

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Diseño de la carrocería de un vehículo tipo fórmula

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por:

René Araujo Gallardo

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala  
2017



Diseño de la carrocería de un vehículo tipo fórmula

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Diseño de la carrocería de un vehículo tipo fórmula

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por:

René Araujo Gallardo

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala  
2017


Asesor del Trabajo de Graduación:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Rony José Herrarte

Tribunal examinador

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Rony José Herrarte

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Víctor Hugo Ayerdi

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Raúl Eduardo Loarca

# ÍNDICE

LISTA DE CUADROS .....	vi
LISTA DE IILUSTRACIONES.....	vii
RESUMEN.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	2
A. General .....	2
B. Específicos.....	2
III. JUSTIFICACIÓN.....	3
IV. MARCO TEÓRICO .....	5
A. Aerodinámica .....	5
B. Principios básicos de aerodinámica .....	6
1. Viscosidad ( $\mu$ ).....	7
2. Presión (P).....	8
3. Densidad ( $\rho$ ).....	9
C. Teorema de Bernoulli .....	9
1. Diferencia de presión.....	9
2. Energía de presión.....	10
3. Bernoulli alrededor de una geometría.....	10
D. Fuerzas más importantes entre el aire y un vehículo .....	10
E. Resistencia aerodinámica .....	12
F. Resistencia de superficie .....	12
1. Resistencia de forma.....	12
2. Resistencia por fricción.....	13

3.Resistencia de presión. ....	13
G.    Eficiencia aerodinámica .....	15
1.Coeficiente de Sustentación ( <b>CL</b> ). ....	16
2.Coeficiente de Resistencia Aerodinámica ( <b>CD</b> ). ....	16
3.Coeficientes de Sustentación y Resistencia en la Aerodinámica. ....	18
H.    Flujos laminar y turbulento.....	19
1.Capa límite. ....	19
I.    Número de Reynolds .....	20
J.    Efecto Coanda .....	21
K.    Autodesk Inventor 2017 .....	21
1.Extrude. ....	22
2.Sculpt.....	22
3.Parametrización. ....	23
L.    ANSYS .....	23
1.Workbench 15.0. ....	23
2.FLUENT. ....	23
3.Static Structural. ....	29
M.    2017-2018 Formula SAE Rules.....	30
V.    SECCIONES DE LA CARROCERÍA .....	34
A.    Punta.....	35
B.    Frente y tomas de aire laterales .....	35
C.    Capó .....	36
D.    Piso .....	39
E.    Gurney Flap.....	39
VI.   DISEÑO DE CARROCERÍA .....	43
A.    Fase I .....	53

B.	Fase II.....	55
VII.	PRUEBAS DE DISEÑO DE CARROCERÍA Y VALIDACIÓN.....	56
A.	Resultados Fase I.....	59
B.	Resultados Fase II.....	62
C.	Tomas de aire laterales .....	66
D.	Velocidad máxima.....	69
E.	Validación: Esfera .....	70
F.	Prueba estructural punta .....	72
VIII.	CONCLUSIONES.....	75
IX.	RECOMENDACIONES .....	76
X.	BIBLIOGRAFÍA.....	78
XI.	ANEXOS.....	80
	ANEXO 1: Fabricación de la carrocería .....	80
	ANEXO 2: Cortes de la carrocería.....	89
	ANEXO 3: Agujeros de la carrocería.....	93
	ANEXO 4: Cotizaciones .....	96
	ANEXO 5: Planos .....	101

## **LISTA DE CUADROS**

Cuadro 1. Densidad y viscosidad del aire a 1 atm. ....	7
Cuadro 2. Requerimientos de diseño dentro del manual de Fórmula SAE 2016. ....	30
Continuación Cuadro 2.....	31
Cuadro 3. Últimas iteraciones de resultados obtenidos en FLUENT para la carrocería. ....	65
Cuadro 4. Últimas iteraciones de resultados obtenidos en FLUENT para la esfera. ....	71
Cuadro 5. Datos de la fibra de vidrio ingresados en ANSYS.....	73

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Cohesión de moléculas en sólidos, líquidos y gases. ....	6
Figura 2. Fuerza aerodinámica total y sus componentes. ....	11
Figura 3. Análisis de presiones en camiones. ....	14
Figura 4. Análisis de ANSYS de la carrocería Fase I (izq.) y Fase II (der.). ....	15
Figura 5. Coeficiente de arrastre en diferentes formas. ....	17
Figura 6. Bosquejos de las diferentes secciones que conforman la carrocería. ....	21
Figura 7. Superficies que conforman la carrocería. ....	22
Figura 8. Superficies de la carrocería transformadas en sólido por medio de la función Sculpt. ....	22
Figura 9. Parámetros del chasis y la carrocería en documento Excel. ....	23
Figura 10. Túnel de viento digital recomendado por FLUENT Alemania. ....	24
Figura 11. Túnel de viento digital con mallado ingresado a FLUENT. ....	25
Figura 12. Programación del modelo en FLUENT. ....	26
Figura 13. Programación de la velocidad del aire en FLUENT. ....	27
Figura 14. Programación de los valores de referencia en FLUENT. ....	28
Figura 15. Programación del método de solución en FLUENT. ....	29
Figura 16. Prueba de la punta con la presión del aire en su parte delantera en ANSYS. ....	30
Figura 17. Requerimientos de diseño dentro del manual de Fórmula SAE 2016. ....	32
Figura 18. Carrocería completa. ....	34
Figura 19. Punta de la carrocería. ....	35
Figura 20. Frente y tomas de aire laterales. ....	36
Figura 21. Capó de la carrocería. ....	37
Figura 22. Toggle Latch Fasteners. ....	38
Figura 23. Instalación de sección en la parte frontal utilizando Toggle Latch Fasteners. ....	38
Figura 24. Piso de la carrocería. ....	39
Figura 25. Gurney Flap. ....	40
Figura 26. Perturbaciones en un Gurney Flap y sus efectos. ....	41
Figura 27. Efectos del Gurney Flap en la carrocería del vehículo Fórmula SAE. ....	42
Figura 28. Chasis con atenuador de impactos instalado en su parte frontal. ....	43
Figura 29. Bosquejos de las diferentes secciones que conforman la carrocería. ....	44
Figura 30. Bosquejo de la parte superior de la carrocería. ....	45
Figura 31. Bosquejo de la parte inferior de la carrocería. ....	46

Figura 32. Verificación de la carrocería sobre el chasis y el atenuador de impactos. ....	46
Figura 33. Verificación de la parte inferior de la carrocería con el chasis y el atenuador de impactos ..	47
Figura 34. Superficies que conforman la carrocería. ....	48
Figura 35. Planos que limitan las tomas de aire laterales. ....	49
Figura 36. Superficies que conforman las tomas de aire laterales. ....	50
Figura 37. Carrocería con toma de aire lateral. ....	51
Figura 38. Verificación de la carrocería completa instalada en el chasis. ....	52
Figura 39. Chasis y componentes del vehículo instalados. ....	52
Figura 40. Carrocería instalada en chasis con componentes del vehículo. ....	53
Figura 41. Carrocería Fase I. ....	54
Figura 42. Carrocería Fase II. ....	55
Figura 43. Túnel de viento digital realizado en ANSYS. ....	57
Figura 44. Túnel de viento digital realizado en ANSYS. ....	57
Figura 45. Parámetros del mallado en ANSYS. ....	58
Figura 46. Túnel de viento digital con mallado ingresado a FLUENT. ....	58
Figura 47. Vectores de velocidad del aire sobre la carrocería. ....	60
Figura 48. Vectores de turbulencia del aire sobre la carrocería. ....	60
Figura 49. Vectores de turbulencia sobre el lateral de la carrocería. ....	61
Figura 50. Presiones sobre la carrocería. ....	62
Figura 51. Vectores de velocidad del aire sobre la carrocería. ....	63
Figura 52. Vectores de turbulencia del aire sobre la carrocería. ....	64
Figura 53. Vectores de turbulencia sobre el lateral de la carrocería. ....	64
Figura 54. Resultados del coeficiente de resistencia aerodinámica Cd. ....	65
Figura 55. Presiones sobre la carrocería. ....	66
Figura 56. Vectores de velocidad del aire dentro de la toma de aire lateral. ....	66
Figura 57. Plano medio de la toma de aire lateral con vectores de velocidad del aire. ....	67
Figura 58. Vectores de turbulencia del aire dentro de la toma de aire lateral. ....	67
Figura 59. Plano medio de la toma de aire lateral con vectores de turbulencia del aire. ....	68
Figura 60. Vectores de velocidad del aire alrededor de la esfera. ....	72
Figura 61. Punta de la carrocería en ANSYS con la presión que experimenta. ....	73
Figura 62. Esfuerzo de tensión en la punta de la carrocería. ....	74
Figura 63. Deformación en la punta de la carrocería. ....	74

## RESUMEN

El megaproyecto titulado “*Fórmula SAE*” fue creado con el fin de participar en la competencia Fórmula SAE 2018 que se realizará en Estados Unidos. La competencia consta de pruebas estáticas y dinámicas, las cuales evalúan diferentes aspectos que van desde análisis financieros, diseño del vehículo y análisis aerodinámico, hasta pruebas de aceleración, prueba de frenado e incluso las pruebas en el circuito de carreras. La organización SAE establece los requisitos de la competencia por medio del reglamento, los cuales deben de ser cumplidos por el megaproyecto en cada uno de sus diferentes módulos los cuales son: dirección y suspensión, potencia y frenos, transmisión mecánica, sistema eléctrico y electrónico, estructura, y aerodinámica.

El módulo de Aerodinámica busca optimizar la eficiencia del diseño de la carrocería del vehículo tipo fórmula, haciendo que esta sea aerodinámicamente eficiente, buscando obtener un coeficiente de resistencia aerodinámica menor a 1. De acuerdo a datos de competencias anteriores, estos vehículos no alcanzan velocidades mayores a 70 km/h en las curvas, por lo que los alerones traseros y delanteros no causan ningún efecto significativo en su maniobrabilidad. No agregar alerones al diseño aerodinámico también ayuda a mejorar la relación peso-potencia, mitiga errores por tener que instalar más accesorios al vehículo, ayuda a mantener el costo del vehículo bajo y reduce el área frontal del vehículo. Por lo tanto, se buscan diseños de carrocerías simples y que no agreguen cargas aerodinámicas innecesarias a los vehículos; esto con el fin de maximizar el desempeño del vehículo, mejorando su aceleración y permitiéndole alcanzar la velocidad máxima deseada de por lo menos 120 km/h, pues según el reglamento de Fórmula SAE las velocidades máximas de la prueba no serán de más de 105 km/h.

Esto solamente se puede lograr encontrando el diseño que minimice la resistencia aerodinámica, por lo que se investigaron principios básicos de aerodinámica, artículos científicos y reportes de equipos que han participado en años anteriores de la aerodinámica aplicada a sus carrocerías, y las diferentes tendencias que han marcado la aerodinámica en los carros de competición, principalmente el tipo fórmula. Cada una de las secciones del vehículo que conforman la carrocería, como: punta, trompa, pontones y fondo plano, se diseñaron con diferentes curvas y geometrías, las cuales se integraron para conformar la carrocería completa y así analizarla y evaluarla por medio del software

ANSYS con lo que se determinó el coeficiente de resistencia aerodinámica de la misma y la dirección del flujo de aire sobre sus superficies. La carrocería se optimizó hasta que esta tuvo un coeficiente de resistencia aerodinámica menor a 0.9 y se comprobó que el vehículo sea capaz de alcanzar la velocidad máxima deseada de por lo menos 120 km/h.

# I. INTRODUCCIÓN

La eficiencia aerodinámica en el diseño de la carrocería del vehículo Fórmula SAE es una parte fundamental del desempeño del mismo, pues mejora su aceleración y le permite alcanzar la velocidad máxima deseada de por lo menos 120 km/h, al minimizar las cargas aerodinámicas que actúan sobre el mismo. Esto se logra manteniendo el coeficiente de resistencia aerodinámica al mínimo, eliminando turbulencias y manteniendo laminar la capa límite del flujo de aire sobre la carrocería.

El entendimiento y estudio de los principios básicos de la aerodinámica fue necesario para realizar un diseño que contara con geometrías de curvaturas suaves que permitieran al flujo de aire deslizarse por encima de la carrocería del vehículo Fórmula SAE de forma laminar, sin crear turbulencias a lo largo de la misma. Esto se evaluó en un túnel de viento digital, el cual por medio del software demostró que el coeficiente de resistencia aerodinámica se logró mantener menor a 0.9; e hizo evidente la necesidad de algunas mejoras en el diseño de la carrocería.

Entre estas mejoras se encontraba la necesidad de un Gurney Flap previo al habitáculo del piloto y un diseño que causará la menor turbulencia posible en su parte trasera. Las mejoras fueron implementadas al diseño de la carrocería y luego esta se volvió a evaluar y analizar por medio del túnel de viento digital. Este análisis demostró el correcto funcionamiento del Gurney Flap implementado al diseño y comprobó la mitigación de las turbulencias que se formaban en la parte trasera.

Además, se comprobó que el coeficiente de resistencia aerodinámica se mantuvo por debajo de 0.9, siendo el mismo de  $0.70794 \pm 0.04665$ . Por lo que el diseño es aerodinámicamente eficiente de acuerdo a los objetivos planteados para este proyecto y definitivamente ayuda en el desempeño del vehículo.

## **II. OBJETIVOS**

### **A. General**

- Diseñar una carrocería tipo fórmula que optimice la eficiencia aerodinámica del vehículo Fórmula SAE con un coeficiente de resistencia aerodinámica menor a 0.9.

### **B. Específicos**

- Crear un diseño CAD paramétrico que se ajuste al diseño del chasis.
- Obtener un valor de coeficiente de resistencia aerodinámica menor a 0.9 para la carrocería completa con todas sus secciones integradas.
- Crear un diseño que permita al vehículo alcanzar una velocidad máxima de por lo menos 120 km/h.
- Elaborar planos del diseño final para su fabricación.

### III. JUSTIFICACIÓN

La industria automotriz representa a uno de los sectores económicos más importantes del mundo debido a sus ingresos. Año tras años todas las marcas que conforman esta industria buscan la innovación en el diseño, el desarrollo tecnológico y el desempeño de los vehículos para así sobresalir y marcar las nuevas tendencias de un mercado que cada vez quiere más velocidad, más potencia, más eficiencia y un mejor desempeño. Pero encontrar nuevas propuestas se vuelve cada vez más difícil, por lo que no hay mejor forma de hacerlo que retando a las nuevas mentes a desarrollar nuevas ideas y poner a prueba su ingenio en competencias como lo es la Fórmula SAE. Competencias como esta generan grandes ideas, las cuales pueden desarrollarse y aplicarse a los nuevos automóviles que se llevan al mercado, mejorando su tecnología, su desempeño y su eficiencia e impulsando muchas veces las nuevas tendencias que revolucionan la industria automotriz.

La aerodinámica es el aspecto de la tecnología de los vehículos de carreras, sobre todo los tipo fórmula, que mayor influencia ha tenido en su rendimiento. Y es que es considerada “El Santo Grial” de los vehículos de carreras, y no se podría esperar menos, pues desde que se descubrió el potencial que tiene utilizar el aire y sus efectos sobre los vehículos de carreras, ya nada ha sido igual en el mundo del automovilismo. La aerodinámica ha permitido mejoras en el desempeño de los vehículos como la reducción en las distancias de frenado, el aumento en la velocidad en las curvas y mayor aceleración entre muchas otras ventajas en el comportamiento de los vehículos, hasta tal punto que esto ha llegado a ser peligroso y se han tenido que establecer reglamentos y límites en las modificaciones que se pueden hacer a los vehículos de carreras.

Por supuesto, la Fórmula SAE no es la excepción, y en estos vehículos la aerodinámica también juega un papel muy importante en su desempeño y su rendimiento en la pista, y es que si se logra diseñar una carrocería aerodinámicamente eficiente, que maximice la carga aerodinámica permitiendo al vehículo volar a través de las curvas a toda velocidad, con un arrastre moderado que no sacrifique su velocidad máxima en las rectas, se tiene una gran ventaja en el comportamiento del vehículo y el rendimiento que este tendrá. Además de esto, la carrocería del vehículo es su estilo, su cuerpo, su cara y su personalidad, por lo que la aerodinámica en un vehículo tipo fórmula no solo es una ciencia, sino que también un arte.

Sin importar el motor, el sistema de frenos, el chasis o la transmisión que el vehículo tenga, un correcto diseño aerodinámico mejora siempre el desempeño del vehículo. Además, siempre y cuando se respeten los requerimientos y las áreas para dispositivos aerodinámicos establecidos por el reglamento de la Fórmula SAE, la aerodinámica es un sistema que no tiene fronteras, ni un diseño final

o decisivo, y permite siempre seguir mejorando, seguir haciendo modificaciones y retádonos a llevar el desempeño del vehículo al límite.

## IV. MARCO TEÓRICO

### A. Aerodinámica

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que se ocupa de estudiar el movimiento de los fluidos y las fuerzas que estos ejercen sobre un cuerpo sumergido en ellos. Básicamente, estudia cómo se mueve un fluido alrededor de los objetos y cómo interactúa con ellos. (Riva, 2011)

Generalmente asociamos la aerodinámica a la aviación, pues un claro ejemplo de la misma es el movimiento de un avión a través del aire. La presencia de un objeto dentro de un fluido gaseoso causa modificaciones en la repartición de presiones y velocidades de las partículas del fluido que lo rodean, originando así fuerzas de sustentación y resistencia, que son algunos de los principios básicos de la aerodinámica. (Zitnik, 2000)

Estos principios básicos son tan utilizables en las aeronaves como lo son en los automóviles, en donde los ingenieros han desarrollado vehículos de alto rendimiento en los cuales la aerodinámica juega un papel muy importante permitiendo aumentar la estabilidad a altas velocidades y mejorar la capacidad de agarre en las curvas. (Gebhard, 2001)

Pues es algo impresionante observar a una maquina tan grande y pesada como un avión de pasajeros acelerar por la pista y despegar, y que las fuerzas que lo elevan y lo mantienen en vuelo sean creadas solamente por sus estilizadas alas que van cortando el aire mientras el avión se mueve a través del mismo. Lo mismo sucede cuando un monoplaza genera la suficiente sustentación negativa o carga aerodinámica para tomar una curva a más de 100 km/h y no perder el control. (McBeath, 2006)

La Fórmula SAE reta a que los estudiantes construyan un vehículo estilo fórmula, en donde la aerodinámica juega un papel muy importante en el desempeño del mismo, por lo que se busca es que el vehículo sea aerodinámicamente eficiente. Básicamente la fuerza de arrastre se trata de minimizar, pues actúa inversa al movimiento del vehículo convirtiéndose en resistencia aerodinámica o resistencia al avance; y la carga aerodinámica se trata de optimizar, pues mantiene el vehículo en el piso, pero lo puede hacer perder velocidad. (Hetawal, Gophane, B.K., & Mukkamala, 2014)

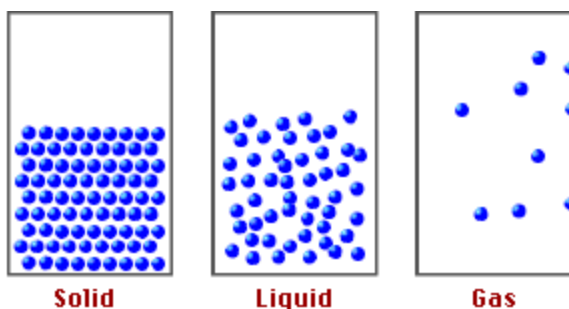
Para entender mejor todos estos principios aplicados a los vehículos es necesario conocer los principios básicos de la aerodinámica y todo lo que se sabe del comportamiento de los fluidos sobre los objetos y cómo interactúan con ellos, pues desde que los ingenieros descubrieron el potencial que tiene la utilización del aire y los efectos que este genera en los vehículos, ya nada volvió a ser igual en el

área automotriz (Diaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015). Estos principios se muestran a continuación.

## B. Principios básicos de aerodinámica

Anteriormente se mencionó que la aerodinámica estudia cómo se mueve un fluido alrededor de los objetos y cómo este interactúa con ellos, por lo que se debe entender que un fluido es toda sustancia cuyas moléculas se mantienen unidas entre sí por fuerzas de atracción débiles, propiedad que les permite fluir. Esto quiere decir, escurrirse alrededor de los objetos y tomar su forma por la facilidad con la que sus moléculas se separan del resto. (Diaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015)

Figura 1. Cohesión de moléculas en sólidos, líquidos y gases.



Fuente: (Diaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015)

Los fluidos pueden ser tanto líquidos como gaseosos, la diferencia entre los mismos depende de la fuerza con la que se cohesionan sus moléculas. Los líquidos presentan una cohesión mayor a la de los gases, lo que les permite mantener su volumen y tomar la forma del recipiente que los contiene, a diferencia de los gases que no mantienen su volumen ni toman una forma propia. Esta fuerza de cohesión entre partículas en los gases es la responsable de la mayoría de los efectos de la aerodinámica que se presentan posteriormente. (Diaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015)

**1. Viscosidad ( $\mu$ ).** La viscosidad es la propiedad que presenta todo fluido de resistencia de sus moléculas a ser separadas, por lo que, a mayor viscosidad, mayor resistencia. Si la unión de las moléculas es alta, la fuerza que se debe ejercer para separarlas debe de ser mayor. Algo importante a entender es que la viscosidad no es lo mismo que la densidad, y aunque se puede pensar que un fluido denso será también viscoso, esto no es cierto, pues sustancias de igual densidad pueden tener diferentes viscosidades. Para el caso de un vehículo estilo formula las variaciones por viscosidad son muy pequeñas, pero resultan significativas dependiendo del clima y la altura a la que se encuentre la pista en donde se va a competir (Diaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015). Por lo tanto, para los análisis realizados a la carrocería se tomó la viscosidad del aire como  $\eta_{air} = 1.8 * 10^{-5} \text{Ns/m}^2$  de acuerdo a los datos establecidos como estándar por ANSYS según el informe Best Practice Guidelines for Handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT (Lanfrít, 2005) y tablas del informe Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere. (Morrison, 2013)

Cuadro 1. Densidad y viscosidad del aire a 1 atm.

**Densidades de algunas sustancias comunes a 1 atm (760 mm Hg)**

Sustancia	Temperatura °C	Densidad	
		g/cm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
<i>Gases</i>			
Aire	0	0,00130	1,30
	10	0,00125	1,25
	20	0,00120	1,20
	30	0,00116	1,16

**Viscosidad de algunos gases y líquidos comunes**

Fluido	Temperatura °C.	Viscosidad	
		Poises (dina·s/cm <sup>2</sup> , P)	Poiseuilles (N·s/m <sup>2</sup> , o Pl)
<i>Gases</i>			
Aire	0	1,71×10 <sup>-4</sup>	1,71×10 <sup>-5</sup>
	18	1,83×10 <sup>-4</sup>	1,83×10 <sup>-5</sup>
	40	1,90×10 <sup>-4</sup>	1,90×10 <sup>-5</sup>

Fuente: (Morrison, 2013)

La viscosidad es la propiedad de cualquier fluido, que sucede en la resistencia de sí mismo a un esfuerzo cortante ( $\tau$ ). De acuerdo a la Ley de Newton sobre la viscosidad, el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la viscosidad para un porcentaje dado de la deformación angular de un fluido ( $\frac{dV}{dy}$ ), en donde  $dV$  es la velocidad y  $dy$  la distancia. (Pauta Solano & Sanchez Ramírez, 2014)  
La viscosidad matemáticamente se define a continuación.

Ecuación 1. Viscosidad

$$\mu = \left( \frac{\tau}{\frac{dV}{dy}} \right) \left[ \frac{Ns}{m^2} \right]$$

Fuente: (Pauta Solano & Sanchez Ramírez, 2014) [07/2/2017]

En la práctica se utiliza el valor de la viscosidad cinemática ( $\nu$ ), que es el cociente entre la viscosidad absoluta ( $\mu$ ) y la densidad ( $\rho$ ) del fluido. (Pauta Solano & Sanchez Ramírez, 2014)

Ecuación 2. Viscosidad Cinemática

$$\nu = \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$

Fuente: (Pauta Solano & Sanchez Ramírez, 2014) [07/2/2017]

**2.Presión (P).** La presión es la relación entre la fuerza normal (F) a una superficie y el área (A) de acción donde la fuerza (F) es aplicada. En el caso de un fluido, la fuerza es normal al plano definido por el fluido o en relación a la superficie que se encuentra en contacto con el mismo (Pauta Solano & Sanchez Ramírez, 2014). Su definición matemática se presenta a continuación.

Ecuación 3. Presión

$$P = \left( \frac{F}{A} \right) \left[ \frac{N}{m^2} \right] o [Pa]$$

Fuente: (Pauta Solano & Sanchez Ramírez, 2014) [07/2/2017]

En el caso de los análisis realizados a la carrocería se tomó la presión del aire como  $P = 1 atm$  de acuerdo a los datos establecidos como estándar por ANSYS según el informe Best Practice Guidelines for Handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT (Lanfrit, 2005) y el informe Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere. (Morrison, 2013)

**3.Densidad ( $\rho$ ).** La densidad es la relación entre la masa ( $m$ ) y el volumen ( $V$ ) que dicha masa ocupa (Pauta Solano & Sanchez Ramírez, 2014). Matemáticamente se define a continuación.

Ecuación 4. Densidad

$$\rho = \left(\frac{m}{V}\right) \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

Fuente: (Pauta Solano & Sanchez Ramírez, 2014) [07/2/2017]

En el caso de los análisis realizados a la carrocería se tomó la densidad del aire como  $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$  de acuerdo a los datos establecidos como estándar por ANSYS según el informe Best Practice Guidelines for Handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT (Lanfrit, 2005) y el informe Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere. (Morrison, 2013)

## C. Teorema de Bernoulli

El Teorema de Bernoulli es un principio físico de la dinámica de los fluidos el cual describe la disminución de la presión de un fluido en movimiento, ya sea este un líquido o un gas, al aumentar su velocidad, lo que quiere decir que al aumentar la velocidad de un fluido, esto genera una disminución en su presión. Este fenómeno es resultado de la conservación de la energía, ya que según el teorema la energía total de un sistema de fluidos con flujo uniforme es constante a lo largo de toda la trayectoria del flujo. (Alonso, 2006)

El teorema es aplicable a flujos sobre superficies sólidas, siendo el ejemplo más conocido el perfil alar de un avión. Las alas de los aviones se diseñan de tal forma que obligan al aire a fluir con mayor velocidad sobre su superficie superior, por lo que generan una zona de alta presión en su superficie inferior y una de baja presión en la superior; esta diferencia de presiones es lo que se conoce con el nombre de fuerza de sustentación y permite que los aviones vuelen. Para entender mejor el teorema es necesario mencionar las tres energías que influyen en el mismo. Estas son la energía potencial gravitatoria, la energía cinética y la energía de presión. (Alonso, 2006)

**1.Diferencia de presión.** La diferencia de presión puede expresarse matemáticamente como la presión dinámica por el coeficiente de presión  $C_p$ .

Ecuación 5. Diferencia de presión

$$P = \frac{1}{2} * C_p * \rho * V^2$$

Fuente: (Alonso, 2006) [23/1/2017]

**2.Energía de presión.** También se conoce como la energía de flujo y es el trabajo que es realizado por la presión del fluido.

Ecuación 6. Trabajo realizado por la energía de presión

$$W = P * A * \partial x = P * V$$

Fuente: (Alonso, 2006) [23/1/2017]

Ecuación 7. Energía de presión

$$E_{pr} = P * V = P * \left(\frac{m}{\rho}\right)$$

Fuente: (Alonso, 2006) [23/1/2017]

**3.Bernoulli alrededor de una geometría.** Para el caso en el que se aplica un flujo de aire alrededor de una geometría la ecuación de Bernoulli es:

Ecuación 8. Energía de Bernoulli de un flujo de aire alrededor de una geometría

$$P + \left(\frac{1}{2}\right) * \rho * V^2 = cte.$$

Fuente: (Alonso, 2006) [23/1/2017]

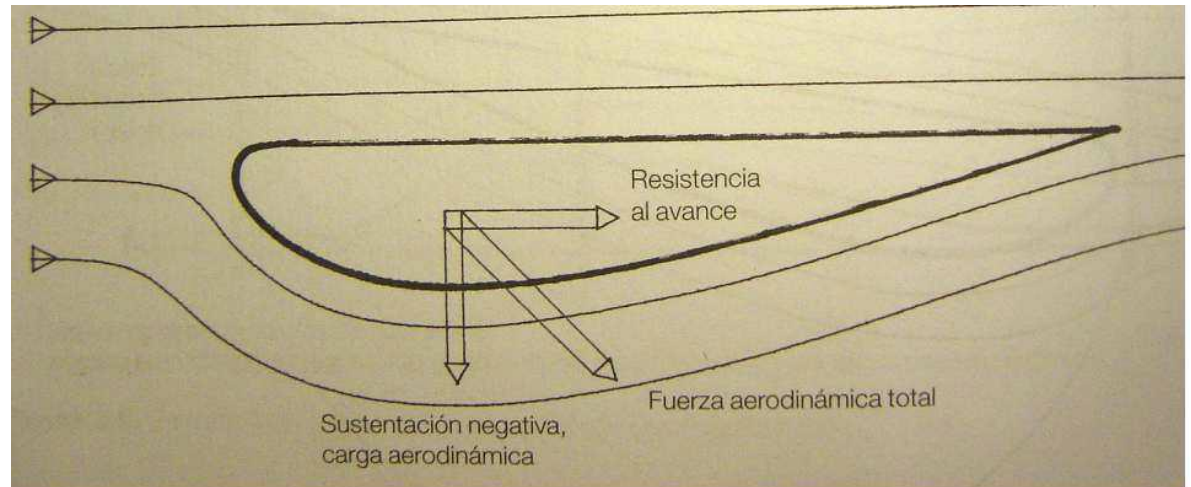
En esta ecuación P representa la presión estática y  $\frac{1}{2} \rho V^2$  la presión dinámica. Esta ecuación lo que establece es que si el flujo de aire alcanza su velocidad máxima la presión se encontrará en un mínimo. (Alonso, 2006)

## D. Fuerzas más importantes entre el aire y un vehículo

Las fuerzas más importantes que se ven implicadas entre el flujo del aire y un vehículo son la fuerza de sustentación y la resistencia, ambas resultado de la transferencia de la cantidad de movimiento entre las partículas de aire y la superficie con la que estas colisionan. (Alonso, 2006)

Al combinarse ambas fuerzas como vectores generan la fuerza aerodinámica total resultante, siendo este el principio básico de todas las presiones que actúan sobre un cuerpo cuando alrededor de este existe un flujo de aire. Esto se puede comprender mejor si se observa la Figura 2, donde la fuerza de sustentación es la componente vertical y la resistencia la horizontal. (Alonso, 2006)

Figura 2. Fuerza aerodinámica total y sus componentes.



Fuente:(Alonso, 2006)

Las ecuaciones para estas componentes de la fuerza aerodinámica son:

Ecuación 9. Sustentación

$$Sustentación = \frac{1}{2} * C_L * \rho * V^2 * A$$

Fuente: (Alonso, 2006) [23/1/2017]

Ecuación 10. Resistencia

$$Resistencia = \frac{1}{2} * C_D * \rho * V^2 * A$$

Fuente: (Alonso, 2006) [23/1/2017]

Es importante mencionar que el área A en estas ecuaciones siempre debe de tomar la superficie en planta, debido a que así se expresan los coeficientes  $C_D$  y  $C_L$ , pero si el cálculo se está realizando para un vehículo entero, se debe de utilizar toda su área frontal. (Alonso, 2006)

## E. Resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica es la fuerza opuesta al movimiento de un objeto sólido la cual es ejercida sobre él cuando este se desplaza a través de un fluido. También se le conoce como resistencia al avance o arrastre, y siempre va en sentido contrario al avance del vehículo de forma proporcional a la velocidad del mismo. Por lo tanto, a mayor velocidad, mayor resistencia. (Díaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015)

Ecuación 11. Resistencia Aerodinámica

$$R_a = \frac{1}{2} * C_D * A * \rho * V^2$$

Fuente: (Kojima, 2010) [20/11/2016]

La resistencia aerodinámica no es constante, pues depende de la forma del objeto, su posición, la densidad del fluido y la velocidad del objeto; pues la resistencia aerodinámica es proporcional al cuadrado de la velocidad relativa entre el objeto y el fluido.

La resistencia aerodinámica cuenta con dos componentes principales, una es la componente de presión y la otra es la componente de fricción, las cuales están definidas por la resistencia de presión y la resistencia de superficie, respectivamente. (Díaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015)

## F. Resistencia de superficie

Existen dos tipos de resistencia de superficie, la resistencia de forma y la resistencia por fricción. (Díaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015)

**1. Resistencia de forma.** La resistencia de forma es la resistencia al avance producida por la forma que tiene el objeto que se desplaza a través del fluido. Por ejemplo, cuando un vehículo avanza por una carretera, este va desplazando una cantidad importante de moléculas de aire de su camino para poder avanzar. Es decir, las partículas que forman la masa de aire al frente del vehículo colisionan contra él, en mayor o menor cantidad dependiendo de la geometría de la superficie del vehículo. Esto reduce su velocidad y obligan a que el motor tenga que generar más potencia para poder conseguir esa velocidad perdida. Es decir, que reducir la resistencia implica que el motor gaste menos potencia para conseguir ganar velocidad. (Díaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015)

En un vehículo, los valores de la resistencia de forma dependerán del área que ocupa el vehículo visto perfectamente de frente, o sea la superficie frontal del objeto. Cuando un vehículo va avanzando, su superficie frontal colisiona contra las partículas de aire que va encontrando en su camino, por lo que debe empujarlas para apartarlas de él. Las partículas se ven forzadas a realizar un cambio de dirección, lo que produce que estas partículas empujen el vehículo hacia atrás, y generen así resistencia aerodinámica. Por lo que, si se reduce la superficie frontal del vehículo, se obtendrán valores de resistencia de superficie mucho menores. (Díaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015)

Para minimizar la resistencia de forma, el diseño del vehículo se apegó a la geometría propuesta por el chasis y se diseñó de tal manera que contuviera dentro de sí los componentes necesarios como el atenuador de impactos y los radiadores dentro de las tomas de aire laterales, siempre teniendo curvas suaves y geometrías que no representaran mayor resistencia aerodinámica.

**2.Resistencia por fricción.** La fuerza de fricción es aquella oposición al movimiento que se produce cuando dos cuerpos que se desplazan se ponen en contacto entre ellos. En el caso de los vehículos, esta resistencia se genera cuando el aire se pone en contacto con la superficie del vehículo e interactúa con él, pues la resistencia por fricción se da en todos los medios sean estos sólidos, líquidos o gaseosos. Además de la velocidad a la que se desplace el vehículo, existen dos factores fundamentales de los cuales depende la fricción dinámica. (Díaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015)

**a.Estado de la superficie del objeto.** Con esto se refiere a la rugosidad que presenta la superficie, pues si la superficie es lisa y con un acabado pulido presentará valores de resistencia por fricción menores que si esta es rugosa. En un vehículo estilo fórmula se busca que todas las superficies sean lo más lisas posibles y no presenten rugosidad. (Díaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015)

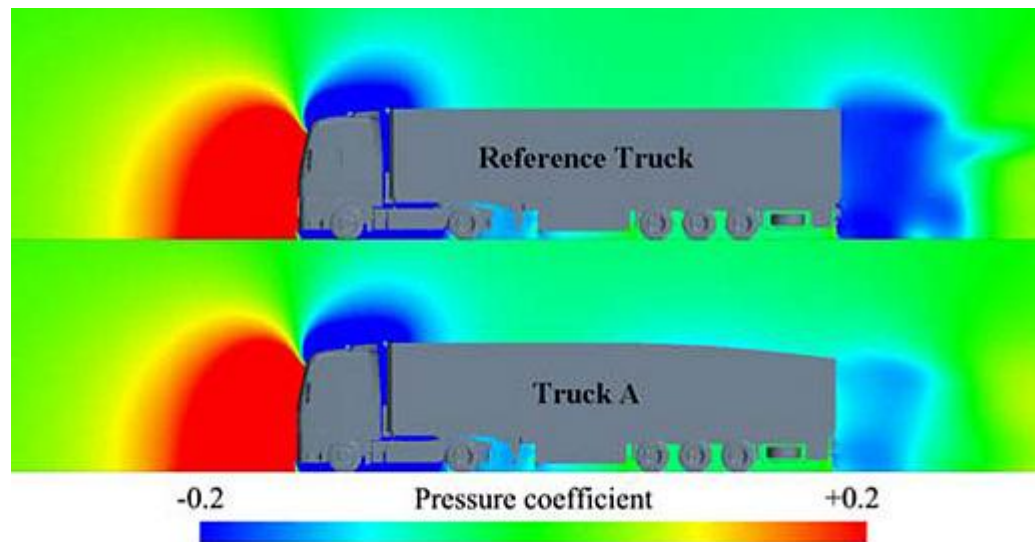
Por esta razón, el vehículo debe de presentar un acabado liso en su carrocería cuando esta se elabore, el cual puede mejorarse mucho aplicando pintura y puliendo la misma antes de la competencia.

**3.Resistencia de presión.** La resistencia por presión es la resistencia al avance producida sobre los objetos que se desplazan en un fluido cuando se genera un diferencial de presiones entre una zona de alta presión y una de baja presión, situadas en la parte frontal y posterior del objeto respectivamente. Para el caso de un vehículo, en la parte frontal tenemos la presión de estancamiento y en la parte posterior se genera una zona de baja presión cuando el flujo se separa del vehículo, y se

produce succión de cola o resistencia de remolino. El diferencial de estas presiones es la resistencia por presión en un vehículo y es la principal responsable de gran parte de la reducción de la eficiencia aerodinámica en el mismo. (Díaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015)

En la parte frontal del vehículo, su superficie impide su avance, pero la parte trasera es la que se ve mayormente afectada por la succión, la cual se produce cuando el aire no es capaz de llenar y ocupar ordenadamente el espacio que existe detrás de vehículo. Esto crea resistencia aerodinámica, pues las moléculas de aire no pueden llegar normalmente a la parte trasera del vehículo. Por esta razón, cuando se trata de llenar este vacío esto arrastra la parte trasera del vehículo también, creando así la resistencia de presión. (Díaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015)

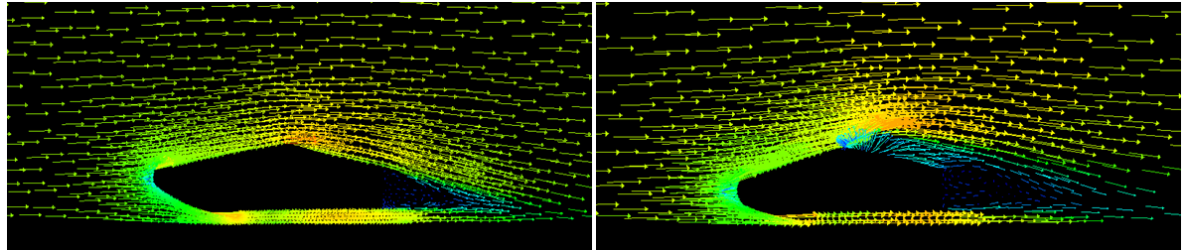
Figura 3. Análisis de presiones en camiones.



Fuente: (Hirz & Stadler, 2014)

En la Figura 3 se puede observar un análisis de la diferencia de presiones en un camión. El primero es un camión con una estructura convencional, mientras que el segundo tiene una estructura más aerodinámica y en su parte trasera tiene un elemento que reduce la succión en la cola. Es evidente el cambio en el coeficiente de presión al utilizar un diseño más aerodinámico en la parte trasera del camión y minimizar así la succión. (Díaz, Aerodinámica 1: Principios Básicos, 2015)

Figura 4. Análisis de ANSYS de la carrocería Fase I (izq.) y Fase II (der.).



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la carrocería del vehículo Fórmula SAE minimizar la resistencia de presión fue de gran interés en su diseño, pues esto no solo evitaría la succión sino también la turbulencia en la parte trasera, por lo que en la primera parte del diseño se realizó una curva que dirigiera la mayor parte del aire en la punta hacia la parte superior del vehículo y una geometría muy plana y con poco ángulo en la parte superior, lo cual se mejoró en la segunda fase del diseño, donde se modificó el ángulo del piso plano creando la suficiente sustentación y se agregó un Gurney Flap en la parte superior, enviando el aire más arriba que la cabina del piloto de forma laminar y eliminando así casi por completo la turbulencia en la parte trasera del vehículo.

## G. Eficiencia aerodinámica

La eficiencia aerodinámica es la relación que existe entre el coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) y el coeficiente de resistencia ( $C_D$ ). (Díaz, Aerodinámica 2: En Busca de la Eficiencia, 2015)

Ecuación 12. Eficiencia Aerodinámica

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

Fuente: (Díaz, Aerodinámica 2: En Busca de la Eficiencia, 2015) [23/3/2017]

El diseño más eficiente para un carro estilo fórmula es aquel que tiene suficientes elementos aerodinámicos que creen valores  $C_L$  negativos muy altos y valores  $C_D$  cercanos a cero, pero en la

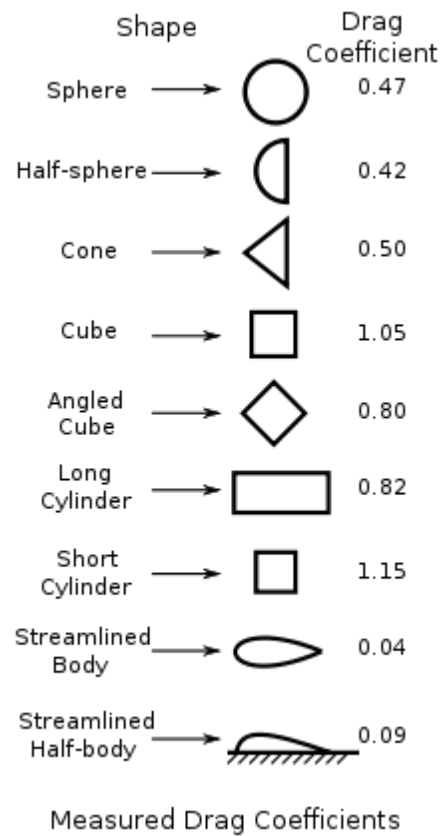
realidad este diseño no sería posible, pues incrementar la sustentación, incrementa el arrastre. (Diaz, Aerodinámica 2: En Busca de la Eficiencia, 2015)

**1.Coeficiente de Sustentación ( $C_L$ ).** La sustentación es la fuerza perpendicular al avance generada sobre un cuerpo cuando este se desplaza a través de un fluido. Su coeficiente, es una magnitud adimensional, y nos permite determinar la efectividad que tiene la forma de un cuerpo para producir sustentación. Básicamente, mientras más alto sea el valor del coeficiente de sustentación, mayor sustentación producirá el objeto y viceversa, generando incluso valores negativos, como en los vehículos. Cuando el valor del coeficiente de sustentación es negativo significa que las fuerzas están actuando de tal manera que impiden la sustentación, es decir, empujan hacia el suelo, produciendo así uno de los efectos más deseados en los vehículos formula, la carga aerodinámica o downforce. (Diaz, Aerodinámica 2: En Busca de la Eficiencia, 2015)

Para el diseño de la carrocería del vehículo Fórmula SAE, la sustentación no es un factor importante, pues esta solo influye en el desempeño del vehículo cuando este toma curvas a altas velocidades; pero según (Alonso, 2006), las pruebas de la que consta la competición en donde se pone a prueba el comportamiento dinámico del vehículo, registran velocidades medias en los circuitos de 40 hasta 57 km/h y velocidades máximas en las rectas de aproximadamente 105 km/h. Por lo tanto, el diseño de la carrocería del vehículo Fórmula SAE se optimizó para el coeficiente de resistencia aerodinámica y no para el de sustentación, pues el primero sería de gran influencia en el desempeño del vehículo en la competencia, a diferencia del segundo que no influiría, pues la competencia no consta de curvas con velocidades altas. Es por esta razón que el diseño de la carrocería del vehículo Fórmula SAE y de los vehículos de esta competencia en general, en su mayoría, no tienen alerones delanteros ni traseros, ni otros artículos aerodinámicos sino que solamente se reducen a un morro con la menor resistencia aerodinámica posible y, en algunos casos, tomas de aire o pontones laterales, situados a los lados del habitáculo del piloto, cuyo objetivo es la aerodinámica interna, es decir la refrigeración y, por consiguiente, la optimización del rendimiento del motor. (Alonso, 2006)

**2.Coeficiente de Resistencia Aerodinámica ( $C_D$ ).** El coeficiente de resistencia aerodinámica está determinado casi en su totalidad por la forma del objeto y cuantifica el arrastre o la resistencia que presenta el mismo cuando está dentro de un fluido. El coeficiente de resistencia aerodinámica depende de la resistencia de forma y la resistencia por fricción del objeto. En un vehículo estilo formula buscamos que este coeficiente tenga un valor bajo, pues esto indica que el vehículo presenta poca resistencia aerodinámica. (Diaz, Aerodinámica 2: En Busca de la Eficiencia, 2015)

Figura 5. Coeficiente de arrastre en diferentes formas.



Fuente: (Kojima, 2010) [20/11/2016]

En la Figura 5 podemos observar el coeficiente de arrastre para cuerpos con la misma superficie frontal pero diferentes formas. Esta figura también comprueba como los objetos se ven afectados por la succión en la parte trasera debido a las turbulencias que ahí se generan y como esto incrementa su coeficiente de arrastre. (Diaz, Aerodinámica 2: En Busca de la Eficiencia, 2015)

Por lo tanto, la forma de un objeto define la trayectoria que tiene que seguir el aire para poder rodearlo, y dependiendo de la velocidad y el orden con el que este lo haga, el aire terminará de rodearlo de una manera ordenada o desordenada. Es decir, que si el vehículo se diseña con un borde afilado al

frente las partículas de aire sufren un aumento paulatino de la presión, hasta que el aire se separa en la parte trasera y forma torbellinos muy potentes, que generan arrastre. Por otro lado, si la parte delantera se diseña de forma redondeada, se crea una zona de baja presión, la cual, por así decirlo, atrapa las partículas de aire, y lo pega a la superficie del vehículo, manteniéndolas en la capa límite, haciendo que este fluya sin dificultad por la superficie del vehículo hasta separarse en la parte trasera y reducir al mínimo la creación de torbellinos. Este efecto en la aerodinámica se conoce como el efecto coanda. (Díaz, Aerodinámica 2: En Busca de la Eficiencia, 2015)

**3. Coeficientes de Sustentación y Resistencia en la Aerodinámica.** Ambos coeficientes, el de resistencia y el de sustentación,  $C_D$  y  $C_L$  son medidas relativas de cuánta resistencia aerodinámica y sustentación genera un cuerpo. Pero en los vehículos es el coeficiente de resistencia aerodinámica  $C_D$  el parámetro más importante, pues este coeficiente es el que más influye en el desempeño del vehículo, aerodinámicamente hablando, ya que se encuentra directamente ligado al consumo, ya que para que el coeficiente de sustentación  $C_L$  influya en el desempeño del vehículo, este tendría que alcanzar velocidades muy altas. (Alonso, 2006)

Por lo tanto, en el diseño de la carrocería del vehículo tipo fórmula para la competencia Fórmula SAE, se buscará optimizar la aerodinámica de la misma en base al coeficiente de resistencia aerodinámica  $C_D$ , tratando de que este tenga un valor menor a 0.9. Esto se debe a que, de acuerdo a datos de competencias de años anteriores, los vehículos no alcanzan velocidades mayores a 70 km/h en las curvas y 105 km/h en las rectas como la de la prueba de aceleración. Esto hace que el coeficiente de sustentación sea despreciable, pues no causará ningún efecto significativo en el desempeño del vehículo. Además, debido a las velocidades tan bajas alcanzadas en las curvas, los alerones traseros y delanteros no tienen ningún efecto significativo en la maniobrabilidad del vehículo, por lo que no agregarlos al diseño aerodinámico ayuda a mantener bajo el coeficiente de resistencia, mantener la relación peso-potencia, mitiga errores por tener que instalar más accesorios aerodinámicos al vehículo, ayuda a mantener el costo del vehículo bajo y reduce el área frontal del vehículo; por lo que se buscan diseños de carrocerías simples y que no agreguen cargas aerodinámicas innecesarias a los vehículos manteniendo el coeficiente de resistencia aerodinámica por debajo de 1. (Arteaga, Mena, Caiza, & Vilaña, 2015)

Existe una forma en la que el coeficiente  $C_D$  puede determinar la eficiencia de una carrocería (o una forma determinada) ante la resistencia que presenta al aire a su avance. Esta no es más que una plancha metálica lisa colocada de forma perpendicular al flujo del viento, la cual tiene un  $C_D$  de aproximadamente 1.25. Debido a que  $C_D$  es un coeficiente no importa el tamaño de la plancha, pues lo

que se evalúa es la resistencia de la forma. Según datos recopilados de competencias de años anteriores, los vehículos de Fórmula SAE buscan mantener su  $C_D$  por debajo de 0.9, pero es importante mencionar que a pesar que dos vehículos tengan el mismo  $C_D$  esto no garantiza que ambos tengan la misma resistencia al aire, pues lo que de verdad mide esta resistencia es el llamado  $A \cdot C_D$  lo cual resulta de multiplicar el área frontal del vehículo por el coeficiente de resistencia aerodinámica, por lo que el área frontal del vehículo debe minimizarse lo más posible cumpliendo siempre todos los requerimientos establecidos por el reglamento de Fórmula SAE. (Alonso, 2006)

Por lo general, las áreas frontales de los vehículos Fórmula SAE se encuentran en un rango entre  $1 \text{ m}^2$  hasta  $1.5 \text{ m}^2$ . El área frontal del vehículo depende de los accesorios aerodinámicos que se le agreguen a este y el diseño de la pared de fuego, la cual se debe optimizar para ser lo más pequeña posible, pero siempre cumplir con el reglamento, pues la pared de fuego es una de las partes del vehículo que más resistencia aerodinámica presenta debido a la gran contribución que representa en el área frontal del mismo. (Hetawal, Gophane, B.K., & Mukkamala, 2014)

## H. Flujos laminar y turbulento

El flujo laminar es aquel en el que sus moléculas se mueven unidas de forma ordenada a lo largo de una trayectoria fijada, todas siguiendo la misma dirección; formando capas o láminas que se deslizan suavemente unas sobre otras. Por otro lado, el flujo turbulento es aquel en donde las partículas del fluido pasan de una zona a otra en cualquier dirección y sin ningún orden, colisionando e intercambiando cantidad de movimiento entre ellas; provocando pérdidas de energía en todo el flujo. (Diaz, Aerodinámica 3: Análisis de la Capa Límite y el Efecto Coanda, 2015)

El comportamiento de los fluidos es algo muy difícil de predecir e igualmente de analizar, pero para un vehículo estilo fórmula lo que se busca en su diseño aerodinámico es minimizar al máximo la resistencia al avance manteniendo el flujo laminar tanto como sea posible permitiendo que el aire fluya suavemente sobre su superficie. Por lo tanto, para poder comprender más el comportamiento de los fluidos y de cómo mantenerlos en un flujo laminar es necesario entender el concepto básico de la aerodinámica, el cual se presenta a continuación.

**1. Capa límite.** La capa límite es la zona que existe entre un fluido en movimiento y un sólido con el que se encuentra en contacto en donde la velocidad del fluido se ve perturbada y decrece hasta detenerse completamente e incluso alcanzar valores negativos en algunos casos. Las moléculas del fluido colisionan la superficie del sólido y son frenadas por la fricción que se genera, frenando también las moléculas por encima de ellas y así sucesivamente hasta llegar al punto en donde las partículas ya

no son frenadas y se mueven a la velocidad de la corriente. La capa límite puede ser de tres tipos: Laminar, turbulenta o transitoria. (Diaz, Aerodinámica 3: Análisis de la Capa Límite y el Efecto Coanda, 2015)

## I. Número de Reynolds

El número de Reynolds define el comportamiento de un fluido y en particular, si el fluido se comporta de forma laminar, turbulento o transitorio en su capa límite. Para poder establecerlo se necesitan datos del fluido como la densidad y la viscosidad y datos del objeto como su área frontal y su velocidad. En el caso de interés para esta tesis, se desea comprobar si el comportamiento del fluido es laminar o turbulento alrededor de una esfera, y así validar si el software ANSYS nos entrega datos apegados a la realidad con los análisis realizados, por lo que se puede utilizar la siguiente ecuación. (Morrison, 2013)

Ecuación 13. Número de Reynolds para una esfera en el aire.

$$Re = \frac{\rho_{air}DV}{\eta_{air}}$$

Fuente: (Morrison, 2013) [23/3/2017]

Donde:

P: presión del aire

$\rho_{air}$ : densidad del aire

$\eta_{air}$ : viscosidad del aire

D: diámetro esfera

V: velocidad

Este valor es de gran interés, pues gracias a este podemos establecer con gran aproximación el coeficiente de arrastre, que es el valor que más interesa para el diseño de la carrocería. Para valores de  $Re = 2 \cdot 10^{-6}$  o cercanos a este valor, la ecuación de Morrison es la que mejor establece el coeficiente de arrastre  $C_D$ . (Morrison, 2013) La ecuación es la siguiente.

Ecuación 14. Ecuación de Morrison para el coeficiente de arrastre.

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{2.6\left(\frac{Re}{0.5}\right)}{1 + \left(\frac{Re}{0.5}\right)^{1.52}} + \frac{0.411\left(\frac{Re}{263000}\right)^{-7.94}}{1 + \left(\frac{Re}{263000}\right)^{-8}} + \frac{Re^{0.8}}{461000}$$

Fuente: (Morrison, 2013) [23/3/2017]

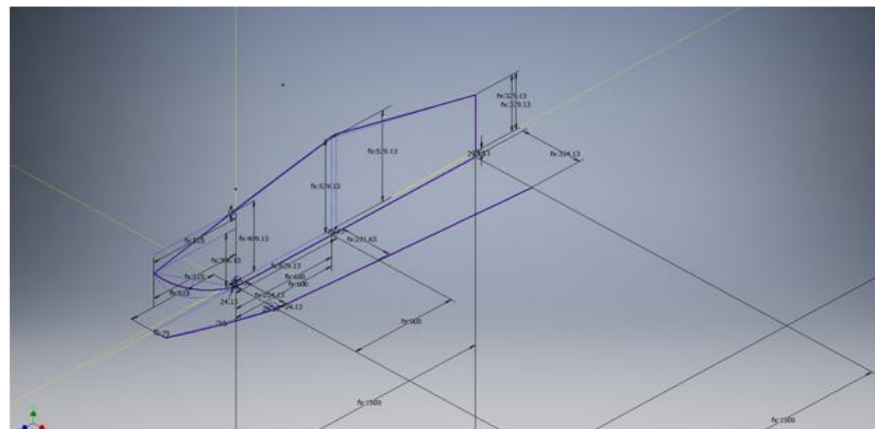
## J. Efecto Coanda

El efecto Coanda es la tendencia de un fluido en movimiento a ser atraído por una superficie de un objeto sólido y seguir su trayectoria. Este efecto se produce por la viscosidad del fluido, el cual disminuye la velocidad de las moléculas que colisionan con el sólido, lo cual no solo detiene las partículas, sino que además las adhiere a él. El efecto Coanda es de especial interés en la aerodinámica, pues si se puede aprovechar el efecto, este resulta en una forma sencilla de desviar el flujo de aire y mantener la capa límite adherida al sólido. (Diaz, Aerodinámica 3: Análisis de la Capa Límite y el Efecto Coanda, 2015)

## K. Autodesk Inventor 2017

El software que se utilizó para realizar el modelado 3D fue Autodesk Inventor 2017 del cual se utilizaron sus diferentes funciones para realizar los bosquejos que definen la geometría de la carrocería los cuales se parametrizaron y luego se convirtieron en las superficies que la conforman.

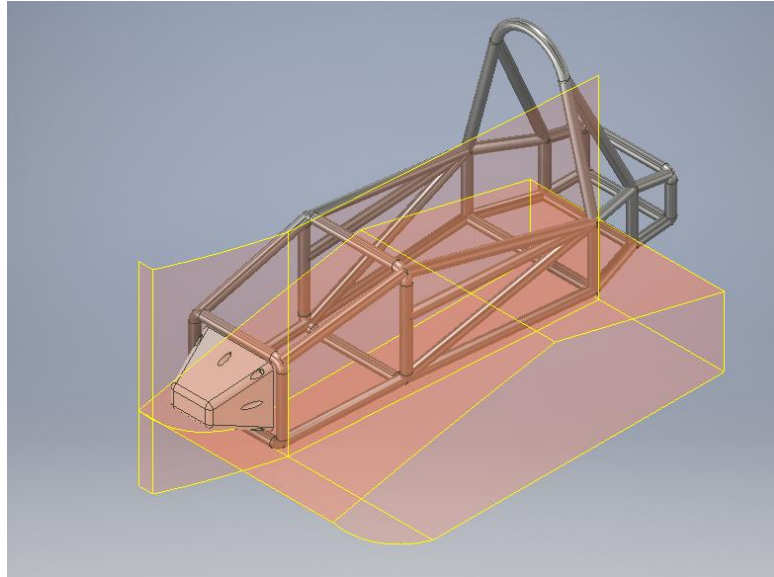
Figura 6. Bosquejos de las diferentes secciones que conforman la carrocería.



Fuente: Elaboración propia.

**1.Extrude.** La función Extrude toma los diferentes bosquejos y permite convertirlos en superficies de las cuales solo es necesario definir su longitud.

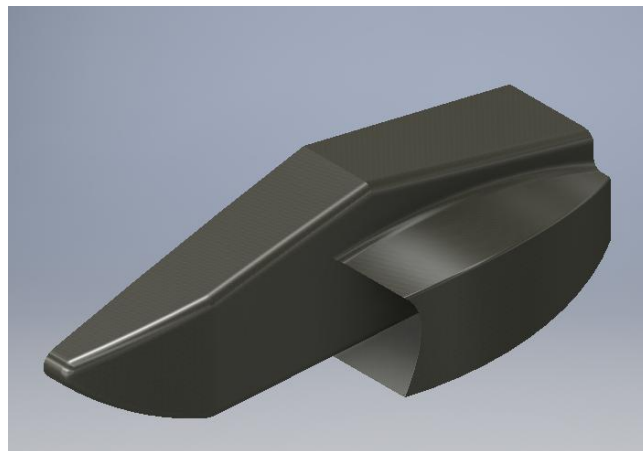
Figura 7. Superficies que conforman la carrocería.



Fuente: Elaboración propia.

**2.Sculpt.** La función Sculpt toma las diferentes superficies que se intersectan entre sí y las une formando un sólido, el cual se puede editar con las funciones de diseño de 3D del software.

Figura 8. Superficies de la carrocería transformadas en sólido por medio de la función Sculpt.

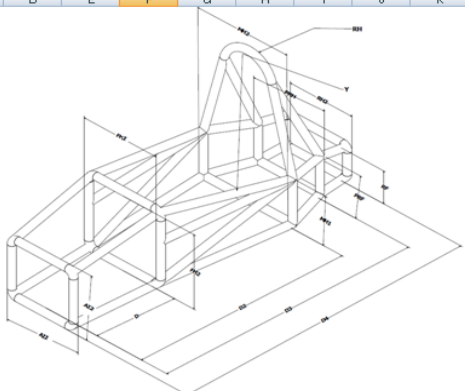


Fuente: Elaboración propia.

**3.Parametrización.** Inventor permite parametrizar diferentes medidas en sus bosquejos, las cuales pueden tener diferentes dependencias e incluso pueden vincularse con un archivo Excel para modificarlas de una manera más sencilla y luego solo actualizar el diseño de Inventor.

Figura 9. Parámetros del chasis y la carrocería en documento Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	AI1	450									
2	AI2	380									
3	DI	600									
4	R1	415									
5	FH1	525									
6	FH2	500									
7	R2	5125									
8	D2	1500									
9	Y	1000									
10	MH1	300									
11	MH2	650									
12	PH	180									
13	D3	1800									
14	D4	2000									
15	PRF	250									
16	PRH	450									
17	PF	220									
18	FH2	450									
19	R3	33.5									
20	H4	300									
21	PLFR	0									
22	PLPU	68182									
23	PLNA	-600									
24	PLPA	-1500									
25	PLPI	-29.13									
26	PLMT	0									
27	ARAIL	0									
28	ARAI	408.13									
29	ARFHL	600									
30	ARFH	523.13									
31	ARMHL	1500									
32	ARMH	329.13									
33	ABAIL	0									
34	ABAI	29.13									
35	ABFHL	600									
36	ABFH	29.13									
37	ABMHL	1500									
38	ABMH	29.13									
39	LTAIL	0									
40	LTAI	364.13									



Fuente: Elaboración propia.

Es muy importante entender que el diseño de la carrocería es parametrizable hasta sus superficies. Después de creadas las mismas, si se utilizan funciones de diseño de 3D el diseño ya no sigue siendo parametrizable. Esto quiere decir que si se hacen cambios en las medidas de la misma se tiene que volver hasta antes de utilizada cualquier función de diseño 3D como Sculpt o Fillet, por ejemplo.

## L. ANSYS

**1.Workbench 15.0.** ANSYS Workbench 15.0 en su versión estudiantil fue el software que se utilizó para realizar las pruebas de aerodinámica y así poder comprobar los datos de interés como el Coeficiente de Arrastre  $C_D$  de la carrocería. Para esto se importó el diseño realizado en Autodesk Inventor y para su análisis en ANSYS.

**2.FLUENT.** FLUENT es una plataforma de ANSYS Workbench 15.0 la cual nos permite realizar diferentes análisis de fluidos y como estos se comportan. Para el análisis de la carrocería se

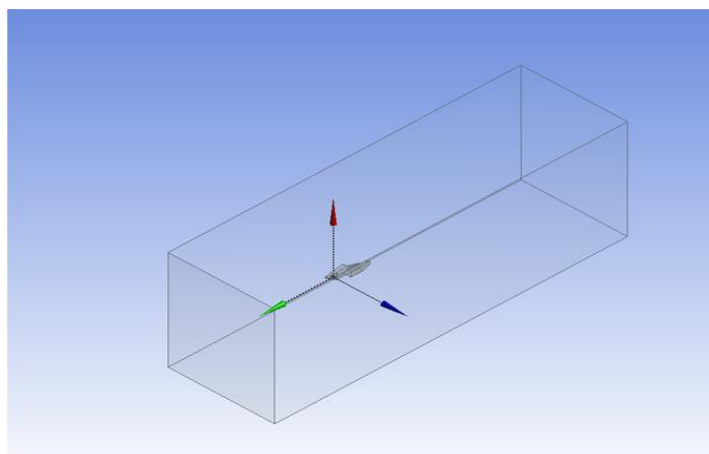
creó un túnel de viento digital utilizando FLUENT en el cual se ingresó la carrocería y se controlaron diferentes parámetros como la velocidad a la que fluiría el aire y su densidad, viscosidad y la presión dentro del túnel de viento.

Para las pruebas aerodinámicas en ANSYS se siguió el método propuesto por el equipo de FLUENT Alemania, quienes desarrollaron el documento *Best Practice Guidelines for Handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT* (Lanfrit, 2005), el cual describe una guía de las mejores prácticas para utilizar y programar el software para realizar análisis aerodinámicos automotrices a cualquier vehículo de tal manera que los resultados obtenidos sean lo más apegados a la realidad y con el menor error posible, es decir, como si se estuvieran realizando las pruebas aerodinámicas en un túnel de viento real.

Este documento contiene lineamientos que van desde las medidas del túnel de viento y el mallado que recomiendan para el análisis, hasta todos los valores que se deben de programar en el software e incluso la selección de la forma en que queremos que lo resuelva y las iteraciones necesarias para obtener resultados reales. (Lanfrit, 2005) Estos lineamientos se presentan a continuación.

**a. Túnel de viento digital.** El túnel de viento se recomienda de por lo menos tres veces la longitud del vehículo hacia adelante y hacia atrás del mismo y por lo menos tres veces hacia arriba y tres veces hacia los lados. Además, recomienda dejar la superficie del suelo a aproximadamente 50 mm o más de su parte inferior. (Lanfrit, 2005)

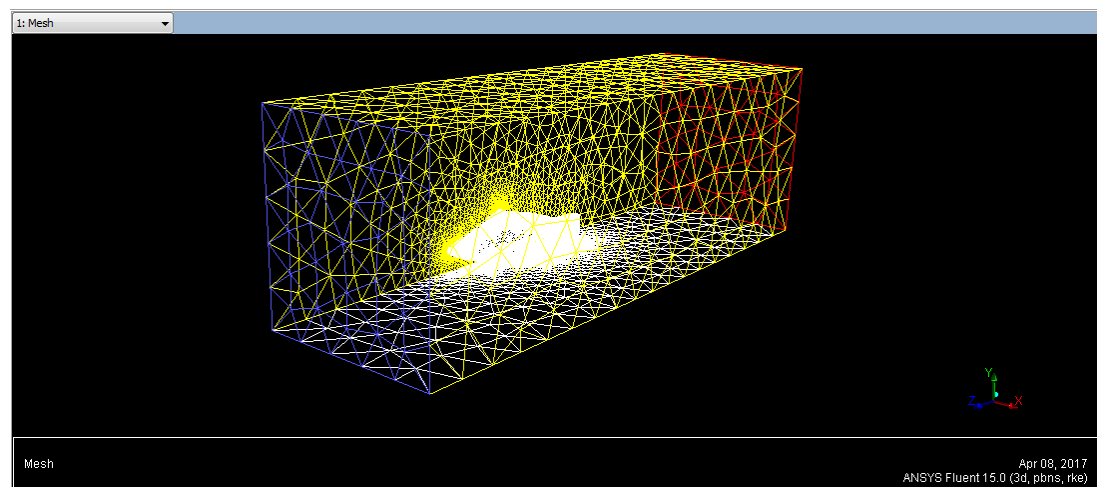
Figura 10. Túnel de viento digital recomendado por FLUENT Alemania.



Fuente: Elaboración propia.

**b.Mallado.** El mallado recomendado por FLUENT Alemania es un mallado de proximidad y curvatura, el cual pone especial énfasis a la carrocería dentro del túnel de viento y sus alrededores, que es lo que más interesa, pues en el volumen de aire que se encuentra más alejado de la carrocería solamente es necesario comprobar que el viento no se comporte de una forma turbulenta o genere succión. Además, el documento contiene los nombres con los que recomiendan nombrar las diferentes superficies del túnel de viento digital, ya que el software FLUENT reconoce estos nombres y automáticamente establece donde entrará el aire en el túnel, hacia donde irá, que paredes deben analizarse, como la carrocería y el suelo, y cuáles no tienen ningún efecto en el análisis, como las laterales y la superior. (Lanfrit, 2005)

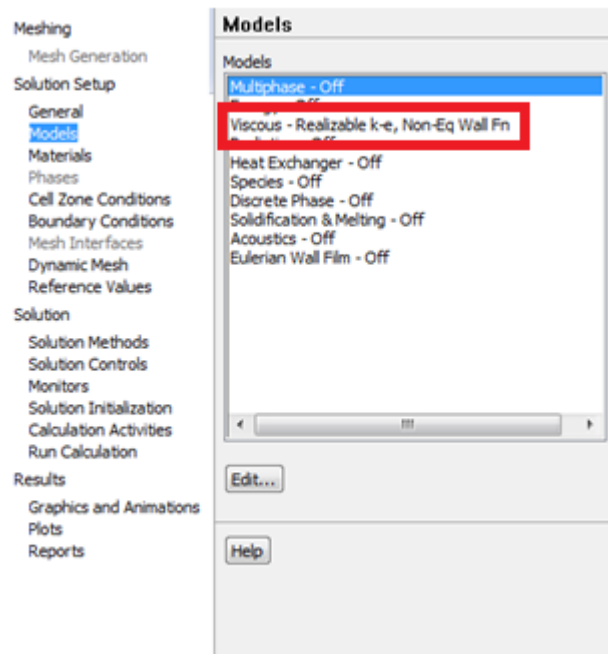
Figura 11. Túnel de viento digital con mallado ingresado a FLUENT.



Fuente: Elaboración propia.

**c.Modelo.** El modelo a solucionar propuesto por FLUENT Alemania es el K-epsilon, pues este es el más utilizado para los modelos computacionales de la dinámica de fluidos, ya que simula el flujo con características de laminar a turbulento por medio de un modelo de dos ecuaciones que describen de forma general las turbulencias y es el más apegado al modelo de un túnel de viento real. (Lanfrit, 2005)

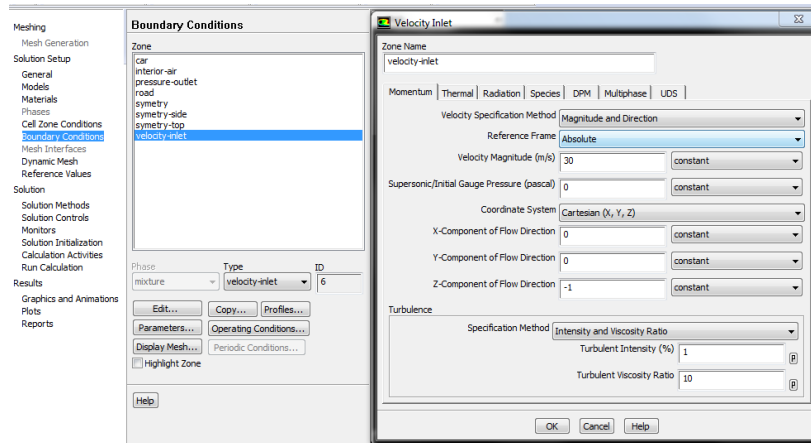
Figura 12. Programación del modelo en FLUENT.



Fuente: Elaboración propia.

**d. Condiciones frontera.** Las condiciones frontera en FLUENT ya están programadas de forma adecuada para el túnel de viento debido a los nombres que se les asignaron a las superficies del mismo, por lo que ya solo es necesario programar la velocidad del viento. Esta velocidad se recomienda que sea lo más alta posible, para que los resultados sean lo más apegados a la realidad posible, por lo tanto, para la carrocería se programó una velocidad de 30 m/s para el aire, ya que esta velocidad es de 108 km/h, lo cual se encuentra entre el rango de 105 km/h y 120 km/h que es la velocidad máxima que alcanza el vehículo de Fórmula SAE.

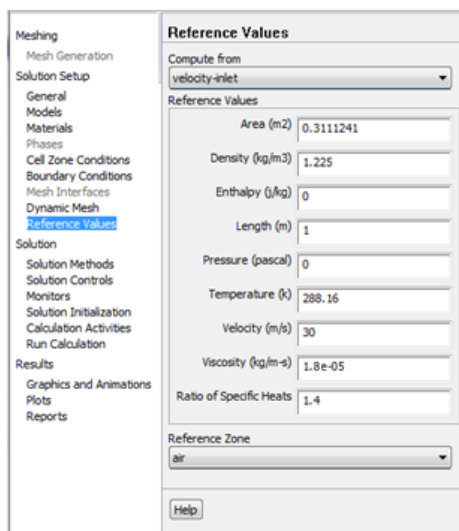
Figura 13. Programación de la velocidad del aire en FLUENT.



Fuente: Elaboración propia.

**e.Valores de referencia.** Los valores de referencia recomendados por FLUENT Alemania son las características del aire descritas anteriormente para su densidad y su viscosidad a una presión de una atmósfera. Es importante mencionar que la presión aquí debe de ser 0, pues es la presión manométrica y esta se encontraría por encima de una atmósfera. Aquí solamente es necesario establecer el área frontal del vehículo, la cual se puede calcular por medio de inventor o FLUENT nos permite obtenerla por medio de la función Reports, en la opción de Projected Areas en el eje z. Por último, solo se establece que el valor de referencia se computarice desde el Inlet y todos los datos restantes se programan automáticamente. (Lanfrit, 2005)

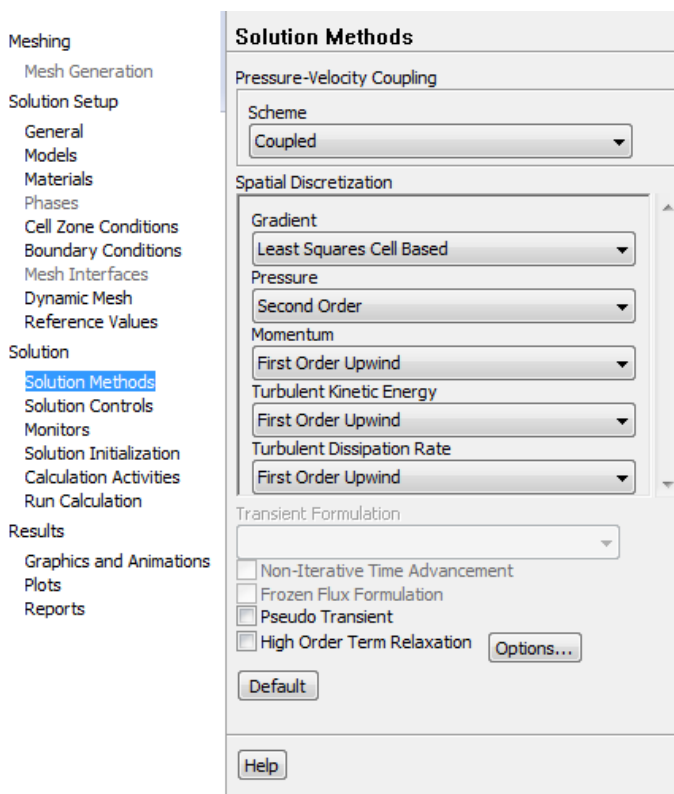
Figura 14. Programación de los valores de referencia en FLUENT.



Fuente: Elaboración propia.

**f. Método de solución.** En el método de solución es donde se programan las ecuaciones en primer orden para las primeras iteraciones y luego de segundo orden para las últimas, esto es recomendación de FLUENT Alemania para el modelo es que este se programe para solucionarse con ecuaciones de primer orden en las primeras cien iteraciones, para así obtener una buena aproximación del comportamiento del fluido dentro del túnel de viento a lo que será el resultado final, para luego solucionarlo con un modelo de ecuaciones de segundo orden con las cuales se realizan las iteraciones suficientes hasta que el dato que interesa al usuario alcance a ser constante en el cuarto decimal. Esto es un proceso de 1000 iteraciones, las cuales llevan bastante tiempo, pero que al ser constante el cuarto decimal, aseguran que el resultado sea estable y preciso. Las 1000 iteraciones constan de 100 para las ecuaciones en primer orden, las cuales permiten que el software empiece a acercarse a una solución; y 900 para las ecuaciones en segundo orden, pues al tener un total de 1000 iteraciones el quinto decimal del resultado de interés ya se ha vuelto constante. En el caso del diseño de la carrocería del vehículo Fórmula SAE este valor es el del coeficiente de resistencia aerodinámica. (Lanfrit, 2005)

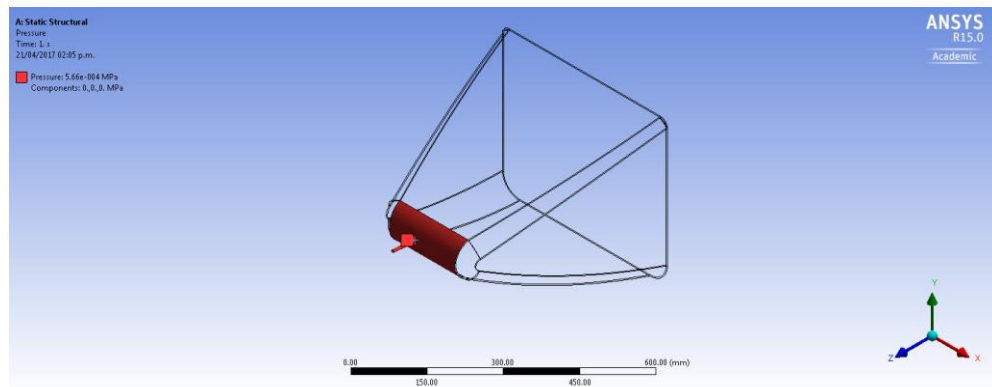
Figura 15. Programación del método de solución en FLUENT.



Fuente: Elaboración propia.

**3.Static Structural.** Static Structural es otra de las plataformas de ANSYS Workbench 15.0 la cual nos permite realizar diferentes análisis estructurales. Para la carrocería este análisis se realizó en la punta, la cual es la parte en donde, según los resultados obtenidos en FLUENT, la carrocería experimenta la presión más grande. Por esta razón, debía comprobarse que la fibra de vidrio y el grosor seleccionado para la misma fuera el adecuado para que la carrocería no se deforme o se dañe si esta excede su límite de esfuerzo último de tensión.

Figura 16. Prueba de la punta con la presión del aire en su parte delantera en ANSYS.



Fuente: Elaboración propia.

## M. 2017-2018 Formula SAE Rules

La SAE presenta cada año un documento actualizado con todas las reglas que rigen la competencia, este es el Reglamento de la Fórmula SAE. Este reglamento contiene los diferentes lineamientos y requerimientos de cada aspecto de la competencia, incluyendo los del módulo de aerodinámica, por lo que es muy importante tomar en cuenta cada uno de estos requerimientos en todo momento para el diseño de la carrocería. A continuación, se presenta una tabla que contiene los diferentes requerimientos para el módulo de aerodinámica establecidos por el documento 2017-2018 Formula SAE Rules y las gráficas proporcionadas por el mismo las cuales explican de forma gráfica las limitaciones establecidas para el diseño de la carrocería por la SAE.

Cuadro 2. Requerimientos de diseño dentro del manual de Fórmula SAE 2016.

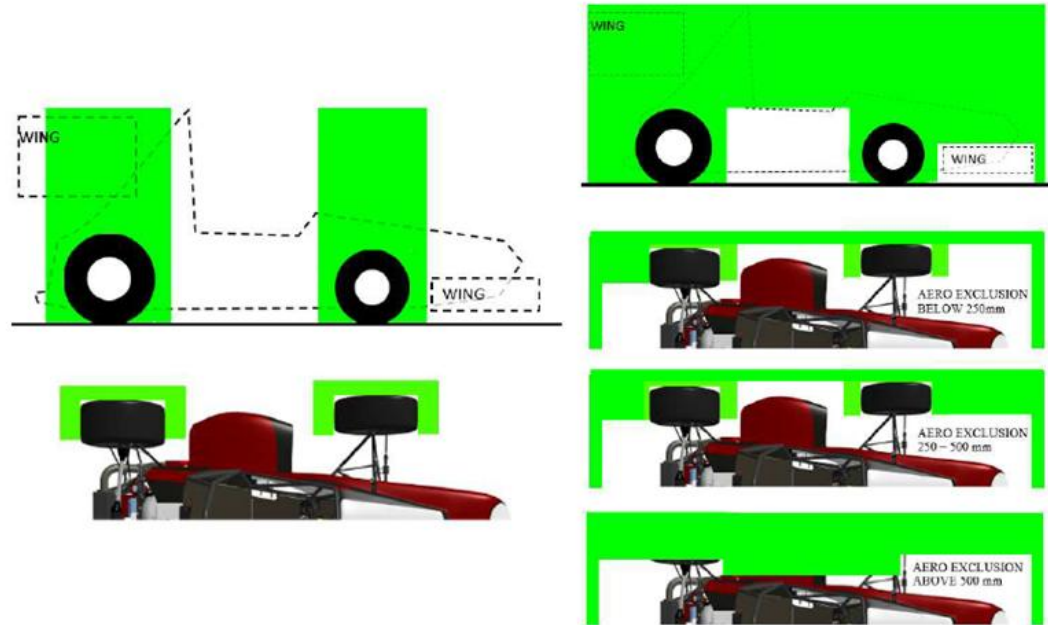
ID	REQUERIMIENTO
T2.1.a	Definición de "ruedas al descubierto" - Los primeros 180 grados de las llantas deben estar sin obstrucciones cuando estas se observen desde una vista vertical por encima de la llanta.
T2.1.b	Las llantas deben estar sin obstrucción alguna cuando estas se observen desde al lado.
T2.1.c	Ninguna parte del vehículo debe entrar en la keep-out-zone que este definida por dos líneas que se extienden verticalmente desde las posiciones de 75mm por delante y 75mm por detrás del diámetro exterior de las llantas delanteras y traseras. Esta zona se extiende lateralmente desde el plano exterior de la llanta al plano interior de la llanta. (Ver Figura en el reglamento de Formula SAE 2017-2018, Pág. 25)

Continuación Cuadro 2.

ID	REQUERIMIENTO
T2.1.4d	Se debe cumplir con las dimensiones/requerimientos del ARTÍCULO 9: Dispositivos Aerodinámicos que se encuentra en la Parte T del Reglamento de Formula SAE 2017/18
T2.2	No debe haber aberturas a través de la carrocería en el compartimiento del conductor desde la parte delantera del vehículo a la barra antivuelco principal o firewall que no sea la requerida para la apertura de la cabina. Se permiten aberturas mínimas alrededor de los componentes de la suspensión delantera.
T2.5	Todos los artículos en el formulario de inspección deben ser claramente visibles a los inspectores técnicos sin necesidad de utilizar instrumentos como los endoscopios o espejos. Para lograr la visibilidad de dichos artículos se pueden remover paneles de la carrocería o colocar paneles de acceso extraíbles.
T9.1	Aerodinámica y Efecto Suelo - General: Todos los dispositivos aerodinámicos deben de satisfacer los siguientes requerimientos, los cuales deben de cumplirse en conjunto con los requerimientos de la Configuración del Vehículo definidos en T2.1.
T9.2.1	Desde una vista superior, ninguna parte de la aerodinámica debe estar 700 mm más adelante del frente de las llantas frontales ni más ancho que los aros del vehículo medido desde su centro.
T9.2.2	Desde una vista frontal, ninguna parte del vehículo que este 250mm arriba de las llantas debe estar obstruida por ninguna parte aerodinámica
T9.3.1	La estructura aerodinámica debe cumplir con lo especificado en el artículo T9.3.1 del documento 2017/18 formula SAE rules desde una vista superior
T9.3.1.a	Ninguna parte debe estar más atrás de 250mm desde las llantas traseras.
T9.3.1.b	Ninguna parte debe estar más adelante que la parte posterior del reposacabezas.
T9.3.1.c	Ninguna parte debe ser más ancha que el ancho de las llantas.
T9.3.2	Ninguna parte del sistema aerodinámico debe ser más alta que 1.2 m medido desde el suelo y sin piloto.
T9.4.2	Ninguna parte del sistema aerodinámico debe exceder de 500mm sobre el suelo y sin piloto.
T9.5.1	Toda orilla posicionada de forma horizontal debe tener un radio mínimo de 5mm y las verticales de 3mm.
T9.6	Ningún aparato debe quitar el aire debajo del carro excepto ventiladores para el sistema de refrigeración.
T9.7.1	Todos los dispositivos aerodinámicos deben estar diseñados con una rigidez adecuada y sin que haya alguna deflexión significativa.

(2017-18 Formula SAE Rules)

Figura 17. Requerimientos de diseño dentro del manual de Fórmula SAE 2016.

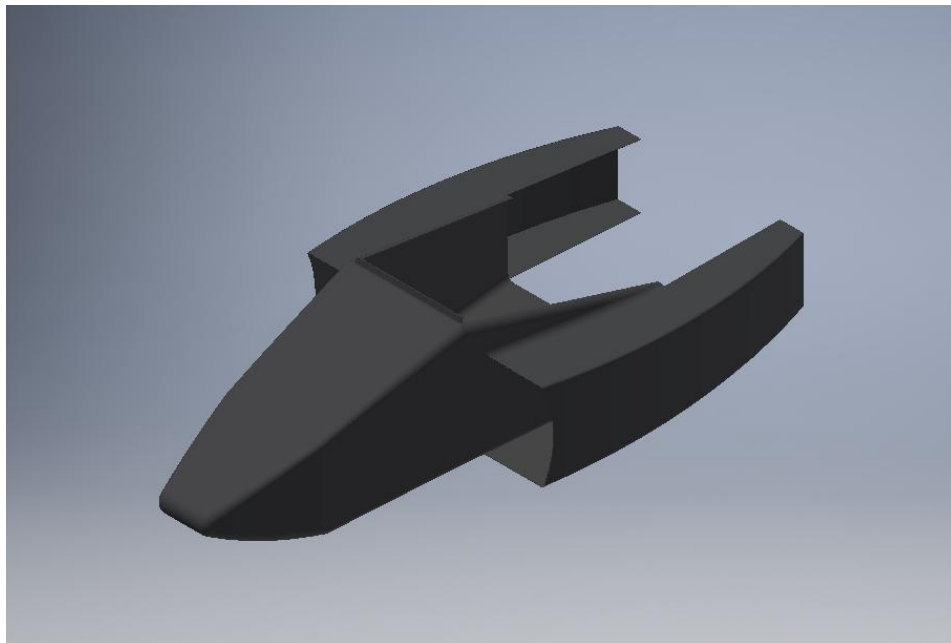


Fuente: (2017-18 Formula SAE Rules)

## V. SECCIONES DE LA CARROCERÍA

A continuación, se presentan las diferentes secciones que conforman toda la carrocería del vehículo Fórmula SAE con todos sus componentes. Esta se seccionó tomando en cuenta diferentes criterios como lo son el reglamento de la competencia Fórmula SAE 2017-18, su instalación y/o desinstalación, los componentes del vehículo que se encuentran dentro o debajo de ella y el seccionamiento general de los diferentes componentes de un vehículo tipo fórmula común.

Figura 18. Carrocería completa.

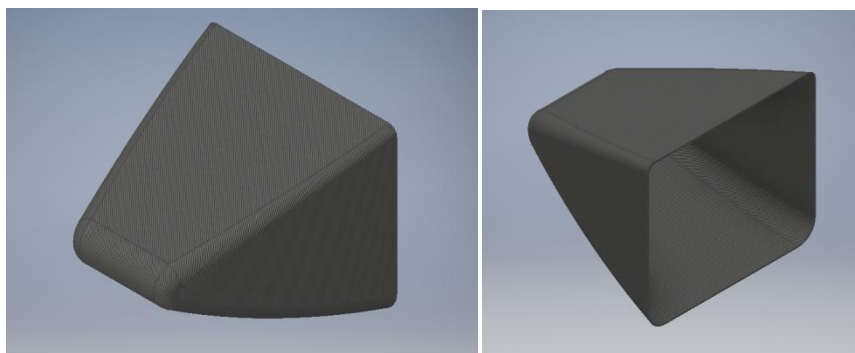


Fuente: Elaboración propia.

## A. Punta

La punta es el primer componente del vehículo, pues este es el frente del mismo. Se decidió establecer a la punta como una sección independiente, pues ésta siempre debe estar fija en el chasis, ya que el único componente del vehículo que se encuentra dentro de ella es el atenuador de impactos.

Figura 19. Punta de la carrocería.

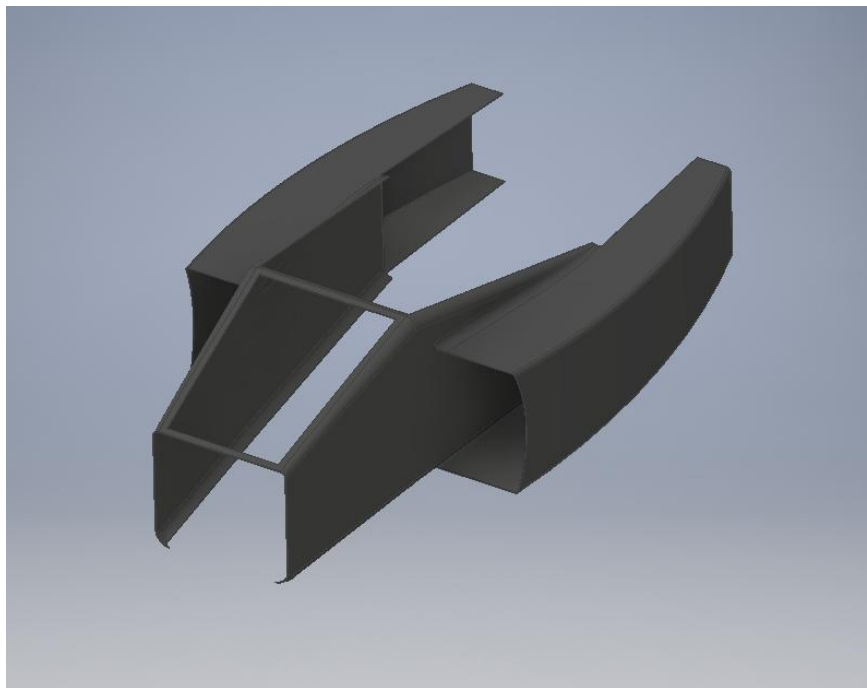


Fuente: Elaboración propia.

## B. Frente y tomas de aire laterales

El frente y las tomas de aire laterales se dejaron unidas, pues de esta forma se mantenía su rigidez estructural y se ahorra peso por parte de accesorios como fasteners y tornillos para su unión, además que se mitiga cualquier falla por parte de accesorios aerodinámicos que se pudieran caer o separar, lo cual, según el reglamento, podría eliminar al vehículo de la competencia. Además, si las tomas de aire fueran separadas del frente del vehículo, es muy difícil unirlos y que estas queden perfectamente simétricas, por lo que se obtiene mejor simetría en ambos lados de la carrocería si éstas van unidas al frente de la misma desde su construcción.

Figura 20. Frente y tomas de aire laterales.

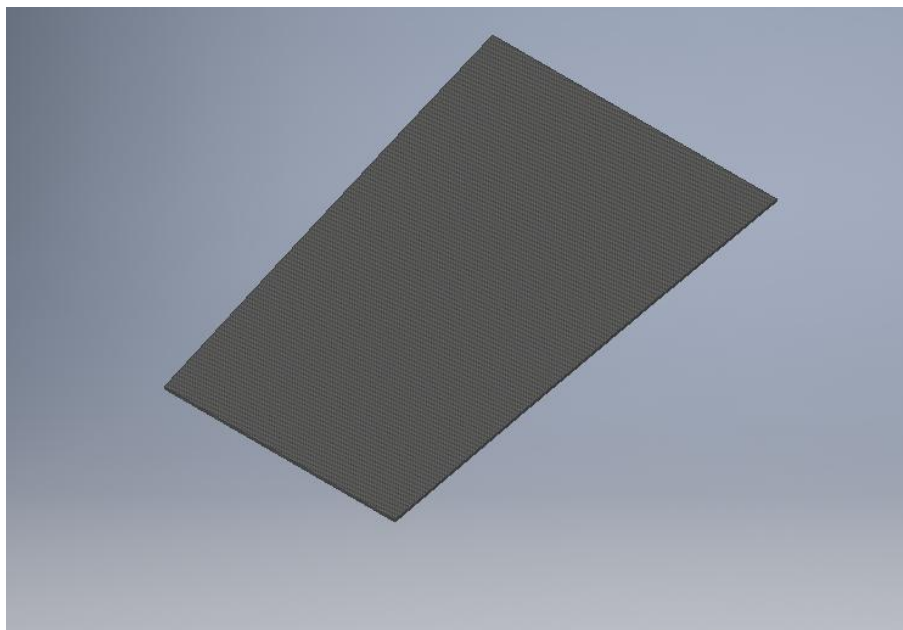


Fuente: Elaboración propia.

## C. Capó

El capó es una compuerta en el frente del vehículo, el cual se agregó por requerimiento del reglamento, ya que piden que esta sección pueda abrirse si los jueces solicitan revisar la suspensión delantera del vehículo. Se recomienda construir la parte frontal completa y luego cortar el capó, para que éste tenga la misma curvatura que la carrocería y encaje perfectamente con la misma.

Figura 21. Capó de la carrocería.



Fuente: Elaboración propia.

Para unir el capó a la carrocería se utilizarán Toggle Latch Fasteners, los cuales se utilizan en aeronaves para unir secciones de las mismas, permitiendo así que este se pueda remover fácilmente, no se le agregue demasiado peso al vehículo, su geometría no se vea afectada y no se generen turbulencias. Los Toggle Latch Fasteners son los más recomendados para unir secciones de carros de carreras y se utilizan en vehículos de todas categorías. (Jacobson, 2012)

Figura 22. Toggle Latch Fasteners



Fuente: (Uxcell, 2017) [28/04/2017]

Los Toggle Latch Fasteners permiten una instalación y desinstalación rápida de cualquier sección en los vehículos de carreras, siendo al mismo tiempo seguros, logrando que las piezas se ensamblen unas con otras sin luces ni separaciones. (Jacobson, 2012)

Figura 23. Instalación de sección en la parte frontal utilizando Toggle Latch Fasteners.

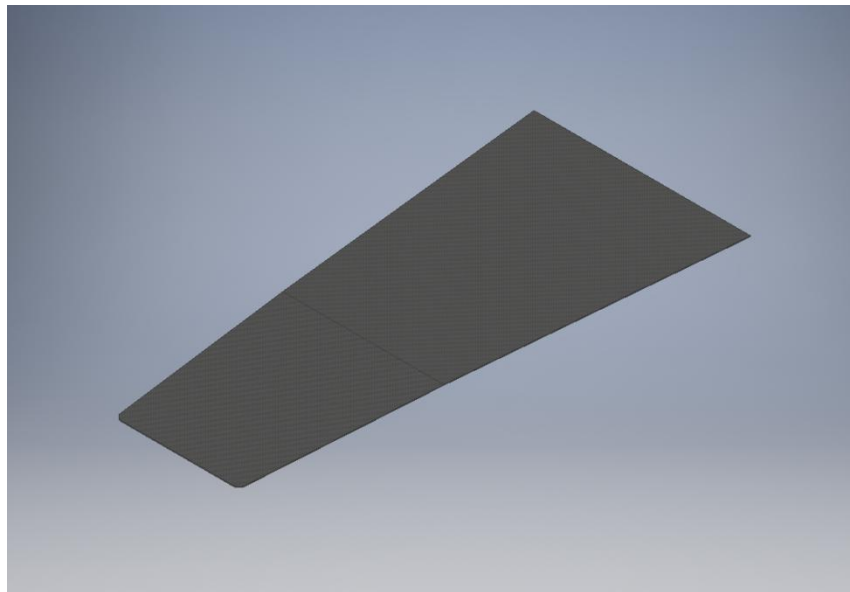


Fuente: (Jacobson, 2012) [28/04/2017]

## D. Piso

El piso se separó del frente de la carrocería y las tomas de aire, pues de ser necesario trabajar el vehículo, es más cómodo si estas partes son desinstalables; aunque el piso del vehículo puede quedarse instalado. Por esta razón, al igual que con el capó, se recomienda que después de construir todo el frente con las tomas de aire laterales, éste se corte y se separe del frente del vehículo, para que siga su curvatura y encaje con la parte superior al momento de su instalación.

Figura 24. Piso de la carrocería.



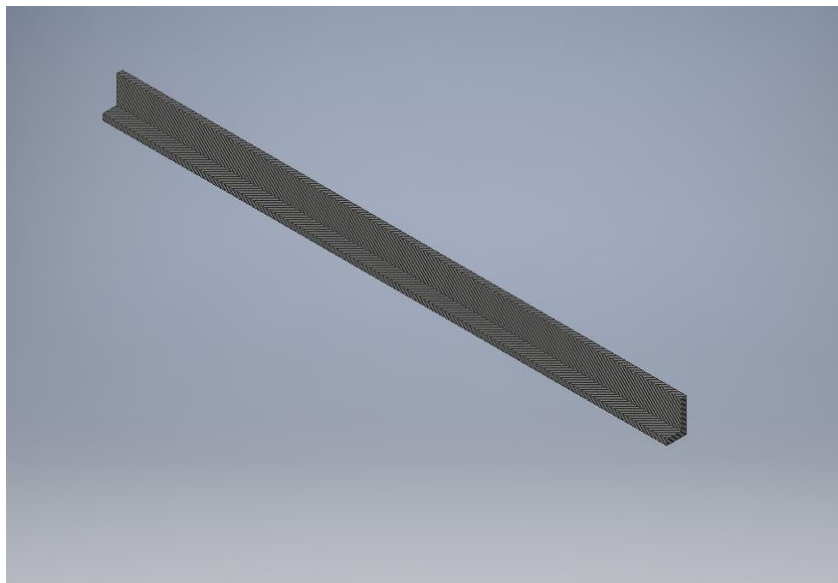
Fuente: Elaboración propia.

## E. Gurney Flap

El Gurney Flap fue el último accesorio aerodinámico en ser agregado al diseño, pues la necesidad del mismo se hizo evidente en la primera fase del mismo y se integró con la carrocería en la segunda fase, donde, al realizar las pruebas en el túnel de viento digital, los cambios en la aerodinámica del

vehículo fueron impresionantes. Este componente se puede construir separado de la carrocería e instalarse al final, pues no necesita de ninguna curvatura compleja.

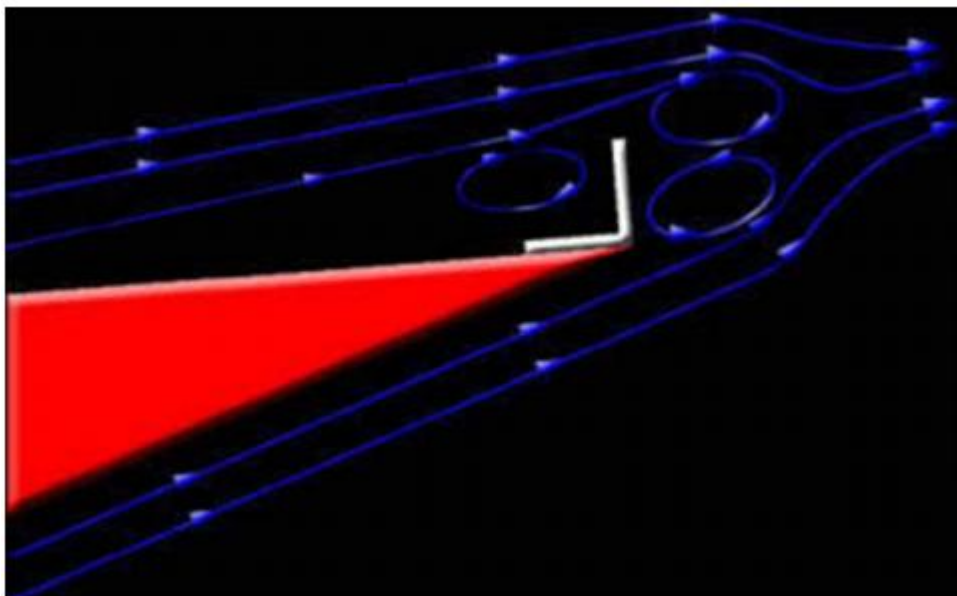
Figura 25. Gurney Flap.



Fuente: Elaboración propia.

El Gurney Flap es una tira, usualmente de aluminio, plástico, fibra de vidrio o fibra de carbono; que se coloca en el borde de fuga, es decir, el borde donde el flujo se despegue de cualquier elemento de la carrocería o accesorio aerodinámico. Su objetivo es permitir que la capa límite se mantenga en un flujo laminar, en la capa superior y se eliminen turbulencias después que éste se despegue de la superficie. (Diaz, Aerodinámica: Evolucionar o Morir (Parte 1), 2016) Los efectos del Gurney Flap se pueden apreciar en la Figura 26.

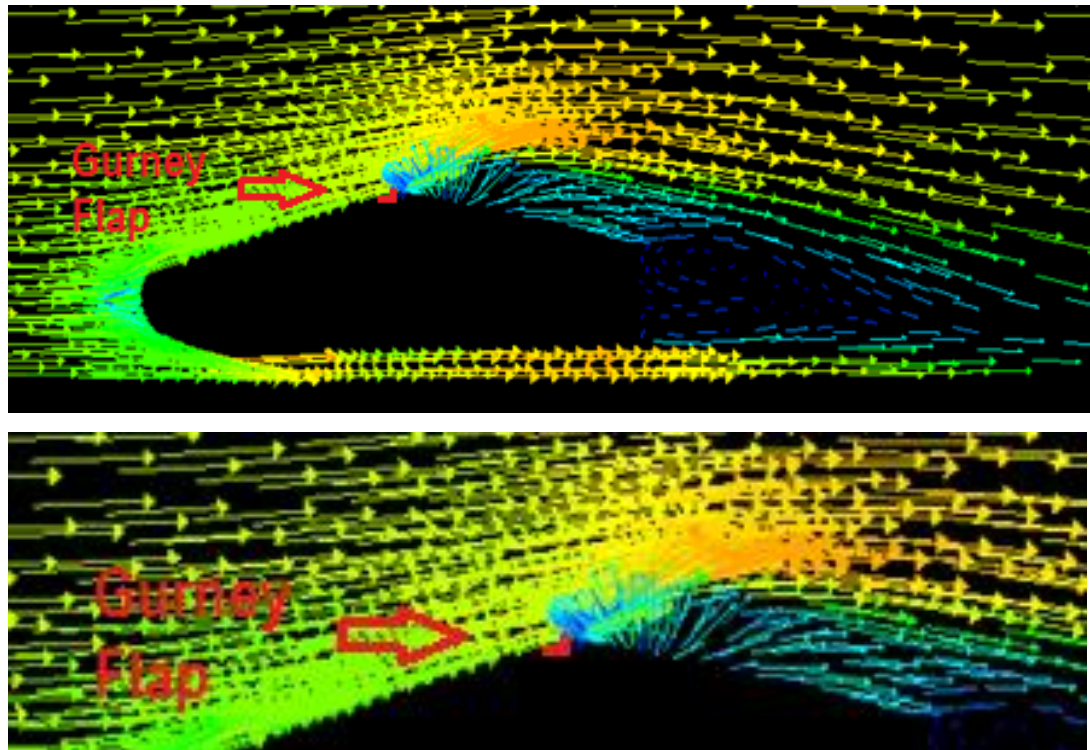
Figura 26. Perturbaciones en un Gurney Flap y sus efectos.



Fuente: (Diaz, Aerodinámica: Evolucionar o Morir (Parte 1), 2016)

Al estar el perfil del Gurney Flap colocado de forma vertical crea tres perturbaciones, es decir, vórtices o remolinos. La primera en su parte delantera que crea un poco de resistencia, pero desplaza hacia arriba el flujo, haciendo que éste salga más arriba que la superficie superior. Las últimas dos en su parte trasera, los cuales crean una potente zona de vacío que succiona de forma ordenada la capa límite del flujo en la parte superior, ayudando a que se mantenga laminar hasta llegar a su parte final, a pesar de que el mismo salga más arriba que la superficie superior. (Diaz, Aerodinámica: Evolucionar o Morir (Parte 1), 2016) Este efecto es apreciable en la Figura 27.

Figura 27. Efectos del Gurney Flap en la carrocería del vehículo Fórmula SAE.

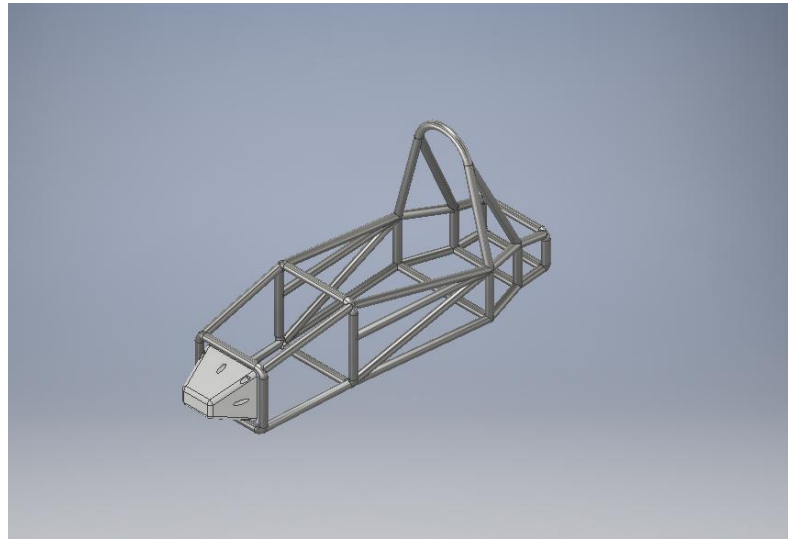


Fuente: Elaboración propia.

## VI. DISEÑO DE CARROCERÍA

Para el diseño de la carrocería se utilizó como base la versión más actualizada del chasis, a la cual se agregó el atenuador de impactos, pues este tiene que tomarse en cuenta dentro de los límites para la geometría de la punta de la carrocería.

Figura 28. Chasis con atenuador de impactos instalado en su parte frontal.



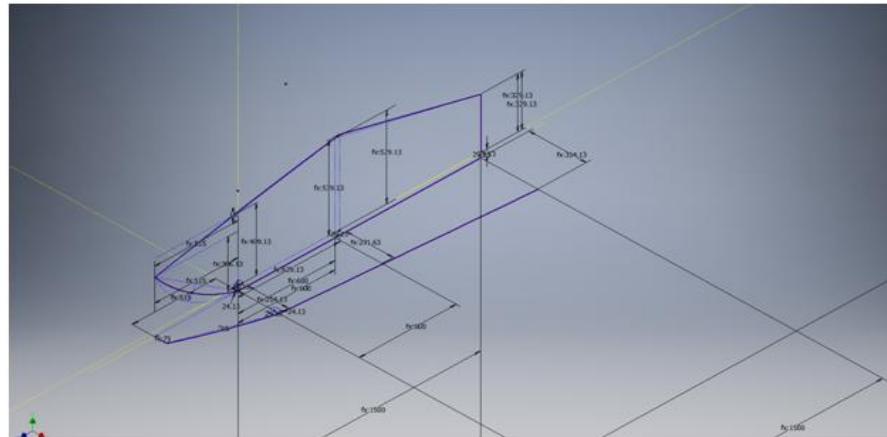
Fuente: Elaboración propia.

Aparte de la geometría del chasis y el atenuador de impactos, los límites para el diseño de la carrocería se ven regidos por el reglamento de la competencia. Estos se encuentran en el Artículo 2 y el Artículo 9 del reglamento, los cuales limitan la geometría con medidas precisas, las cuales se deben respetar, independientemente del diseño que se desee realizar o la geometría que se quiera seguir para el mismo; ver Cuadro 2 y Figura 17.

Por esta razón, el diseño de la carrocería debe de ser aerodinámicamente eficiente de tal manera que cumpla con los objetivos propuestos en cuanto al coeficiente de arrastre menor de 0.9 y la velocidad máxima alcanzable de por lo menos 120 km/h; pero al mismo tiempo cumpla con todos los requerimientos establecidos por el reglamento de la competencia y los límites de la geometría base propuesta por el diseño del chasis. Por lo tanto, es necesario poder controlar de una manera eficiente la geometría básica del diseño de la carrocería para luego solamente refinar los contornos de la misma y que la resistencia aerodinámica sea mínima.

Para tener un mayor control sobre la geometría deseada se trabajaron sketches o bosquejos en las diferentes secciones del automóvil los cuales luego se volverían superficies que deben intersectarse entre sí, para que la función Sculpt del software Inventor pueda juntarlas y así crear la carrocería teniendo control sobre la geometría que se le quiera dar a la misma.

Figura 29. Bosquejos de las diferentes secciones que conforman la carrocería.

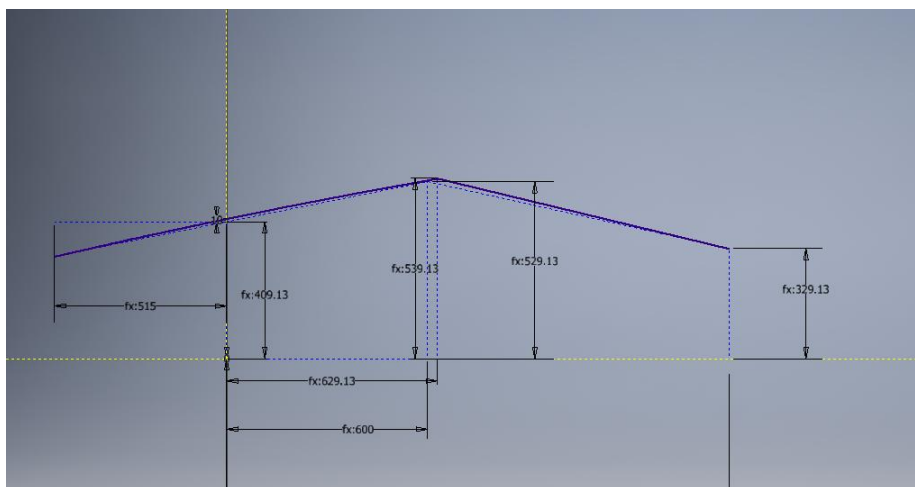


Fuente: Elaboración propia.

Además, es necesario que el diseño de la carrocería sea paramétrico, por lo tanto, cada uno de los bosquejos cuenta con medidas parametrizadas, las cuales se encuentran directamente vinculadas al documento Excel de los parámetros del chasis. De acuerdo a las pruebas y cambios realizados al diseño de la carrocería se comprobó que el diseño de la misma es parametrizable hasta las superficies, pues las funciones de modelado en 3D no se actualizan con los cambios en los parámetros y causan errores en el software. Ver Figura 9.

Para la geometría del bosquejo de la parte superior de la carrocería se buscó que esta fuera lo más alta posible en la punta y luego siguiera una curvatura muy suave a lo largo de toda la nariz. Lo primero porque se busca que la mayor parte del aire que pasa alrededor del vehículo lo haga por abajo, y así se reduzca la succión en la parte trasera, evitando así la resistencia de presión; y lo último, debido a que se desea que la capa límite se mantenga laminar y no se separe de la superficie mientras el flujo se sube gradualmente y así no choque de frente con el conductor al llegar al habitáculo, sino más bien pase por encima del mismo.

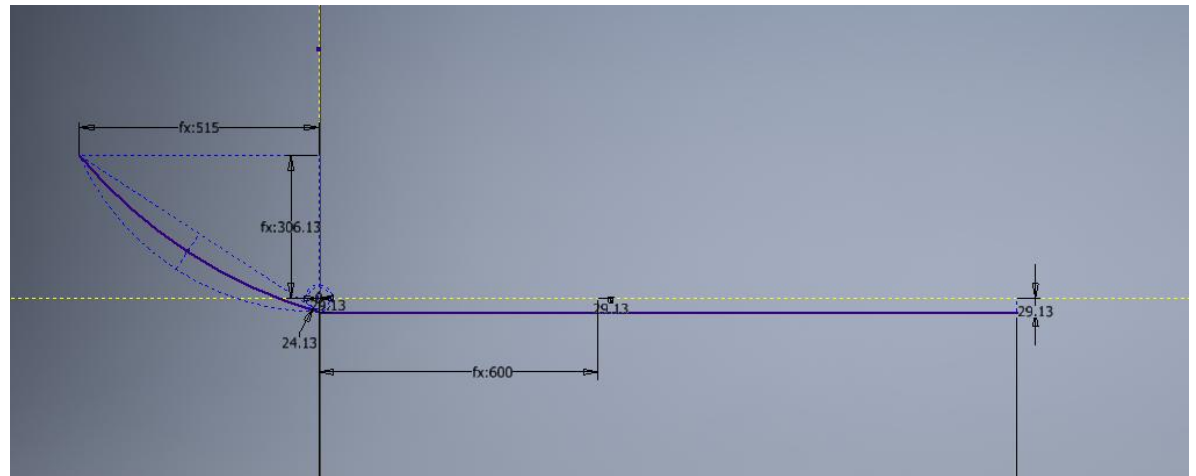
Figura 30. Bosquejo de la parte superior de la carrocería.



Fuente: Elaboración propia.

La geometría obtenida en la parte inferior del chasis tiene la menor pronunciación de la curva respetando la longitud de la punta, regida por el reglamento, el cual establece que ninguna parte de la aerodinámica debe estar 700 mm más adelante del frente de las llantas frontales, dejando además suficiente espacio al atenuador de impactos. En la parte más baja se buscó respetar siempre el mínimo de 5 milímetros entre el chasis y la carrocería. La separación entre el chasis y la carrocería es mayor en el primer tubo de la carrocería y menor en el último, pues al darle un ángulo al piso del vehículo se mejora el flujo que pasa por debajo de este evitando la resistencia de presión y permitiendo al aire salir de forma más ordenada, es decir, con el mínimo de turbulencia posible.

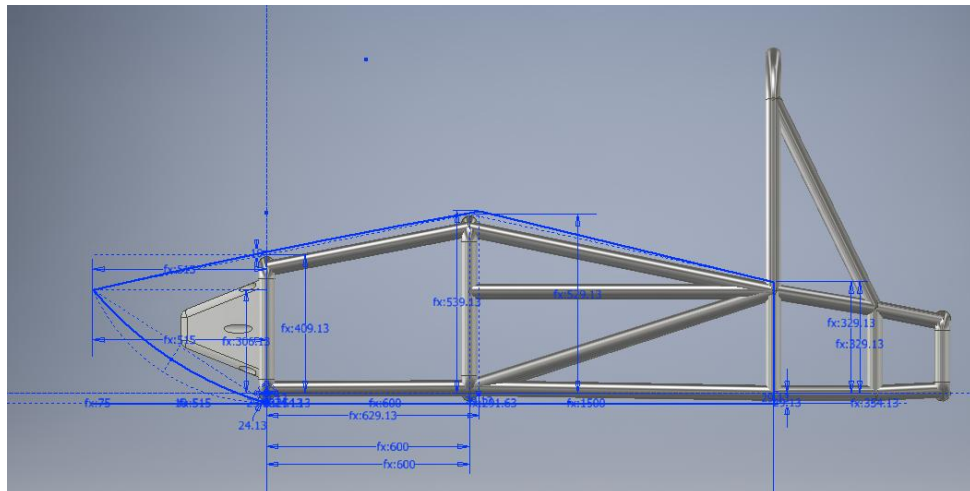
Figura 31. Bosquejo de la parte inferior de la carrocería.



Fuente: Elaboración propia.

Todas estas geometrías se verificaron directamente sobre el chasis y el atenuador de impactos mientras se diseñaban para realizar cualquier cambio en los bosquejos antes de empezar a realizar cualquier modelado en 3D. Según el reglamento, ninguna parte de la aerodinámica debe estar 700 mm más adelante del frente de las llantas frontales, por lo que esta longitud establecida por el reglamento es la que controla la geometría de la punta principalmente, pues siempre y cuando esto se respete, solamente es necesario verificar que el atenuador de impactos tenga espacio suficiente dentro de la punta de la carrocería.

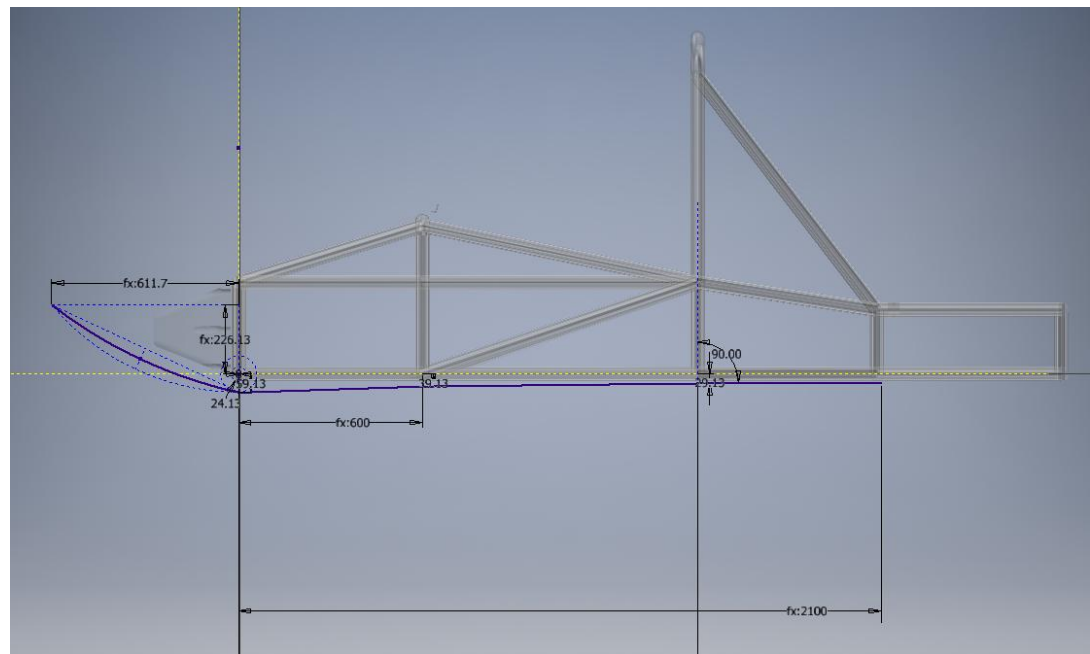
Figura 32. Verificación de la carrocería sobre el chasis y el atenuador de impactos.



Fuente: Elaboración propia.

La geometría lateral se ve regida por el diseño del chasis, y para la punta se trató de mantener una curvatura suave que mantuviera la capa límite laminar y no creara turbulencias, por lo que en el frente se diseñó de tal manera que la punta fuera un tercio del ancho de la parte frontal del vehículo (la parte donde está instalado el atenuador de impactos). Esta geometría también se verificó con el chasis y el atenuador de impactos y siempre respetó el mínimo de los 5 milímetros entre el chasis y la carrocería.

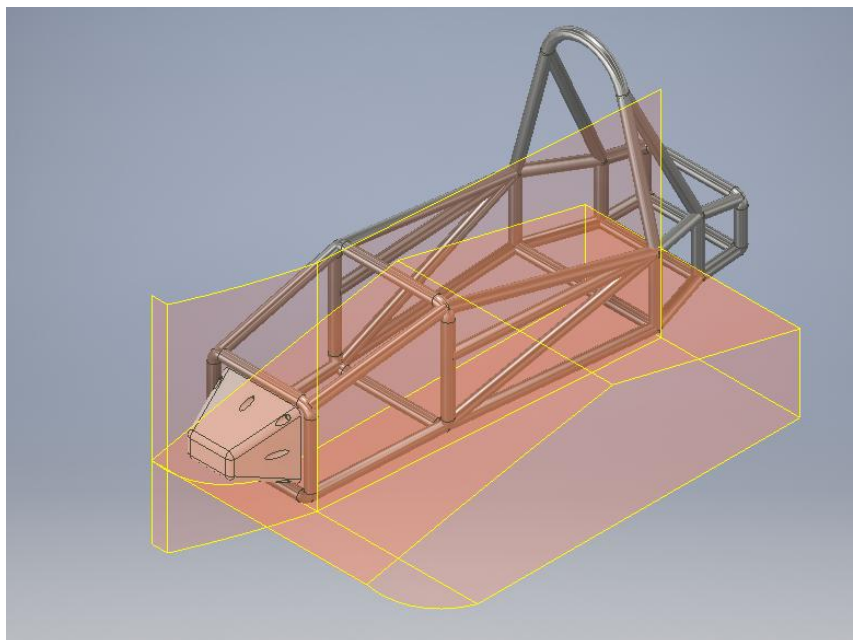
Figura 33. Verificación de la parte inferior de la carrocería con el chasis y el atenuador de impactos



Fuente: Elaboración propia.

Estos bosquejos se convierten luego en extrusiones de superficies las cuales deben intersectarse entre sí. Hasta este punto el diseño de la carrocería es todavía parametrizable.

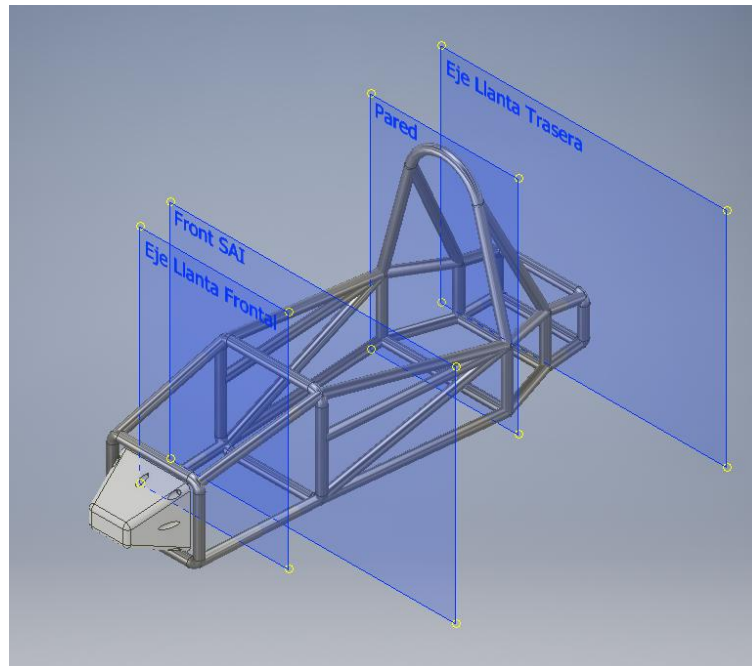
Figura 34. Superficies que conforman la carrocería.



Fuente: Elaboración propia.

El diseño de las tomas de aire laterales se ve regido por la posición de los ejes delantero y trasero, pues el reglamento no permite partes de la carrocería hasta 75 milímetros antes/después de las llantas. Como las posiciones no se habían fijado, se parametrizaron los bosquejos con planos que representan las posiciones de los ejes delantero y trasero, de tal forma que, al mover los planos, las medidas de los bosquejos cambien automáticamente.

Figura 35. Planos que limitan las tomas de aire laterales.

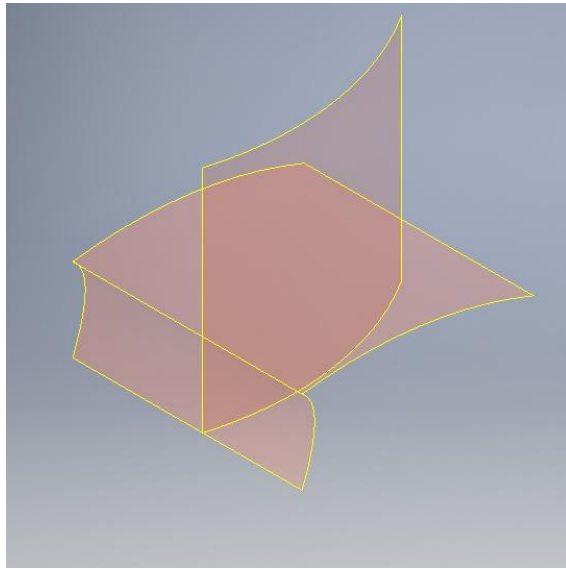


Fuente: Elaboración propia.

La geometría lateral de las tomas de aire debe desviar el aire hacia el motor y el radiador en su parte interior, y en la exterior, debe de mantener la capa límite laminar y no generar turbulencias. Además, la parte superior de las mismas debe de tener una curvatura suave que mantenga la capa límite pegada a la misma de forma laminar y baje levemente el flujo para evitar lo más posible la resistencia por presión y no cree succión en la parte trasera del vehículo.

Los bosquejos de las tomas de aire laterales también se convierten en extrusiones de superficies, las cuales deben intersectarse entre ellas.

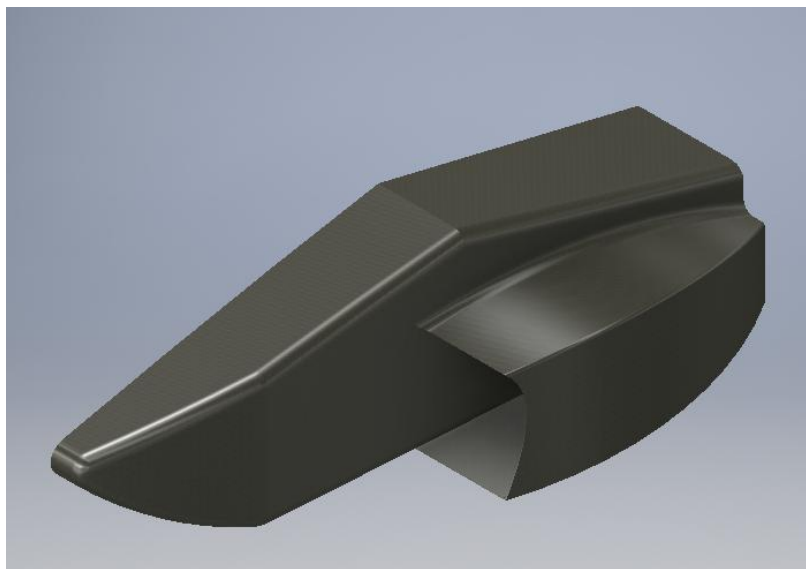
Figura 36. Superficies que conforman las tomas de aire laterales.



Fuente: Elaboración propia.

Luego, todo el diseño se une por medio de diferentes funciones de modelado en 3D, las cuales incluyen Sculpt, Shell y diferentes Fillets que permiten terminar de afinar la carrocería. Estas funciones son utilizadas, pues nos permiten construir el cascarón que conforma la carrocería independientemente de lo complejas que sean las geometrías de las superficies que la conforman, obteniendo así una carrocería regida por el diseño de sus superficies con orillas refinadas que nos permiten reducir la resistencia de forma y la resistencia aerodinámica.

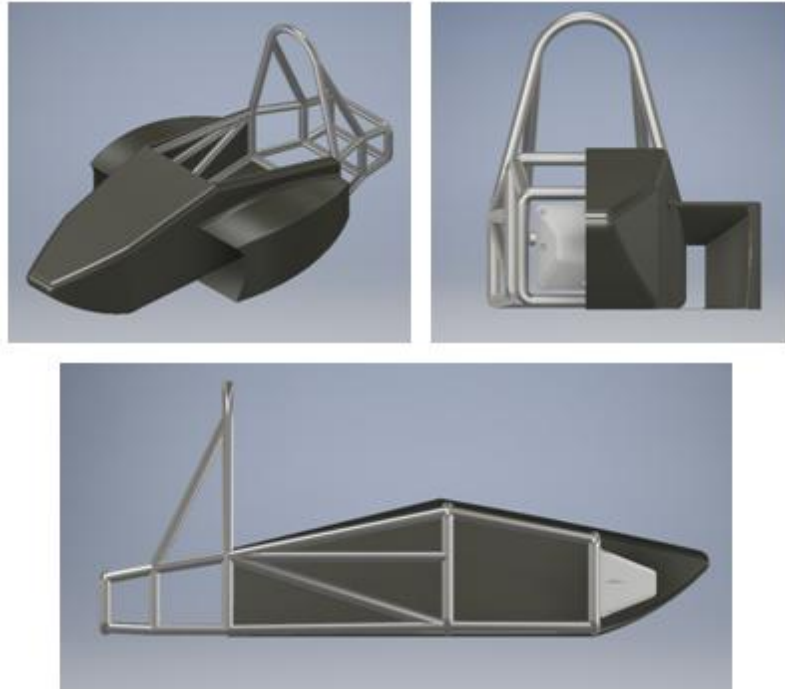
Figura 37. Carrocería con toma de aire lateral.



Fuente: Elaboración propia.

Conociendo la densidad de la fibra de vidrio Clase E, que es la fibra de vidrio que se comercializa en Guatemala, junto con la resina, de  $2.58 \text{ gr/cm}^3$  (Bangherpour, 2005), se utilizó Autodesk Inventor para obtener el peso de la carrocería. Ya que el software, al conocer la densidad del material, puede calcular el volumen de toda la estructura proporcionar el dato del peso de la misma. El peso obtenido es de 42.23 kg., por lo que, si la carrocería se construye de 3 milímetros de espesor, ésta tendría un grosor que le permite ser tanto ligera como rígida. Su rigidez se pudo comprobar con la prueba estructural realizada en ANSYS en el punto donde experimenta una mayor presión. Por último, solo fue necesario verificar que la carrocería no tope con el chasis ni el atenuador de impactos en ningún punto.

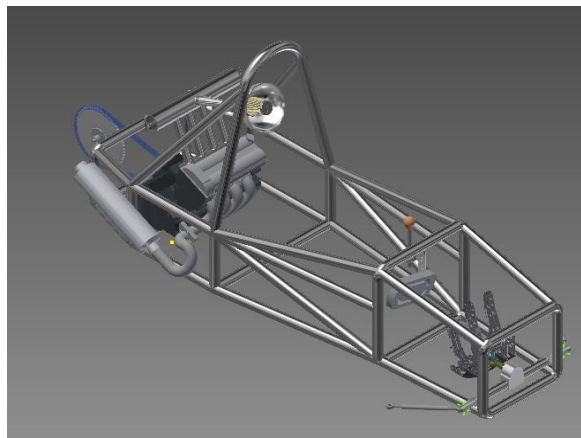
Figura 38. Verificación de la carrocería completa instalada en el chasis.



Fuente: Elaboración propia.

Ya teniendo la mayoría de componentes del vehículo ensamblados se hizo pequeños ajustes para asegurar que estos no fueran a causar problemas de instalación. Entre estos ajustes se tomó en cuenta el tamaño y la posición del radiador y las posiciones tanto del eje delantero como el trasero del vehículo.

Figura 39. Chasis y componentes del vehículo instalados.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 40. Carrocería instalada en chasis con componentes del vehículo.



Fuente: Elaboración propia.

Al terminar el diseño se realizaron las pruebas aerodinámicas al mismo en ANSYS utilizando el túnel de viento digital realizado en FLUENT, donde se obtuvo resultados no solo de su coeficiente de arrastre, sino que también las gráficas de los vectores tanto de velocidad del aire alrededor de la carrocería, como de los vectores de turbulencia que generaba la misma. En estos análisis se pudo verificar el correcto funcionamiento de la carrocería y los accesorios aerodinámicos, pero también fue evidente que había que realizar algunas mejoras en ciertas áreas, por lo que se decidió dividir el diseño en dos fases. Ambas fases y sus diferentes características se presentan a continuación.

## A. Fase I

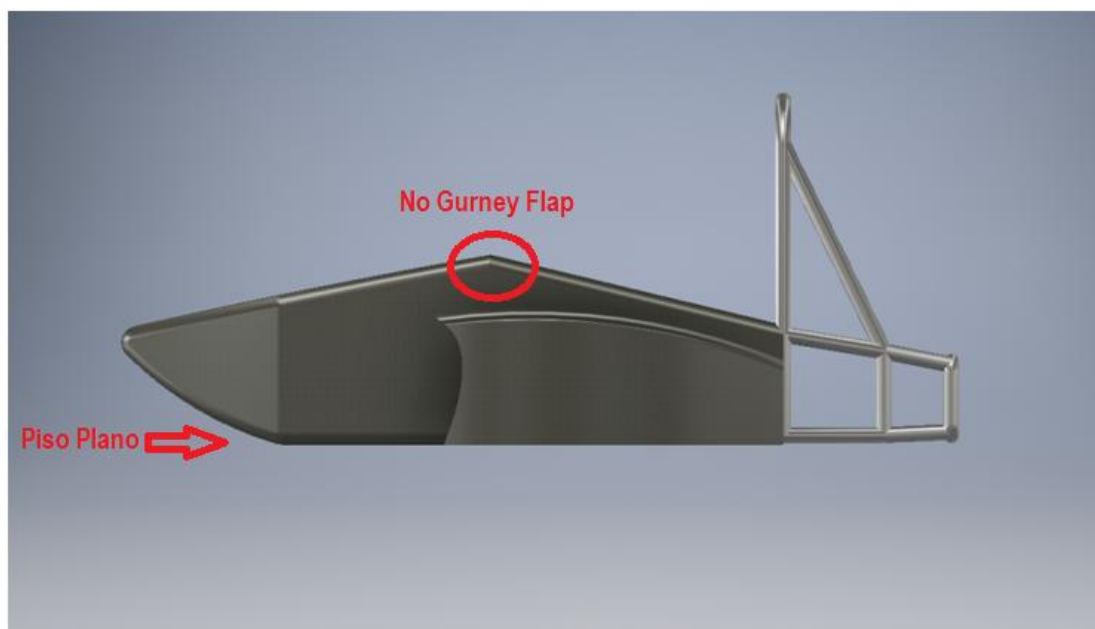
La fase I contaba con curvas muy suaves tanto en su superficie superior como en la inferior, éstas curvas se respetaron tanto en la fase I como en la fase II, pues según el análisis realizado en FLUENT éstas curvas suaves mantuvieron el flujo del aire en forma laminar a lo largo de toda su superficie. (vid. VII. PRUEBAS DE DISEÑO DE CARROCERÍA Y VALIDACIÓN: A. FASE I)

Las capas de fluido en la capa límite laminar se encuentran perfectamente ordenadas una sobre la otra y permanecen adheridas siempre a la superficie del sólido. (Diaz, Aerodinámica 3: Análisis de la Capa Límite y el Efecto Coanda, 2015)

Esta fase no contaba con accesorios aerodinámicos como el Gurney Flap y su piso era plano, lo que en las pruebas en FLUENT hizo evidente que era un diseño que causaba mucha turbulencia cuando el flujo salía de su superficie y en su parte superior el flujo de aire iría dirigido hacia la cara del piloto. (vid. VII. PRUEBAS DE DISEÑO DE CARROCERÍA Y VALIDACIÓN: A. FASE I)

Las moléculas del fluido se mueven en todas direcciones en la capa límite turbulenta, disipando mayor energía y generando mayor fuerza de fricción. Cuando se sale de la zona de la capa límite, el flujo se vuelve laminar de nuevo, pues en este caso solamente la capa límite es turbulenta. (Diaz, Aerodinámica 3: Análisis de la Capa Límite y el Efecto Coanda, 2015)

Figura 41. Carrocería Fase I.



Fuente: Elaboración propia.

## B. Fase II

La fase II del diseño, de la carrocería, mitigó los flujos turbulentos generados por la fase I, ya que se agregó un Gurney Flap antes de llegar a la cabina del piloto y el piso dejó de ser plano, pues al estar en ángulo respecto a la horizontal desvió el aire para que saliera un poco más arriba en la parte trasera. Esto se verificó con las pruebas realizadas en FLUENT, en donde se comprobó que las turbulencias se habían minimizado y definitivamente este diseño era más conveniente, pues siempre se mantenía la capa límite laminar a su alrededor de su superficie, pero al despegarse de ésta el flujo seguía siendo laminar y esto ayudaría a no causar succión. (vid. VII. PRUEBAS DE DISEÑO DE CARROCERÍA Y VALIDACIÓN: B. FASE II)

Además, de acuerdo a los vectores de turbulencia y velocidad obtenidos en el análisis de FLUENT se pudo verificar el correcto funcionamiento del Gurney Flap y que el flujo de aire ya no se dirigiera a la cabina del piloto. (vid. VII. PRUEBAS DE DISEÑO DE CARROCERÍA Y VALIDACIÓN: B. FASE II)

Figura 42. Carrocería Fase II.



Fuente: Elaboración propia.

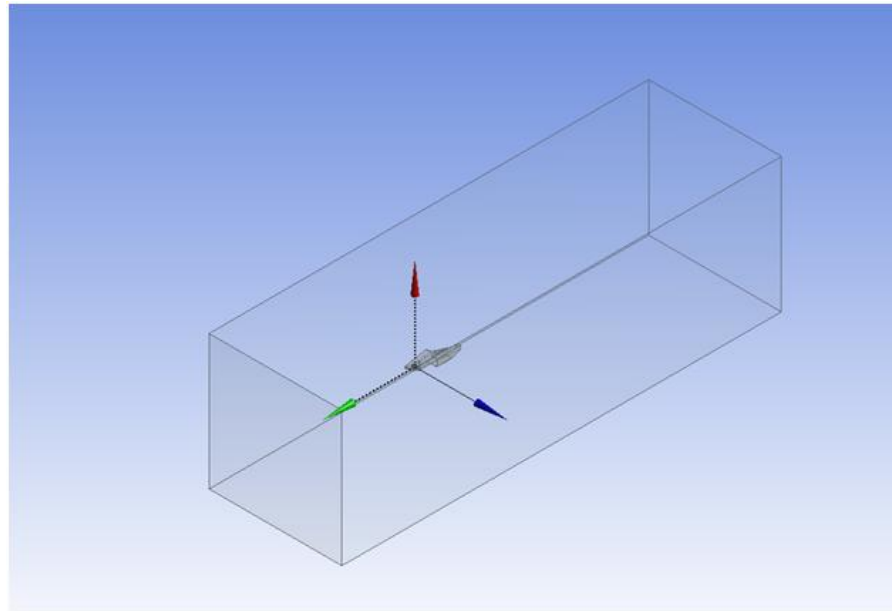
## VII. PRUEBAS DE DISEÑO DE CARROCERÍA Y VALIDACIÓN

Terminado el proceso de diseño se prosiguió a realizar pruebas aerodinámicas en ANSYS para verificar que este cumpla con los objetivos establecidos.

Para las pruebas aerodinámicas en Ansys se siguió el método propuesto por el equipo de Fluent Alemania, quienes desarrollaron el documento “*Best Practice Guidelines for Handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT*” en el cual se explica a detalle cómo realizar las pruebas aerodinámicas a cualquier vehículo.

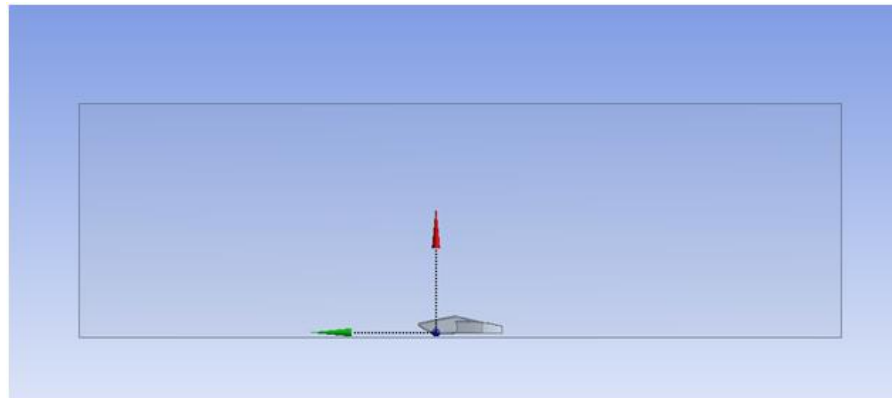
El túnel de viento utilizado para la simulación debe tener suficiente espacio entre las paredes de este y la carrocería para que cualquier efecto causado en las paredes del túnel no sea notable en el fluido circundante a la carrocería. Teniendo esto en cuenta y limitado, a la vez, por la capacidad del software que tiene licencia estudiantil, se obtuvo una longitud equivalente a 3 veces la longitud de vehículo de frente, 3 veces hacia atrás, 3 hacia arriba y 3 de lado. El análisis se realiza solamente a la mitad del vehículo, pues este es simétrico en ambos lados, y esto permite hacer lo más grande posible el túnel de viento, para que las paredes del mismo no influyan en los resultados del vehículo; y permiten maximizar los elementos para el análisis, pues solamente se tiene que aplicar un mallado a la mitad del túnel de viento, lo cual optimiza los resultados del análisis obteniendo los resultados más precisos posibles.

Figura 43. Túnel de viento digital realizado en ANSYS.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 44. Túnel de viento digital realizado en ANSYS.



Fuente: Elaboración propia.

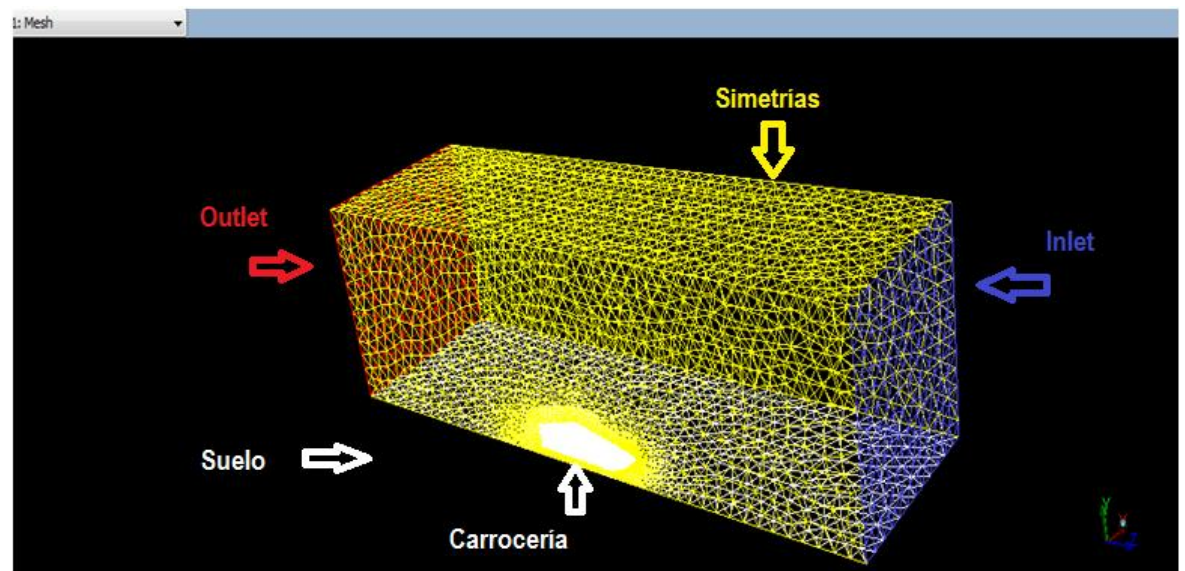
El mallado debe permitir el análisis del recorrido del fluido sobre la superficie de la carrocería, siendo lo suficientemente fino para obtener los vectores de velocidad del aire sobre la misma y la turbulencia que se forma alrededor de ella. Tomando en cuenta esto y limitado, a la vez, por la capacidad del software que tiene licencia estudiantil, se obtuvo un mallado refinado en la superficie de la carrocería y sus curvaturas, maximizando el número de elementos que conforman el mallado siendo estos lo más cercanos al límite propuesto por la licencia.

Figura 45. Parámetros del mado en ANSYS.

Details of "Mesh"	
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	0
<b>Sizing</b>	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	5
<input type="checkbox"/> Min Size	1.0 mm
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (13.410 mm)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	250.0 mm
<input type="checkbox"/> Max Size	250.0 mm
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.20 )
Minimum Edge Length	5.9129e-002 mm
<b>Inflation</b>	
<b>Assembly Meshing</b>	
Method	None

Fuente: Elaboración propia.

Figura 46. Túnel de viento digital con mado ingresado a FLUENT.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestran los diferentes resultados en un análisis de más de 1000 iteraciones. El número de iteraciones se debe a que el resultado que más importancia tiene para nuestro análisis es el del coeficiente de resistencia aerodinámica  $C_D$ , por lo que según los expertos de FLUENT Alemania, lo que se busca es que el quinto decimal de este resultado se vuelva constante. De esta manera el resultado se considera lo suficientemente preciso y válido. Para llegar a este resultado las primeras 100 iteraciones se realizan con todas las ecuaciones de primer orden pues éstas solo buscan empezar a acercarse al resultado final. El resultado obtenido por las primeras 100 iteraciones es refinado luego con más de 900 iteraciones, las cuales se realizan con las ecuaciones de segundo orden, las cuales nos llevan a resultados más precisos. Este proceso se realiza de esta manera para ahorrar tiempo y obtener resultados válidos de acuerdo a las recomendaciones realizadas por Fluent Alemania, y se realizan las suficientes iteraciones hasta que el quinto decimal del resultado de mayor interés sea constante, en el caso de la carrocería del Fórmula SAE, el coeficiente de resistencia aerodinámica  $C_D$ .

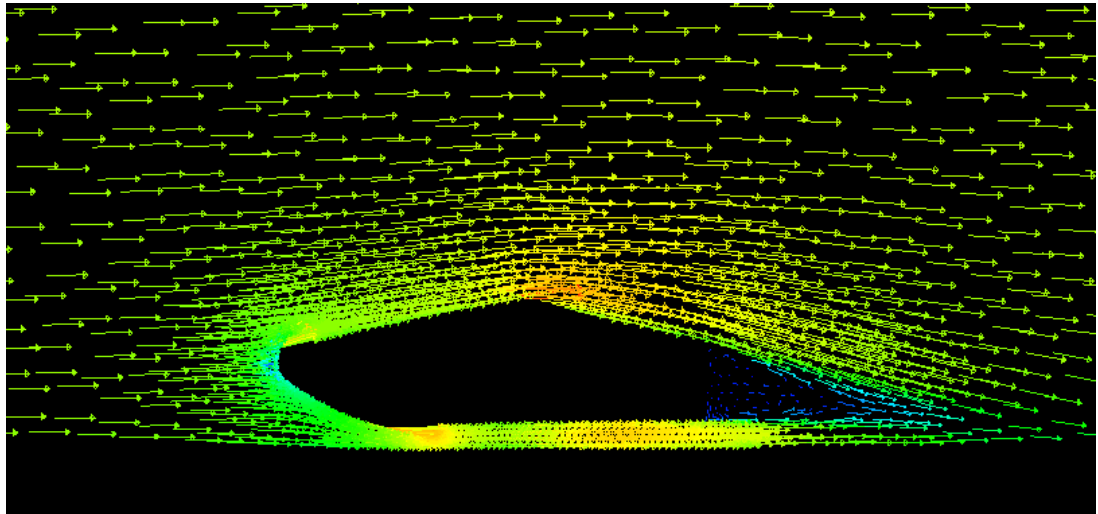
## **A. Resultados Fase I**

En los vectores de velocidad de la fase I se puede observar como el aire recorre la superficie de la carrocería de una forma eficiente cumpliendo con las bases de diseño utilizadas teniendo velocidades muy parecidas tanto en la parte superior como en la inferior. El aire rodea el vehículo sin formar turbulencias, manteniendo la capa límite laminar y pegada a toda la superficie del vehículo.

En la parte superior se observa en la sección del habitáculo del piloto, que el flujo de aire sigue pegado a la superficie, lo que significa que el aire se dirigiría directo hacia él. Esto se debe a un vacío que se forma en el cambio de la curvatura tan marcado en esta sección, lo que se puede observar mejor en los resultados de presiones (vid. Figura 50). Este efecto se debe evitar, pues el flujo de aire chocaría con el piloto y la pared de fuego, aumentando drásticamente el coeficiente de arrastre.

Además, al juntarse los flujos tanto inferior como superior en la parte trasera, podemos observar turbulencias causadas por el choque entre ambos flujos a velocidades similares.

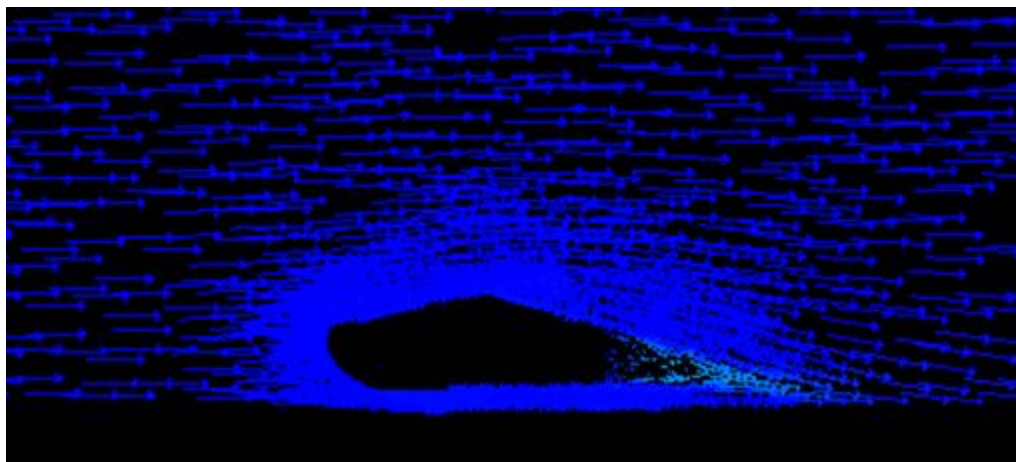
Figura 47. Vectores de velocidad del aire sobre la carrocería.



Fuente: Elaboración propia.

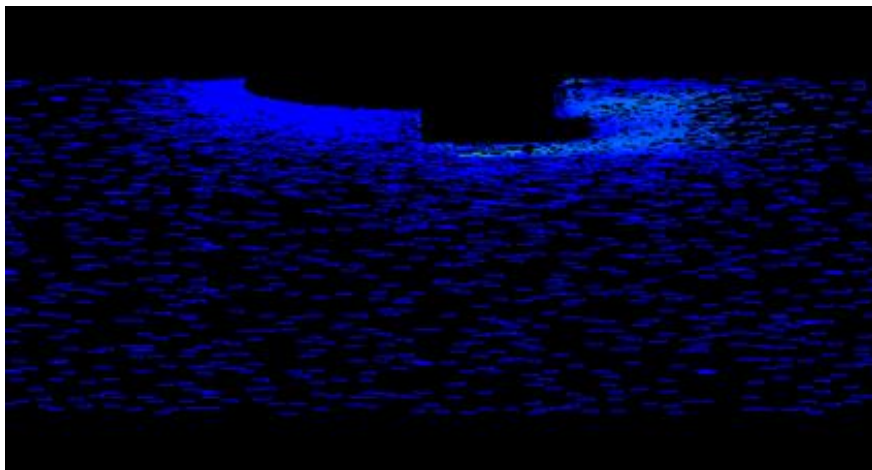
Los vectores de turbulencia verifican de nuevo los resultados de los vectores de velocidad, comprobando que las turbulencias no se forman a lo largo de toda la carrocería, manteniendo el flujo de aire pegado a la superficie de forma laminar tanto en la parte inferior como superior y la parte lateral de las tomas de aire. Las turbulencias formadas sobre la carrocería se concentran en la parte trasera, lo que representa un problema para el vehículo, pues esto causa succión e incrementa la resistencia por presión.

Figura 48. Vectores de turbulencia del aire sobre la carrocería.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 49. Vectores de turbulencia sobre el lateral de la carrocería.



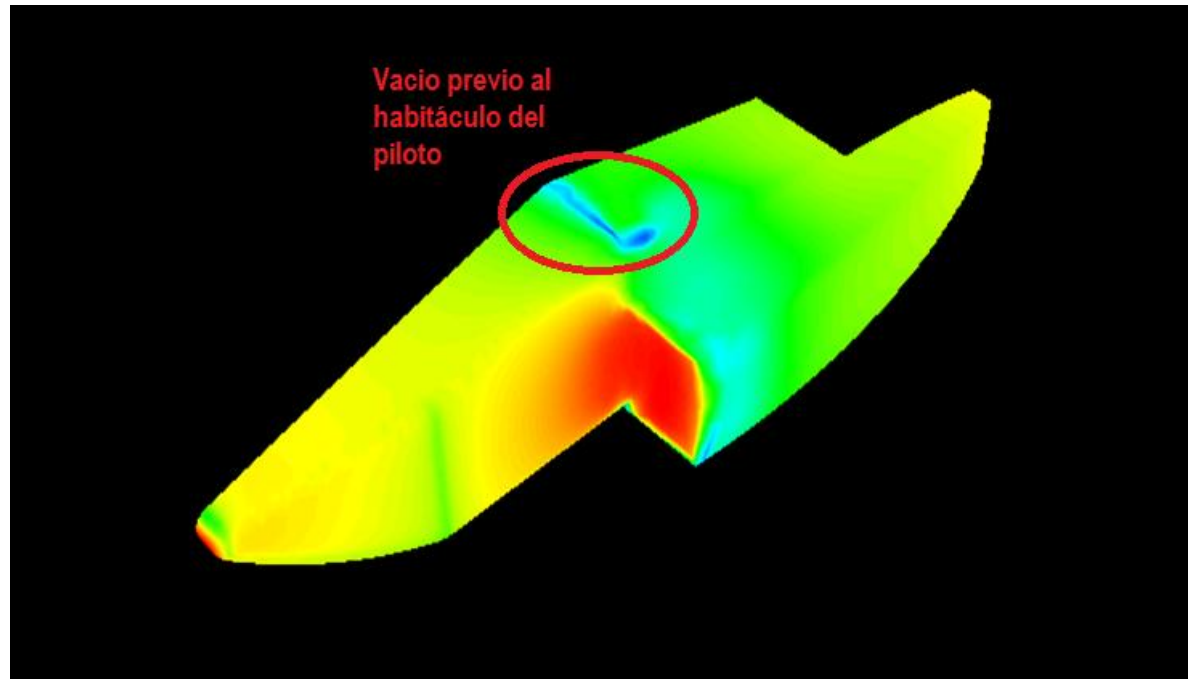
Fuente: Elaboración propia.

Para mitigar estas turbulencias formadas en la parte trasera de la carrocería se plantea que en la fase I el piso del vehículo no sea plano, esto con el fin de acelerar el flujo de aire que pasa por la parte inferior y que este salga del vehículo de una forma más distribuida y ordenada, es decir, sin chocar directamente con el flujo superior y mantenerse laminar.

Además, el vacío en la sección del habitáculo del piloto debe de eliminarse, por lo que se propone que para la fase II se instale un Gurney Flap en esta sección, el cual mantendrá el flujo de aire en la parte superior más alto, evitando que este choque directamente con el piloto y la pared de fuego; lo mantendrá laminar y al mantenerlo más alto evitará el choque directo de este con el flujo inferior, ayudando también a la mitigación de las turbulencias concentradas en la parte trasera.

Un análisis de las presiones que experimenta el vehículo también es importante, pues éste permite entender mejor lo que está sucediendo y porque se está comportando el aire de esa manera alrededor de la carrocería. Este análisis muestra el vacío que se forma en la sección del habitáculo del piloto, el cual hace que el flujo de aire baje después de esta sección. Esto hace evidente la necesidad de instalar un Gurney Flap en esta sección.

Figura 50. Presiones sobre la carrocería.



Fuente: Elaboración propia.

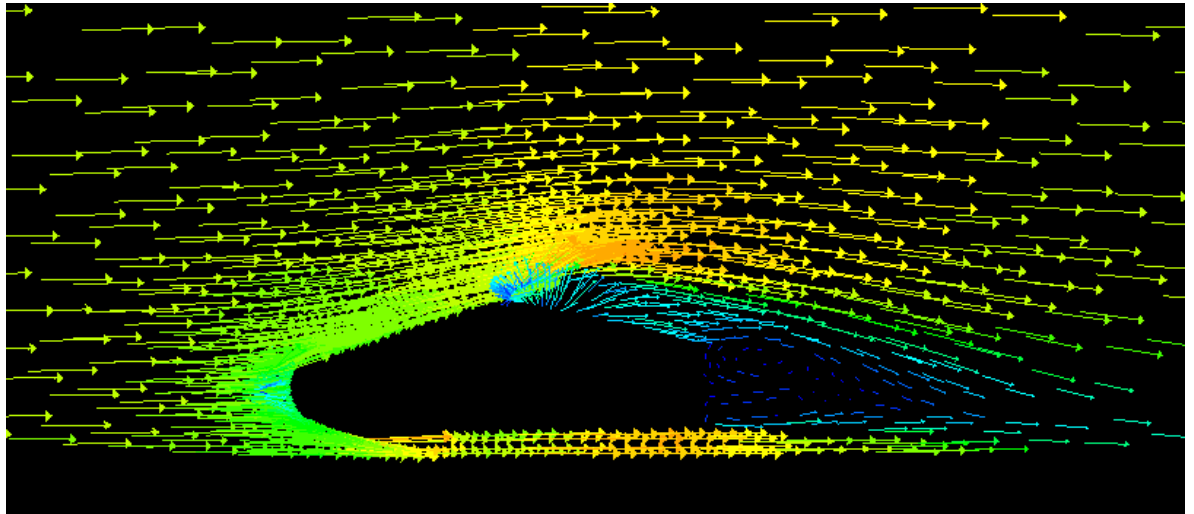
## B. Resultados Fase II

En la fase II se respetaron las geometrías propuestas por la fase I para la carrocería, por lo que los vectores de velocidad demuestran de nuevos como el aire recorre la superficie de la carrocería de una forma eficiente cumpliendo con las bases de diseño utilizadas. Las velocidades en la parte inferior del vehículo cambian al final, pues el flujo se acelera debido a que el piso del vehículo ya no es plano en la fase II y en la parte superior el flujo se frena levemente por el Gurney Flap instalado antes del habitáculo del piloto. De esta manera se logra con la carrocería un efecto similar al de un perfil alar invertido, que es lo que se busca en la aerodinámica automotriz.

Es apreciable también el efecto que esto tiene reduciendo el vacío previo al habitáculo del piloto, desviando el flujo del aire hacia arriba, logrando de esta manera que el aire pase por encima del habitáculo del piloto en su mayoría, evitando así incrementar el coeficiente de arrastre.

Los vectores de velocidad siguen un flujo laminar a lo largo de toda la superficie de la carrocería, evitando así las turbulencias y manteniendo el flujo pegado a la misma.

Figura 51. Vectores de velocidad del aire sobre la carrocería.

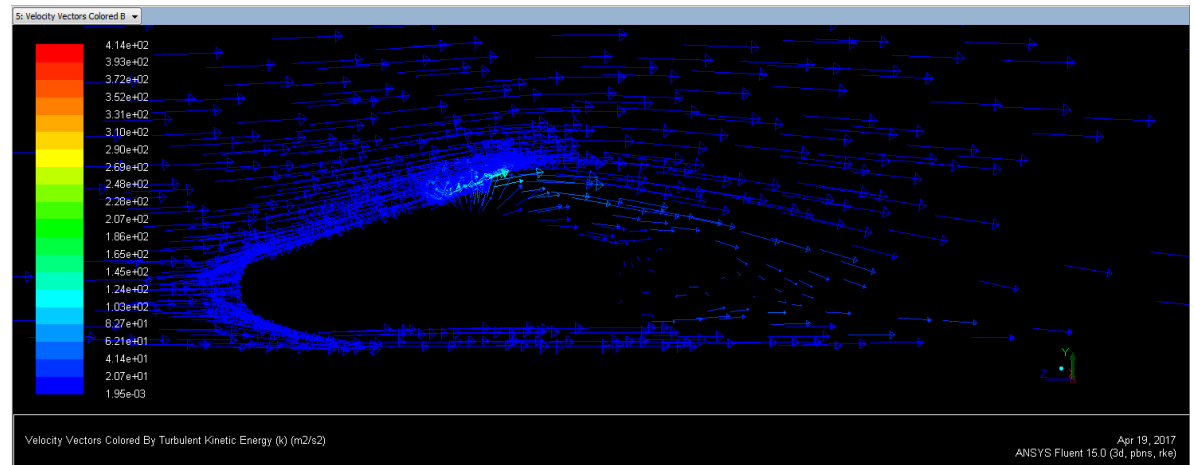


Fuente: Elaboración propia.

Los vectores de turbulencia demuestran que el flujo es laminar a lo largo de toda su superficie, presentándose solamente en la parte trasera, pero en una magnitud considerablemente menor a los vectores de turbulencia de la fase I. Se puede observar que las turbulencias en esta parte se encuentran controladas, pues los flujos generan la suficiente sustentación como para evitar la succión en esta sección.

También es apreciable la turbulencia formada en el Gurney Flap, lo cual demuestra la teoría del mismo, ya que es debido a esta turbulencia generada por el Gurney Flap que el flujo sube siguiendo la geometría de la carrocería previa al Gurney Flap, el flujo es desplazado hacia arriba por la turbulencia generada en su parte frontal y que el flujo es succionado de forma ordenada en su capa límite por las turbulencias de su parte trasera ayudando a que este se mantenga laminar.

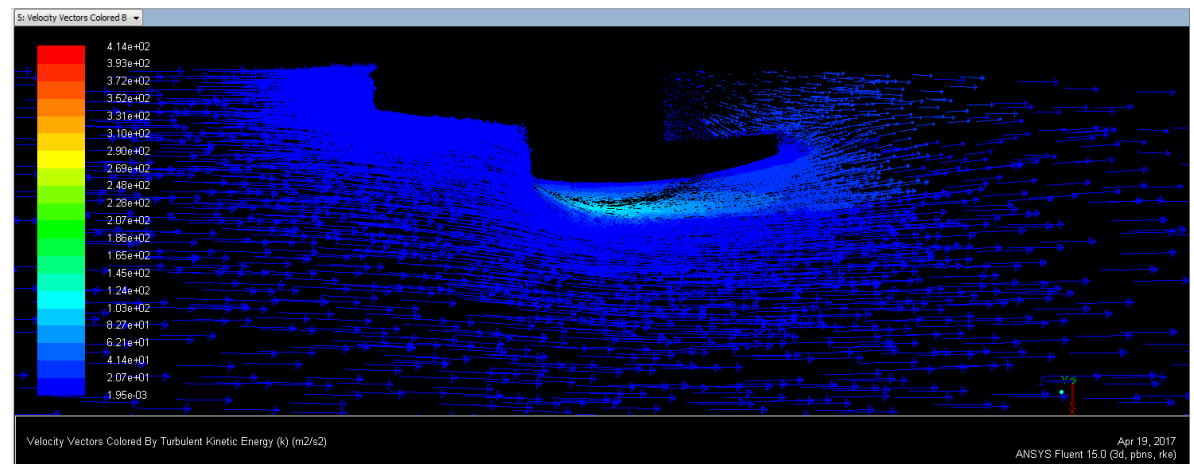
Figura 52. Vectores de turbulencia del aire sobre la carrocería.



Fuente: Elaboración propia.

En su parte lateral es apreciable cierta turbulencia fuera de la capa límite de la toma de aire lateral, pero ésta es despreciable pues es generada por el flujo de aire que topa de frente con la toma de aire y se genera debido a que para esta prueba las tomas de aire laterales se encontraban cerradas, por lo tanto, este efecto no sucederá, sino que este flujo seguirá su camino dentro de la toma de aire. Lo que es apreciable es la reducción en la turbulencia generada en la parte trasera y como los laterales de la carrocería mantienen su flujo laminar y sin turbulencias a lo largo de toda su superficie.

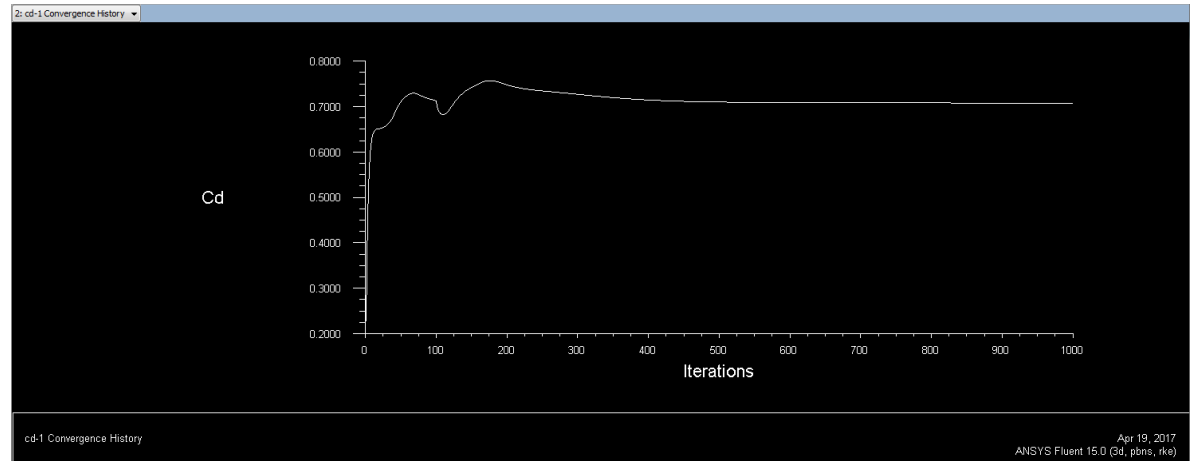
Figura 53. Vectores de turbulencia sobre el lateral de la carrocería.



Fuente: Elaboración propia.

El  $C_D$  se estabilizó luego de las iteraciones en un valor de 0.70794 lo cual es muy favorable, pues según los objetivos propuestos el  $C_D$  que se busca para el vehículo es de 0.9.

Figura 54. Resultados del coeficiente de resistencia aerodinámica  $C_d$ .



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3. Últimas iteraciones de resultados obtenidos en FLUENT para la carrocería.

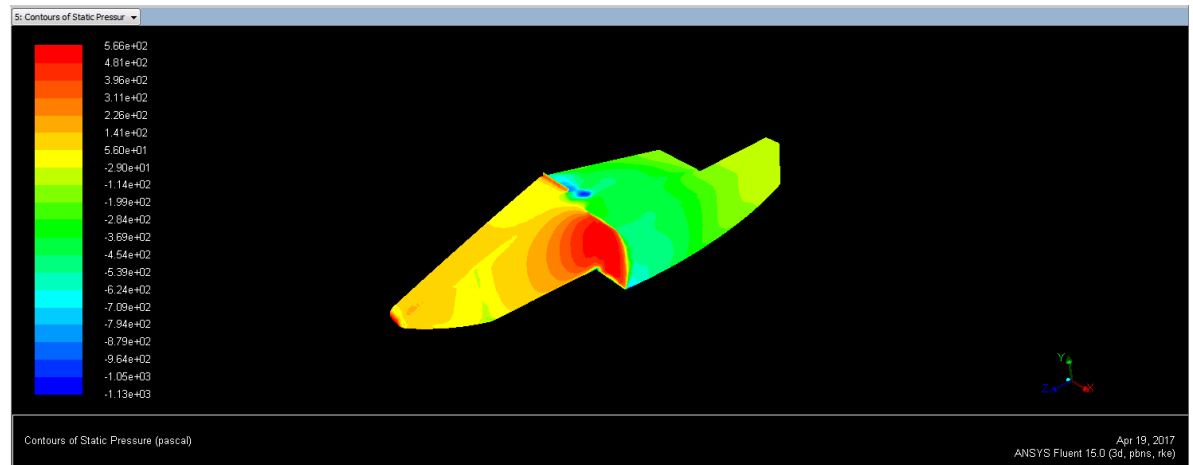
983	2.1093e-05	2.6864e-08	3.8265e-08	9.8183e-08	4.3896e-05	2.1598e-05	-2.3871e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:01:44	17
984	2.1450e-05	2.6954e-08	3.8218e-08	9.8527e-08	4.2848e-05	2.1652e-05	-2.3872e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:01:40	16
985	2.1264e-05	2.7805e-08	3.8094e-08	9.8963e-08	4.3079e-05	2.1593e-05	-2.3872e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:01:33	15
986	2.1568e-05	2.7142e-08	3.8094e-08	9.9034e-08	4.2832e-05	2.1650e-05	-2.3873e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:01:26	14
987	2.1475e-05	2.7185e-08	3.8016e-08	9.8981e-08	4.3066e-05	2.1604e-05	-2.3873e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:01:20	13
988	2.1426e-05	2.7382e-08	3.8077e-08	9.8789e-08	4.2822e-05	2.1625e-05	-2.3873e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:01:13	12
989	2.1441e-05	2.7428e-08	3.8189e-08	9.8822e-08	4.3057e-05	2.1578e-05	-2.3874e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:01:09	11
990	2.1480e-05	2.7577e-08	3.8306e-08	9.8718e-08	4.2814e-05	2.1575e-05	-2.3874e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:01:02	10
iter	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	k	epsilon	cm-1	cl-1	Cd-1	wake-velocit	time/iter	
991	2.1641e-05	2.7684e-08	3.8390e-08	9.8745e-08	4.3052e-05	2.1505e-05	-2.3874e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:00:56	9
992	2.1671e-05	2.7902e-08	3.8630e-08	9.8161e-08	4.2812e-05	2.1511e-05	-2.3875e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:00:49	8
993	2.1919e-05	2.7968e-08	3.8899e-08	9.8880e-08	4.3048e-05	2.1449e-05	-2.3875e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:00:43	7
994	2.1711e-05	2.8105e-08	3.9221e-08	9.9245e-08	4.2884e-05	2.1464e-05	-2.3875e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:00:37	6
995	2.1908e-05	2.8116e-08	3.9480e-08	9.8918e-08	4.3041e-05	2.1428e-05	-2.3875e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:00:31	5
996	2.2044e-05	2.8131e-08	3.9842e-08	9.8762e-08	4.2880e-05	2.1476e-05	-2.3876e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:00:25	4
997	2.2121e-05	2.8085e-08	4.0105e-08	9.9209e-08	4.3003e-05	2.1452e-05	-2.3876e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:00:19	3
998	2.1984e-05	2.8085e-08	4.0450e-08	9.7884e-08	4.2799e-05	2.1529e-05	-2.3877e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:00:12	2
999	2.2192e-05	2.8135e-08	4.0688e-08	9.8836e-08	4.3042e-05	2.1496e-05	-2.3877e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:00:06	1
1000	2.2092e-05	2.8179e-08	4.0843e-08	9.8593e-08	4.2801e-05	2.1592e-05	-2.3878e-02	1.2136e-01	7.0794e-01	0.0000e+00	0:00:00	0

Writing "j" gzip -2cf > C:\Users\ara1019\Downloads\Aerodinamica-actualizado-corregido (2)\Aerodinamica-actualizado-corregido\Aerodinamica\AERO III FIN\AERO II\Chasis FSAE\Chasis FS  
Writing temporary file C:\Users\ara1019\AppData\Local\Temp\Fintgz-856413 ...  
Done.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, las presiones demuestran el correcto funcionamiento del Gurney Flap y establecen la presión en la punta de la carrocería, que es la sección que experimenta la presión más alta, de 566 Pa, lo que se utilizó luego para el análisis estructural de la carrocería.

Figura 55. Presiones sobre la carrocería.

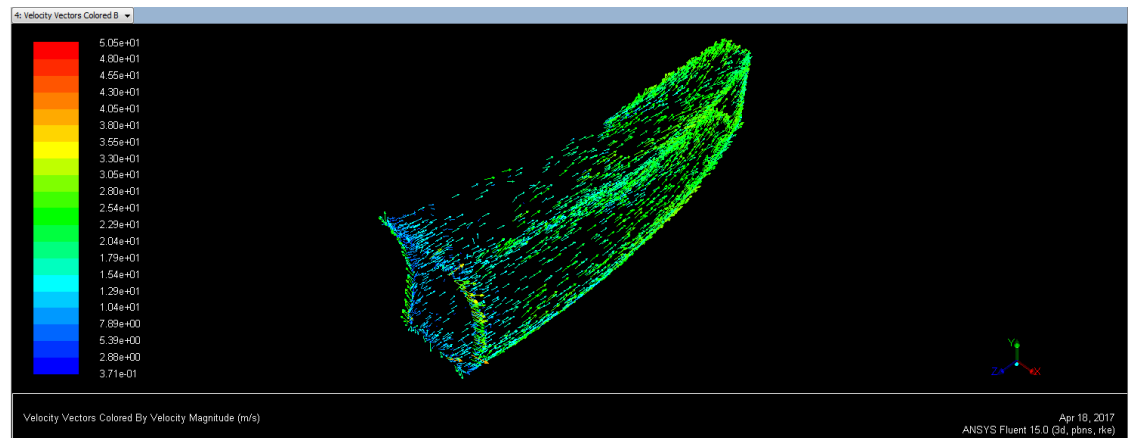


Fuente: Elaboración propia.

## C. Tomas de aire laterales

Los vectores de velocidad en las tomas de aire laterales demuestran que la curvatura de las mismas es lo suficientemente suave como para mantener el flujo laminar dentro de todas sus superficies y definitivamente direccionan el aire hacia el radiador.

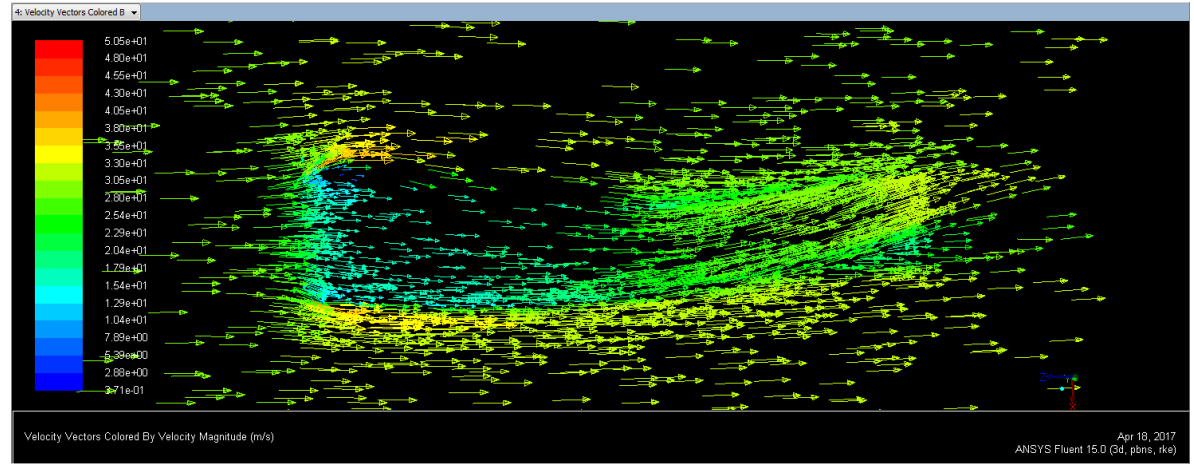
Figura 56. Vectores de velocidad del aire dentro de la toma de aire lateral.



Fuente: Elaboración propia.

En el plano medio de la toma de aire lateral, se aprecia como los vectores de velocidad del aire siguen la curvatura de la misma de forma laminar, guiando a las capas intermedias directamente hacia el radiador.

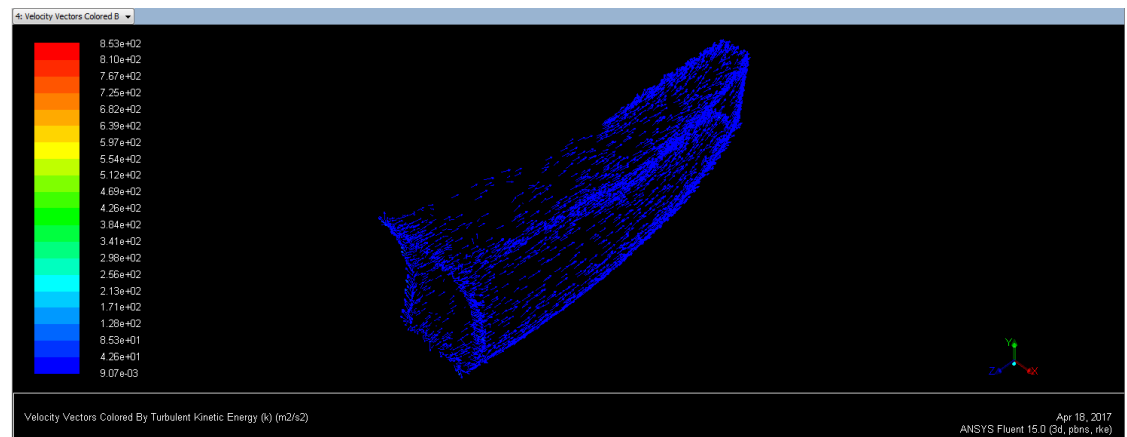
Figura 57. Plano medio de la toma de aire lateral con vectores de velocidad del aire.



Fuente: Elaboración propia.

Además, los vectores de turbulencia demuestran que la capa límite no se separa, por lo que no se causan turbulencias dentro de la toma de aire lateral.

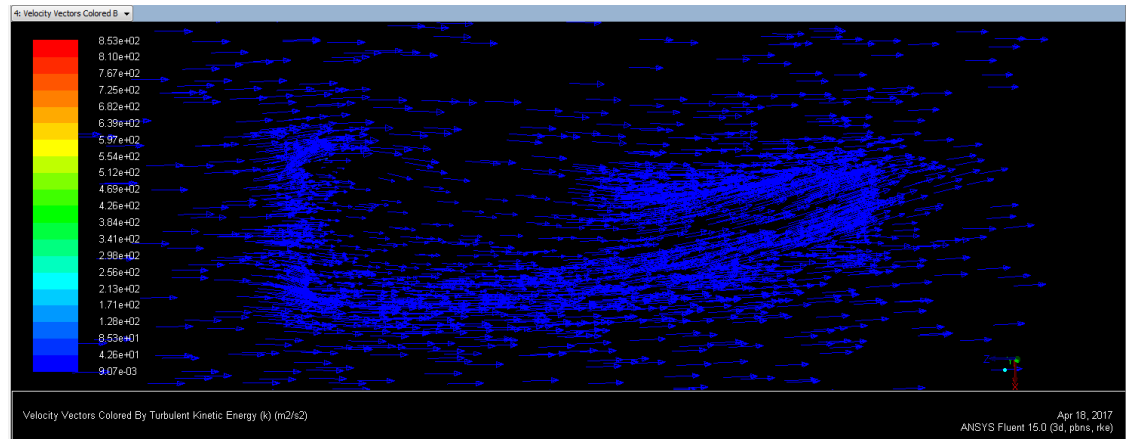
Figura 58. Vectores de turbulencia del aire dentro de la toma de aire lateral.



Fuente: Elaboración propia.

Por último, en el plano medio de la toma de aire lateral, los vectores de turbulencia demuestran que las capas intermedias entre las capas límite de las superficies mantienen el flujo ordenado y laminar sin causar ninguna turbulencia dentro de la toma de aire, por lo que el flujo va dirigido directamente al radiador sin turbulencia.

Figura 59. Plano medio de la toma de aire lateral con vectores de turbulencia del aire.



Fuente: Elaboración propia.

El flujo másico dentro de las tomas de aire se obtiene con el área de sección transversal en la entrada de las mismas, la cual se obtuvo por medio del software Autodesk Inventor. Esta es de  $0.218056 \text{ m}^2$ .

Se utiliza la ecuación para el flujo másico:

Ecuación 15. Flujo másico.

$$\dot{m} = \rho VA$$

Fuente: (Cengel, 2014) [23/3/2017]

Donde:

$\rho$ : Densidad del aire

V: velocidad del aire

A: Área de sección transversal

La densidad del aire es  $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$  de (Lanfrit, 2005) y (Morrison, 2013), la velocidad se estableció como 30 m/s. Por lo tanto, el flujo másico de aire dentro de la toma de aire lateral es de 8.014 kg/s.

## D. Velocidad máxima

Para poder estimar la velocidad máxima que puede alcanzar el vehículo tomando en cuenta las limitaciones por el arrastre generado por la carrocería se utilizó la ecuación de (Wordley & Saunders, 2006) y la potencia entregada por el motor tomando en cuenta sus pérdidas, calculada por el módulo de potencia del vehículo Fórmula SAE, de  $P = 40\text{kW}$ .

Ecuación 16. Ecuación de potencia para encontrar la velocidad máxima del vehículo en SI.

$$P = \frac{C_D * A * V^3}{1633}$$

Fuente: (Wordley & Saunders, 2006) [23/3/2017]

En donde:

P: Potencia

$C_D$ : Coeficiente de resistencia aerodinámica del vehículo

A: Área frontal del vehículo

V: Velocidad del vehículo

Utilizando el  $C_D$  obtenido de los análisis de FLUENT para la carrocería de 0.70794 y el área frontal del mismo análisis obtenida con el software de  $0.3111241 \text{ m}^2$ , se obtiene una velocidad del vehículo de 66.69 m/s, es decir 240 km/h, lo cual es muy favorable, pues la velocidad máxima que puede alcanzar el vehículo tomando en cuenta las pérdidas generadas por la carrocería está muy por encima de 120 km/h. Esto se debe a que el coeficiente de resistencia aerodinámica del vehículo se mantuvo por debajo de 0.9.

## E. Validación: Esfera

La validación del software ANSYS y su plataforma para análisis de fluidos FLUENT se realizó por medio de la comprobación y comparación de los datos obtenidos con el software y los datos teóricos del caso del coeficiente de resistencia aerodinámica de una esfera.

Para este caso teórico se calculó el número de Reynolds utilizando la ecuación 15.

Ecuación 17. Número de Reynolds para una esfera en el aire.

$$Re = \frac{\rho_{air}DV}{\eta_{air}}$$

Fuente: (Morrison, 2013) [23/3/2017]

Donde:

P: presión del aire

$\rho_{air}$ : densidad del aire

$\eta_{air}$ : viscosidad del aire

D: diámetro esfera

V: velocidad

Utilizando la densidad del aire  $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$  de (Lanfrit, 2005) y (Morrison, 2013) y la viscosidad del aire  $\eta_{air} = 1.8 * 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$  de (Lanfrit, 2005) y (Morrison, 2013) a la presión de P = 1 atm; la velocidad de 30 m/s y estableciendo el diámetro de la esfera como D = 1m por conveniencia para obtener un valor muy cercano a  $Re = 2*10^6$ , ya que de esta manera se obtienen las mejores aproximaciones para el  $C_D$  según (Morrison, 2013); se obtiene  $Re = 2041666.667$ .

Este valor se utiliza luego con la ecuación 18.

Ecuación 18. Ecuación de Morrison para el coeficiente de arrastre.

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{2.6\left(\frac{Re}{0.5}\right)}{1 + \left(\frac{Re}{0.5}\right)^{1.52}} + \frac{0.411\left(\frac{Re}{263000}\right)^{-7.94}}{1 + \left(\frac{Re}{263000}\right)^{-8}} + \frac{Re^{0.8}}{461000}$$

Fuente: (Morrison, 2013) [23/3/2017]

Y se obtiene así el  $C_D$  teórico de 0.24541.

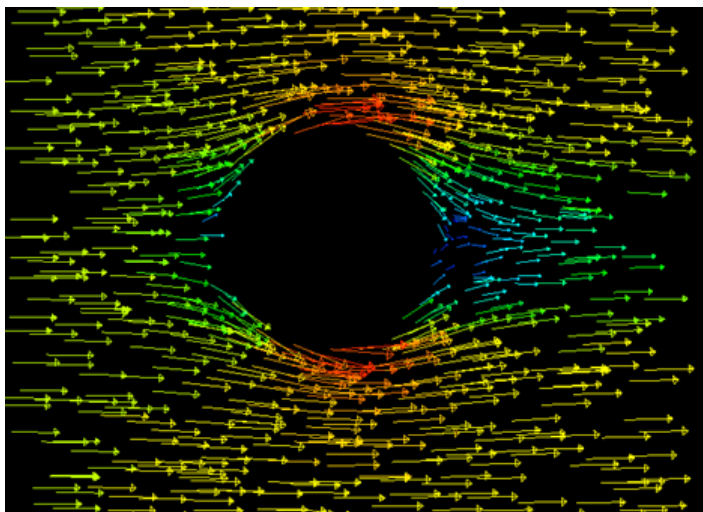
El mismo análisis con el túnel de viento digital que se hizo con la carrocería se realiza con la esfera de 1m de diámetro utilizando el software FLUENT, obteniendo luego de las iteraciones el  $C_D$  de 0.22924.

Cuadro 4. Últimas iteraciones de resultados obtenidos en FLUENT para la esfera.

983	1.6662e-05	6.5428e-08	6.5895e-08	1.2762e-07	5.8623e-04	3.3230e-04	-3.0547e-04	7.9692e-04	2.2924e-01	0:00:01	17
984	1.5773e-05	6.4195e-08	6.4672e-08	1.2730e-07	5.8485e-04	3.3117e-04	-3.0540e-04	7.9766e-04	2.2924e-01	0:00:04	16
985	1.5577e-05	6.2790e-08	6.3412e-08	1.2564e-07	5.8623e-04	3.3230e-04	-3.0547e-04	7.9696e-04	2.2924e-01	0:00:03	15
986	1.5354e-05	6.1476e-08	6.2250e-08	1.2470e-07	5.8488e-04	3.3129e-04	-3.0540e-04	7.9771e-04	2.2924e-01	0:00:02	14
987	1.5048e-05	5.9989e-08	6.1111e-08	1.2269e-07	5.8628e-04	3.3248e-04	-3.0547e-04	7.9690e-04	2.2924e-01	0:00:02	13
988	1.4744e-05	5.8555e-08	5.9905e-08	1.2180e-07	5.8496e-04	3.3141e-04	-3.0540e-04	7.9764e-04	2.2924e-01	0:00:01	12
989	1.4453e-05	5.6938e-08	5.8666e-08	1.1979e-07	5.8639e-04	3.3260e-04	-3.0546e-04	7.9683e-04	2.2924e-01	0:00:03	11
990	1.4155e-05	5.5612e-08	5.7667e-08	1.1839e-07	5.8510e-04	3.3156e-04	-3.0539e-04	7.9746e-04	2.2924e-01	0:00:02	10
iter	continuity	u-velocity	v-velocity	w-velocity	k	epsilon	Omega-1	Omega-2	Omega-3	time/iter	
991	1.3854e-05	5.4407e-08	5.6425e-08	1.1710e-07	5.8655e-04	3.3273e-04	-3.0546e-04	7.9665e-04	2.2924e-01	0:00:02	9
992	1.3688e-05	5.2753e-08	5.5229e-08	1.1562e-07	5.8526e-04	3.3170e-04	-3.0539e-04	7.9741e-04	2.2924e-01	0:00:01	8
993	1.3373e-05	5.1283e-08	5.4185e-08	1.1381e-07	5.8670e-04	3.3283e-04	-3.0545e-04	7.9650e-04	2.2924e-01	0:00:01	7
994	1.3080e-05	5.0030e-08	5.3046e-08	1.1200e-07	5.8541e-04	3.3178e-04	-3.0538e-04	7.9728e-04	2.2924e-01	0:00:02	6
995	1.2812e-05	4.8928e-08	5.1994e-08	1.1013e-07	5.8681e-04	3.3290e-04	-3.0545e-04	7.9650e-04	2.2924e-01	0:00:01	5
996	1.2627e-05	4.8162e-08	5.1139e-08	1.0759e-07	5.8551e-04	3.3180e-04	-3.0538e-04	7.9712e-04	2.2924e-01	0:00:01	4
997	1.2378e-05	4.7492e-08	5.0191e-08	1.0511e-07	5.8688e-04	3.3280e-04	-3.0540e-04	7.9629e-04	2.2924e-01	0:00:00	3
998	1.2306e-05	4.7486e-08	4.9279e-08	1.0500e-07	5.8558e-04	3.3177e-04	-3.0538e-04	7.9696e-04	2.2924e-01	0:00:01	2
999	1.2129e-05	4.7236e-08	4.8445e-08	1.0446e-07	5.8688e-04	3.3283e-04	-3.0540e-04	7.9623e-04	2.2924e-01	0:00:00	1
Writing "1" zip -ref > C:\Users\ara1019\Downloads\Aerodinamica-actualizado-corregido (2)\Aerodinamica-actualizado-corregido\Aerodinamica\AERO III FINAL\AERO III\Chasis FS\Chasis FS											
Writing temporary file C:\Users\ara1019\AppData\Local\Temp\flntgz-494814 ...											
Done.											
1000	1.2144e-05	4.7185e-08	4.7737e-08	1.0357e-07	5.8558e-04	3.3168e-04	-3.0537e-04	7.9687e-04	2.2924e-01	0:00:00	0

Fuente: Elaboración propia.

Figura 60. Vectores de velocidad del aire alrededor de la esfera.



Fuente: Elaboración propia.

Los datos de  $C_D$  obtenidos en FLUENT se comparan con los datos de  $C_D$  teórico por medio del cálculo del porcentaje de error, obteniendo un error de 6.59% entre los datos del software y los datos teóricos lo que significa que los datos obtenidos para la carrocería en el software FLUENT solamente tendrán un 6.59% de error. Esto es muy favorable, pues el  $C_D$  de la carrocería estaría en un rango de  $C_D = 0.70794 \pm 0.04665$ , es decir que el  $C_{Dmax} = 0.75459$  y el  $C_{Dmin} = 0.66128$ , lo cual sigue encontrándose por debajo de 0.9, por lo que se sigue cumpliendo con el objetivo principal.

## F. Prueba estructural punta

La punta es la sección que experimenta la mayor presión de toda la carrocería según los datos obtenidos en FLUENT, siendo esta de 566 Pa. Por esta razón se realizó un análisis estructural a esta sección de la carrocería, para poder comprobar de esta forma si la fibra de vidrio tenía suficiente rigidez estructural si esta se proponía de 3 mm de espesor.

Para este análisis se programó el material en ANSYS para que este fuera la fibra de vidrio clase E, que es la de mayor comercialización en Guatemala y la que se utilizará para la fabricación de la carrocería, basado en los datos de (Bangherpour, 2005).

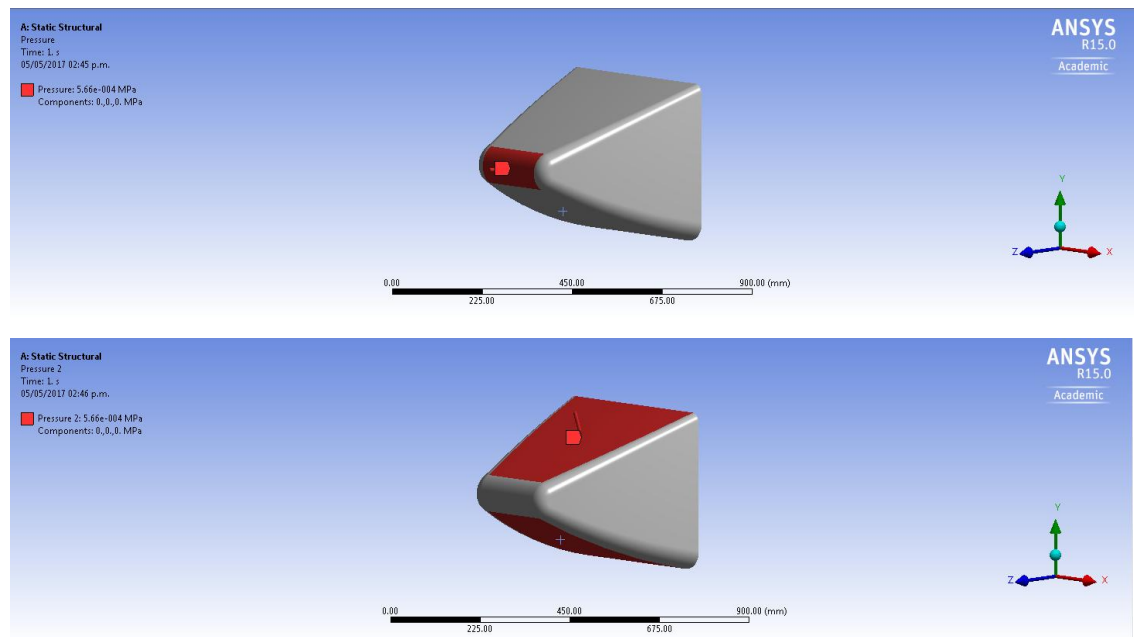
Cuadro 5. Datos de la fibra de vidrio ingresados en ANSYS.

Properties of Outline Row 3: Fibra de Vidrio				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	2.58	g cm <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus and...		
5	Young's Modulus	7.23E+10	Pa	
6	Poisson's Ratio	0.22		
7	Bulk Modulus	4.3036E+10	Pa	
8	Shear Modulus	2.9631E+10	Pa	

Fuente: Elaboración propia.

La punta se ingresó en ANSYS, se le realizó el mallado y se aplicó la presión que esta iba a experimentar, tanto en la parte frontal como en la superior e inferior.

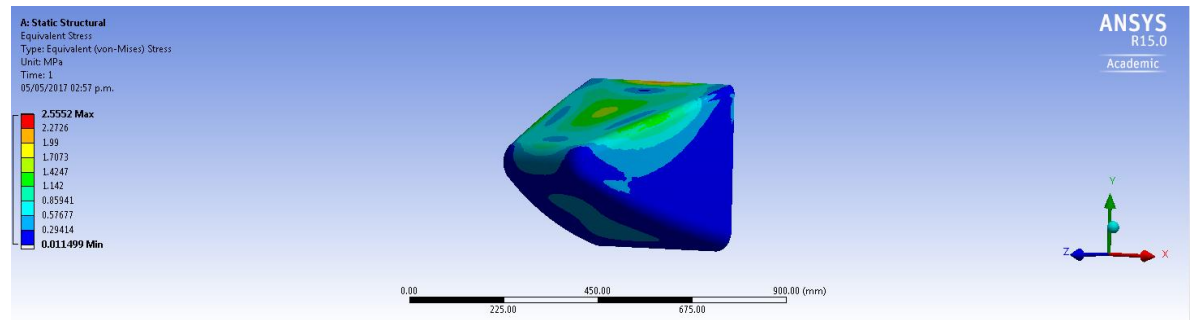
Figura 61. Punta de la carrocería en ANSYS con la presión que experimenta.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos en ANSYS, el esfuerzo de tensión máximo en la punta es de 2.5552 MPa, lo cual es insignificante comparado con el esfuerzo último de tensión de la fibra de vidrio de 3445 MPa, de (Bangherpour, 2005).

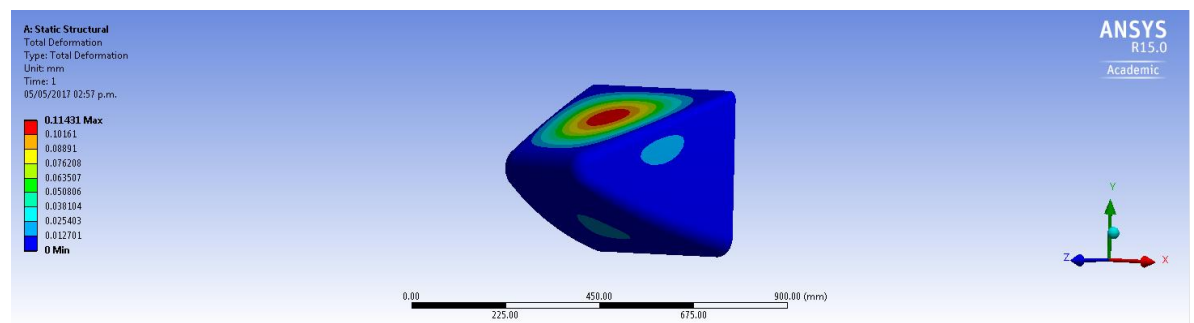
Figura 62. Esfuerzo de tensión en la punta de la carrocería.



Fuente: Elaboración propia.

Esto se comprueba de igual manera con la deformación total que experimenta la punta, siendo el máximo de esta de 0.11431 mm, de acuerdo a los resultados obtenidos en ANSYS, lo que es una deformación totalmente insignificante.

Figura 63. Deformación en la punta de la carrocería.



Fuente: Elaboración propia.

## VIII. CONCLUSIONES

- La carrocería tipo fórmula diseñada optimiza la eficiencia aerodinámica del vehículo Fórmula SAE con un coeficiente de resistencia aerodinámica de  $0.70794 \pm 0.04665$ , manteniéndose de esta forma por debajo de 0.9, pues en todas sus geometrías se utilizaron principios básicos de la aerodinámica automotriz para su diseño. Además, el análisis del diseño realizado en el túnel de viento digital en FLUENT ayudó a la mejora del mismo, mitigando turbulencias en el flujo de aire y evitando flujos indeseados hacia el habitáculo del piloto.
- El diseño de la carrocería del vehículo Fórmula SAE se ajusta al diseño del chasis, siendo a su vez totalmente paramétrico en sus geometrías hasta la generación de sus superficies, ya que después de realizada cualquier función de modelado en 3D, el diseño ya no es paramétrico y es necesario regresar a las superficies obtenidas de los bosquejos en 2D.
- La carrocería diseñada para el vehículo tipo fórmula permite al mismo alcanzar velocidades mayores a 120 km/h, pues su coeficiente de resistencia aerodinámica es bastante bajo y no representa grandes consumos de potencia al motor del vehículo.
- Los planos elaborados del diseño final de la carrocería permiten su fabricación y el seccionamiento de la misma de una manera detallada. Estos se encuentran en el ANEXO 5. El juego de planos que se elaboró consiste de 10 hojas, las cuales muestran la geometría resultante de la carrocería, la cual permite la fabricación y el seccionamiento adecuado de todas las partes que conforman la carrocería del vehículo Fórmula SAE. Éstas están conformadas por la aerodinámica externa, que son las secciones que cubren el habitáculo del piloto; y la aerodinámica externa, conformada por las tomas de aire laterales, las cuales se encargan de la refrigeración y, por consiguiente, la optimización del rendimiento del motor.

## IX. RECOMENDACIONES

- Para trabajar la fibra de vidrio, material del que se fabricará la carrocería, existen diferentes técnicas, pero se recomienda que para la fabricación de esta se utilice la técnica propuesta por (Jacobson, 2012), pues ésta es la técnica más utilizada en el área automotriz, ya que con ella se obtienen piezas que son tanto ligeras como rígidas y se apegan de una forma muy precisa a la geometría de diseño. (vid. ANEXO 1: Fabricación de la Carrocería)
- Se recomienda que el modelo sea seccionado, para su fabricación, después de que el modelo cuente con todas las secciones unidas; pues, al seccionarlas de esta manera, se asegura que cada sección encajará con las otras minimizando la luz entre ellas; apeándose así al proceso de fabricación de carrocerías de carros de carreras de (Jacobson, 2012). (vid. ANEXO 2: Cortes de la Carrocería)
- De acuerdo a las reglas establecidas en (SAE, 2016), ver Cuadro 2, la carrocería no debe tener agujeros desde la punta hasta el habitáculo del piloto, a menos que estos sean para la suspensión frontal. Por lo mismo, estos deben ser lo más pequeños posible, razón por la cual se recomienda que éstos se realicen al final de la fabricación de la carrocería, pues de ésta forma se puede probar, teniendo ya la suspensión fabricada, cuanto es el mínimo necesario para los agujeros de la suspensión frontal; evitando así no cumplir con el reglamento y/o que la suspensión tope con la carrocería. (vid. ANEXO 3: Agujeros de la Carrocería)
- Se recomienda que para unir las secciones como el capó y el piso a la carrocería se utilicen Toggle Latch Fasteners, comúnmente utilizados en aeronaves, pues estos ajustan bien las piezas, no afectan la geometría de la carrocería del vehículo ni le agregan demasiado peso y permiten que éstas se puedan remover fácilmente también. Los agujeros y el posicionamiento de los mismos se recomienda al final de la fabricación de la carrocería según el proceso de fabricación de (Jacobson, 2012), pues de esta manera se asegura su buen posicionamiento. (vid. ANEXO 3: Agujeros de la Carrocería)
- Los Dzus Fasteners son recomendados para unir la carrocería al chasis, pues éstos mismos son utilizados en aeronaves para cumplir esta misma función. Al igual que los Toggle Latch Fasteners, los agujeros para estos se recomienda hacerlos al final del proceso de fabricación. (vid. ANEXO 3: Agujeros de la Carrocería)

- Los difusores en los vehículos de carreras sirven para direccionar el aire y así mitigar las turbulencias. Por lo tanto, se recomienda realizar un difusor para la parte trasera del vehículo, pues esto terminaría de mitigar las turbulencias en su parte trasera. Esto se debe realizar cuando todo el carro ya esté construido, pues de acuerdo al reglamento (SAE, 2016), ver Cuadro 2, ningún artefacto aerodinámico debe de tocar la superficie del suelo. Por lo que, hay que construirlo cuando la altura del vehículo sea la definitiva. Para su fabricación en fibra de vidrio, igualmente seguir el proceso propuesto por (Jacobson, 2012). (vid. ANEXO 1: Fabricación de la Carrocería).
- Después de fabricada la carrocería del vehículo Fórmula SAE se recomienda guardar los moldes, pues estos pueden reutilizarse en caso se necesite un repuesto de alguna de las secciones del vehículo o de la carrocería completa. Los moldes, si no se dañan en el proceso, se pueden utilizar varias veces.
- Se recomienda utilizar pintura de poliuretano para pintar la carrocería del vehículo, pues esta le da un acabado liso el cual se puede pulir con cera y pasta de uso automotriz. Esto no solo hará que el vehículo se vea bien, también ayudará a la aerodinámica resultando en menor resistencia por fricción.

## X. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, J. d. (2006). *Diseño y Análisis para un Prototipo de Fórmula SAE*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Madrid.
- Arteaga, O., Mena, S., Caiza, V., & Vilaña, J. (2015). *Diseño, Simulación, Optimización y Construcción de una Carrocería de un Vehículo Tipo Fórmula SAE*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga.
- Bangherpour, S. (2005). *Fibre Reinforced Polyester Composites*. Azad: Islamic Azad University.
- Blade, B. (2013). *Big Fiberglass Project - BLADE XTR*. Fort Worth.
- Cengel, Y. (2014). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.
- Cumberford, R. (2013). *"Don't Build That Fiberglass Body" - Part 1*. Tampa: Car and Driver 1962.
- Díaz, J. M. (2015). *Aerodinámica 1: Principios Básicos*. Car and Driver The F1.
- Díaz, J. M. (2015). *Aerodinámica 2: En Busca de la Eficiencia*. Car and Driver The F1.
- Díaz, J. M. (2015). *Aerodinámica 3: Análisis de la Capa Límite y el Efecto Coanda*. Car and Driver The F1.
- Díaz, J. M. (2016). *Aerodinámica: Evolucionar o Morir (Parte 1)*. Car and Driver The F1.
- Gebhard, I. J. (2001). *Aerodinámica*. SAE Automotive Engineering International.
- González, B. A. (2016). *Estudio Computacional y Experimental de la Aerodinámica de un Monoplaza Tipo Fórmula SAE*. Universidad de Cantabria, Santander.
- Hetawal, S., Gophane, M., B.K., A., & Mukkamala, Y. (2014). *Aerodynamic Study of Formula SAE Car*. Tamilnadu.
- Hirz, M., & Stadler, S. (2014). *Variable trailer design drastically cuts aerodynamic drag*. SAE Articles .
- Jacobson, C. (2012). *Racecar bodies, from initial rendering through serial production*. Perform Resources.
- Kojima, M. (2010). *Basic Aerodynamics: Part One - What is Aerodynamics?*
- Lanfrit, M. (2005). *Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT*. Darmstadt: Fluent Deutschland GmbH.

- Mayo, F. (2014). *Cómo Construir un Molde Hembra Partido*. México D.F.: Full Mecánica.
- McBeath, S. (2006). *Aerodinámica del Automóvil de Competición*. Haynes Publishing.
- Morrison, F. A. (2013). *Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere*. Houghton: Michigan Technological University.
- Pauta Solano, J. F., & Sanchez Ramírez, M. L. (2014). *Diseño y Construcción de la Carrocería de una Vehículo de Competencia Tipo Fórmula SAE*. Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana.
- Riva, I. d. (2011). *Aerodinámica*. Universidad Politécnica de Madrid, Laboratorio de Aerodinámica E.T.S.I. Aeronáuticos, Madrid.
- Sacco, C., & Giuglioloni, F. (2006). Análisis de la Aerodinámica de un Automóvil de Competición. En A. Cardona, N. Nigro, V. Sonzogni, & M. Storti, *Mecánica Computacional* (Vol. XXV, págs. 83-94). Santa Fe, Argentina.
- SAE, 2.-2. F. (2016). *FSAE International*. Recuperado el 13 de Noviembre de 2016, de <http://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20FSAE%20Rules%20PRELIMINARY.pdf>
- Seibon. (2013). *How to Install Aerocatch Hood Pins on Your Seibon Carbon Hood*. Seibon.
- Wordley, S., & Saunders, J. (2006). *Aerodynamics for Formula SAE: Initial design and performance prediction*. Clayton: SAE International.
- Zitnik, J. (2000). *Aerodinámica*. Manual de Vuelo.

## **XI. ANEXOS**

### **ANEXO 1: Fabricación de la carrocería**

La carrocería del vehículo Fórmula SAE se fabricará en fibra de vidrio. El proceso de su fabricación está conformado por tres partes fundamentales: el contra-molde, el molde y la pieza final, es decir, la carrocería.

#### **Materiales**

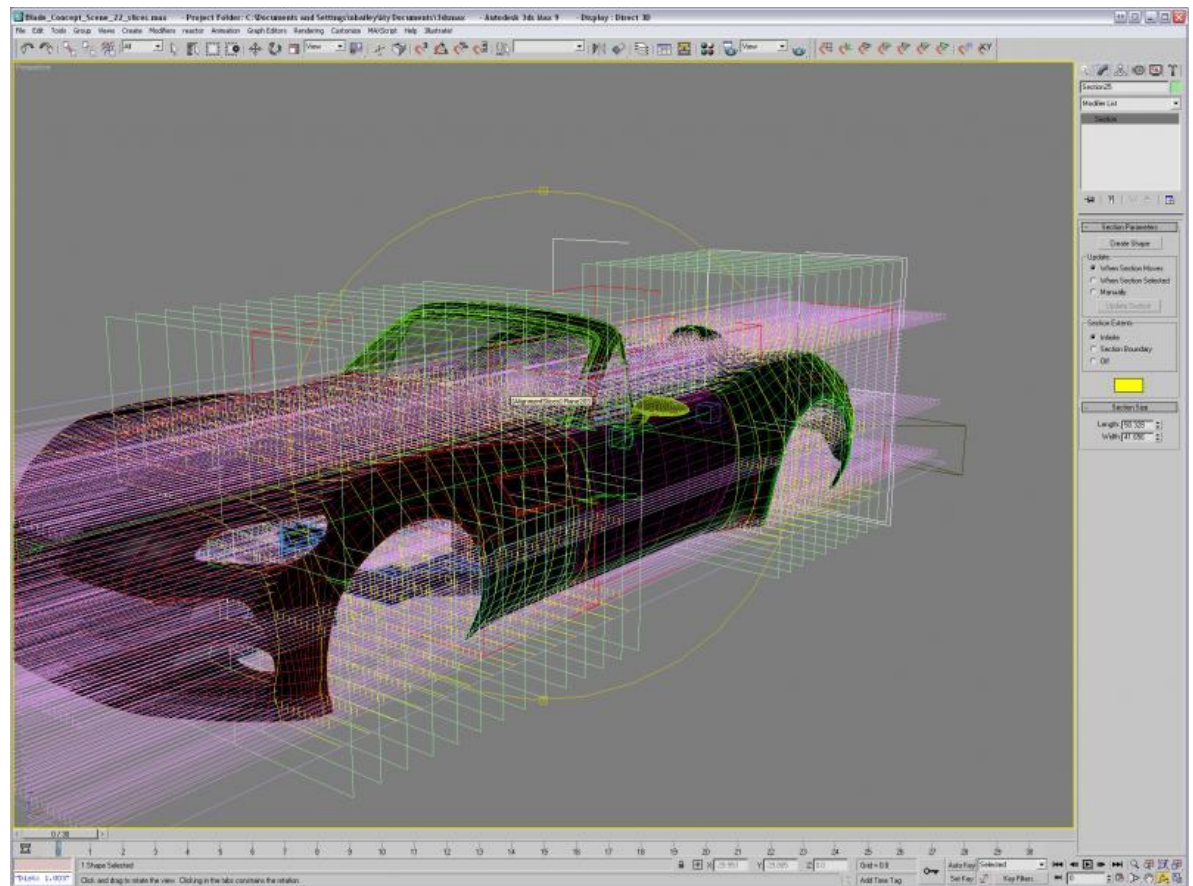
- Cartón
- Duroport
- Pegamento
- Brochas
- Pernos con tuerca y arandelas
- Fibra de vidrio
- Resina y secante (catalizador)
- Gel Coat
- Mascarilla
- Guantes de latex
- Lijas
- Planos de la carrocería impresos a escala 1:1
- Papel aluminio
- Tape de empacador

#### **Contra-molde**

Primero es necesario fabricar el contra-molde. Este debe de tener el acabado más fino posible, pues es cómo quedará la pieza final, por lo que debe de dedicársele todo el tiempo y refinado que sea necesario.

Para empezar el contra-molde es necesario seccionar la carrocería en secciones muy pequeñas, siendo cada una de éstas del mismo grosor que el de una plancha de duroport y el grosor del cartón juntos. Esto se realiza de una manera sencilla haciendo planos en Inventor y proyectando sobre ellos la geometría de la carrocería.

Carrocería seccionada.



Fuente: (Blade, 2013) [28/04/2017]

Cada uno de estos planos de la carrocería con la geometría proyectada deberá imprimirse a una escala de 1:1, es decir a escala real, para luego pegarlo en el cartón y recortar este con la geometría de

la carrocería. Se recomienda también agregar un plano que corte la carrocería completa por el medio de forma vertical y hacer lo mismo en este.

Secciones con la geometría de la carrocería en cartón.



Fuente: (Blade, 2013) [28/04/2017]

Estos cartones con la geometría de la carrocería deben pegarse a planchas de duroport, las cuales igualmente se cortan, pero esta vez dejando un margen de 1 a 2 cm en todo su contorno. El orden de cada una de estas piezas es importante, pues estas luego se pegan para obtener una geometría muy cercana a la carrocería.

Carrocería formada por secciones de cartón y duroport.



Fuente: (Blade, 2013) [28/04/2017]

Ahora, utilizando siempre una mascarilla y protección visual, es necesario lijar todo el duroport hasta que este esté a la misma altura de los cartones y siga la misma forma de los mismos, logrando así darle al duroport la forma de la carrocería. Es muy importante tomar en cuenta que en este paso debe de dársele el mejor acabado posible al duroport, pues, así como quede el contra-molde será el resultado final, por lo tanto, se recomienda tomarse todo el tiempo necesario para realizar este paso y que la carrocería quede lo más refinada posible.

Al tener el contra-molde con la forma final de la carrocería, es necesario dividirla horizontalmente por la mitad, pues el molde consta de dos secciones, la inferior y la superior, para obtener así la carrocería completa.

Lo siguiente consiste en recubrir el contra-molde de duroport ya sea con papel aluminio, tape de aluminio y/o tape de empacador, pues esto protege al duroport de la resina ya que esta lo daña y lo deshace. Después de haber recubierto la carrocería es necesaria la aplicación gel coat, para que la fibra de vidrio se despegue del contra-molde más fácilmente.

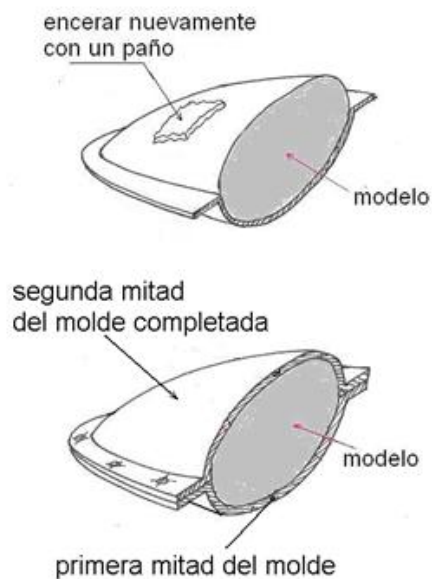
Aplicación de gel coat.



Fuente: (Mayo, 2014) [28/04/2017]

El gel coat se debe encerar después de su aplicación como si se estuviera puliendo un vehículo.

Encerado y molde con contra-molde en su interior.

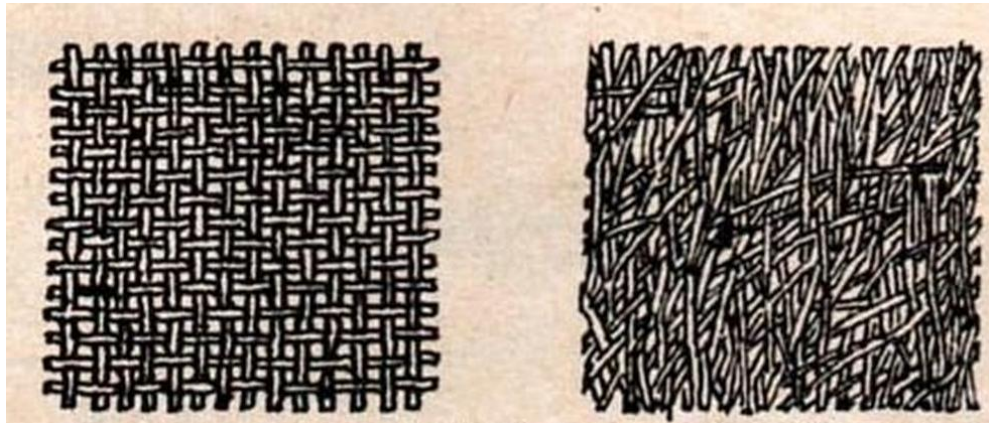


Fuente: (Mayo, 2014) [28/04/2017]

## Molde

La fabricación del molde consiste en aplicar fibra de vidrio al contra-molde en ambas secciones, la inferior y la superior. Para esto es recomendable siempre utilizar guantes de latex, protección visual y una mascarilla. Antes de empezar, se recomienda tener todo el material preparado, es decir, la fibra de vidrio lista, pues es muy difícil su manejo cuando se está aplicando la resina. La primera capa de fibra de vidrio se debe de aplicar de la fibra más fina o fibra de tapete, para que esta tome la forma de la carrocería, luego se deben aplicar dos o tres capas de fibra de vidrio común para darle un mayor grosor y que este sea más rígido.

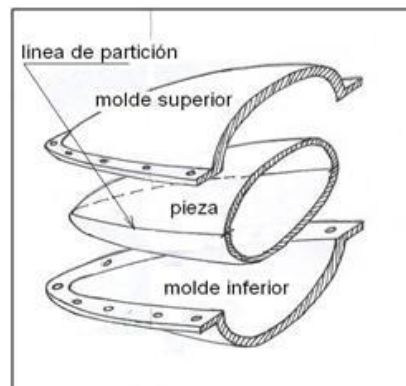
Fibra de vidrio fina (izquierda) y fibra de vidrio común (derecha).



Fuente: (Cumberford, 2013) [28/04/2017]

Se debe dejar curar por aproximadamente 24 horas. Luego se pueden separar ambas secciones del molde del contra-molde original.

Secciones inferior y superior del molde.



Fuente: (Mayo, 2014) [28/04/2017]

Ahora se deben de trabajar cada una de las secciones. Si la superficie interior del molde no es completamente lisa, se recomienda utilizar masilla para alisarla, lijando la misma con cada aplicación hasta conseguir una superficie totalmente lisa. Como se muestra en la figura anterior, la línea de partición de ambas secciones se debe de perforar, pues luego, cuando se quiera unir el molde para obtener la carrocería completa, se debe de pasar pernos con sus respectivas tuercas y arandelas a través de estas perforaciones, para que así la carrocería se pueda curar unida y la unión de la parte inferior y superior sea uniforme a lo largo de toda la pieza final y esta sea una sola pieza completa y no esté seccionada.

Al igual que el contra-molde, se debe de aplicar gel coat al molde para que así la fibra de vidrio de la pieza final no se una al molde.

### **Pieza final (Carrocería)**

La pieza final se obtiene aplicando fibra de vidrio y resina a la parte interna de ambas secciones del molde. Las orillas de la línea de partición entre la parte inferior y superior del molde se deben de enfibrar de último, pues cuando la resina siga fresca, se deben de unir ambas partes apretando bien los pernos y dejando curar por aproximadamente 24 horas antes de retirar el molde.

Al obtener la pieza final se puede proceder a realizarle los cortes necesarios como lo son los del habitáculo del piloto, el capó y el piso. De ser necesario alisar o refinar la pieza final previo a su pintado, esto se debe realizar con masilla. El último paso es pintar la carrocería con pintura automotriz de poliuretano.

Pieza final: Ejemplo de carrocería fabricada en fibra de vidrio.



Fuente: (Jacobson, 2012) [28/04/2017]

## ANEXO 2: Cortes de la carrocería

La carrocería debe de fabricarse como una pieza completa, para que luego solamente sea necesario cortar de la misma las diferentes secciones que se deseen y que al intalarlas al chasis estas encajen con las demás piezas que la conforman sin luces entre ellas. (Jacobson, 2012)

Carrocería completa fabricada en fibra de vidrio sin cortes de seccionamiento.



Fuente: (Jacobson, 2012) [28/04/2017]

Para el proceso de corte de la carrocería se necesitan pocas herramientas, pues, por su grosor, lo más recomendable para realizar los cortes es utilizar un Dremmel con un disco de corte; pues una pulidora haría el trabajo en menos tiempo, pero el grosor de su disco de corte quitaría material en exceso y esto crearía luces entre las diferentes secciones. Teniendo la carrocería completa, solamente es necesario marcar los cortes que se harán con un marcador permanente y luego delimitar el área de

corte con masking tape, de esta forma no se perderá la línea bajo el polvo que se genere a la hora de cortar. (Jacobson, 2012)

Siempre que se trabaje fibra de vidrio, y sobre todo cuando esta se corta, deben utilizarse todo el tiempo guantes de latex, protección visual y una mascarilla.

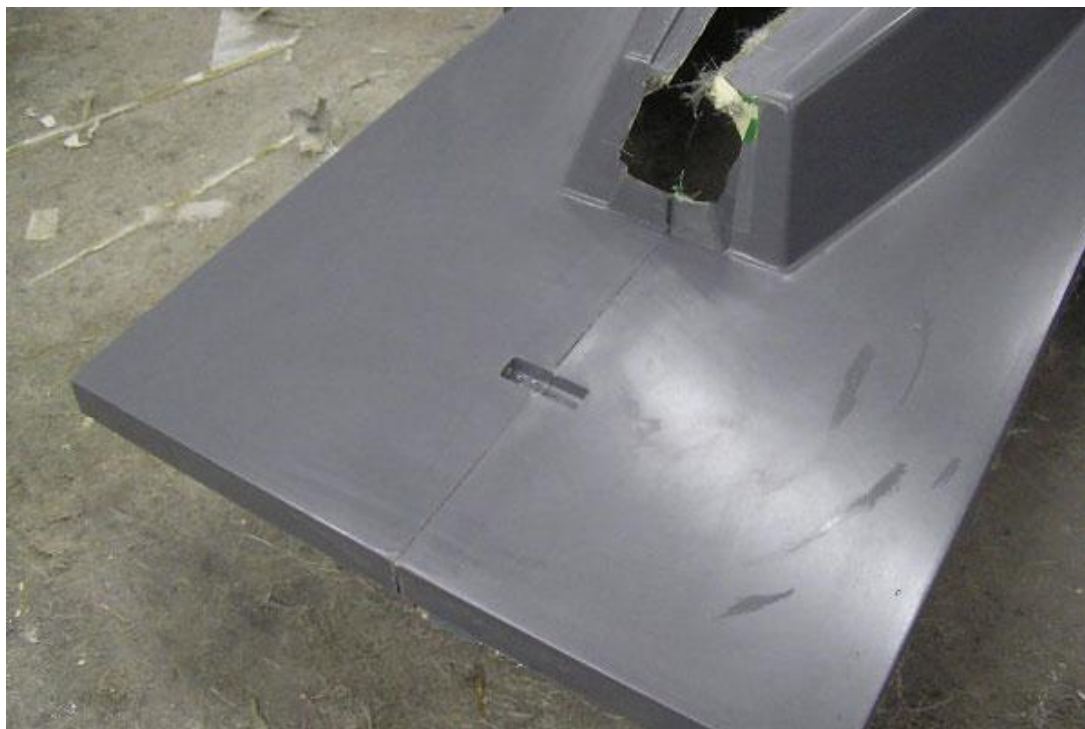
Ejemplo de corte en carrocería de fibra de vidrio.



Fuente: (Jacobson, 2012) [28/04/2017]

Los cortes deben de ser limpios y continuos, por lo que se recomienda tomarse el tiempo necesario para realizarlos y siempre tener cerca discos de corte de repuesto, y en caso el disco ya se encuentre muy desgastado, siempre es recomendable cambiarlo previo a empezar el corte. (Jacobson, 2012)

Ejemplo de corte en carrocería de fibra de vidrio.



Fuente: (Jacobson, 2012) [28/04/2017]

La fibra de vidrio es un excelente material, pues en caso de que se haya realizado un corte indeseado o este no se haya hecho como uno lo tenía planeado, este siempre se puede reparar con una simple aplicación de fibra de vidrio y resina, aunque habrá que esperar a que esta vuelva a secar para poder realizar el corte de nuevo, pero por lo menos la pieza no se hechará a perder. (Jacobson, 2012)

Instalación de sección cortada en la parte frontal sin luces ni separaciones utilizando Toggle Latch Fasteners.



Fuente: (Jacobson, 2012) [28/04/2017]

### **ANEXO 3: Agujeros de la carrocería**

Los agujeros de la carrocería se deben de abrir de acuerdo a la técnica establecida por (Seibon, 2013), la cual consta de cuatro simples pasos, los cuales se muestran a continuación. No se debe de olvidar nunca que para trabajar fibra de vidrio siempre es necesario utilizar guantes de latex, protección visual y una mascarilla.

El primer paso es marcar los agujeros en las orillas de los mismos en las platinas con pintura, la cual debe estar fresca para marcar donde se necesitan los agujeros en la carrocería. (Seibon, 2013)

Aplicación de pintura sobre pieza del chasis que se desea marcar en la pieza de fibra de vidrio.



Fuente: (Seibon, 2013) [28/04/2017]

Luego, se instala la carrocería sobre el chasis, haciendo un poco de presión sobre los puntos que se desean marcar. Estos quedarán marcados por la pintura fresca en la parte interior de la carrocería, por lo que serán muy fáciles de ver. En caso no se haya marcado en donde se deseaba se puede limpiar la pintura con thinner y volver a marcar o marcar de nuevo con pintura de otro color. (Seibon, 2013)

Pieza de fibra que se presiona contra la pintura en la pieza del chasis.



Fuente: (Seibon, 2013) [28/04/2017]

A continuación se marcan los centros con un puntero y luego con una broca pequeña, es decir, más pequeña que la broca que se vaya a utilizar para realizar el agujero final. Aquí se puede instalar de nuevo la pieza para probar si el agujero ha quedado centrado donde se desea. (Seibon, 2013)

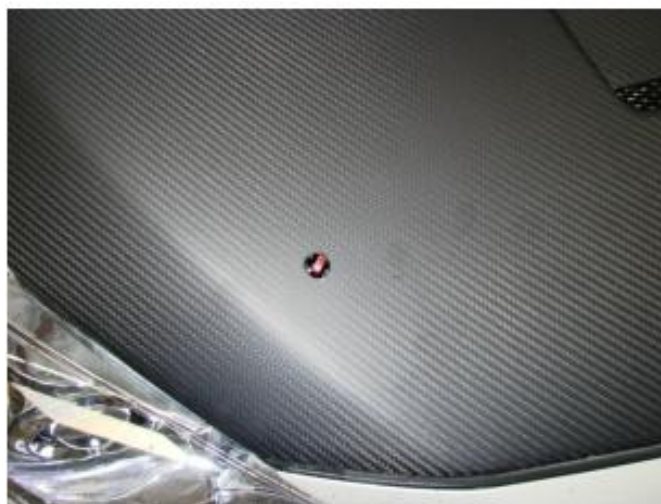
Abriendo el agujero en la parte interna de la pieza de fibra marcada por la pintura.



Fuente: (Seibon, 2013) [28/04/2017]

Por último se abre el agujero con la broca del tamaño final. (Seibon, 2013)

Agujero justo encima de la pieza del chasis que marcó con pintura la pieza de fibra.



Fuente: (Seibon, 2013) [28/04/2017]

## ANEXO 4: Cotizaciones

### Dzus Fasteners



Bryke Fasteners

### Self Ejecting QuarterTurn Buttons

\$19.99

Home / Quarter Turn Fasteners / Self Ejecting QuarterTurn Buttons



Marca: Bryke Racing

Cantidad: 5 Dzus Fasteners

Precio: \$.19.99

Link: <http://bryke.com/self-ejecting-quarterturn-buttons/>

## Toggle Latch Fasteners



Specification:

Product Name	Toggle Latch
Material	Metal
Color	Silver Tone
Total Size	5.5 x 3.6 x 1.1cm / 2.2" x 1.4" x 0.4" (L*W*H)
Mounting Hole Diameter	3mm / 0.12"
Hole Distance (Center to Center)	18mm / 0.7"
Weight	139g
Package Content	4 x Toggle Latch Set

Description:

- Straight Loop Catches Toggle Latches, with mounting holes.
- High strength catch and strike. Economical and compact size.
- Pull up ability, no secondary lock.
- Spring loaded with excellent tension, easy to install.

Marca: UXCELL

Cantidad: 4 Toggle Latch Fasteners

Precio: \$.6.99

Link: <http://www.uxcell.com/pcs-aviation-toolbox-silver-tone-straight-loop-toggle-latch-catches-p-540386.html>

### 4 Set Aviation Toolbox Silver Tone Straight Loop Toggle Latch Catches



Market Price: \$17.49    Our Price: hello **\$6.99**  
Model Number : a14021800ux0540

**Duroport****PLANCHA DUROPORT 4'x8'x 1/2"**

SKU#16884

MARCA:

MODELO: PLANDURO4X8X1/2

**Q35.00** / PLA

¡Sé el primero en evaluar este producto!

\* Requiere Inicio de sesión para poder calificar producto.

Cantidad: **DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO**

- MEDIDA: 4x8x1/2"



CONSTRUPOR, S. A.

CONSTRUPOR SOCIEDAD ANONIMA  
3a. Avenida 4-40, Zona 13 Guatemala, Guatemala  
Teléfono: (502) 2473-8875 al 79 FAX: (502) 2473-6264  
www.construpor.com.gt  
ventas@construpor.com.gt

COTIZACION

Nº 009411

Nombre: UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Dirección: 11 CALLE 15-79 ZONA 15 VISTA HERMOZA III  
E-mail: ars10190@uvg.edu.gt Fecha: 02/05/2017  
ATN: RENE ARAUJO Teléfono: 23640336 / 41540993

CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	C-469 PLANCHA CUBO 4 X 8 X 0.05	Q83.25	Q83.25
	<b>TOTAL</b>		<b>Q83.25</b>

**PRECIOS INCLUYEN IVA**  
**PRECIOS SUJETOS A CAMBIO**  
**NO SE ACEPTAN CAMBIOS, NI DEVOLUCIONES**

Precios puestos en: FABRICA

Forma de pago: CONTADO

Tiempo de entrega: A CONVENIR

**Bancos disponibles para depositar:**  
G&T Continental Monetarios 02-5001760-0  
Industrial Monetarios 006-009574-5

**A nombre de: CONSTRUPOR, S. A.**

CONSTRUPOR de la mano con el medio ambiente 

M.   
HUGO HERNANDEZ

Fibra de vidrio, resina y gel coat

**PESQUEROS DE GUATEMALA, S.A.**

**COTIZACION**

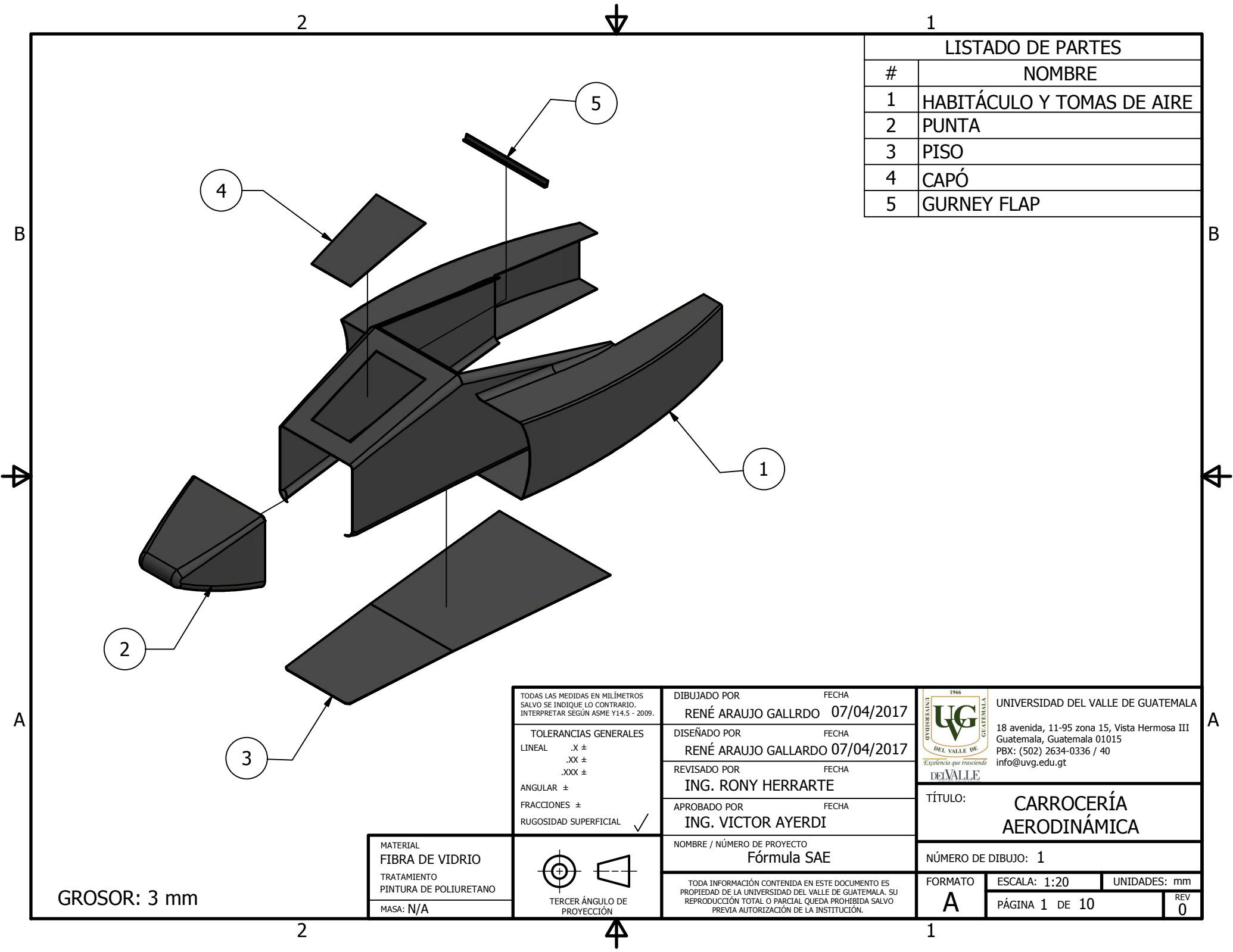
Agencia: (1) PESQUEROS - ZONA 9

<b>Ciente: (CF) RENE ARAUJO</b>	<b>Fecha</b>	<b>No.</b>
Direccion: Ciudad. - NIT.:CF	<b>02/May/2017</b>	<b>CVP 749.0</b>

<b>Código</b>	<b>Descripción del Producto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio/U. Q.</b>	<b>Sub-Total Q.</b>
15172	CERA DESMOLDANTE MGH-8 LATA	1	162.06	162.06
33004	RESINA POLIESTER 33004-00 PROCESO LENTO X GALON	1	95.00	95.00
15060	CATALIZADOR FRASCO DE 2 ONZ.	1	5.00	5.00
15022	FIBRA VIDRIO 1 1/2 ONZ X 37.4 BOLSA	1	26.00	26.00
15124	GELCOAT BLANCO AMERICANO GL	1	210.00	210.00
15070	PETATON 24 OZ BOLSA 2 YDAS CUADRIFICADA	1	50.00	50.00

**TOTAL Q. 548.06**

**ANEXO 5: Planos**



LISTADO DE PARTES	
#	NOMBRE
1	HABITÁCULO Y TOMAS DE AIRE
2	PUNTA
3	PISO
4	CAPÓ
5	GURNEY FLAP

TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES	
LINEAL	.X ±
	.XX ±
	.XXX ±
ANGULAR	±
FRACCIONES	±
RUGOSIDAD SUPERFICIAL	✓

DIBUJADO POR	FECHA
RENÉ ARAUJO GALLRDO	07/04/2017
DISEÑADO POR	FECHA
RENÉ ARAUJO GALLARDO	07/04/2017
REVISADO POR	FECHA
ING. RONY HERRARTE	
APROBADO POR	FECHA
ING. VICTOR AYERDI	
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO	
Fórmula SAE	

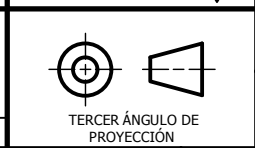
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
 Guatemala, Guatemala 01015  
 PBX: (502) 2634-0336 / 40  
 info@uvg.edu.gt

TÍTULO: **CARROCERÍA AERODINÁMICA**

NÚMERO DE DIBUJO: 1

FORMATO	ESCALA: 1:20	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 1 DE 10	REV 0

MATERIAL	FIBRA DE VIDRIO
TRATAMIENTO	PINTURA DE POLIURETANO
MASA:	N/A



GROSOR: 3 mm

2

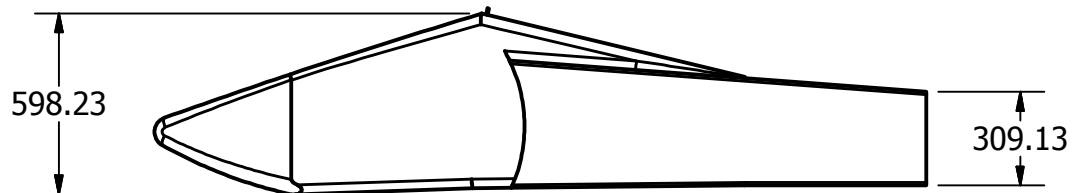
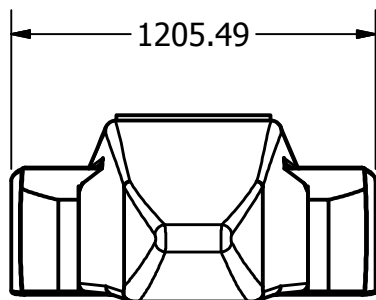
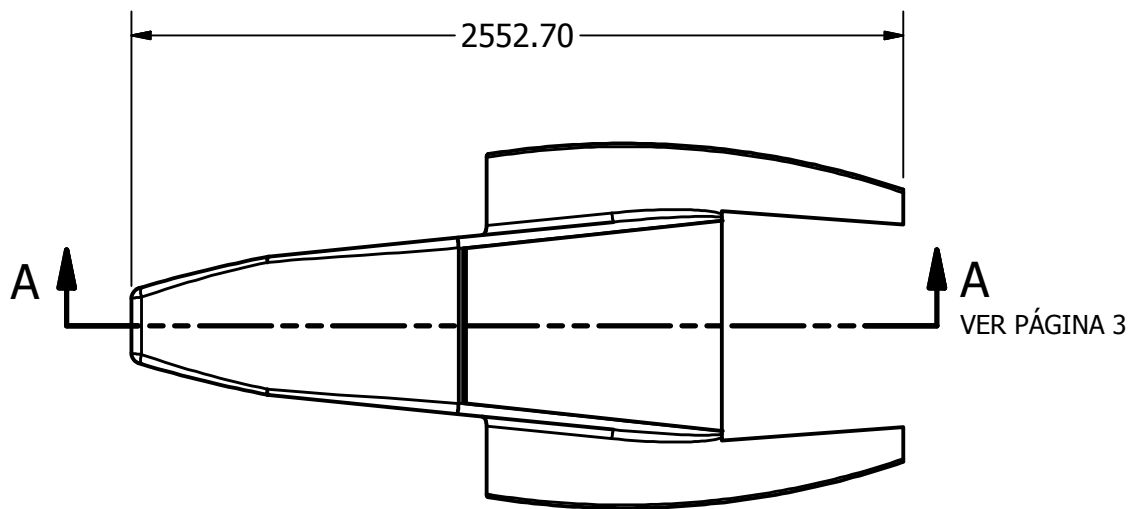
1

2

1

B

B



A

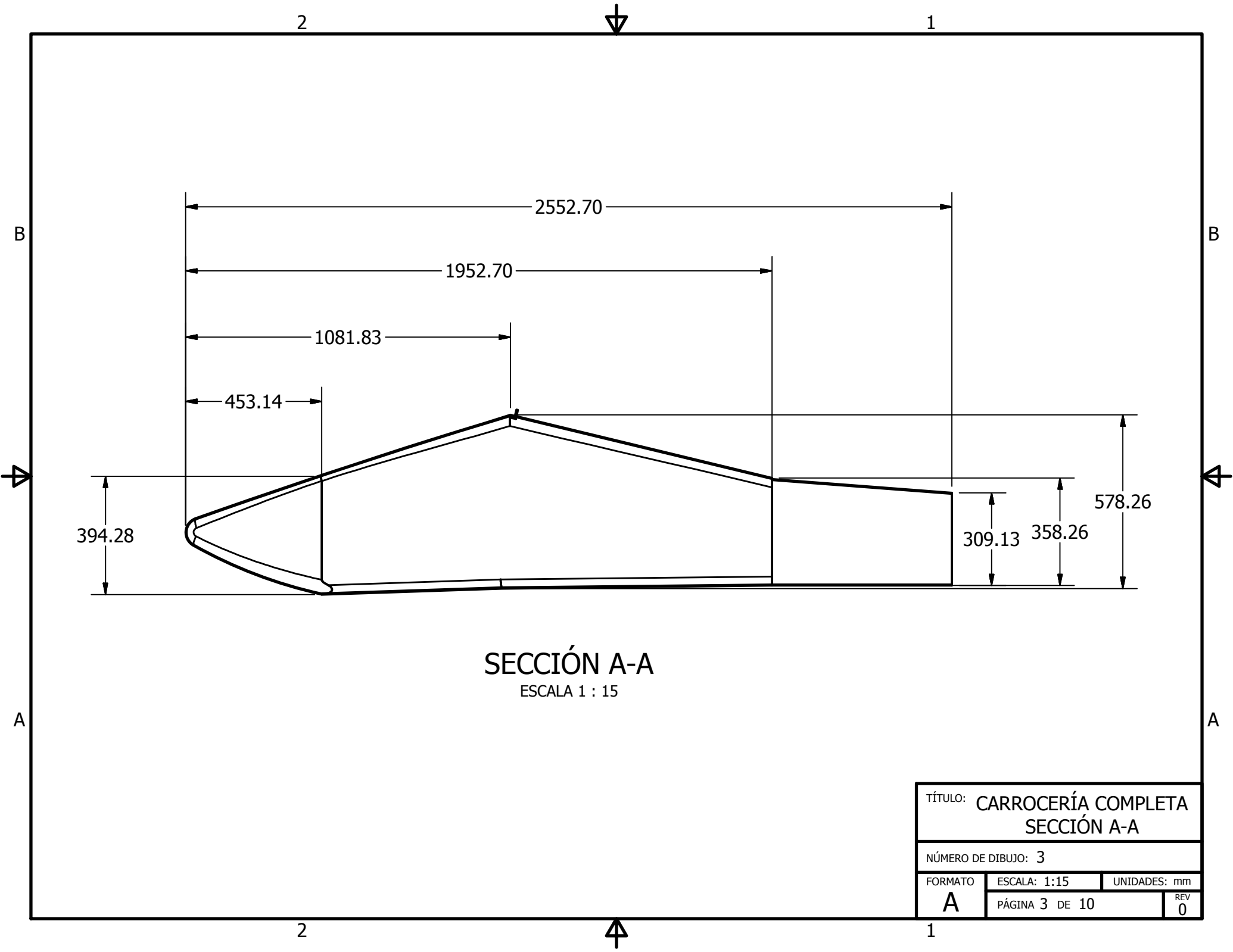
A

2

1

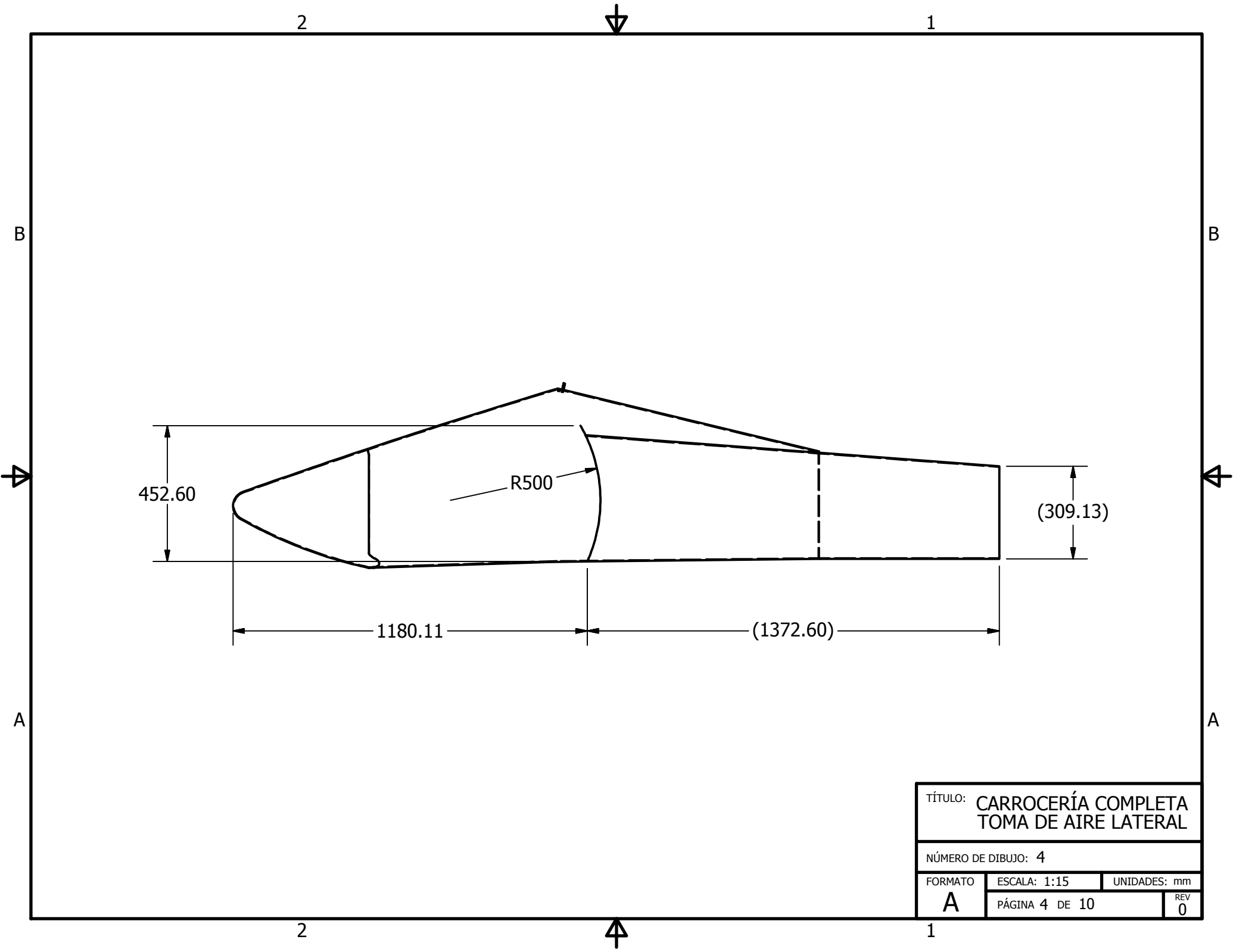
TÍTULO:				CARROCERÍA COMPLETA	
NÚMERO DE DIBUJO: 2					
FORMATO	ESCALA: 1:25	UNIDADES: mm			
<b>A</b>	PÁGINA 2 DE 10			REV	0

1

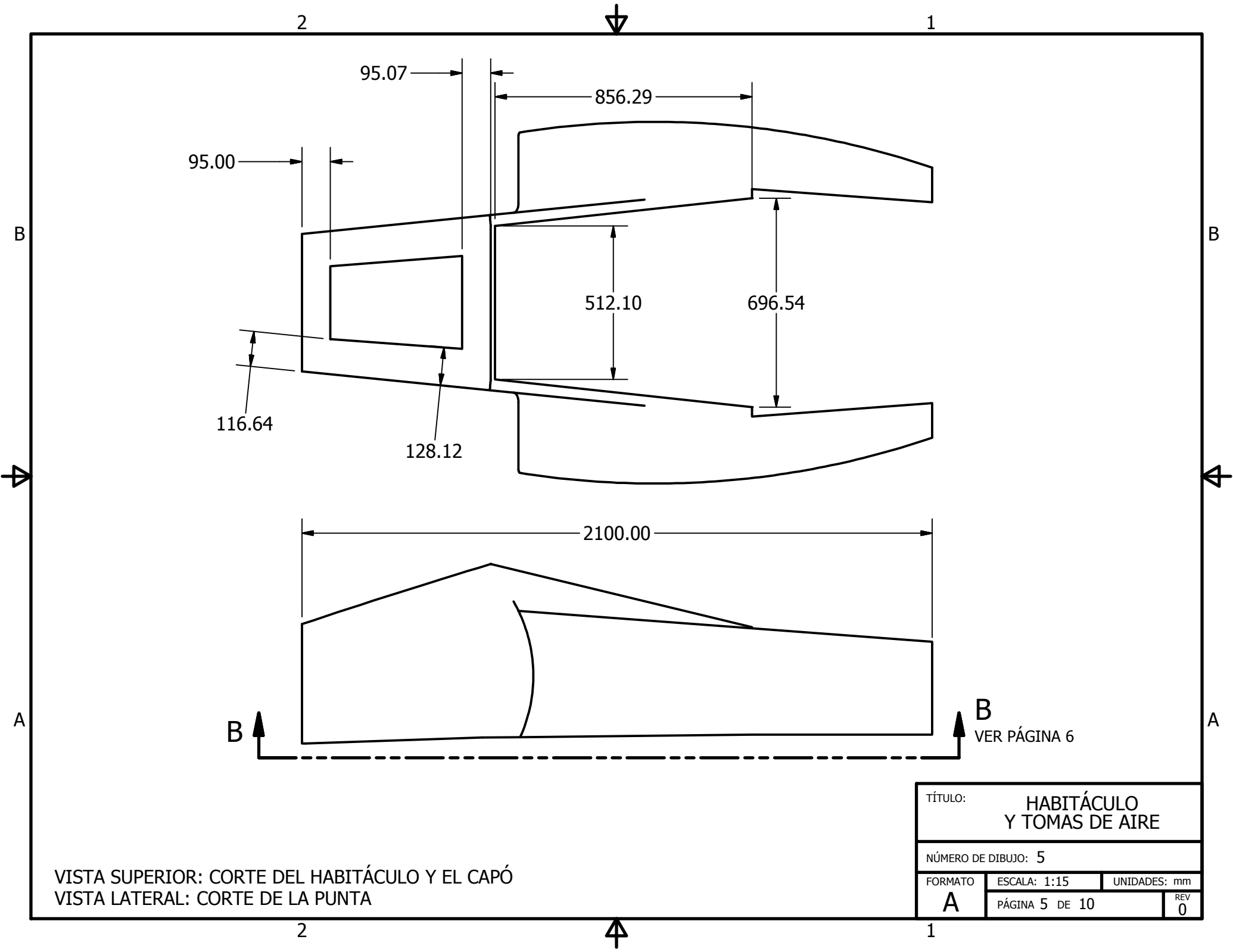


SECCIÓN A-A  
 ESCALA 1 : 15

TÍTULO: CARROCERÍA COMPLETA SECCIÓN A-A			
NÚMERO DE DIBUJO: 3			
FORMATO	ESCALA: 1:15	UNIDADES: mm	
<b>A</b>	PÁGINA 3 DE 10	REV 0	

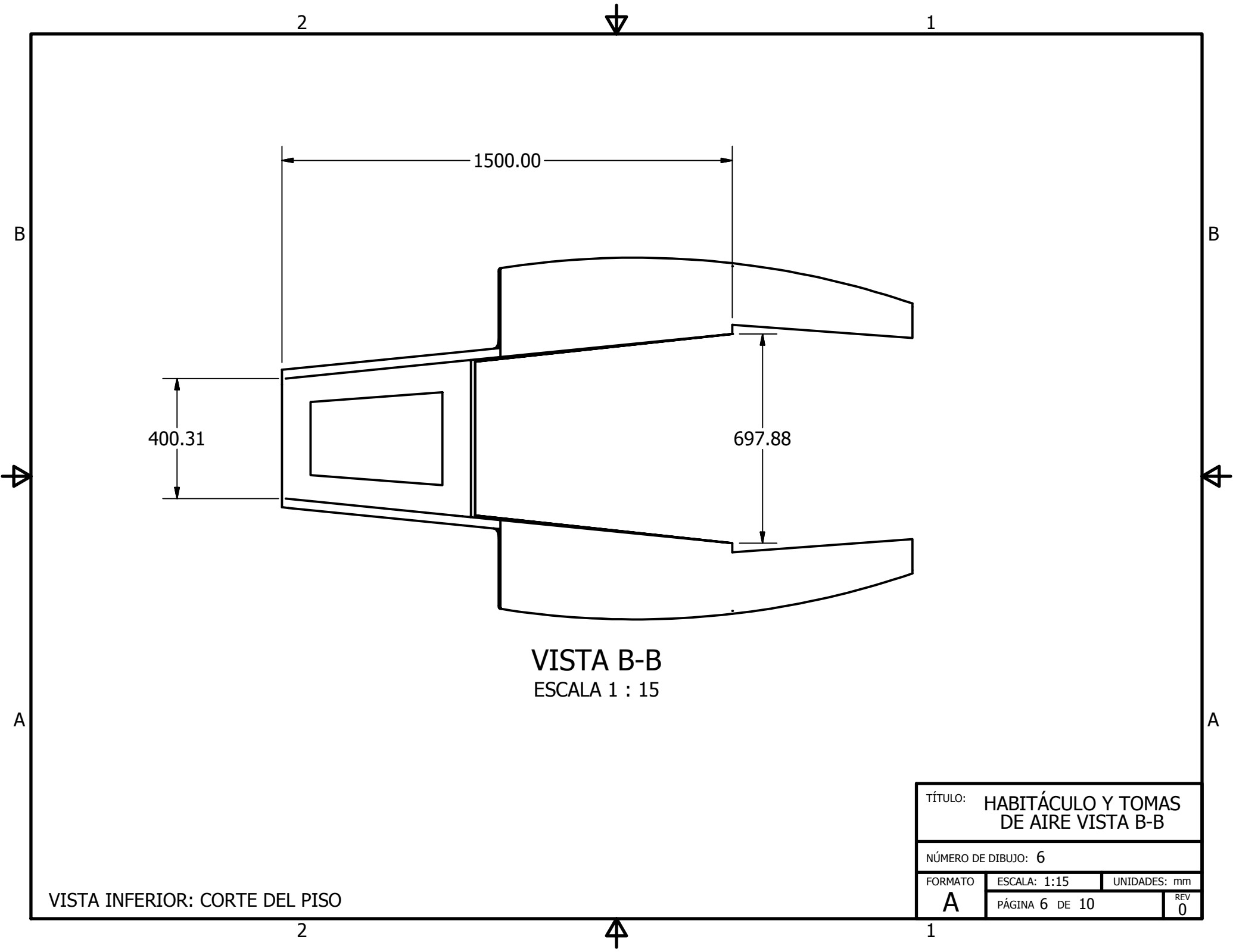


TÍTULO: CARROCERÍA COMPLETA TOMA DE AIRE LATERAL		
NÚMERO DE DIBUJO: 4		
FORMATO	ESCALA: 1:15	UNIDADES: mm
<b>A</b>	PÁGINA 4 DE 10	REV 0



VISTA SUPERIOR: CORTE DEL HABITÁCULO Y EL CAPÓ  
 VISTA LATERAL: CORTE DE LA PUNTA

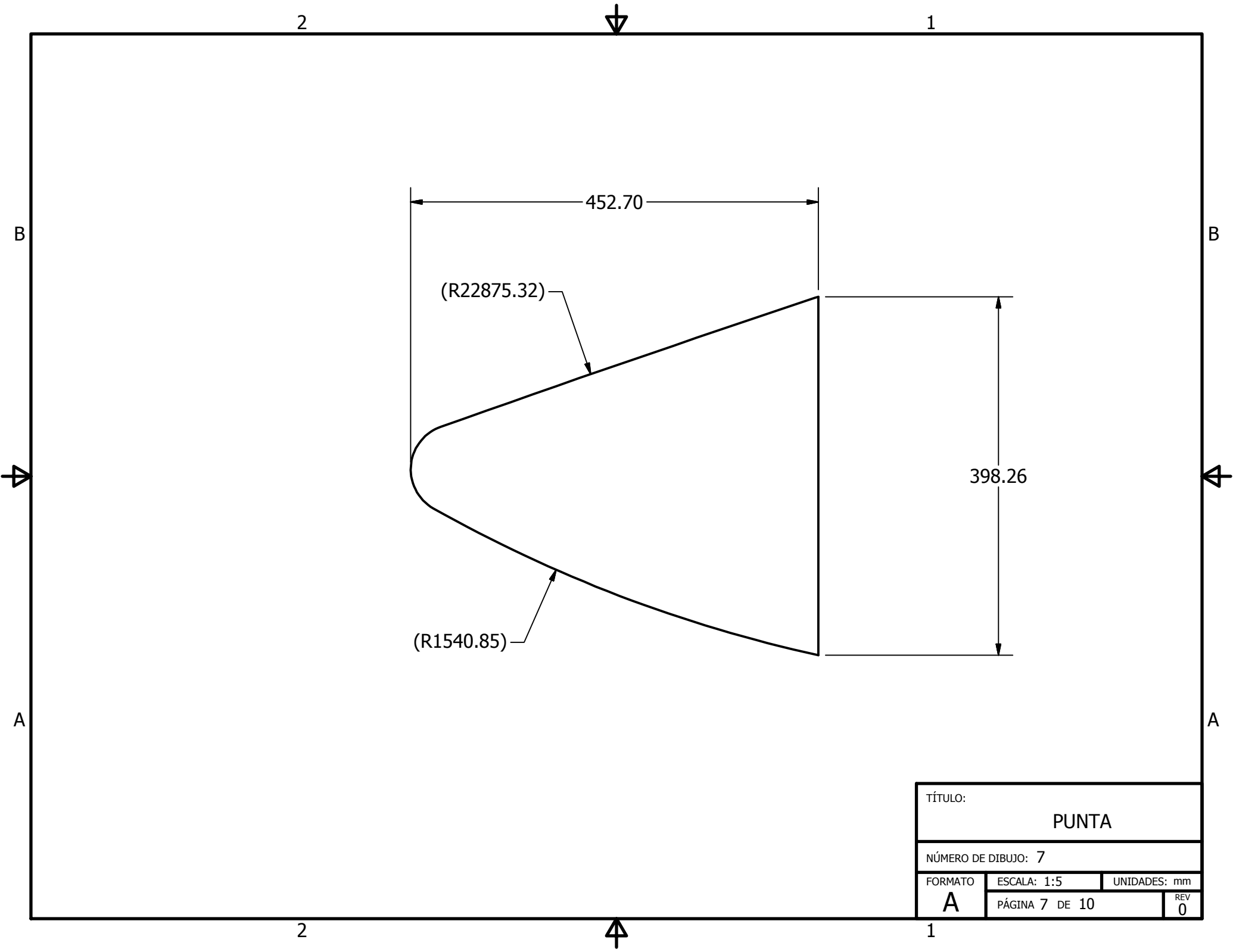
TÍTULO:			HABITÁCULO Y TOMAS DE AIRE		
NÚMERO DE DIBUJO: 5					
FORMATO	ESCALA: 1:15	UNIDADES: mm			
A	PÁGINA 5 DE 10			REV	0



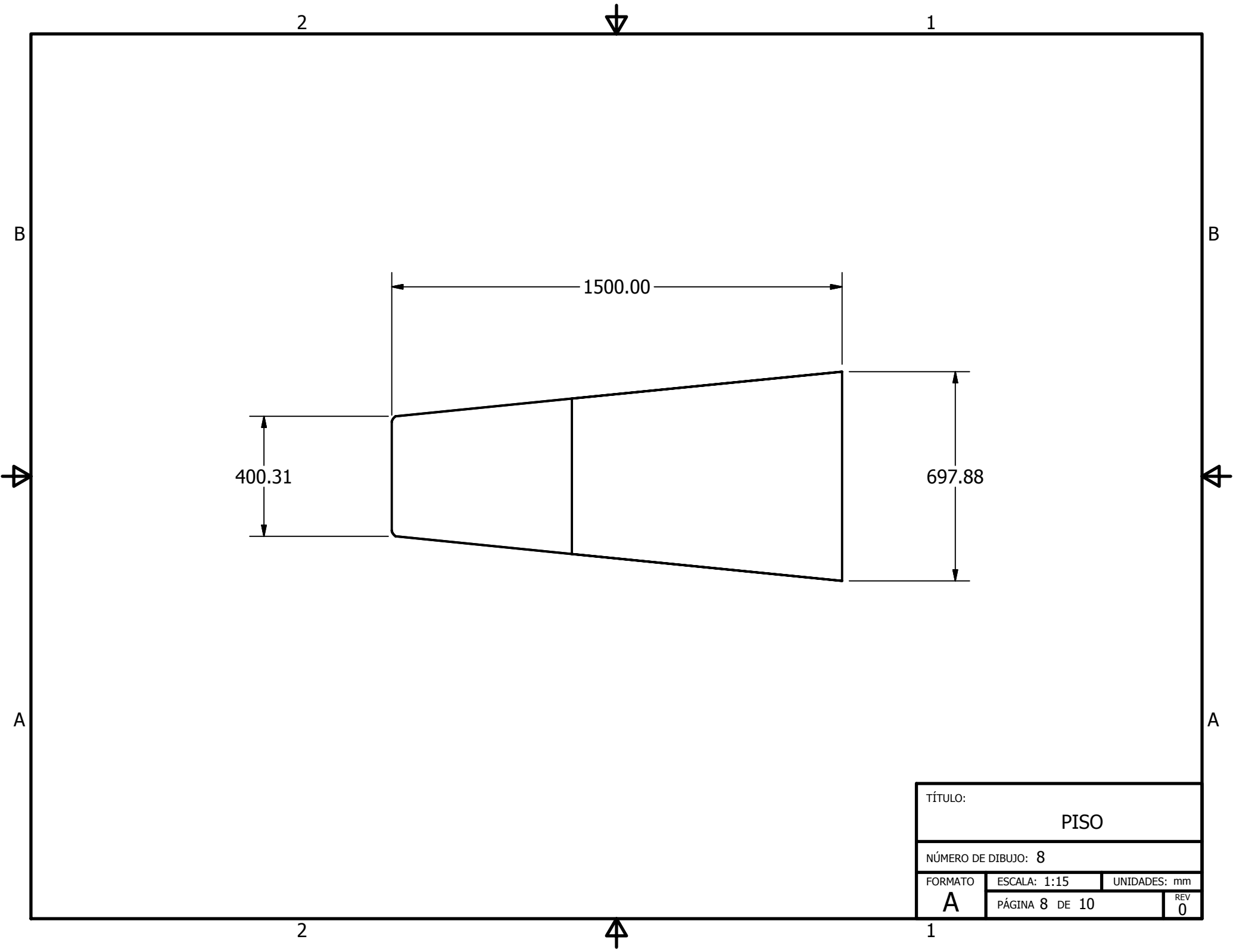
VISTA B-B  
 ESCALA 1 : 15

VISTA INFERIOR: CORTE DEL PISO

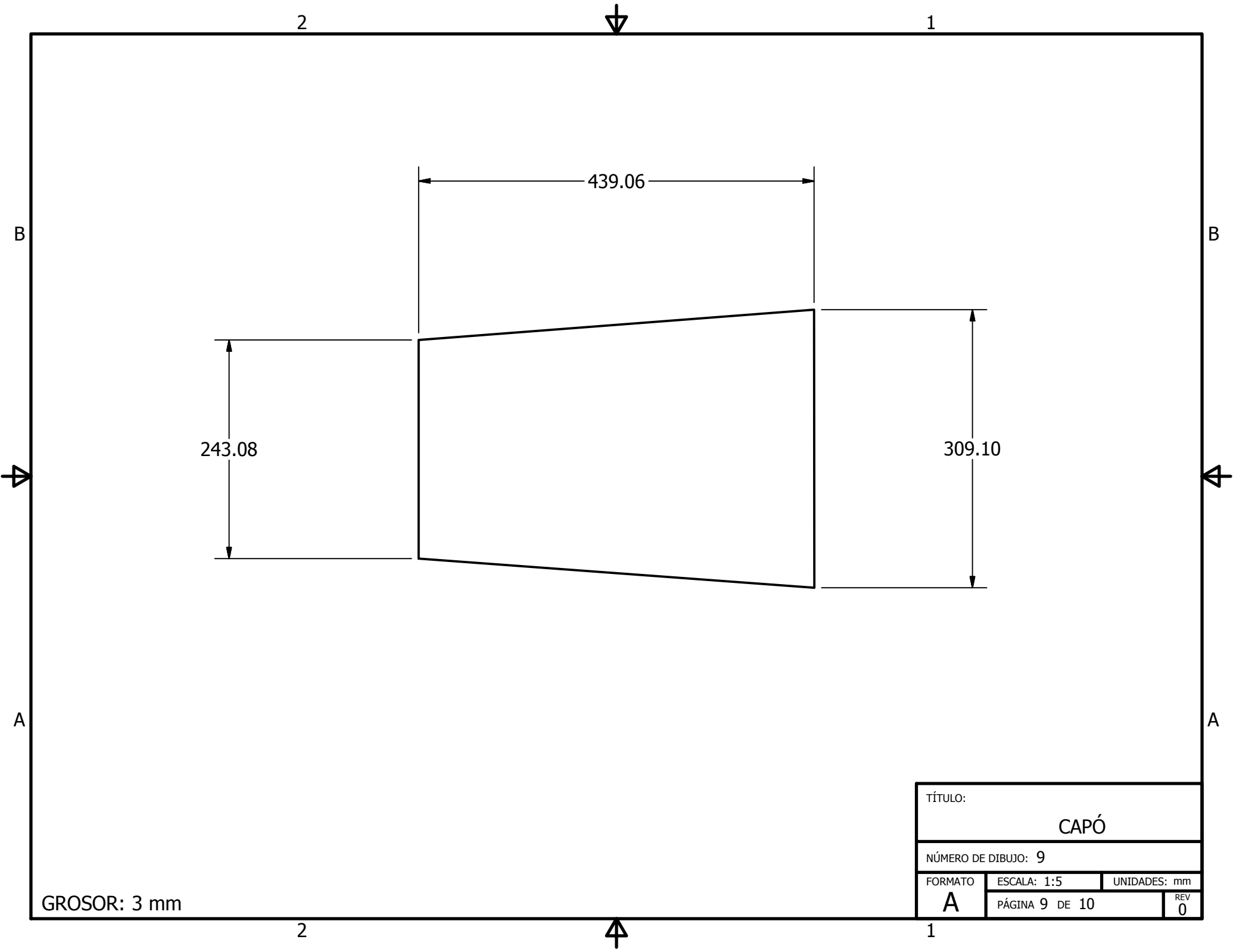
TÍTULO: HABITÁCULO Y TOMAS DE AIRE VISTA B-B		
NÚMERO DE DIBUJO: 6		
FORMATO	ESCALA: 1:15	UNIDADES: mm
<b>A</b>	PÁGINA 6 DE 10	REV 0

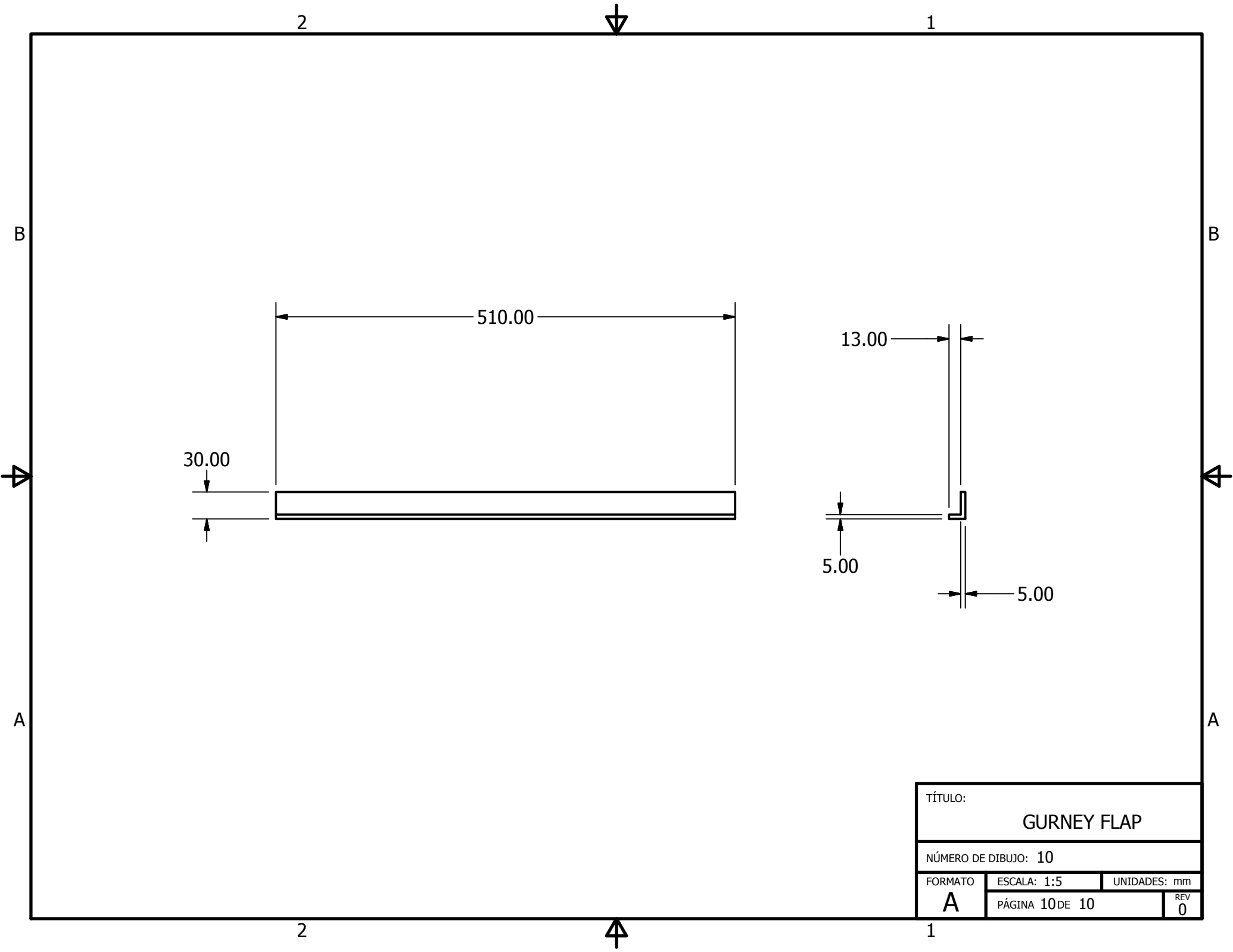


TÍTULO:		
PUNTA		
NÚMERO DE DIBUJO: 7		
FORMATO	ESCALA: 1:5	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 7 DE 10	REV 0



TÍTULO:			
PISO			
NÚMERO DE DIBUJO: 8			
FORMATO	ESCALA: 1:15	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 8 DE 10		REV 0





TÍTULO:			
GURNEY FLAP			
NÚMERO DE DIBUJO: 10			
FORMATO	ESCALA: 1:5	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 10 DE 10		REV 0