



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v8i1.2596>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Diseño y construcción en fibra de carbono del alerón delantero aplicado a un vehículo prototipo Fórmula SAE

Carbon fiber design and construction of the front spoiler applied to an SAE Formula prototype vehicle

Projeto e construção em fibra de carbono da asa dianteira aplicada a um veículo protótipo da Fórmula SAE

Saúl Fernando Chuquín-Narváez ^I
sfchuquin@yahoo.com
<https://orcid.org/0000-0003-1297-5481>

Luis Fernando Buenaño-Moyano ^{II}
lfbuenanio@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-2194-4102>

Olga Barrera-Cárdenas ^{III}
obarrera@epoch.edu.ec
<http://orcid.org/0000-0002-9708-5105>

Celin Abad Padilla-Padilla ^{IV}
c_padilla@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-2241-5421>

Correspondencia: sfchuquin@yahoo.com

***Recibido:** 02 de enero 2022 ***Aceptado:** 27 de enero de 2022 *** Publicado:** 17 de febrero de 2022

- I. Investigador Independiente, Riobamba, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Riobamba, Ecuador.
- III. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Riobamba, Ecuador.
- IV. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Grupo de Investigación SAPIA, Riobamba, Ecuador.

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo diseñar y construir en fibra de carbono el alerón delantero para un vehículo prototipo Fórmula SAE el cual ha sido desarrollado previamente en la Carrera de Ingeniería Automotriz de la ESPOCH. Esta investigación surge de la necesidad de optimizar la aerodinámica del auto de competencia. En primera instancia se realizó el diseño de cinco modelos de alerones mediante el software Space Clam, una vez digitalizados estos diseños fueron transferidos al software ANSYS y mediante la aplicación del módulo DISCOVERY el cual es adecuado para realizar estudios aerodinámicos, se determinó la carga aerodinámica, fuerza de resistencia, coeficiente de arrastre, fineza y potencia absorbida, para cada diseño. La selección del alerón a construir se realizó considerando los resultados de la simulación en conjunto con el análisis de costos de manufactura basándose en criterios como la estabilidad del auto en competencia el costo de construcción la complejidad y tiempo de manufactura. El diseño seleccionado se basa en un perfil NACA 5212, que de acuerdo con la simulación ofrece una carga aerodinámica de 2.328 N y una resistencia aerodinámica de 2.259 N con un c_d de 0.036. Para su construcción se ha dividido el alerón en tres partes: alerón principal, alerones y derivas laterales. Mediante moldes de madera y metal se manufacturó con fibra de carbono cada parte para su posterior ensamble e instalación en el vehículo. Se realizan pruebas experimentales en el túnel de viento con un modelo a escala 1:10, los resultados son equivalentes a los obtenidos en la simulación.

Palabras clave: Formula SAE; Alerón delantero; Aerodinámica; carga aerodinámica; coeficiente de arrastre.

Abstract

The objective of this work was to design and build a carbon fiber front spoiler for a Formula SAE prototype vehicle, which has been previously developed in the Automotive Engineering course at ESPOCH. This research arises from the need to optimize the aerodynamics of the competition car. First of all, five aileron models were designed using SolidWorks software. Once these designs were digitized, they were transferred to ANSYS software and by applying the DISCOVERY module, which is suitable for aerodynamic studies, the aerodynamic load, drag force, drag coefficient, fineness and absorbed power were determined for each design. The selection of the wing to be built was made considering the results of the simulation in conjunction with the manufacturing cost analysis based on criteria such as the stability of the car in competition, construction cost, complexity and

manufacturing time. The selected design is based on a NACA 5212 profile, which according to the simulation offers an aerodynamic load of 2.328 N and an aerodynamic drag of 2.259 N with a c_d of 0.036. For its construction the aileron has been divided into three parts: main aileron, ailerons and lateral drifts. Using wood and metal molds, each part was manufactured with carbon fiber for subsequent assembly and installation on the vehicle. Experimental tests were carried out in the wind tunnel with a 1:10 scale model, the results are equivalent to those obtained in the simulation.

Keywords: Formula SAE; front wing; aerodynamics; aerodynamic load; drag coefficient.

Resumo

O objetivo deste trabalho foi projetar e construir em fibra de carbono o spoiler dianteiro para um veículo protótipo da Fórmula SAE que foi desenvolvido anteriormente na ESPOCH Automotive Engineering Race. Esta pesquisa surge da necessidade de otimizar a aerodinâmica do carro de competição. Em um primeiro momento, o projeto de cinco modelos de ailerons foi realizado utilizando o software Space Clam, uma vez que esses projetos foram digitalizados, foram transferidos para o software ANSYS e por meio da aplicação do módulo DISCOVERY, adequado para estudos aerodinâmicos, foi determinada a carga aerodinâmica, força de resistência, coeficiente de arrasto, finura e potência absorvida, para cada projeto. A seleção do spoiler a ser construído foi feita considerando os resultados da simulação em conjunto com a análise dos custos de fabricação com base em critérios como a estabilidade do carro em competição, o custo de construção, a complexidade e o tempo de fabricação. O projeto selecionado é baseado em um perfil NACA 5212, que de acordo com a simulação oferece uma força descendente de 2.328 N e um arrasto de 2.259 N com um c_d de 0,036. Para sua construção, o spoiler foi dividido em três partes: spoiler principal, spoilers e drifts laterais. Utilizando moldes de madeira e metal, cada peça foi fabricada com fibra de carbono para posterior montagem e instalação no veículo. Ensaios experimentais são realizados no túnel de vento com modelo em escala 1:10, os resultados são equivalentes aos obtidos na simulação.

Palavras-chave: Fórmula SAE; spoiler dianteiro; Aerodinâmica; downforce; coeficiente de arrasto.

Introducción

El mayor impacto en el rendimiento de los vehículos hoy en día es la innovación en la parte aerodinámica. Hace unos años, el coeficiente de resistencia se afirmaba que tenía un valor de 1.5., el cual es uno de los principales factores que aumentan el consumo de combustible en un automóvil.

Diseño y construcción en fibra de carbono del alerón delantero aplicado a un vehículo prototipo Fórmula SAE

Con el fin de solucionar este inconveniente se comenzaron a emplear alerones que provocan carga aerodinámica y además ayuden a redirigir de manera efectiva el flujo de aire a través del automóvil (1).

El estudio aerodinámico es el inicio de una revolución en el desempeño automotriz, en el Ecuador ha sido escaso el análisis para perfeccionar la aerodinámica del vehículo, ya que ha sido empleado para mejorar la apariencia con la adaptación de alerones estáticos.

A velocidades superiores a 60 km/h un automóvil de competencia es propenso a perder la adherencia de los neumáticos que ruedan sobre la calzada de la vía. En el Ecuador existe muy poca información analizada con respecto a la aerodinámica en vehículos tipo Fórmula SAE para mejorar el desempeño en curvas (1).

Se puede visualizar que gran número de competencias de FSAE (2), los automóviles que participan no poseen alerones ya que uno de los principales factores es la complejidad al momento de realizar el montaje por lo que es indispensable realizar varios estudios de diseño y simulación con el fin de determinar su correcta ubicación.

Considerando esto el trabajo que se presenta se planteó con el objetivo de diseñar y construir en fibra de carbono un alerón delantero aplicado al vehículo prototipo Fórmula “SAE”, para ello se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Rediseñar el perfil para el alerón frontal en base a análisis realizados con el programa ANSYS Discovery.
- Construir el alerón frontal con referencia al perfil seleccionado anteriormente tomando en cuenta la fibra de carbono y acabados superficiales.
- Recopilar datos del comportamiento del alerón frontal del automóvil y proceder al análisis de resultados obtenidos en las diferentes pruebas.

Metodología

Para la elaboración de este proyecto se siguió el marco metodológico que se presenta en la

Diseño y construcción en fibra de carbono del alerón delantero aplicado a un vehículo prototipo Fórmula SAE

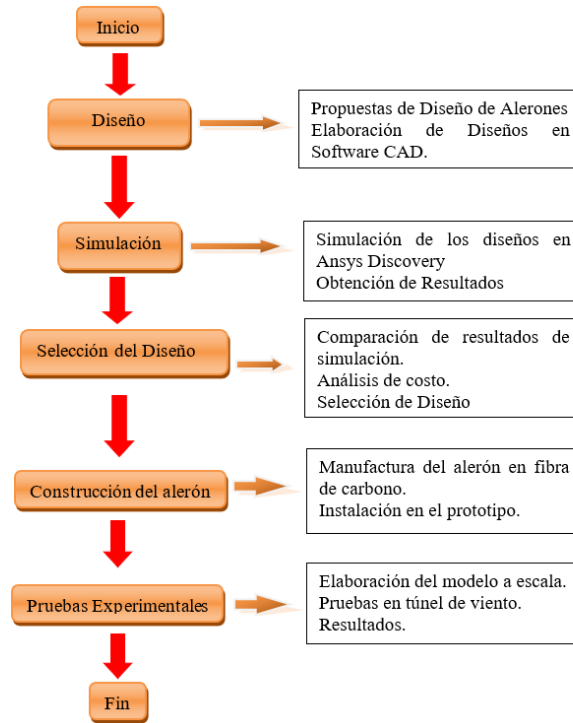


Figura 1. Metodología seguida para la ejecución del proyecto.

Métodos de investigación

En la Tabla 1 se ha detallado la metodología a seguir para lograr la adecuada consecución del proyecto.

Tabla 1. Metodología.

MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN	TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN
Investigación aplicada	Diseño y modelación del alerón	Investigaciones previas Artículos científicos Normas Software CAD
	Análisis del alerón	Software ANSYS
	Validar el diseño	Software ANSYS
	Manufactura	Manufactura aditiva
	Montaje del alerón al vehículo de fórmula SAE.	Pruebas de funcionamiento.
	Pruebas experimentales.	Túnel de viento

Equipos y Materiales

Diseñar y analizar elementos mecánicos mediante software siempre ha resultado complejo, en vista de esto, se debe contar con procesadores de buenas características de procesamiento, por lo tanto se utilizó un computador Xeon de 16 en RAM, 2.7 Hz en procesador Nvidia y 4Gb de disco sólido, características que fueron capaces de ejecutar sin dificultad los análisis aerodinámicos del alerón mediante software ANSYS y posterior a esto se hizo uso de una cortadora laser para la elaboración del molde en madera MDF.

Este estudio se centra prácticamente en la manufactura del alerón en fibra de carbono por lo que se realizó a parte la selección de algunos materiales complementarios, como por ejemplo el tipo de resina epoxi, tipo de lijas y pintura como se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2. Equipos, herramientas y materiales.

Equipos y herramientas	Materiales
Computador Xeon	Fibra de carbono
Software ANSYS módulo	Resina Epoxi
Discovery	Molde
Flexómetro	Cera desmoldante
Sierra	Catalizador 100 14
Lijadora eléctrica	Espuma de poliuretano
Lijas	Cinta de butilo
Taladro	Plancha de madera MDF
Brocas	Easy -mix PU-90 Adhesivo de poliuretano
Cortadora laser	Brocha
Bomba de vacío de 1HP	Pernos métricos
Túnel de Viento	

Diseño y Construcción del Alerón

Selección del Perfil

Un perfil aerodinámico es un cuerpo con un diseño determinado, el cual aprovechará las fuerzas que se originan por la variación de velocidad y presión cuando éste se sitúa dentro de una corriente de aire (3).

En la obra Aerodinámica del Automóvil de Competición de (4), se indica que al incrementar el grosor en más del 12% de la cuerda de un perfil, esto provoca un poco efecto en la carga aerodinámica, lo

Diseño y construcción en fibra de carbono del alerón delantero aplicado a un vehículo prototipo Fórmula SAE

cual es de suma importancia para la mayor parte de las categorías de competición, en tal contexto se consideró el 12% de la cuerda para el grosor de los perfiles propuestos en el presente proyecto.

Los perfiles NACA, son una serie de perfiles que fueron creados por NACA (National Advisory Committee For Aeronautics) para proveer una familia estandarizada de geometrías de perfiles para desarrollo y análisis de ingeniería (4).

Como el objetivo del trabajo es mejorar el diseño previo con el que cuenta el SAE, se parte del diseño inicial, en este caso se reporta por los creadores de este alerón (5) que de acuerdo a los estudios realizados con el software ANSYS Fluent, su selección del perfil NACA 5212 es la más adecuada para el prototipo SAE, en comparación de otras opciones como el NACA 4412 y NACA 6412, esto debido a que presenta una baja resistencia al avance y como consecuencia de esto, un bajo consumo de combustible.

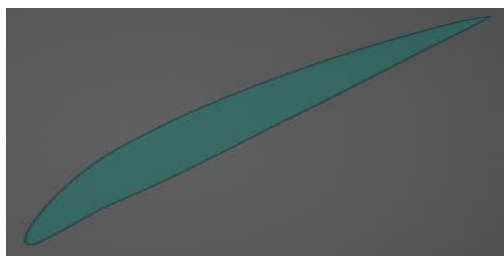


Figura 2. Perfil NACA 5212 en Space Claim.

Las características del perfil NACA 5212, tomado como base para los nuevos diseños se indican en la Tabla 3 (5), y se basaron en las características de los perfiles NACA obtenidas de la base de datos de Airfoiltools (6), de esta base de datos se extrajo un archivo de coordenadas que se pudo utilizar para construir el perfil. En este caso se utilizó el software Space Claim para obtener un perfil NACA 5212 con una envergadura de 1420 mm, este valor corresponde al ancho del monoplaça.

Tabla 3. Características del perfil NACA 5212, elegido para los nuevos diseños.

Parámetro	Dimensión [mm]
Borde de Ataque:	9.420
Cuerda media (Eje y)	3.771
Cuerda media (Eje x)	37.681
Espesor	22.610

Una vez definido el tipo de perfil, se procedió a diseñar cuatro modelos de alerones con derivas laterales distintas, además de los soportes para la instalación de los prototipos en el monoplaza.

Diseño N°1

Este diseño cuenta con superficies onduladas laminadoras de aire incorporadas en las derivas laterales y en los alerones transversales laterales.

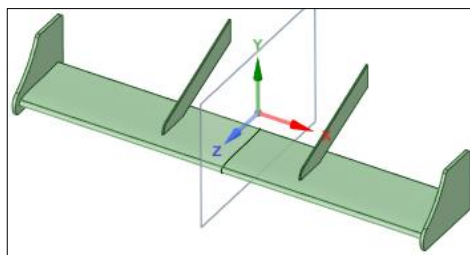


Figura 3. Diseño con derivas laterales perpendiculares.

Diseño N°2

En el segundo diseño los alerones laterales están dispuestos a un ángulo de 45 grados, se redujo completamente a 60mm de ancho el alerón principal y se incorporó nuevos modelos de derivas laterales.

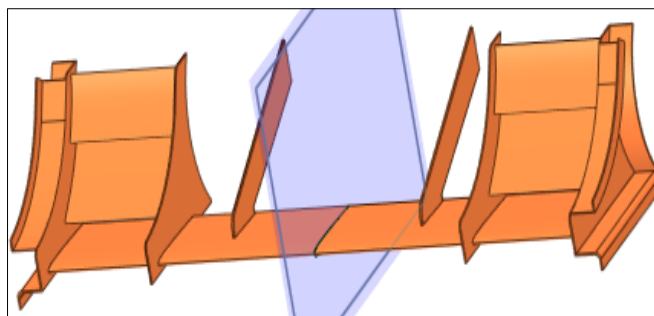


Figura 4. Diseño con derivas laterales onduladas.

Diseño N°3

En este diseño se consideró un alerón principal más ancho con derivas laterales sencillas y alerones laterales curvilíneos.

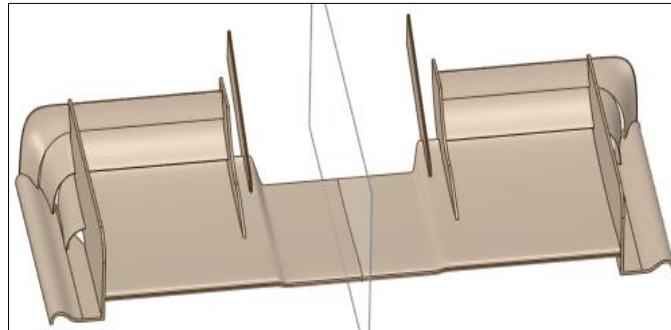


Figura 5. Diseño con derivas laterales disipadoras de flujo de aire.

Diseño N°4

Este último modelo se diseñó con derivas laterales rectas perpendiculares al alerón principal y sobre este se optó por montar con una inclinación a 30 grados nuevas derivas donde se sujetan los alerones laterales transversales.

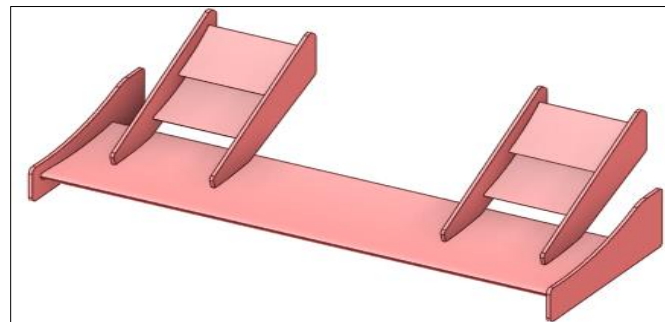


Figura 6. Diseño con derivas laterales perpendiculares a todos los alerones.

Condiciones de contorno

Una vez terminada la etapa del diseño, para el análisis y simulación de los alerones se consideraron las condiciones críticas de temperatura y presión respecto al Ecuador, esto se muestra en la Tabla 4, ya que el auto se desempeñará en competencias nacionales (6).

Tabla 4. Condiciones de simulación.

Parámetros	Detalle
Temperatura máxima	32°C= 305°K, parámetro tomado de acuerdo con el boletín climatológico semestral registrado en Portoviejo
Presión	Este parámetro fue tomado en función de la temperatura, por tanto, la presión manométrica en Portoviejo es de 0.99573917 atm = 100868.378 Pa
Velocidad	Parámetro basado en la formula SAE cuyo rango máximo es de 75Km/h = 20.83m/s

Designados los parámetros de contorno, se procedió al cálculo de las características del fluido como el número de Reynolds y Mach (7).

$$R_e = 67,778 * v * l$$

$$R_e = 67.778 * 20.834 * 0.188 = 265.472$$

Como $265.472 < 2000$ entonces el flujo es laminar

$$M = \frac{V}{C}$$

$$C = \sqrt{K * R * T}; K = cte = 1.4$$

$$C = \sqrt{1.4 * 287 \frac{J}{kg \cdot K} * 305 \cdot K}$$

$$C = 350.069$$

$$M = \frac{V}{C} = \frac{20.83}{350.069} = 0.060$$

De acuerdo con el cálculo del número de Match es un flujo incompresible.

Simulación de diseños

Con las condiciones de contorno y modelos propuestos definidos, el siguiente paso fue importar la geometría de los alerones al módulo ANSYS Discovery Live, donde se efectuaron los análisis que a continuación se desarrollan. Se debe considerar al signo (-) de acuerdo a los ejes coordenados que provee el software, de igual manera $F_z = F_x$ debido a la posición asumida, esto se aprecia en la Figura 7.

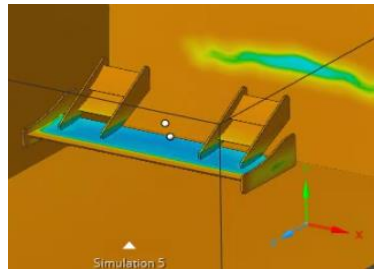


Figura 7. Disposición de ejes coordenados para la simulación en Ansys Discovery.

Estudio aerodinámico del diseño del alerón 1

En la Figura 8 se puede observar que el diseño lamina perfectamente el aire y se ejercen fuerzas con magnitud de, $F_x=F_z= -2.162\text{N}$, $F_y= -1.159\text{N}$.

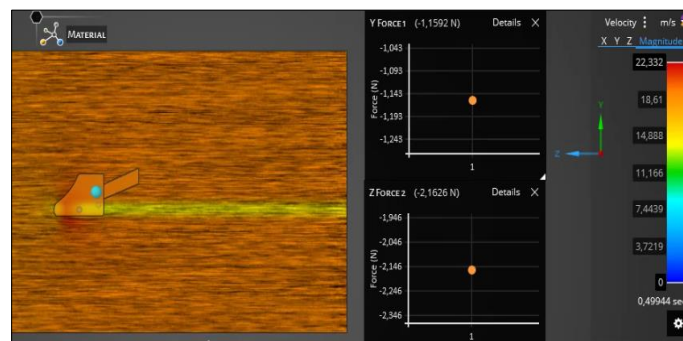


Figura 8. Contorno de velocidad y fuerzas del primer diseño

En la Figura 9 se puede apreciar que la presión ejercida se distribuye uniformemente sobre el alerón principal con un valor de $1.014 \times 10^5 \text{Pa}$.

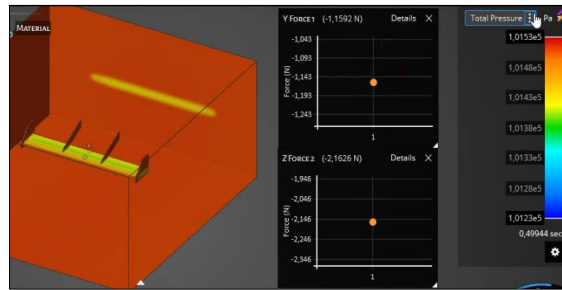


Figura 9. Contorno de presión del primer diseño.

Estudio aerodinámico del diseño del alerón 2

La Figura 10 muestra la trayectoria del flujo de aire que desarrolla el primer alerón, las magnitudes de las fuerzas actuantes son $F_x=F_z= -6.494\text{N}$, $F_y=0.932\text{N}$. Con respecto a este diseño, se puede apreciar que se provoca un levantamiento en F_y .

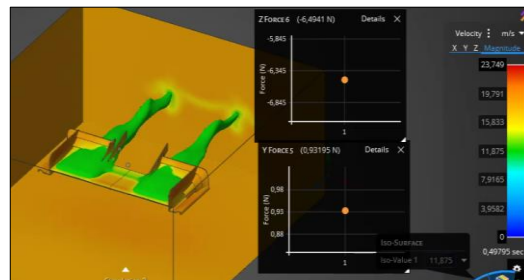


Figura 10. Contorno de velocidad y fuerzas del segundo diseño.

En la Figura 11 se puede observar que la máxima presión se origina alrededor de los alerones laterales con una magnitud de 1.015×10^5 Pa.

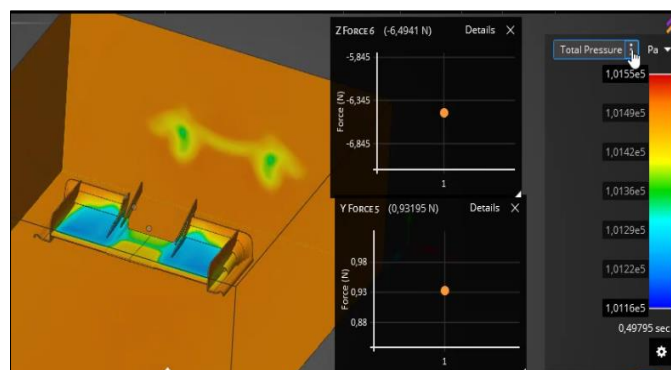


Figura 11. Contorno de presión del segundo diseño.

Estudio aerodinámico del diseño del alerón 3

En la Figura 12 se puede observar que con este diseño la trayectoria del fluido es laminar, pero debido a las dimensiones genera torbellinos. Las magnitudes de las fuerzas son $F_x=F_z=-1.259\text{N}$, $F_y=-1.328\text{N}$.

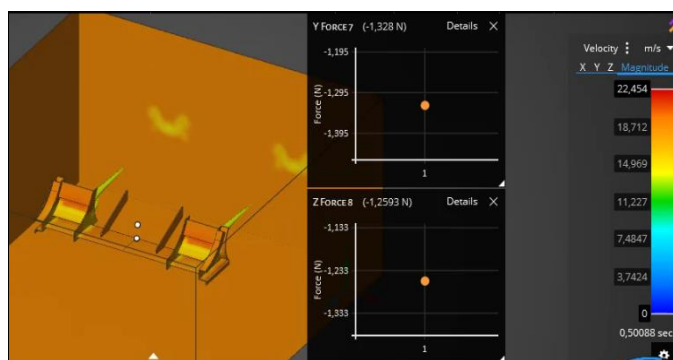


Figura 12. Contorno de velocidad y fuerzas del tercer diseño.

En la Figura 13 se muestra que se genera mayor presión sobre los primeros alerones transversales con un valor de $1.014 \times 10^5 \text{ Pa}$.

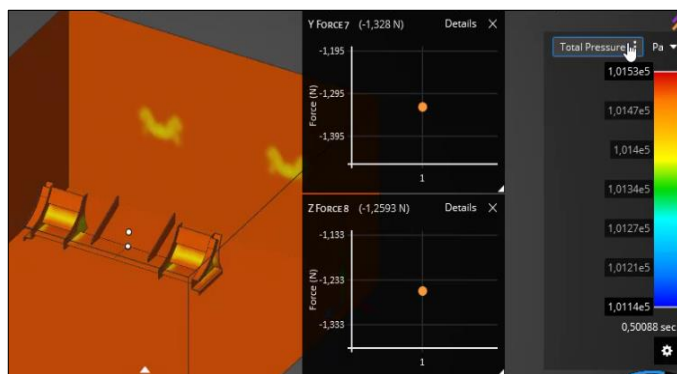


Figura 13. Contorno de presión del tercer diseño.

Estudio aerodinámico del diseño del alerón 4

Con respecto a este estudio en Figura 14 se puede observar que la forma aerodinámica del alerón le ayuda a laminar de mejor manera el aire sin demasiados vórtices.

Los valores de las fuerzas ejercidas son, $F_x=F_z=-2.259\text{N}$, $F_y=-2.328\text{N}$.

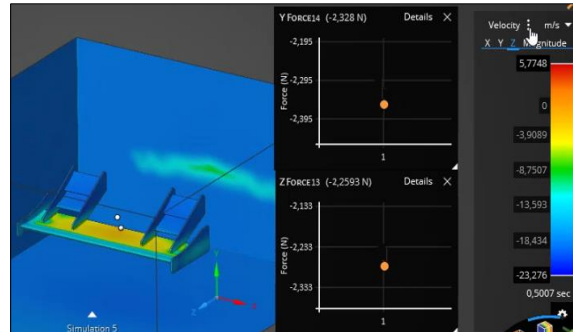


Figura 14. Contorno de velocidad y fuerzas del cuarto diseño.

La Figura 15 muestra que se produce una presión máxima de 1.015×10^5 Pa alrededor del filo de los primeros alerones transversales.

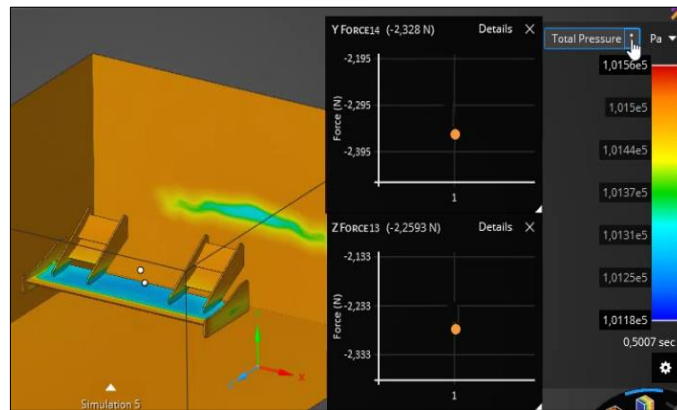


Figura 15. Contorno de presión del cuarto diseño.

Una vez concluidas las simulaciones se han recabado los datos necesarios para el análisis aerodinámico. En este caso se desarrolla el estudio del diseño 1.

Datos del diseño 1:

$$F_x = -2.162\text{N}$$

$$F_y = -1.159\text{N}$$

$$V = 20.83\text{m/s}$$

Cálculo del coeficiente de resistencia (S):

Para efectuar este cálculo primero se calculó el área de contacto del alerón con el aire (9).

$$S = c * e = (0.188m) (1.25m)$$

$$S = 0.235 \text{ m}^2$$

C = espesor del perfil NACA5212

e = Ancho del perfil

Resistencia aerodinámica (Fx):

$$F_x = 0.5 * \rho * v^2 * S * C_d$$

Coefficiente de resistencia (Cd):

$$C_d = \frac{F_x}{0.5 * \rho * v^2 * S}$$

$$C_d = \frac{-2.162N}{(0.5)(1.225)(20.83^2)(0.235)}$$

$$C_d = -0.035$$

Carga aerodinámica (Fy)

$$F_y = 0.5 * \rho * v^2 * S * C_l$$

Coefficiente de sustentación (Cl)

Diseño y construcción en fibra de carbono del alerón delantero aplicado a un vehículo prototipo Fórmula SAE

$$Cl = \frac{Fy}{0.5 * p * v^2 * S}$$

$$Cl = \frac{-1.159N}{(0.5)(1.225)(20.83^2)(0.235)}$$

$$Cl = -0.018$$

Fineza en base a valores de fuerzas

$$f = \frac{Fy}{Fx}$$

$$f = \frac{-1.159N}{-2.162N}$$

$$f = 0.536$$

Fineza en base a valores de coeficientes

$$f = \frac{Cl}{Cd}$$

$$f = \frac{-0.018}{-0.034}$$

$$f = 0.529$$

Cálculo de potencia absorbida

$$Cv \text{ absorbidos} = \frac{Cd * S * v^3}{1225}$$

$$Cv \text{ absorbidos} = \frac{(0.034)(0.235)(20.83)^3}{1225}$$

$$Cv \text{ absorbidos} = 0.060 Cv = 0.059Hp$$

En base a las fórmulas utilizadas en el diseño uno y los datos obtenidos de cada resultado de la simulación (Fx, Fy, velocidad, presión), se elabora la Tabla 5 con los resultados del estudio aerodinámico para cada alerón propuesto.

Tabla 5. Resultados del Estudio Aerodinámico.

D	Fy (N)	Fx(N)	f	Cl	Cd	Hp
1	-1.159	-2.162	0.536	-0.018	-0.034	0.059
2	0.932	-6.494	-0.143	0.014	-0.103	0.177
3	-1.328	-1.259	1.054	-0.021	-0.020	0.034
4	-2.328	-2.259	1.030	-0.037	-0.036	0.061

De acuerdo con los resultados, los alerones ejercen mayor carga en el siguiente orden: alerón cuatro, seguido por el alerón tres, alerón uno y alerón dos, que es el que menos carga ofrece. En automoción a grandes velocidades el valor de carga es muy importante, ya que gracias a esta fuerza el vehículo se mantiene presionado sobre la calzada, permitiendo al piloto realizar giros y maniobras seguras, evitando que el auto pierda equilibrio y se originen volcamientos. En vista de esto se consideró analizar los alerones que ejercen mayor carga (diseño uno, tres y cuatro) para realizar la selección y efectuar la posterior manufactura.

El alerón viable para la manufactura se seleccionó, en base a los parámetros que se describen en la Tabla 6. Para llevar a cabo la selección, fueron evaluados sobre una puntuación máxima de tres puntos considerando una puntuación de 3 puntos para el parámetro más viable y 1 punto para el parámetro menos viable. Los resultados de esta valoración se muestran en la

Tabla 7.

Tabla 6. Parámetros de Selección.

D	Costo (USD)	Carga F_y (N)	Tiempo de manufactura	Complejidad de manufactura	Peso (kg)
1	907	-1.159	3 semanas	Media	11.20
3	1631.50	-1.328	1 mes y medio	Alta	11.30
4	1307.50	-2.328	3 semanas	Media	11.25

Tabla 7. Evaluación de Parámetros.

D	Costo	Carga (F_y)	Tiempo de manufactura	Complejidad de manufactura	Peso (kg)	Total
1	3	1	3	2	3	12
3	1	1	1	1	1	5
4	2	3	3	2	2	12

Como se puede observar en la

Tabla 7, los alerones más viables son el primer y cuarto diseño ya que existe un empate de valores de selección, por lo que considerado que el cuarto diseño ofrece una mayor carga aerodinámica respecto a los demás diseños lo vuelve la mejor selección ya que, esto provocaría que a velocidades altas el vehículo sea seguro cuando el piloto realice maniobras, además el costo es promedio con una complejidad de manufactura media.

Manufactura del alerón seleccionado

Para conseguir la manufactura del alerón del diseño 4, sus componentes fueron divididos en tres grupos: alerón principal, alerones laterales y derivas laterales (Figura 16).

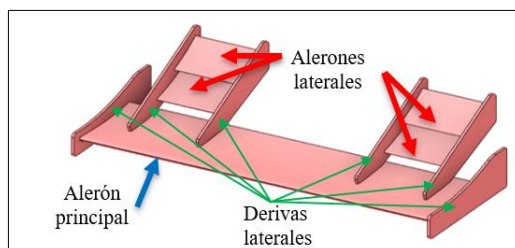


Figura 16. Partes de alerón.

Para los moldes del alerón principal fue necesario utilizar dos planchas de tol con espesor de 0.6mm, con los cuales se formó el perfil NACA 521, esto se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Planchas de tol dobladas.

Seguidamente se cortó la fibra de carbono con las debidas dimensiones y esta fue aplicada sobre las superficies con cera en los moldes. Para los moldes laterales se utilizó madera para formar las piezas, luego se ensambló mediante pegamento cada una de ellas, las partes huecas se rellenó con espuma de poliuretano, para mejorar la consistencia del molde, a partir de esto se aplicó la fibra de carbono tal como se realizó en la manufactura del alerón principal. A continuación, las derivas laterales, se realizaron de igual manera a partir de moldes de madera y la aplicación de fibra de carbono.

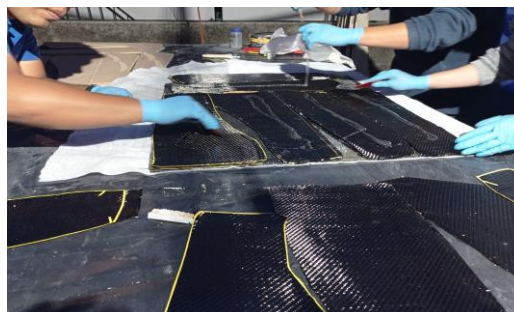


Figura 18. Proceso de manufactura de las partes del alerón.

Diseño y construcción en fibra de carbono del alerón delantero aplicado a un vehículo prototipo Fórmula SAE

Una vez manufacturados todos los componentes del alerón se procedió a limpiar y ensamblar mediante pernos para obtener el alerón final y ensamblarlo en el prototipo SAE. (Figura 20)



Figura 19. Alerón ensamblado en el prototipo SAE.

Resultados

Para obtener resultados experimentales del diseño construido, se optó por realizar pruebas en el túnel de viento del laboratorio de aerodinámica de la Carrera de Ingeniería Automotriz de la ESPOCH, en el cual se pueden realizar pruebas experimentales con prototipos a escala 1:10., para lo cual se realizó una impresión 3D del alerón que se construyó con el objetivo de su evaluación en el túnel de viento. El modelo se presenta en la



Figura 20. Alerón a escala 1:10.

El túnel de viento que se utiliza posee un sistema de control que permite obtener datos en tiempo real a través de una pantalla digital.



Figura 21. Túnel de viento de la Carrera de Ingeniería Automotriz.

Al poner en marcha el túnel de viento el módulo arroja los valores tanto para la fuerza ejercida en la componente X, como la fuerza en Y, además de la velocidad (Figura 22).

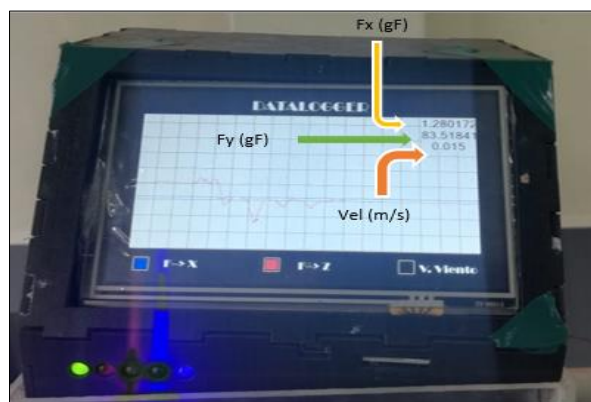


Figura 22. Lecturas obtenidas en el módulo de resultados.

Para poder realizar pruebas en el túnel de viento, puesto que su velocidad máxima es aproximadamente 16 m/s, es necesario obtener los valores de la simulación tanto de Fy como de Fx con esa velocidad, posteriormente se los escala a 1:10., es decir esos valores se dividen entre 10 y conformaran los valores esperados contra los cuales se compararán los valores experimentales que se obtengan del túnel de viento. Estos valores se indican en la Tabla 10.

A continuación, se muestran en la Tabla 8 y Tabla 9 los resultados de las pruebas en el túnel con el modelo a escala. La prueba se llevó a cabo de tal manera de que se fue aumentando progresivamente la velocidad del viento hasta alcanzar la velocidad máxima. El valor final obtenido será el valor experimental correspondiente de Fy y Fx medidos en gf.

Tabla 8. Resultados en el túnel de viento de la Fuerza de Sustentación - Fy

Velocidad		Fuerza
[m/s]	[Km/h]	[gf]
0.00	0.00	0.00
2.25	8.10	1.28
5.50	19.80	2.56
6.30	22.68	3.98
7.10	25.56	5.40
7.65	27.54	6.59
8.20	29.52	8.77
9.15	32.94	9.87
10.10	36.36	10.47
10.55	37.98	10.88
11.00	39.60	11.42
12.41	44.68	11.58
13.00	46.80	13.92
14.00	50.40	16.32
15.00	54.00	18.72
15.50	55.80	19.86
15.67	56.41	19.94

Tabla 9. Resultados en el túnel de viento de la fuerza de arrastre Fx.

Velocidad		Fuerza
[m/s]	[Km/h]	[gf]
0.00	0.00	0.00
1.35	4.86	0.43
2.40	8.64	1.83
3.50	12.60	2.73
4.40	15.84	3.83
5.45	19.62	4.63
6.60	23.76	5.73
7.40	26.64	6.73
8.62	31.03	7.73
9.30	33.48	8.63
9.90	35.64	10.83
10.40	37.44	14.73
11.30	40.68	16.83
12.40	44.64	18.63
13.05	46.98	20.73
13.75	49.50	20.63
15.95	57.42	21.85

En la Tabla 10 se presentan los resultados obtenidos, en la experimentación con el túnel de viento, y los valores esperados, además se presenta el error relativo encontrado para cada caso, que como se aprecia en los resultados presentados, el modelo a escala presenta el efecto esperado de acuerdo con el diseño planteado.

Tabla 10. Comparación de resultados simulados con los valores experimentales.

	Velocidad máxima	Valor Simulado (Escala 10:1)	Valor Experimental	Error Relativo
	[m/s]	[gf]	[gf]	[%]
F_x	15.95	22.54	21.85	3.06
F_y	15.67	20.70	19.94	3.67

Conclusiones

Concluida la etapa de diseño, simulación y selección, el diseño elegido de entre los cuatro candidatos presentados, fue el número 4, considerando las ventajas de carga aerodinámica que ofrece con respecto a la carga aerodinámica que genera, el costo promedio de inversión y la viabilidad de construcción.

Se diseñó y construyó en fibra de carbono el alerón delantero y se lo integró en el vehículo prototipo Formula “SAE” de la carrera de Ingeniería Automotriz de la ESPOCH. Durante este proceso, fue importante el contar con los materiales y elementos necesarios a fin de lograr concluir la manufactura. El alerón que se implementa, en la etapa de estudio aerodinámico presentó una carga aerodinámica de -2.328 N, una fuerza de arrastre de -2.259 N, una finesa de 1.030, un CI de -0.037, un cd de -0.036, propiedades que le confieren al prototipo un excelente comportamiento, y que sumadas a que el costo de fabricación es mejor en relación con las otras alternativas, convirtieron a este diseño en una selección adecuada en para su construcción.

A fin de comprobar experimentalmente el efecto del alerón en las fuerzas que afectan al vehículo, se optó por realizar pruebas con un modelo a escala, en este caso de 1:10, en el túnel de viento. Los resultados fueron comparados con los valores de simulación y demostraron que los efectos que se

pretenden alcanzar son los esperados. Puntualmente se obtuvo un F_x de 21.85 gf con un error del 3.07% y un F_y de 19.94 gf con un error de 3.67%.

Referencias

1. *Estudio de la Aerodinámica en los vehículos*. **Fraija B., Iskandar**. 2006, Prospectiva.
2. **International, SAE**. SAE for Students. [En línea] 2022. <https://www.sae.org/students>.
3. **GARCÍA PEDROZA, Marco Agustín**. *Periles aerodinámicos*. 2013. Pag. 14.
4. **McBEATH, Simón**. *Aerodinámica del automóvil de competición*. s.l. : Enrique H. Scalabroni, 2001.
5. **Avalos Valverde, Gonzalo : Marcelo Patricio, Chasi Alarcon**. *Diseño y construcción de un spoiler y un alerón en fibra natural para el vehículo de competencia formula (SAE) de la carrera de Ingeniería Automotriz de la ESPOCH*. Riobamba : s.n.
6. **Airfoiltools**. NACA 4 digit airfoil generator (NACA 2412 AIRFOIL). [En línea] 2022. <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>.
7. **Alban, Gustavo**. *ANÁLISIS Y SIMULACIÓN AERODINÁMICA DE UNA MOTOCICLETA DE CARRETERA TIPO CUSTOM 125 CC. MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (DFC) Y PROPUESTA DE DISEÑO DE UN CARENADO FRONTAL*. Riobamba : s.n., 2015.
8. **MOTT, Robert**. *Mecánica de Fluidos. sexta edición*. México : Pearson education, 2006.
9. **CASTAÑÉ, Josep**. *El Equipo de Competición*. Madrid : Paperback, 1996.