

# MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO AUTOMOTRIZ

“Análisis aerodinámico de un camión Hino serie 500 mediante la inclusión de un alerón en el techo de la cabina”

Nota de Autor

*Ing. Bayronn Ernesto Fraga López*, Facultad de Arquitectura e Ingenierías, Universidad Internacional SEK; Director Msc. Jaime Molina.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a: [bayronnfraga@hotmail.com](mailto:bayronnfraga@hotmail.com).

Quito 2017

¿Influye la aerodinámica en el diseño del modelo Hino Gh 500 ?

¿Cuál es el porcentaje de consumo de combustible en base al estudio aerodinámico ?

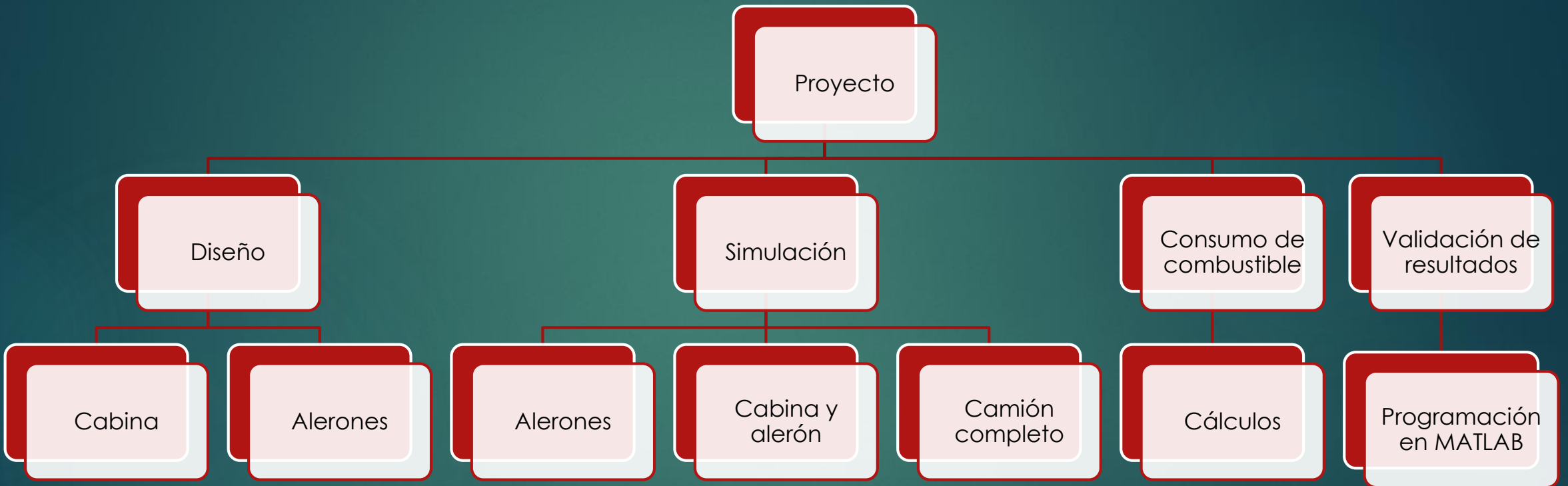


## *Objetivo General:*

Este proyecto tiene como objetivo realizar un detallado análisis aerodinámico de la cabina de un camión Hino serie 500 GH y determinar su incidencia en el consumo de combustible, mediante el uso de software especializado en fluidos (CFD).

## *Objetivos Específicos:*

- Escanear un camión Hino GH Serie 500 en Teojama con la ayuda de los sofisticados equipos de COTECMI S.A para obtener un modelo detallado en donde se realizará las simulaciones.
- Diseñar tres alternativas en alerones para el techo del camión y seleccionar el más eficiente después de un análisis CDF.
- Simular las condiciones físicas a las cuales está sometido el camión en ANSYS y encontrar la fuerza de arrastre.
- Realizar los respectivos cálculos para la obtención del consumo de combustible en base a detallados algoritmos matemáticos.
- Validar los resultados obtenidos en las simulaciones CFD con el uso de modelos matemáticos en MATLAB y considerar un error aproximado del 15%.



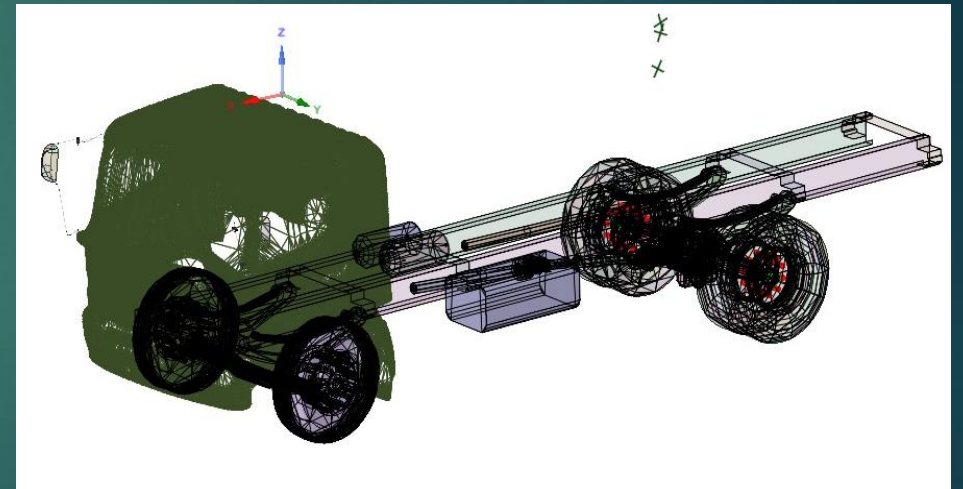
# Método

## *Diseño*

Se procedió a realizar un escaneo 3d de un camión real en Teojama una empresa encargada de ensamblar y comercializar vehículos de transporte pesado marca Hino, de esta forma se obtuvo una nube de puntos



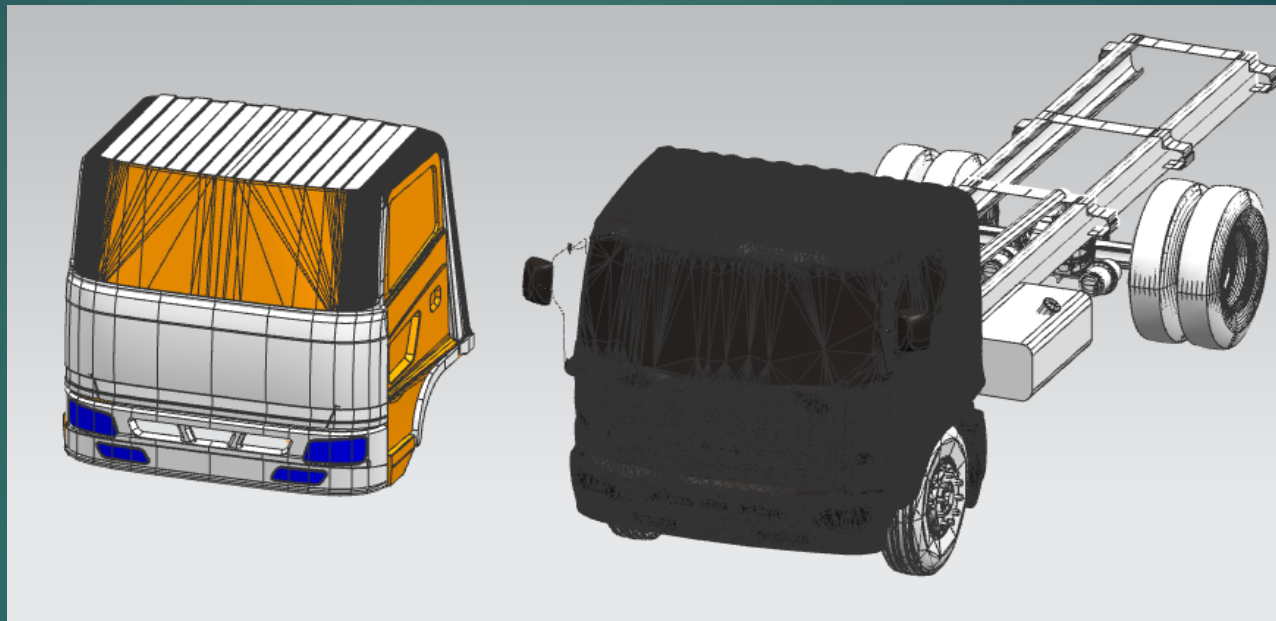
Escaneo 3D



Nube de puntos



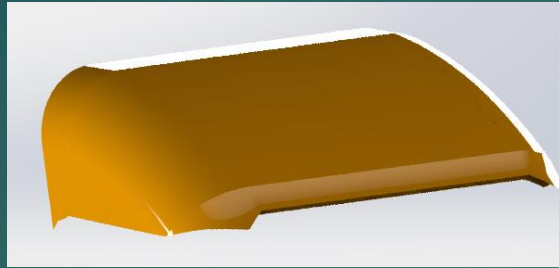
# Cabina



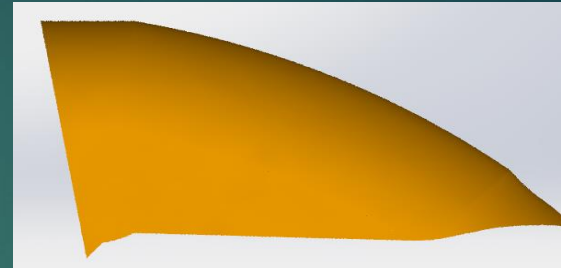
“Diseño de la cabina a partir de la nube de puntos”. Fuente Propia.

# Diseño de Alerones

Alerón 1

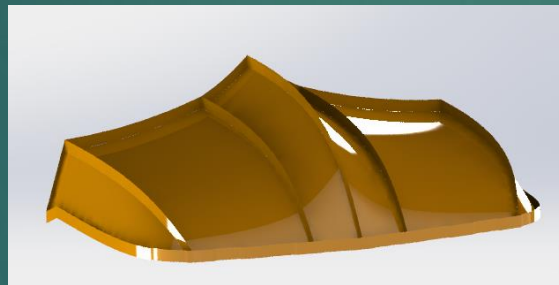


Vista isométrica.

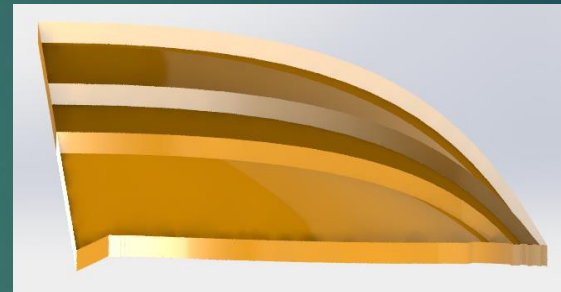


Vista lateral derecha.

Alerón 2

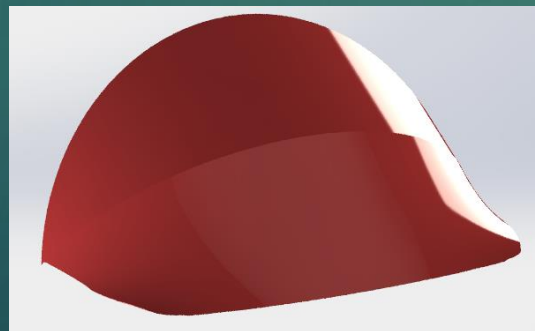


Vista isométrica.

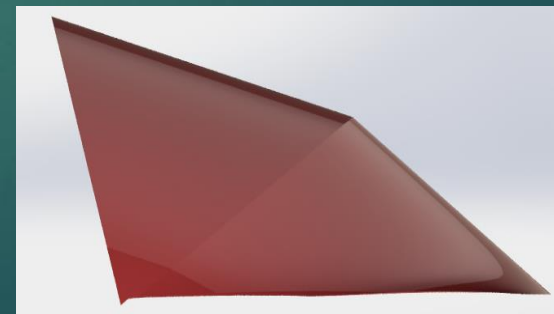


Vista lateral derecha.

Alerón 3



Vista isométrica.



Vista lateral derecha.

# Eficiencia Aerodinámica en base a Reynolds

$$Re = \frac{\rho v A}{\mu}$$

Donde:

Re = Número de Reynolds (Valor Adimensional)

P = Densidad del aire [Kg/m<sup>3</sup>].

V = Velocidad del fluido (vehículo) [m/s].

A = Área frontal del vehículo [m<sup>2</sup>].

μ = Viscosidad dinámica del fluido

Si Re < 2000, el flujo es laminar

Si Re > 4000, el flujo es turbulento.

## *Análisis para una velocidad de 70 Km/h*

Datos:

$$\rho = 1.2 \text{ Kg/m}^3$$

$$V = 19.44 \text{ m/s}$$

$$A = 3 \text{ m}^2$$

$$\mu = 1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$$

Reemplazando:

$$Re = \frac{(1.2 \text{ Kg/m}^3)(19.44 \text{ m/s})(3 \text{ m}^2)}{(1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa.s})}$$

$$Re = 3.86 \times 10^6 \text{ (Adimensional)}$$

## *Análisis para una velocidad de 90 Km/h*

Datos:

$$\rho = 1.2 \text{ Kg/m}^3$$

$$V = 25 \text{ m/s}$$

$$A = 3 \text{ m}^2$$

$$\mu = 1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$$

Reemplazando:

$$Re = \frac{(1.2 \text{ Kg/m}^3)(25 \text{ m/s})(3 \text{ m}^2)}{(1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa.s})}$$

$$Re = 4.97 \times 10^6 \text{ (Adimensional)}$$



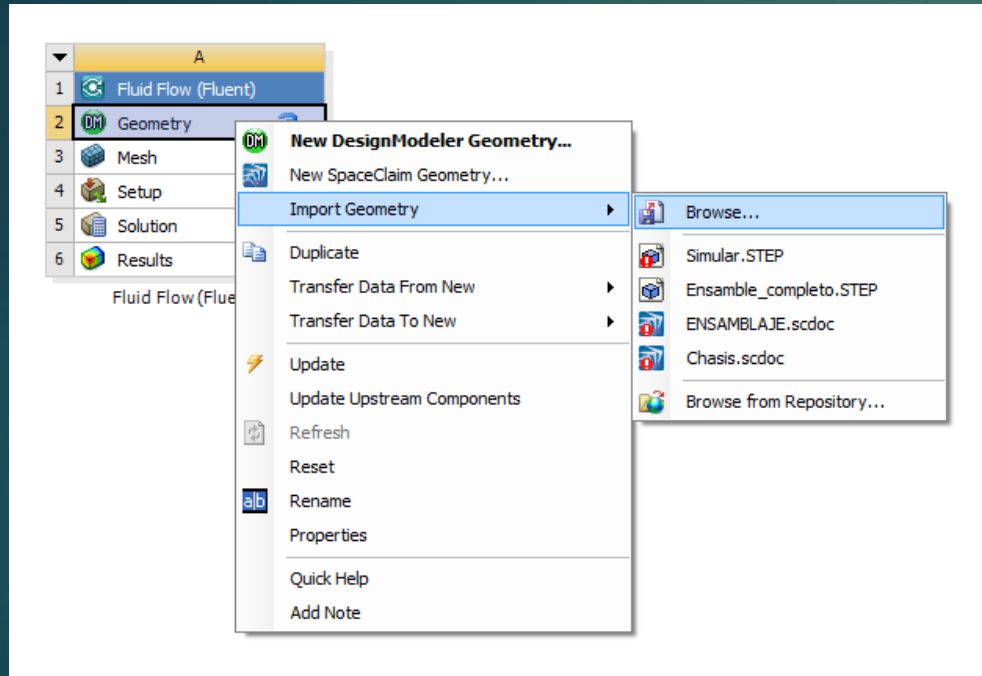
## Resultados de eficiencia aerodinámica en base a Reynolds

Análisis de turbulencia para cada uno de los prototipos		
Prototipos	Número de Reynolds a 19.44 [m/s] o 70 [Km/h] (Adimensional)	Número de Reynolds a 25 [m/s] o 90 [Km/h] (Adimensional)
Alerón 1	$3.86 \times 10^6$	$4.97 \times 10^6$
Alerón 2	$3.78 \times 10^6$	$4.87 \times 10^6$
Alerón 3	$4.07 \times 10^6$	$5.23 \times 10^6$

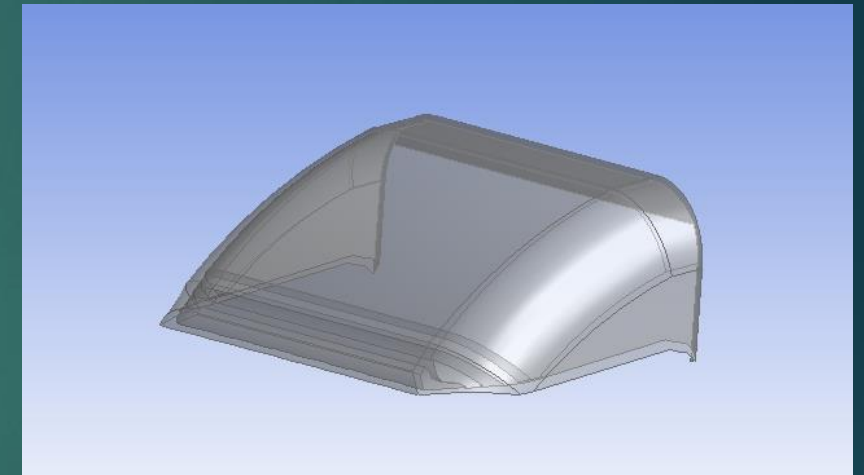
Nota: El alerón 2 es el más eficiente por generar la menor turbulencia de los tres prototipos. Esto en base a Reynolds.

# Introducción al proceso CFD (ANSYS)

## Pre procesamiento:

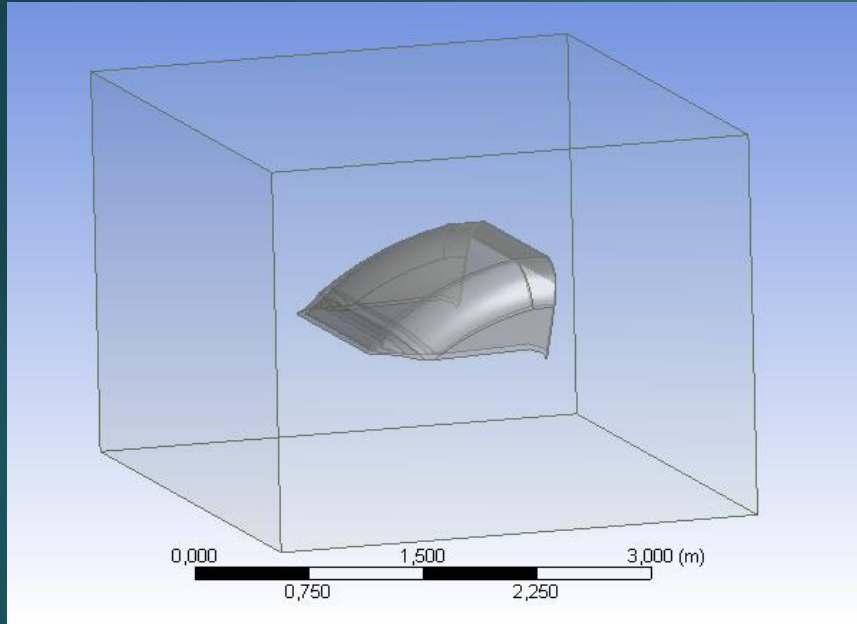


Parámetros para simulación en ANSYS.



Ingreso del alerón 1 .

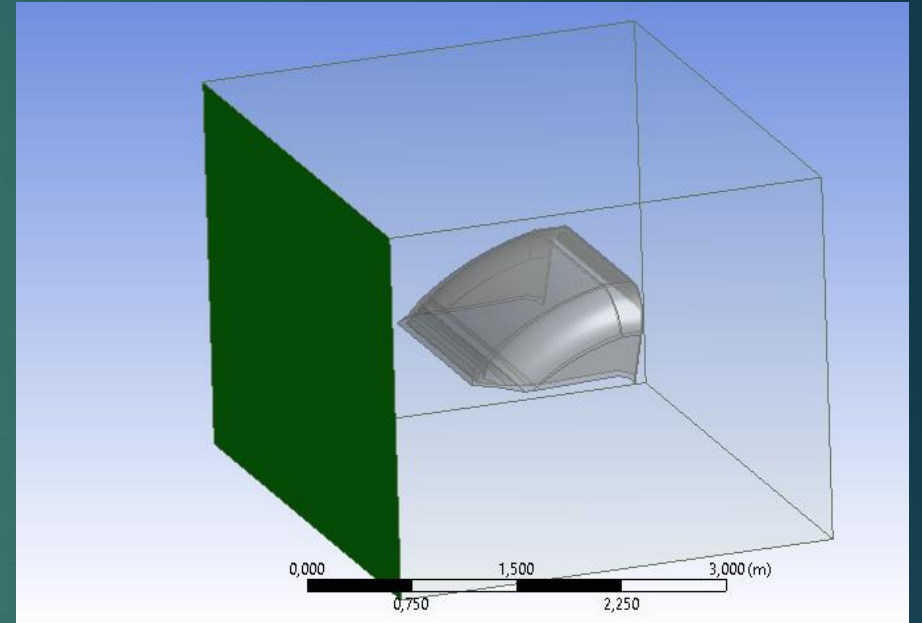
Condiciones iniciales.



Generación de entorno computacional.

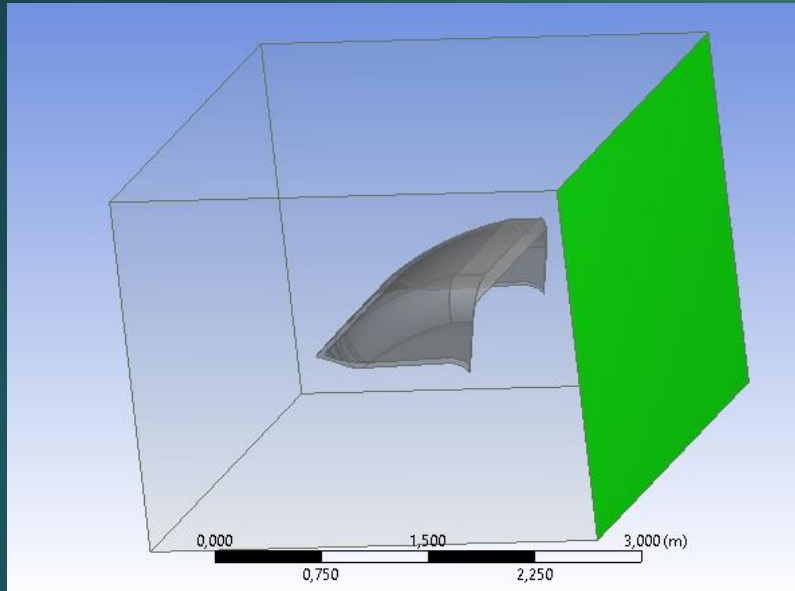


Condiciones iniciales.



Velocidad de flujo de aire.

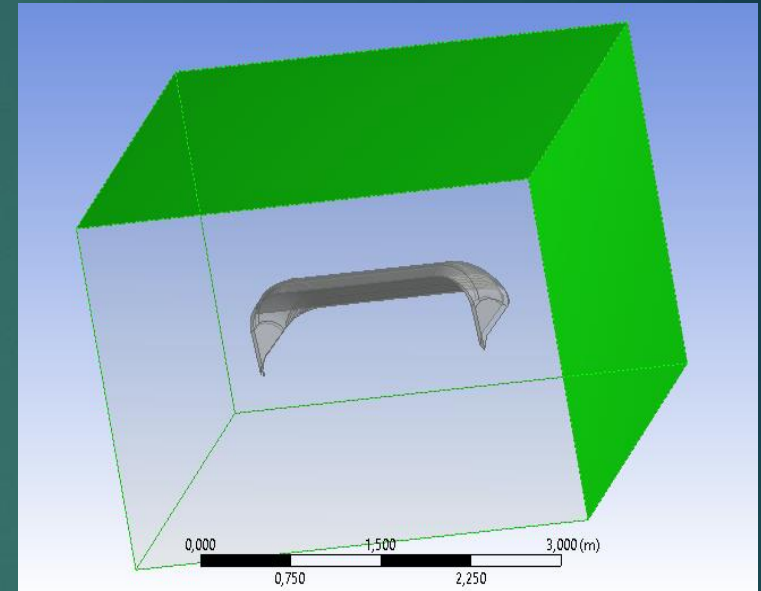
Condiciones iniciales.



Salida de flujo.



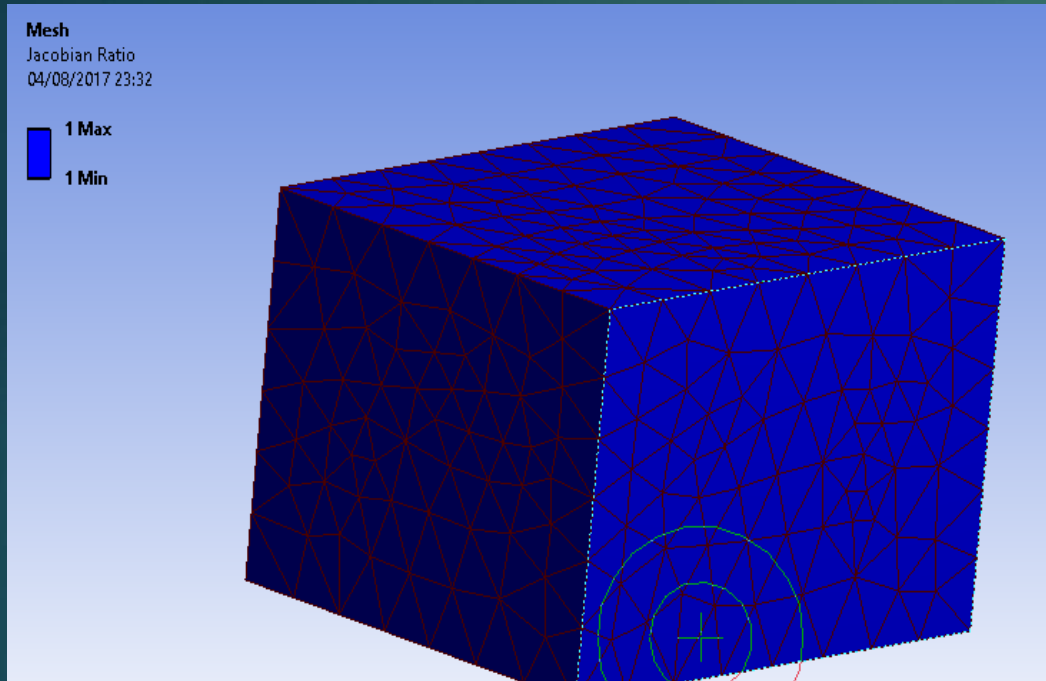
Condiciones iniciales.



Volumen de control.

# Procesamiento:

Mallado.



Volumen de control.

Mallado.

Details of "Mesh"

Initial Size Seed	Active Assembly
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (36,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (7,22960 mm)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (722,960 mm)
<input type="checkbox"/> Max Tet Size	Default (1445,90 mm)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (3,61480 mm)
Minimum Edge Length	34,4250 mm

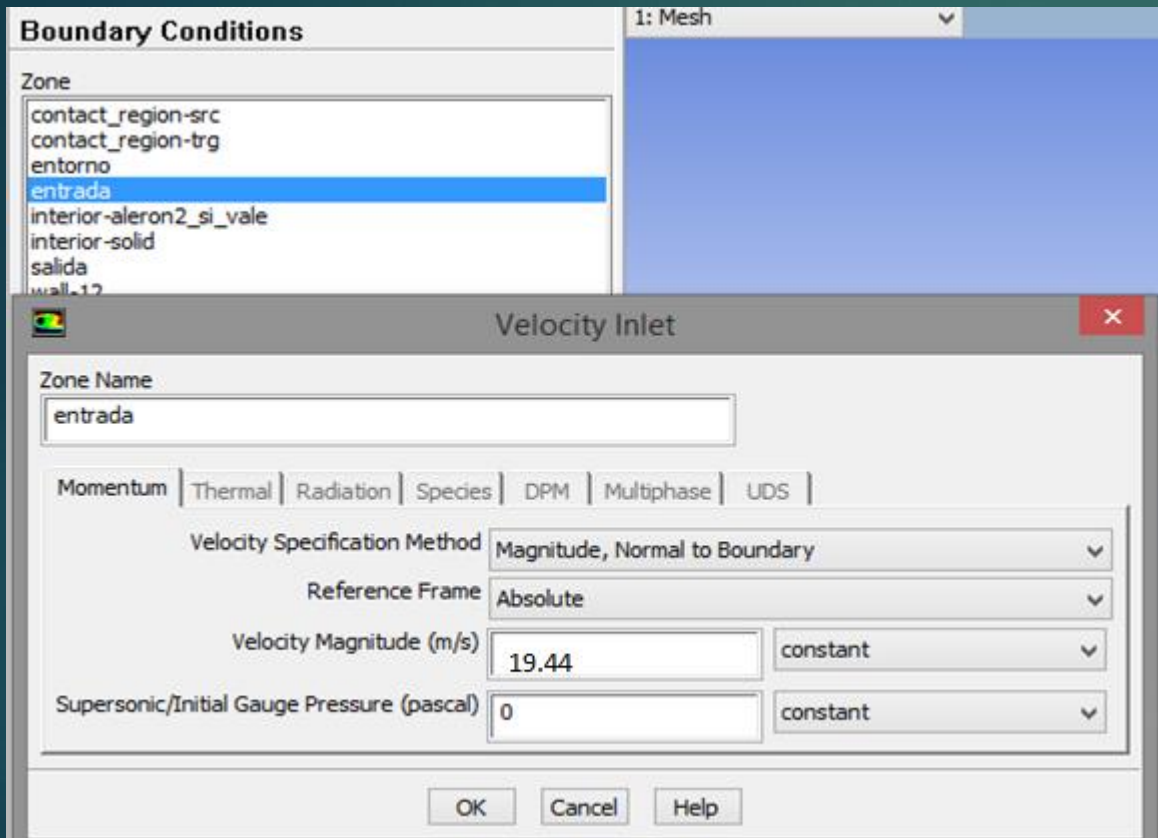
Detalles del mallado.

+ Advanced	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	2951
<input type="checkbox"/> Elements	14670

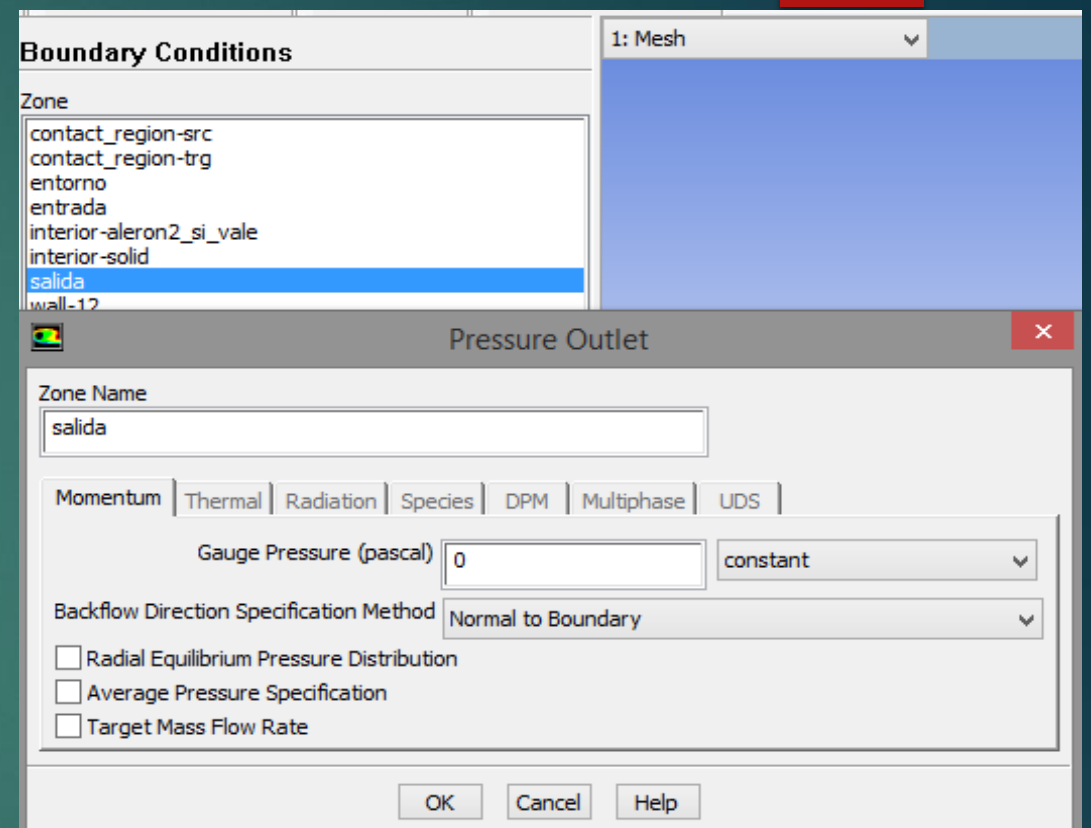
Detalles del mallado.



# Condiciones Iniciales



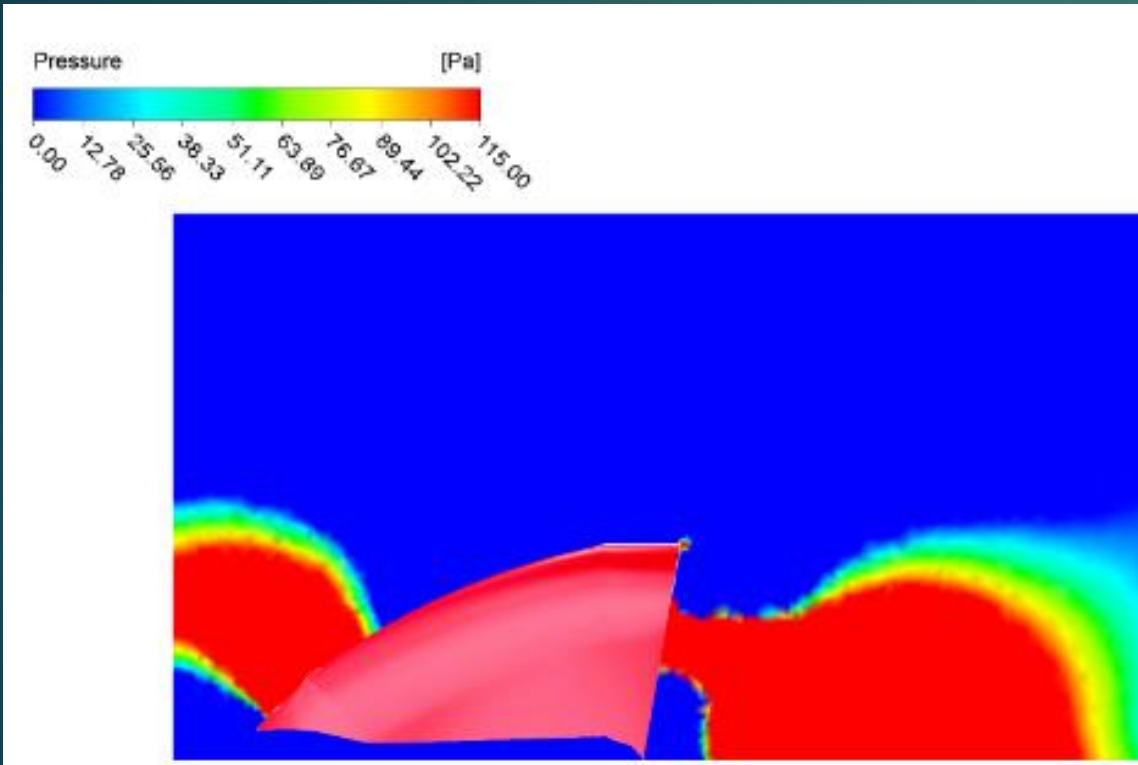
Ingreso de velocidad.



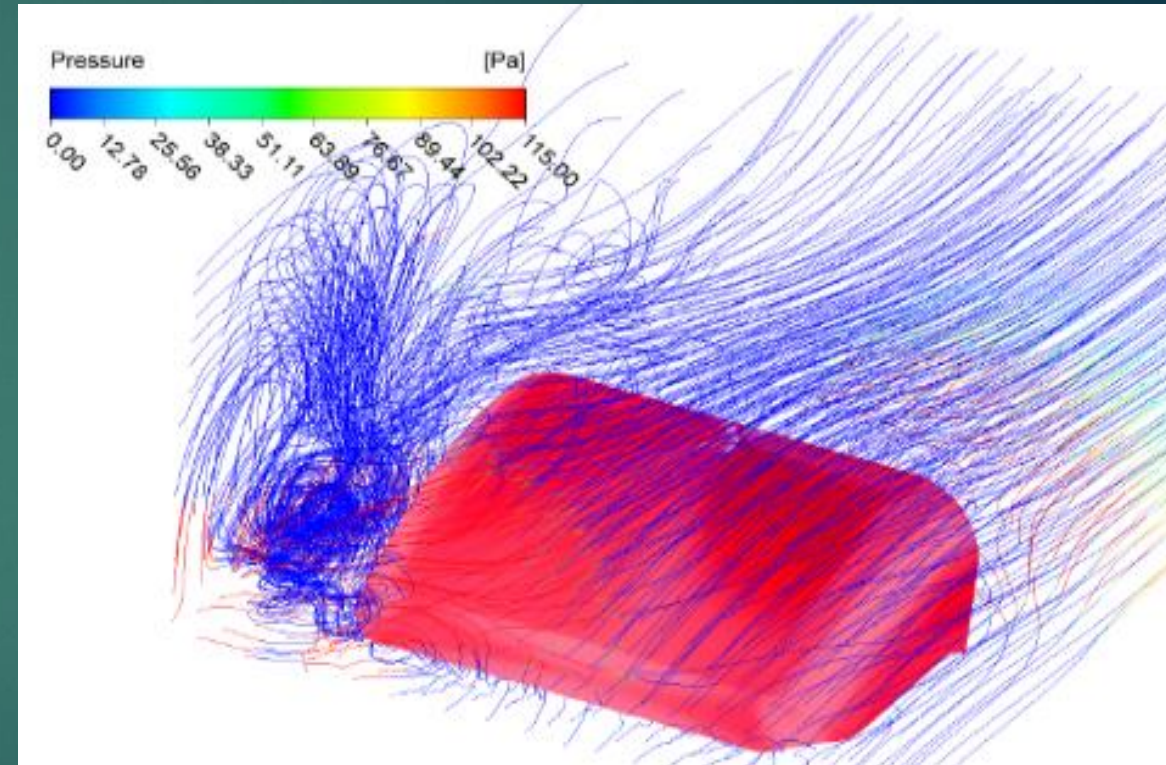
Salida de flujo (Abierto).

# Resultados simulación

*Alerón 1 a 70 Km/h*

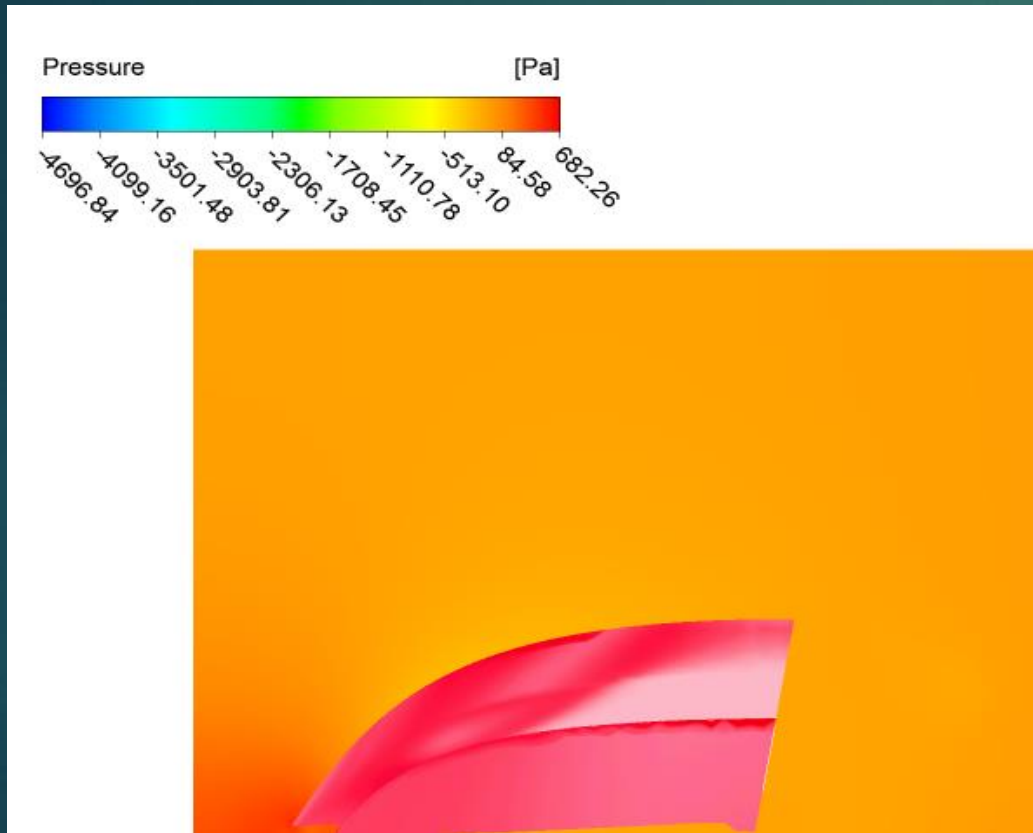


Vista lateral izquierda

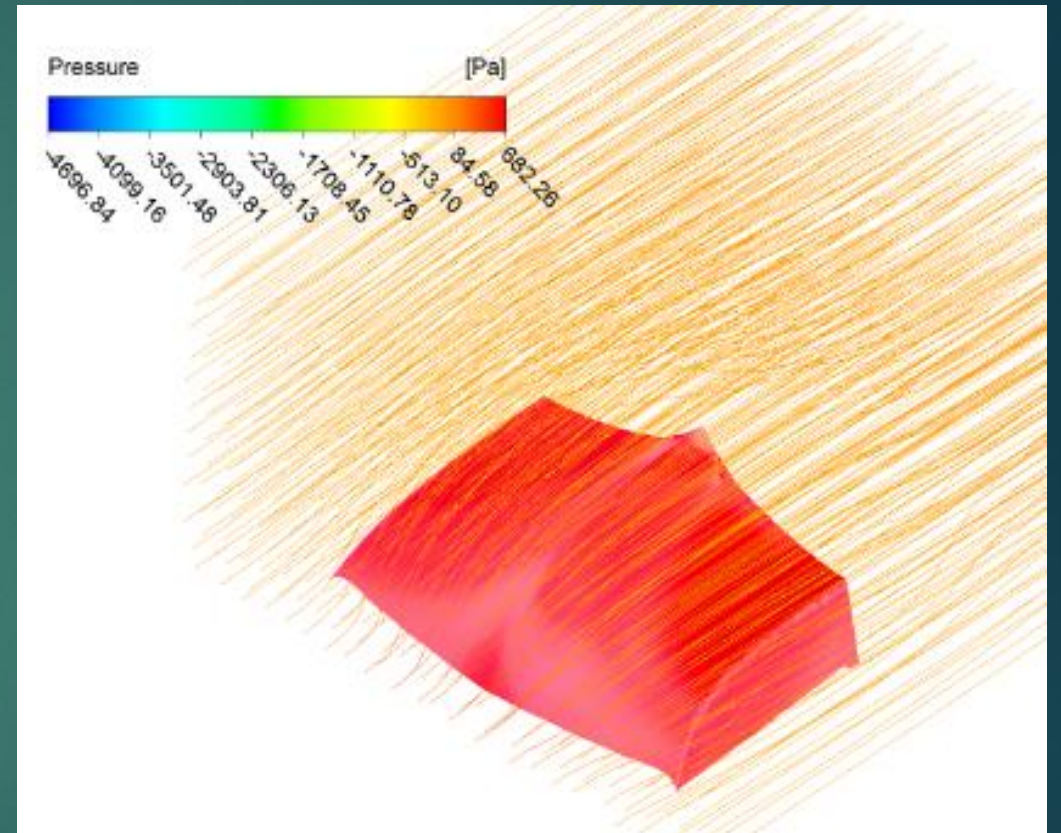


Vista isométrica

## Alerón 2 a 70 Km/h



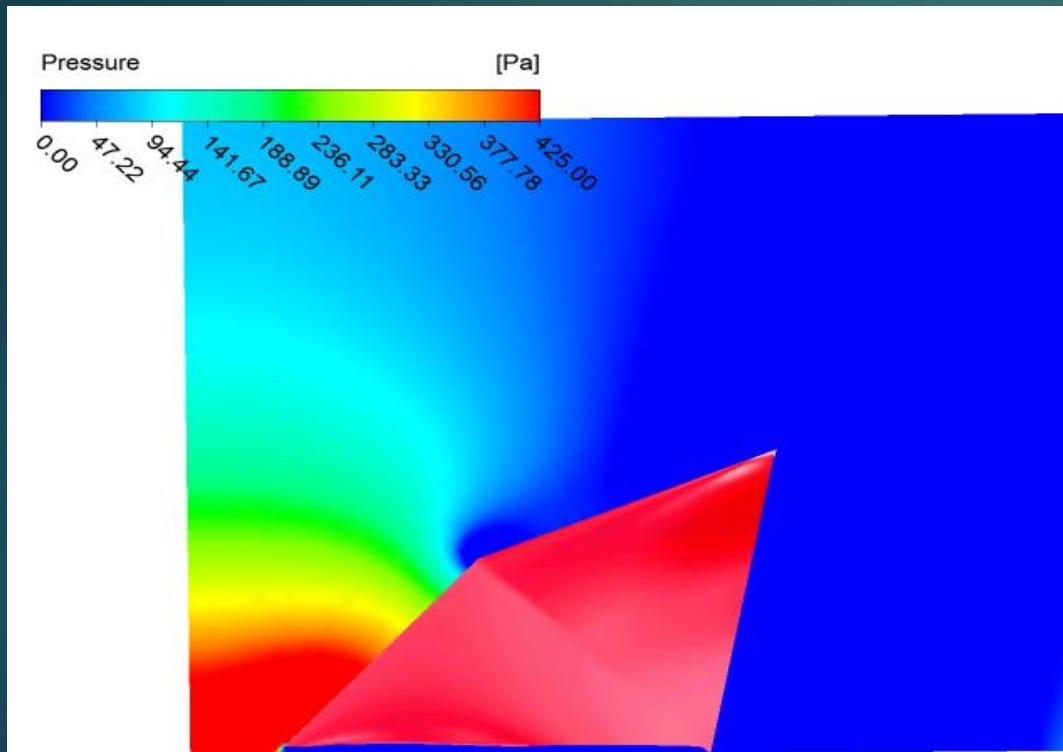
Vista lateral izquierda



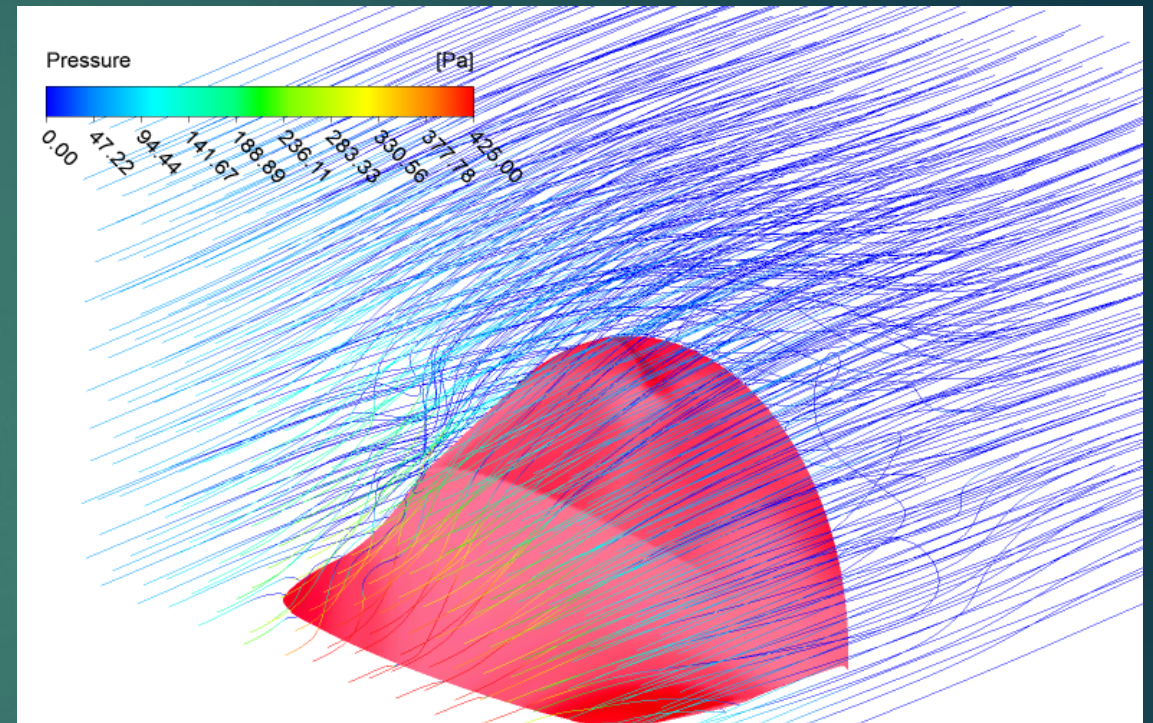
Vista isométrica



## *Alerón 3 a 70 Km/h*



Vista lateral izquierda



Vista isométrica

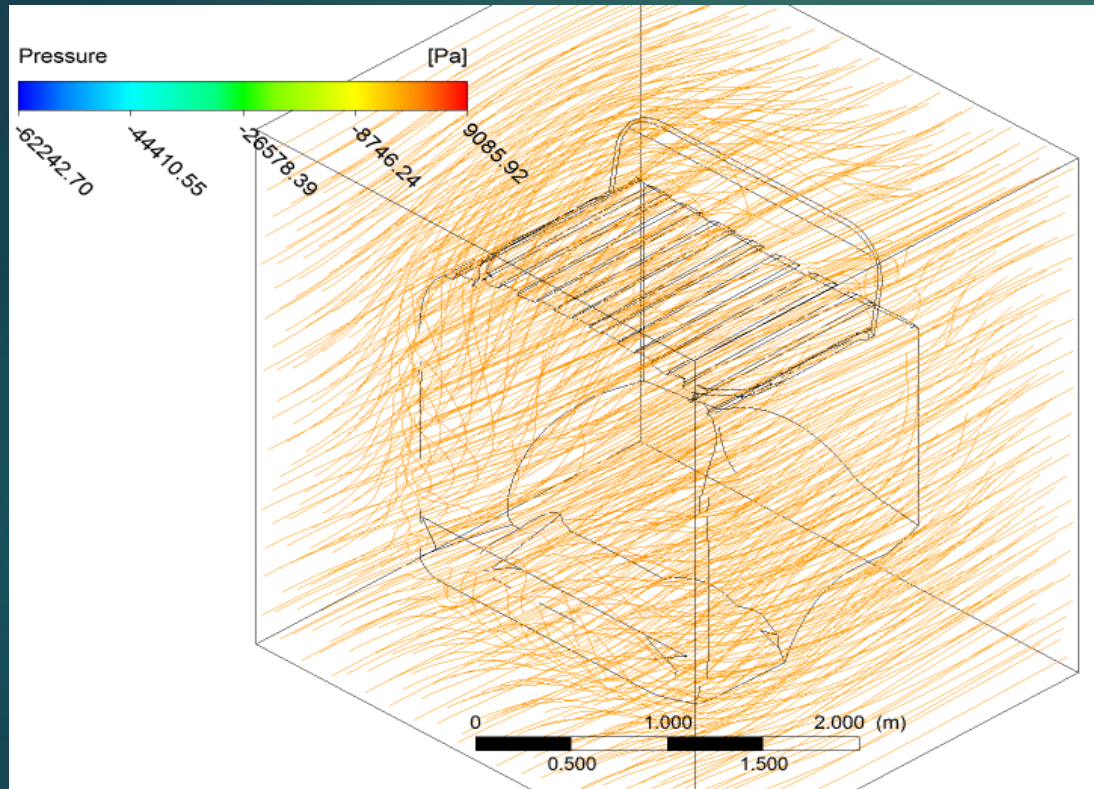
## Resultados de presión y velocidad de flujo de aire en el eje “Y”

Velocidad					
Del		70 [Km/h]		90 [Km/h]	
Camión					
Propuestas	Presión Máxima	Velocidad de	Presión Máxima	Velocidad de	
	[Pa]	flujo de aire	[Pa]	flujo de aire	
		Máxima [Km/h]		Máxima [Km/h]	
Alerón 1	115	360	145	321	
Alerón 2	682.26	315,18	1083.77	405.28	
Alerón 3	425	250	432	250	

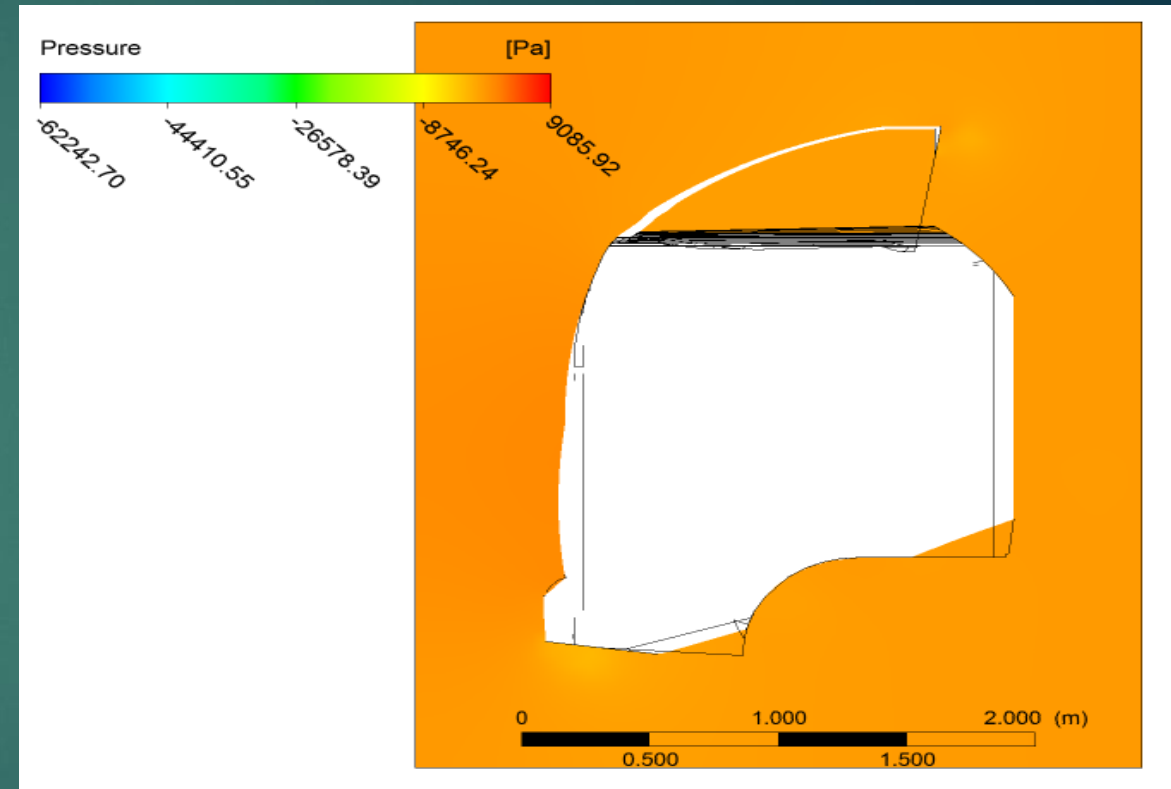
Nota: Las presiones máximas obtenidas en el alerón 2 se encuentran en eje Y las cuales hacen referencia a la presión ejercida hacia el piso por el flujo de aire.



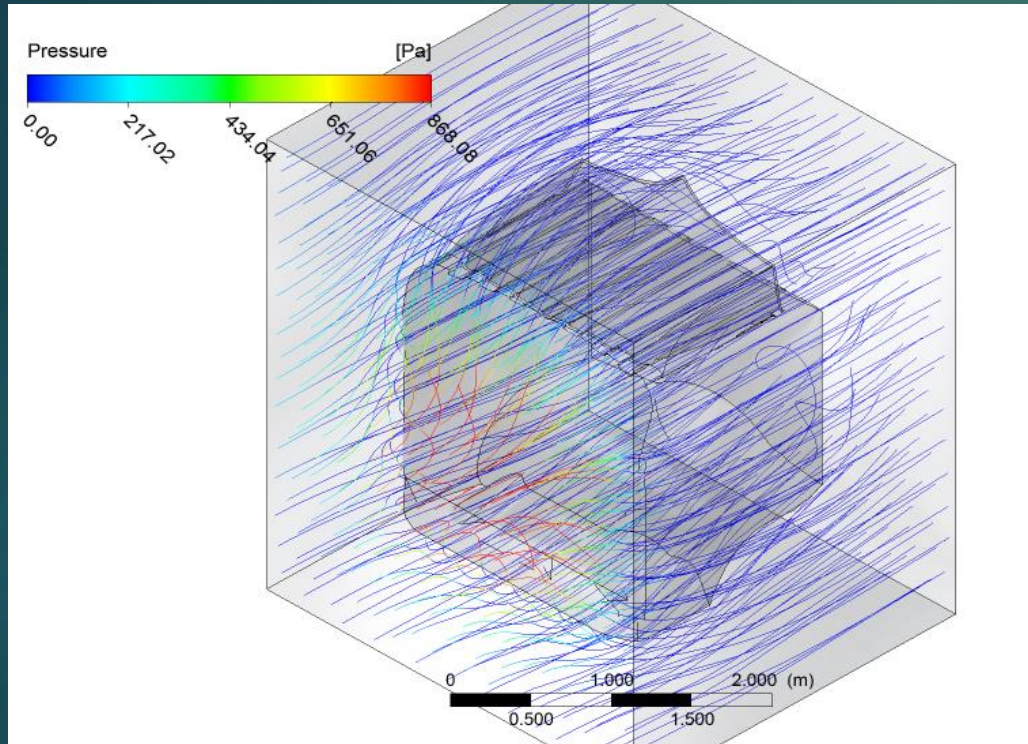
# Análisis “CFD” para la cabina y los prototipos propuestos



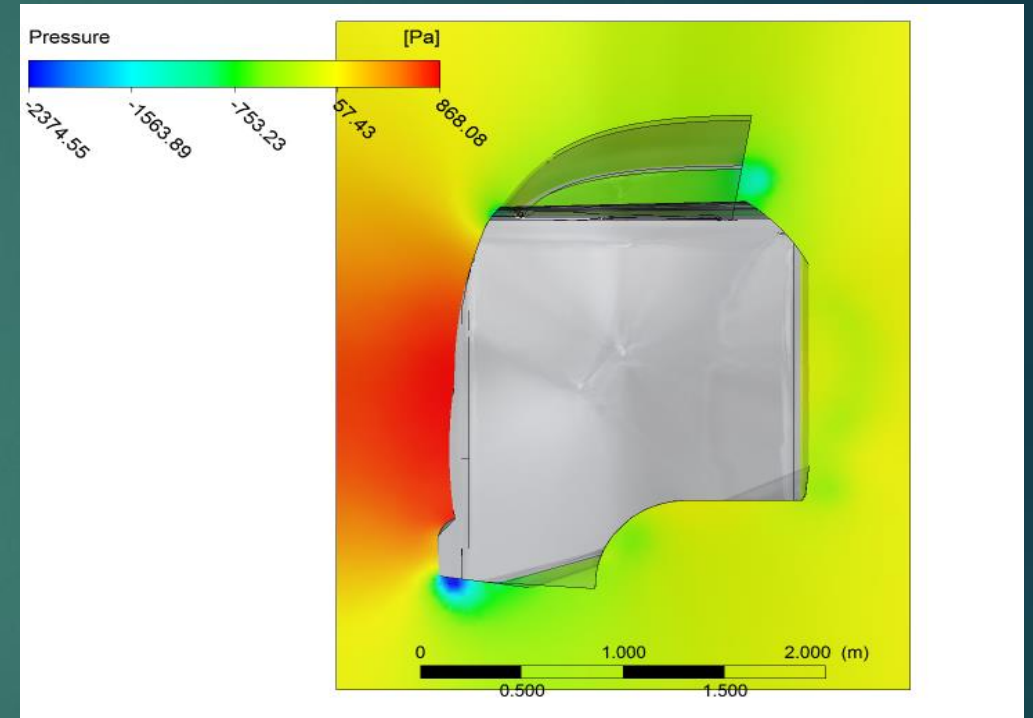
Vista isométrica



Vista lateral derecha

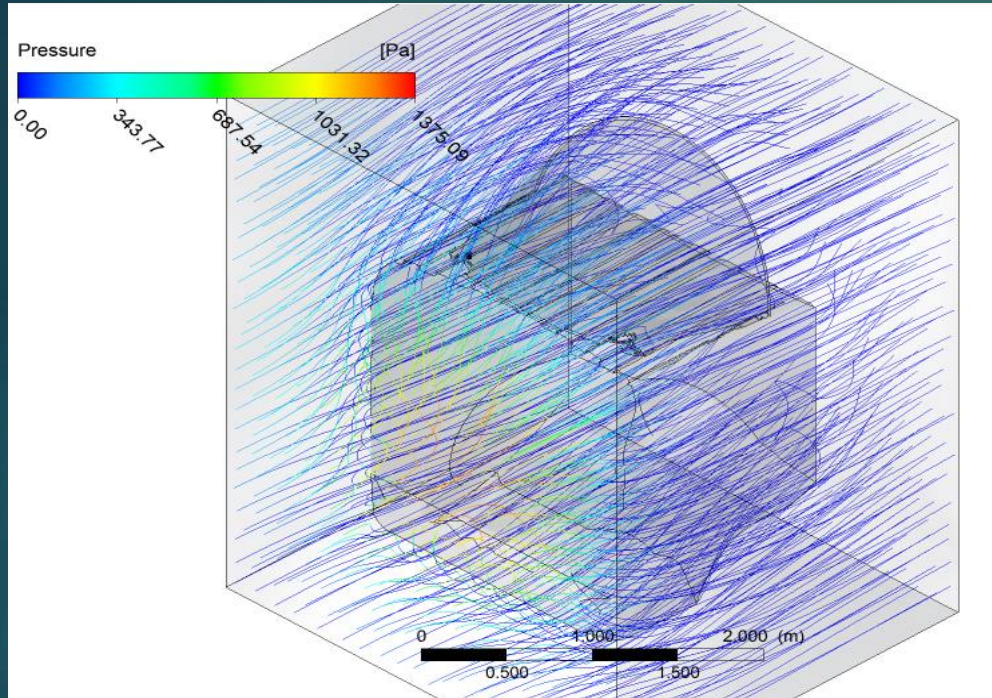


Vista isométrica

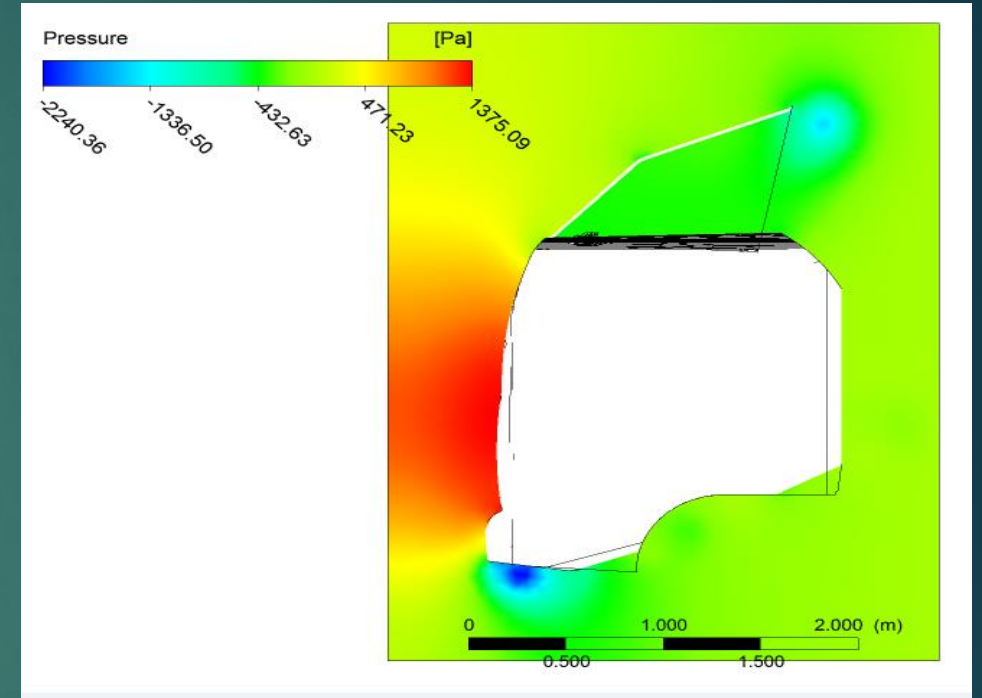


Vista lateral derecha





Vista isométrica



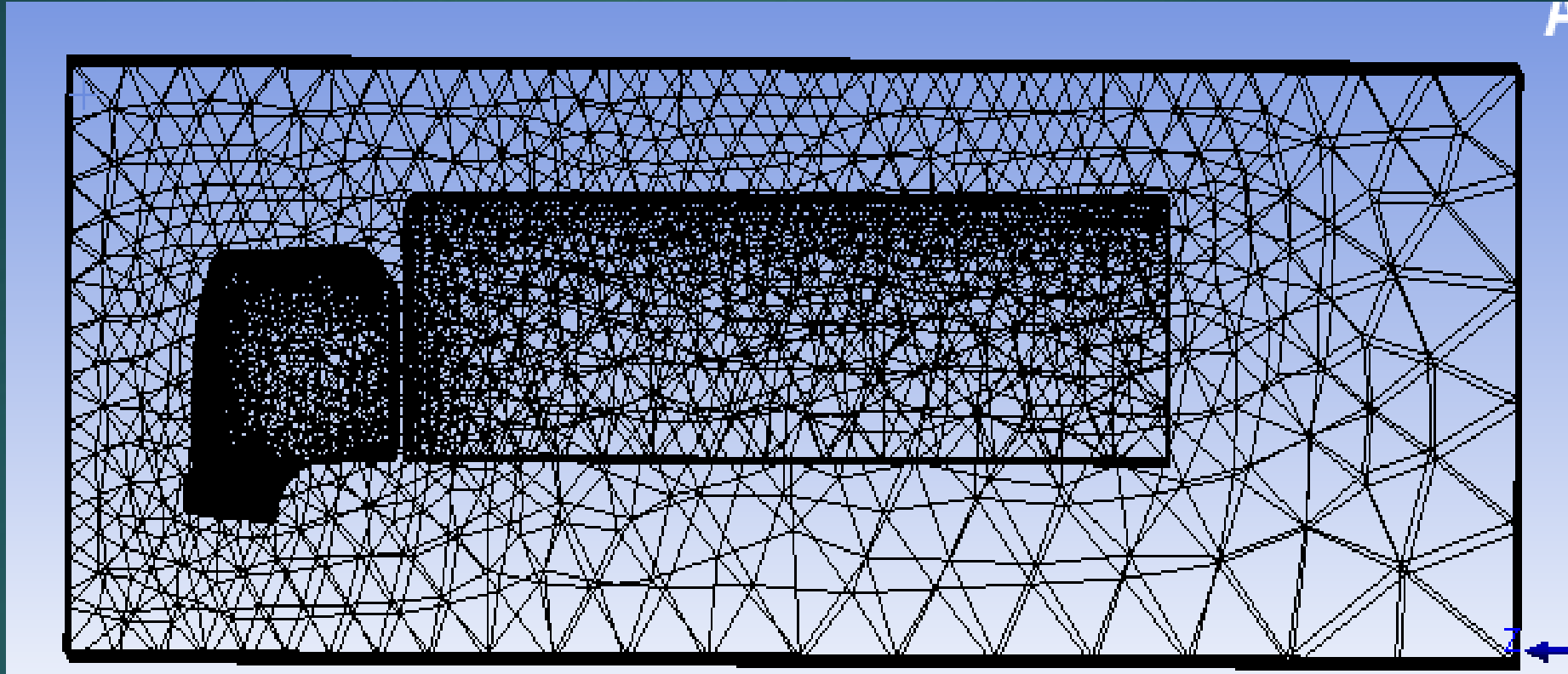
Vista lateral derecha

## Tabla de resultados arrojados a partir del análisis CFD de la cabina

Velocidad				
Del	70 [Km/h]		90 [Km/h]	
Camión				
Propuestas	Presión Máxima	Velocidad de	Presión Máxima	Velocidad de
	[Pa]	flujo de aire	[Pa]	flujo de aire
		Máxima [Km/h]		Máxima [Km/h]
Alerón 1	9085.92	250	15786.90	250
Alerón 2	868.08	250	1429.47	250
Alerón 3	1375.09	250	2248.85	250

Nota: La presión obtenida en este análisis se encuentra en el eje Z, la cual disminuye notablemente con el alerón 2

## Análisis CFD para el camión sin alerón



En esta figura se puede apreciar claramente la calidad de mallado, en donde la superficie en contacto con el flujo de aire posee una calidad mucho mayor al resto de elementos en el dominio computacional. Fuente: ANSYS.



## Calidad de mallado método “Jacobian Ratio”

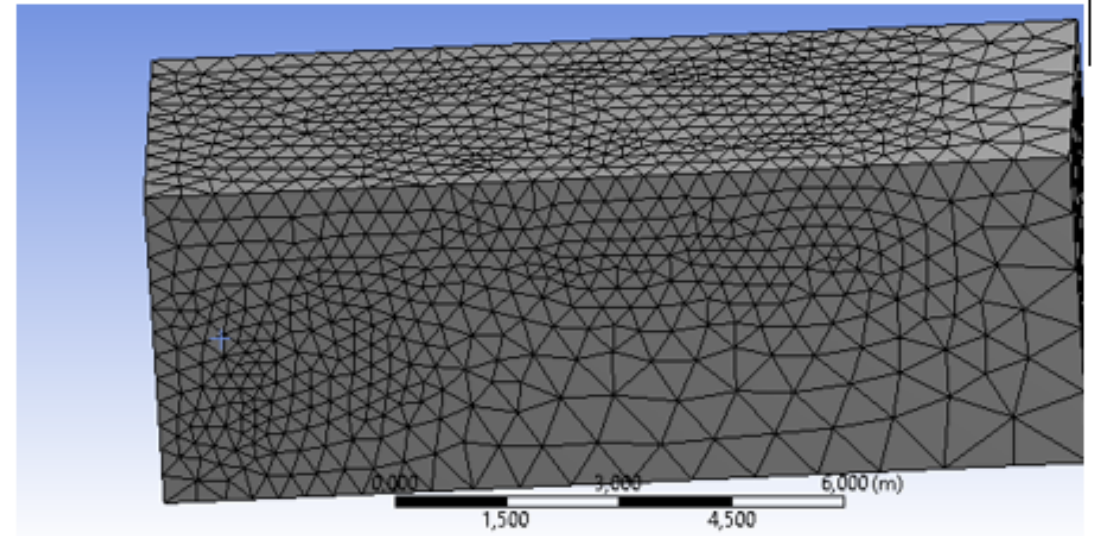
### Details of "Mesh"

#### + Advanced

#### + Defeaturing

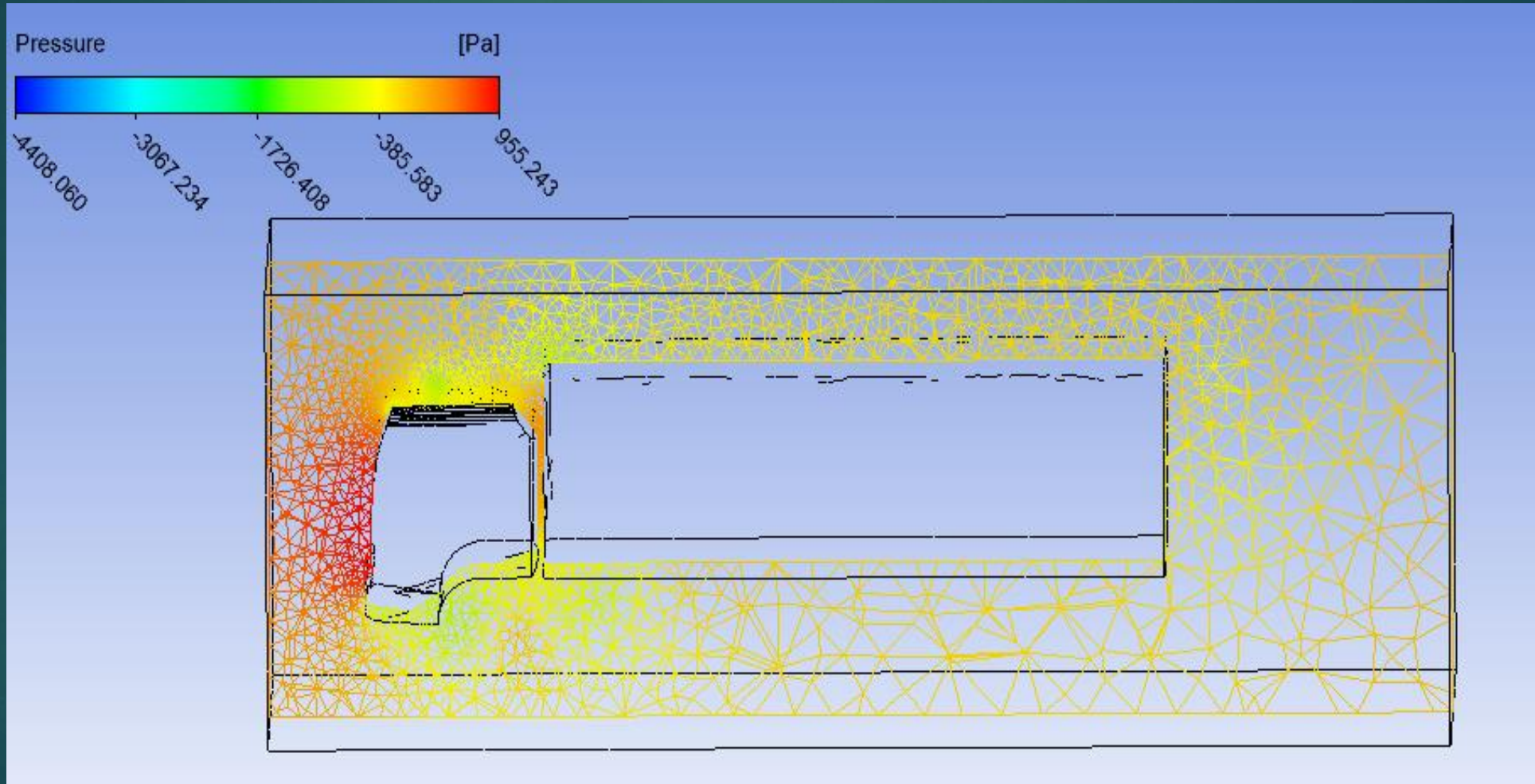
#### - Statistics

<input type="checkbox"/> Nodes	82992
<input type="checkbox"/> Elements	448663
<b>Mesh Metric</b>	<b>Jacobian Ratio</b>
<input type="checkbox"/> Min	1,
<input type="checkbox"/> Max	1,
<input type="checkbox"/> Average	1,
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,



Nota: Para el análisis CFD sin alerón se logró obtener que el tamaño de la malla según el “Jacobian Ratio”, sea 1 lo que asegura la convergencia del fluido y la calidad de los resultados, en donde el número de nodos presentes fue 82992 y 448663 elementos.

En la figura se muestra el resultado de presión obtenido en el análisis computacional a una velocidad de 90 Km/h, en donde el color rojo representa el valor máximo de la magnitud, y el color azul el valor mínimo.



“Visualización de presión máxima del flujo de aire”. Fuente: ANSYS.

$$F_L = \frac{(C_L)(\rho)(V^2)(A)}{2}$$

Donde:

$F_L$  = Fuerza de Sustentación [N].

$C_L$  = Coeficiente de Sustentación adimensional.

$\rho$ : Densidad del aire [Kg/m<sup>3</sup>].

A: Área frontal del vehículo [m<sup>2</sup>].

V: Velocidad del vehículo [m/s].

$$F_D = \frac{(C_D)(\rho)(V^2)(A)}{2}$$

Donde:

$F_D$ : Fuerza de Arrastre

$C_D$ : Coeficiente de Arrastre

$\rho$ : Densidad del aire [Kg/m<sup>3</sup>].

A: Área frontal del vehículo [m<sup>2</sup>].

V: Velocidad del vehículo [m/s].

$$Pa = \frac{1}{2} C_x \rho A V^3$$

$$R = \frac{1}{2} C_x \rho V^2$$

$$\mu = \frac{C_L}{C_D}$$

Donde:

Pa = Potencia necesaria para vencer la resistencia del aire [W].

Cx= Coeficiente de Penetración (Adimensional).

A= Superficie frontal del cuerpo perpendicular al movimiento del fluido [m<sup>2</sup>].

V= Velocidad del vehículo [m/s].

Donde:

R= Resistencia del aire [N].

Cx= Coeficiente de Penetración (Adimensional).

ρ= Densidad del aire [Kg/m<sup>3</sup>].

V= Velocidad del vehículo [m/s].

$\mu$  = Eficiencia Aerodinámica

CL = Coeficiente de Sustentación

CD = Coeficiente de Arrastre

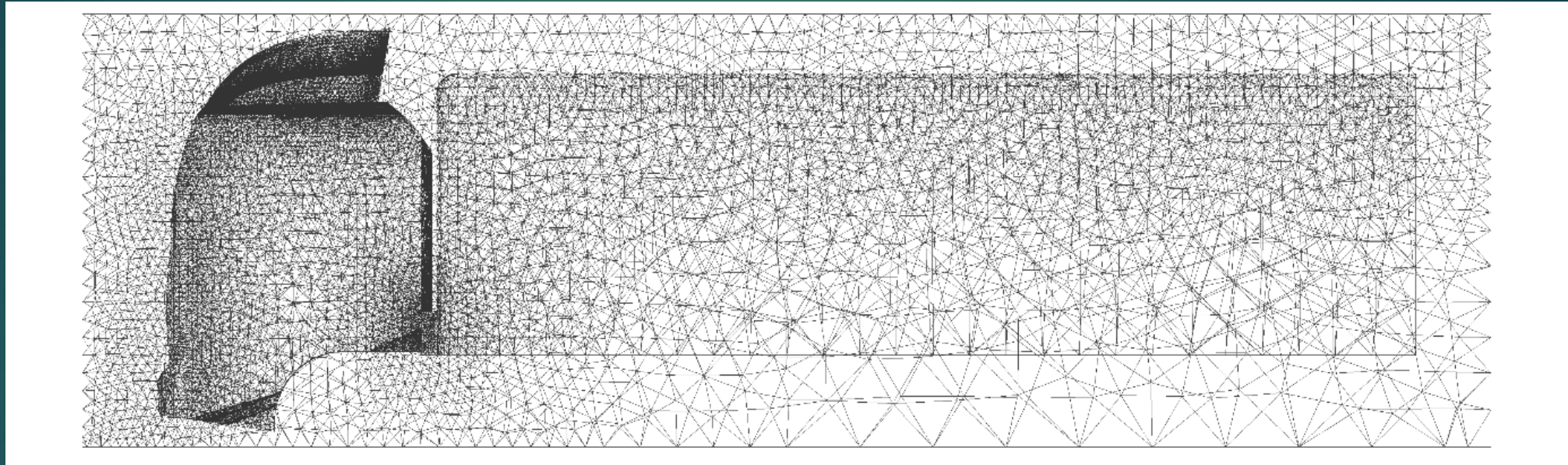
En la tabla se muestran los valores de los parámetros aerodinámicos obtenidos a partir del cálculo de la presión (análisis CFD) y posterior fuerza de arrastre para el modelo 3D del camión con su contenedor.

*Tabla de resultados en base a parámetros aerodinámicos.*

<b>Variable</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Fuerza de Arrastre	FL	[N]	6570
Fuerza de Sustentación	FD	[N]	490.2
Coeficiente Arrastre	CD	[--]	2.55
Coeficiente de Sustentación	CL	[--]	0.19
Resistencia del Aire	R	[N]	322.5
Potencia para vencer la resistencia del aire	<u>Pa</u>	[W]	55570
Eficiencia Aerodinámica	H	[--]	0.074

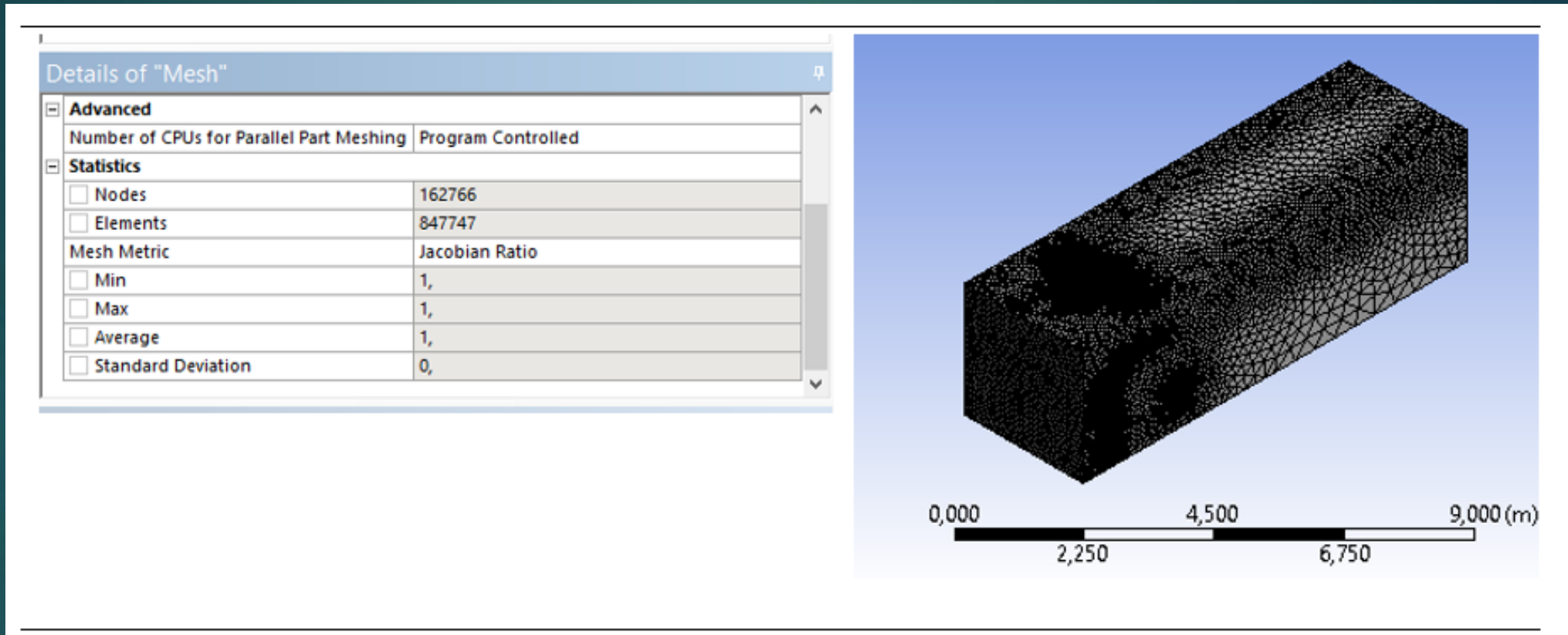


## Análisis CFD para el camión con alerón



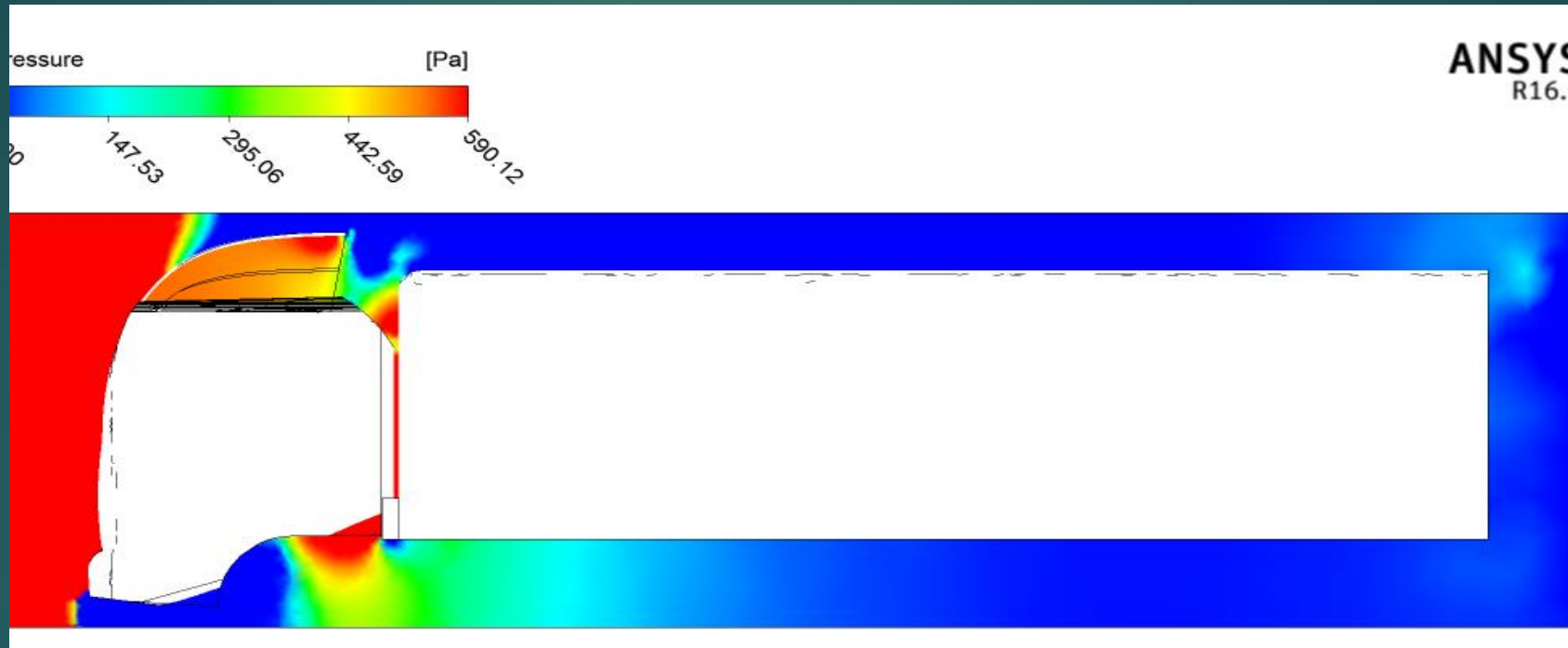
En esta figura se puede apreciar claramente la calidad de mallado tetraédrico, en donde la superficie en contacto con el flujo de aire posee una calidad mucho mayor al resto de elementos en el dominio computacional. Fuente: ANSYS

## Calidad de mallado método “Jacobian Ratio”



Nota: Para el análisis CFD con alerón se logró obtener que el tamaño de la malla según el “Jacobian Ratio”, sea 1 lo que asegura la convergencia del fluido y la calidad de los resultados, en donde el número de nodos presentes fue 162766 y 847747 elementos.

En la figura se muestra el resultado de presión obtenido en el análisis computacional a una velocidad de 90 Km/h, en presencia del alerón más eficiente, en donde el color rojo representa el valor máximo de la magnitud, y el color azul el valor mínimo.



“Visualización de presión máxima del flujo de aire”. Fuente: ANSYS.

En la tabla se muestran los valores de los parámetros aerodinámicos obtenidos a partir del cálculo de la presión (análisis CFD) y posterior fuerza de arrastre para el modelo 3D del camión con su contenedor.

*Tabla de resultados en base a parámetros aerodinámicos.*

<b>Variable</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Fuerza de Arrastre	FL	[N]	5664
Fuerza de Sustentación	FD	[N]	684
Coefficiente Arrastre	CD	[--]	1.57
Coefficiente de Sustentación	CL	[--]	0.19
Resistencia del Aire	R	[N]	322.5
Potencia para vencer la resistencia del aire	<u>Pa</u>	[W]	77400
Eficiencia Aerodinámica	H	[--]	0.12



## Cálculo de consumo de combustible

Fuerza de resistencia al avance:

$$R_T = R_t + R_r + R_a$$

$$R_T = (G \cdot f) + (G \cdot H_w) + \left( \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \right)$$

Potencia necesaria para vencer  $R_T$ :

$$Ne = R_T \cdot V$$

$$Ne = \left[ (G \cdot f) + (G \cdot H_w) + \left( \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \right) \right] \cdot V$$

$$Ne = \left[ \left[ (G \cdot f) + (G \cdot H_w) + \left( \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \right) \right] \cdot V \right] \times 10^{-3} \times \frac{1}{\eta_{tr}}$$



Rendimiento efectivo:

$$\eta_e = \frac{Ne}{BQ}$$

Consumo de combustible:

$$B = \frac{Ne}{(\eta_e)(Q)}$$

Remplazando :

$$B = \frac{\left[ \left[ (G \cdot f) + (G \cdot H_w) + \left( \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \right) \right] \cdot V \right] \times 10^{-3}}{(\eta_e)(Q)} \times \frac{1}{\eta_{tr}}$$

*Consumo de combustible en dólares para el vehículo sin alerón*



Consumo de Combustible

<u>Kg/seg</u>	<u>m<sup>3</sup>/seg</u>	gal/h	Viaje de 10 h	Costo (Dólares)
$5.9 \times 10^{-3}$	$6.88 \times 10^{-6}$	6.447	64.47 gal	67.40



*Consumo de combustible en dólares para el vehículo con alerón*

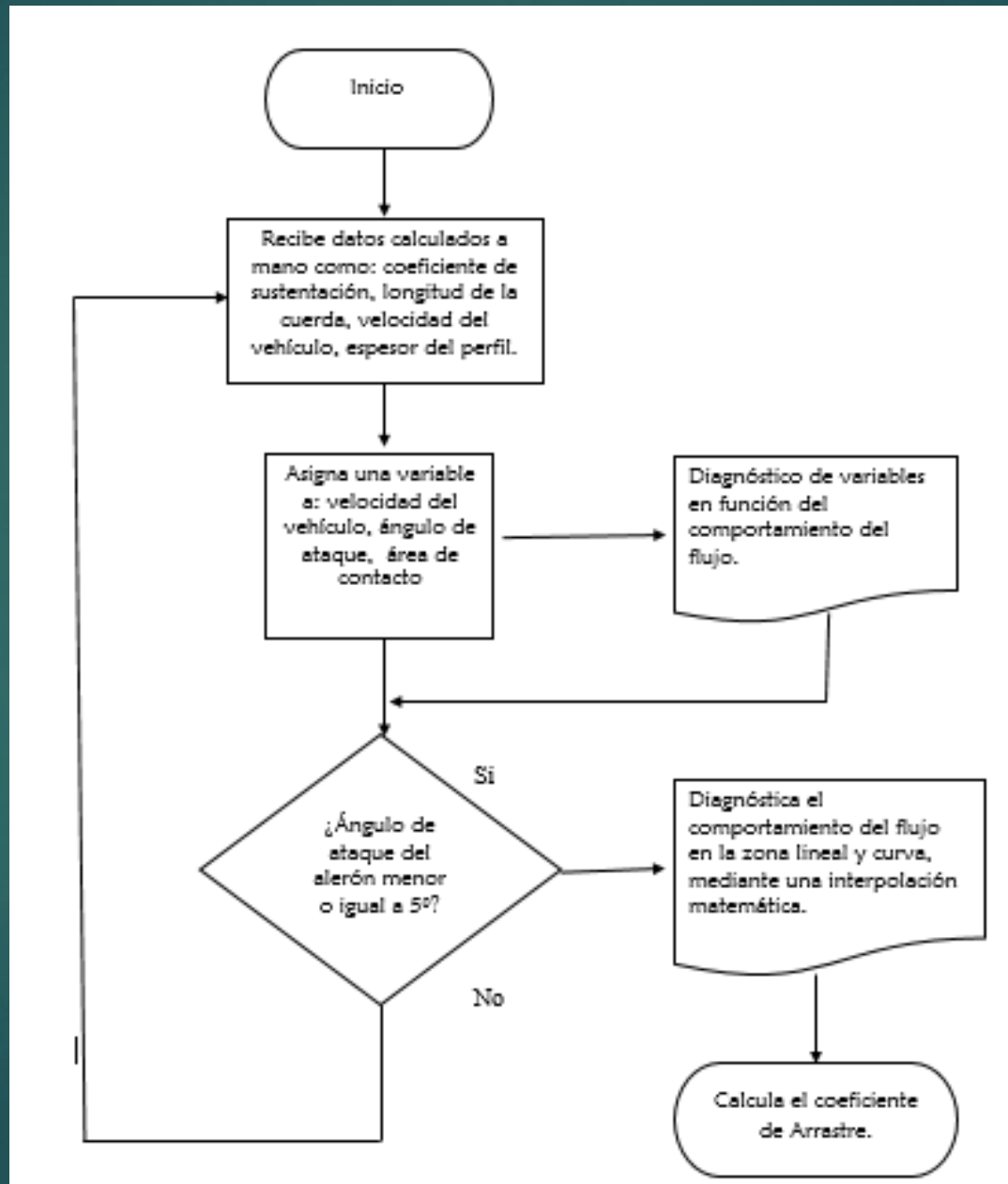


Consumo de Combustible

<u>Kg/seg</u>	<u>m<sup>3</sup>/seg</u>	gal/h	Viaje de 10 h	Costo (Dólares)
$5.91 \times 10^{-3}$	$6.8 \times 10^{-6}$	6.5	65 gal	66.95



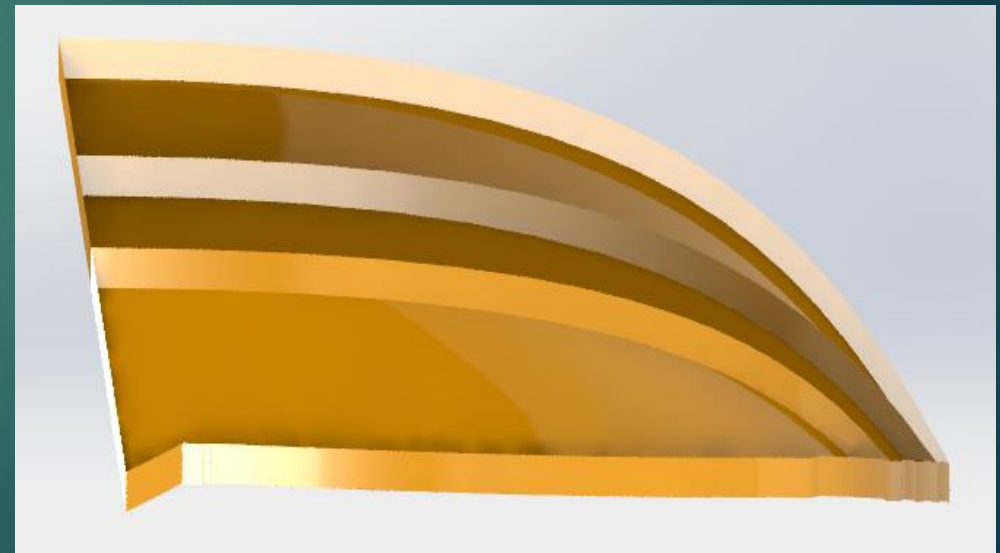
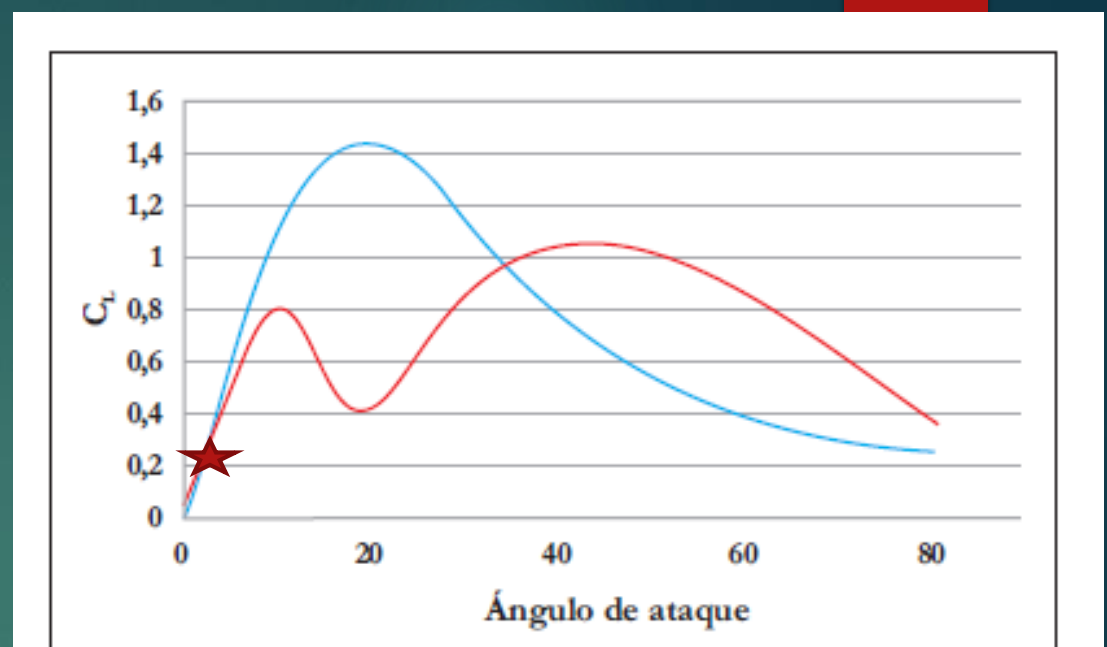
# Validación de resultados en MATLAB



```

1 function CoefSustent()
2 clc;clear;
3 %% entradas
4 alfa=input('Ingrese el valor del ángulo de ataque: ');
5 alfa=(alfa*pi)/180;
6 area=9.6;%Area de contacto perpendicular a flujo
7 %% constantes
8 C_D90=2;
9 C_L90=0.08;
10 C_L0=0;
11 alfa_0=0;
12 alfa_CL=0.19;
13 c=1.07;%longitud de la cuerda
14 tm=0.002; %espesor
15 velocidad=25;
16 C_Lalf=0.3; %valor obtenido de la gráfica C_L vs alfa
17 %% Desarrollo
18 C_DP=C_D90*(sin(alfa))^2;
19 A=1+(C_L0)/(sin(45))*sin(alfa);
20 delta1=57.6*C_L90*sin(alfa);
21 delta2=alfa_0*cos(alfa);
22 beta=alfa*180/pi-delta1-delta2;
23 beta=beta*pi/180;
24 s_alfa=A*area*C_L90*sin(beta)*cos(beta);
25 t_alfa=C_L0+C_Lalf*alfa*180/pi;
26 f_alfa=1;%en la zona lineal
27 C_Lalfa1=f_alfa*t_alfa+(1-f_alfa)*s_alfa;
28 f_alfa=0;%en la no zona lineal
29 C_Lalfa2=f_alfa*t_alfa+(1-f_alfa)*s_alfa;
30 C_LalfaT=(C_Lalfa1+C_Lalfa2)*(4.21); %factor de compensación el 4.2
31 f=(C_LalfaT-s_alfa)/(t_alfa-s_alfa)
32 alfa_CD=0.13*alfa_CL;
33 C_Df=1.25*(tm/c);
34 C_DI=C_Df+alfa_CD;
35 C_D=f*C_DI+(1-f)*C_DP
36 C_Dreal=(C D)*(velocidad)

```



# Resultados mediante MATLAB

```
Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

Ingrese el valor del ángulo de ataque: 5

f =

    4.5265

C_D =

    0.0688

C_Dreal =

    1.7201

fx >>
```



## Coefficients of drag according to methodology used:



Análisis CFD		Análisis MATLAB		Condiciones
Cd	Fr	Cd	Fr	Velocidad : 25 m/seg
1.57	5664 [N]	1.72	6120 [N]	Área: 9,6 m <sup>2</sup>
				Densidad: 1.2 Kg/m <sup>3</sup>

Nota: Los coeficientes de arrastre y fuerza de arrastre se encuentran dentro del margen de error. □

En esta parte de la investigación se visualiza tabla, los resultados obtenidos en el proceso CFD y en MATLAB siendo muy cercanos, lo cual certifica la calidad del trabajo realizado.

*Consumo de combustible con Cd en base a MATLAB.*

Consumo de Combustible				
<u>Kg/seg</u>	<u>m<sup>3</sup>/seg</u>	gal/h	Viaje de 10 h	Costo (Dólares)
5.916x10 <sup>-3</sup>	6.8x10 <sup>-6</sup>	6.52	65.2 gal	67.2

## Conclusiones

El proceso de elaboración de este proyecto ha sido muy beneficioso ya que se pudo realizar un profundo análisis de la eficiencia aerodinámica y el consumo de combustible en camiones Hino GH serie 500 y es así que al llegar a la culminación de este trabajo de investigación se concluye que:

- El uso de la ingeniería inversa para el modelado 3D de la carrocería del camión es una excelente alternativa para quienes buscan detallar al máximo las características de los vehículos previos a un análisis CFD.
- La inclusión de un alerón en techo de la cabina del vehículo, mejora los aspectos aerodinámicos, es así que se aprecia que la reducción de la fuerza de Arrastre de 6570 [N] a 5664 [N], en un 0.07%, tomando en cuenta que el vehículo se encuentra a plena carga.
- Al incluir el Alerón la fuerza de Sustentación (efecto suelo), aumenta de 490.2 [N] a 684 [N], en un 0.03 %, un valor insignificante tomando en cuenta la geometría del vehículo (plena carga).
- La Eficiencia Aerodinámica mejoró de 0.074 a 0.12; un valor sumamente bajo, es decir el vehículo con un peso bruto de 17000 Kg no es aerodinámico y con esa cantidad de peso la inclusión del alerón no incide en el desempeño.

- Al analizar el consumo de combustible se corrobora todo lo mencionado anteriormente ya que este no depende de la eficiencia aerodinámica, sino de la capacidad de carga del vehículo. Cuando el vehículo se encuentra descargado la eficiencia aerodinámica aumenta en un 5.5% al momento de incluir el alerón eso haciendo referencia al estudio realizado por Fraga López, B. (2015). Diseño y Simulación de Alerones Superiores para Camiones. Universidad internacional SEK, Quito, Ecuador, pero cuando el vehículo se encuentra a toda su capacidad de carga el consumo de combustible difiere en 0.45 \$ con la inclusión del alerón.

En general el resultado de esta investigación, establece que la incidencia del alerón en el techo de la cabina del vehículo cuando este se encuentra su máxima capacidad de carga es muy pobre.

