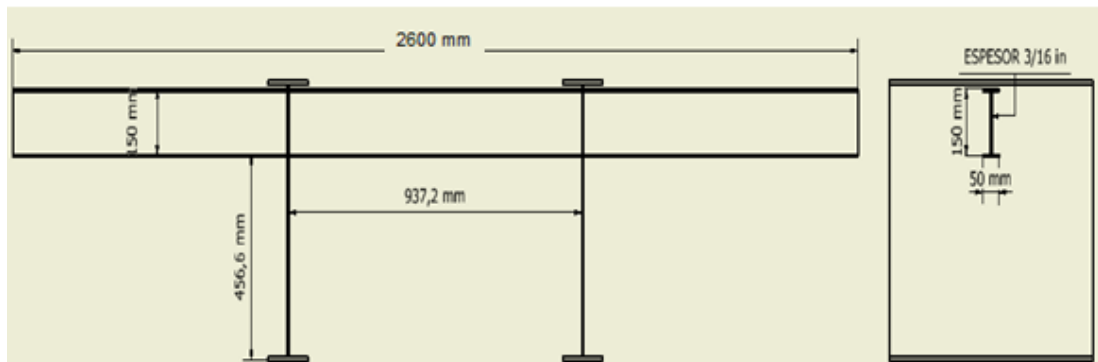
Figura 18. Dimensiones del travesaño en el semirremolque marca FALCON



Este diseño de travesaño es el utilizado en el semirremolque marca FALCON proporcionado por BAF y asociados para su mejoramiento estructural. Como se puede observar en la figura 18, este elemento presenta una sección transversal de perfil en C, cuyas dimensiones se especifican en el esquema. Presenta uniones por soldadura con el alma de las vigas principales en la zona lateral externa. El semirremolque presenta un total de 21 travesaños con una separación de 600mm entre ellos, y cada uno de estos elementos tiene un peso de 23,2 kg, elaborados en una sola pieza plegada en sus extremos, fabricados en acero ASTM A36.

### 5.3.3.2. Modelo del travesaño en el semirremolque marca ROMARCO.

Figura 19. Dimensiones del travesaño en el semirremolque marca ROMARCO

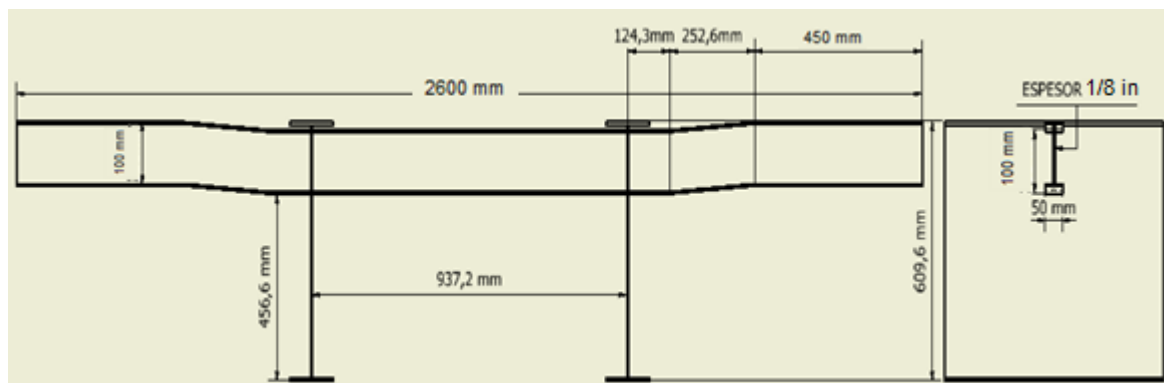


En la figura 19 se puede apreciar el diseño de los travesaños de un semirremolque elaborado por ROMARCO S.A, la cual es una de las empresas más reconocidas de Colombia en la fabricación de estos equipos. En ella se puede detallar la disposición en doble T de la sección transversal de este elemento. Este diseño presenta uniones por soldadura con el alma de las vigas principales en la zona lateral externa.

Este semirremolque presenta un total de 29 travesaños con una separación de 414 mm entre ellos. Cada uno de estos elementos tiene un peso de 24,3 Kg, elaborados por la unión soldada entre láminas con un espesor de 3/16 de pulgada, también están fabricados con el acero ASTM A36.

### 5.3.3.3. Modelo del travesaños propuesto para el mejoramiento

**Figura 20. Dimensiones del travesaños propuesto para el mejoramiento**



Como se puede apreciar en la figura 20, este modelo para los travesaños es una adaptación del modelo presente en el semirremolque marca ROMARCO. Este nuevo prototipo presenta una configuración del perfil en doble T, con una altura de 100mm. Siendo una estructura rígida, la cual está separada 124,3 mm de la cara externa de la viga principal, y asciende 30 mm hasta llegar al nivel del patín superior de la viga principal, todo esto con el fin de que una considerable sección

de los travesaños de 450 mm a cada lado, entre en contacto con la plataforma que soportará la carga transportada. Este modelo de travesaño tiene un peso de 13,3 Kg, con un espesor de 1/8 pulgada, y garantiza una mejor distribución del peso total de la carga sobre la estructura.

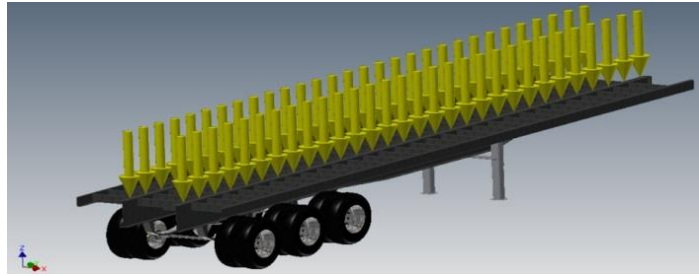
Mediante la bibliografía consultada [4], se determinó que el perfil en doble T es un modelo más eficiente que el perfil en C, ya que a iguales áreas transversales el perfil en doble T presenta un mayor momento de inercia, esto le permite un incremento en la capacidad de resistir las cargas impuestas, por lo cual para el modelo propuesto se seleccionó este tipo de configuración de sección transversal.

#### **5.4. FORMULACIÓN DEL MEJORAMIENTO**

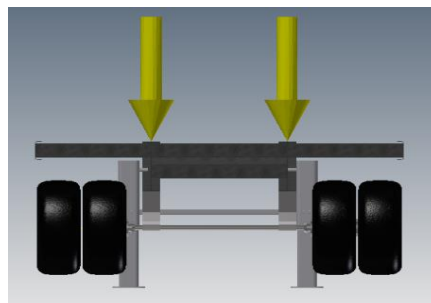
Para una adecuada formulación del mejoramiento, se hizo necesario realizar un análisis detallado del comportamiento estructural del semirremolque a mejorar, identificando el tipo de carga sobre cada uno de los elementos estructurales, y determinando cuales de estos elementos presentan un mayor aporte a la integridad estructural del equipo, y cuales aportan los mayores porcentajes en peso de la estructura.

El análisis estático consiste en identificar la posición de los apoyos, y determinar las fuerzas asociadas con la carga a transportar en la plataforma. La fuerza que se ejerce sobre el equipo corresponde a la carga útil máxima que se puede transportar, la cual para el semirremolque estudiado corresponde a un valor aproximado de 35.000 kg. El peso se distribuye a lo largo de la plataforma, actuando como una presión sobre el piso, y luego se traslada hacia los componentes estructurales.

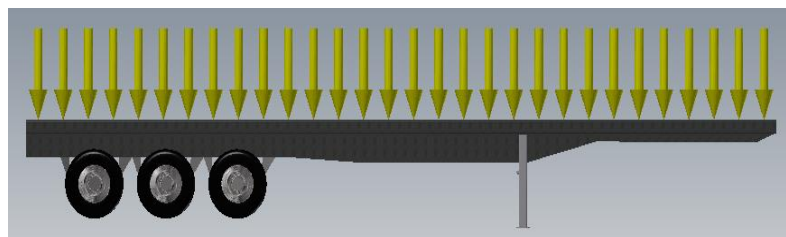
**Figura 21. Distribución de la carga sobre los semirremolques**



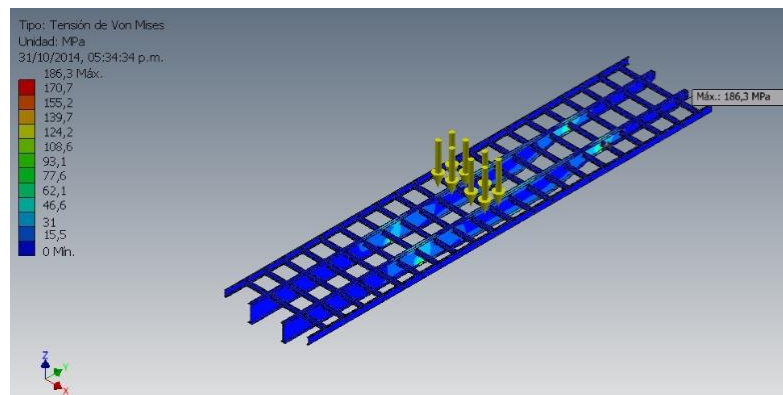
**Figura 22. Vista frontal para la distribución de carga**



**Figura 23. Vista lateral para la distribución de carga**



**Figura 24. Análisis estático del modelo a mejorar.**



Mediante un análisis computacional, se puede determinar, que los elementos estructurales que aportan en mayor medida a la integridad estructural son las vigas principales, debido a que el peso transportado sobre la plataforma se traslada directamente hacia estas, como se puede observar en la figura 24. El máximo esfuerzo según Von Mises, y la máxima deformación se presentaron sobre las vigas principales.

Las vigas principales tienen el mayor compromiso de resistencia mecánica en el semirremolque, y adicionalmente el conjunto de vigas aporta con el 42,53% de la masa en el conjunto estructural, véase la tabla 15. El propósito con las vigas será el de minimizar su masa, manteniendo la resistencia mecánica de este elemento estructural sin disminuir su factor de seguridad.

## **5.5. SIMULACION 3D**

Luego de comprender de forma general el comportamiento estructural, se procede a realizar la construcción de un modelo 3D que cuente con las dimensiones geométricas reales de los componentes estructurales del modelo a mejorar y el propuesto con el fin de evaluar los resultados numéricos, los cuales servirán como referencia de cálculo para comparar el desempeño estructural de ambos modelos.

**5.5.1. Protocolo de simulación.** Luego de definir la reducción de espesores y conocer las condiciones de carga, se hace necesario evaluar el desempeño que este equipo tendrá con la carga máxima, teniendo en cuenta sus condiciones geométricas, estructurales y operativas. Es en este momento donde el software de simulación se convierte en una herramienta crucial, por lo cual es importante la selección de un software para análisis de elementos finitos.

Pese al gran volumen de documentación en lo que respecta a ejemplos de modelos y tutoriales de simulación por elementos finitos disponibles, ninguna de estas referencias cubría por completo los detalles de las herramientas y los protocolos de simulación que debían seguirse para obtener la información numérica relacionada con los objetivos del presente estudio. Debido a esto, se hizo necesario un largo proceso de “prueba y error”, para lograr una perspectiva clara del verdadero potencial y los límites que el software tiene para satisfacer las demandas de esta investigación, desde cuestiones básicas como la identificación de herramientas de cálculo y gráficas, hasta el establecimiento de las mejores prácticas de simulación, fueron los principales logros obtenidos en esta etapa de experimentación. A continuación se especifica el protocolo implementado:

- Inicialmente se procede a realizar un modelo tridimensional con las dimensiones geométricas reales utilizando una herramienta CAD llamada Autodesk Inventor professional 2013. Esta plataforma permite diseñar, construir y calcular dimensiones, pesos y algunos otros parámetros esenciales para el desarrollo.
- Posteriormente, en la etapa de simulación, el modelo realizado en la herramienta CAD se exporta al software ANSYS 14.0, utilizado para realizar las respectivas simulaciones.
- En esta etapa se determinan las zonas de apoyo y las cargas que se van a aplicar a cada uno de los modelos.
- Se determina el tamaño y forma de la malla, mediante el análisis de gráficas de convergencia, las cuales se obtienen realizando varias simulaciones para cada modelo.
- Finalmente, se toman los resultados que proporcionen los valores más acordes a la solución real de acuerdo a la validación de los resultados.

**5.5.2. Elementos constitutivos de la malla.** Las primeras recomendaciones sobre el uso de elementos tetraédricos simples en el modelado bajo la

metodología de elementos finitos, provienen de autores como Gallagher, Melosh y Argyris (Gallagher, Padlog, & Bijlaard, 1962; Melosh, 1963; Argyris, 1965). Sin embargo, es posible percibir inmediatamente que el número de elementos tetraédricos simples debe ser considerado, si se requiere alcanzar un alto nivel de precisión. Lo cual se traduce en un importante número de ecuaciones simultáneas, requiriendo una mayor cantidad de memoria de cómputo. Pese a esto, y dada la versatilidad del tetraedro para la representación de secciones complejas, donde otro tipo de elemento prismáticos (cubos, prismas triangulares, etc.) no lograrían un buen ajuste, se optó por el tetraedro como elemento constitutivo de la malla.

**5.5.3. Teoría del fallo.** En mecánica estructural el criterio de Von Mises es a menudo empleado como el “el esfuerzo representativo” al evaluar las condiciones del diseño de un elemento, comparándolo ya sea con el esfuerzo de fluencia para el estudio de la deformación plástica, o con el esfuerzo último para la predicción de la ruptura. Este se define como la máxima energía de distorsión, siendo especialmente útil, al proporcionar una medida escalar proveniente del tensor de esfuerzo, obteniéndose mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (4)$$

Donde  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{yz}$ ,  $\sigma_{zx}$ , son los componentes del tensor esfuerzo de Cauchy.  $\sigma$  es definido como:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Gracias al software de simulación ANSYS 14.0, fue posible obtener los valores máximos del esfuerzo según Von Mises para la configuración del semirremolque a mejorar y el propuesto.

## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1. DISTRIBUCIÓN DEL PESO ESTRUCTURAL PARA EL DISEÑO PROPUESTO

Una vez conocidos los pesos de cada uno de los semirremolques estudiados como parte de la metodología implementada para el desarrollo de esta investigación. Se procede a calcular el peso correspondiente a cada uno de los elementos estructurales que componen al diseño propuesto para el mejoramiento. El modelo propuesto corresponde a una adaptación del diseño de la marca FALCON, debido a que este posee un peso inferior al ROMARCO, según las tablas 14 y 15, convirtiéndose este en la opción de modelo a mejorar.

**Tabla 18. Peso de los componentes en el modelo de semirremolque propuesto**

PARTES	CANTIDAD	PESO POR UNIDAD [Kg]	3S3 PROPUESTO	
			MASA [Kg]	% MASA
VIGAS PRINCIPALES	2	481,5	963	50,50
TRAVESAÑOS	21	13,3	279,3	14,6
LAMINA DEL PISO	1	503,2	503,2	26,40
LATERALES	2	81	162	8,50
<b>TOTAL:</b>	<b>26</b>	<b>1079</b>	<b>1907,5</b>	<b>100</b>

En los resultados de la tabla 18, es importante mencionar que los travesaños y los laterales del diseño propuesto tuvieron un cambio en el espesor y la altura de la sección transversal de cada uno de ellos. Pasando la altura de 150 mm a 100 mm en los travesaños, cuyos perfiles son en doble T, y de 200 mm a 150 mm en los

laterales, cuyos perfiles son en C, partiendo de las medidas obtenidas en los diseños del ROMARCO y el FALCON respectivamente. El ancho de la sección transversal para ambos componentes es de 50mm. También es importante recordar que los valores de los espesores para cada componente del modelo propuesto fueron tomados de la tabla 17.

## 6.2. CONDICIONES DE CARGA PARA CADA SEMI-REMOLQUE.

Estas condiciones han sido establecidas en base a lo propuesto en la resolución 4100 de diciembre 28 del 2004 expedida por el ministerio de transporte, en la cual se estipula que el peso bruto para una unidad tractora de tipo 3S3 es de 52000 kg. El cálculo de la carga útil para cada transporte se muestra a continuación:

$$\text{Carga Útil} = \text{Peso Bruto Vehicular} - \text{Peso Total del Conjunto Vacío} \quad (6)$$

$$\text{Peso Total del conjunto Vacío} = \text{Peso del Tracto Camión} + \text{Peso Semirr. Vacío} \quad (7)$$

**Tabla 19. Carga útil que puede transportar cada uno de los semirremolques.**

DISEÑO DEL 3S3	PESO BRUTO VEHICULAR [Kg]	PESO DEL TRACTO CAMIÓN [Kg]	PESO DEL SEMI-REMOLQUE VACÍO [Kg]		PESO DEL CONJUNTO VACÍO [Kg].	CARGA ÚTIL [Kg]
			ELEMENTOS ESTRUCTURALES [Kg]	EJES, CARROCERÍA Y OTROS [Kg]		
MARCA ROMARCO	52000	8870	3764,5	5109	17743,5	34256,5
MARCA FALCON	52000	8870	2990,4	5109	16969,4	35030,6
PROPUESTO	52000	8870	1907,5	5109	15886,5	36113,5

La carga útil es el peso máximo que se puede transportar en los distintos modelos, y depende en gran medida del peso de los elementos que constituyen el semirremolque. Esta será la carga aplicada para la realización del análisis computacional.

Como se observa en la tabla 19, la mayor capacidad de carga útil, se presenta para el diseño propuesto. Por lo cual, podemos deducir que la geometría adoptada para los elementos en este diseño permite una reducción significativa del peso estructural, lo cual representa una ventaja en ahorro de combustible para las empresas transportadoras, debido a un menor esfuerzo de la maquinaria vacía por carretera e igualmente permite una mayor cantidad de carga transportada, sin exceder el límite establecido por el ministerio de transporte.

**Tabla 20. Incrementos de la carga útil del modelo propuesto**

DISEÑO DEL 3S3	INCREMENTO DE LA CARGA ÚTIL DEL MODELO PROPUESTO [Kg]
MARCA ROMARCO	1857
MARCA FALCON	1083

El modelo propuesto presenta un notorio incremento en la carga útil al compararlo con los modelos de las marcas estudiadas. La carga útil del modelo propuesto es mayor al de la marca ROMARCO, superándola en casi 2 toneladas métricas, es decir en 1857 kg. También, es superior a la del semirremolque FALCON, con un poco más de la tonelada métrica, es decir los 1083 Kg, véase la tabla 20.

El peso correspondiente al tracto camión de tres ejes, fue medido con una báscula utilizada para la regulación del peso vehicular en la ciudad de Bucaramanga. Mientras que el peso de la carrocería, los ejes y todos los elementos estructurales se obtuvieron por las especificaciones del fabricante, y fueron calculados por medio de las relaciones entre el volúmen y la densidad en cada uno de ellos.

### 6.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULACIÓN.

Una vez conocido el hecho de que la reducción de espesores permite una considerable reducción del peso estructural para el modelo propuesto, se procede a determinar la efectividad de los modelos de la marca FALCON y propuesto. Teniendo en cuenta las deformaciones y los esfuerzos máximos generados en cada uno ellos, con el propósito de evaluar si los elementos estructurales no tendrán fallas en alguno de estos aspectos, y conocer el factor de seguridad presente en ellos, cuando están sometidos a las condiciones de carga máxima.

Para efectos de una explicación más favorable del análisis de los resultados obtenidos, se procede a modificar el nombre del modelo de la marca FALCON, por el de modelo en acero ASTM A36, y el del modelo propuesto, por el de modelo en acero Domex 700.

**6.3.1. Vigas principales para el modelo en acero ASTM A36 y Domex 700.** El área en el que actúa el peso que soporta cada viga principal corresponde al área del patín superior para ambos diseños, véase la figura 23. El ancho del patín superior es de 5 pulgadas ó 127 mm, con un largo de 13000 mm.

**Tabla 21. Fuerzas que actúan sobre las vigas en ambos diseños**

DISEÑO EN ACERO	AREA [mm <sup>2</sup> ]	PESO QUE SOPORTA CADA VIGA [Kg]	FUERZA QUE ACTUA EN CADA VIGA [KN]	CARGA QUE SOPORTA CADA VIGA [MPa]
ASTM A36	1651000	17515,3	171649,94	0,103967256
Domex 700	1651000	18056,75	176956,15	0,107181193

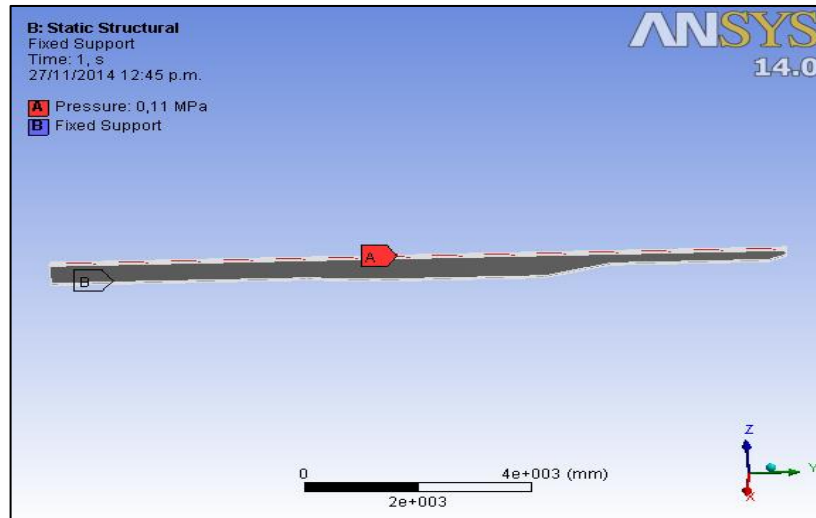
En los cálculos realizados para la tabla 21, solo se tuvo en cuenta la mitad del peso de la carga útil para cada una de las vigas presentes en los modelos.

Con el fin de realizar una comparación entre el comportamiento estructural de cada una de las vigas, se aplicó el mismo esfuerzo para realizar la simulación,

cuyo valor es de 0,11 MPa, siendo este valor un poco más alto para el caso de la viga ASTM A36.

### 6.3.1.1. Viga principal para el modelo en acero ASTM A36

Figura 25. Vista previa de la simulación para las vigas principales



Se aplicó una carga en forma de presión sobre la cara superior de la viga de 110000 Pa (0,11 MPa), sobre un área de 1651000 mm<sup>2</sup>, obteniéndose una carga equivalente de 181610 N, como se indica en la etiqueta A en la figura 25, los apoyos se ubicaron en la cara inferior de la viga, como se indica en la etiqueta B.

Tabla 22. Especificaciones utilizadas para la simulación de las vigas principales

Object Name	<i>Pressure</i>	<i>Fixed Support</i>
State	Fully Defined	
<b>Scope</b>		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	1 Face	5 Faces
<b>Definition</b>		
Type	Pressure	Fixed Support
Define By	Normal To	
Magnitude	0,11 MPa (ramped)	
Suppressed	No	

**Tabla 23. Características principales de la viga ASTM A36**

Material	Acero ASTM A36
Densidad	7,84905 g/cm <sup>3</sup>
Masa	636,266 kg
Área	19275600 mm <sup>2</sup>
Volumen	81062800 mm <sup>3</sup>
Centro de gravedad	x=0 mm y=6233,71 mm z=280,231 mm

**Tabla 24. Propiedades generales de la viga ASTM A36**

Nombre	Acero ASTM A36	
General	Densidad de masa	7,84905 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	248,225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399,9 MPa
Tensión	Módulo de Young	199,959 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,3 su
	Módulo cortante	76,9073 GPa
Tensión térmica	Coefficiente de expansión	0,0000117 su/c
	Conductividad térmica	45 W/( m K )
	Calor específico	480 J/( kg c )
Nombre(s) de pieza	viga1	

**Fuente:** los autores

**6.3.1.1.1. Resultados obtenidos en la simulación con el acero ASTM A36.**

**Figura 26. Esfuerzo Equivalente Von Mises para la viga ASTM A36**

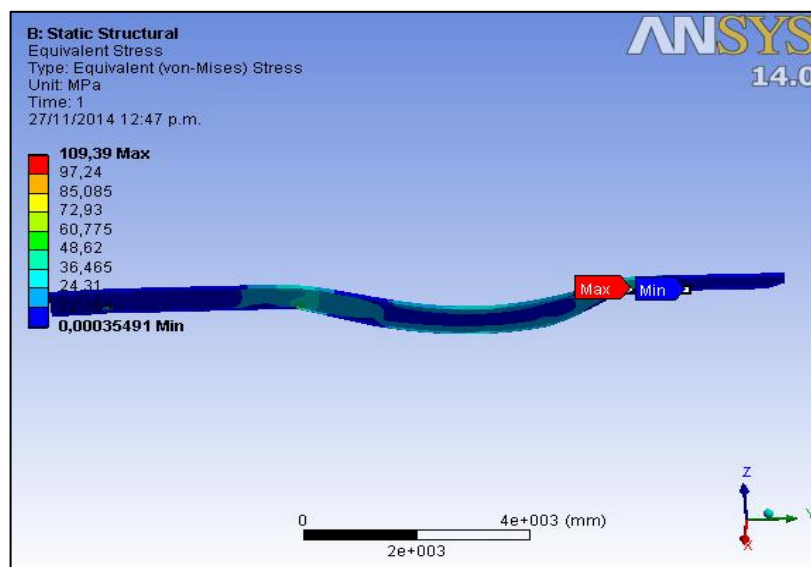


Figura 27. Deformación elástica equivalente para la viga ASTM A36

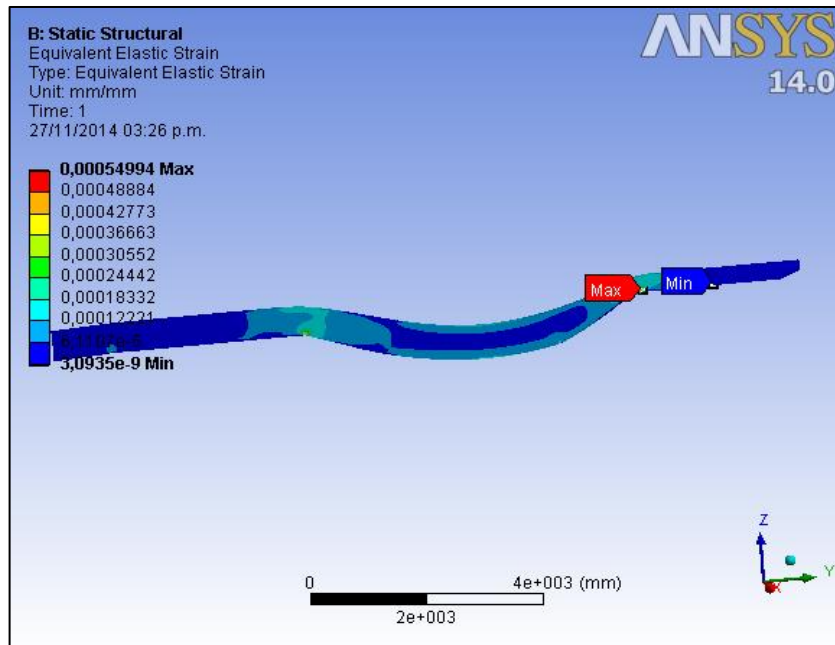
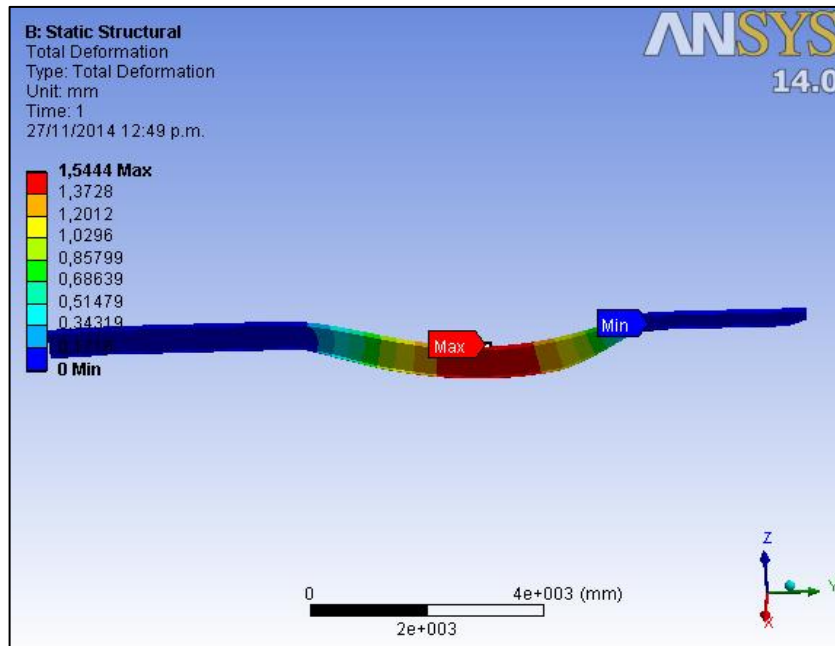


Figura 28. Deformación total para la viga en acero ASTM A36



**Tabla 25. Principales resultados en la simulación de la viga ASTM A36**

Definition			
Object Name	Equivalent Stress	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain
Results			
Minimum	3,5491e-004 MPa	0, mm	3,0935e-009 mm/mm
Maximum	109,39 MPa	1,5444 mm	5,4994e-004 mm/mm

Al analizar los resultados de la simulación para la viga en acero ASTM A36, se puede observar que en el estado de cargas impuestas la máxima tensión es de 109,39 MPa, siendo esta inferior a la tensión de fluencia del material cuyo valor es de 248,23 MPa, por lo cual el factor de seguridad para la viga ASTM A36 es de 2,27. Como se observa en la figura 26, el esfuerzo máximo se presenta en la zona de acople entre el semirremolque y el tracto camión, debido a que en ella se encuentra el cambio de sección transversal más significativo en toda la viga, y esta zona es muy cercana a uno de los apoyos.

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma} = \frac{248,23}{109,39} = 2,27 \quad (8)$$

Donde:

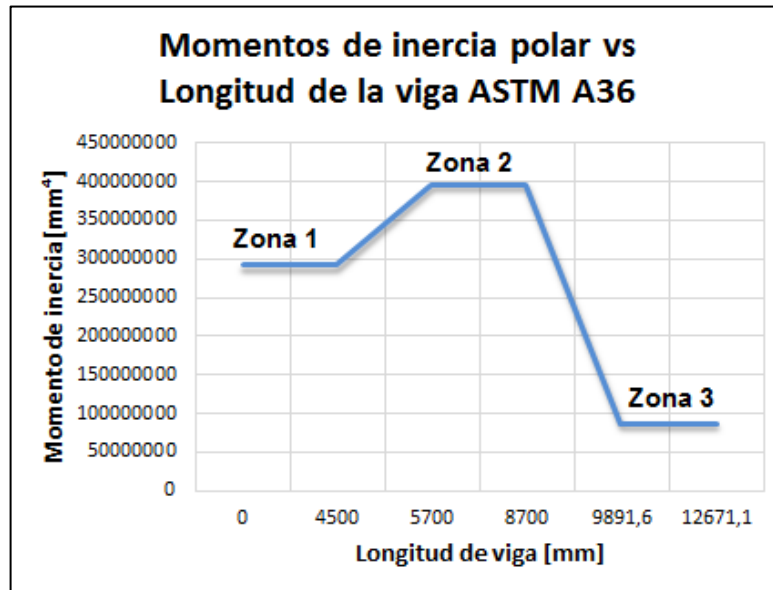
- FS = factor de seguridad
- $\sigma_y$  = Resistencia última a la fluencia [MPa]
- $\sigma$  = Máxima tensión del componente [MPa]

En la figura 27, se puede observar que el valor de la deformación elástica equivalente es de 0,00054994 mm/mm, el cual se encuentra dentro de la zona elástica y por lo tanto se puede afirmar que no se presentarán fallas por deformaciones plásticas del material. También se obtuvo el máximo desplazamiento, cuyo valor es de 1,544 mm, el cual se produjo en dirección vertical en el sentido de la carga impuesta, este se encuentra ubicado a lo largo de

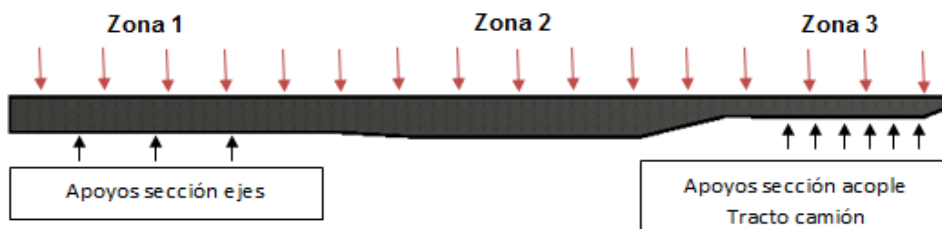
la zona media de la viga, debido a que en esta zona no se encuentran apoyos, véase la figura 28. En la tabla 25, se encuentra el resumen de los principales resultados obtenidos la simulación.

**6.3.1.1.2. Momentos de inercia presentes en las vigas elaboradas con el acero ASTM A36.**

**Figura 29. Variación de los momentos de inercia para la viga ASTM A36**



**Figura 30. Esquema de las zonas en las vigas principales.**



Debido a los cambios de sección presentes en la viga, se origina una variación en el momento de inercia a lo largo de esta. Por lo cual, se presenta una diversificación de los esfuerzos y por consiguiente de las deformaciones, teniendo en cuenta que la carga aplicada es uniforme.

Analizando el modelo, se puede observar que las zonas de la viga que presentan un menor momento de inercia son aquellas en las que se ubican los apoyos, y las zonas con una mayor área transversal presentan un mayor momento de inercia, lo cual les permite tener una mejor capacidad de soportar la carga. En estas zonas el área es mayor debido a que no presenta ningún apoyo.

Inicialmente, se tiene una sección de 4500mm (zona 1), cuyo valor del momento de inercia es de  $292210240\text{mm}^4$ , el cual permanece constante. Posteriormente en la zona de transición a la zona 2, observamos una variación lineal en el momento de inercia, debido a que entramos en la zona intermedia de la viga, la cual requiere de mejores condiciones de resistencia mecánica, debido a la ausencia de apoyos en ella, convirtiéndola en una sección crítica de la viga, y por este motivo el área de sección transversal aumenta hasta un valor máximo, en el cual se presenta el mayor momento de inercia, este valor permanece constante en la zona 2. Posteriormente, en la transición a la zona 3, se observa una disminución en el momento de inercia como se detalla en la figura 29, esta se origina por las restricciones propias del diseño, debido a que esta zona corresponde al acople con el tracto camión, el cual soporta parte de la carga transportada, y por lo tanto es permitida un área de sección transversal mínima en esta sección de la viga.

**6.3.1.1.3. Viga principal para el modelo en acero Domex 700:** Es importante resaltar que, debido a la reducción del peso generada por el cambio en los espesores, las vigas para el modelo propuesto tienen un 50,5% de la masa total presente en él. Por lo tanto, su compromiso en la resistencia mecánica del modelo

es superior que el de las vigas ASTM A36, las cuales poseen el 42,53% de la masa total, véase las tablas 15 y 18 en las páginas 50 y 65.

Al igual que en el caso de la viga en acero ASTM A36, se aplicó una carga en forma de presión sobre la cara superior de la viga de 0,11 MPa, sobre un área de 1651000 mm<sup>2</sup>, obteniéndose una carga equivalente de 181610 N, como se indica en la etiqueta A, y los apoyos se ubicaron en la cara inferior de la viga como se indica en la etiqueta B, véase la figura 25. Las especificaciones utilizadas para la simulación de la viga elaborada en acero Domex 700, se encuentran consignadas en la tabla 22.

**Tabla 26. Características principales para la viga Domex 700**

Material	Domex 700
Densidad	7,85 g/cm <sup>3</sup>
Masa	481,525 kg
Área	19316000 mm <sup>2</sup>
Volumen	61340800 mm <sup>3</sup>
Centro de gravedad	x=0 mm y=6244 mm z=280,083 mm

**Tabla 27. Propiedades generales de la viga Domex 700**

Nombre	Domex 700	
General	Densidad de masa	7,85 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	750 MPa
	Resistencia máxima a tracción	950 MPa
Tensión	Módulo de Young	210 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,29 su
	Módulo cortante	81,3953 GPa
Tensión térmica	Coefficiente de expansión	0,000012 su/c
	Conductividad térmica	56 W/( m K )
	Calor específico	460 J/( kg c )
Nombre(s) de pieza	vigaDOMEX700	

#### 6.3.1.1.4. Resultados obtenidos en la simulación con el acero Domex 700.

Figura 31. Esfuerzo Equivalente Von Mises para la viga Domex 700

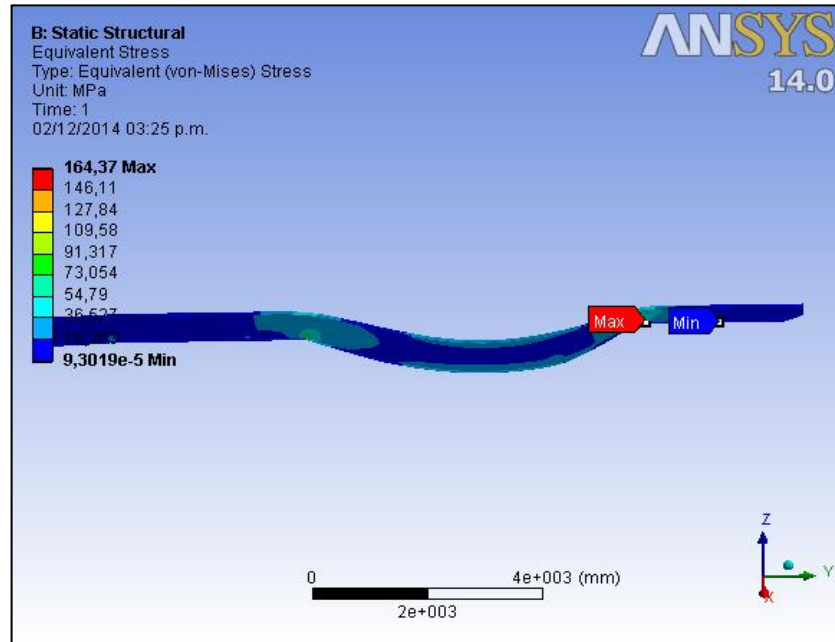
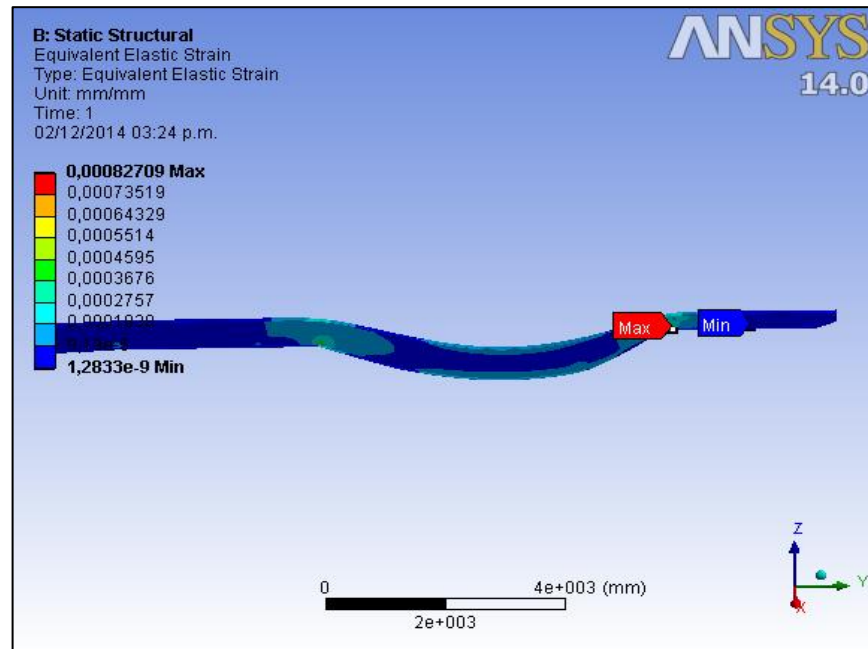
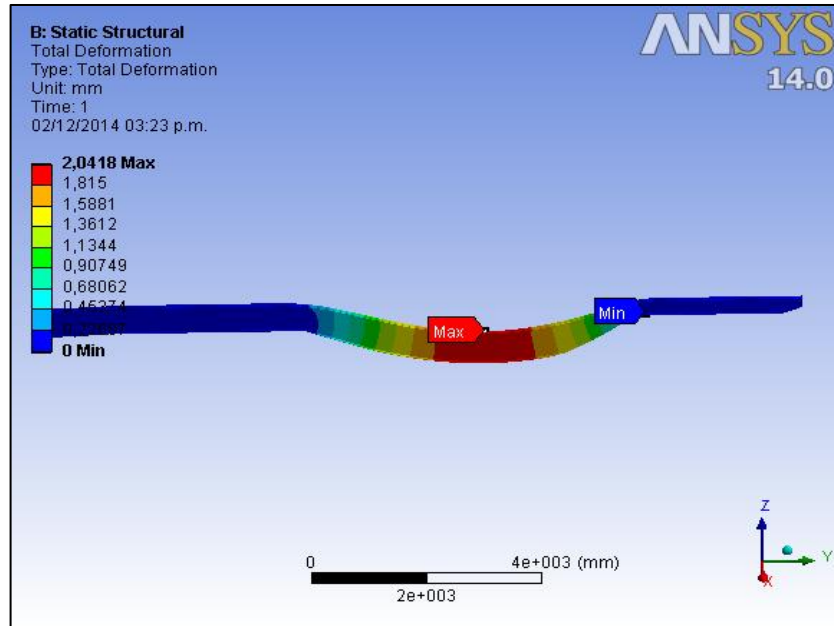


Figura 32. Deformación Elástica Equivalente para la viga Domex 700



**Figura 33. Deformación total para la viga Domex 700**



**Tabla 28. Principales resultados en la simulación de la viga Domex 700**

Definition			
Type	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress
Results			
Minimum	0, mm	1,2833e-009 mm/mm	9,3019e-005 MPa
Maximum	2,0418 mm	8,2709e-004 mm/mm	164,37 MPa

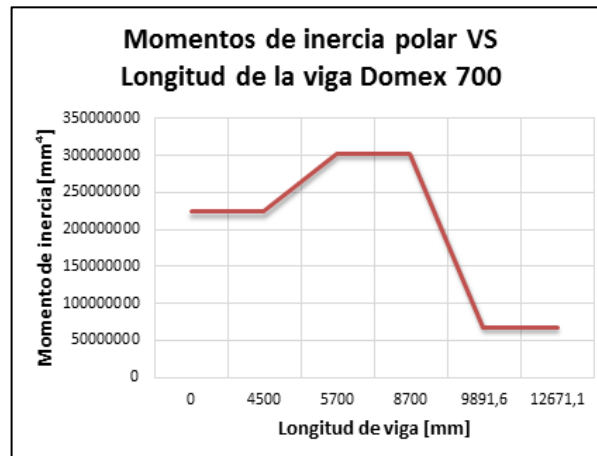
Al analizar los resultados de la simulación para la viga en acero Domex 700, se puede observar que para el estado de cargas impuestas, la máxima tensión es de 164,37 MPa, siendo este valor superior al esfuerzo máximo generado en la viga en acero ASTM A36, pero muy por debajo del límite de fluencia del material, cuyo valor es de 700 MPa. Seguramente, este incremento en el esfuerzo máximo es causado por la reducción del área en la sección transversal de la viga. El factor de seguridad calculado según el máximo esfuerzo obtenido es de 4,26. El esfuerzo máximo se presenta en la zona de acople con el tracto camión al igual que en la viga ASTM A36, como se observa en la figura 31.

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma} = \frac{700}{164,37} = 4,26$$

en la figura 32, se puede observar que el valor de la deformación elástica equivalente es de 0,00082709 mm/mm, el cual se presenta dentro de la zona elástica, por lo tanto, se puede afirmar que no se presentarán fallas por deformación plástica del material. También, se obtuvo un máximo desplazamiento, cuyo valor es de 2,0418 mm, el cual se produjo en dirección vertical en el sentido de la carga impuesta, ubicado en la misma zona que para la viga en acero ASTM A36, como se observa en la figura 33. En la tabla 28, se encuentra el resumen de los principales resultados obtenidos en la simulación para la viga Domex 700.

#### 6.3.1.1.5. Momentos de inercia presentes en las vigas elaboradas en acero Domex 700.

**Figura 34. Variación de los momentos de inercia para la viga Domex 700**



Debido a los cambios de sección que presenta la viga, se origina una variación en el momento de inercia a lo largo de esta. Por lo cual, se presenta una

diversificación de los esfuerzos y por consiguiente en las deformaciones, teniendo en cuenta que la carga aplicada sobre la viga es uniforme.

Analizando el modelo, se puede observar que las zonas de la viga que presentan un menor momento de inercia, de 68302289 y 223256013,123 mm<sup>4</sup>, son aquellas en las que se ubican los apoyos, y la zona con una mayor área transversal presenta el mayor momento de inercia, de 302787429,63 mm<sup>4</sup>, lo cual le permite tener una mejor capacidad de asumir las cargas, y por lo tanto en estas zonas no se pondrán apoyos.

El comportamiento del momento de inercia respecto a la longitud de la viga, es similar al observado en la viga ASTM A36. La principal diferencia radica en la disminución de estos valores, causada por la reducción de espesores.

### 6.3.1.2. Comparación de los resultados obtenidos para las vigas de ambos modelos.

**Tabla 29. Principales resultados obtenidos en las simulaciones de las vigas ASTM A36 y Domex 700**

		VIGAS	
		Viga en acero ASTM A36	Viga en acero Domex 700
<b>Masa [Kg]</b>		636,266	481,525
<b>espesor [mm]</b>	<b>alma</b>	6,35	4,763
	<b>patines</b>	12,7	9,525
<b>Deformación total Máxima [mm]</b>		1,544	2,418
<b>Def. Elástica eq. Máxima [mm/mm]</b>		0,0005499	0,000827
<b>Esfuerzo Eq. De Von Mises Máx. [MPa]</b>		109,39	164,37
<b>Factor de Seguridad</b>		2,27	4,26

Una vez obtenidos los principales datos de las simulaciones para las vigas elaboradas en acero ASTM A36 y Domex 700, se realizó una tabla comparativa entre estos valores, con la finalidad de determinar la viabilidad del mejoramiento a

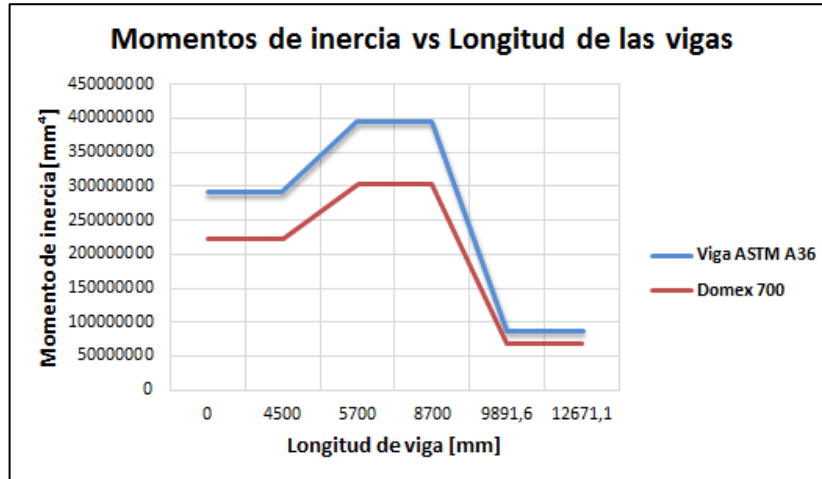
partir de la reducción de espesores y el cambio del material, analizando el desempeño estructural del diseño a mejorar y el propuesto.

Como se observa en la tabla 29, mediante las reducciones de espesores se obtuvo una disminución del 24,32% del peso de la viga en acero ASTM A36 al utilizar el acero Domex 700.

Al comparar el límite fluencia del acero ASTM A36 y el Domex 700 cuyos valores son de 248,23 y 700 MPa respectivamente, y al tener en cuenta los principales resultados obtenidos en las simulaciones, consignados en la tabla 29. Se obtiene un mayor factor de seguridad para la viga en acero Domex 700, a pesar de que se observa un incremento en los valores del esfuerzo máximo, deformación elástica equivalente y deformación total, ocasionados por la reducción del área en la sección transversal. Esto quiere decir, que los valores de resistencia mecánica para el modelo propuesto satisfacen el límite de carga máxima para los semirremolques, y ningún esfuerzo generado en ellos alcanza un cuarto del límite de fluencia del Domex 700, lo cual hace del modelo propuesto una alternativa más eficiente que el modelo encontrado actualmente en el mercado.

### 6.3.1.3. Comparación entre los momentos de inercia presentes en las vigas de ambos modelos.

Figura 35. Variación del momento de inercia en las vigas simuladas



Como consecuencia de la reducción de espesores para el modelo propuesto en acero Domex 700, el área de la sección transversal y los momentos de inercia disminuyeron en comparación con los del modelo en acero ASTM A36, modificándose la resistencia a la flexión y los resultados de las simulaciones para la viga.

Se elaboró una gráfica en la cual se correlacionan los datos obtenidos del momento de inercia respecto a la longitud de la viga para el caso del modelo a mejorar y el propuesto, con el fin de realizar un análisis de estos valores. Debido a la reducción de espesores, se observa una disminución en los valores del momento de inercia para la viga en acero Domex 700, en comparación con los valores para la viga en acero ASTM A36. En esta gráfica se puede apreciar que la zona susceptible a los esfuerzos más altos, se ubica cercana a la zona de acople entre la viga y el tracto camión, la cual corresponde en las gráficas al punto donde estas casi se interceptan, a los 10 metros aproximadamente, véase la figura 35, debido a que en esta zona empieza el momento de inercia más bajo para ambos

modelos y es el final de la zona de transición más aguda, por lo cual se acumulan los esfuerzos. Igualmente, se observa que la gráfica azul, presenta una pendiente más pronunciada en la transición a la zona de acople comparada con la gráfica roja, por lo cual se puede afirmar, que la viga en acero ASTM A36 es menos susceptible a la presencia de esfuerzos en comparación con la viga en acero Domex 700.

#### 6.3.1.4. Validación de los resultados para la simulación de las vigas ASTM A36 y Domex 700.

**Figura 36. Gráfico de convergencia para la viga ASTM A36**



**Tabla 30. Determinación del número de elementos de malla para la simulación de la viga ASTM A36**

Esf. Eq. Von Mises Viga ASTM A36	Número de elementos finitos	% de variación del esfuerzo Eq. Von Mises
34,89	34523	
73,9	67256	52,78755074
95,93	120067	22,96466173
104,7	147689	8,376313276
109,39	150087	4,287412012

**Tabla 31. Número de nodos y elementos finitos para la viga ASTM A36**

Statistics	
Nodes	303577
Elements	150087
Element Size	20, mm

**Figura 37. Gráfico de convergencia para la viga Domex 700**



**Tabla 32. Determinación del número de elementos de malla para la simulación de la viga Domex 700**

Esf. Eq. Von Mises Viga Domex 700	Número de elementos finitos	% de variación del esfuerzo Eq. Von Mises
45,7	3425	
97,3	6756	53,03186023
132,45	128679	26,53831635
156,89	149978	15,57779336
164,37	151344	4,550708767

**Tabla 33. Número de nodos y elementos finitos para la viga Domex 700**

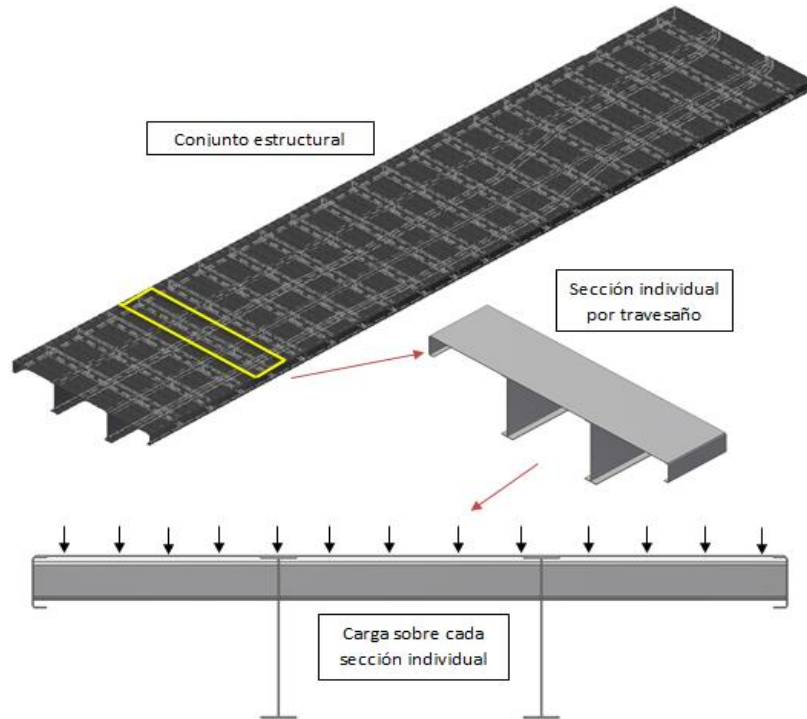
Statistics	
Nodes	306072
Elements	151344
Element Size	20, mm

En las figuras 36 y 37, se pueden observar los gráficos de convergencia para las simulaciones de las vigas en acero ASTM A36 y Domex 700, los cuales se

obtuvieron luego de realizar repetidas simulaciones con el fin de determinar el tamaño de malla más apropiado. Se realizaron cinco simulaciones para cada uno de los modelos variando el tamaño de la malla y posteriormente se determinó la cantidad de elementos finitos y el esfuerzo equivalente Von Mises obtenido en cada una de ellas. Al analizar esta información, observamos que los valores del esfuerzo equivalente Von mises aumentan al disminuir el tamaño del elemento finito, ya que entre mayor sea el número de elementos finitos, mayor será el número de nodos presentes en el modelo, y por consiguiente la solución numérica será más aproximada al valor real, véase las tablas 30 y 32. Para este caso en particular, se determinó que tanto para las vigas en acero ASTM A36 y Domex 700, la menor variación del porcentaje del esfuerzo equivalente Von Mises de una solución a otra se presentó para un tamaño de malla de 20 mm, que proporcionó un número de elementos finitos de 150087 y 151344 con un 4,29% y 4,55% de variación respectivamente, estos valores se encuentran dentro de lo admisible, véase las tablas 31 y 33.

**6.3.2. Travesaños para los modelos en acero ASTM A36 y Domex 700.** Para determinar la carga aplicada en cada uno de los travesaños, se halló inicialmente el esfuerzo soportado por el conjunto estructural completo, sometiéndolo a las máximas condiciones de carga. Este esfuerzo se determinó aplicando la carga útil cuyo valor es de 363209,82 kg, sobre el área de la lámina cuyo valor es de 33800000 mm<sup>2</sup>, generándose sobre esta un esfuerzo de 0,0102 MPa. Posteriormente, se analizó un tramo de la sección del conjunto estructural con el objetivo de identificar el valor de la carga soportada por cada uno de los travesaños.

**Figura 38. Esquema de la carga sobre el travesaño por sección individual**

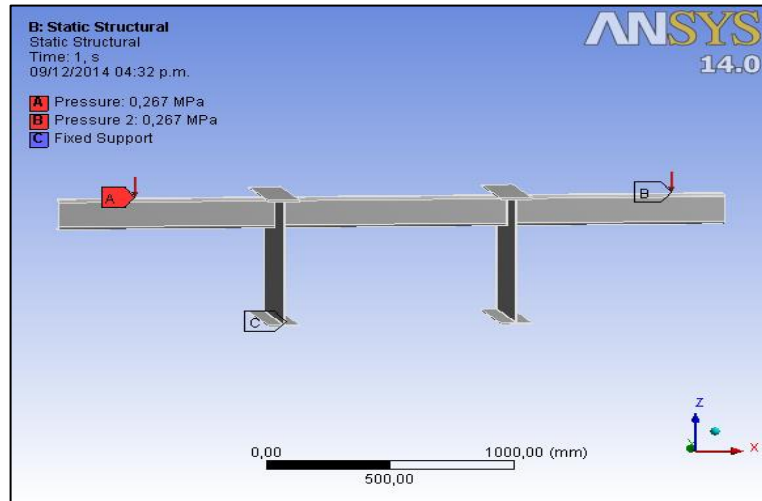


Posteriormente, se halló el área útil correspondiente a cada uno de los travesaños, con el fin de determinar las fuerzas actuantes sobre cada uno de estos elementos. Aplicando el esfuerzo calculado para el conjunto estructural completo, sobre un área de  $1748191,9 \text{ mm}^2$ , se encontró la carga correspondiente, cuyo valor fue de  $17295,71 \text{ N}$ , esto equivale a  $1764,87 \text{ Kg}$  de peso. Es decir, este es el peso soportado por cada sección. En la figura 38, se muestra un esquema que ejemplifica la forma como se obtuvieron estos resultados.

**6.3.2.1. Travesaños elaborados en acero ASTM A36.** Se aplicó una carga en forma de presión de  $0,267 \text{ MPa}$ , sobre la cara superior de los extremos en el travesaño con perfil en C y en doble T, correspondientes a las marcas FALCON y ROMARCO respectivamente, sobre un área de  $2247,2 \text{ mm}^2$  obteniéndose una carga equivalente de  $6000 \text{ N}$ , como se indica en las etiquetas A y B de la figura

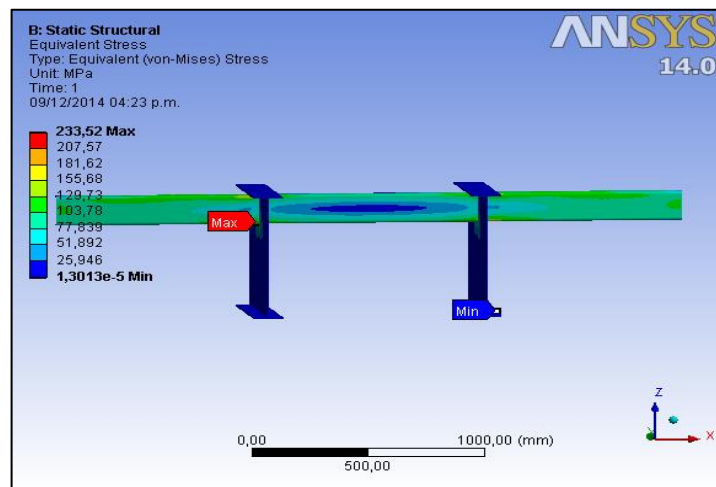
39, los apoyos se ubicaron en la cara inferior de la viga como se indica en la etiqueta C.

**Figura 39. Vista previa de la simulación para los travesaños ASTM A36**



### 6.3.2.1.1. Resultados de la simulación del travesaño con perfil en C.

**Figura 40. Esfuerzo Equivalente Von Mises para el travesaño con perfil en C**



En la figura 40, se puede observar una imagen frontal de la simulación realizada para el travesaño con perfil en C, en la cual se muestra el máximo (etiqueta roja) y

mínimo (etiqueta azul) esfuerzo equivalente según Von Mises, cuyos valores son 233,52 MPa y 0,000013013 MPa respectivamente.

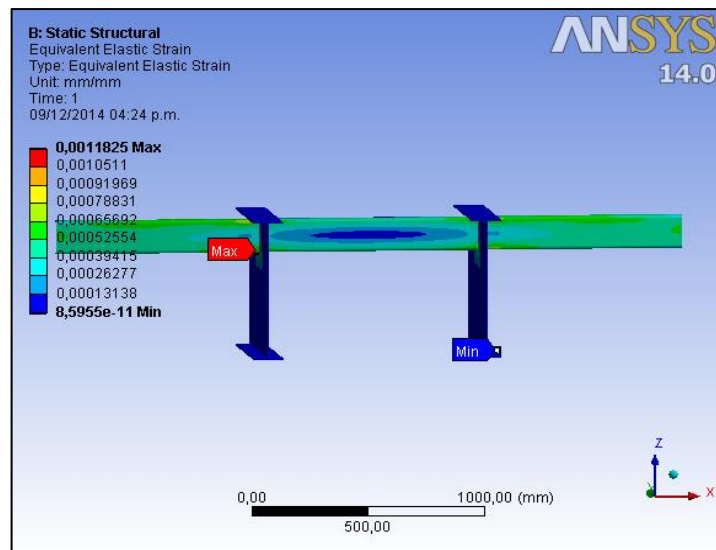
Las zonas azules representan la menor concentración de esfuerzos. Al ascender por la escala de colores, se incrementa el valor de los esfuerzos generados en el material, como se muestra en el gradiente ubicado en el sector izquierdo de la figura 40.

El factor de seguridad calculado para este tipo de travesaños según el máximo esfuerzo presentes en ellos es de 1,063. El esfuerzo máximo, se ubica en la parte inferior de la zona donde el travesaño se intercepta con el alma de la viga principal, siendo este el punto de apoyo del travesaño sobre la viga.

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma} = \frac{248,23}{233,52} = 1.063$$

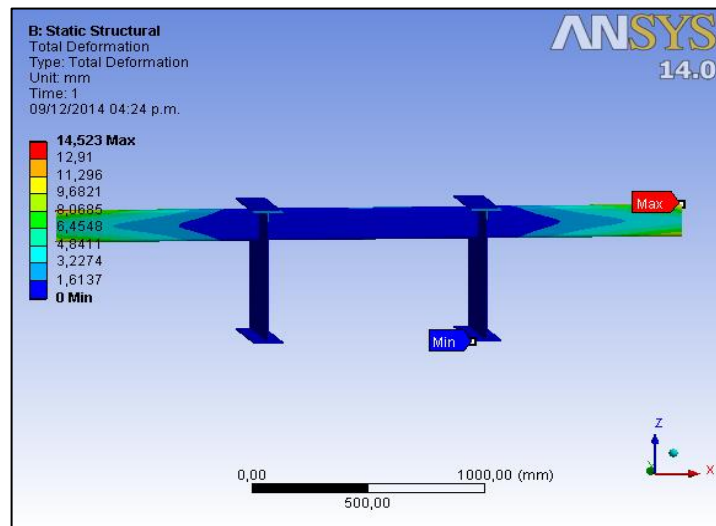
Este tipo de travesaños presenta un muy bajo factor de seguridad al momento de someter al semirremolque a la máxima capacidad de carga.

**Figura 41. Deformación elástica equivalente para el travesaño con perfil en C**



En la figura 41, se presentan los resultados de la deformación elástica equivalente máxima (etiqueta roja) y mínima (etiqueta azul), cuyos valores son 0,0011825 y 8,5955E-11 respectivamente. Estos valores se encuentran dentro de la zona elástica del material, por lo tanto se puede afirmar que no se presentarán fallas por deformación plástica, pero su máximo valor es cercano al valor de inicio de las deformaciones plásticas (0,002), y debido a esto se requiere un mayor control en la cantidad de carga a ser transportada.

**Figura 42. Deformación total del travesaño con perfil en C**



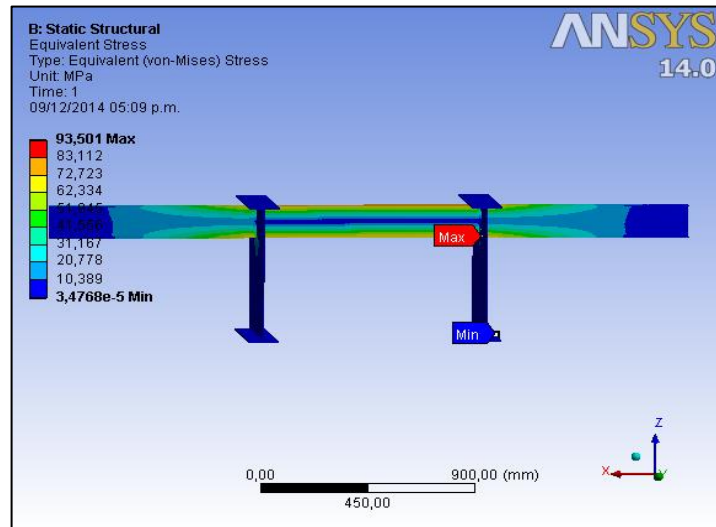
En la figura 42, se observan los resultados de la deformación o el desplazamiento total máximo (etiqueta roja) y mínimo (etiqueta azul), cuyos valores son 14,523 mm y 0 mm respectivamente. Este se produce en la dirección longitudinal del travesaño. La deformación tiene un patrón triangular como el observado en la figura 42, debido a la geometría del perfil en el travesaño. El cual al ser sometido a una carga de presión se producen distorsiones en su altura, debido a que no existe un refuerzo en medio de la lámina superior e inferior que lo constituye, favoreciendo su deformación y posterior alargamiento, el cual es mayor en los extremos y muy bajo en la zona media de este elemento.

**Tabla 34. Principales resultados obtenidos para el travesaño con perfil en C**

Definition			
Type	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress
Results			
Minimum	0, mm	8,5955e-011 mm/mm	1,3013e-005 MPa
Maximum	14,523 mm	1,1825e-003 mm/mm	233,52 MPa

**6.3.2.1.2. Resultados obtenidos en la simulación del travesaño con perfil en doble T.**

**Figura 43. Esfuerzo equivalente Von Mises para el travesaño con perfil en doble T**



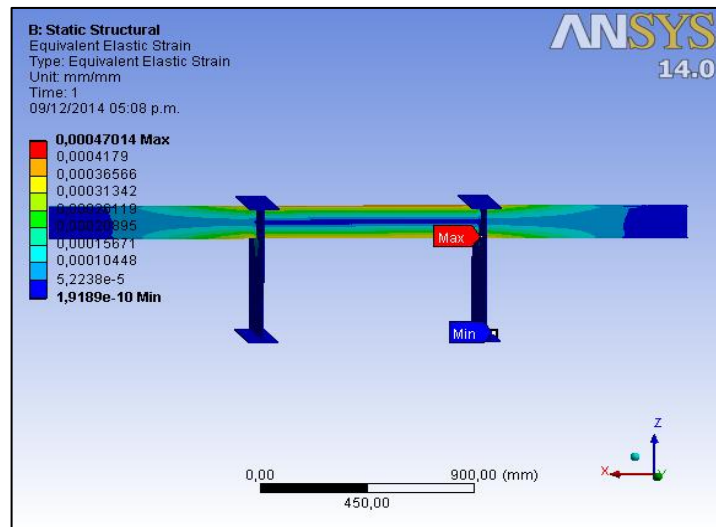
En la figura 43, se observa una imagen frontal de la simulación realizada para el travesaño con perfil en doble T, en la cual se muestra el máximo (etiqueta roja) y mínimo (etiqueta azul) esfuerzo equivalente según Von Mises, cuyos valores son 93,501 MPa y 3,4768E-5 MPa respectivamente. El factor de seguridad calculado para este tipo de travesaños según el máximo esfuerzo presente en ellos es de 2,655.

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma} = \frac{248,23}{93,501} = 2,655$$

Los esfuerzos máximos para este modelo, se sitúan en las mismas zonas que en el modelo con un perfil en C, y su factor de seguridad es más del doble.

Finalmente, se observa en la figura 43, un gradiente de esfuerzos en la altura correspondiente a la parte central del travesaño, debido a que en esta zona el elemento se encuentra sometido a esfuerzos de tensión (en la parte superior) y compresión (en la parte inferior), debido a la flexión que genera la carga aplicada en los extremos, y de esta forma se logra aliviar las tensiones presentes en ellos.

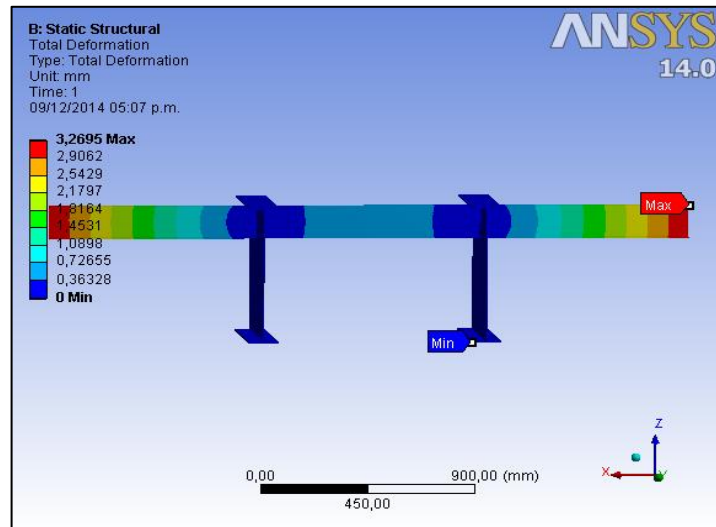
**Figura 44. Deformación elástica equivalente del travesaño con perfil en doble T**



En la figura 44, se presentan los resultados para la deformación elástica equivalente máxima (etiqueta roja) y mínima (etiqueta azul) cuyos valores son  $4,70E-4$  y  $1,92E-10$  respectivamente. Estos valores se encuentran dentro de la zona elástica del material, y por lo tanto se puede afirmar que no se presentarán fallas por deformación plástica. Las deformaciones elásticas equivalentes del travesaño, presentan la misma distribución de los esfuerzos equivalentes, debido a que estos se encuentran directamente relacionados. Es decir, a mayor esfuerzo mayor es la deformación elástica equivalente para esta zona, véase las figuras 43

y 44. Al igual que en el travesaño con perfil en C, la máxima deformación elástica equivalente se presenta en la zona de intercepción del travesaño con el alma de la viga principal, la cual actua como un punto de apoyo para el travesaño.

**Figura 45. Deformación total para el travesaño con perfil en doble T**



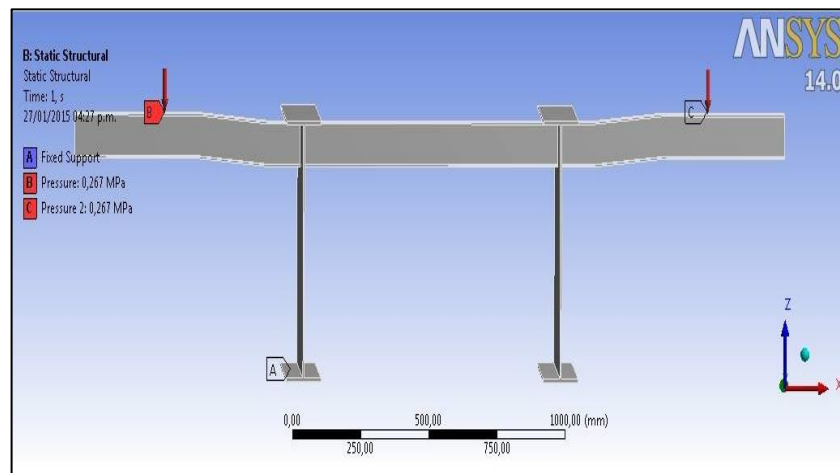
En la figura 45, se observan los resultados de la simulación relacionados con la deformación o desplazamiento total máximo (etiqueta roja) y mínimo (etiqueta azul) cuyos valores son 3,2695 mm y 0 mm respectivamente, este se produce en la dirección logitudinal del travesaño. La deformación presenta un patrón uniforme o rectangular como el observado en la figura 45, debido a la geometría en el perfil del travesaño. El cual al ser sometido a una carga de presión se produce en él una deflexión, debido a que existe un refuerzo (el alma) en la mitad del patín superior e inferior, ocasionando que la deformación y posterior alargamiento sean contrarrestados con mayor efectividad. El desplazamiento es mayor en los extremos y muy bajo en las zonas cercanas a los puntos de apoyo del travesaño.

**Tabla 35. Principales resultados obtenidos para el travesaño con perfil doble en T.**

Definition			
Type	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress
Results			
Minimum	0, mm	1,9189e-010 mm/mm	3,4768e-005 MPa
Maximum	3,2695 mm	4,7014e-004 mm/mm	93,501 MPa

### 6.3.2.2. Travesaño elaborado en acero Domex 700.

**Figura 46. Vista previa de la simulación del travesaño tipo gaviota**



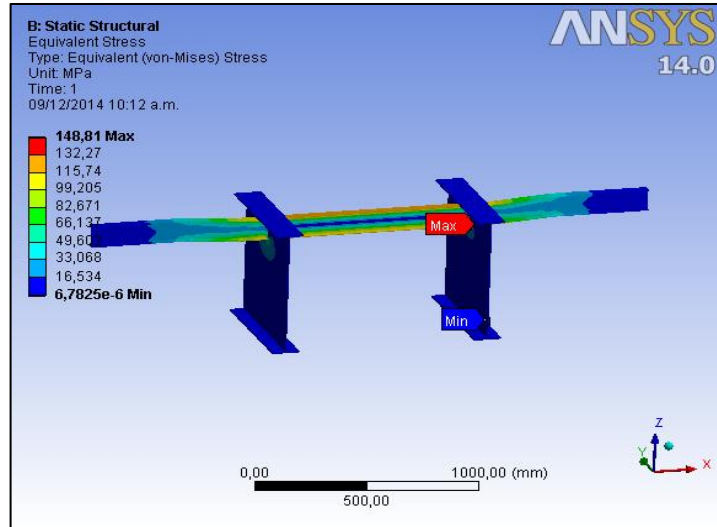
Se aplicó una carga en forma de presión de 0,267 MPa sobre la cara superior de los extremos en el travesaño propuesto para el mejoramiento, sobre un área de 22472 mm<sup>2</sup>, obteniéndose una carga equivalente de 6000 N, como se indica en las etiquetas B y C de la figura 46. Los apoyos están ubicados en la cara inferior de la viga, al igual que en los travesaños fabricados con el acero ASTM A36 como se indica la etiqueta A.

En este modelo de travesaños los extremos se encuentran a la misma altura que el patín superior de la viga principal, lo cual le proporciona una apariencia de ave.

Para efecto práctico su nombre será cambiado al de travesaño tipo gaviota, y su perfil en doble T es similar al de un travesaño modelo ROMARCO.

### 6.3.2.2.1. Resultados obtenidos en la simulación del travesaño tipo gaviota.

**Figura 47. Esfuerzo equivalente Von Mises para el travesaño tipo gaviota**

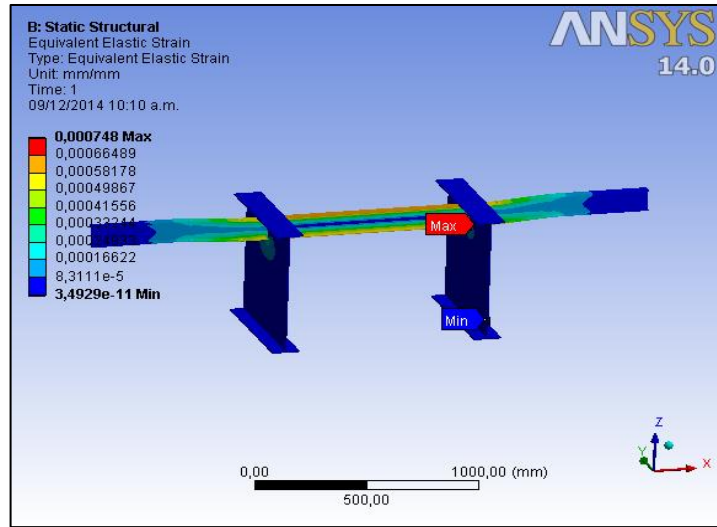


En la figura 47, se observa una imagen frontal de la simulación realizada para el travesaño tipo gaviota, en la cual se observa el máximo (etiqueta roja) y mínimo (etiqueta azul) esfuerzo equivalente según Von Mises, cuyos valores son 148,81 MPa y 6,7825E-6 MPa respectivamente. El factor de seguridad calculado para este tipo de travesaños según el máximo esfuerzo presente en ellos es de 4,704.

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma} = \frac{700}{148,81} = 4,704$$

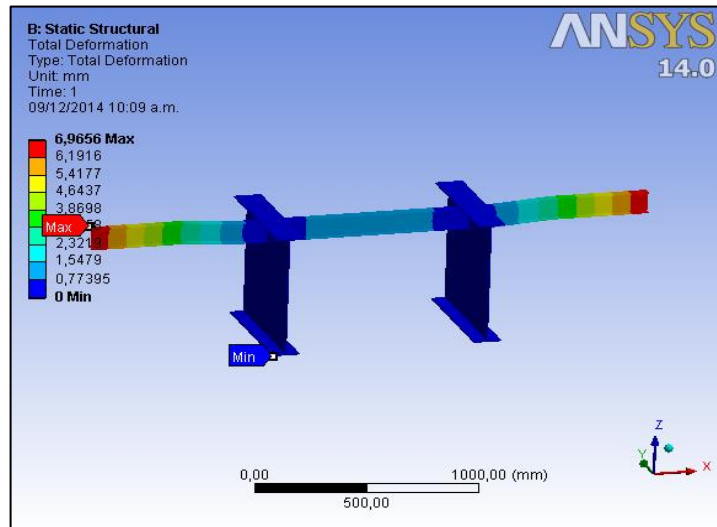
Los esfuerzos máximos en este prototipo, se sitúan en las mismas zonas que en los modelos de travesaños elaborados en acero ASTM A36, y su factor de seguridad es cuatro veces mayor que el presente en el travesaño con perfil en C y más del doble en comparación con el de perfil en doble T.

**Figura 48. Deformación elástica equivalente travesaño tipo gaviota**



En la figura 48, se presentan los resultados para la deformación elástica equivalente máxima (etiqueta roja) y mínima (etiqueta azul), cuyos valores son  $7,48E-4$  y  $3,4929E-11$  respectivamente.

**Figura 49. Deformación total para el travesaño tipo gaviota**



En la figura 49, se observan los resultados de la simulación con respecto a la deformación total máxima (etiqueta roja) y mínima (etiqueta azul) cuyos valores son  $6,9656$  mm y  $0$  mm respectivamente.

La distribución de los esfuerzos, las deformaciones elásticas equivalentes y la deformación total en este prototipo, son similares a la observadas en el travesaño con perfil en doble T, la principal diferencia radica en que estos valores son mayores en el travesaño tipo gaviota, esto es debido a la reducción del espesor y la altura en la sección transversal, como se observa en las figuras 19 y 20, y en las tablas 35, 36 y 37.

**Tabla 36. Principales resultados obtenidos para el travesaño tipo gaviota**

Definition			
Type	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress
Results			
Minimum	0, mm	3,4929e-011 mm/mm	6,7825e-006 MPa
Maximum	6,9656 mm	7,48e-004 mm/mm	148,81 MPa

#### 6.3.2.2. Comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones de los travesaños.

**Tabla 37. Comparación de los resultados obtenidos para los travesaños**

	TRAVESAÑOS		
	Perfil en C	Perfil en doble T	Alas de Gaviota
<b>Masa [Kg]</b>	23,2	24,3	13,3
<b>espesor [mm]</b>	4,763	4,763	3,175
<b>deformación total Máxima [mm]</b>	14,523	3,2695	6,9656
<b>Def. elastica eq. Maxima [mm/mm]</b>	0,0011825	0,0004701	0,000748
<b>Esfuerzo Eq. De Von Mises Máx. [Mpa]</b>	233,52	93,5	148,89
<b>momentos de Inercia [ mm<sup>4</sup> ]</b>	3560965,77	3714834,6	1634686,254
<b>Factor de Seguridad</b>	1,063	2,655	4,704

Analizando la tabla 37, observamos que el travesaño tipo gaviota es el de menor peso con una reducción del 42,67% respecto al travesaño con perfil en C y del 45,26% en comparación con el de perfil en doble T. Los modelos presentes actualmente en el mercado tienen valores aproximados en cuanto a peso y

momento de inercia en cada uno de los travesaños, debido a que estos presentan las mismas dimensiones y espesores, variando únicamente en la forma y en la fabricación de sus perfiles. Sin embargo, debido al cambio del material en el travesaño tipo gaviota se puede realizar una reducción significativa en el espesor y en la altura del alma, y por lo tanto del momento de inercia de su perfil en doble T, el cual se reduce a menos de la mitad en comparación con los travesaños comerciales, véase la tabla 37.

Conociendo todos los resultados de las simulaciones, podemos observar en ellos que el mayor valor para el esfuerzo equivalente según Von Mises fue obtenido para el travesaño con perfil en C, y el valor mínimo se presentó para el travesaño con perfil en doble T. Sin embargo, el travesaño tipo gaviota presenta valores intermedios. A pesar de que el travesaño con perfil en doble T obtuvo el mejor resultado en cuanto al esfuerzo equivalente máximo de Von Mises se refiere, no es el diseño más eficiente, debido a que presenta el mayor peso y posee la mayor área de sección transversal, lo que le proporciona el valor más alto de momento de inercia respecto a los otros dos tipos de travesaños. Esto quiere decir, que realiza muy bien su función, pero no es el diseño más óptimo en cuanto a peso se refiere. Por otro lado observamos que el modelo de travesaño tipo gaviota presenta resultados intermedios de esfuerzo y deformación, pero con la mitad del peso de los otros dos tipos de travesaños, y con un momento de inercia mucho menor, y sin embargo, este presenta un mejor comportamiento frente a las cargas impuestas que el evidenciado para el travesaño con perfil en C.

### 6.3.2.2.3. Validación de los resultados para la simulación de los travesaños.

Figura 50. Gráficos de convergencia para los travesaños

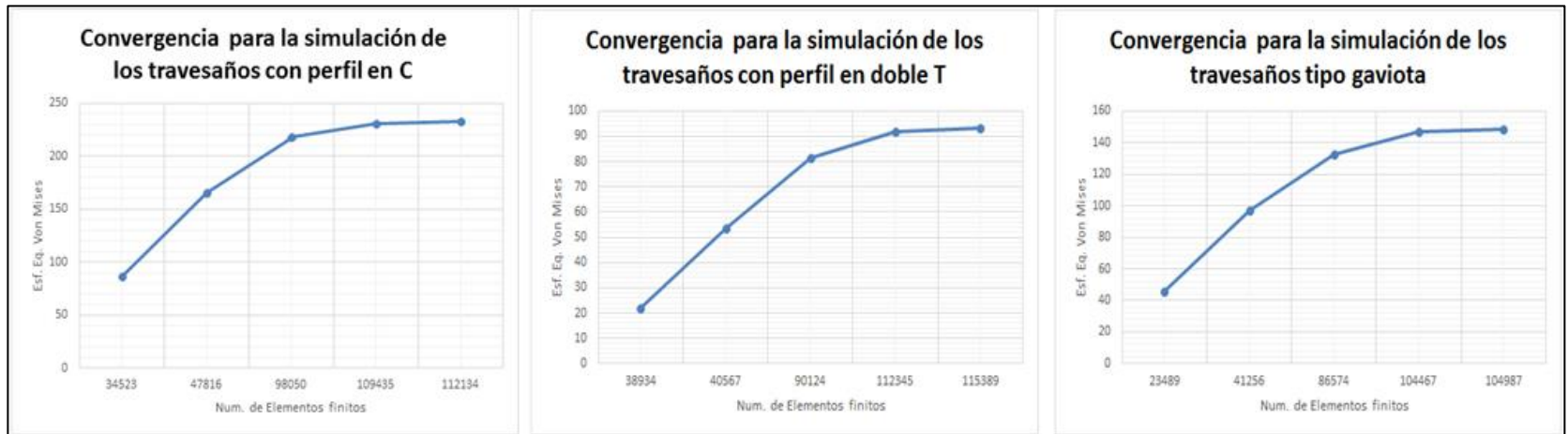


Figura 51. Determinación de los elementos de malla para los travesaños

Esf. Eq. Von Mises T. con perfil en C	Numero de elementos finitos	% de variacion del esfuerzo Eq. Von Mises	Esf. Eq. Von Mises T. con perfil en doble T	Número de elementos finitos	% de variacion del esfuerzo Eq. Von Mises	Esf. Eq. Von Mises T. tipo gaviota.	Número de elementos finitos	% de variacion del esfuerzo Eq. Von Mises
86,4	34523		21,87	38934		45,7	23489	
165,8	47816	47,88902292	53,68	40567	59,2585693	97,3	41256	53,03186023
217,7	98050	23,84014699	81,33	90124	33,99729497	132,45	86574	26,53831635
231,2	109435	5,839100346	91,89	112345	11,49200131	146,72	104467	9,726008724
233,1	112134	0,815100815	93,501	115389	1,722976225	148,81	104987	1,404475506

Con el fin de encontrar el tamaño de malla que proporcione el mayor número de elementos finitos, se realizó un gráfico de convergencia para cada uno de los tipos de travesaños, ejecutando varias simulaciones y modificando el tamaño de malla para cada una de ellas.

En las graficas de la figura 50, se observa que al aumentar el número de elementos finitos el esfuerzo equivalente máximo de Von Mises también se incrementa. Esto quiere decir, que la solución se ajusta cada vez más a un valor acorde con la realidad. El objetivo principal de este gráfico de convergencia es determinar el número de elementos finitos que proporcione los mejores resultados en la simulación, encontrando la menor variación porcentual de un valor a otro en cuanto a esfuerzo máximo según Von Mises se refiere. Es decir, los gráficos tienden a un valor constante, ocasionando que la variación porcentual de un valor a otro sea menor, llegando a un punto en el cual la variación del número de elementos finitos no origina una diferencia considerable en los resultados obtenidos comparados a los anteriores. Según las referencias bibliográficas [15], el valor del porcentaje de variación recomendado es menor al 5%.

Para cada tipo de travesaño se realizó su respectivo gráfico de convergencia, encontrando en cada uno de ellos los valores del porcentaje de variación del esfuerzo máximo equivalente de Von Mises menores al 5%. Esto quiere decir, que los resultados obtenidos se ajustan al valor real, véase las tablas en la figura 51.

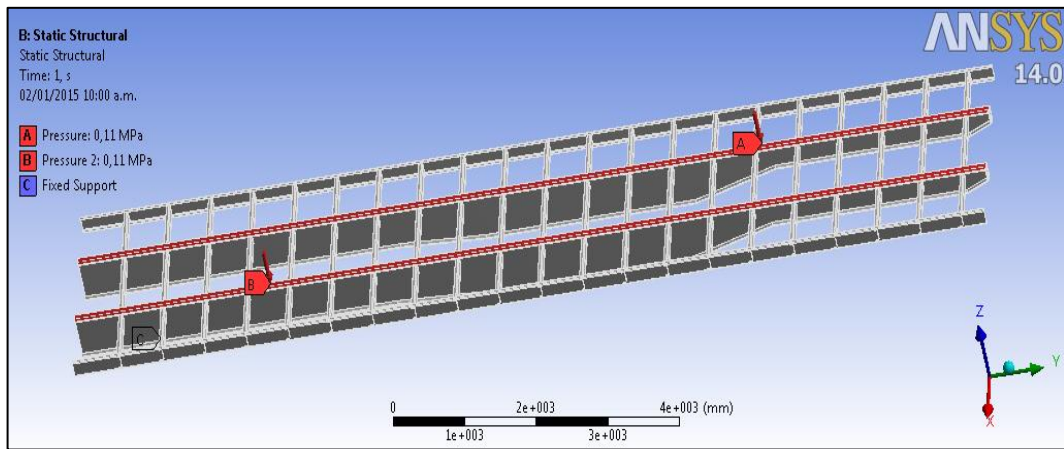
La cantidad de elementos finitos utilizados para efectuar cada una de simulaciones, son las especificadas en las tablas de la tabla 38.

**Tabla 38. Especificaciones de las mallas utilizadas para las simulaciones.**

Travesaño con perfil en C		Travesaño con perfil en doble T		Travesaño tipo gaviota	
Statistics		Statistics		Statistics	
Nodes	226544	Nodes	233025	Nodes	212072
Elements	112134	Elements	115389	Elements	104987
Element Size	10, mm	Element Size:	10, mm	Element Size	10, mm

### 6.3.3. Ensamblaje para el modelo en acero ASTM A36 y Domex 700.

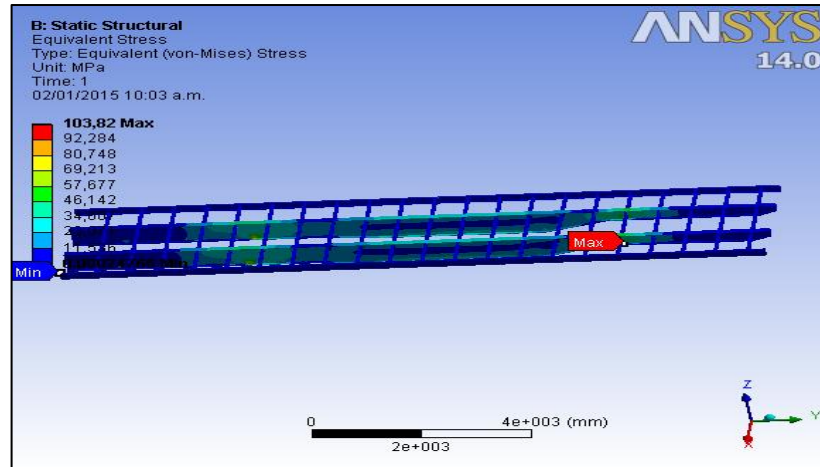
**Figura 52. Vista previa de la simulación para los ensamblajes.**



Se aplicó una carga en forma de presión sobre la cara superior de las vigas y en los extremos de los travesaños de 0,11 MPa, sobre un área de 3301907,544 mm<sup>2</sup> obteniendo una carga equivalente de 363209,82 N, como indica la etiqueta A y B en la figura 52, los apoyos se ubicaron en la cara inferior de la viga como indica la etiqueta C.

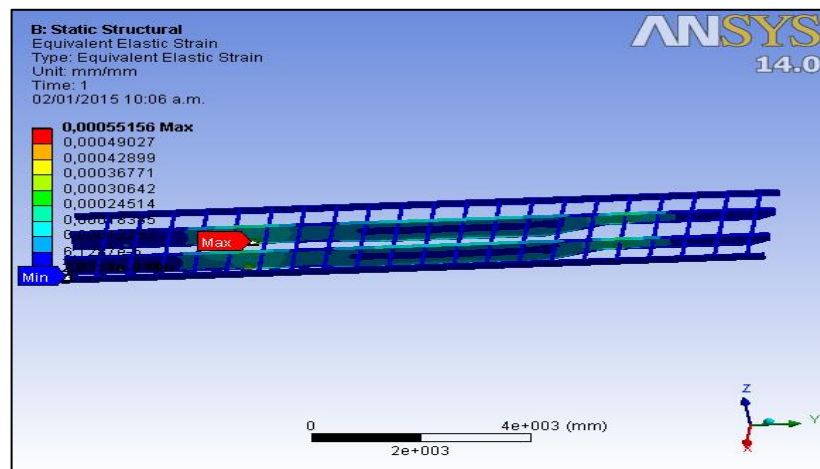
### 6.3.3.1. Resultados obtenidos en la simulación del ensamblaje ASTM A 36.

Figura 53. Esfuerzo equivalente Von Mises para el ensamblaje ASTM A36.



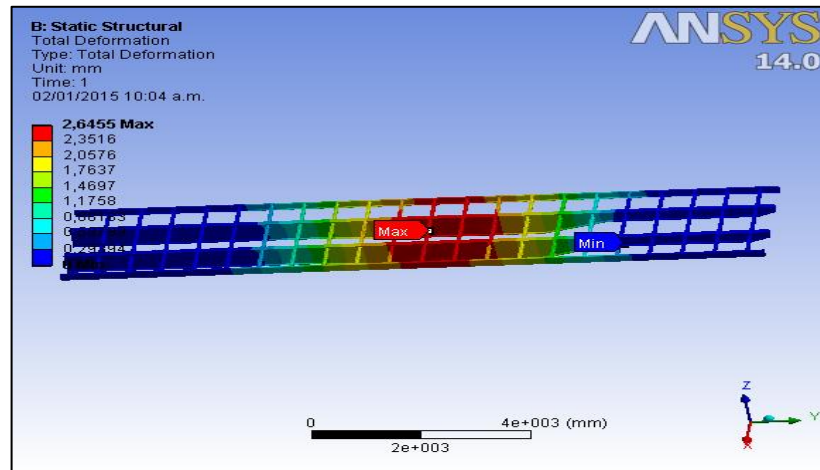
En la figura 53, se observa una imagen de la simulación realizada para el ensamblaje ASTM A36, en la cual se muestra el máximo (etiqueta roja) y mínimo (etiqueta azul) esfuerzo equivalente según Von Mises, cuyos valores son 103,82 MPa y 2,4766E-4 MPa respectivamente.

Figura 54. Deformación elástica equivalente para el ensamblaje ASTM A 36



En la figura 54, se presentan los resultados para la deformación elástica equivalente máxima (etiqueta roja) y mínima (etiqueta azul), cuyos valores son 5,5156E-4 y 2,9314E-9 respectivamente.

**Figura 55. Deformación total para el ensamble ASTM A 36**



En la figura 55, se observan los resultados de la simulación con respecto a la deformación total máxima (etiqueta roja) y mínima (etiqueta azul), cuyos valores son 2,6455 mm y 0 mm respectivamente.

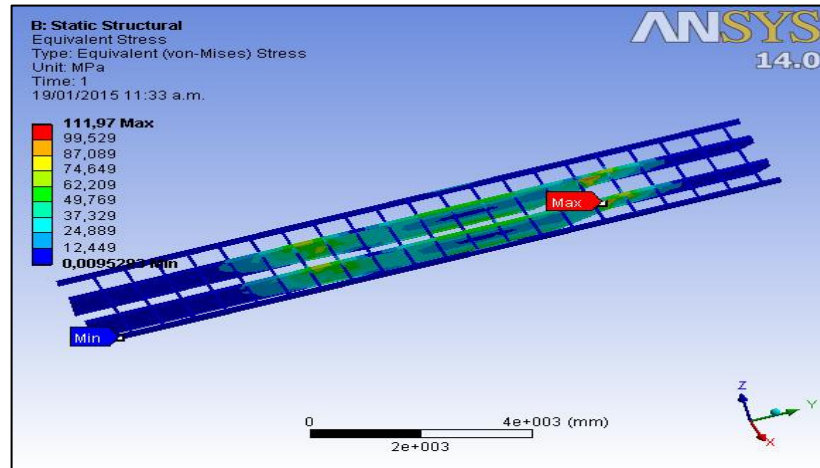
**Tabla 39. Resultado de la simulación para el ensamblaje ASTM A36**

Definition			
Type	Equivalent (von-Mises) Stress	Equivalent Elastic Strain	Total Deformation
Results			
Minimum	2,4766e-004 MPa	2,9314e-009 mm/mm	0, mm
Maximum	103,82 MPa	5,5156e-004 mm/mm	2,6455 mm

**6.3.3.2. Resultados obtenidos en la simulación del ensamblaje Domex 700:** Al igual que en el caso del ensamblaje en acero ASTM A36, se aplicó una carga en forma de presión sobre la cara superior de la viga de 0,11 MPa, sobre un área de 3301907,544 mm<sup>2</sup>, obteniéndose una carga equivalente de 363209,82 N, como

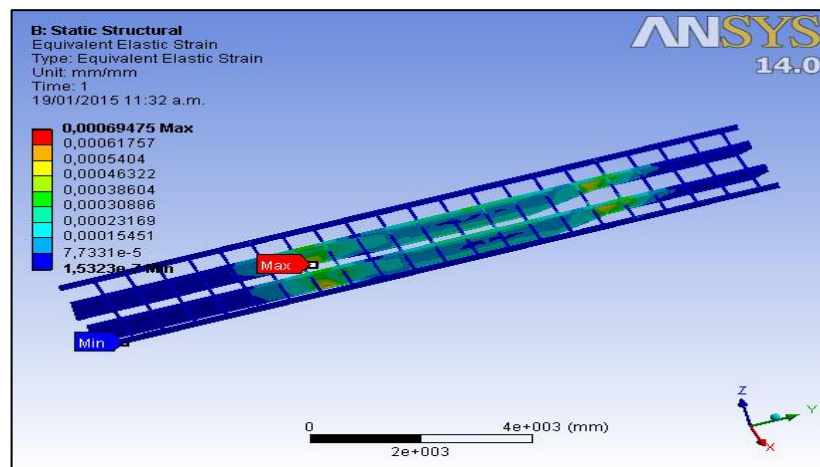
indica la etiqueta A y B en la figura 52, los apoyos se ubicaron en la cara inferior de la viga como indica la etiqueta C.

**Figura 56. Esfuerzo equivalente Von Mises para el ensamblaje Domex 700**



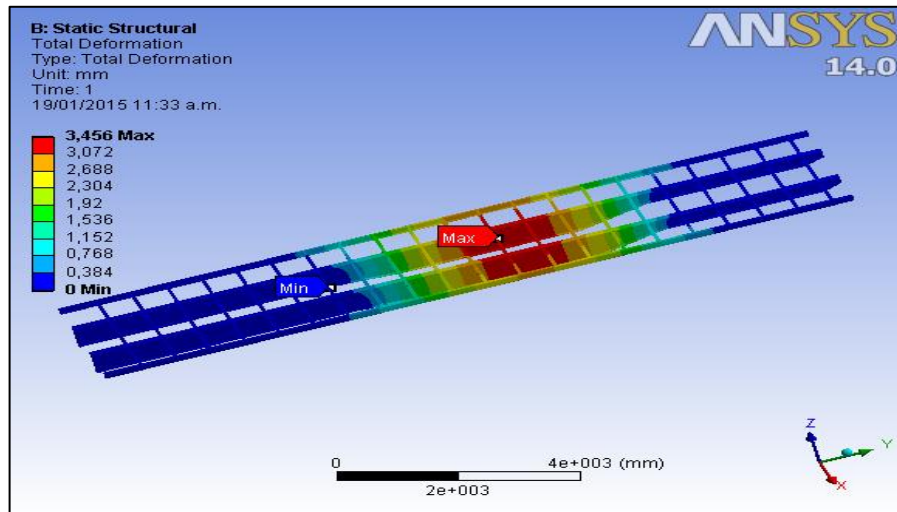
En la figura 56, se observa una imagen de la simulación realizada para el ensamblaje Domex 700, en la cual se muestra el máximo (etiqueta roja) y mínimo (etiqueta azul) esfuerzo equivalente según Von Mises cuyos valores son 111,97 MPa y  $9,5283E-3$  respectivamente.

**Figura 57. Deformación elástica equivalente para el ensamblaje Domex 700**



En la figura 57, se presentan los resultados para la deformación elástica equivalente máxima (etiqueta roja) y mínima (etiqueta azul), cuyos valores son  $6,9475E-4$  y  $1,5323E-7$  respectivamente.

**Figura 58. Deformación total para el ensamblaje en acero Domex 700.**



En la figura 58, se observan los resultados de la simulación con respecto a la deformación total máxima (etiqueta roja) y mínima (etiqueta azul) cuyos valores son 3,456 mm y 0 mm respectivamente.

**Tabla 40. Resultados de la simulación para el ensamblaje Domex 700**

Definition			
Type	Equivalent (von-Mises) Stress	Equivalent Elastic Strain	Total Deformation
Results			
Minimum	9,5283e-003 MPa	1,5323e-007 mm/mm	0, mm
Maximum	111,97 MPa	6,9475e-004 mm/mm	3,456 mm

### 6.3.3.3. Comparación de los resultados obtenidos para los ensamblajes.

Tabla 41. Resultados obtenidos en las simulaciones de los ensamblajes

	Ensamblaje	
	ASTM A36	Domex700
<b>Masa [Kg]</b>	2990,4	1907,5
<b>Deformación total Máxima [mm]</b>	2,6455	3,456
<b>Def. Elástica eq. Máxima [mm/mm]</b>	0,00055156	0,00069475
<b>Esf. Eq. De Von Mises Máx. [MPa]</b>	103,82	111,97
<b>Factor de seguridad</b>	2,40801387	6,25167456

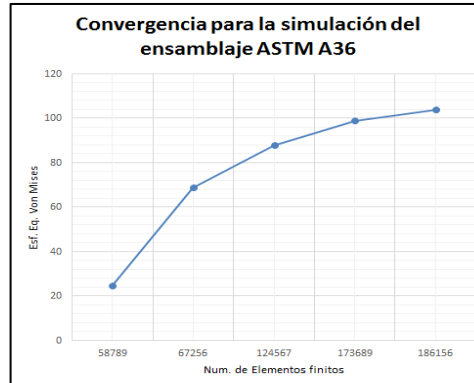
Como se evidencia en la tabla 41, en los resultados obtenidos para los ensamblajes, observamos que los valores generales son menores para la estructura en acero ASTM A36 excepto en el peso. Al igual que en el caso de las vigas principales, la reducción del área de la sección transversal afectó el momento de inercia, por lo cual se produjo una mayor presencia de esfuerzos y un incremento en las deformaciones para el conjunto en acero Domex700. Sin embargo, el factor de seguridad es mucho más alto que para el ensamble en acero ASTM A36, a pesar de que el esfuerzo equivalente según Von Mises fue mayor, esto se debe a la diferencia del límite de fluencia entre los dos materiales, que para el caso del acero Domex 700 es mayor. En general los resultados de los ensamblajes se encuentran dentro de los valores admisibles. Los valores de deformación elástica equivalente, se encuentran dentro de la zona elástica del material, por lo cual no se presentarán fallas por deformación plástica bajo estas condiciones de carga. El mayor desplazamiento se presenta en la zona media, al igual que en el análisis de las vigas individuales.

Respecto al peso de los conjuntos analizados se observó una reducción del 36,2% en el ensamble en Acero Domex 700, en comparación con el ASTM A36. Como se mencionó anteriormente, los resultados demuestran que se mantuvo la integridad estructural del equipo, y se observó un incremento en el factor de seguridad, es

decir la capacidad de resistencia mecánica del modelo propuesto es mayor, y con un menor peso.

#### 6.3.3.4. Validación de los resultados para la simulación de los ensamblajes

**Figura 59. Gráfico de convergencia para el ensamblaje ASTM A36**



**Tabla 42. Determinación del número de elementos de malla para la simulación del ensamblaje ASTM A36**

Esf. Eq. Von Mises ensamblaje ASTM A36	Número de elementos finitos	% de variación del esfuerzo Eq. Von Mises
24,89	58789	
68,9	67256	63,87518142
87,93	124567	21,6422154
98,89	173689	11,08302154
103,82	186156	4,748603352

**Tabla 43. Número de nodos y elementos finitos utilizados para la simulación del ensamblaje ASTM A36.**

Statistics	
Nodes	376247
Elements	186156
Element Size :	50, mm

**Figura 60. Gráfico de convergencia para el ensamblaje Domex 700**



**Tabla 44. Determinación del número de elementos de malla para la simulación del ensamblaje Domex 700**

Esf. Eq. Von Mises ensamblaje Domex 700	Número de elementos finitos	% de variación del esfuerzo Eq. Von Mises
23,56	5439	
68,43	6756	65,57065614
90,76	128679	24,60334949
106,45	174659	14,73931423
111,97	185389	4,929891935

**Tabla 45. Número de nodos y elementos finitos utilizados para la simulación del ensamblaje Domex 700.**

Statistics	
Nodes	370778
Elements	185389
Element Size	50, mm

Para el caso de los ensambles en acero ASTM A36 y Domex 700, se determinó que la menor variación del porcentaje del esfuerzo equivalente según Von Mises de una solución a otra fue para un tamaño de malla de 50 mm, el cual proporcionó un número de elementos finitos de 186156 y 185389 con un 4,75% y 4,92% de

variación respectivamente, estos valores se encuentran dentro de lo admisible según la teoría de validación de resultados [15].

## 7. CONCLUSIONES

- En base al objetivo general del proyecto, se propuso una alternativa para el mejoramiento de un prototipo de semirremolque tipo 3S3 suministrado por la empresa BAF y Asociados, cuyo propósito principal fue efectuar una reducción en peso utilizando el criterio para el cambio de espesores, establecido por la compañía SSAB Tunnplåt, manteniendo la integridad estructural del equipo y de esta forma lograr un incremento de la carga útil a transportar. A través de este estudio se determinó la viabilidad del mejoramiento, realizándose inicialmente un análisis individual para cada uno de los elementos estructurales en aceros ASTM A36 y los propuestos en los aceros Domex 700 y Hardox 450, posteriormente se efectuó una comparación entre los resultados obtenidos, y se realizó un análisis del conjunto estructural completamente ensamblado en el cual se evidenció una reducción del 36,2% en peso, y se obtuvo un factor de seguridad de 6,25 para el modelo propuesto. Por lo cual se puede afirmar que fue posible obtener una significativa reducción en el peso, sin afectar la integridad estructural del equipo, por el contrario, se obtuvo un mayor factor de seguridad con respecto al modelo ASTM A36.
- las dimensiones finales propuestas para el mejoramiento del semirremolque conservan las dimensiones generales de ancho, longitud y altura para las vigas principales respecto al modelo ASTM A36, solo varió el espesor; esto con la finalidad de no modificar las zonas que presentan restricciones en el diseño. Para el caso del travesaño propuesto, se presentó una modificación más drástica debido a que se demostró que el modelo de perfil en C es poco eficiente a la hora de soportar las cargas impuestas en comparación con el perfil en doble T, debido a la configuración de su sección transversal, por lo tanto el modelo de travesaño que permitió una reducción en peso del 42,67%,

y a que su vez demostró un desempeño intermedio en cuanto a resistencia mecánica, con un valor en el factor de seguridad de 4.7, fue el travesaño tipo gaviota.

- El software de simulación ANSYS 14.0, fue empleado como herramienta de análisis, y el software Autodesk Inventor professional 2013 como herramienta de diseño, con el fin de realizar los análisis pertinentes para la determinación de la viabilidad del mejoramiento, realizando la respectiva validación de los resultados obtenidos, se observó que los valores correspondientes a los elementos de malla y al tamaño de estos en cada una de las simulaciones proporcionan resultados cercanos a los esperados en el desempeño real de los componentes.

## 8. RECOMENDACIONES

Al pasar de un acero convencional como el ASTM A36 a uno de alta resistencia como el Domex 700, con el fin de desarrollar una estructura ligera. Se deben tener en cuenta algunas sencillas recomendaciones:

- Los modelos propuestos deben ser lo menos complejo posible, es decir mantener el número de piezas a un mínimo y utilizar técnicas modernas de fabricación para integrar los componentes, y reducir al mínimo el número de juntas soldadas.
- Para las vigas principales del chasis se recomienda utilizar una sola pieza, y así también para los patines y el alma a lo largo de toda la longitud del semirremolque. Esta alternativa reduce el número de las soldaduras, especialmente en la dirección transversal, lo cual es muy importante desde un punto de vista de la fatiga.
- Las placas de refuerzo para ambos patines y el alma se utilizan comúnmente con la intención de aumentar la capacidad de carga del chasis. Desde un punto de vista estático, tales diseños hacen más daño que bien. Debido que al introducir una placa de refuerzo se crea una concentración de las tensiones en la unión soldada, ya que habrá un gradiente de rigidez en esta zona. Por lo tanto, esta junta de soldadura limitará la resistencia a la fatiga del chasis y puede causar problemas de agrietamiento en un diseño mejorado en el que los niveles de las tensiones de trabajo son mayores.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. COLFECAR, “comportamiento Sectorial Transporte y Coyuntura 2010,”2010.
2. Ministerio de Transporte “Diagnostico del transporte 2010 República de Colombia. Ministerio de transporte oficina asesora de planeación Grupo de planeación sectorial 2010.” 2010.
3. Ministerio del Transporte, “Resolución 4100 de diciembre 29 del 2004. Por la cual se adoptan los límites de pesos y dimensiones en los vehículos de transporte terrestre automotor de carga por carretera, para su operación normal en la red vial a nivel nacional.” 2004.
4. Víctor Ruiz R. y Efraín Acero, tesis pregrado, Diseño óptimo de un semirremolque para vehículo de carga. octubre del 2012.
5. Gonzalo Esteban Robledo Torres, tesis pregrado, Diseño de semirremolque agrícola, para el transporte de cosechadoras, Valdivia de Chile, 2006.
6. Marcos Gómez Puentes, Breve historia administrativa del transporte por carretera, Airlex Ediciones 2010.
7. Alberto Garnelo Fernández, monografía, los aceros de alta resistencia, cesvimap 2010.
8. Carlos Bohóquez Ávila, Revista científica, optimización topológica de un semirremolque, Agosto del 2014 .

9. SSAB Technology AB, Revista científica, Trailer design guideline, Suecia, SSAB Tunnpåt Febrero del 2012.
10. SSAB Technology AB, Ficha técnica, acero Hardox 450, Suecia, SSAB Tunnpåt octubre 28 del 2011.
11. SSAB Technology AB, Ficha técnica, acero Domex 700, Suecia, SSAB Tunnpåt octubre 28 del 2011.
12. SSAB Technology AB, Revista científica, Welding of Domex and Docol advanced high strength steels, Suecia, SSAB Tunnpåt, 2011.
13. Standard Specification for Carbon Structural Steel, ASTM Committee A-Iron Steel, Stainless Steel, and Related Alloys, and is the direct responsibility of Subcommittee A01.02 on Structural Steel for Bridges, Buildings, Rolling Stock, and Ships. Current edition approved Nov. 10, 1997. Published April 1998. Originally published as A 36 - 60 T. Last previous edition A 36/ A 36M.
14. Vargas, Gustavo, Tesis de Maestría, Inspección y control de calidad, en la aplicación de soldadura de elementos estructurales, Colombia, 2009.
15. Högberg, D. (2001). Use of finite element method in trailer deck design. *Journal of Materials Processing Technology*, 117(1-2), 238-243.

## BIBLIOGRAFÍA

- BOHÓQUEZ ÁVILA Carlos, Revista científica, optimización topológica de un semirremolque, Agosto del 2014.
- COLFECAR, “comportamiento Sectorial Transporte y Coyuntura 2010,”2010.
- GARNELO FERNÁNDEZ Alberto, monografía, los aceros de alta resistencia, cesvimap 2010.
- GÓMEZ PUENTES Marcos, Breve historia administrativa del transporte por carretera, Airlex Ediciones 2010.
- GONZALO ESTEBAN Robledo Torres, tesis pregrado, Diseño de semirremolque agrícola, para el transporte de cosechadoras, Valdivia de Chile, 2006.
- HÖGBERG, D. Use of finite element method in trailer deck design. *Journal of Materials Processing Technology*, 117(1-2), 238-243. (2001).
- MINISTERIO DE TRANSPORTE “Diagnostico del transporte 2010 República de Colombia. Ministerio de transporte oficina asesora de planeación Grupo de planeación sectorial 2010.” 2010.
- MINISTERIO DEL TRANSPORTE, “Resolución 4100 de diciembre 29 del 2004. Por la cual se adoptan los límites de pesos y dimensiones en los vehículos de transporte terrestre automotor de carga por carretera, para su operación normal en la red vial a nivel nacional.” 2004.

- RUIZ R. Víctor y ACERO Efraín, tesis pregrado, Diseño óptimo de un semirremolque para vehículo de carga. octubre del 2012.
- SSAB Technology AB, Ficha técnica, acero Domex 700, Suecia, SSAB Tunnpåt octubre 28 del 2011.
- SSAB Technology AB, Ficha técnica, acero Hardox 450, Suecia, SSAB Tunnpåt octubre 28 del 2011.
- SSAB Technology AB, Revista científica, Trailer design guideline, Suecia, SSAB Tunnpåt Febrero del 2012.
- SSAB Technology AB, Revista científica, Welding of Domex and Docol advanced high strength steels, Suecia, SSAB Tunnpåt, 2011.
- Standard Specification for Carbon Structural Steel, ASTM Connittee A-Ion Steel, Stainless Steel, and Related Alloys, and is the direct responsibility of Subcommittee A01.02 on Structural Steel for Bridges, Buildings, Rolling Stock, and Ships. Current edition approved Nov. 10, 1997. Published April 1998. Originally published as A 36 - 60 T. Last previous edition A 36/ A 36M.
- VARGAS, Gustavo, Tesis de Maestría, Inspección y control de calidad, en la aplicación de soldadura de elementos estructurales, Colombia, 2009.