

**PROPUESTA DE DISEÑO ESTRUCTURAL, MODELADO Y SIMULACIÓN CFD  
DE UN REMOLQUE TIPO CARAVANA OFF-ROAD PARA LA EMPRESA  
ASSISTMEDIA LTDA**

**JUAN ELÍAS REYES LARA  
ANDRÉS FERNANDO SÁENZ SUAREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2017**

**PROPUESTA DE DISEÑO ESTRUCTURAL, MODELADO Y SIMULACIÓN CFD  
DE UN REMOLQUE TIPO CARAVANA OFF-ROAD PARA LA EMPRESA  
ASSISTMEDIA LTDA**

**JUAN ELÍAS REYES LARA  
ANDRÉS FERNANDO SÁENZ SUAREZ**

**Trabajo de grado para optar por el título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director:  
CARLOS BORRAS PINILLA  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER por permitirnos ser parte de su familia universitaria y ayudar a forjar nuestro conocimiento y carácter.

Al Ingeniero Carlos Borrás Pinilla por su guía y apoyo en la realización de éste proyecto.

Al empresario Jhon Jairo Pérez por permitirnos entrar a la empresa Assistmedia Ltda y otorgarnos esta experiencia.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	18
1. OBJETIVOS DE PROYECTO DE GRADO .....	19
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
2. ESTADO DEL ARTE .....	21
2.1 REMOLQUE.....	21
2.2 CARAVANA.....	21
2.2.1 Caravana americana.....	21
2.2.2 Caravana unión europea.....	22
2.2.3 Caravana australiana.....	23
3. REGLAMENTO DEL MINISTERIO DE TRANSPORTE .....	24
3.1 RESOLUCION 004100 DE 2004 .....	24
3.2 DESIGNACIÓN .....	24
3.3 DIMENSIONES.....	26
4. MARCO TEORICO.....	27
4.1 CLASIFICACIÓN DE CARGA SEGÚN EL TIEMPO DE APLICACIÓN.....	27
4.1.1 Permanentes.....	27
4.1.2 Accidentales.....	27
4.1.3 De Impacto.....	27
4.2 CLASIFICACIÓN DE CARGA SEGÚN SU ESTADO INERCIAL .....	27
4.2.1 Estáticas.....	27
4.2.2 Dinámicas.....	27
4.3 CLASIFICACIÓN DE CARGA SEGÚN LA DIRECCIÓN DEL MOVIMIENTO .....	28
4.3.1 Móviles .....	28
4.3.2 Por efecto de aceleración.....	28
4.4 CLASIFICACIÓN DE CARGA SEGÚN SU UBICACIÓN EN EL ESPACIO.....	28
4.4.1 Concentradas o Puntuales.....	28
4.4.2 Distribuidas .....	28
4.5 OTRAS CARGAS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO.....	29

4.5.1 De Viento.....	29
4.5.2 Sísmicas.....	29
4.6 RESISTENCIA A LA RODADURA (RC) .....	29
4.7 FUERZA DE TIRO.....	29
4.8 TEORÍA PARA EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA .....	30
4.8.1 Tensiones de von mises.....	30
4.8.2 Teorías de fallo.....	30
4.9 DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES (CFD).....	31
4.9.1 parametros de diseño.....	31
4.9.2 ecuaciones de gobierno del modelo matematico.....	32
4.9.3 Túnel de viento.....	33
4.9.4 Resistencia aerodinámica.....	33
4.9.5 Mallado.....	34
5. DISEÑO CONCEPTUAL .....	35
5.1 REQUERIMIENTOS DEL CONSUMIDOR.....	35
5.2 DESCRIPCIÓN DE LA CARAVANA .....	35
5.3 DINAMICA DE LA CARAVANA .....	36
5.3.1 Estabilidad dinámica de la caravana.....	38
5.4 ALTERNATIVA DE DISEÑO PRINCIPAL .....	40
6. DETERMINACION DE LAS CARGAS DE DISEÑO PARA EL CHASIS Y CABINA ...	43
6.1 CARGAS PERMANENTES.....	43
6.2 CALCULO DE LA FUERZA DE TIRO.....	45
6.3 EFECTO DE LA RESISTENCIA DE RODAMIENTO.....	45
6.4 FUERZA DE TIRO MÁXIMA.....	46
6.5 CARGA TRANSITORIA.....	47
6.6 CARGAS POR EL VIENTO.....	47
4.9.3 Carga frontal.....	47
4.9.3 Carga lateral.....	48
7. SELECCIÓN DEL MATERIAL .....	49
7.1 IDENTIFICACIÓN.....	49
7.2 SELECCIÓN DE LOS PERFILES.....	50
7.3 CALCULO PARA EL PERFIL SELECCIONADO.....	50

<b>8. SIMULACION ESTRUCTURAL .....</b>	<b>52</b>
<b>8.1 SIMULACION ESTATICO DEL CHASIS.....</b>	<b>52</b>
8.1.1 Modelo geométrico del chasis.....	52
8.1.2 Material.....	52
8.1.3 Condiciones de frontera para el chasis.....	53
8.1.4 Cargas en el chasis.....	53
8.1.5 Análisis de sensibilidad de la malla.....	54
8.1.6 Resultados .....	55
8.1.7 Rediseño.....	56
<b>8.2 SIMULACIÓN ESTÁTICA DE LA CABINA .....</b>	<b>59</b>
8.2.1 Modelo geométrico de la cabina.....	59
8.2.2 Cargas sobre la cabina.....	59
8.2.3 Resultados .....	60
8.2.4 Resultado análisis estático .....	61
<b>8.3 SIMULACIÓN ESTÁTICA CASO COMBINADO CHASIS-CABINA .....</b>	<b>61</b>
8.3.1 caso 1 condicion inicial.....	62
8.3.2 caso 2 condicion intermedia.....	64
8.3.3 caso 3 condicion especial.....	66
8.3.4 caso 4 condicion especial 2.....	68
8.3.5 resultado análisis estático caso combinado .....	69
<b>8.4 SIMULACIÓN ANÁLISIS MODAL DEL CHASIS .....</b>	<b>69</b>
8.4.1 Análisis modal del chasis .....	69
8.4.2 RESULTADO ANÁLISIS MODAL .....	73
<b>9. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MECANISMO LEVADIZO.....</b>	<b>75</b>
9.1 ANÁLISIS DEL DISEÑO DEL MECANISMO LEVADIZO.....	75
9.2 PARÁMETROS DE DISEÑO.....	75
9.3 DISEÑO DE MECANISMO DE TIJERAS .....	75
9.4 ANÁLISIS ESTÁTICO POSICIÓN SUPERIOR .....	77
9.4.1 Solución de ecuaciones posición superior.....	79
9.5 ANÁLISIS ESTÁTICO POSICIÓN INFERIOR .....	79
9.5.1 Solución de ecuaciones en posición inferior .....	79
9.6 CÁLCULO Y DISEÑO DE LAS BARRAS .....	79

<b>10. SIMULACION CFD REMOLQUE .....</b>	<b>83</b>
<b>10.1 GENERACIÓN DE MODELADO 3D.....</b>	<b>84</b>
10.1.1 Enclosure .....	84
10.1.2 Simetría .....	84
10.1.3 Boolean .....	85
<b>10.2 MALLADO.....</b>	<b>86</b>
10.2.1 Defaults .....	87
10.2.2 Sizing.....	87
10.2.3 Inflation.....	88
<b>10.3 SETUP.....</b>	<b>93</b>
<b>10.4 SOLUTION.....</b>	<b>93</b>
10.4.1 Models .....	94
10.4.2 Materials .....	94
10.4.3 Boundary conditions .....	94
10.4.5 Reference values .....	95
10.4.6 Solution methods.....	95
10.4.7 Solution controls .....	95
10.4.8 Monitors.....	95
10.4.9 Solution initialization .....	96
10.4.10 Run calculation .....	96
<b>10.5 RESULTADOS .....</b>	<b>97</b>
10.5.1 Geometría .....	97
10.5.2 Coeficiente de arrastre .....	97
10.5.3 Perfil de velocidades .....	98
10.5.4 Perfil de presiones.....	98
10.5.5 Perfil de turbulencia.....	98
<b>10.6 REMOLQUE 1 .....</b>	<b>98</b>
10.6.1 Geometría básica de un remolque.....	98
10.6.2 Coeficiente de arrastre .....	99
10.6.3 Perfil de velocidad .....	99
10.6.4 Perfil de turbulencia.....	100
10.6.5 Perfil de presión.....	101

<b>10.7 REMOLQUE 2</b> .....	<b>102</b>
<b>10.7.1 Geometría con estudio aerodinámico en la parte</b> .....	<b>102</b>
<b>10.7.2 Coeficiente de arrastre</b> .....	<b>102</b>
<b>10.7.3 Perfil de velocidad</b> .....	<b>103</b>
<b>10.7.4 Perfil de turbulencia</b> .....	<b>103</b>
<b>10.7.5 Perfil de presión</b> .....	<b>104</b>
<b>10.8 REMOLQUE 3</b> .....	<b>104</b>
<b>10.8.1 Geometría con estudio aerodinámico en la parte frontal y posterior</b> .....	<b>104</b>
<b>10.8.1 Coeficiente de arrastre</b> .....	<b>105</b>
<b>10.8.2 Perfil de velocidad</b> .....	<b>106</b>
<b>10.8.4 Perfil de turbulencia</b> .....	<b>106</b>
<b>10.8.5 Perfil de presiones</b> .....	<b>107</b>
<b>10.9 REMOLQUE 4</b> .....	<b>107</b>
<b>10.9.1 Geometría con estudio aerodinámico en la parte frontal con posible mejora</b> .....	<b>107</b>
<b>10.9.2 Coeficiente de arrastre</b> .....	<b>108</b>
<b>10.9.3 Perfil de velocidad</b> .....	<b>108</b>
<b>10.9.4 Perfil de turbulencia</b> .....	<b>109</b>
<b>10.9.5 Perfil de presiones</b> .....	<b>109</b>
<b>11. SIMULACION CFD REMOLQUE ACOMPLADO</b> .....	<b>111</b>
<b>11.1 VEHICULO AUTOMOTOR</b> .....	<b>111</b>
<b>11.2 GOMETRIA DEL REMOLQUE ACOPLADO</b> .....	<b>111</b>
<b>11.3 COEFICIENTE DE ARRASTRE</b> .....	<b>112</b>
<b>11.4 PERFIL DE VELOCIDADES</b> .....	<b>112</b>
<b>11.5 PERFIL DE TURBULENCIA</b> .....	<b>113</b>
<b>11.6 PERFIL DE PRESION</b> .....	<b>113</b>
<b>12. ANALISIS DE RESULTADOS CFD</b> .....	<b>114</b>
<b>13. CONCLUSIONES</b> .....	<b>116</b>
<b>14.RECOMENDACIONES</b> .....	<b>118</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>120</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Dimensiones .....	26
<b>Tabla 2.</b> Pesos max por eje .....	26
<b>Tabla 3.</b> Propiedades del aire a 25°C y 1atm.....	32
<b>Tabla 4.</b> Cargas verticales.....	43
<b>Tabla 6.</b> Propiedades mecánicas ASTM A-500 grado C.....	49
<b>Tabla 7.</b> Selección del perfiles.....	50
<b>Tabla 8.</b> Material para la estructura y chasis .....	52
<b>Tabla 9.</b> Resultados análisis estático chasis.....	56
<b>Tabla 10.</b> Resultados de rediseño chasis.....	58
<b>Tabla 11.</b> Resultados análisis estático cabina .....	61
<b>Tabla 16.</b> Análisis modal.....	73
<b>Tabla 13.</b> Analisis coeficiente de arrastre del remolque y remolque acomplado .....	114

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Caravana .....	21
<b>Figura 2.</b> Caravana América.....	22
<b>Figura 3.</b> Caravana unión europea.....	22
<b>Figura 4.</b> Caravana australiana.....	23
<b>Figura 5.</b> Caravana australiana 2 .....	23
<b>Figura 6.</b> Designación.....	25
<b>Figura 7.</b> Cargas distribuidas.....	28
<b>Figura 8.</b> Modelos de turbulencia.....	32
<b>Figura 9.</b> Modelos 2d .....	38
<b>Figura 10.</b> Diagrama de cuerpo libre.....	38
<b>Figura 11.</b> Alternativa de diseño principal .....	40
<b>Figura 12.</b> Layout de la caravana .....	41
<b>Figura 12.</b> Dimensiones de la caravana .....	42
<b>Figura 14.</b> Diagrama de cargas .....	44
<b>Figura 15.</b> Diagrama cortante y momento flector .....	44
<b>Figura 16.</b> Área frontal.....	47
<b>Figura 17.</b> Área lateral.....	48
<b>Figura 18.</b> Modelo geométrico del chasis.....	52
<b>Figura 19.</b> Cargas en el chasis .....	53
<b>Figura 20.</b> Análisis de Sensibilidad de la malla .....	54
<b>Figura 21.</b> Tensión axial y de flexión en el límite superior.....	55
<b>Figura 22.</b> Desplazamiento crítico en y.....	55
<b>Figura 23.</b> Condición crítica .....	56
<b>Figura 24.</b> Detalle de rediseño .....	57
<b>Figura 25.</b> Factor de seguridad de rediseño .....	57
<b>Figura 26.</b> Tensión axial y de flexión en el límite superior rediseño .....	58
<b>Figura 27.</b> Modelo geométrico de la cabina .....	59
<b>Figura 28.</b> Cargas sobre la cabina.....	59
<b>Figura 29.</b> Tensión axial y de flexión sobre la cabina.....	60
<b>Figura 30.</b> Deformación en Z.....	60
<b>Figura 31.</b> Deformaciones en X .....	60
<b>Figura 32.</b> Deformaciones en Y .....	61
<b>Figura 33.</b> Modelo geométrico chasis-cabina .....	61
<b>Figura 34.</b> Cargas caso combinado .....	62
<b>Figura 35.</b> Esfuerzo axial y de flexión en el límite superior .....	63
<b>Figura 36.</b> Desplazamiento total .....	63

<b>Figura 37.</b> Desplazamiento Ux Uy .....	63
<b>Figura 38.</b> Distribución de las cargas caso 2 .....	64
<b>Figura 39.</b> Esfuerzo axial y de flexión en el límite superior caso 2 .....	65
<b>Figura 40.</b> Desplazamiento resultante caso 2 .....	65
<b>Figura 41.</b> Desplazamiento Ux,Uz caso 2 .....	65
<b>Figura 42.</b> Distribución de las cargas caso 3.....	66
<b>Figura 43.</b> Esfuerxo axial y de flexion en el milite superior caso 3.....	66
<b>Figura 44.</b> Desplazamiento resultante caso 3 .....	67
<b>Figura 45.</b> Desplazamiento Ux Uz caso 3 .....	67
<b>Figura 46.</b> Esfuerzo axial y de flexión en el límite superior caso 4 .....	68
<b>Figura 47.</b> Desplazamiento resultante caso 4 .....	68
<b>Figura 48.</b> Modal 1 momento eje Z .....	70
<b>Figura 49.</b> Modal 2 momento eje X.....	70
<b>Figura 50.</b> Modal 3 momento eje Y .....	70
<b>Figura 51.</b> Modal 4 momento eje X .....	71
<b>Figura 52.</b> Modal 5 flexión plano XZ un punto nodal .....	71
<b>Figura 53.</b> Modal 6 flexión plano XY un punto nodal.....	71
<b>Figura 54.</b> Modal 7 torsión eje Z critico parte trasera.....	72
<b>Figura 55.</b> Modal 8 momento eje X .....	72
<b>Figura 56.</b> Modal 9 torsión en Z.....	72
<b>Figura 57.</b> Modal 10 momento eje X .....	73
<b>Figura 58.</b> Scissor lift .....	76
<b>Figura 59.</b> Actuador eléctrico .....	76
<b>Figura 60.</b> Modelado del mecanismo de techo levadizo .....	82
<b>Figura 61.</b> Etapas del proceso de una simulación CFD.....	83
<b>Figura 62.</b> Simetría y Enclosure.....	85
<b>Figura 63.</b> Boolean.....	85
<b>Figura 64.</b> Caja para detalle de malla .....	86
<b>Figura 65.</b> Mallado básico.....	87
<b>Figura 66.</b> Mallado configurado.....	88
<b>Figura 67.</b> Mallado por defecto vs Mallado configurado .....	89
<b>Figura 68.</b> Volumen de influencia .....	89
<b>Figura 69.</b> Mallado del volumen de influencia .....	90
<b>Figura 70.</b> Volumen del remolque.....	90
<b>Figura 71.</b> Metodo grafico para determinar la calidad de la malla.....	91
<b>Figura 72.</b> Mallado del volumen del remolque.....	91
<b>Figura 73.</b> Detalle de las diferentes mallas .....	92
<b>Figura 74.</b> Asignación de nombres a las caras del túnel .....	92
<b>Figura 75.</b> Setup .....	93
<b>Figura 76.</b> Configuración de la solución .....	94

<b>Figura 77.</b> Geometría remolque 1.....	98
<b>Figura 78.</b> Coeficiente de arrastre remolque 1 .....	99
<b>Figura 79.</b> Perfil de velocidad remolque 1 .....	99
<b>Figura 81.</b> Velocidad techo remolque 1 .....	100
<b>Figura 83.</b> Turbulencia remolque 1.....	100
<b>Figura 84.</b> Presión remolque 1 .....	101
<b>Figura 85.</b> Geometría remolque 2.....	102
<b>Figura 86.</b> Coeficiente de arrastre remolque 2 .....	102
<b>Figura 87.</b> Perfil de velocidad remolque 2.....	103
<b>Figura 90.</b> Turbulencia remolque 2.....	103
<b>Figura 91.</b> Presión remolque 2.....	104
<b>Figura 92.</b> Geometría remolque 3.....	105
<b>Figura 93.</b> Coeficiente de arrastre remolque 3 .....	105
<b>Figura 94.</b> Perfil de velocidad remolque 3.....	106
<b>Figura 96.</b> Turbulencia remolque 3.....	106
<b>Figura 97.</b> Perfil de presiones remolque 3 .....	107
<b>Figura 98.</b> Geometría remolque 4.....	107
<b>Figura 99.</b> Coeficiente de arrastre remolque 4 .....	108
<b>Figura 100.</b> Perfil de velocidad remolque 4.....	108
<b>Figura 101.</b> Turbulencia remolque 4 .....	109
<b>Figura 102.</b> Presión remolque 4.....	109
<b>Figura 103.</b> Geometria del remolque acoplado .....	111
<b>Figura 104.</b> Coeficiente de arrastre del remolque acomplado .....	112
<b>Figura 105.</b> Perfil de velocidad remolque acomplado .....	112
<b>Figura 106.</b> Turbulencia de remolque acomplado.....	113
<b>Figura 107.</b> Presion del remolque acoplado .....	113

## LISTA DE GRAFICAS

<b>Grafica 1.</b> Fuerza de arrastre vs velocidad .....	114
<b>Gráfica 2.</b> Potencia vs velocidad.....	115

## RESUMEN

**TITULO:** PROPUESTA DE DISEÑO ESTRUCTURAL, MODELADO Y SIMULACIÓN CFD DE UN REMOLQUE TIPO CARAVANA OFF-ROAD PARA LA EMPRESA ASSISTMEDIA LTDA.\*

**AUTORES:** JUAN ELIAS REYES LARA

ANDRÉS FERNANDO SÁENZ SUAREZ \*\*

**PALABRAS CLAVE:** Simulación, Aerodinámica, Modelado, Coeficiente, Tráiler, Acoplado, Cabina, Remolque, CFD, Chasis.

Pérdidas de fuerza de arrastre contra el viento, para optimizar el consumo de combustible.

En este proyecto se desarrolla en los programas CAD-CAE que brindan la posibilidad de realizar simulaciones con condiciones que se acerquen a la realidad, para obtener resultados tangibles que de igual manera se acerquen a la realidad, pero sin la necesidad de invertir dinero en una prueba física. Uno de los programas utilizados en este proyecto fue Ansys Fluent 2015, siendo un programa con una gama amplia en las simulaciones.

Para realizar los modelados y las simulaciones estructurales de la cabina y el chasis del remolque usamos SolidWorks 2016, en él se evidencio la capacidad de carga estática y dinámica, se obtuvo el factor de seguridad, se determinaron los diferentes modos de frecuencia previniendo que entre en frecuencia natural y también para el diseño del mecanismo levadizo del techo del remolque.

Por último, se comprobó que todo el sistema estructural estaba dispuesto a soportar las cargas por las cuales fue diseñado. Se eligió el mejor perfil aerodinámico evidenciando que presentaba la menor resistencia al avance, con datos obtenidos como coeficiente de arrastre y fuerza de arrastre.

**DESCRIPCIÓN:** El diseño, modelado y simulación de un remolque es para caracterizar factores estáticos, dinámicos. Estudiando la estructura del diseño soporte las diferentes cargas. Así como también determinar el mejor perfil aerodinámico, disminuyendo las

---

\* Tesis de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Borrás Pinilla

## ABSTRACT

**TITLE:** PROPOSAL OF STRUCTURAL DESIGN, MODELING AND CFD SIMULATION OF AN OFF-ROAD CARAVAN TYPE TOWER FOR THE ASSISTED COMPANY LTDA.\*

**AUTHORS:** JUAN ELÍAS REYES LARA

ANDRÉS FERNANDO SÁENZ SUAREZ \*\*

**KEY WORDS:** Simulation, Aerodynamics, Modeling, Coefficient, Trailer, Trailer, Cabin, Trailer, CFD, Chassis.

**DESCRIPTION:** The design, modeling and simulation of a trailer is to characterize static, dynamic factors. Studying the structure of the design support the different loads. As well as determining the best aerodynamic profile, reducing drag losses against the wind, to optimize fuel consumption.

This project is developed in CAD-CAE programs that offer the possibility of simulations with conditions that come close to reality, to obtain tangible results that similarly approach reality, but without the need to invest money in a physical test. One of the programs used in this project was Ansys Fluent 2015, being a program with a wide range in the simulations.

To perform modeling and structural simulations of the cab and trailer chassis we used SolidWorks 2015, it showed the static and dynamic load capacity, the safety factor was obtained, the different frequency modes were determined preventing it from entering Natural frequency and also for the design of the drawbar mechanism of the trailer roof.

Finally it was verified that the entire structural system was willing to support the loads for which it was designed. The best aerodynamic profile was chosen, evidencing that it presented the least drag resistance, with data obtained as coefficient of drag and drag.

---

\* Degree work

\*\* Faculty Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Carlos Borrás

## INTRODUCCIÓN

Se desarrolla una propuesta de diseño de un prototipo de vehículo remolcado no convencional en Colombia, el cual se ajusta a las peticiones de la empresa y recomendaciones generadas durante la experiencia del diseño. Se realiza teniendo en cuenta la forma, el tamaño y las cargas que afecta la mecánica estructural y la aerodinámica del remolque.

La propuesta se enfoca desde el punto de vista de la ingeniería mecánica la cual se centra en proporcionar una estructura segura, estable tomando las decisiones con los criterios propios de la ingeniería profundizando en un diseño integral con un soporte adicional de normas y procedimientos que justifique su correcto desarrollo y aplicación.

El diseño estructural y análisis del comportamiento de un chasis de caravana consiste en estudiar los tipos de carga que participan y localizar los posibles puntos críticos de inicio de rotura o fractura, como también los modos y las frecuencias propias que son características intrínsecas de la estructura (distribución de masa, rigidez y amortiguamiento), así como de las condiciones de apoyo.

Como datos preliminares se describe en el modelo propuesto, sus características geométricas, los datos necesarios para la simulación y discretización del mismo, se analiza por medio de un cálculo estático lineal las zonas de mayor tensión-deformación y los desplazamientos correspondientes. En base a los resultados del cálculo anterior se procede a simular las vibraciones características de la estructura, calculando frecuencias naturales, modos propios y perfil aerodinámico, determinando su respuesta e incluyendo la repartición de esfuerzos y desplazamientos bajo condiciones diferentes de carga.

# 1. OBJETIVOS DE PROYECTO DE GRADO

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander dando solución a las diferentes necesidades de la sociedad, desarrollando proyectos que integren áreas de conocimiento de Ingeniería Mecánica y fortaleciendo la relación universidad – industria, mediante el diseño de un remolque tipo caravana off-road para la empresa ASSISTMEDIA LTDA.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y modelar estructuralmente un remolque para las siguientes especificaciones:
  - ✓ Cumplir con los parámetros exigidos por la norma NTC 4788 y la resolución del ministerio de transporte 4100
  - ✓ Carga aproximada en la plataforma de 1200kg
  - ✓ Volumen aproximado de 12m<sup>3</sup>
  - ✓ Carga de 400kg en el techo del carrozado
  
- Diseñar y modelar el mecanismo de un techo levadizo para aumentar el volumen de alojamiento.
  
- Realizar un análisis de esfuerzos mecánicos, caracterización estática y dinámica a los diferentes elementos que constituyen la estructura junto a los planos utilizando herramientas (CAD-CAE) tales como:

- ✓ Solidwork
- ✓ Ansys
  
- Desarrollar y analizar una simulación computacional de fluidos dinámicos (CFD) para determinar el coeficiente de arrastre con herramientas como:
  - ✓ Ansys
  - ✓ Comsol
  
- Crear un manual de seguridad y mantenimiento para el prototipo.

## 2. ESTADO DEL ARTE

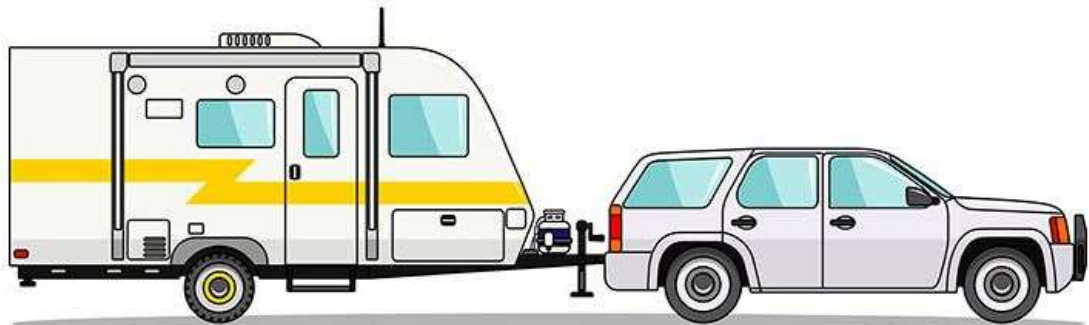
### 2.1 REMOLQUE

Conocido como acoplado o tráiler es un vehículo de carga no motorizado que consta como mínimo de chasis, ruedas, superficie de carga y, dependiendo de su peso y dimensiones, freno propio. No se puede mover por sus propios medios, sino que es arrastrado y dirigido por otro vehículo:

### 2.2 CARAVANA.

Remolque concebido y acondicionado que incluye en él un mobiliario básico en su interior para ser utilizado como vivienda móvil, permitiendo el uso de su cabina cuando el vehículo está estacionado.

**Figura 1.** Caravana



Fuente: <https://www.motorpasion.com>

Alrededor del mundo se presenta diferentes formas de y diseñar caravanas dependiendo de las características del terreno y estilo de vida.

**2.2.1 Caravana americana.** Principalmente construidas en chasis de acero o aluminio con paneles de fibra de vidrio-madera y aluminio de forma y tamaños muy

variados de acuerdo a las leyes que rigen los diferentes estados de la unión americana. Su principal característica y enfoque de construcción es la comida y el tamaño.

**Figura 2.** Caravana América



Fuente: <https://www.motorpasion.com>

**2.2.2 Caravana unión europea.** Estructura de tamaño medio, chasis de aluminio, cuerpo de fibra de vidrio y materiales modernos cuyas características permiten transitar en carreteras angostas y ciudades principales. Estilos homogéneos, prevaleciendo la estabilidad y confort del interior sin impactar la simplicidad y propósito de la caravana.

**Figura 3.** Caravana unión europea



Fuente: <http://www.campingsalon.com>

**2.2.3 Caravana australiana.** Diseño robusto para prestaciones en terrenos agrestes y campo traviesa características fundamentales de la geografía australiana, diseño de chasis rígido tipo escalera en acero o aluminio con cabina cerrada en acero galvanizado soldado o apernado con paneles de madera y fibra de vidrio garantizando la integridad total de la estructura.

**Figura 4.** Caravana australiana



Fuente: <http://the-rdn.com/2011/05/trackmaster-off-road-caravans/t-kimberley>

**Figura 5.** Caravana australiana 2



Fuente: <http://the-rdn.com/2011/05/trackmaster-off-road-caravans/t-kimberley>

### **3. REGLAMENTO DEL MINISTERIO DE TRANSPORTE**

#### **3.1 RESOLUCIÓN 004100 DE 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.

La caravana se considera equipo de diseño especial como: casas rodantes, equipos de uso en la explotación petrolera, estaciones eléctricas las cuales no pueden sobrepasar los pesos y dimensiones establecidos en la norma.

“La presente resolución tiene por objeto reglamentar la tipología para vehículos automotores de carga para transporte terrestre, así como los requisitos relacionados con dimensiones, máximos pesos brutos vehiculares y máximos pesos por eje, para su operación normal en la red vial en todo el territorio nacional, de acuerdo con las definiciones, designación y clasificación establecidas en la Norma Técnica Colombiana NTC 4788 "Tipología para vehículos de transporte de carga terrestre"<sup>1</sup> Los vehículos de carga se clasifican de acuerdo con su sistema de propulsión.

#### **3.2 DESIGNACIÓN**

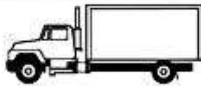



Para la aplicación de la presente Resolución, los vehículos de carga se designan de acuerdo a la configuración de sus ejes, Con el primer dígito se designa el número de ejes del camión o del tracto camión de la siguiente manera:







---

<sup>1</sup> RESOLUCIÓN 004100 DE 2004 disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co>

- La letra **S** significa semirremolque y el dígito inmediato indica el número de sus ejes.
- La letra **R** significa remolque y el dígito inmediato indica el número de sus ejes
- La letra **B** significa remolque balanceado y el dígito inmediato indica el número de sus ejes.

**Figura 6.** Designación

Designación	Configuración	Descripción
2		Camión de dos ejes Camión Sencillo
3		Camión de tres ejes Dobletroque
4		Camión de cuatro ejes
2S1		Tractocamión de dos ejes con semirremolque de un eje

Designación	Configuración	Descripción
4R4		Camión de cuatro ejes con remolque de cuatro ejes
2B1		Camión de dos ejes con remolque balanceado de un eje
2B2		Camión de dos ejes con remolque balanceado de dos ejes
2B3		Camión de dos ejes con remolque balanceado de tres ejes
3B1		Camión de tres ejes Dobletroque con remolque balanceado de un eje
3B2		Camión de tres ejes Dobletroque con remolque balanceado de dos ejes

Fuente: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=15600>

### 3.3 DIMENSIONES

**Tabla 1.** Dimensiones

Designación	Dimensiones		
	Ancho máximo, m	Altura máxima, m	Longitud máxima, m
2B3	2,60	4,40	18,50
3B1	2,60	4,40	18,50
3B2	2,60	4,40	18,50
3B3	2,60	4,40	18,50
4B1	2,60	4,40	18,50
4B2	2,60	4,40	18,50
4B3	2,60	4,40	18,50
Remolque (R) y remolque balanceado (B)	2,60	4,40	10,00
Semirremolque (S)	2,60	4,40	13,00

Fuente: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=15600>

Para el remolque tipo caravana tenemos una designación de 2B1 o 2B2 cuyas dimensiones de ancho no pueden superar 2.6m, altura de 4.4m y longitud de 10m estas dimensiones limitan el diseño para asegurar una operación conservadora y lograr transitar por las carreteras a nivel nacional.

**Tabla 2.** Pesos máximos por eje

Tipo de eje	Peso max por eje [kg]
Eje sencillo	
Dos llantas	6000
Cuatro llantas	11000
Eje tándem	
Cuatro llantas	8000
Seis llantas	17000
Ocho llantas	22000

Fuente: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=15600>

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 CLASIFICACIÓN DE CARGA SEGÚN EL TIEMPO DE APLICACIÓN

**4.1.1 Permanentes.** Son las que duran toda la vida útil del remolque, estas comprenden el peso propio de la estructura y la carga de cada uno de los sistemas auxiliares que la componen.

**4.1.2 temporales.** Son aquellas cuya magnitud y/o posición pueden variar a lo largo de la vida útil de la estructura, actúan en forma transitoria apareciendo solamente en determinados momentos.

**4.1.3 De Impacto.** Efecto dinámico que actúa sobre una estructura, móvil o estática, son aquellas en las cuales la dirección del movimiento es coincidente con la dirección en la que se produce la carga. Se caracterizan por un tiempo de aplicación muy breve (instantánea).

### 4.2 CLASIFICACIÓN DE CARGA SEGÚN SU ESTADO INERCIAL

**4.2.1 Estáticas.** Son aquellas que durante el tiempo que actúan están en reposo y su estado inercial es despreciable, es decir que si varía en el tiempo lo hace en forma muy lenta.

**4.2.2 Dinámicas.** Son las que varían en magnitud en el tiempo. En todos los casos actúan en estado de movimiento. Bajo la acción de una carga dinámica La estructura desarrolla fuerzas inerciales y su deformación máxima no coincide necesariamente con la intensidad máxima de la fuerza aplicada.

### 4.3 CLASIFICACIÓN DE CARGA SEGÚN LA DIRECCIÓN DEL MOVIMIENTO

**4.3.1 Móviles.** Son aquellas en las cuales la dirección del movimiento es perpendicular a la dirección en que se produce la carga

**4.3.2 Por efecto de aceleración.** Es la fuerza necesaria que permite al remolque romper su inercia para iniciar el Movimiento. Este movimiento está estrechamente relacionado con la dinámica de las Ruedas y del tipo de vía por la que transita el remolque.

### 4.4 CLASIFICACIÓN DE CARGA SEGÚN SU UBICACIÓN EN EL ESPACIO.

**4.4.1 Concentradas o Puntuales.** Carga que actúa sobre un área muy pequeña o punto.

**4.4.2 Distribuidas.** Son las que actúan a lo largo de todo el elemento estructural o parte de él. Se dividen:

- Uniformemente distribuidas; aquellas que mantienen un mismo valor en toda su extensión.
- No uniformemente distribuidas; son aquellas en las que varía su valor en los distintos puntos de su extensión.

**Figura 7.** Cargas distribuidas



## 4.5 OTRAS CARGAS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO

**4.5.1 De Viento.** Este tipo de cargas son provocadas por la energía cinética del viento que actúa sobre una sección o área de la caravana.

**4.5.2 Sísmicas.** Estas cargas son generadas por vibraciones cíclicas y simultáneas en forma vertical y horizontal, tienen mayor incidencia en las estructuras de poca sección transversal y en equipos de movimiento rotativo.

## 4.6 RESISTENCIA A LA RODADURA

Existen diferentes formas de analizar cada una de las posibilidades en que el neumático del remolque puede interactuar con el suelo. Para un análisis aproximado de ésta interacción se puede partir asumiendo que la rueda es rígida y el terreno es completamente liso<sup>2</sup>.

$$R_c = \frac{W^2}{5.7 * c * b * D} \quad (4.1)$$

Dónde: W es la carga vertical, c para la constante de resistencia del terreno, b el ancho de la llanta y D es el diámetro de la llanta.

## 4.7 FUERZA DE TIRO

Es la fuerza máxima desarrollada por el vehículo motriz que permite el movimiento del remolque. La fórmula desarrollada a continuación toma en cuenta la resistencia a la rodadura y la componente de la carga total del remolque que afecta a la fuerza de tiro por parte del vehículo tractor.

---

<sup>2</sup> Resistencia a la rodadura influencia en los vehículos consultado en: <https://books.google.com.co/books?manual> de la técnica del automóvil

## 4.8 TEORÍA PARA EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

**4.8.1 Tensiones de Von Mises.** Es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión. En ingeniería estructural se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles.

La tensión de Von Mises puede calcularse fácilmente a partir de las tensiones principales del tensor tensión en un punto de un sólido deformable, mediante la ecuación:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4.2)$$

Siendo las tensiones principales, y obteniendo la expresión a partir de la energía de distorsión en función de las tensiones principales:

$$E_{def,dist} = \frac{1}{6*G} * \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad (4.3)$$

**4.8.2 Teorías de fallo.** Son criterios usados para determinar los esfuerzos estáticos permisibles en estructuras o componentes de máquinas. Bajo este criterio una pieza resistente o elemento estructural falla cuando en alguno de sus puntos sucede que:

$$T_{max} \geq \frac{\sigma_y}{2} \quad (4.4)$$

Dónde:  $T_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$  es la tensión cortante máxima del punto considerado. Y  $\sigma_1, \sigma_3$

Son la mayor y menor tensión principal en el punto considerado.

## **4.9 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)**

Un estudio CFD es la mezcla entre mecánica de fluidos, elementos finitos y métodos computacionales, que no es más que una simulación por computador de un flujo de aire en contacto con cualquier objeto físico. Dicha simulación se realiza en túneles de viento que da como resultados datos asociados con la velocidad, densidad, coeficiente de arrastre entre otras. Un análisis CFD es una herramienta muy utilizada para investigaciones o para aplicaciones industriales tales como:

- Sistema de líquido o gas-líquido
- Flujo a través o rodeando un objeto solido
- Conductos en sistemas de tuberías
- Trayectorias de partículas
- Transferencia de calor
- Separación de partículas
- Entre otras

### **4.9.1 Parámetros de diseño.**

- Las propiedades del aire se tomarán a una temperatura estándar de 25°C y a 1atm de presión
- La simulación se realizará en el 50% de la geometría en perfecta simetría por motivos de memoria computacional.
- El vehículo se encontrará totalmente estático en un túnel de viendo donde se imprime aire a una velocidad de 30 m/s (Limite en carretera colombiana)
- Los accesorios tales como; antenas, espejos, luces, guardafangos, limpia parabrisas, se despreciarán, ya que el área trasversal del modelo es la que presenta la mayor resistencia al avance
- Aire se trabajará como fluido estacionario, newtoniano e incompresible debido a su baja velocidad ( $Mach=0,0904$ )

#### 4.9.2 Ecuaciones de gobierno del modelo matemático 2D.

- Numero de Reynolds

Para determinar el modelo de viento es régimen laminar o turbulento.

$$Re = \frac{\rho \cdot Deq \cdot Vel}{\mu}$$

$$Deq = \frac{4 \cdot A}{P}$$

$$P = a + a + b + b$$

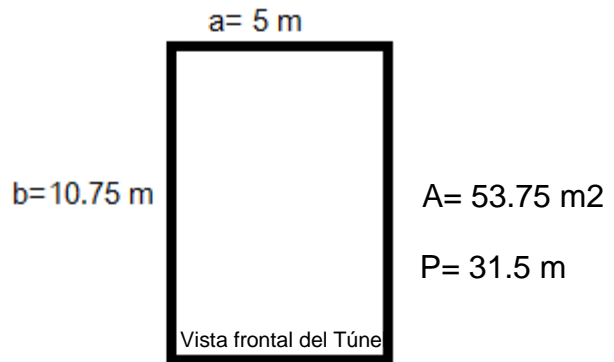
$$A = a \cdot b$$

$\rho =$  Densidad

$Vel =$  Velocidad del fluido

$Deq =$  Diametro equivalente

$\mu =$  Viscosidad dinamica

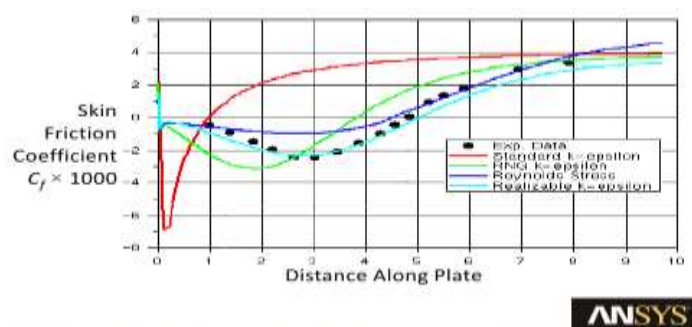


**Tabla 3.** Propiedades del aire a 25°C y 1atm

Densidad	v. Dinámica	v. cinemática
1.184 kg/m <sup>3</sup>	0.00001849 kg/ms	0.00001562 m <sup>2</sup> /s

**Re= 13'111.855.49** por lo tanto se denomina régimen totalmente turbulento.

**Figura 8.** Modelos de turbulencia



Fuente: Manual Ansys Fluent

El modelo de turbulencia k-épsilon realizable (Color celeste) es el que más se asemeja a datos reales. Este modelo permite obedecer ciertas limitaciones matemáticas que en última instancia mejoran su rendimiento.

**4.9.3 Túnel de viento.** El túnel de viento es una de las herramientas de investigación más útiles en la ingeniería, con este se permiten realizar estudios del efecto del movimiento de flujos a velocidades específicas al rodear un objeto.

El principio del túnel de viento consiste en que el objeto permanezca estático, mientras se imprime flujo artificialmente y se fuerza el paso del fluido alrededor del cuerpo para estudiar su comportamiento. Se utiliza como método de investigación en el comportamiento del aire en objetos como aviones, automóviles, misiles, edificios, camiones, entre otros.

Las dimensiones recomendadas para garantizar un buen estudio CFD del túnel deben ser mucho mayores a la del objeto que se desea analizar. En teoría el ancho del túnel puede ser tan grande como se desee, pero es recomendable que no exceda más de cinco veces el ancho del cuerpo a estudiar, evitando que se cree un reflejo del choque de onda contra las paredes del túnel. El mismo principio se aplica para el techo. Luego de tener el túnel se deben nombrar las paredes del mismo, para que de esta manera el programa las reconozca y les aplique sus respectivas condiciones de comportamiento.

**4.9.4 Resistencia al movimiento.** La componente de la fuerza que actúa en sentido opuesto al movimiento en dirección a la velocidad relativa entre el aire y el objeto se denomina resistencia aerodinámica. Cuando un automóvil se traslada no nos damos cuenta que está atravesando el aire que lo rodea (de lo contrario avanzaría en el vacío) este aire presenta una resistencia al movimiento que el motor del automóvil tiene que vencer y esto queda reflejado en el consumo de combustible.

Se utilizan coeficientes aerodinámicos que están asociados con coeficiente de penetración o coeficiente de resistencia, que permiten caracterizar la efectividad de un vehículo al atravesar el aire. Una forma de comparar la eficiencia aerodinámica de un vehículo es con el coeficiente de arrastre, que este está en función de:

$$Cx = \frac{2 * F}{v^2 * A * \rho} \quad (4.54)$$

Dónde:

- F: Fuerza de arrastre, que es la componente de la fuerza en dirección opuesta al movimiento
- A: Área de referencia
- $v$ : Rapidez del objeto relativa al fluido
- $\rho$ : Densidad del fluido

**4.9.5 Mallado.** La malla es el proceso más importante que cualquier otro pasó a la hora de realizar un proceso CFD. La principal función del mallado es convertir lo infinito en finito. Un número de fuentes de la literatura han confirmado la importancia de una buena malla “la generación de la malla constituye uno de los pasos más importantes sobre la etapa de pre-proceso”<sup>3</sup>. Se revelo en diferentes literaturas que la mayor parte del tiempo empleado en este paso, es generar una malla del dominio de la geometría, esto lleva a concluir que la generación de malla es un proceso más largo que la generación de la geometría precisa.

---

<sup>3</sup> Jiyuan Tu, Kiao Inthavong, Goodarz Ahmadi. Computational fluid and particle dynamics in the human respiratory system (2008)

## 5. DISEÑO CONCEPTUAL

Para el diseño conceptual se utiliza el modelo australiano como fuente de inspiración e información por sus características constructivas y semejantes prestaciones requeridas en un prototipo “*offroad*”. Las reglamentaciones de diseño de un remolque tipo caravana en Colombia son muy limitadas y solo contemplan las magnitudes de altura, ancho, largo, tipificación y carga. Por lo tanto varios requerimientos técnicos son usados y conseguidos en la norma del departamento de infraestructura y desarrollo regional australiano, se obtienen de la página web <https://infrastructure.gov.au/>

### 5.1 REQUERIMIENTOS DEL CONSUMIDOR

A continuación, se realiza una lista de los requerimientos básicos de la empresa Assistmedia Ltda para tener en cuenta en el desarrollo del prototipo:

- Capacidad para transportar una cuatrimoto Grizzly 450cc
- Dos niveles habitacionales para 4 personas
- Centro de entretenimiento
- Capacidad de carga de 500kg aproximadamente
- Amoblado (Comedor, cocina, estudio, baño, gabinetes exteriores e interiores, entre otros)
- Carga total en el chasis 1200Kg

### 5.2 DESCRIPCIÓN DE LA CARAVANA

Se requiere una base robusta con una estructura que soporte bien las vibraciones en la carretera, de bajo centro de gravedad y perfil aerodinámico para disminuir la resistencia del aire y fuerza de arrastre, para ofrecer la mayor seguridad y estabilidad estructural y cuyas dimensiones se ajusten a las normas propuestas por

el ministerio de transporte. El diseño de sus componentes está desarrollado intencionalmente para integrarse a las características propias de una caravana y necesidades intrínsecas de este tipo de vehículo, tales como:

- Chasis tipo escalera
- Estructura perimetral de acero tubular.
- Estudio espacial del mobiliario.
- Techo levadizo.
- Interior modulable sin comprometer la rigidez del conjunto.

Estas características encarecen el producto y le da un nivel de calidad que los otros fabricantes no alcanzan. Hay otras opciones de caravanas en el mundo, pero se fabrican bajo diseños de estructuras autoportantes-paneladas, sin chasis tipo escalera, que pesan menos y son más baratas, pero no están concebidas para soportar terreno agreste y las condiciones de las carreteras colombianas.

### **5.3 DINÁMICA DE LA CARAVANA**

“Muchos estudios y ensayos prácticos asociados de la dinámica de las caravanas y vehículos de remolque indican que los factores dominantes que afectan a la estabilidad del remolque son la inercia de guiñada, la masa de la nariz (distribución de masa), la posición del eje del remolque, la velocidad, la presión y la rigidez sobre las paredes laterales de la llanta, afecta a la estabilidad particularmente del vehículo remolcador”<sup>4</sup>.

En esencia, cualquier remolque tirado por medio de un enganche en voladizo es fundamentalmente inestable, pero se intenta dentro de los límites prácticos reducir al mínimo las causas que lo contribuyen.

---

<sup>4</sup> Dinámica de la caravana disponible en: <http://caravanandmotorhomebooks.com/caravan-and-tow-vehicle-dynamics/>

El método de concebir el diseño y la forma geométrica de la caravana está sustentada bajo la experiencia y recomendaciones de los principales fabricantes australianos teniendo como principal esfuerzo su estabilidad y seguridad de este tipo de vehículo. Por lo tanto se sigue los principales lineamientos sugeridos y presentados en los siguientes factores.

**Determinados por el constructor del remolque caravana incluyen:**

- Distancia desde el enganche de remolque al eje central.
- Numero de ejes.
- Masa de la caravana.
- Distribución de la masa a lo largo de la longitud de la caravana.
- Centro de gravedad de la caravana.
- Altura del eje central (impuesta por la geometría de la suspensión de la caravana).
- neumáticos con buena estabilidad a los costados.
- Diseño especial aerodinámico

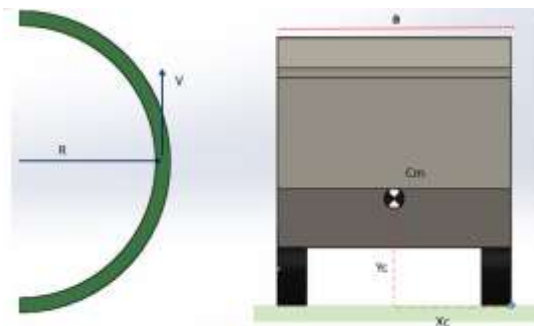
**Determinados por el propietario del remolque caravana incluyen:**

- La sobrecarga y distribución de la misma en el remolque caravana.
- El exceso de voladizo en la bola de remolque causada por extensión innecesaria de barras o masa de enganche.
- Velocidad máxima crítica y recomendada.
- El montaje y la utilización de dispositivos de control de zigzagado, balanceo y cabeceo.
- El peso y la estabilidad del vehículo remolcador.

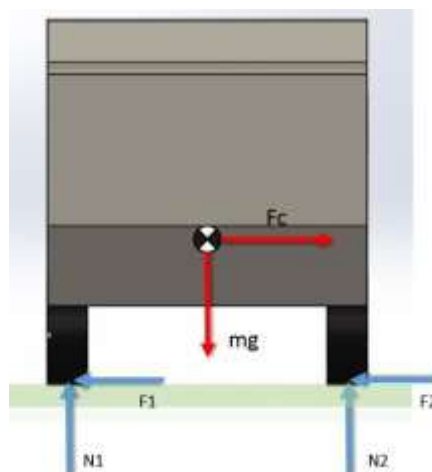
**5.3.1 Análisis 2d de la estabilidad dinámica de la caravana.** Se considera un remolque que está describiendo una curva de radio  $R$ , con velocidad constante  $v$ . Debido a la distribución de la carga, el centro de masas está situado en la posición  $x_c, y_c$  tal como se señala en la figura. El coeficiente de rozamiento entre las ruedas del vehículo y la carretera es  $\mu$ . se determina si:

- El remolque está en equilibrio.
- Si desliza hacia fuera, saliéndose de la curva.
- Si vuelca, girando alrededor de un eje que pasa por las ruedas de la parte derecha, cuando el automóvil describe una curva hacia la izquierda.
- Si desliza y vuelca a la vez.

**Figura 9.** Modelo 2d



**Figura 10.** Diagrama de cuerpo libre



$N_1$  y  $N_2$  son las reacciones o fuerzas que ejerce la carretera sobre las ruedas del remolque.  $F_1$  y  $F_2$  son las fuerzas de rozamiento que se oponen al deslizamiento del remolque a lo largo de la dirección radial y hacia fuera. El peso  $mg$  y la fuerza centrífuga  $F_c$  actúan en el centro de masa.

Si el vehículo permanece en reposo a lo largo de la dirección radial, se tiene que

$$N_1 + N_2 = mg \quad (5.1)$$

$$F_c = F_1 + F_2 \quad (5.2)$$

Se toma momentos respecto de O. La condición de equilibrio se expresa

$$-N_1 a - F_c y_c + mg X_c = 0 \quad (5.3)$$

Siendo "a" la distancia entre las ruedas. Se despeja  $N_1$  de la ecuación 5.3

$$N_1 = \frac{mgx_c - F_c y_c}{a} \quad (5.4)$$

Se examina las distintas situaciones:

- El remolque vuelca

A medida que aumenta la velocidad  $v$  del remolque, aumenta la fuerza centrífuga  $F_c = mv^2/R$ , hasta que  $N_1$  llega a cero. Un incremento de la velocidad hace que el vehículo empiece a volcar.

La condición para que empiece a volcar es  $N_1 = 0$  o  $\frac{v^2}{R} = (g \frac{X_c}{y_c})$

- El remolque desliza

La fuerza de rozamiento  $F_c = F_1 + F_2$  no puede superar el valor máximo  $\mu N_1 + \mu N_2 = \mu \cdot mg$

La condición para que el remolque empiece a deslizar es que:

$$\frac{v^2}{R} = \mu \cdot g \quad (5.5)$$

Si  $m.g.x_c > F_c.y_c$  el remolque no vuelca

Si  $F_c < \mu.mg$  el remolque no desliza

Si  $m.g.x_c > \mu.m.g.y_c$  es decir, si  $\mu < x_c/y_c$  el remolque empieza a deslizar en el momento en el que se cumple que  $\frac{V^2}{R} = \mu.g$

Si  $\mu > x_c/y_c$  el remolque empieza a volcar en el momento en el que se cumple que  $\frac{V^2}{R} = g.\left(\frac{x_c}{y_c}\right)$

Se estudia las diferentes condiciones que cumplen para el volcamiento o deslizamiento del remolque teniendo en cuenta un análisis 2d el cual no incluye los efectos tipo péndulo por la combinación del remolque-vehículo tractor y la fuerza de arrastre frontal. Con este resultado sirve de apoyo para complementar y tener un diseño integral y escoger correctamente el tamaño y características de las llantas como también las dimensiones del remolque y ubicación espacial del interior que cumplan con las condiciones necesarias para su correcto uso en carretera bajo las limitaciones por seguridad de este tipo de vehículo.

## 5.4 ALTERNATIVA DE DISEÑO PRINCIPAL

Figura 11: Alternativa de diseño principal

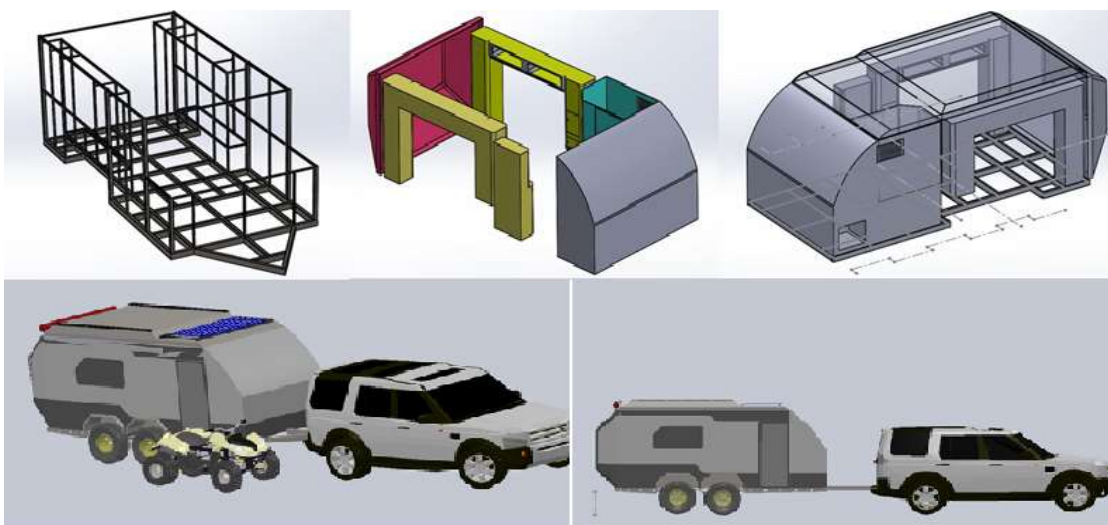


Figura 12. Layout de la caravana





## 6. DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS DE DISEÑO PARA EL CHASIS Y CABINA

### 6.1 CARGAS PERMANENTES.

Se determina la carga permanente total ( $P_e$ ) realizando una sumatoria del peso de cada uno de los componentes del remolque (Ver tabla 4).

La carga sobre la cabina de 400 kg no se considera permanente ya que solo actúa con la caravana estacionada y con la carga de la cuatrimoto retirada.

**Tabla 4.** Cargas permanentes

componentes	masa(Kg)	posición[m]	# carga	carga (N)
Cocina	100	0.3	p1	1000
Cuatrimoto	300	1.3	p2	3000
Muebles	250	1.2	p3	2500
Baño	50	2.8	p4	500
Planta eléctrica	16	3.5	p5	160
Aire acondicionado	8	3.5	p6	80
Cilindro de gas	10	4.0	p7	100
Gabinetes	100	1.5	p8	1000
Tanque de agua	60	0.35	p9	600
Tanque de aguas negras	60	2.70	p10	600
Llanta auxiliar	15	2.80	p11	150
Carrozado	200	0 - 4.0	P12	2000
Techo (mecanismo)	60	0 - 4.0	P13	600
Cabina	132	0 - 4.0	P14	1320
<b>CARGA TOTAL</b>	<b>1360</b>			
Chasis	218			2180
Ejes, llantas y suspensión	160	1.5		1600
<b>MASA TOTAL DEL REMOLQUE</b>	<b>1738</b>			

Figura 14: Diagrama de cargas

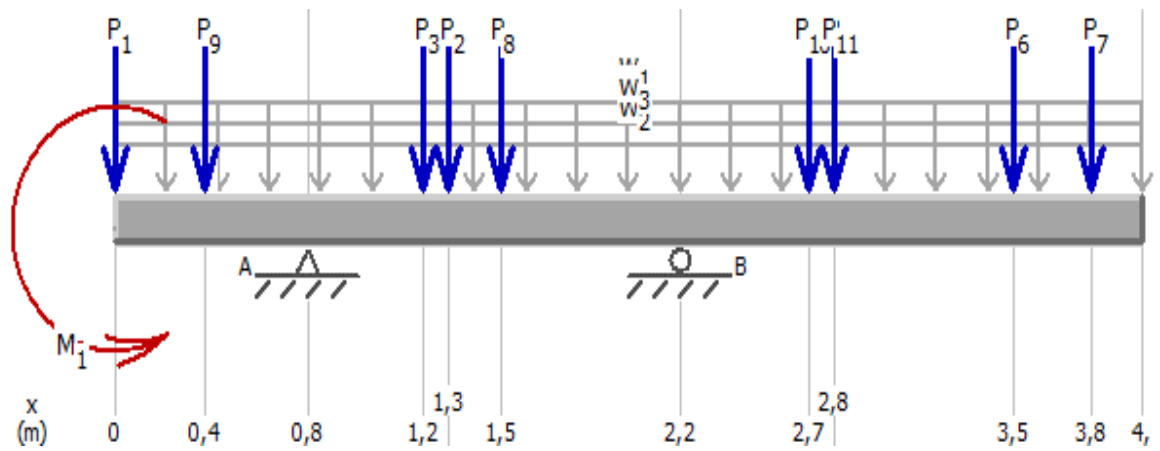
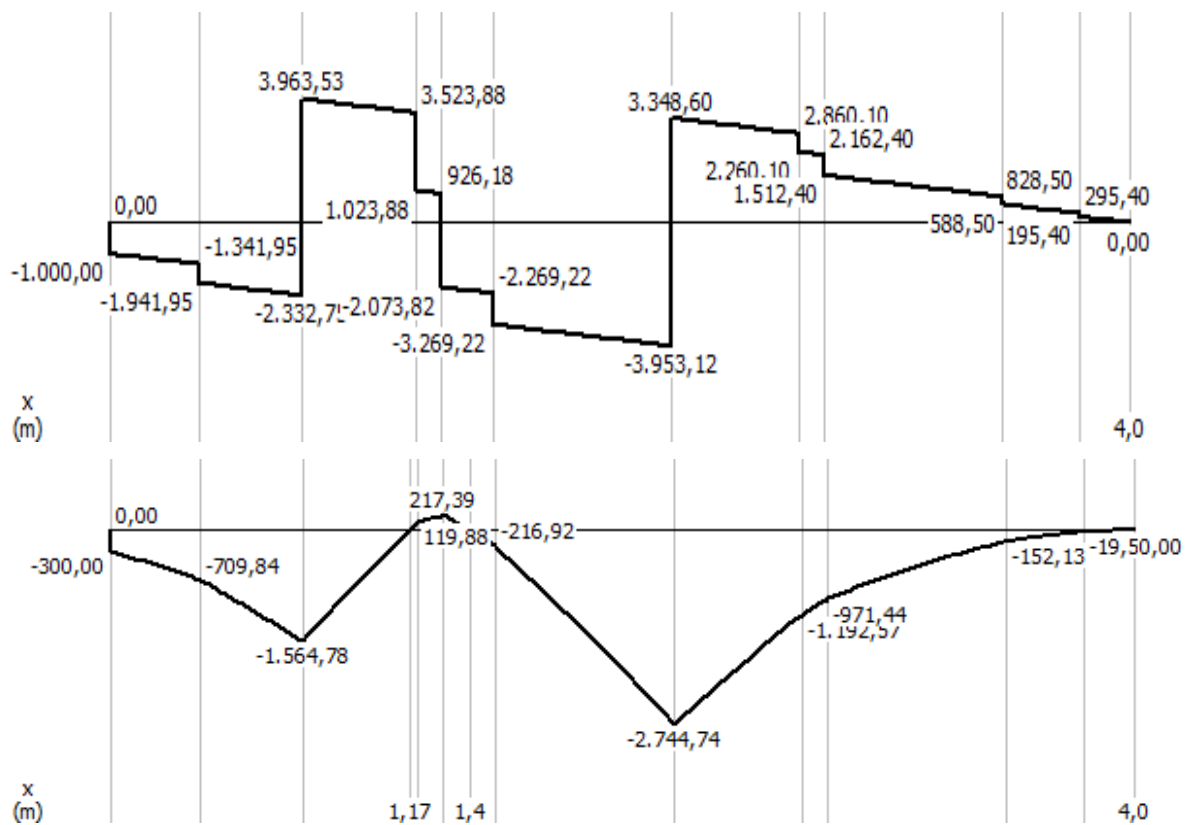


Figura 15: Diagrama cortante y momento flector



## 6.2 CÁLCULO DE LA FUERZA DE TIRO

Para este cálculo ( $F_a$ ) es necesario determinar previamente la aceleración máxima ( $a$ ) que el vehículo ejerce al encontrarse tirando al remolque con su máxima capacidad de carga. Se asume un valor de 60 km/h de velocidad máxima ( $V$ ) alcanzado en un periodo de tiempo ( $t$ ) de 0 a 15 segundos, por tanto:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{v}{t} ; \quad a = 1.1 \frac{m}{s^2} \quad (6.1)$$

De la carga de diseño se determina la masa ( $m$ ) con la cual se obtiene el valor de la fuerza de tiro utilizando la ecuación de la aceleración

Carga de diseño  $C_d=2200\text{kgf}$  “peso total del remolque más 20%”

$$C_d = m * g \quad (6.2)$$
$$m = \frac{C_d}{g} = \frac{2200\text{kgf}}{9.8\left(\frac{m}{s^2}\right)} = 224 \text{ kgf} * \frac{s^2}{m}$$
$$F_a = 224 \left( \text{kgf} * \frac{s^2}{m} \right) * 1.1 \left( \frac{m}{s^2} \right) = 246.4 \text{Kgf}$$

## 6.3 EFECTO DE LA RESISTENCIA DE RODAMIENTO

La resistencia al rodamiento ( $R_c$ ) se encuentra cuando el remolque alcanza cierta velocidad sobre una vía de cualquier tipo. Se considera que el remolque se desplaza en una vía de condiciones agrestes, que se compara con una superficie de tierra mojada, considerado como terreno arcilloso cuyo contenido de humedad es del 25%. De esta manera se obtiene la constante de resistencia al terreno ( $c$ ), desarrollado en la “Teoría de Equilibrio de elasticidad y Plasticidad de Mecánica de

Suelos".El peso total que soporta cada neumático (W) se obtiene de dividir la carga de diseño por el número de ruedas del prototipo.

Donde

$$c = 7045.47 \text{ Kg/m}^2$$

$$b = \text{ancho del neumático} = 175 \text{ mm}$$

$$D = \text{diámetro de la rueda} = 620 \text{ mm}$$

$$W = Cd/4 = 550 \text{ kgf}$$

De la ecuación 4.1:

$$R_c = \frac{(550 \text{ kg})^2}{5.7 * 0.25 \text{ m} * 0.62 \text{ m} * 7045 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right)}$$

$$R_c = 48.6 \text{ kg}$$

Se determina un valor de resistencia a la rodadura de 48.6kg en condiciones críticas, además no se toma en cuenta el efecto de la aceleración en las interacciones entre la rueda y el terreno.

$$R_{c_{total}} = 4 * R_c = 194.4 \text{ Kg} \quad (6.3)$$

$$R_{c_{Total}} \Rightarrow 200 \text{ kg}$$

## 6.4 FUERZA DE TIRO MÁXIMA

Para determinar la fuerza máxima de tiro (Ft) se toma en cuenta que el remolque está subiendo una pendiente de 30° en una condición crítica con la resistencia a la rodadura máxima.

$$F_t = C_d * \text{sen}(\beta) + R_{c_{total}} \quad (6.4)$$

$$F_t = 2200 \text{ kgf} \text{ sen}(30^\circ) + 200 \text{ kgf}$$

$$F_t = 1200 \text{ Kg}$$

## 6.5 CARGA TRANSITORIA

Para este caso particular se considera la carga sobre la cabina Como transitoria. Esta carga se aplica con el remolque estacionado y en reposo además tiene diferentes condiciones de frontera para su análisis estático y está sujeto a las recomendaciones de funcionalidad propias de una caravana. Carga de 400 Kg.

## 6.6 CARGAS POR EL VIENTO

**6.6.1 Carga frontal.** De la simulación computacional de fluidos se obtiene la presión en el frente de la caravana a una velocidad máxima de 100Km/h, con la cual se calcula la fuerza ejercida por el viento.

$$P = 570Pa \text{ ver figura 99}$$

$$F = P * A_p \tag{6.5}$$

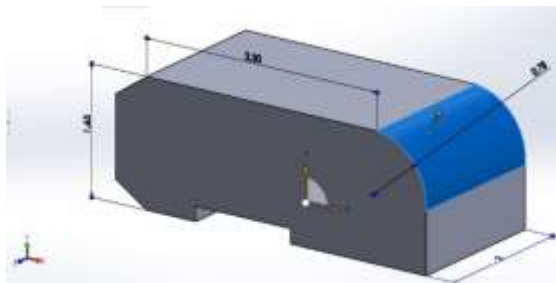
$$A_p = \text{Área frontal proyectada} = 0.7m * \frac{\pi}{2} * 2m = 2.2m^2$$

$$F = 570Pa * 2.2m^2 = 1254N$$

Longitud perimetral de la estructura frontal es de 8m

$$F = \frac{1254N}{8m} = 156.75 \frac{N}{m} = 15.67 \frac{kgf}{m}$$

**Figura 16.** Área frontal



**6.6.2 Carga lateral.** Para una situación crítica se halla la fuerza ejercida por el viento sobre la pared lateral teniendo en cuenta que no hay volcamiento.

Para una velocidad de 100Km/h

$$\text{viento de } 100 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 27.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para hallar la presión se toma la fórmula utilizada por el código de ética de la sociedad americana de ingeniería civil ASCE el cual utiliza valores típicos para la densidad del aire y la aceleración.

$$p = 0.613 * V^2$$

$$V \text{ [m/s]}$$

$$P[\text{pa}]$$

$$P=0.613 * \left(27.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 473.75 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

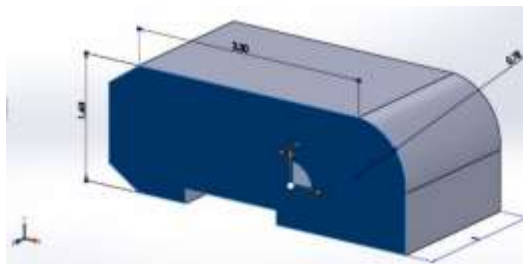
$$A_p = \text{Área lateral proyectada} = 7.425 \text{m}^2$$

$$F = 473 \text{Pa} * 7.425 \text{m}^2 = 3512 \text{N}$$

$$\text{Longitud perimetral lateral} = 9.65 \text{m}$$

$$F = \frac{3512 \text{N}}{9.65 \text{m}} = 364 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 36.4 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

**Figura 17.** Área lateral



## 7. SELECCIÓN DEL MATERIAL

Los perfiles de acero estructural tubular marca colmena de fabricación colombiana en geometría redonda, cuadrada o rectangular son una alternativa industrial, diseñada para construir sistemas estructurales metálicos de alta resistencia, de una manera práctica, rápida y sencilla. Se puede emplear como columnas, vigas, viguetas simples en combinación con otros elementos de línea estructural y/o en conjunto con cualquier otra alternativa del mercado. Presenta las mejores prestaciones de economía, fiabilidad y versatilidad para el tipo de diseño a realizar.

### 7.1 IDENTIFICACIÓN

Los perfiles se fabrican con acero laminado en caliente (H.R.) de bajo contenido de carbono, alta soldabilidad y ductilidad, según normas AISI/SAE 1015 JISG 3132 SPHT 4 o cualquier otro acero equivalente con los siguientes contenidos máximos en su composición química.

Carbono: 0.27%; manganeso: 40%maximo; fosforo: 0.045%; azufre: 0.045%max

**Tabla 6.** Propiedades mecánicas ASTM A-500 grado C

PROPIEDADES MECÁNICAS PARA ASTM A-500 grado C		
esfuerzos	redondos	cuadrados y rectangulares
fluencia fy	3,241 kg/cm <sup>2</sup>	3,522kg/cm <sup>3</sup>
ultimo fu	4,368kg/cm <sup>2</sup>	4,368kg/cm <sup>2</sup>
elongación en 2 "	21%	21%

Fuente: catalogo aceros colmena

El esfuerzo mínimo de fluencia del acero es de 3.241 kg/cm<sup>2</sup> (46000psi). La relación entre el esfuerzo último y de fluencia esta entre 1.25 y 1.3 satisfaciendo la relación mínima recomendada para formado en frio de 1.2. Los perfiles estructurales se fabrican partiendo de bandas de acero laminado en caliente, que al pasar por una serie de rodillos sufren un proceso de formado en frio dando la geometría de cada perfil, el cerrado se hace mediante soldadura por inducción con alta frecuencia (electrofusión ERW)

## 7.2 SELECCIÓN DE LOS PERFILES

**Tabla 7.** Selección de los perfiles

CARACTERÍSTICAS Y DENOMINACION							PROPIEDADES ESTÁTICAS												
Tamaño Nominales		REALES		Espesor pared	PESO		AREA	FLEXION						Módulo Plástico		TORSION			
								EJE X - X			EJE Y - Y							Módulo de Inercia Jz	Módulo de Inercia Jy
PULGADAS	MILIMETROS	d	b	a	NEGRO	GALVANIZADO	A	Ix	Iy	Sx	Sy	Iy	Iz	Jz	Jy	Iz	Iy		
		mm	mm	mm	Kg/m		cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	
3 1/2X2	90 X 50	90,17	50,00	1,50	3,20	3,54	4,08	44,88	9,96	3,32	18,15	7,26	2,11	12,09	8,07	41,02	12,32		
		90,17	50,00	2,00	4,32	4,65	5,50	58,15	12,90	3,25	23,41	9,36	2,06	15,78	10,52	53,63	15,93		
		90,17	50,00	2,50	5,76	5,59	6,70	70,59	15,66	3,25	28,28	11,31	2,05	19,31	12,84	65,75	19,32		
		90,17	50,00	3,00	6,19	6,52	7,89	82,24	18,24	3,23	32,80	13,12	2,04	22,67	15,05	77,38	22,48		

Fuente catalogo aceros colmena

## 7.3 CÁLCULO PARA EL PERFIL SELECCIONADO

$$M_{max} = 2744N.m \quad \text{Ver figura 15}$$

$$\sigma = \frac{M_{max} * C}{I} \quad (7.1)$$

$$\frac{M_{max}}{2} = M_{estructura} = 1372N.m \quad (7.2)$$

Se realiza sobre un componente de la estructura donde van los anclajes de la suspensión, para este diseño se tiene dos largueros principales que reciben las cargas las cuales se dividen de forma simétrica para cada uno.

Se asume un perfil inicial para verificar sus condiciones y trabajar sobre este como base para los siguientes perfiles que puedan ser utilizados.

Rectangular. 90x50mm -3mm;  $I_x=82.24 \text{ cm}^4=822400 \text{ mm}^4$ ;  $C=45\text{mm}$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{estructura} * C}{I} = \frac{1372000 \text{ N.mm} * 45 \text{ mm}}{822400 \text{ mm}^4} = 75 \text{ Mpa} \quad (7.3)$$

$$\text{Factor de seguridad } fs = \frac{f_y}{\sigma_{max}} = \frac{352.2 \text{ Mpa}}{75 \text{ Mpa}} = 4.7 \quad (7.4)$$

Los primeros resultados de esfuerzo y factor de seguridad sirven de base de referencia para los demás elementos de la estructura como son los travesaños. Para facilitar los cálculos y obtener las deformaciones y desplazamientos correctos se realiza una simulación de un modelo de chasis con las condiciones de frontera adecuadas manteniendo los parámetros de diseño sugeridos.

## 8. SIMULACIÓN ESTRUCTURAL

### 8.1 SIMULACIÓN ESTÁTICO DEL CHASIS

**8.1.1 Modelo geométrico del chasis.** El chasis está conformado por tres largueros principales de perfil rectangular unido a través de travesaños con perfil cuadrado el cual permite aumentar la resistencia de los esfuerzos laterales. Realizado en SolidWorks 2016 ver anexo plano.

**Figura 18:** Modelo geométrico del chasis



### 8.1.2 Material.

**Tabla 8.** Material para la estructura y chasis

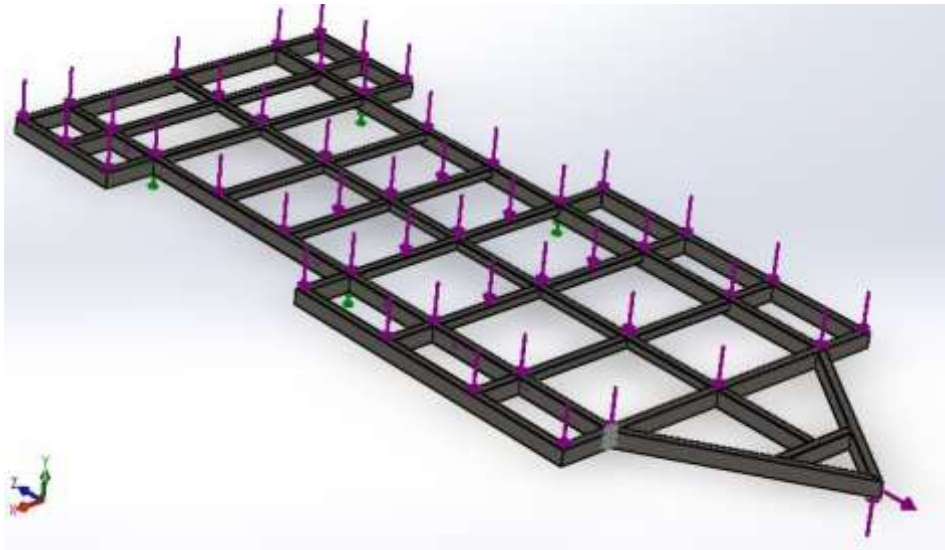
Propiedades Físicomecánicas	Magnitud	Unidades
Límite de resistencia	400	Mpa
Límite de fluencia	350	Mpa
Módulo de elasticidad	210	Gpa
Coefficiente de poisson	0,3	
Módulo de cortante	7,90E+10	Mpa
Densidad de masa	7850	Kg/m3
%elongación	21	

**8.1.3 Condiciones de frontera para el chasis.** Se implementa ejes tipo tándem de muelles de ballestas semielípticas. En el modelo se impone dos tipos de condiciones de frontera en dos diferentes regiones, en la zona frontal del chasis se aplica una condición de bisagra, es decir sin desplazamientos en la dirección axial ni radial. La segunda región corresponde a la parte de atrás del modelo donde se impone dos tipos de condiciones que representa el contacto entre el chasis y la chapa superior principal del muelle de ballesta, que es el medio que transfiere el peso de la carga del chasis al eje, guiado por un área preestablecida que se encuentra en el interior del chasis.

#### 8.1.4 Cargas en el chasis.

- Permanentes 1400kgf + 20%
- Tracción 246kgf
- Carga en el enganche 120kgf

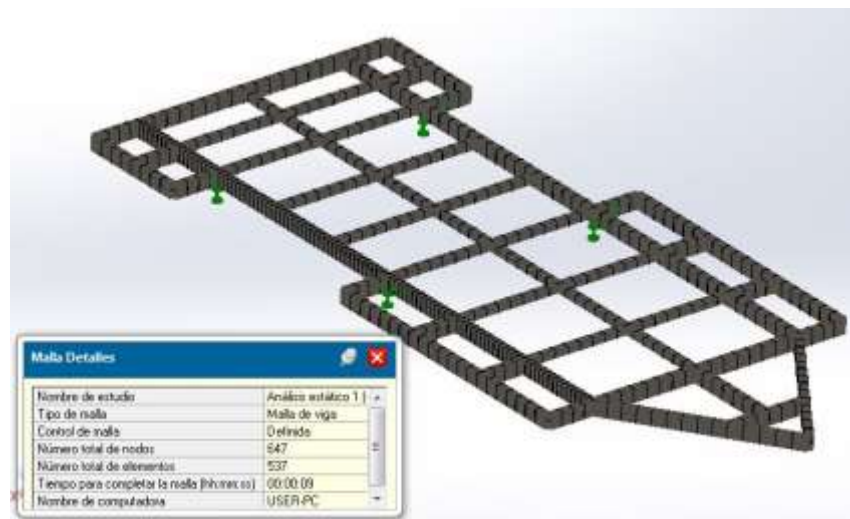
**Figura 19:** Cargas en el chasis



Se distribuye la carga total en el número de nodos (puntos de unión estructurales), teniendo en cuenta que es una situación crítica aceptable para obtener valores conservativos y ser analizados

### 8.1.5 Análisis de sensibilidad de la malla.

**Figura 20:** Análisis de sensibilidad de la malla



Se realiza para asegurar la precisión del modelo frente alguna variable tal como la tensión, la deformación o desplazamiento. Para este propósito se construye el modelo como una pieza soldada que por defecto para solidworks realiza un mallado tipo viga compuesta de elementos hexaédricos y 6 grados de libertad lo cual garantiza un tratamiento adecuado para una viga, excluyendo una matriz tetraédrica que puede rigidizar la estructura y desviar los resultados. La cantidad total de nodos es de 647 y se tiene una convergencia de resultados al aumentar el número de nodos en la parte crítica de los largueros principales, se tiene en cuenta poner cargas sobre todas las vigas para precisar en los resultados.

### 8.1.6 Resultados.

Figura 21: Tensión axial y de flexión en el límite superior

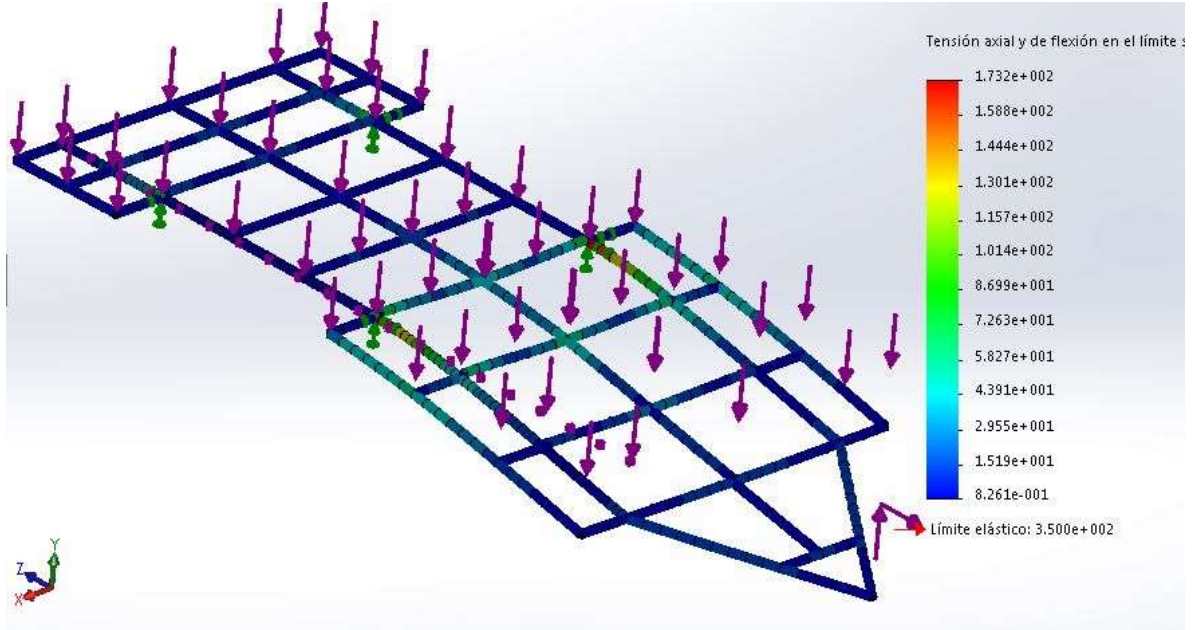
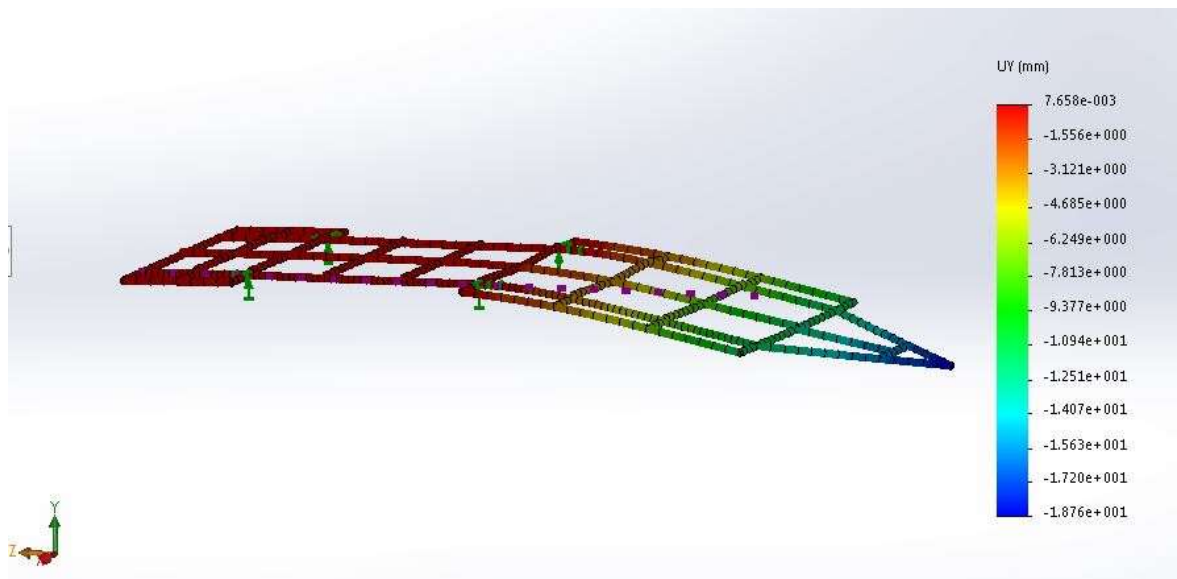


Figura 22: Desplazamiento crítico en Y

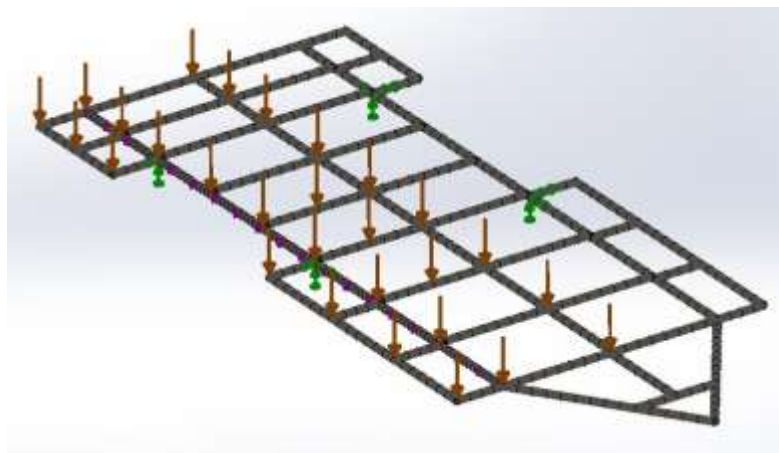


**Tabla 9.** Resultado análisis estático chasis

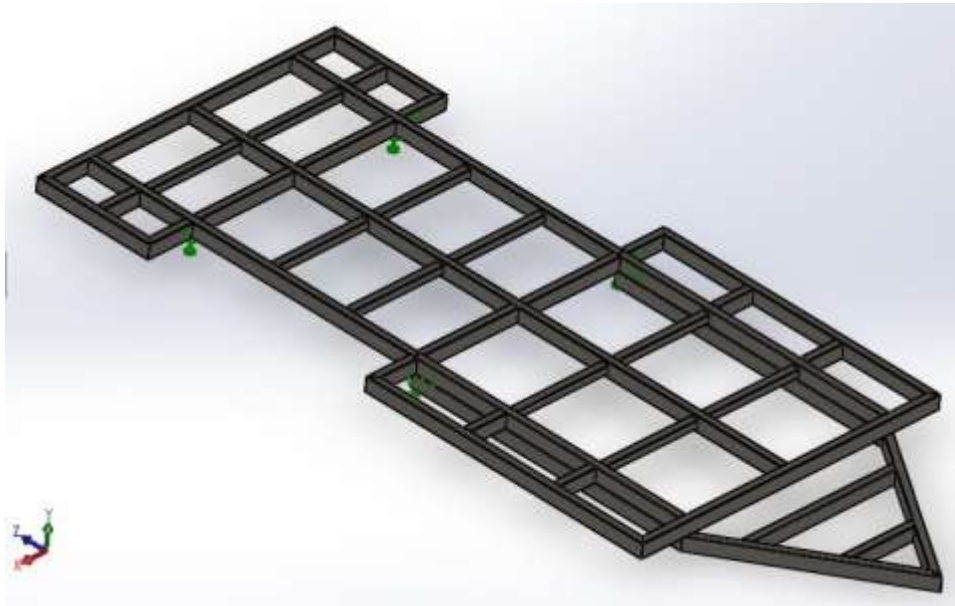
	Tensión axial y de flexión en el límite superior [Mpa]	desplazamiento [mm]			desplazamiento resultante[mm]	factor de seguridad
		X	Y	Z		
chasis	173	0,011	-18.07	0.0299	18.75	2

**8.1.7 Rediseño.** Las mayores tensiones se localizan en la parte trasera y delantera del chasis, cerca de la zona donde se monta las ballestas alcanzando un valor máximo de 173 Mpa por debajo del límite elástico del material. Los mayores desplazamientos ocurren en el extremo delantero del chasis en los travesaños en voladizo alcanzando un desplazamiento de 18.7mm. Para el chasis se necesita rigidizar y disminuir su desplazamiento frontal y aumentar la resistencia en el punto crítico cerca a la chapa del muelle. Se adhiere otra sección de tubería rectangular y se une a la sección de tiro para homogenizar la estructura. Un cálculo de esfuerzos debido a un bache se representa con el total de las cargas en un solo costado lateral del chasis y también con una distribución para una posible carga torsional, esto tendrá como consecuencia que los esfuerzos lleguen peligrosamente al esfuerzo límite de fluencia.

**Figura 23:** Condición crítica

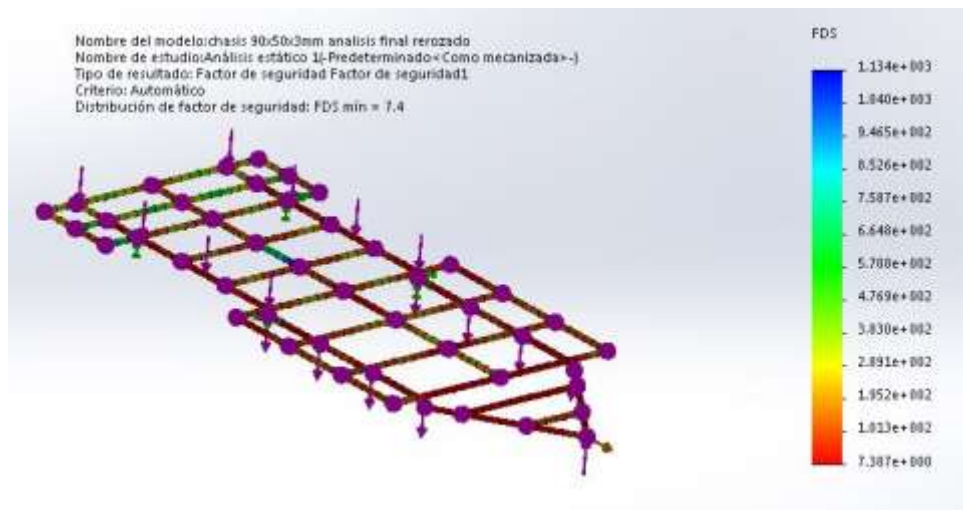


**Figura 24:** Detalle de rediseño

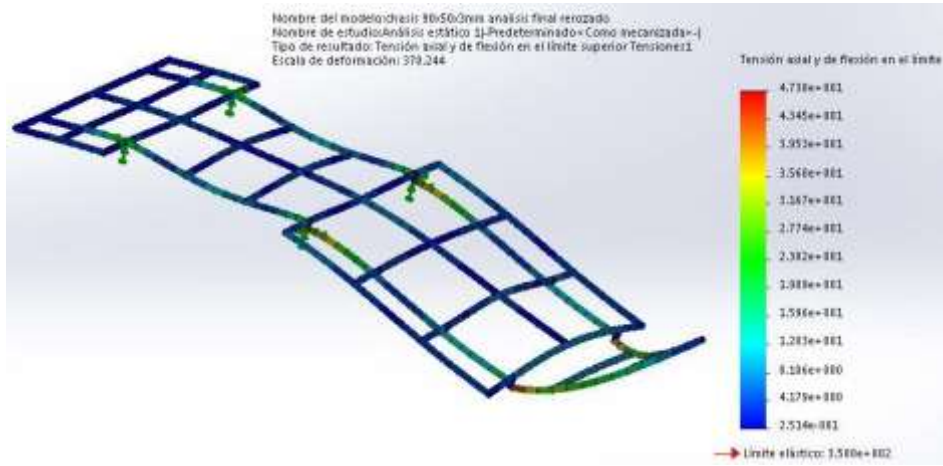


Cambiar la altura de enganche y adherir una sección de tubería rigidiza la estructura aumentando la resistencia y disminuyendo las deformaciones debido al voladizo frontal y a las cargas laterales producto de un movimiento de guiñado o zigzagueado.

**Figura 25:** Factor de seguridad de rediseño



**Figura 26:** Tensión axial y de flexión en el límite superior para el rediseño



**Tabla 10.** Resultados de rediseño chasis

	tensiones de von mises [Mpa]	desplazamiento [mm]			desplazamiento resultante[mm]	factor de seguridad
		X	Y	Z		
chasis	47.38	0,002	-1.35	0.03	1.35	7.4

Se determina las tensiones axiales y de flexión, como también los desplazamientos en las tres coordenadas rigidizando las estructuras y aumentando la resistencia en sus puntos críticos. Aumenta el factor de seguridad a 7.4 garantizando una operación de alta fiabilidad y estabilidad de sus miembros estructurales como el montaje de la cabina, se tiene en cuenta que una situación crítica como pasar por un bache es suficientemente resistente sin llegar al límite de fluencia del material.

## 8.2 SIMULACIÓN ESTÁTICA DE LA CABINA

### 8.2.1 Modelo geométrico de la cabina.

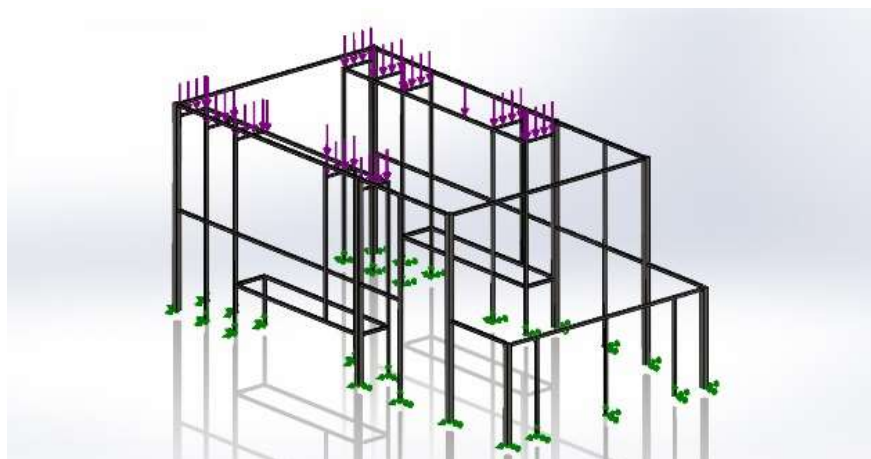
**Figura 27:** Modelo geométrico de la cabina



### 8.2.2 Cargas sobre la cabina.

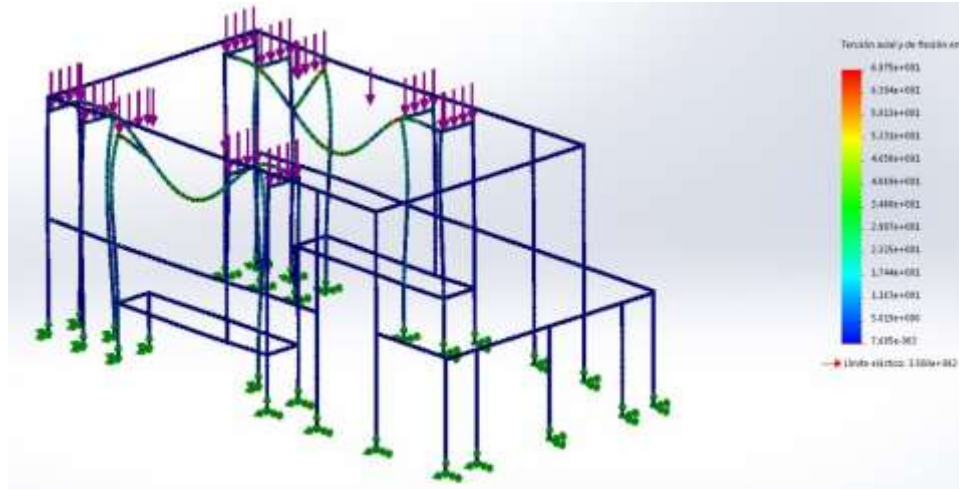
400Kgf que representa la carga de diseño requerida

**Figura 28:** Cargas sobre la cabina

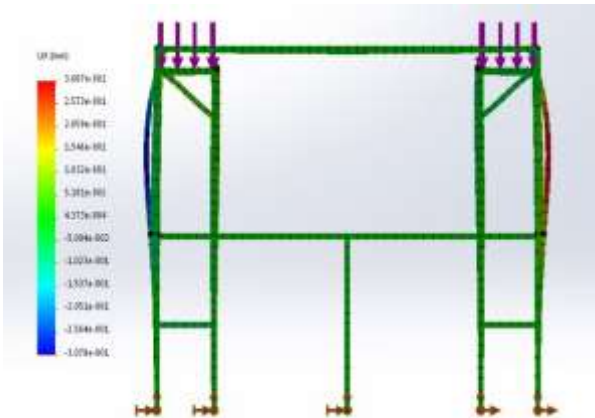


### 8.2.3 Resultados.

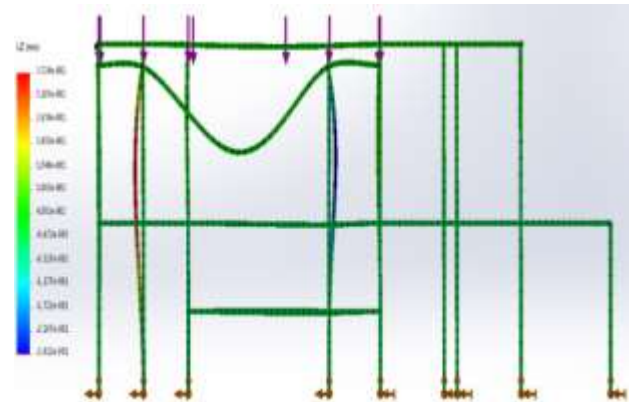
**Figura 29** Tensión axial y de flexión sobre la cabina



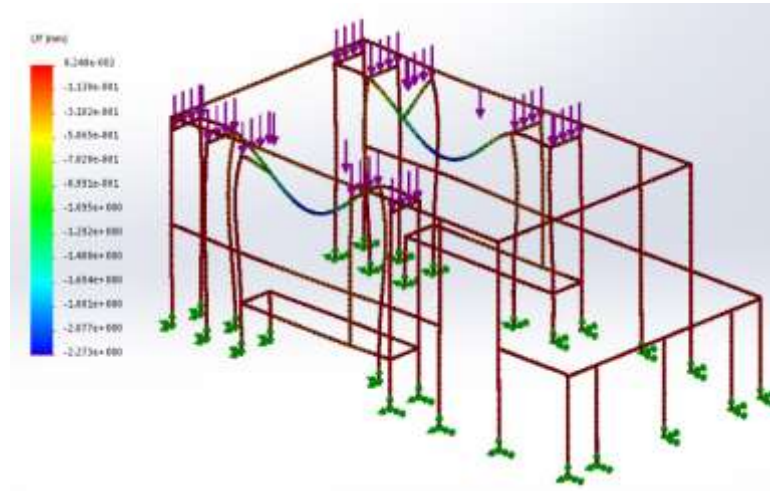
**Figura 30:** Deformaciones en X



**Figura 31:** Deformación en Z



**Figura 32:** Deformaciones en Y



**8.2.4 Resultado análisis estático.**

**Tabla 11.** Resultado análisis estático cabina

	tensiones de von mises [Mpa]	desplazamiento [mm]			desplazamiento resultante[mm]	factor de seguridad
		X	Y	Z		
<b>cabina</b>	69,75	0,307	-2,2	0,28	2,23	5

**8.3 SIMULACIÓN ESTÁTICA CASO COMBINADO CHASIS-CABINA**

**Figura 33:** Modelo geométrico chasis-cabina



### 8.3.1 caso 1 condición inicial.

- Carga permanente 1400Kgf+ 20%
- Carga de enganche 120Kgf
- Fuerza de tiro 246Kgf
- Aceleración longitudinal 6.91m/ s<sup>2</sup>

El remolque alcanza los 60km/h en un tiempo de 15 segundos por lo tanto en el centro de gravedad de la estructura actúa una fuerza producto de la inercia en dirección opuesta al movimiento para efectos prácticos de la simulación se introduce una aceleración en el eje longitudinal del remolque la cual multiplicada con la masa de la estructura equivale a la fuerza de inercia del remolque de masa de 2200kg

$$fi = m * a$$

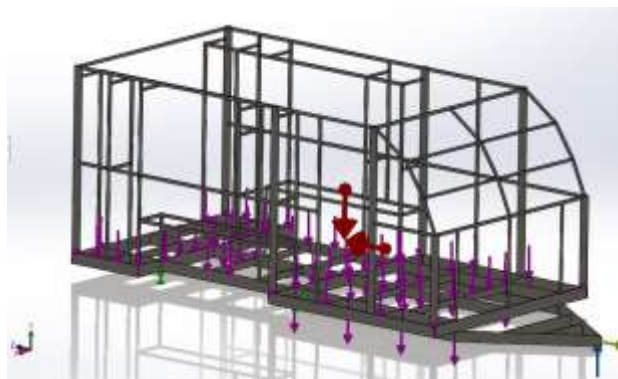
$$fi = 2200kg * 1.1 \frac{m}{s^2}$$

$$fi = 2420N$$

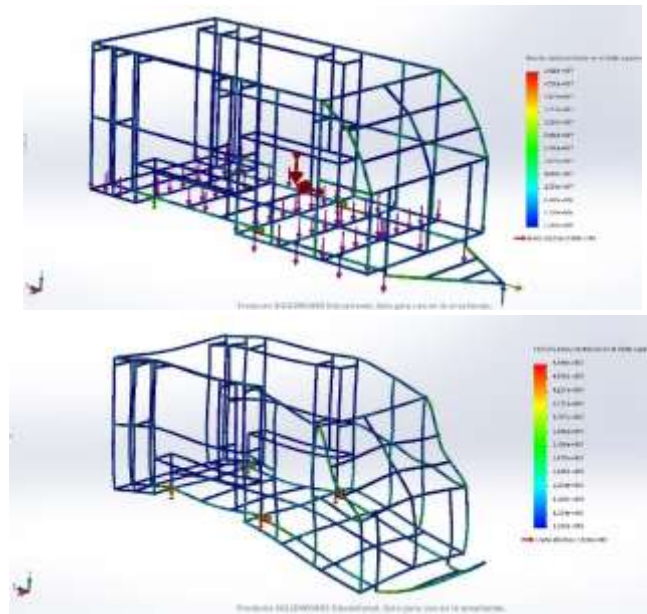
$$fi = m_{estructura} * a_i$$

$$a_i = \frac{2420N}{350kg} = 6.91 \frac{m}{s^2}$$

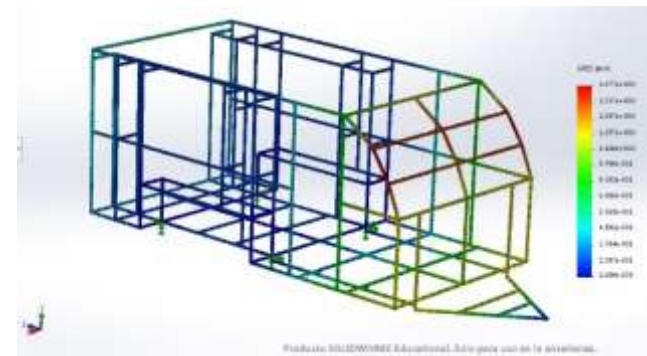
**Figura 34:** Cargas caso combinado



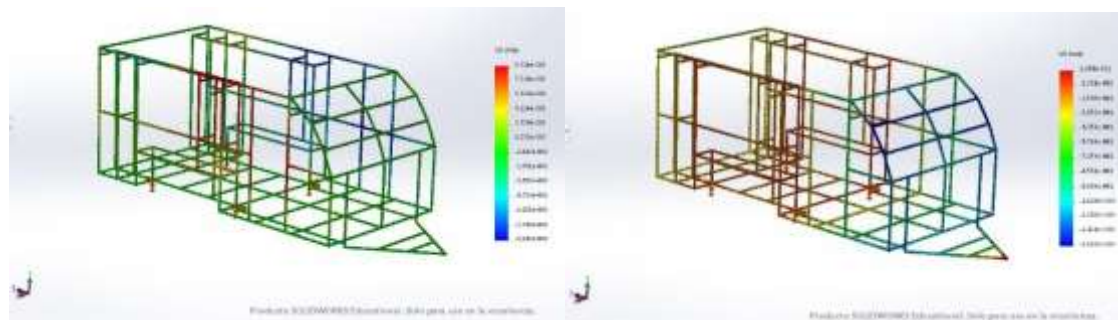
**Figura 35:** Esfuerzo axial y de flexión en el límite superior



**Figura 36:** Desplazamiento total



**Figura 37:** Desplazamientos  $U_x$ ,  $U_y$  [mm]



**Tabla 12**

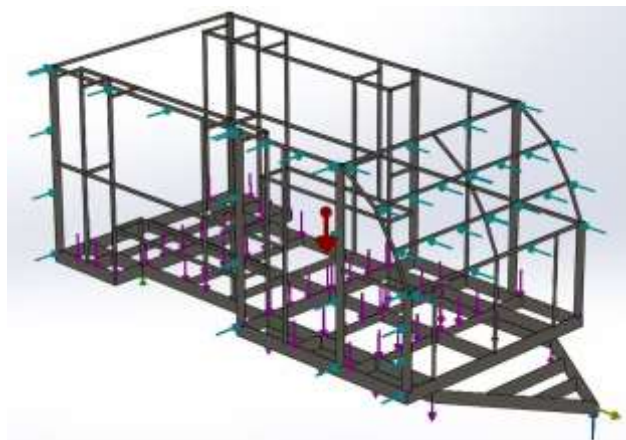
	Tensión axial y de flexión [Mpa]	desplazamiento [mm]			desplazamiento resultante[mm]	factor de seguridad
		X	Y	Z		
<b>Chasis cabina</b>	49.4	0.09	0.6	3.58	1.67	7

**8.3.2 caso 2 condición intermedia**

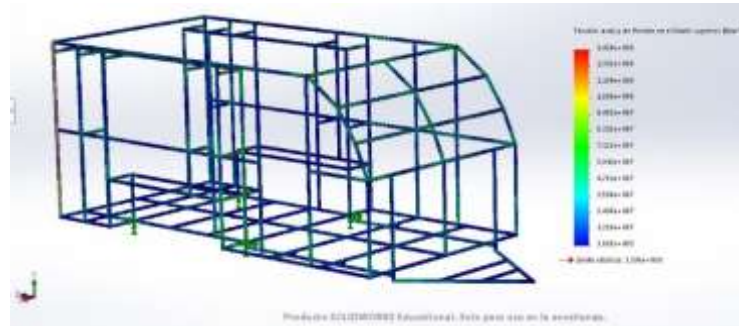
- Carga permanente 1400Kgf+ 20%
- Carga de enganche 120Kgf
- Fuerza de tiro 246Kgf
- Fuerza del viento frontal 15.6 kgf/m
- Fuerza del viento lateral 36.4 kgf/m

Para este caso en particular se tiene la acción del viento a una velocidad máxima del remolque de 100 km/h y la situación supuesta y crítica de vientos laterales de 100 km/h sin volcamiento del remolque.

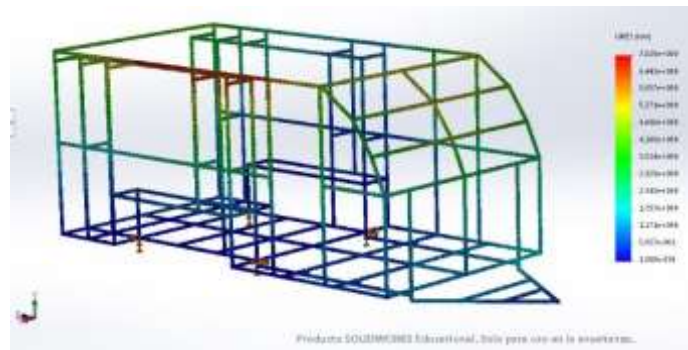
**Figura 38:** Distribución de las cargas caso 2



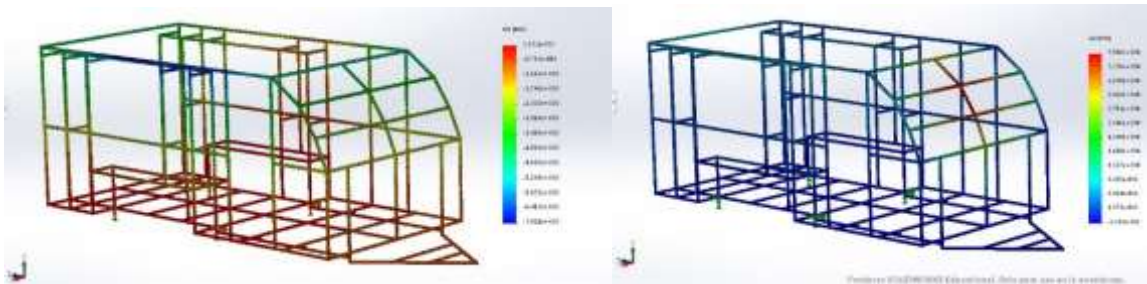
**Figura 39:** Esfuerzo axial y de flexión en el límite superior caso 2



**Figura 40:** Desplazamiento resultante caso 2



**Figura 41:** Desplazamiento  $U_x, U_z$  [mm] caso 2



**Tabla 13**

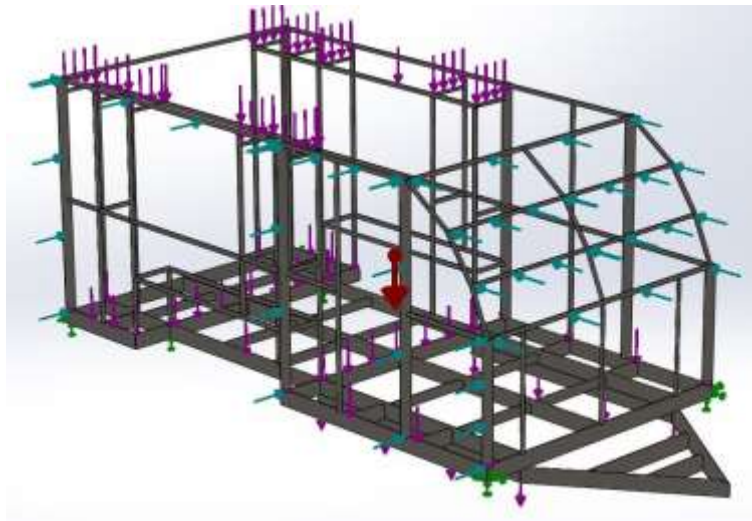
	Tensión axial y de flexión [Mpa]	desplazamiento [mm]			desplazamiento resultante[mm]	factor de seguridad
		X	Y	Z		
<b>Chasis cabina</b>	142	-7	-2.26	3.58	7.028	2.4

### 8.3.3 caso 3 condición especial

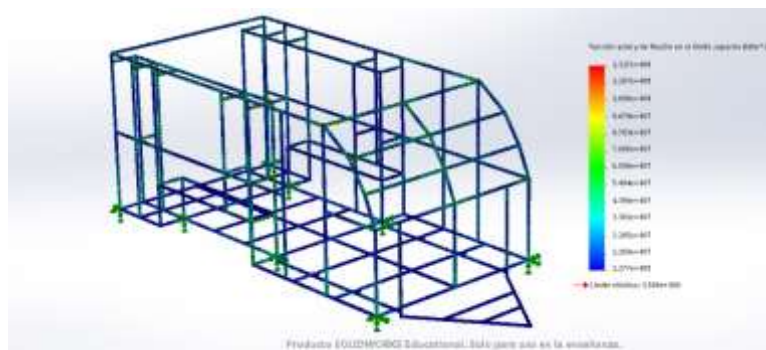
- Carga permanente 1400Kgf+ 20%
- Carga sobre la cabina 400Kgf
- Fuerza del viento frontal 15.6 kgf/m
- Fuerza del viento lateral 36.4 kgf/m

Condición en la cual el remolque se encuentra en estacionado con carga en la cabina y con cuatro apoyos fijos en los extremos, la cuatrimoto es retirada y su carga remplazada por la de 200 kg.

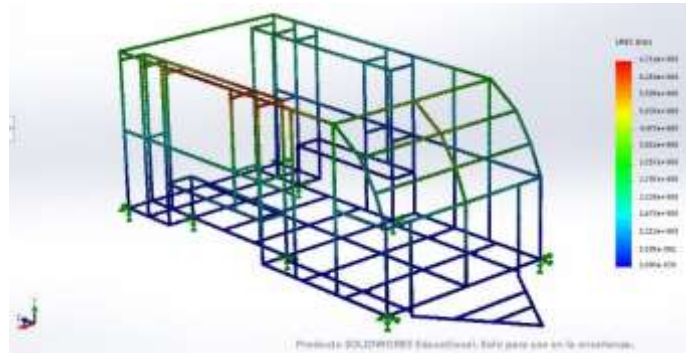
**Figura 42:** Distribución de las cargas caso 3



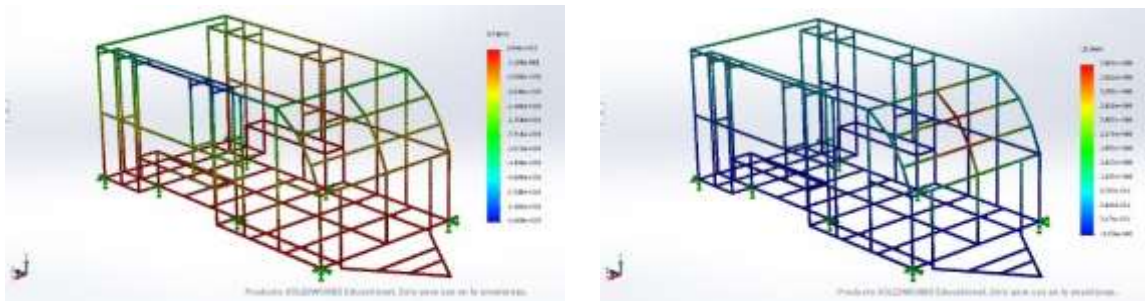
**Figura 43:** Esfuerzo axial y de flexión en el límite superior caso 3



**Figura 44:** Desplazamiento resultante caso 3



**Figura 45:** Desplazamiento  $U_x$ ,  $U_z$  [mm] caso 3



**Tabla 14**

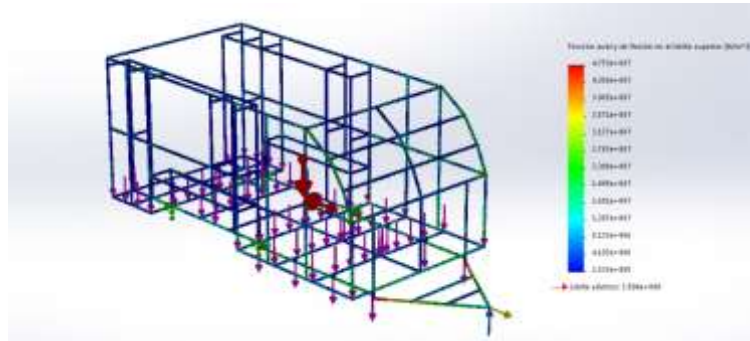
3	Tensión axial y de flexión [Mpa]	desplazamiento [mm]			desplazamiento resultante[mm]	factor de seguridad
		X	Y	Z		
<b>Chasis cabina</b>	131	6.6	-1.42	3.9	6.71	2.67

### 8.3.4 caso 4 condición especial 2

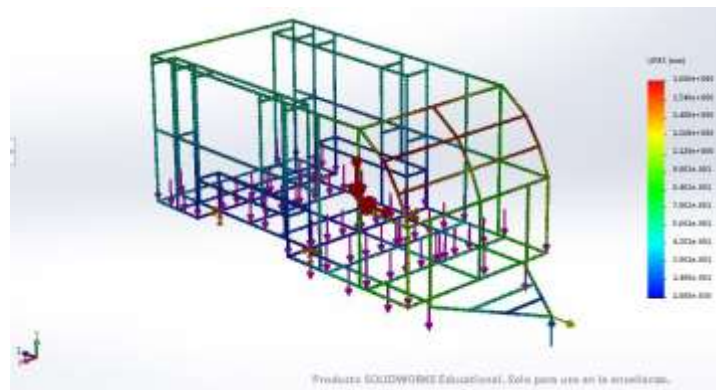
- Carga permanente 1400Kgf+ 20%
- Carga de enganche 120kgf
- Fuerza de tiro máxima 1200kgf
- Aceleración longitudinal 10 m/s<sup>2</sup>

Condición en la cual el remolque se encuentra en reposo e inicia el movimiento con una inclinación de 30 grados y terreno fangoso con la mayor resistencia a la rodadura.

**Figura 46:** Esfuerzo axial y de flexión en el límite superior caso 4



**Figura 47:** Desplazamiento resultante caso 4



**Tabla15**

4	Tensión axial y de flexión [Mpa]	desplazamiento [mm]			desplazamiento resultante[mm]	factor de seguridad
		X	Y	Z		
<b>Chasis cabina</b>	47.5	0.16	-1.3	1.17	1.68	7.3

### **8.3.5 Resultado análisis estático caso combinado.**

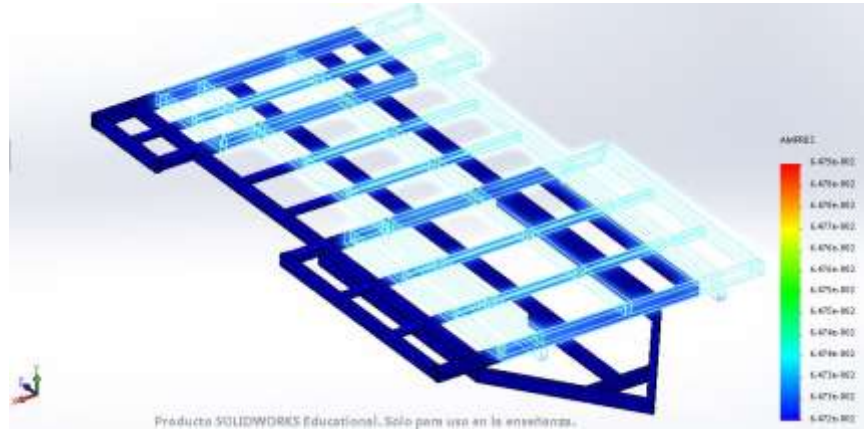
Los esfuerzos, desplazamientos y deformaciones máximas se encuentran en la cabina como se ve en la tabla 13 del caso 2 intermedios, en el cual se aplican las cargas de vientos combinadas frontal y lateral en una situación crítica que pone a prueba la resistencia estructural del remolque. Para aumentar la resistencia y disminuir los desplazamientos en la cabina se rigidiza colocando pie de amigo en las barras laterales. Para tener en cuenta el remolque interna y externamente está compuesto por paneles de madera contrachapada la cual aumenta la resistencia.

## **8.4 SIMULACIÓN DINAMICA ESTRUCTURAL DEL CHASIS**

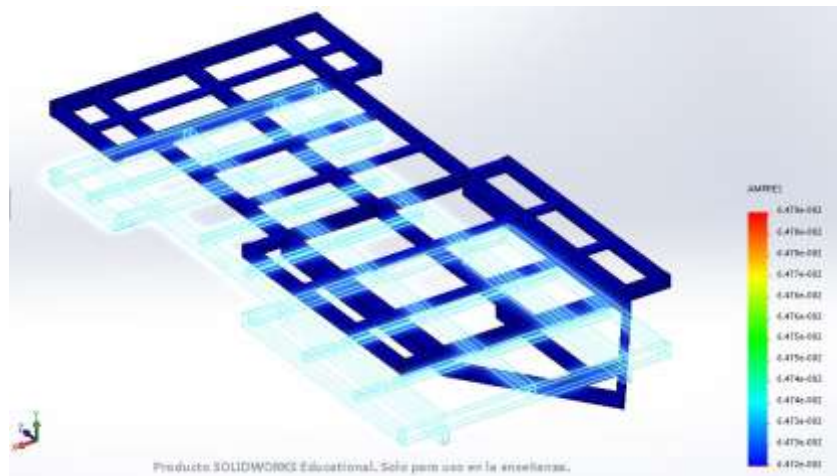
Se realiza el estudio de frecuencias mediante el método de elementos finitos, aplicando la condición conocida como free-free en la cual no tiene ninguna restricción o condición de frontera y no se aplica carga. Un modelo real tiene un número infinito de frecuencias naturales. Sin embargo, un modelo de elementos finitos tiene un número finito de frecuencias naturales que es igual al número de grados de libertad considerados en el modelo. Para la mayoría de los propósitos de los cálculos de frecuencia solo son necesarios los primeros modos. Mediante un análisis modal se puede verificar el comportamiento estructural que tendrá el chasis del remolque ante las vibraciones que recibe en las suspensiones las cuales son provenientes de las ruedas, producto de las irregularidades del terreno por el que se desplaza el remolque.

**8.4.1 Análisis modal del chasis (Análisis dinámico)** Se determina las diez primeras frecuencias y los correspondientes modos de oscilación o vibración.

**Figura 48** Modal 1 momento eje Z



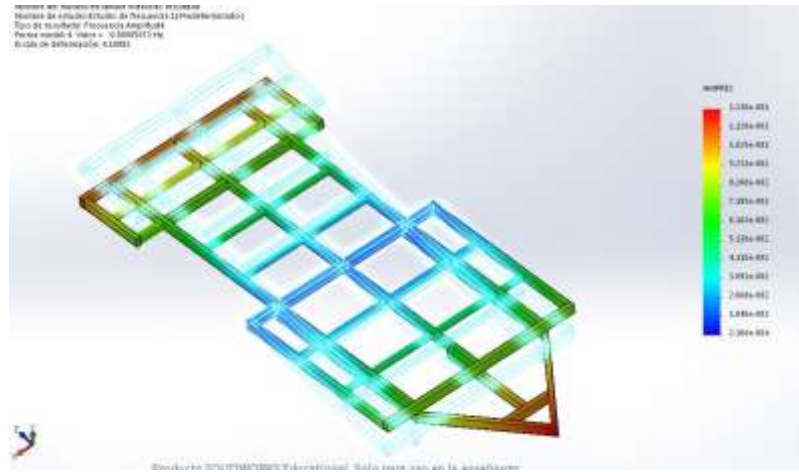
**Figura 49:** Modal 2 momento eje X



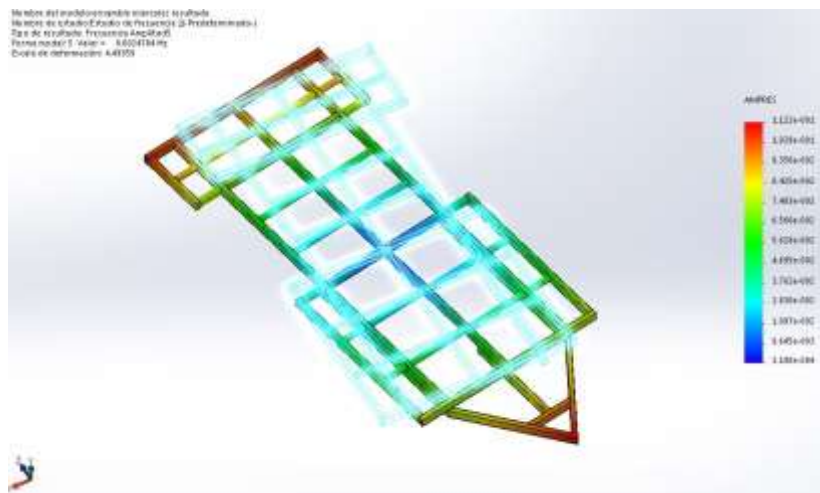
**Figura 50:** Modal 3 momento eje Y



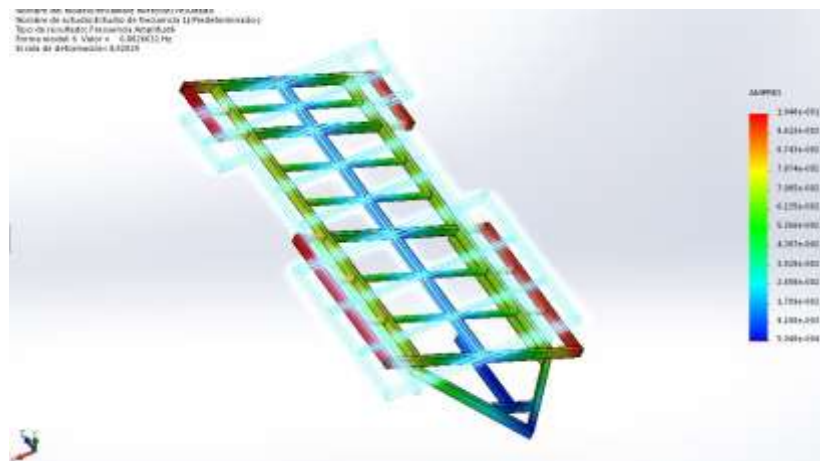
**Figura 51: Modal 4 momento eje X**



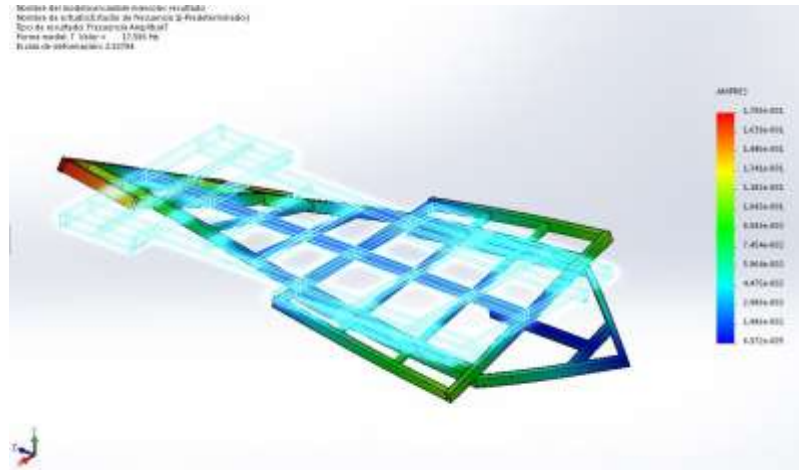
**Figura 52: Modal 5 flexión plano XZ un punto nodal**



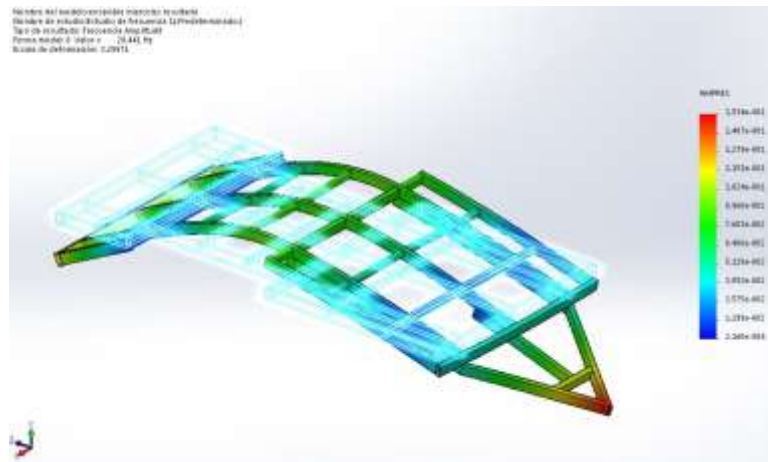
**Figura 53: Modal 6 flexión plano XY un punto nodal**



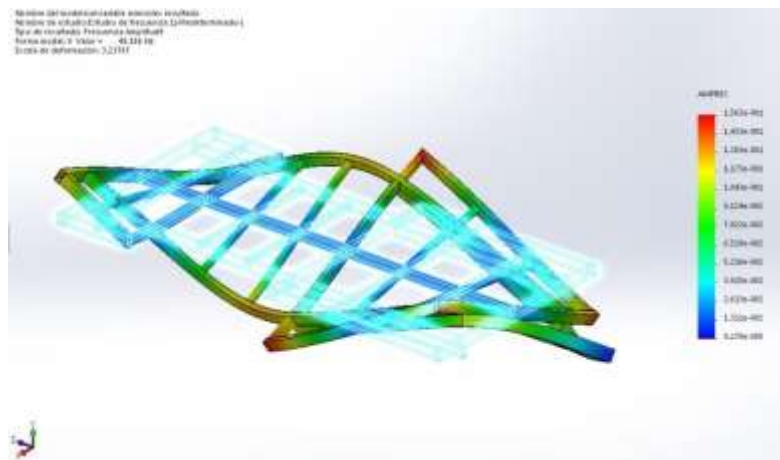
**Figura 54: Modal 7 torsión eje Z crítico parte trasera**



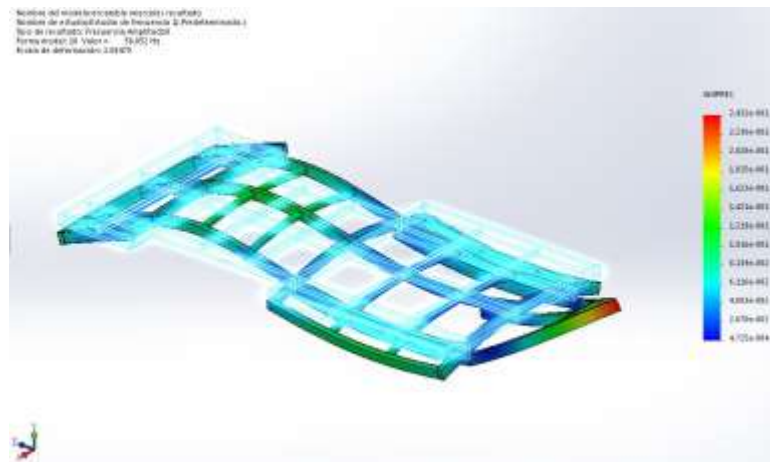
**Figura 55: Modal 8 momento eje X**



**Figura 56: Modal 9 torsión en Z**



**Figura 57:** Modal 10 momento eje X



#### 8.4.2 RESULTADO ANÁLISIS MODAL

**Tabla 16.** Análisis modal

Nº de modo	Frecuencia(Rad/seg)	Frecuencia(Hertz)	Período(Segundos)
1	1.0E-32	1.0E-32	1,00E+32
2	1.0E-32	1.0E-32	1,00E+32
3	1.0E-32	1.0E-32	1,00E+32
4	0.0053	0.0008507	1,00E+32
5	0.0156	0.0024784	902.19
6	0.0167	0.0026632	323.76
7	109.25	17.387	0.057513
8	126.96	20.441	0.049491
9	303.07	49.18	0.020732
10	366.02	58.253	0.017166

Las frecuencias naturales obtenidas son usadas para relacionar las condiciones operativas del remolque mientras los modos propios son usados para determinar si el diseño y posición de los componentes sobre el chasis es adecuado. Para Los tres

primeros modos se considera la estructura en una condición de modo rígido siendo prácticamente nulas las frecuencias y solo determinadas las primeras a partir del cuarto modo. Las fuentes de excitación de la carretera representa la principal perturbación, con valores típicos situados en un rango de 0 a 30 [Hz]<sup>5</sup>. Cuando éste se desplaza por una carretera o por caminos rurales, experimenta excitaciones provenientes de la mayor o menor rugosidad del suelo, cada una de estas fuerzas de excitación tiene una frecuencia característica, las que al coincidir con la frecuencia natural del modelo resultará en un fenómeno de resonancia las frecuencias de 1hz a 30 Hz son la que participan en la operación de un vehículo

---

<sup>5</sup> Irregularidades del terreno y vibraciones en vehículos. Disponible en : <https://books.google.com.co/ingenieria> del automóvil: sistemas y comportamiento dinámico

## **9. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MECANISMO LEVADIZO**

### **9.1 ANÁLISIS DEL DISEÑO DEL MECANISMO LEVADIZO**

El elevador debe ser de fácil ensamble y la Infraestructura donde va a alojarse no necesita modificaciones, además debe tener un sistema impulsor de fácil uso y mantenimiento

Construcción permisible: Algo muy importante que se debe tomar en cuenta es la factibilidad en el acceso a los materiales para la construcción del elevador, refiriéndose a costo asequible y que sus accesorios y repuestos se puedan encontrar en el mercado nacional.

### **9.2 PARÁMETROS DE DISEÑO**

Elevar un techo rígido de un remolque de área aproximada de 6m<sup>2</sup> a una altura de 80cm, el mecanismo debe ser resistente y funcional respecto al carácter propio de una caravana y presentar un funcionamiento práctico y seguro que garantice la exposición a las fuerzas de la naturaleza y resguarde en su interior un habitáculo para dos personas.

Área =6m<sup>2</sup>

altura=0.8m

masa =33.2kg

### **9.3 DISEÑO DE MECANISMO DE TIJERAS**

El principio de funcionamiento del elevador se basa en una estructura metálica que utiliza la geometría y funcionamiento de las tijeras para aumentar la distancia mediante la fuerza aplicada por actuadores eléctricos. Este tipo de mecanismo es simple y robusto, garantizando la operación con gran facilidad con solo una

conexión eléctrica de 12 voltios, además la forma y disposición de la estructura protege contra otras posibles cargas producidas por el viento lateral, frontal y la lluvia.

**Figura 58.** “Scissor lift”



Fuente: <http://www.serapid.com/lifting-systems/scissor-lifts>

**Figura 59.** Actuador eléctrico

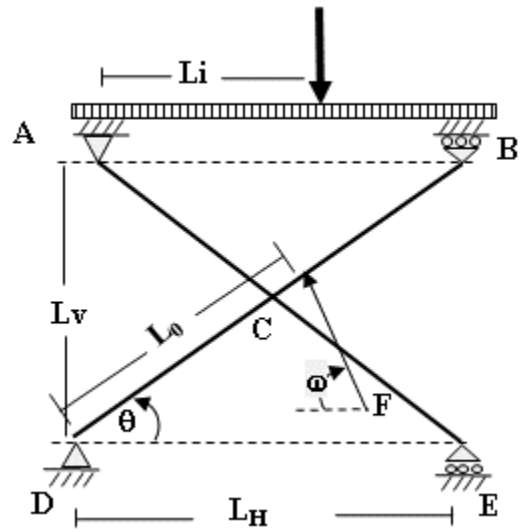


Fuente; <https://es.aliexpress.com>

Se calcula las reacciones en las posiciones superior e inferior. Para obtener la fuerza necesaria y la posición más desfavorable del mecanismo.

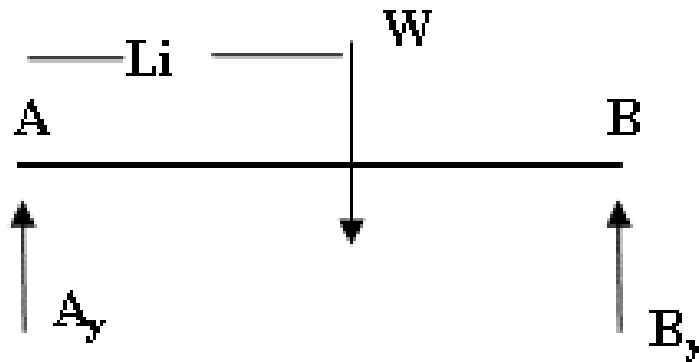
### 9.4 ANÁLISIS ESTÁTICO POSICIÓN SUPERIOR

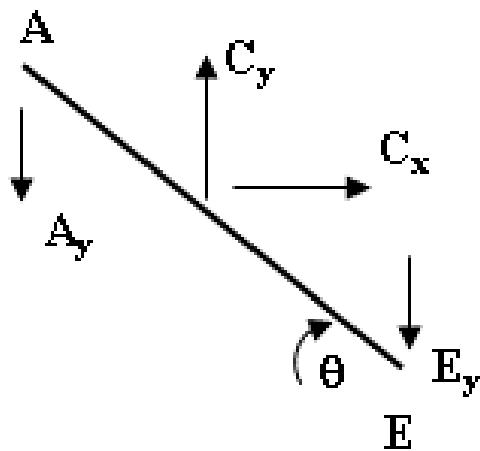
- Longitud de las barras  $\rightarrow L = 1,8 \text{ m}$
- Longitud de aplicación de la fuerza del actuador  $\rightarrow L_o = 1,1 \text{ m}$
- Longitud de aplicación de la carga del techo  $\rightarrow L_i = 1,01 \text{ m}$
- Theta ángulo de barra D-B  $\rightarrow \theta = 26^\circ$
- Omega ángulo actuador  $\rightarrow \omega = 76^\circ$
- Altura  $\rightarrow L_v = 0,8 \text{ m}$
- Carga sobre el techo  $W = 33,2 \text{ Kg}$
- Longitud D-E  $\rightarrow L_H = 1,6 \text{ m}$



### CÁLCULOS

#### Barra A-B





$$\sum M_A = 0 \Rightarrow -W * Li + L_H * B_y = 0$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y + B_y = W$$

### Barra A-E

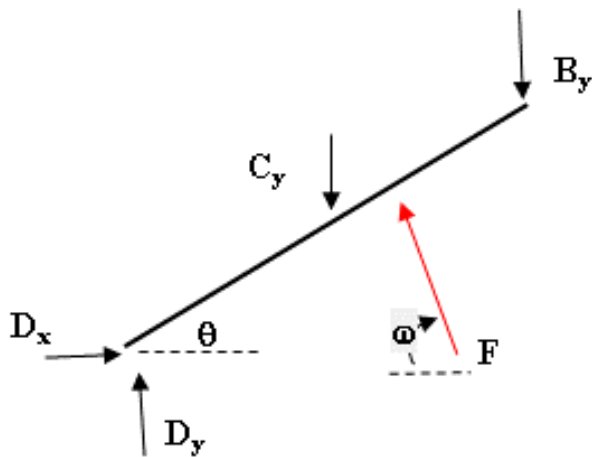
$$\sum F_x = 0 \Rightarrow C_x = 0$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow C_y - A_y - E_y = 0$$

$$\sum M_E = 0$$

$$A_y L \cos(\theta) - C_y \frac{L}{2} \cos(\theta) = 0$$

### Barra D-B



$$\sum F_x = 0$$

$$D_x = F \cos(\varpi)$$

$$\sum F_y = 0$$

$$D_y + F \sin(\varpi) - C_y - B_y = 0$$

$$\begin{aligned} \curvearrow + \sum M_D = 0 \\ -C_y \frac{L}{2} \cos(\theta) + F \sin(\varpi) L_0 \cos(\theta) + F \cos(\varpi) L_0 \sin(\theta) \\ -L \cos(\theta) B_y \end{aligned}$$

### 9.4.1 Solución de ecuaciones posición superior

La solución de las ecuaciones se realiza con el software EES

Reacciones posición superior

	Reacciones						
	$A_y$	$B_y$	$C_y$	$D_x$	$D_y$	$E_y$	F
Magnitud [KgF]	12,24	20,96	24,9	13,69	-2,219	12,24	49,58

### 9.5 ANÁLISIS ESTÁTICO POSICIÓN INFERIOR

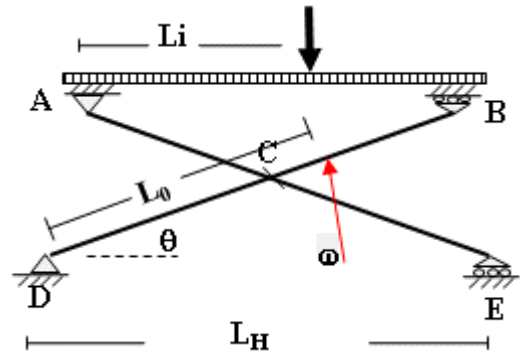
Para la posición inferior se obtiene la mayor fuerza y además tiene que vencer la inercia

Theta ángulo barra  $\rightarrow$  D-B  $\Rightarrow \theta = 2,5^\circ$

Omega ángulo actuador  $\rightarrow \omega = 74^\circ$

Altura  $\rightarrow$  6 cm

Longitud D-E  $\rightarrow L_H = 1,79$  m



#### 9.5.1 Solución de ecuaciones en posición inferior

Reacciones posición inferior

Magnitud	Reacciones						
	$A_y$	$B_y$	$C_y$	$D_x$	$D_y$	$E_y$	F
KgF	14,57	18,63	29,19	15,39	-5,88	14,57	55,88
Newton	142,33	182,85	235,7	152,49	57,63	142,8	55328

### 9.6 CÁLCULO Y DISEÑO DE LAS BARRAS

Se realiza los diagramas de esfuerzos cortantes, axiales y de momentos flectores, para determinar donde se encuentra la sección crítica de la estructura. El momento en el que se estudia las vigas es el más desfavorable, es decir, la posición inferior del mecanismo cuando inicia el movimiento y vence la inercia. Se diseña las barras

según la teoría de Bernoulli – Navier, mediante la hipótesis de flexión compuesta y todas las condiciones que impone.

$$\sigma(x, y, z) = \frac{N_x(x)}{A} * \frac{zI_z - yI_{yz}}{I_z I_y - I_{yz}^2} M_y(x) - \frac{yI_y - zI_{yz}}{I_z I_y - I_{yz}^2} M_z(x)$$

$$N_{max}=150N$$

$$V_{max}=355.26N$$

$$M_{max}=144.4N\cdot m$$

Se utiliza los esfuerzos y el momento obtenidos para diseñar la sección de las barras con la ecuación de Bernoulli-Navier.

$$\sigma_x = \frac{N_x}{A} \pm \frac{M_z}{I_z} * y \rightarrow \sigma_x = \frac{N_x}{A} \pm \frac{M_z}{W_z}$$

Para saber la tensión máxima que puede soportar el material se utiliza la teoría de fallo del esfuerzo cortante máximo o criterio de Tresca. Con un coeficiente de seguridad de 3

$$C_s=3$$

$$\sigma_f=250\text{mpa lamina de acero astm36}$$

$$\tau_{adm} = \frac{\sigma_f}{2C_s} = \frac{250\text{Mpa}}{2 * 3} = 41.66\text{Mpa}$$

$$\text{Según los círculos de Mohr } \tau_{max} = \frac{\sigma_x}{2}$$

$$\text{Por lo tanto } 2 * \tau_{adm} = \frac{N_x}{A} \pm \frac{M_z}{W_z}$$

Dos incógnitas, 'A' y 'Wz', relacionadas directamente, para Resolver se desprecia la carga axil, N=0, como se ve a continuación:

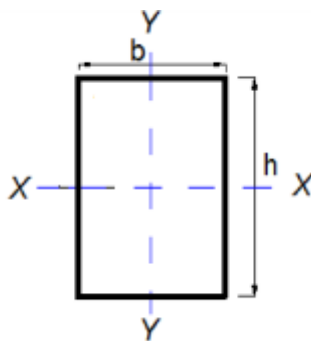
$$2 * \tau_{adm} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{144.3Nm}{W_z} = 83.32Mpa$$

$$W_z = 1.7286cm^3$$

Habiendo obtenido el módulo resistente se pasa a diseñar la sección, será una Sección rectangular, se asume y deja fijo la altura, h=5cm.

Con la sección transversal de la barra se asume.

Para una sección rectangular  $W_z = \frac{b \cdot h^2}{6} \rightarrow b = 0.464cm = 0.5cm$



Asumimos h=5cm

$$A = b \cdot h = 5cm \cdot 0.5cm = 2.5cm^2$$

$$W_z = 2.08cm^3 = 2080mm^3$$

Se comprueba con la ecuación.

$$\sigma_x = N_x/A \pm (M_z/I_z)$$

$$150/250mm^2 + (144.3N \cdot m \cdot 1000)/2080mm^3 = 70MPa$$

$$\tau_{max} = \sigma_x/2 = 35Mpa \leq \tau_{adm} = 41.65MPa$$

Como la tensión resultante es menor se utiliza esta sección para diseñar el mecanismo

Calculo de pasadores

La cortadura que se produce en estos pasadores es simple, ya que sólo hay un plano de corte.

$$N = 150N$$

$$\tau_F = 0.5 \cdot \sigma_F = 0.5 \cdot 250 = 125MPa$$

$$\tau_{adm} = \tau F / C_s = 125 / 3 = 41.66 \text{ MPa}$$

$$\tau_{adm} = F A / A = A = 150 \text{ N} / 41.66 \text{ Mpa} = 3.6 \text{ mm}^2$$

Se normaliza los diámetros de 6 mm para todos los pasadores que componen la estructura debido a las pequeñas cargas cortantes sobre ellos ver anexo 3.

**Figura 60.** Modelado del mecanismo de techo levadizo

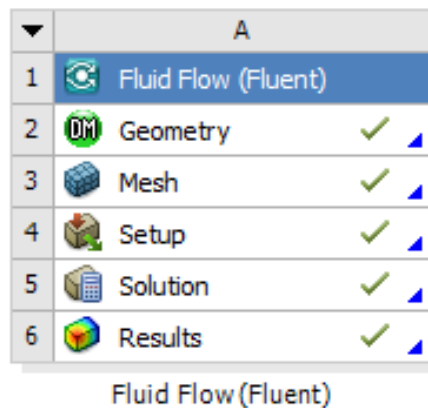


## 10. SIMULACIÓN CFD REMOLQUE

En el presente proyecto de grado se estudia 4 opciones de perfil aerodinámico para el remolque, estos perfiles se simulan con y sin el vehículo automotor para analizar el comportamiento Aerodinámico. Para ello, se muestra detalladamente el proceso de simulación de un solo perfil, entendiéndose que para los demás es el mismo, donde solamente varía el modelado 3D.

Se realiza una simulación CFD en el programa seleccionado Ansys Fluent versión 15.0 con licencia. Para obtener resultados óptimos consta principalmente de 5 etapas, las cuales son: generación de modelado 3D, generación de malla en el dominio, configuración, resolución de ecuaciones y análisis de resultados.

**Figura 61.** Etapas del proceso de una simulación CFD



A continuación, se explica detalladamente el proceso de cada etapa.

## 10.1 GENERACIÓN DE MODELADO 3D

El modelado 3D se creó en el programa CAD (SolidWorks). Lo primero que hay que hacer es importar dicho modelado al software Ansys. Para esto se pulsa el segundo parámetro del cuadro de dialogo "Geometry" esto abre una nueva ventana llamada "DesingModeler". En esta ventana se importará el modelado a estudiar, para esto, "File", "Import external geometry file" y por ultimo "Generate".

Luego que se ha importado la geometría al programa, se realizan tres pasos: "Enclosure", "Simetría" y "Boolean".

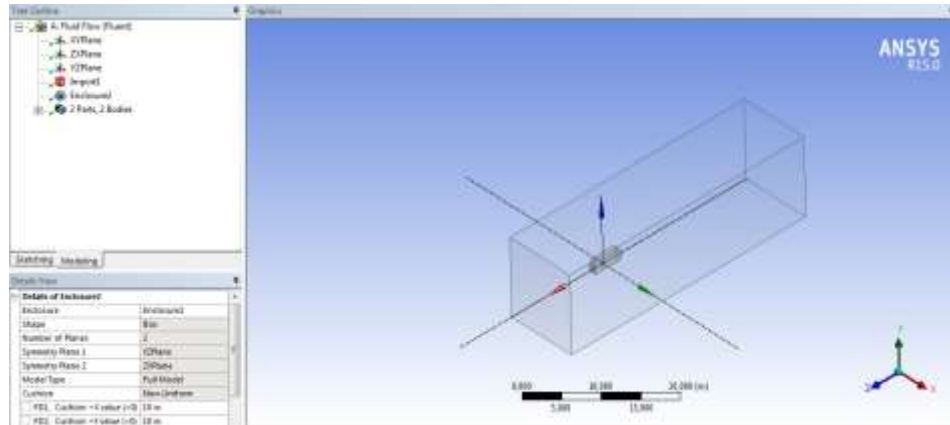
**10.1.1 "Enclosure".** El proceso de "enclosure" o encapsulado, simula un túnel de viento donde se trasportara a una velocidad determinada el fluido circundante, se representa en varias formas geométricas. Para este caso escogeremos la forma de "Box" y se asignara dimensiones específicas para garantizar resultados óptimos. Para esto: "Tools", "Enclosure". Las dimensiones que se especifican para el túnel (Box) se obtuvo del manual "Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT", las cuales son:

- Anchura: Cinco veces la anchura del modelo
- Altura: Cinco veces la altura del modelo
- Longitud: Tres veces la longitud de modelo en la parte frontal y cinco veces en la parte posterior

**10.1.2 Simetría.** Este proceso se realiza con el objetivo de simplificar el modelo y agilizar el tiempo de simulación, no se afecta el resultado de la simulación ya que el comportamiento del fluido al rodear el objeto será el mismo simétricamente, se puede escoger cual lado omitir y cual lado estudiar. Esto se realiza de la siguiente manera: cuando se está definiendo las medidas al "Enclosure" "Number of planes" se selecciona 2, "simetry plane 1" se selecciona "ZXPlane" y "simetry plane 2" se

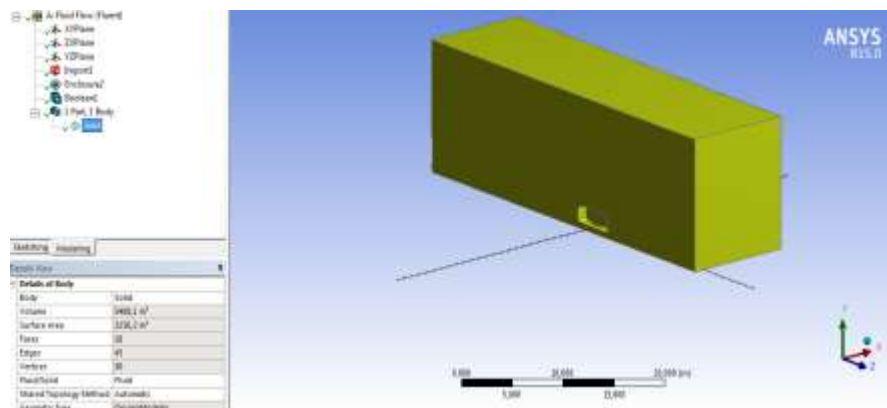
selecciona el plano paralelo a la longitud de la geometría a estudiar. Por último “Generate”.

**Figura 62.** Simetría y “Enclosure”



**10.1.3 “Boolean”.** Este proceso se realiza para sustraer el aire del volumen que ocupa el objeto sólido, esto confirma al programa que las paredes exteriores del objeto son estacionarias. Para esto, “Create”, “Boolean”, “Operation” luego se selecciona “Subtract”, “Target bodies” se selecciona el túnel creado anteriormente, “Tool bodies” se selecciona el objeto sólido. Por ultimo “Generate”.

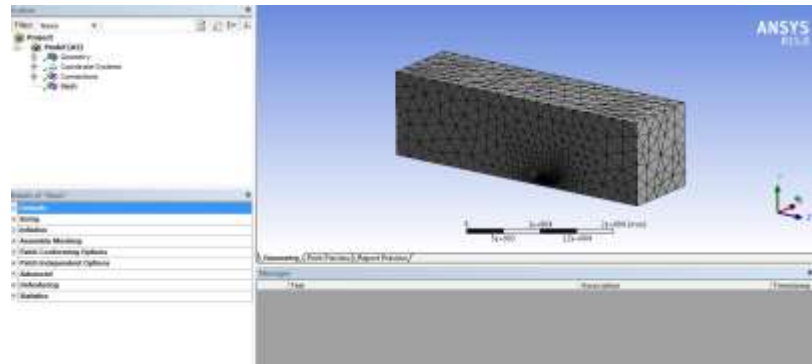
**Figura 63.** “Boolean”



Posteriormente se realiza un croquis con el fin de controlar el mallado del volumen cerca al objeto. Se realiza de la siguiente manera: seleccione el plano paralelo a la



Figura 65. Mallado básico



La primera malla que genera Ansys es la que viene por defecto, no obstante, ansys permite modificar algunos parámetros de la configuración de la malla para generarla un poco mejor para el estudio, a continuación, se hablará sobre los parámetros que se podrían alterar a conveniencia dejando los menos importantes con su configuración predeterminada que el programa nos arroja por defecto.

**10.2.1 “Defaults”**. En este parámetro se especifica las condiciones para la cual se está realizando el mallado. Es importante tener claro que se desea hacer con la simulación, en este caso es un análisis aerodinámico del comportamiento del viento al rodear un objeto.

- **“Physics preference”** CFD, por ser un estudio de fluidos.
- **“Solver preference”**: Fluent, por ser un análisis aerodinámico externo.
- **“Relevance”**: “0”, para una configuración rápida. Oscila entre 100 y -100 determinando que tan fina o que tan gruesa la malla.

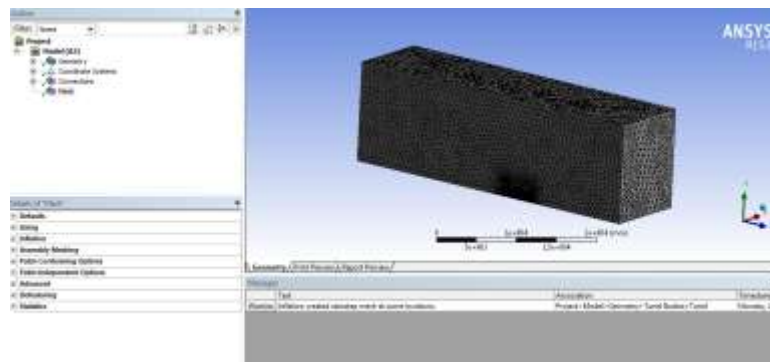
**10.2.2 “Sizing”**. Es el dimensionamiento para determinar forma, tamaño y distribución de la matriz del mallado. Lo ideal es un mallado fino en curvas, cavidades y cambios de sección.

- Use **“advanced size function: proximity and curvature”**, para refinar la malla en proximidades y en curvaturas.

- “Relevance center”: “Fine”, para que la malla sea lo más detallada posible.
- “Span angle center”: “Fine”, para que la malla sea lo más detallada posible.
- “Curvature normal angle”: 12

**10.2.3 “Inflation”**. En este parámetro se presencia la transición de los elementos que componen la malla, tomamos la configuración de “First aspect ratio” basados en la literatura de “Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT”. Luego de haber realizado todas las configuraciones correspondientes a los parámetros nombrados se genera una malla de nuevo.

**Figura 66.** Mallado configurado



Al final el resultado de la malla con una configuración especificada es notablemente más detallado que la que Ansys arroja por defecto. Ver figura 66

Como el volumen del túnel de viento es considerablemente mayor al volumen del remolque, se realiza una “Sub malla en detalle” para decirle al programa que analice minuciosamente las diferentes áreas que se señalan siendo de principal interés. Para esto, clic derecho en “Mesh”, insertar “Sizing”, a la geometría se le indica que se desea un cuerpo de influencia señalando el volumen creado indicando que realice un estudio más detallado en ese volumen especificando cual tamaño de elementos se desea, para este caso se usa “100mm”. Ver figura 71

Figura 67. Mallado por defecto vs Mallado configurado

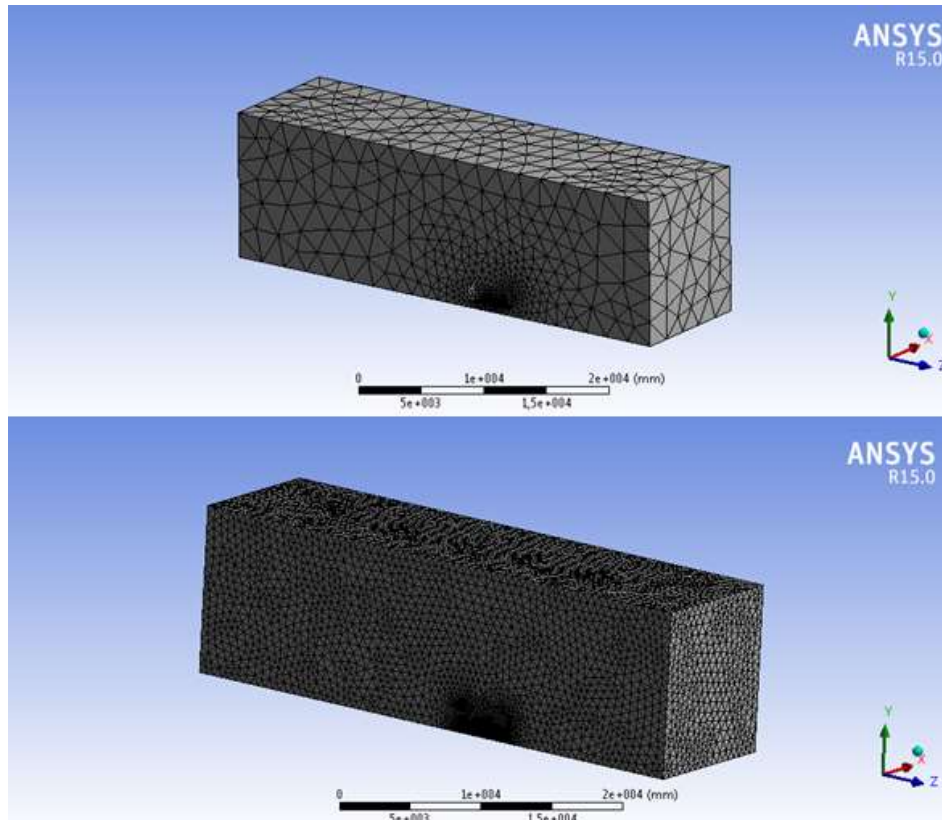
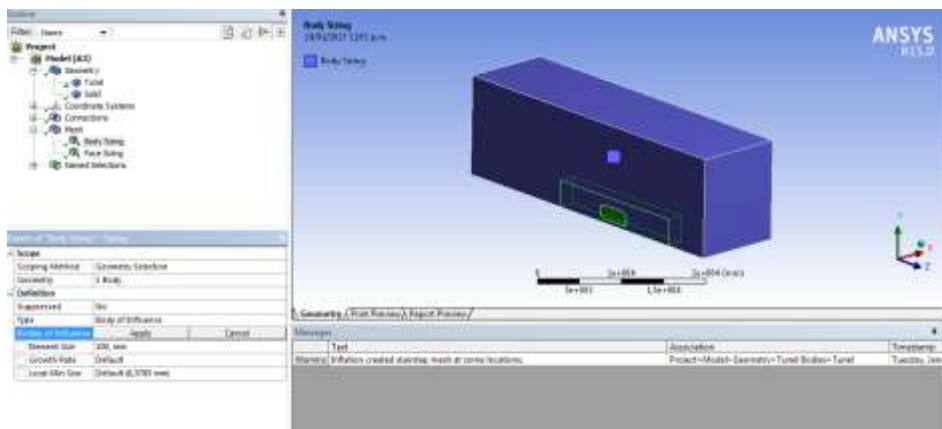
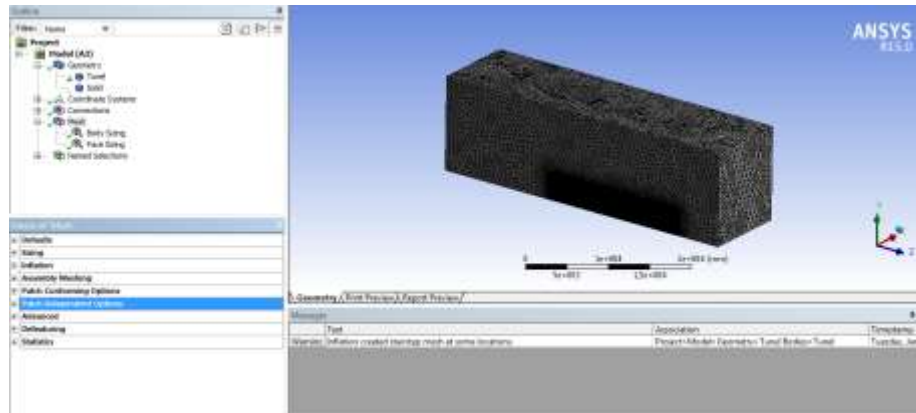


Figura 68. Volumen de influencia



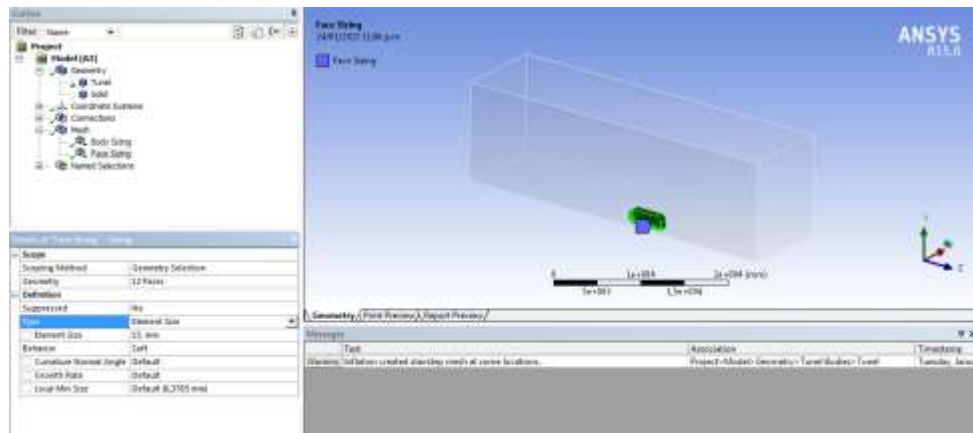
Al generar la malla se puede observar que Ansys toma una malla más fina en el volumen de influencia que la anterior.

**Figura 69.** Mallado del volumen de influencia



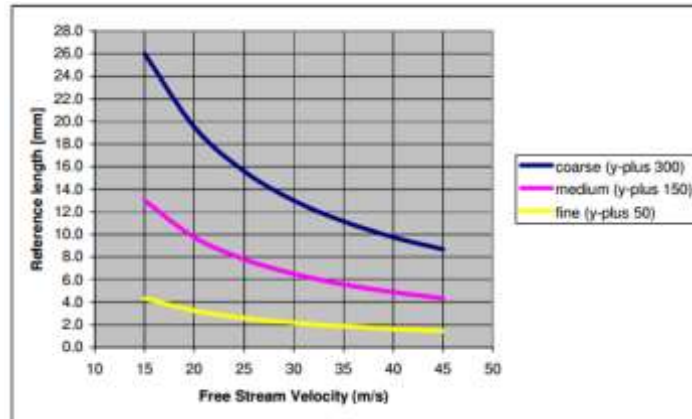
Para garantizar un mejor estudio en el volumen deseado (Modelado 3D), se realiza otra “Malla en detalle” sobre áreas de influencia, para esto, clic derecho en “Mesh”, insertar “Sizing”, se selecciona las áreas en que se desea el estudio en más detalle.

**Figura 70.** Volumen del remolque



Se configura el tamaño de elementos que se desea a “13mm” en este caso, se recuerda que entre más fina tenga la malla más exactos son los resultados de la simulación. Los datos del tamaño de elementos para una velocidad de 30m/s son obtenidos por el método gráfico de la figura 71.

**Figura 71.** Metodo gráfico para determinar la calidad de la malla

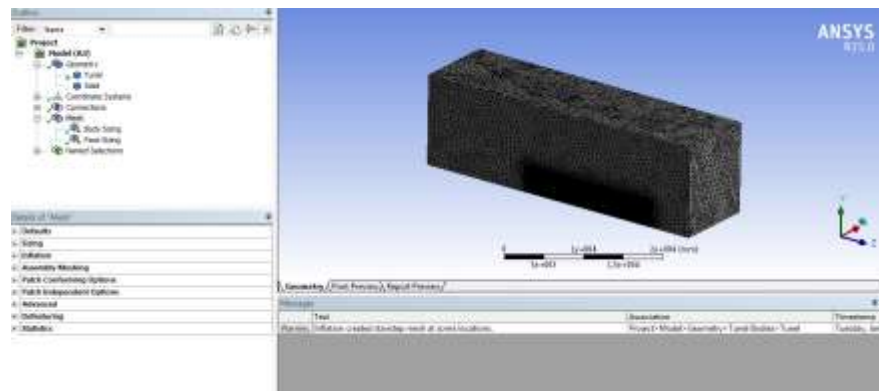


Fuentes: Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT. Donde indica que la calidad del mallado se puede especificar con el número de elementos de malla tomados en las estadísticas

- Mallado grueso: 2-5 millones de elementos
- Mallado medio: 5-10 millones de elementos
- Mallado fino: más de 10 millones de elementos

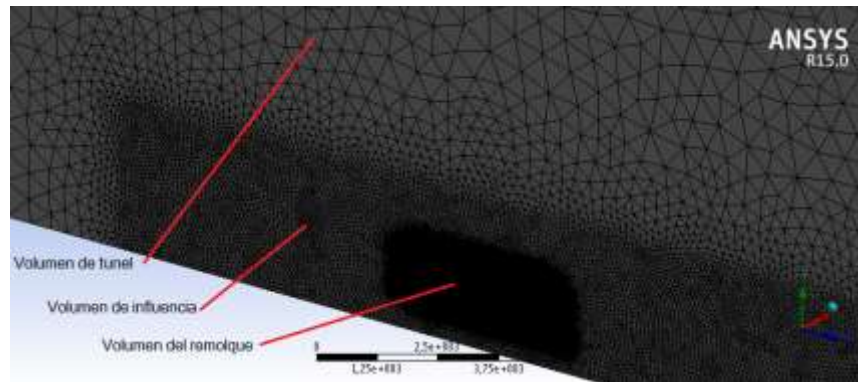
Luego que se genera la malla, se observa que en las áreas de influencia la malla es mucho más fina, esto se realiza para que la simulación sea más detallada en las áreas donde se encuentra.

**Figura 72.** Mallado del volumen del remolque



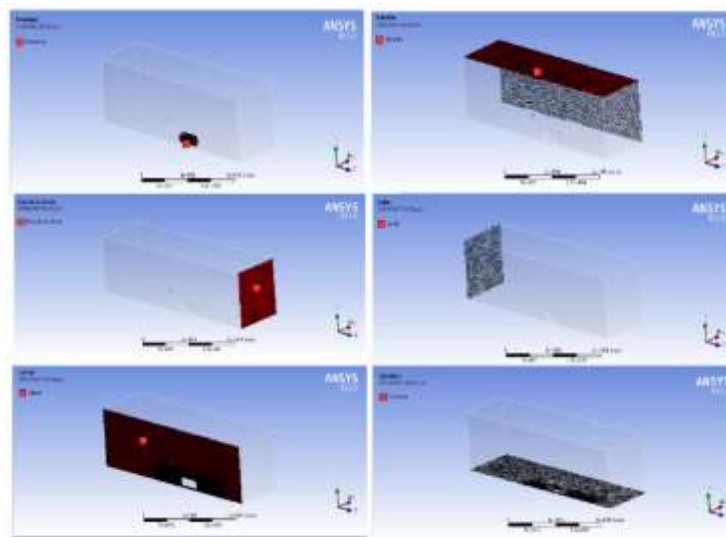
En más detalle se muestra que tanto el volumen de influencia como el volumen ocupado por el remolque, el mallado obtenido es mucho más fino que en otras áreas de poca influencia.

**Figura 73.** Detalle de las diferentes mallas



Luego de realizar el mallado se procede a nombrar las paredes del modelo de simulación para configurarlas según el comportamiento deseado. Para esto, se ubica en cada cara del túnel, incluyendo el remolque, clic derecho, “*Create named selection*” se coloca el nombre que se desea y luego se define que son: entrada de viento, salida de viento, carretera, lateral, simetría y remolque.

**Figura 74.** Asignación de nombres a las caras del túnel



Con el nombre de las secciones se da por terminado el segundo parámetro de simulación, lo que da paso al tercero “Setup”

### 10.3 “SETUP”

Este paso es muy sencillo, aquí se encuentra una ventana donde pide indicar si se desea un proceso de doble precisión, en serie o paralelo y configuraciones sobre colores en la pantalla. En este caso se escoge la configuración que trae por defecto por motivos de memoria del computador utilizado, no existen variaciones a la hora de los resultados de la simulación.

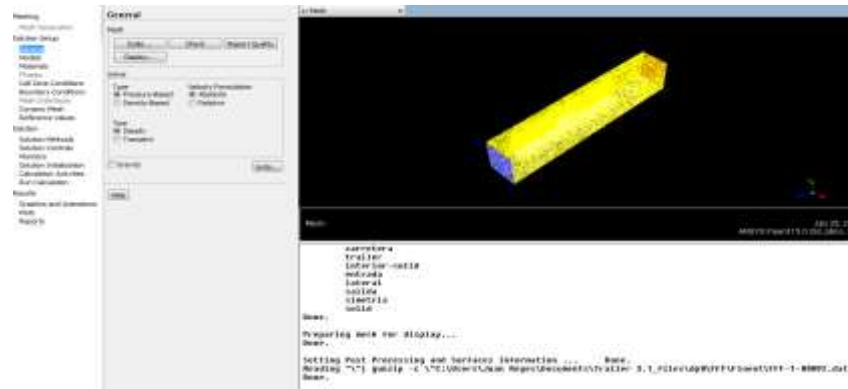
Figura 75. “Setup”



### 10.4 “SOLUTION”

En esta etapa del estudio se toma el tiempo para explicar cada pauta de la configuración que se realiza para dar solución. Lo primero que se debe hacer es revisar si identificó correctamente el modelo, sacando datos máximos y mínimos de áreas, volúmenes y extensiones de dominio. Asegurarnos de que ningún resultado de un valor negativo.

**Figura 76.** Configuración de la solución



**10.4.1 “Models”**. Aquí se selecciona el modelo en el cual se va a efectuar en la simulación, teniendo en cuenta que existen diferentes tipos entre ellos “Viscous” donde se asigna características a nuestro fluido. Ansys por defecto lo toma como flujo laminar, pero para este caso tomaremos k-epsilon (2 eqn), “realizable” ya que es un tipo de modelo mucho más factible comparado con los demás y “Non equilibrium” es el comportamiento más acertado en un análisis aerodinámico donde existan cambios de presión y divisiones de flujo.

**10.4.2 “Materials”**. Anteriormente se mencionó que el fluido en el cual se iba a tomar para la simulación iba ser aire, en esta etapa del proyecto permite configurar las propiedades de este tales como: densidad y viscosidad. El material del solido 3D que se está estudiando es irrelevante, ya que solo se estudiará el comportamiento del viento cuando impacta diferentes superficies sólidas.

**10.4.3 “Boundary conditions”**. Ansys por defecto toma todas las caras anteriormente nombradas como paredes estacionarias sin deslizamiento, cosa que es real solamente para las paredes del solido 3D y la carretera. Es aquí donde se debe asignarle las condiciones limites a cada cara, a continuación, se indica brevemente el tipo de condición a cada una de las caras mencionadas.

- Carretera Tipo: “Wall”, pared estacionaria sin deslizamiento
- Remolque Tipo: “Wall”, pared estacionaria sin deslizamiento
- Lateral Tipo: “Symmetry”, tomado como una herramienta para facilitar la simulación
- Simetría Tipo: “Symmetry”, tomado como una herramienta para facilitar la simulación
- Salida Tipo: “Pressure outlet”, “0” pascales de presión para no crear volumen cerrado.
- Entrada de viento Tipo: “Velocity-inlet” se especifica la entrada de viento por esta cara a una velocidad y dirección determinada (30m/s)

**10.4.5 “Reference values”**. La configuración de esta etapa es muy importante especificar las condiciones fronteras del cálculo de la simulación para los obtener resultados concisos de coeficientes de arrastre. Para esto, se indica que el cálculo comience desde la entrada de viento, el área es la sección transversal del remolque a la dirección del movimiento del fluido. Los demás parámetros se dejan por defecto

**10.4.6 “Solution methods”**. El esquema seleccionado ha sido “Coupled” ya que resuelve ecuaciones de presión, turbulencia y velocidad al mismo tiempo, haciendo más eficiente la simulación realizándola en menor tiempo. En la discretización se toma el parámetro estándar de la presión y turbulencia de primer orden ya que convergen en menor tiempo.

**10.4.7 “Solution controls”**. Numero de courant, es el cociente entre el tiempo de simulación y los elementos de la malla, para este caso se toma de 50.

**10.4.8 “Monitors”** . En este parámetro se escoge las variables que se quiera graficar durante la simulación, por defecto esta activada los residuos de las soluciones de ecuaciones diferenciales. En el coeficiente de arrastre, “Create”, “Drag” activar “print to console”, “plot”, “write”, se selecciona las caras donde se

desea que se aplique dicho coeficiente (Remolque) y se selecciona el vector. Para este caso el coeficiente de arrastre se encuentra en la componente vectorial del movimiento del flujo.

**10.4.9 “Solution initialization”**. Para empezar la simulación existen dos opciones, la inicialización estándar y la híbrida. En la inicialización estándar Ansys toma todos los elementos de malla en las condiciones iniciales a la misma velocidad y la inicialización realiza 10 iteraciones que arrojan como resultados datos un poco más reales. En este caso se escoge inicialización híbrida por las razones anteriormente mencionadas.

**10.4.10 “Run calculation”**. Esta es la última etapa de las condiciones iniciales, se especifica el número de iteraciones que se desea para la solución de ecuaciones diferenciales y se calcula. El número iteraciones debe ser suficiente para que los resultados converjan hasta que el modelo se estabilice.

Durante la simulación, se puede observar el comportamiento de las variables que se ordenó graficar, en este caso se puede observar el comportamiento del coeficiente de arrastre y los residuos de las interacciones. Teniendo en cuenta que se espera que los residuos sean menores a medida que avanzan las iteraciones, el comportamiento esperado es un decaimiento continuo acercándose a un valor aproximado de cero. El comportamiento esperado en el coeficiente de arrastre es que se estabilice dentro del rango de valores lógicos a medida que avance las iteraciones.

## 10.5 RESULTADOS

Al finalizar la simulación en el programa de Ansys Fluent, se observa los diferentes resultados que este arroja, cada parámetro de resultados tiene un comportamiento característico. Siendo Ansys un programa con una gama de resultados bastante amplia, solo se tiene en cuenta los que sean de interés, tales como.

- Coeficiente aerodinámico
- Perfil de presiones
- Perfil de velocidades
- Perfil de turbulencias

Se estudiaron diferentes perfiles aerodinámicos para el remolque diseñado, por lo tanto, se simulará con cada uno, estudiando el comportamiento de cada perfil del remolque y el comportamiento del perfil del remolque seleccionado acoplado al vehículo automotor.

A la hora de analizar los resultados vamos a estudiar varios aspectos, entre ellos:

**10.5.1 Geometría.** Para facilitar la geometría se excluyeron detalles mininos como espejos, remaches, puertas, ventanas, luces, entre otros. Esto no afectará en gran valor los resultados obtenidos ya que las áreas de los accesorios son irrelevantes en comparación de lo que presenta la mayor resistencia aerodinámica, que es el área normal proyectada del remolque a la dirección del viento.

**10.5.2 Coeficiente de arrastre.** Se espera con las iteraciones determinadas que el comportamiento del coeficiente se estabilice. Se dice que el modelo está estabilizado cuando ha pasado un cierto número de iteraciones y el valor de tres cifras del coeficiente no varía. Se desea obtener el mínimo valor, ya que entre menor sea la resistencia al arrastre más aerodinámico será el perfil, notándose principalmente en el ahorro de combustible.

**10.5.3 Perfil de velocidades.** Se puede observar detalladamente la dirección y magnitud de velocidad en cada punto deseado. En el perfil de velocidad se analiza su comportamiento en tres partes, frontal, posterior y techo.

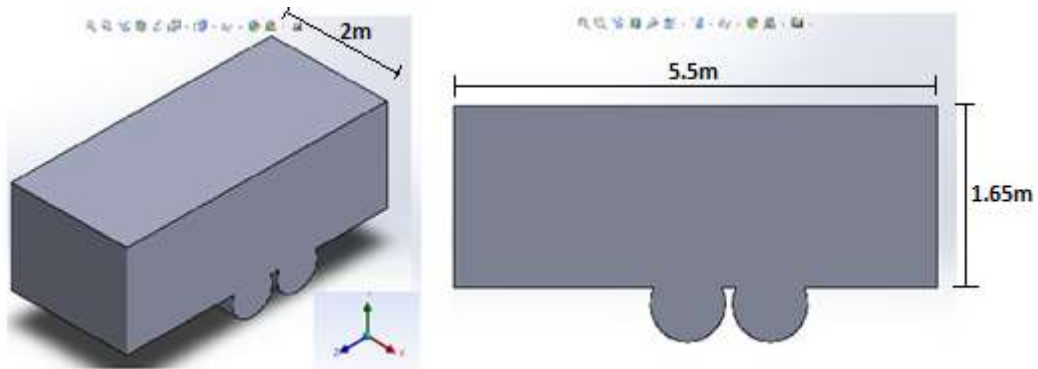
**10.5.4 Perfil de presiones.** Se evidencia en qué lugar existen sobrepresiones y depresiones.

**10.5.5 Perfil de turbulencia.** Muestra donde se presentan turbulencias. Se desea que se formen las mínimas posibles.

## 10.6 REMOLQUE 1

### 10.6.1 Geometría básica de un remolque.

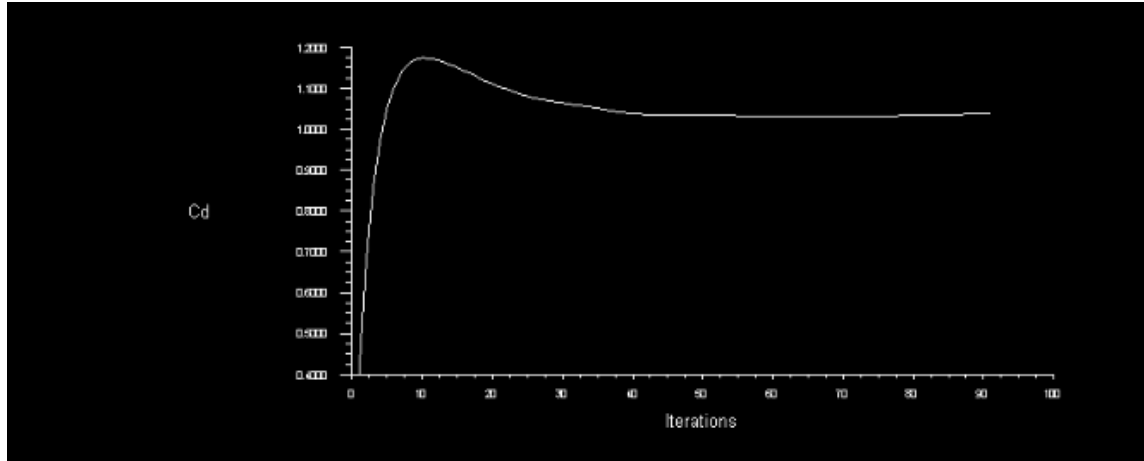
**Figura 77.** Geometría remolque 1



Las dimensiones y coordenadas del remolque no varían en las demás geometrías, ya que los cambios realizados se efectuarán solamente en la geometría externa sin alterar su tamaño o coordenadas.

### 10.6.2 Coeficiente de arrastre.

Figura 78. Coeficiente de arrastre remolque 1

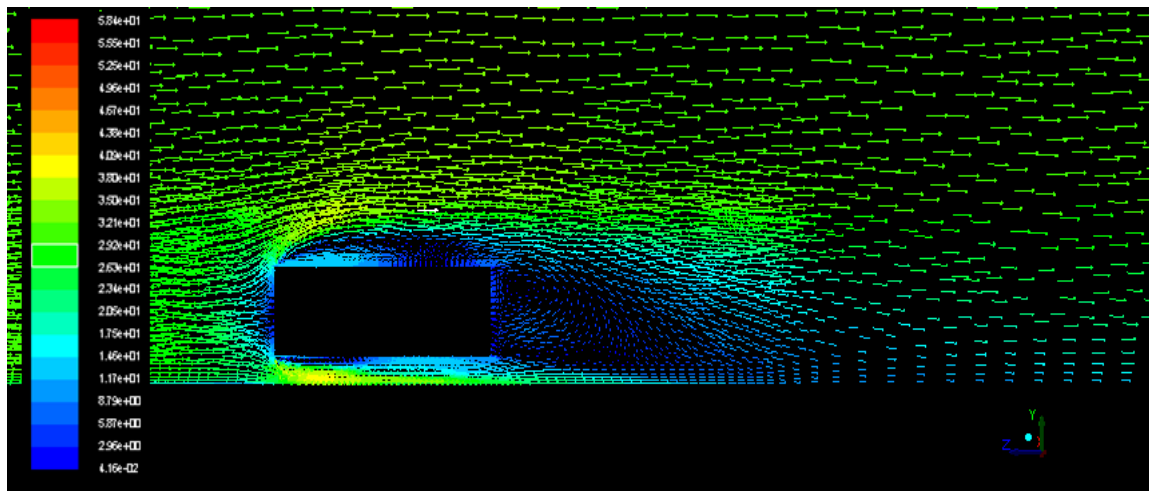


Valor de estabilización: 1,03

Este valor de coeficiente de arrastre es coherente con la geometría del remolque estudiado, ya que la geometría no tiene estudios aerodinámicos y se ve reflejado en el coeficiente. El valor del coeficiente se espera que este entre 0 y 1.

### 10.6.3 Perfil de velocidad.

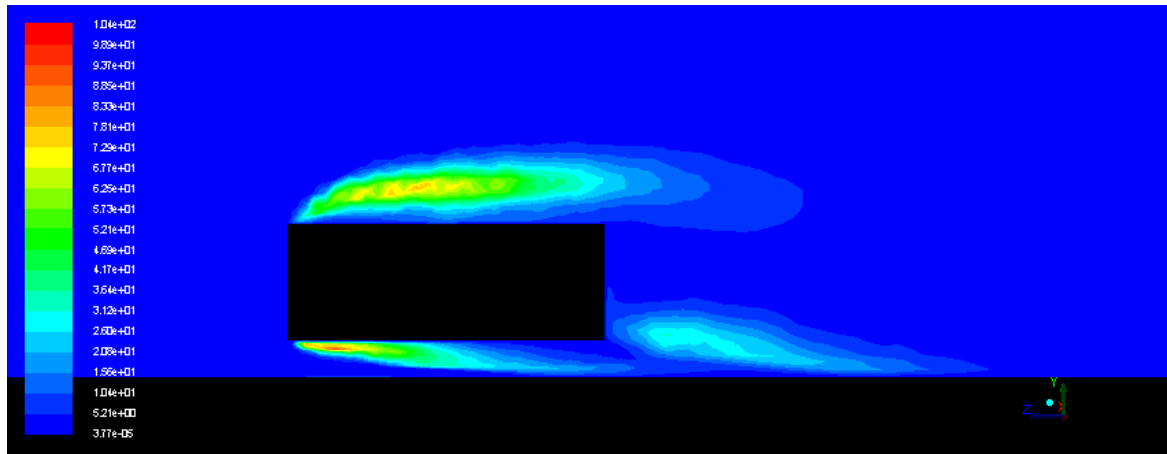
Figura 79. Perfil de velocidad remolque 1



Con las diferentes gamas de colores se pueden apreciar la magnitud de la velocidad en cualquier punto. La velocidad está dada en m/s.

#### 10.6.4 Perfil de turbulencia.

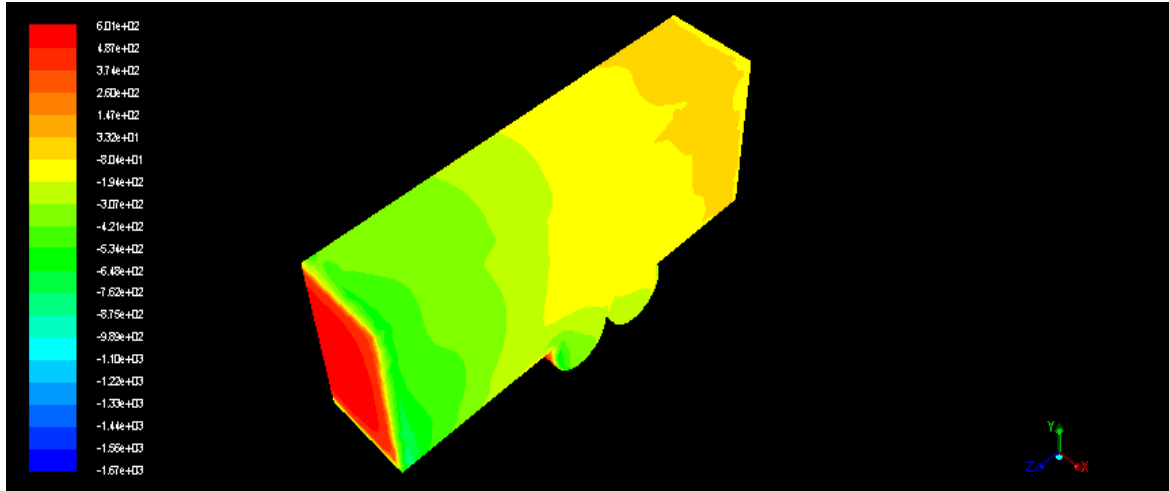
**Figura 83.** Turbulencia remolque 1



Se observa en la gráfica de viscosidad turbulenta  $\mu_t$ , que se caracteriza por la trayectoria circular erráticas, semejantes a remolinos. Se origina por la presencia de paredes con las que el viento impacta o por diferentes capas de viento que se mueven a diferente velocidad. En este perfil se puede observar en qué lugares se presentan flujos turbulentos y en qué lugares se presentan flujos laminares. Se desea disminuir el perfil de turbulencia para evitar pérdidas innecesarias. La viscosidad turbulenta se lee en  $m^2/s^2$

### 10.6.5 Perfil de presión.

Figura 84. Presión remolque 1

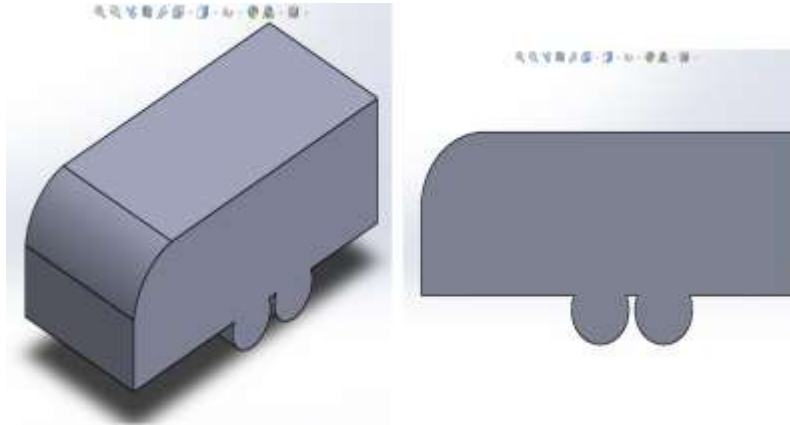


Se evidencia que la parte crítica es la frontal, la gama de colores nos muestra que tiene una presión (hidrostática) aproximada de 601 pascales, a medida que avanza la longitud del remolque aumenta la presión aplicada. Este perfil muestra que la presión aumenta a medida que avanza la longitud del remolque, de la parte frontal a la parte posterior. Donde existen valores de presión negativas significa que el aire está ejerciendo un peso sobre el remolque que lo ayuda a estar en contacto con el piso.

## 10.7 REMOLQUE 2

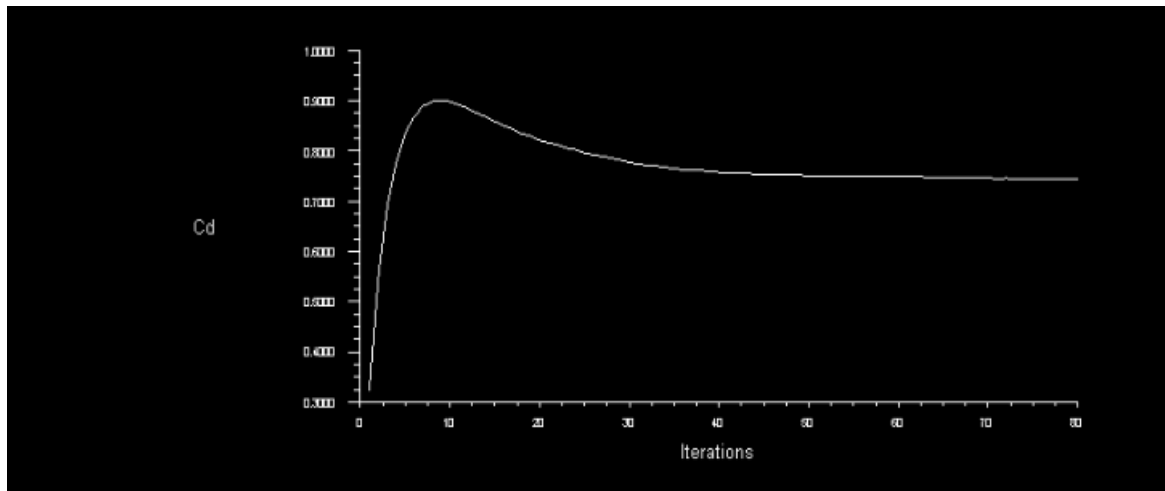
### 10.7.1 Geometría con estudio aerodinámico en la parte frontal.

Figura 85. Geometría remolque 2



### 10.7.2 Coeficiente de arrastre.

Figura 86. Coeficiente de arrastre remolque 2

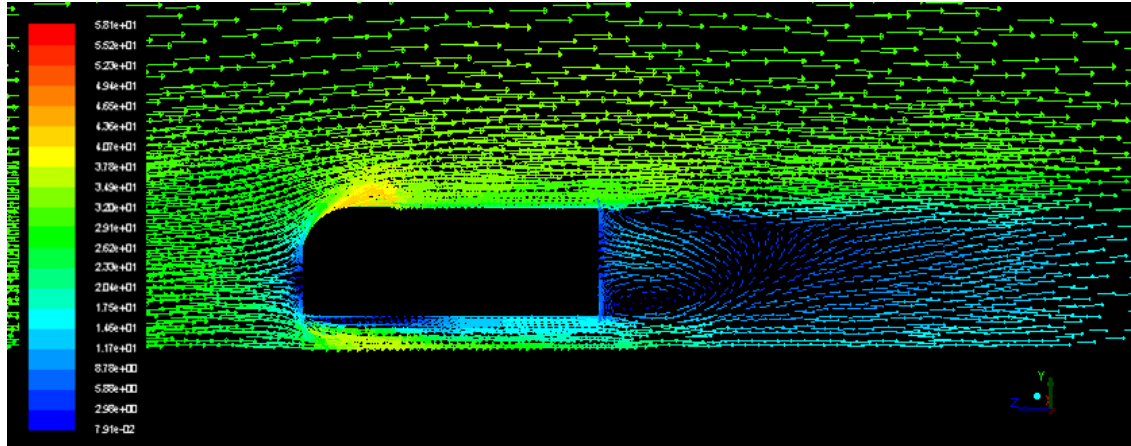


Valor de estabilización: 0,744

Se evidencia que con el estudio aerodinámico en la parte frontal se obtiene una disminución en la resistencia aerodinámica

### 10.7.3 Perfil de velocidad.

Figura 87. Perfil de velocidad remolque 2

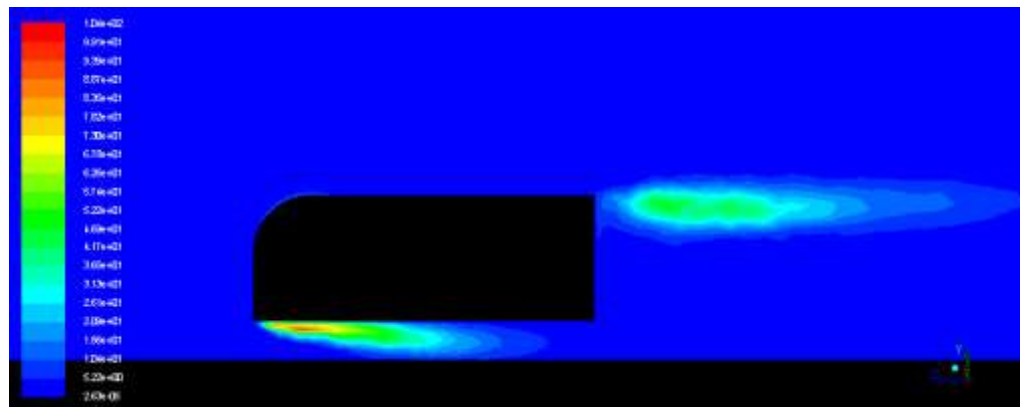


El comportamiento en la parte posterior del remolque es similar al perfil anteriormente estudiado, por lo tanto, solo se analizará en detalle la parte frontal y la parte superior del remolque.

Se evidencia una reducción considerable en el impacto directo contra el aire, ya que se disminuyó el área plana de la parte frontal del remolque. Esto ocasiona menor resistencia aerodinámica y una mejor organización vectorial del viento en comparación con el primer perfil.

### 10.7.4 Perfil de turbulencia .

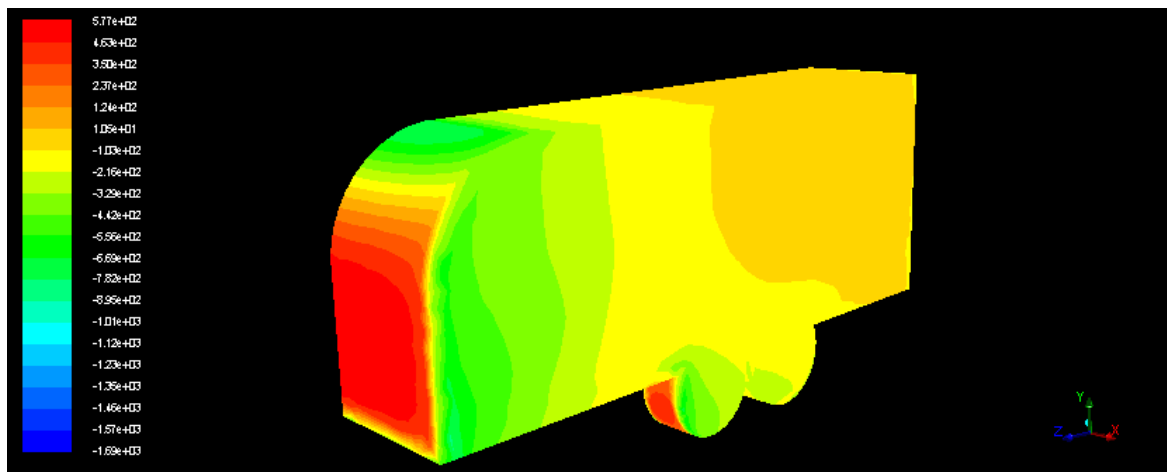
Figura 90. Turbulencia remolque 2



Ya que la turbulencia es causada por la presencia de paredes en la dirección del viento, al realizar el estudio aerodinámico en la parte frontal se elimina la turbulencia que presentaba en el primer perfil estudiado. Se nota que en la parte posterior se sigue presentando turbulencia que se puede evitar.

### 10.7.5 Perfil de presión.

**Figura 91.** Presión remolque 2

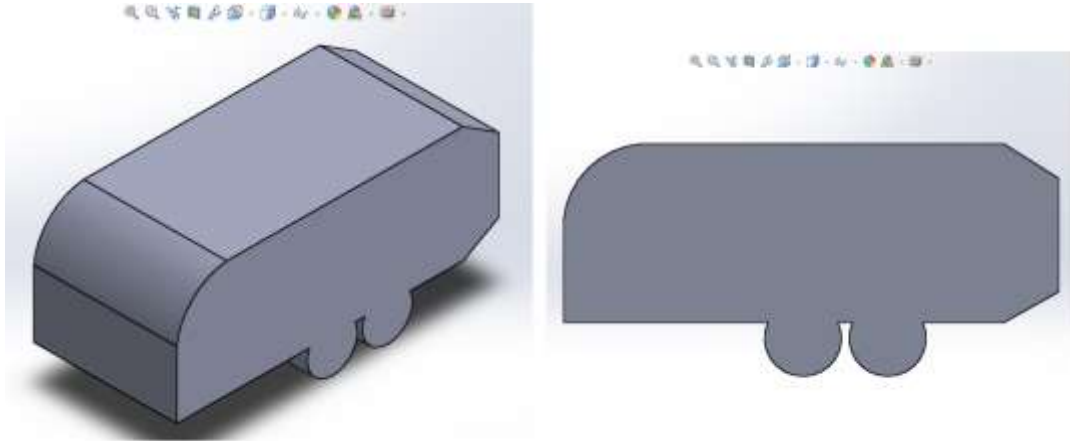


La parte crítica siempre será la cara frontal, al disminuir la superficie plana la presión disminuye a un valor aproximado de 577 pascales. Como en el perfil anterior este perfil muestra que la presión aumenta a medida que avanza la longitud del remolque, de la parte frontal a la parte posterior. Donde existen valores de presión negativas significa que el aire está ejerciendo un peso sobre el remolque que lo ayuda a estar en contacto con el piso.

## 10.8 REMOLQUE 3

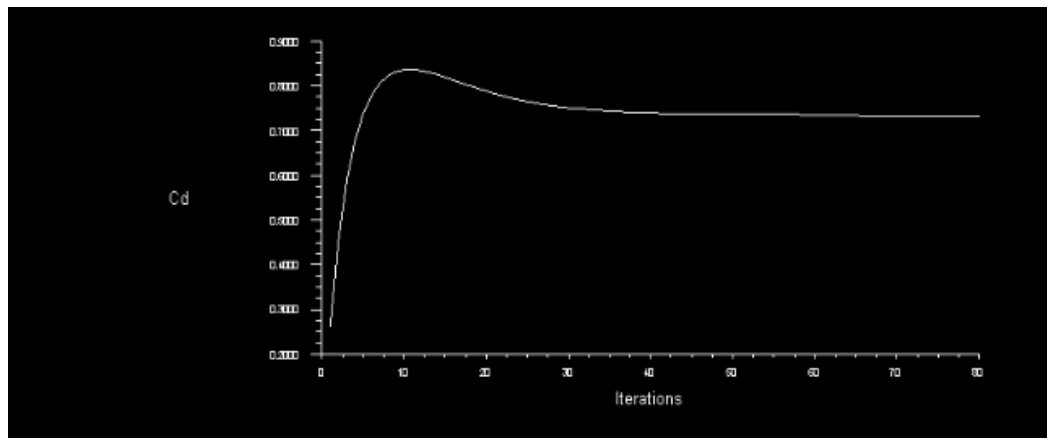
**10.8.1 Geometría con estudio aerodinámico en la parte frontal y posterior.** Esta geometría presenta estudios aerodinámicos en la parte frontal y posterior del remolque, se espera disminuir la resistencia aerodinámica y las turbulencias ocasionadas.

**Figura 92.** Geometría remolque 3



### 10.8.1 Coeficiente de arrastre.

**Figura 93.** Coeficiente de arrastre remolque 3

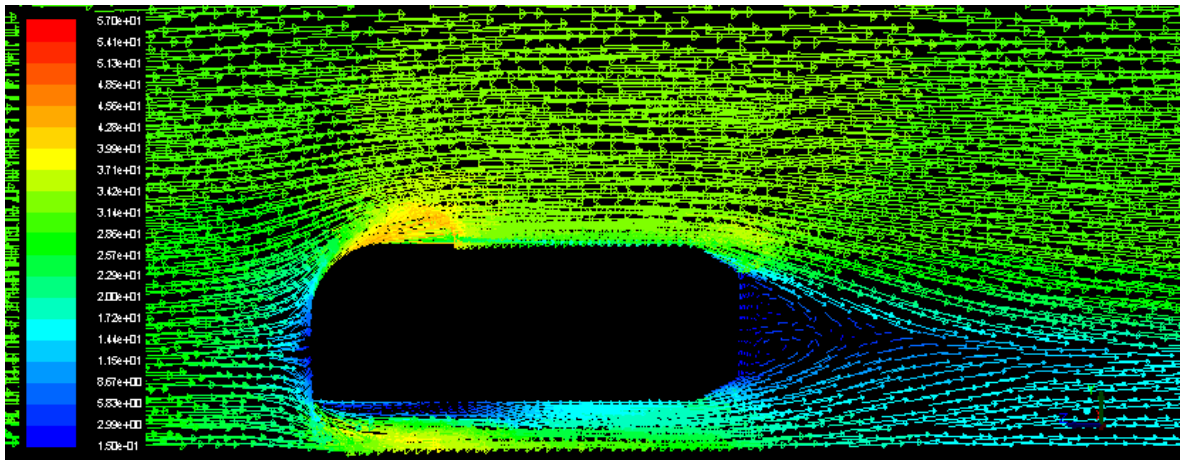


Valor de estabilización: 0,731

Al realizar una comparación a la resistencia aerodinámica entre este perfil y el perfil anterior, el coeficiente varía de 0,744 a 0,731. Esto se debe a que lo que principalmente genera la resistencia aerodinámica es la parte frontal, ya que es el Área que impacta con el viento. Se evidencia que la parte frontal no tiene variación por esto el coeficiente solo disminuye un 0,013

### 10.8.2 Perfil de velocidad.

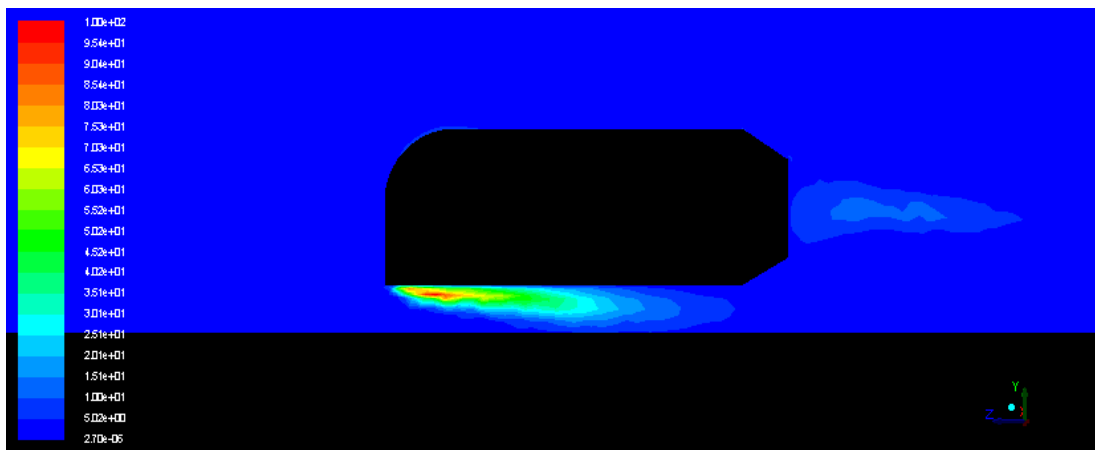
Figura 94. Perfil de velocidad remolque 3



El perfil de velocidad en la parte frontal y la parte superior se comporta similar al perfil anterior solo se analizara en detalle la parte posterior de este, Creando el estudio aerodinámico en la parte posterior, se evidencia una disminución considerable de desarreglo vectorial a comparación del perfil anterior, volviendo más eficiente la aerodinámica en este perfil.

### 10.8.4 Perfil de turbulencia.

Figura 96. Turbulencia remolque 3

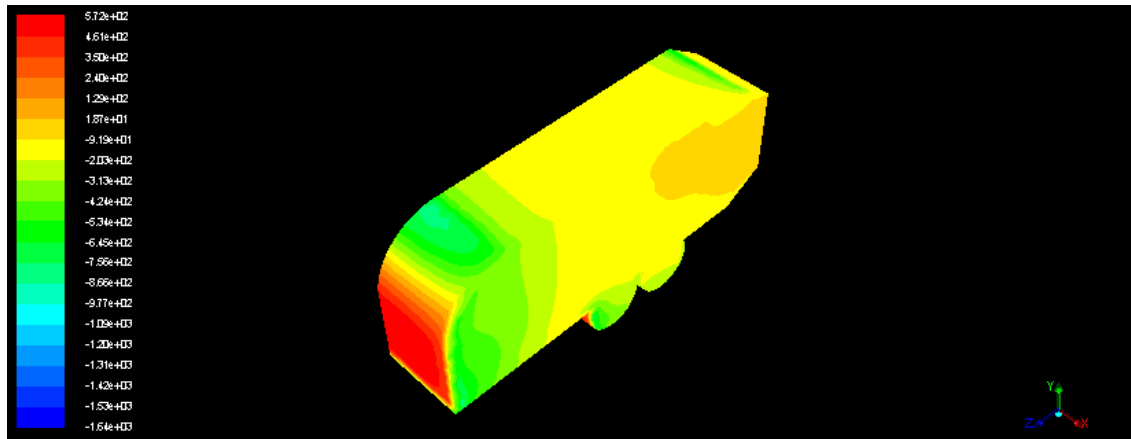


Se puede notar que la turbulencia generada en la parte posterior del perfil anterior

se eliminó con el arreglo aerodinámico. Se sigue presentando una pequeña turbulencia en la parte inferior que se espera eliminar.

### 10.8.5 Perfil de presiones.

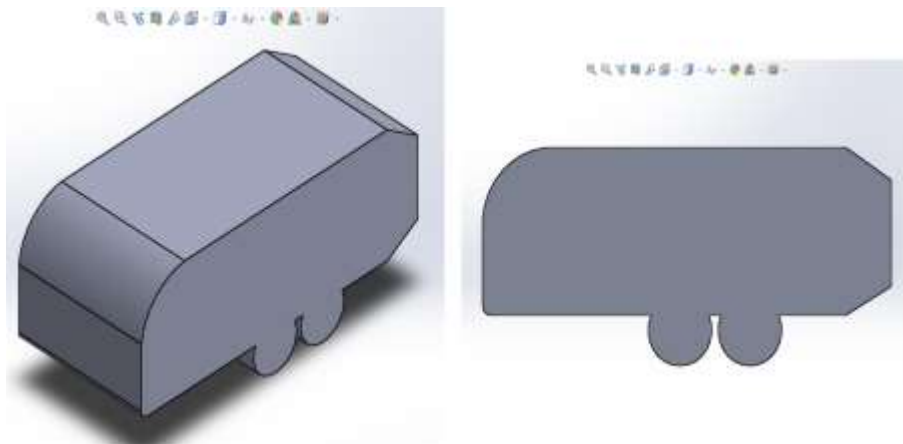
Figura 97. Perfil de presiones remolque 3



## 10.9 REMOLQUE 4

### 10.9.1 Geometría con estudio aerodinámico en la parte frontal con posible mejora.

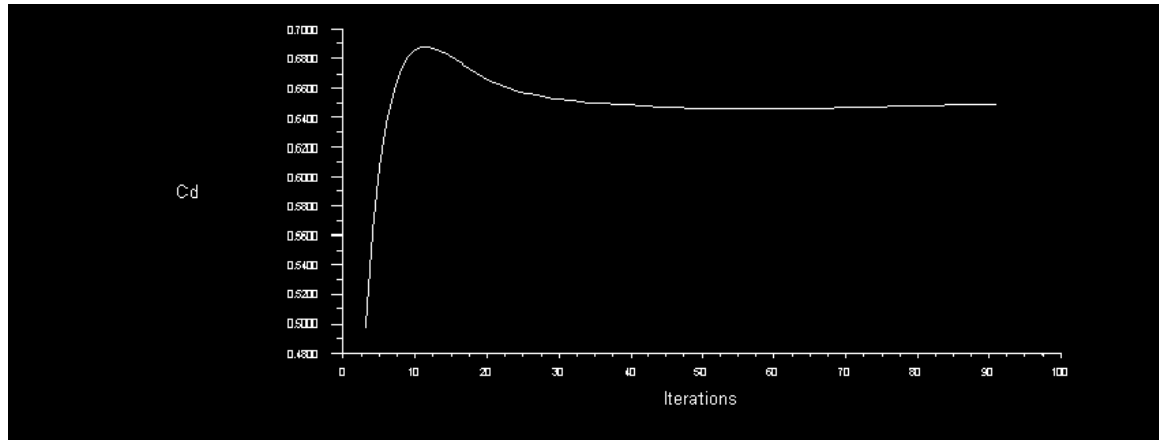
Figura 98. Geometría remolque 4



La mejora realizada para este diseño fue un pequeño redondeo efectuado en la parte inferior frontal, se esperaba mejorar el coeficiente de arrastre y disminuir turbulencias.

### 10.9.2 Coeficiente de arrastre.

Figura 99. Coeficiente de arrastre remolque 4

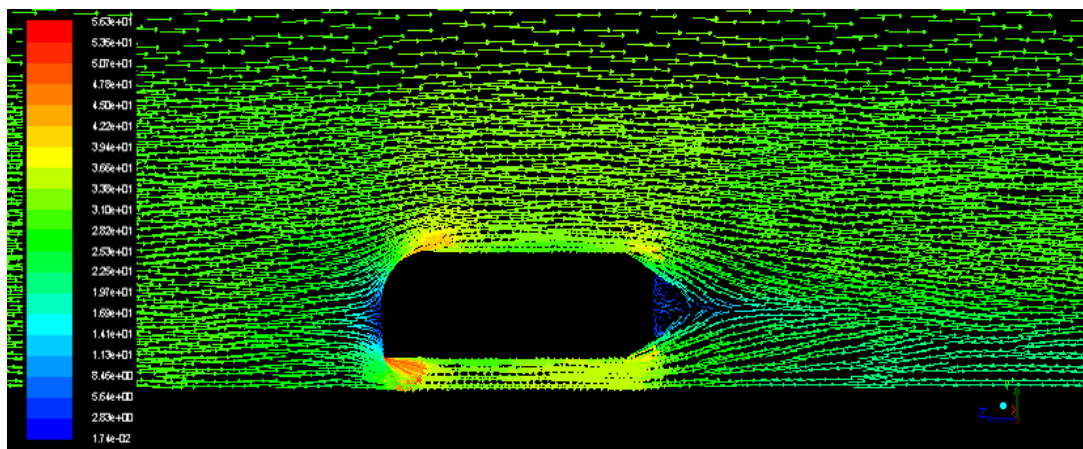


Valor de estabilización: 0,648

Después de realizar el estudio, arroja un resultado del coeficiente de arrastre estabilizado en 0,64. Con este perfil se logra tener la menor resistencia aerodinámica

### 10.9.3 Perfil de velocidad.

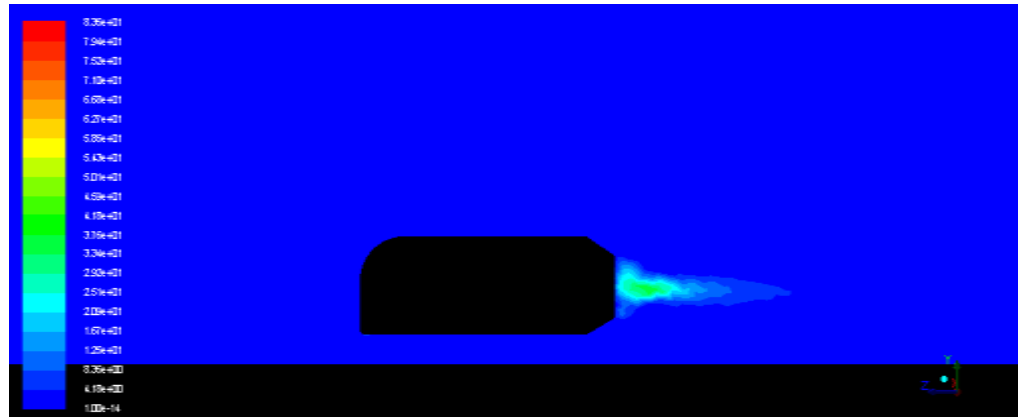
Figura 100. Perfil de velocidad remolque 4



El perfil de velocidad para este perfil indica que existen menos secciones donde se forman velocidades cercanas a cero. En este caso dichas velocidades se forman en el impacto de viento en la parte frontal y en la parte posterior.

#### 10.9.4 Perfil de turbulencia.

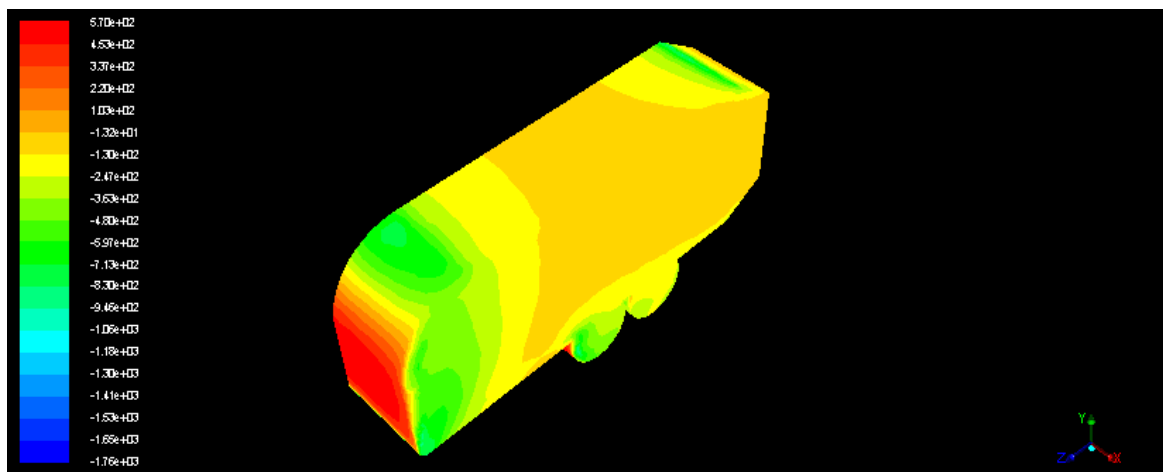
Figura 101. Turbulencia remolque 4



Este perfil presenta la mínima turbulencia, realizando los arreglos aerodinámicos se eliminó las turbulencias generadas en la parte superior, frontal e inferior. Se evidencia una pequeña turbulencia en la parte posterior, pero irrelevante en comparación de las generadas en los perfiles anteriores.

#### 10.9.5 Perfil de presiones.

Figura 102. Presión remolque 4



El perfil de presiones no varía en comparación con el perfil anterior.

**Tabla 12:** Comparacion de resultados

Estudio	Perfil	Fuerza de arrastre (N)	Fuerza de adherencia (N)	Coficiente de arrastre
1		2061,48	40,19	1,031
2		1473,82	105,02	0,744
3		1452,54	119,84	0,731
4		128,74	120,7	0,648

## 11. SIMULACIÓN CFD REMOLQUE ACOPLADO

### 11.1 VEHÍCULO AUTOMOTOR

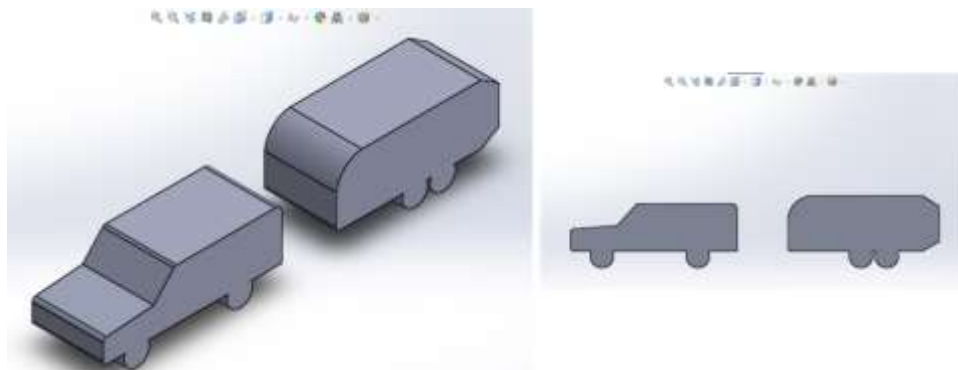
Para especificar el vehiculo automotor tomaremos el siguiente diseño



Por lo tanto, se genera la geometria para nuestro estudio de la siguiente manera

### 11.2 GOMETRIA DEL REMOLQUE ACOPLADO

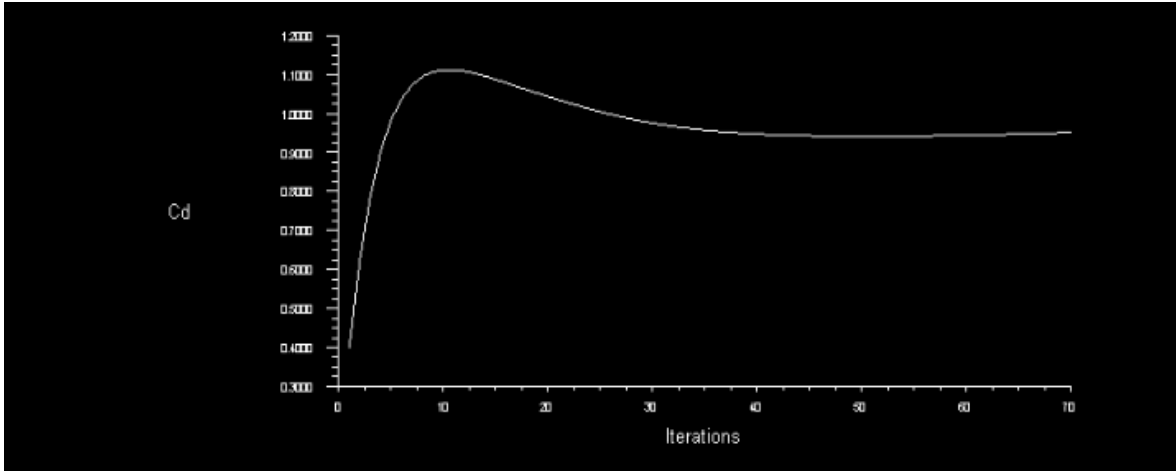
**Figura 103.** Geometria del remolque acoplado



Para este ensamble se realiza una simulacion CFD para ver el comportamiento del viento. Ansys un programa con una gama de resultados bastante amplia, solo enfocaremos los que sean de más interés, tales como:

### 11.3 COEFICIENTE DE ARRASTRE

**Figura 104.** Coeficiente de arrastre del remolque acoplado

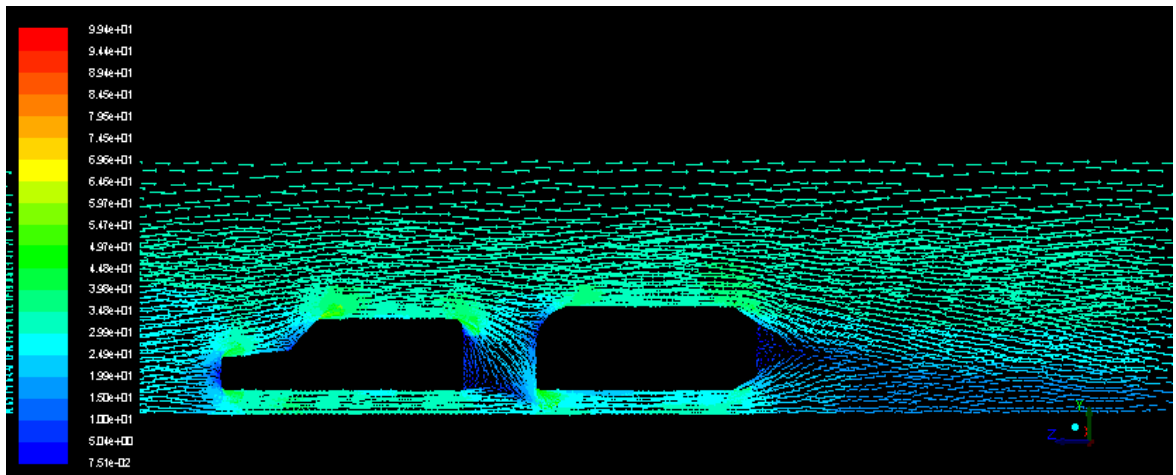


Valor de estabilizacion 0,941

Al terminar la simulacion del remolque acoplado arroja un valor del coeficiente de arrastre dentro del rango, por lo que se corrobora esta informacion

### 11.4 PERFIL DE VELOCIDADES

**Figura 105.** Perfil de velocidad remolque acoplado



## 11.5 PERFIL DE TURBULENCIA

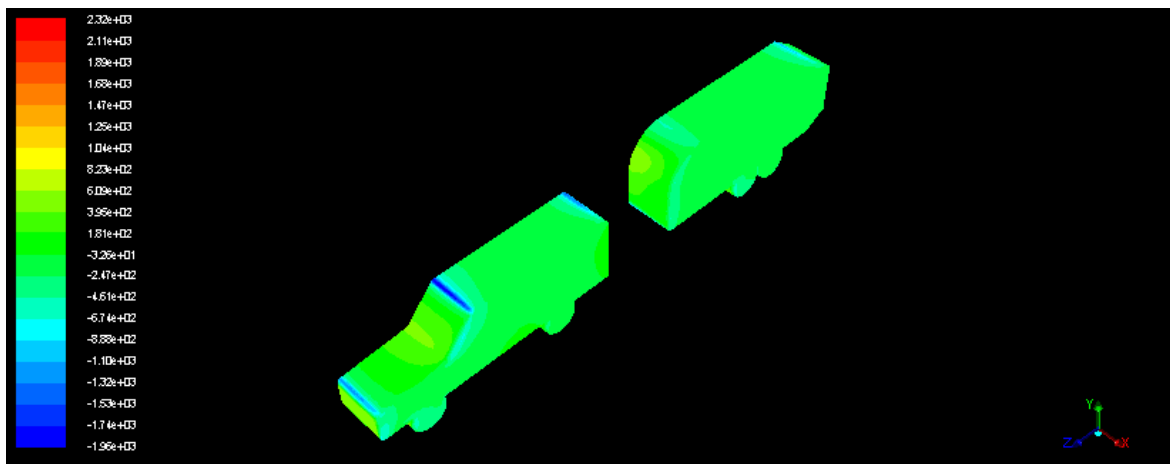
Figura 106. Turbulencia de remolque acoplado



Con el ultimo arreglo aerodinamico se puede notar que la turbulencia se elimino en un 96%

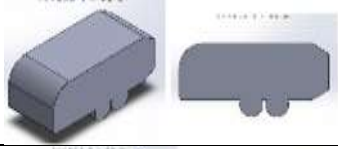

## 11.6 PERFIL DE PRESION

Figura 107. Presion del remolque acoplado

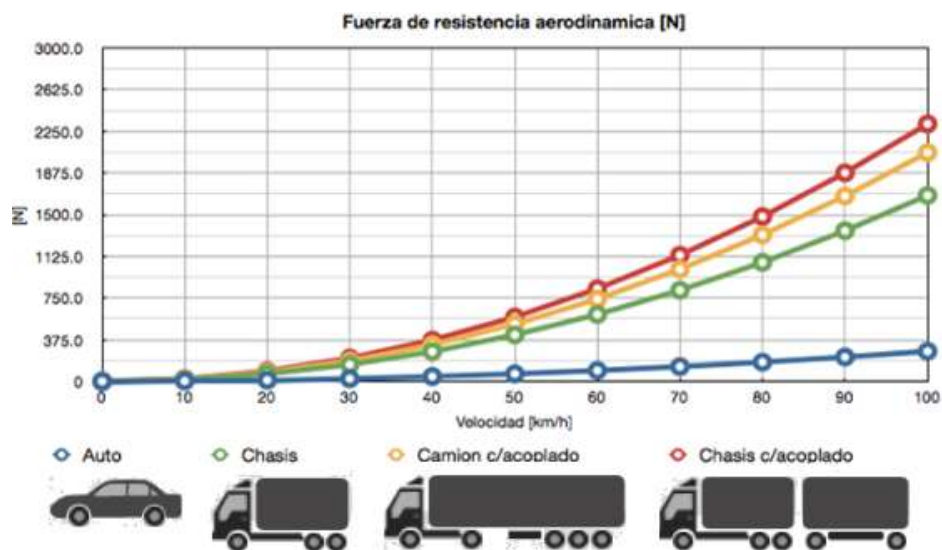


## 12. ANALISIS DE RESULTADOS CFD

**Tabla 13.** Analisis coeficiente de arrastre del remolque y remolque acoplado

Modelo	Perfil	Fuerza de arrastre	Coeficiente de arrastre
Remolque		1287,24	0,648
Acoplado		1894,6	0,9514

**Grafica 1.** Fuerza de arrastre vs velocidad

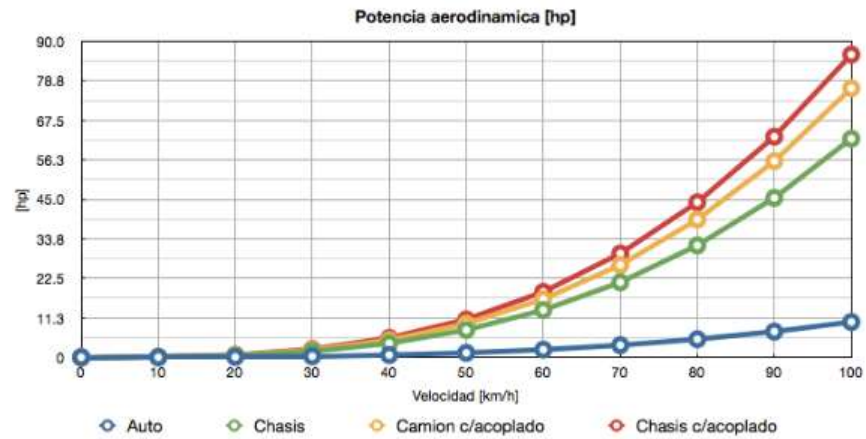


disponible en <http://motorenmarcha.com/aerodinamica-en-camiones/>

Para este remolque viajando a 100km/h con una fuerza de arrastre aproxima de 1287N presentaría un perfil cerca al chasis. En el remolque acoplado con una fuerza

aproximada de 1894N presenta un comportamiento similar al perfil entre camión y chasis acoplado, lo que se esperaría en este caso.

**Gráfica 2.** Potencia vs velocidad



Fuente: disponible en: <http://motorenmarcha.com/aerodinamica-en-camiones/>

### 13. CONCLUSIONES

- Se realizó la caracterización mecánica estructural del prototipo del remolque teniendo como prioridad rigidizar su chasis para disminuir sus deformaciones y desplazamientos en el voladizo frontal de enganche, verificando que cumpla con las condiciones óptimas de operación al estar expuesto a vibraciones producto de las irregularidades del terreno con frecuencias que oscilan de 1HZ a 20HZ.
- Se contrastó la información de las frecuencias de resonancia con los rangos de frecuencias teóricos presentes en el manual de ingeniería del automóvil, sistemas y comportamiento dinámico, mejorando el conocimiento para plantear soluciones a la inclusión de componentes rotativos cuyas frecuencias provocan la resonancia de la estructura para algunos modos de tipo local
- Se construyó un mecanismo de techo levadizo adaptable a un actuador eléctrico para las condiciones necesarias en un remolque tipo caravana con factor de seguridad de 6 para sus cargas estáticas y se establece una configuración en su estructura que refuerza sus componentes para condiciones críticas.
- En la simulación se determinó un flujo totalmente turbulento e incompresible ya que obtuvimos un Reynolds de  $13'111.855$  y un número de Mach 0.0904.
- Al realizar la simulación se decretó al perfil numero 4 el más eficiente aerodinámicamente ya que presenta una fuerza de arrastre de 128.74 N, mucho menor en comparación con los demás perfiles y el coeficiente de arrastre más bajo estabilizado en 0.648.

## 14. RECOMENDACIONES

- Se sugiere contrastar con un diseño experimental para garantizar los resultados y optimizar aquellos componentes críticos producto de las vibraciones o cargas dinámicas.
- Usar equipos computacionales de alto rendimiento simplifica los tiempos de resultados, pero no siempre son necesarios si no son utilizados y aprovechados correctamente
- Las normas de seguridad y mantenimiento del prototipo deben cumplirse a cabalidad para garantizar la vida útil del remolque, se recomienda mantenerlo siempre a la mano en cualquier compartimiento del remolque para que se facilite el acceso a su información
- Las actividades de mantenimiento deben realizarse por personal especializado en un centro de servicio cercano.
- No realizar análisis estáticos para vigas individuales cuando hacen parte de una estructura, ya que los esfuerzos y los momentos son diferentes pues no tienen en cuenta las reacciones que crean las uniones con las demás vigas.

## BIBLIOGRAFÍA

ANSYS, Fluent User's Guide, Noviembre 2013

ALEJANDRO SIERRA. Diseño y construcción de un remolque de dos niveles para monoplazas fso2-e formula SENA eco 2012-2013 y forssa fss1. Trabajo de grado de la escuela de ingeniería mecánica. Bucaramanga. Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. 2015. 106 P.

DANNY GARCÍA MARTÍN, Sara Marcelino Sádaba, Estudio de la capacidad aerodinámica de carrocerías de vehículos categoría cm. Tesis de grado Ingeniero Técnico Industrial Mecánico. Pamplona: Escuela técnica superior de ingenieros Industriales y de telecomunicación. Septiembre 2010

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Trabajos escritos, Presentación y referencias bibliográficas. NTC: 1486 - NTC: 6166. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008.

KYLE GARY BRISKEY, Mejora del diseño de caravanas mediante el modelado del flujo de aire. Tesis de grado Ingeniería Mecánica. Australia: Universidad de Southern Queensland Facultad de Salud, Ingeniería y Ciencias. Octubre 2013

MARCO LANFRIT, Directrices para la mejor práctica para el manejo de la aerodinámica externa automotora con Fluent. Versión 1.2, Febrero 9 2005

MATTHEW DAVID HILLLOCKS, Diseño de una caravana de bajo arrastre aerodinámico. Tesis de grado Ingeniería Mecánica. Australia: Universidad de Southern Queensland Facultad de Salud, Ingeniería y Ciencias. Junio 2016

N. S. KURALAY, Stress Analysis of a Truck Chassis with Riveted Joints, Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam, the Netherlands, Volume 38, 1115 –1130, 2000

SHIGLEY, JOSEPH y MISCHKE. Diseño en ingeniería mecánica.6 ed. Mc Graw Hill, 2002. 1257 p. ISBN 970-10-3646-8

SOLIDWORKS OFFICE PREMIUM, Conceptos básicos de Solidworks, piezas y ensambles, Agosto 2006

# **ANEXOS**