



ING. AUTOMOTRIZ

**DISEÑO Y ANÁLISIS AERODINÁMICO DE UNA CARROCERÍA
CON ALERÓN BÁSICO EN UN PROTOTIPO DE LEMANS CON
SOFTWARE ANSYS.**

AUTORES:

Felipe Santamaria Borniatti

Pedro David Cardenas Torres

TUTOR:

Msc. Gabriela Stefany Chavez Tapia

Certificación

Yo **Felipe Santamaria Borniatti y Pedro David Cárdenas Torres** declaro bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada. Cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de propiedad Intelectual, reglamento y leyes.

Felipe Santamaria Borniatti y Pedro David Cárdenas Torres

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Felipe', enclosed within a large, horizontal oval loop.A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping letters that appear to be 'PDCT'.

Yo, **Gabriela Stefany Chavez Tapia** certifico que conozco al autor del presente trabajo siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

Gabriela Stefany Chavez Tapia
Director de Tesis
Escuela de Ingeniería Automotriz

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mis padres, Margareth Borniatti y Marcelo Santamaría, quienes han sido el pilar fundamental a lo largo de toda mi carrera. Su apoyo incondicional, amor y guía han sido una fuente inagotable de inspiración para alcanzar esta meta.

A mi novia, Abigail Castro, por ser mi mayor apoyo, por impulsarme a perseguir mis sueños con determinación y por estar siempre a mi lado, en los momentos de triunfo y en los desafíos.

A mis hermanos, Ana Paula y Marcelo, por su cariño, consejo y por enseñarme, desde la infancia, el valor del esfuerzo y la perseverancia.

Felipe Santamaria Borniatti

Dedico esta tesis a mi madre, Alexandra Torres, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental en cada paso de este camino. Su amor, paciencia y confianza en mí han sido mi mayor fortaleza.

A mi mejor amigo, quien ha estado a mi lado desde siempre. Sin su apoyo y conocimientos en diseño y modelado, este proyecto no habría sido posible. Este logro es tanto suyo como mío.

Con todo mi amor y gratitud, también dedico este trabajo a los futuros diseñadores del país, con la esperanza de que les sirva de guía en sus análisis y como base para el desarrollo del diseño automotriz.

Pedro David Cardenas Torres

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres y hermanos, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental en mi formación como ingeniero automotriz. Su paciencia, comprensión y constante ánimo me han impulsado a lo largo de este viaje.

A mis padres, gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la dedicación y la perseverancia. Su sabiduría y amor han sido los pilares que me han sostenido en cada etapa de mi vida académica y personal. Sin su sacrificio y guía, no habría podido alcanzar este logro.

A mis hermanos, gracias por su compañía, por ser mi inspiración y por creer siempre en mí. Sus palabras de aliento y su confianza en mis capacidades me han motivado a superar cada obstáculo y a seguir adelante con determinación.

Este logro es tanto mío como de ustedes, pues ha sido posible gracias a su inquebrantable apoyo y amor. Gracias por ser mi fortaleza y por acompañarme en este camino hacia la realización de mis sueños.

Quiero agradecer a mis familiares por apoyarme en el mundo de la ingeniería automotriz y a incentivar me a seguir mi sueño también quiero agradecer al taller Qmotors autoservice que no solo me enseñó a crecer laboralmente y a adquirir los conocimientos técnicos que tengo hoy en día sino también me ayudaron a crecer como persona y obtener varios valores importantes para la materia.

Índice General

Dedicatoria.....	2
Autor 1.....	2
Autor 2.....	2
Agradecimientos.....	3
RESUMEN	6
ABSTRACT.....	6
Introducción	7
Objetivos.....	8
Objetivo General	8
Objetivos Específicos	8
Marco Teórico.....	8
Aerodinámica.....	8
F.E.A. (Análisis de Elementos Finitos)	8
El principio de Bernoulli	9
Formula de Bernoulli	9
Coeficiente de Arrastre.....	10
Coeficiente de sustentación	10
Alerones	11
Modelo Mazda 787B.....	12
Materiales	12
FLUENT y CFX.....	12
Geometrías de Comparación.....	13

Alerón Categoría F1	13
Metodología	14
Corrección de Errores en la Geometría y Reducción de Polígonos.....	14
Trabajo en la Geometría	14
<i>Mallado</i>	14
Restricciones y Configuraciones.....	15
Condiciones iniciales.....	16
Temperatura del aire.....	16
Velocidad en la pista.....	16
Comparación de alerones	16
Categoría GT3	16
Categoría F1	17
Resultados.....	17
Prueba con Alerón	18
Resultado de ecuación con alerón	18
Resultados de ecuación sin alerón	19
Cálculo del coeficiente de sustentación	20
Validación	20
Datos de Validación	21
Conclusiones	22
Impacto del Alerón	22
Bibliografía	23

Resumen

Introducción: El presente trabajo de investigación analiza dos prototipos automóviles de Le Mans, uno con alerón y otro sin alerón, con el objetivo de determinar el coeficiente de arrastre de cada uno e identificar cuál prototipo es capaz de alcanzar la velocidad final de carrera, en el menor tiempo posible. **Metodología:** Se emplearon los programas ANSYS CFX y ANSYS FLUENT para realizar simulaciones, ajustando geometría y mallado, y considerando principalmente el coeficiente de arrastre (C_d) junto con otras variables aerodinámicas. Finalmente se realizó un análisis comparativo en dos escenarios de los prototipos con y sin alerón. **Resultados:** Se logró evidenciar que el prototipo sin alerón alcanza más rápido la velocidad máxima de 270 km/h, debido a menor resistencia al viento, mientras que el que tiene alerón genera mayor carga aerodinámica, lo que mejora su desempeño en curvas. **Conclusión:** A pesar de que el prototipo sin alerón tiene un coeficiente de arrastre inferior donde C_d es $5,732 \times 10^{-4}$, se demuestra que el uso de alerón permite que el auto tenga una mayor carga aerodinámica, consecuentemente el coeficiente de arrastre es mayor $C_d = 3,167 \times 10^{-3}$.

Palabras claves: - Diseño aerodinámico, Prototipo Le Mans, ANSYS, Fluent, Mazda 787B, Análisis computacional, Coeficiente de arrastre, Velocidad final.

Abstract

Introduction: This research analyzes two Le Mans prototype cars—one with a wing and one without—with the objective of determining the drag coefficient of each and identifying which prototype can reach the final race speed in the shortest time. **Methodology:** ANSYS CFX and ANSYS FLUENT software were used to perform simulations, adjusting geometry and meshing while primarily considering the drag coefficient (C_d) along with other aerodynamic variables. A comparative analysis was then conducted under two scenarios: with and without a wing. **Results:** The study revealed that the prototype without a wing reaches the maximum speed of 270 km/h faster due to lower wind resistance, while the winged prototype generates greater downforce, improving cornering performance. **Conclusion:** Although the prototype without a wing has a lower drag coefficient, with $C_d = 5.732 \times 10^{-4}$, the study demonstrates that the use of a wing increases downforce. Consequently, the drag coefficient is higher, with $C_d = 3.167 \times 10^{-3}$.

Keywords: Aerodynamic design, Le Mans prototype, ANSYS, Fluent, Mazda 787B, Computational analysis, Drag coefficient, Final speed.

Introducción

Las 24 horas de Le Mans es una carrera reconocida en el mundo del automovilismo que inicialmente, nació con el objetivo de probar la resistencia de los materiales y exhibir nuevas tecnologías. Esta competencia es referente a nivel mundial por su duración de 24 horas seguidas, en la que gana el piloto con el auto que más distancia haya recorrido en este tiempo. Por otro lado, el presente análisis tiene como protagonista un prototipo de Mazda de la categoría LMP1 de la década de los 90, que se caracteriza por tener una alta demanda de resistencia en circuitos, donde sus motores funcionan por más de 24 horas. En 1.991 Mazda ganó la carrera con el modelo 787B, el mismo que se tomó como referencia para este trabajo.

Se ha logrado identificar que los alerones son un accesorio de competición que ayuda a generar una mayor carga aerodinámica, siendo un elemento clave que influye directamente en el rendimiento en pista en los autos de carrera. El presente análisis busca entender cómo reacciona el prototipo sin alerón y otro con alerón, tomando como punto de partida la influencia que tienen las variables aerodinámicas como el coeficiente de sustentación (C_L), el coeficiente de arrastre, la distribución de presiones, ángulo de ataque, flujo de aire y separación de capa límite, fuerzas y momentos aerodinámicos y elementos finitos. Por otro lado, la implementación de software como ANSYS CFX y ANSYS FLUENT, gracias a su flexibilidad en la alteración de datos permiten corregir la geometría del vehículo y la reducción de polígonos, asegurando una malla sólida. Además, se plantean simulaciones de túnel de viento con el programada DesignModeler de ANSYS alrededor de la geometría del vehículo para estudiar de manera controlada las interacciones del flujo de aire con la superficie del vehículo.

(Watkins, 2021)

Objetivos

Objetivo General

Analizar las variables aerodinámicas y elementos finitos en el desempeño del vehículo Mazda 787 B, para comprender cómo influye el coeficiente de arrastre en el tiempo de carrera en el modelo con alerón y sin alerón.

Objetivos Específicos

- Determinar el efecto del alerón en la resistencia al viento del Mazda 787B mediante simulaciones computacionales.
- Evaluar el impacto del uso de un alerón en la carga aerodinámica que este recibe
- Comparar el desempeño aerodinámico del Mazda 787B con y sin alerón, analizando el coeficiente de arrastre.

Marco Teórico

Aerodinámica

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia el comportamiento del aire en interacción con cuerpos en movimiento, como los vehículos, influyendo en factores clave como la resistencia al avance, la sustentación y la carga aerodinámica. En el campo automovilístico, esta ciencia permite el análisis de la estabilidad, velocidad y eficiencia de los vehículos en pista. Por eso, el análisis aerodinámico es fundamental para evaluar el desempeño del alerón en el Mazda 787B, y determinar el impacto que genera, porque al utilizar alerón existe una mejora en control y en la adherencia en curvas, sin embargo, la resistencia al avance ocasiona una disminución en la velocidad final. De esta manera, se determina si la configuración, con o sin alerón, es la ideal para lograr un equilibrio entre velocidad y estabilidad del vehículo e pista, optimizando así el desempeño del mismo ***Fuente: (Hucho, 2023).***

F.E.A. (Análisis de Elementos Finitos)

El análisis de elementos finitos es un método computarizado utilizado para simular el comportamiento de objetos ante comportamientos aerodinámicos. En este estudio, es fundamental el análisis mencionado porque permite evaluar la carga aerodinámica y la resistencia al avance en el vehículo con o sin alerón en el prototipo diseñado, y al momento de la simulación determinar el tipo de configuración que ofrezca un equilibrio entre control y rendimiento en el automóvil

“El análisis de elementos finitos (FEA) estudia los esfuerzos mecánicos en una pieza, incluyendo vibraciones, calor y flujo de fluidos. Este análisis es crucial para asegurar que las piezas se fabriquen con las tolerancias adecuadas” ***Fuente: (Autodesk, 2024).***

El principio de Bernoulli

Este concepto abarca la ley de la conservación de la energía, en definición este principio indica, si en un fluido ideal, la energía permanece constante a lo largo de todo el recorrido del conducto cerrado, sin embargo, esta situación ideal aplica cuando no existe ni rozamiento, ni viscosidad. Por eso la fórmula de Bernoulli tiene diversas aplicaciones, tomando en cuenta la energía potencial gravitacional, termoquímica, cálculo de trabajo y entre otros, como se evidencia en la siguiente fula.

Formula de Bernoulli

$$\Delta U_g = -mgh$$

El principio determina qué medida que aumenta la rapidez de un fluido, su presión disminuye, es decir, es relación entre la velocidad el aire y la presión que existe en un sistema. Gracias al principio se comprende como el flujo de aire interactúa en la carrocería del Mazda 787B, porque cuando aire se desliza a mayor velocidad sobre ciertas superficies del vehículo, la presión disminuye, cambiando así la estabilidad y control del vehículo. Por eso, al utilizar el alerón en el prototipo existe un cambio en el flujo de aire, ocasionando así mayor carga aerodinámica y diferencia de presiones, causando un aumento de adherencia del vehículo al suelo, por ende, se obtiene mejor desempeño curvas y maniobrabilidad a altas velocidad (White, 2021).

Coeficiente de Arrastre

El coeficiente de arrastre (C_d) es una medida que define la resistencia de un objeto al moverse a través de un fluido, como el aire o agua, y se utiliza en el ámbito automotriz para minimizar la resistencia del aire. **Fuente: (Munson et al., 2020).** Por eso para calcularlo se usa la siguiente fórmula donde se considera la fuerza de arrastre, densidad, velocidad el objeto en el

fluido y el área de referencia perpendicular al flujo.

La fórmula de coeficiente de arrastre es:

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho u^2 A}$$

Fuente: (Engineering, 2024)

En este estudio, el coeficiente de arrastre es fundamental para evaluar el tipo de configuración de con alerón, o sin, en el desempeño del Mazda 787B, porque cuando existe una menor resistencia aerodinámica el vehículo alcanza mayor velocidad, pero en menos tiempo, en cambio, a mayor resistencia existe mejor estabilidad y control del vehículo en curvas, por eso, en las simulaciones se analizará si al utilizar el alerón influye en el coeficiente de arrastre y en la eficiencia aerodinámica del automóvil.

Coeficiente de sustentación

El coeficiente de sustentación mide la capacidad de la superficie en un perfil alar aerodinámico para generar sustentación en relación del aire y con su tamaño, es decir, es la relación de la fuerza de sustentación generada con la densidad del aire, la velocidad del flujo con el área de referencia, en este caso el alerón. La fuerza mencionada es de manera vertical al viento que fluye en el alerón y se representa como L **Fuente: (Muñoz, s.f).**

La fórmula del coeficiente de sustentación es:



The diagram shows the lift equation: $Lift = C_L \times \frac{1}{2} \rho \times V^2 \times S$. It includes four color-coded labels with arrows pointing to the variables: a blue arrow for 'Densidad del aire' (density) pointing to ρ , a green arrow for 'Velocidad' (velocity) pointing to V , a red arrow for 'Ángulo de ataque 12°-14° AOA' (angle of attack) pointing to C_L , and an orange arrow for 'Superficie alar' (wing surface) pointing to S .

Alerones

Los alerones son piezas importantes en la aerodinámica para los vehículos de competición, porque este elemento permite mejorar la estabilidad y adherencia del vehículo al piso, ya que aumenta la carga aerodinámica. En base a lo mencionado, este principio es fundamental para el estudio del Mazda 787B, porque la implementación del mismo cambia la eficiencia aerodinámica del vehículo y el rendimiento en pista, es decir, dependiendo la configuración de los alerones puede generar distintas cargas aerodinámicas, ocasionando un distinto comportamiento del vehículo a velocidad tanto en curvas como en rectas **Fuente:** *(Smith, 2020; Brown, 2019; Johnson, 2021; Williams, 2018).*

Los alerones son piezas que contribuyen a una mejor aerodinámica en el vehículo, se utilizan principalmente en autos de competición o de resistencia ya que además generan el efecto Downforce que significa un efecto de empuje hacia el suelo, mejorando la adherencia y estabilidad del vehículo a velocidad en curvas. Los alerones dependiendo de la cantidad de elementos que los conforman pueden diferenciarse, existen tres tipos, de un solo elemento, de dos elementos y de múltiples elementos.

Alerón de Un Elemento: Este se caracteriza por ser de una sola pieza, significa que su diseño está conformado en el centro del aqueo del perfil ayudando a mantener el efecto Downforce **Fuente: (Smith, 2020).**

Alerón de Dos Elementos: Este tipo de alerón da mayor eficiencia aerodinámica a los que son de un elemento, porque el flujo pasa por dos alerones, y no solo por un solo plano, ocasionando reducción en el desprendimiento de la capa límite del de un solo elemento, así aumenta la velocidad en las curvas, sin embargo, este tipo de configuración puede disminuir en rectas la velocidad porque tiene mayor carga aerodinámica **Fuente: (Brown, 2019).**

Alerón de Múltiples Elementos: Este tipo de alerones cuenta con tres o más planos, causando mayor carga aerodinámica en los neumáticos delanteros, mejorando la distribución del aire y velocidad en las curvas, sin embargo, este tipo de configuración puede frenar al vehículo en las rectas debido a la carga aerodinámica porque mayor resistencia **(Johnson, 2021)**.

Los diferentes tipos de alerones presentan sus ventajas y desventajas en referencia a la eficiencia aerodinámica, la elección del tipo de alerón dependerá de las características del circuito y especificaciones del vehículo **Fuente: (Williams, 2018)**.

Modelo Mazda 787B

Este modelo es emblemático de la marca, ya que se utilizó para realizar análisis aerodinámicos. Este vehículo pertenece a la categoría LMP1 y representa un símbolo ya que fue el primer Mazda con motor rotativo en ganar las 24 Horas de Le Mans en 1991. Otra característica importante del auto es que estaba equipado con un motor Wankel de cuatro rotores, por lo que era la combinación de un innovador diseño y un gran rendimiento.

Además de su éxito en Le Mans, este auto ha sido objeto de numerosos estudios y análisis debido a su avanzada aerodinámica y su contribución al desarrollo de tecnologías de carreras. Su legado perdura no solo en la historia del automovilismo, sino también en la continua evolución de la ingeniería y el diseño de autos de competición **/Fuente: (Escobar, 2022)**.

Materiales

FLUENT y CFX

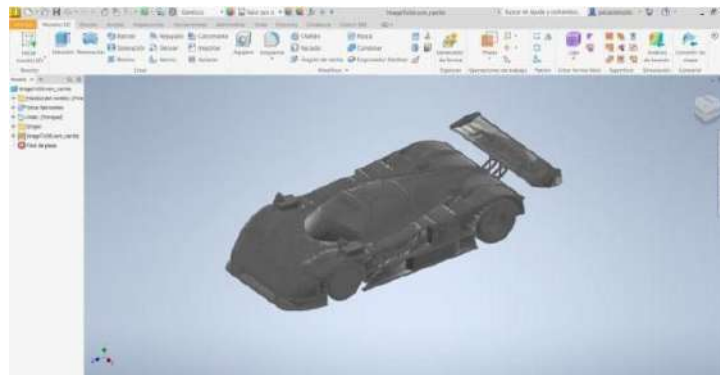
El sistema Fluent es un software especializado en dinámica de fluidos, ampliamente utilizado en ingeniería para simular el comportamiento de fluidos. Debido a que el aire se comporta como un fluido esta herramienta resulta útil en el estudio para simular las circunstancias en las cuales va a interactuar el aire con el alerón y así obtener los valores

correspondientes para dicho calculo.

El cálculo de las simulaciones se ha realizado mediante CFX, el cual es una herramienta que permite simular, entre otros, el comportamiento de sistemas fluidos. Esta herramienta trabaja resolviendo las ecuaciones de flujo fluido en la región de estudio bajo unas condiciones de contorno específicas definidas sobre el dominio de trabajo **Fuente: (andes, s.f.) Fuente: (Library.co, 2024)**

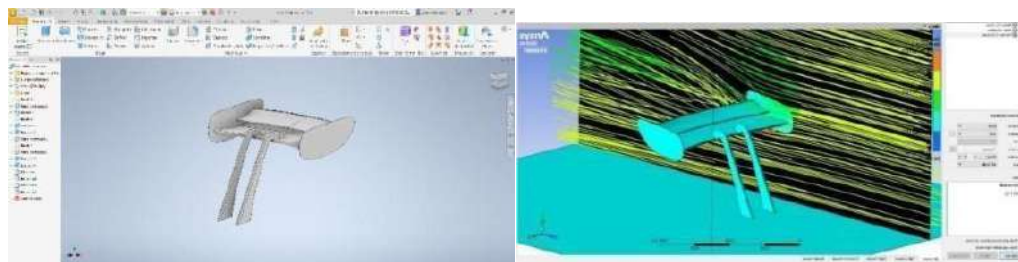
Modelo del Mazda 787B

El vehículo pertenece a la categoría LMP1 y ha sido objeto de numerosos estudios y análisis debido a su avanzada aerodinámica y su contribución al desarrollo de tecnología de carreras. En este caso usaremos una geometría modelada por externos en el programa Inventor Autodesk la cual será simplificada para poder ser admitida por el programa Ansys y ser de ayuda para las modificaciones en el alerón.

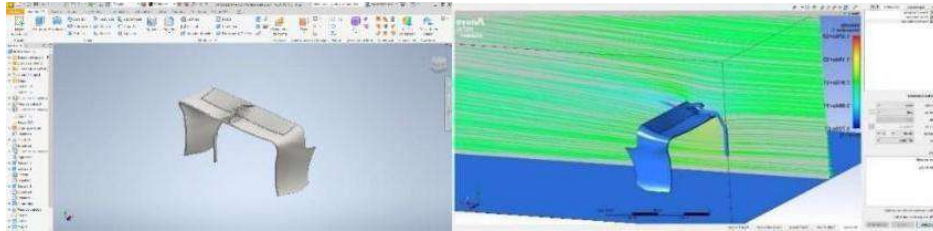


Geometrías de Comparación

Alerón de categoría GT3



Fuente: 2024 Ansys (Autores) Alerón Categoría F1



Fuente: 2024 Ansys (Autores)

Metodología

Se utilizó la metodología explicativa para poder basar la investigación en una comparación de datos y explicar el cómo puede afectar el alerón a los coeficientes de arrastre y aerodinámico de un automóvil, con la creación de tablas comparativas se ilustra el proceso de la obtención de datos de dichos coeficientes y con la ayuda de los programas de simulación proporcionados por Ansys se utilizaron dichos datos para la simulación del entorno de trabajo.

Corrección de Errores en la Geometría y Reducción de Polígonos:

Se utilizó el programa de diseño ANSYS para delimitar las restricciones del estudio y establecer los valores iniciales para tener un punto de partida firme en el cual realizar las simulaciones, además mediante la costura de la malla principal que se convierte en un único cuerpo sólido, el paso indicado es para afirmar que no existan discontinuidades, ni errores en la malla, y así no afecten la precisión del análisis posterior. También, el número de caras se redujo mediante la optimización de polígonos, de esta manera se mejora el procesamiento y se reduce el tiempo del cálculo, así se maneja un diseño más eficiente durante las etapas de simulación en CFD.

Trabajo en la Geometría

En esta sección de estudio para simular el túnel de viento se utiliza el programa DesignModeler de Ansys, donde existe una simulación del espacio en forma de túnel alrededor de la geometría, es decir un "enclosure". De tal manera, el entorno creado es donde se determina las zonas de estudio para el análisis aerodinámico, y así asilar la geometría del entero, de tal manera, se pueda estudiar las interacciones del flujo del aire con la superficie del objeto según las condiciones específicas.

Figura 1:

Figura 2:

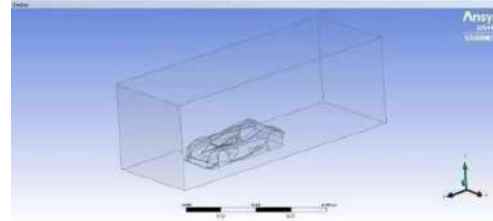
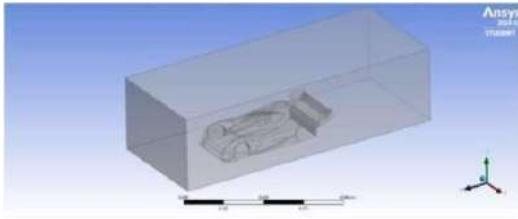


Figura 1: Análisis en la geometría con Alerón Fuente: 2024 Programa Ansys (Autores)

Figura 2: Análisis de geometría sin Alerón Fuente: 2024 Programa Ansys (Autores) Mallado

El mallado es un proceso esencial para convertir la geometría en una serie de elementos que el software pueda simular, por eso se utilizaron técnicas avanzadas para tener una malla con una resolución adecuada en zonas críticas, tomando en cuenta el balance entre precisión y tiempo del cálculo, por eso la simulación del túnel ("enclosure"), se hizo para visualizar la representación física adecuada, de esta manera el aire pueda interactuar de la manera más realista.

Figura 1:

Figura 2:

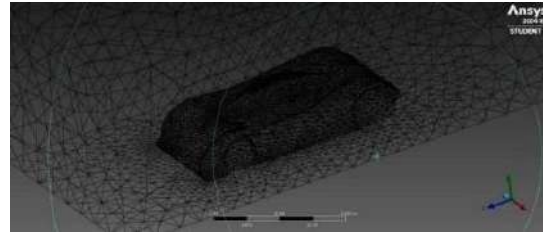
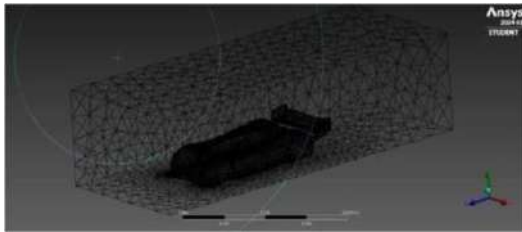


Figura 1: Mallado con Alerón Fuente: 2024 Ansys (Autores)

Figura 2: Mallado sin Alerón Fuente: 2024 Ansys (Autores)

Restricciones y Configuraciones

En el "enclosure" se definieron restricciones físicas para delimitar la zona de estudio, esto comprende la definición de las paredes del túnel y la condición de entrada y salida del flujo del aire u otra condición relevante. Por ende, los parámetros esenciales se configuraron como la presión atmosférica y la velocidad del viento, se crearon estos parámetros porque se estableció

condiciones reales y escenarios específicos que se desean analizar, de esta manera, la simulación sea con precisión al entorno operativo del automóvil.

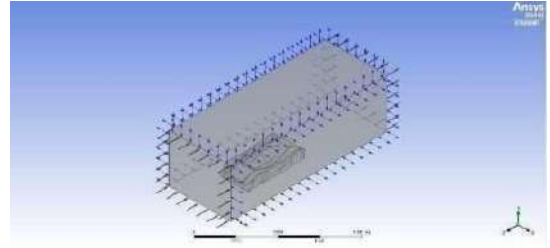
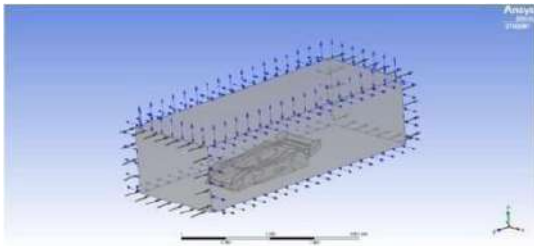


Figura. – Trabajo de restricciones y configuraciones con Alerón Fuente: 2024 Programa Ansys (Autores)

En esta sección, según los ejes de coordenadas especificados indicadas para el estudio, se obtuvo los valores necesarios con la simulación del entorno que se creó. Durante la fase de solución, se utilizó el Software de Ansys para realizar los cálculos de flujo y presión. Este proceso implica unas 60 iteraciones hasta que se alcanzan soluciones convergentes, lo que asegura que los resultados sean precisos y fiables.

Condiciones iniciales

Temperatura del aire

Durante el verano entre los meses de junio hasta agosto hay una temperatura promedio de 25 grados Celsius en el circuito de Le Mans **Fuente: (Spark s.f)**

Velocidad en la pista

En la década de los años 90s los autos alcanzaban una velocidad promedio de 270 km/h por lo que se ha determinado esta misma velocidad para el presente análisis. **Fuente: (Motorsport, 2020)**

La presente tabla tiene como objetivo establecer los parámetros de referencia con los que se inicia el análisis. Estos datos, permiten garantizar la precisión y reproducibilidad de los

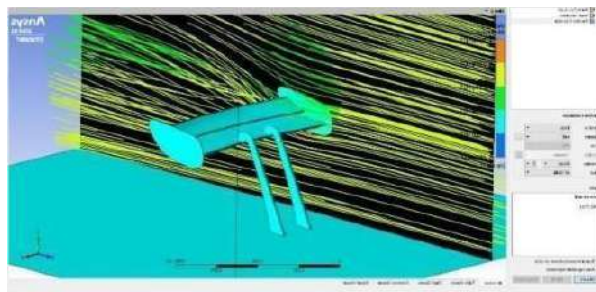
resultados. Además, una correcta definición de las condiciones iniciales facilita la comparación entre distintos escenarios. **Fuente: (Munson et al., 2020).**

Velocidad	270km/h o 75 m/s
Presión Atmosférica	1 atm
Material del Auto	aluminio
Tamaño del Mallado	0,5 m
Fluido	aire a 25 grados Celsius

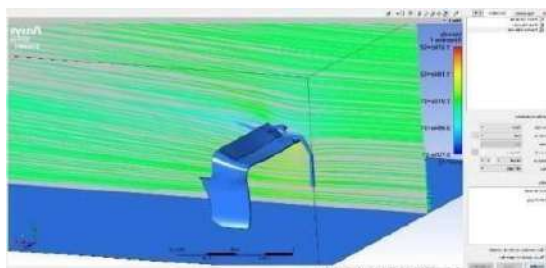
Tabla 1.- Parámetros Fuente: 2024 Ansys (Autores)

Comparación de alerones:

Categoría GT3: El coeficiente de arrastre de la categoría GT3 (C_{dC_dCd}) del alerón es aproximadamente **0.773**.



Categoría F1: El coeficiente de arrastre (C_{dC_dCd}) del alerón en la imagen es aproximadamente **0.3297**.



Resultados

Modelo	Con alerón	Sin alerón
Fuerza del aire	35,1317N	19,4133N
Coefficiente de arrastre	0,0005732	0,0003167

Tabla 2. - Resultados Fuente: 2024 (Autores)

Los datos obtenidos de la simulación se resolvieron utilizando la formula del coeficiente de fricción y se realizó una comparación detallada del rendimiento del vehículo sin el alerón trasero, obteniendo como resultado un 55,2% menos resistencia al aire en el modelo sin alerón.

En aerodinámica la resistencia al viento es un factor clave que limita la velocidad máxima de un vehículo, al disminuir esta variable con la misma potencia se puede alcanzar velocidades más altas sin embargo esto viene con su contraparte de al tener menor resistencia contra el viento el auto perderá adherencia al piso causando una disminución en el agarre.

Prueba con Alerón

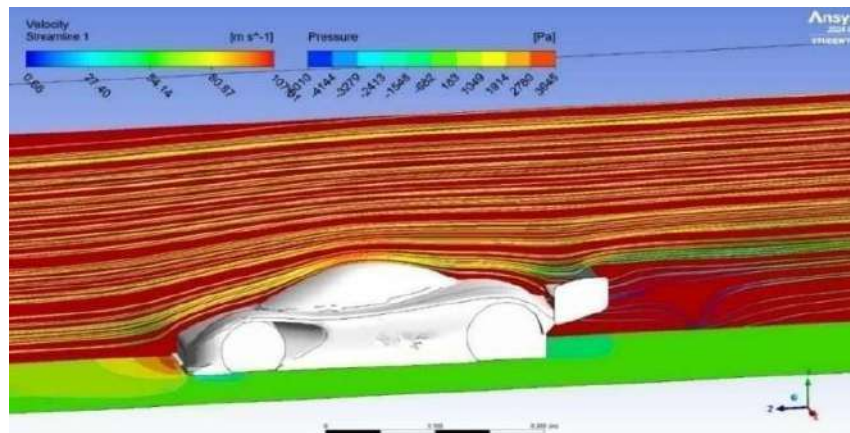


Figura. - Resultados con alerón Fuente: 2024 Ansys (Autores)

Resultado de ecuación con alerón

Fd: 35.1317 N

P: 1.184 kg/m³

V: 270 km/h

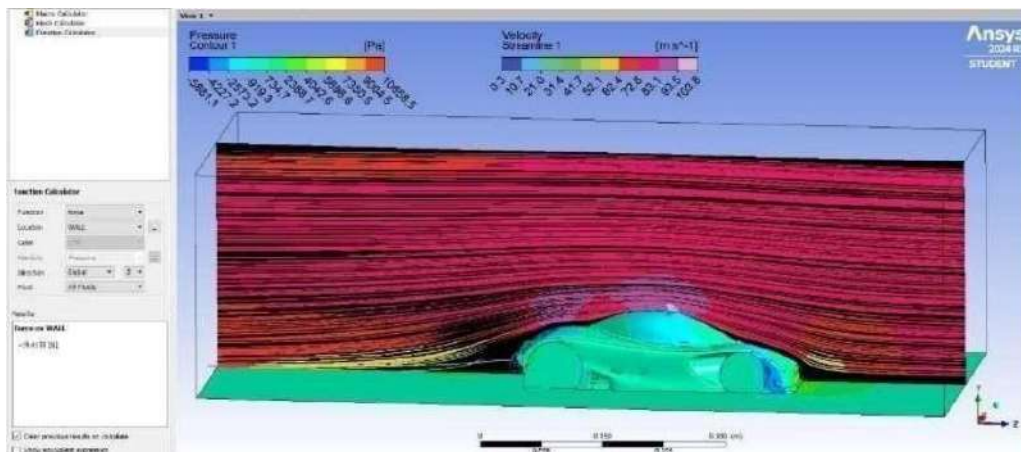
Ecuación del coeficiente de arrastre del modelo con alerón

A: 1,1994134

$$C_D = \frac{35,1317}{\frac{1}{2} (1.184 \times 270)^2 * 1.1994134}$$

$$C_D = 0,0005732$$

Prueba sin alerón



Resultados de ecuación sin alerón

Fd: 19,4133 N

p: 1.184 kg/m³

V: 270 km/h

A: 1,1994134

Ecuación del Coeficiente de arrastre del modelo sin alerón

CD: Coeficiente de arrastre 19,4133

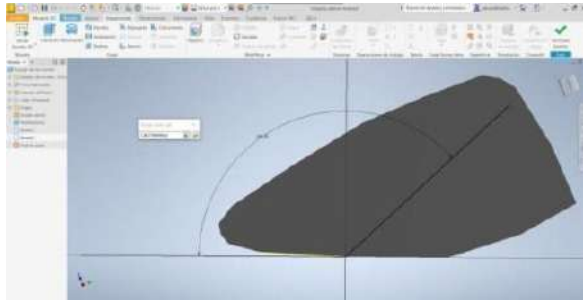
19,4133

$$C_D = \frac{19,4133}{\frac{1}{2} (1.184 \times 270)^2 * 1.1994134}$$

$$C_D = 0,0003167$$

Cálculo del coeficiente de sustentación

Angulo de ataque



$$CL = 136,7^\circ$$

$$\rho = 1,184 \text{ kg/m}^3 \quad V = 270 \text{ km/h} \quad S = 1,1994134$$

L = coeficiente de sustentación

$$L = 136.7 \cdot \frac{1}{2 \cdot 1.184 \cdot 270^2 \cdot 1.1994134}$$

$$L = 0.00066022$$

Validación

Los datos de validación revelan una variación en 6 newtons (2% margen de error) con respecto al análisis realizado en CFD, esto ayuda a verificar los datos ya que es un valor que entra dentro del margen de error de entre 2% al 5% demostrando que el análisis puede obtener resultados similares en los programas de simulación de fluidos

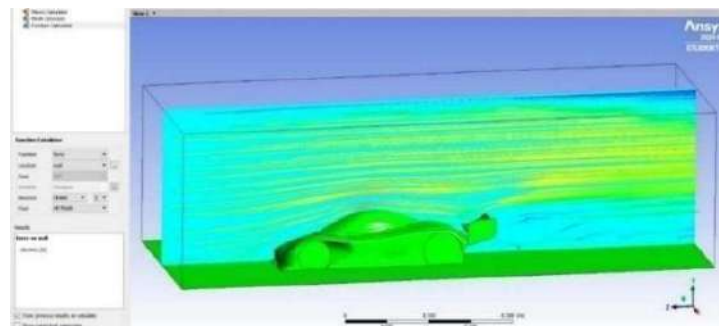


Figura. – Validación con Fluent Fuente: 2024 Ansys Autores)

Fd: 29,3435 N

p: 1.184 kg/m³

V: 270 km/h

Cd: Coeficiente de arrastre

A: 1,1994134

$$C_D = \frac{29,3435}{\frac{1}{2} (1.184 \times 270)^2 * 1.1994134}$$

$$C_D = 0,0004787$$

Ecuación del Coeficiente de Arrastre del Modelo Fluent con alerón.

Datos de Validación

Tabla 3.- Datos de Validación

Modelo	Con Alerón	Validación de Fluent
Fuerza de Aire	35,131 N	29,3435 N
Coeficiente de Arrastre	0,0005732	0,0004787

Conclusiones

El análisis aerodinámico de dos modelos de Mazda 787B, realizado mediante simulaciones computacionales utilizando el software CFX y pruebas en túnel de viento, ha proporcionado una comprensión detallada del flujo de aire alrededor de los vehículos. En el estudio el objetivo general es el análisis del vehículo con alerón (modelo 1) y sin alerón (modelo 2), con objetivos específicos que identifiquen zonas de mejora que permitan incrementar la velocidad final y lograr comparar el rendimiento del prototipo con alerón, y sin él.

Por eso, en las simulaciones computacionales el modelo 2 cuenta con menor resistencia al aire en comparación al modelo 1, determinando que el modelo 2 reduce el arrastre del vehículo con el aire, de esta manera, el vehículo presenta mayor capacidad para alcanzar mayores velocidades finales.

Impacto del Alerón

En conclusión, se determinó que el vehículo con alerón tiene un coeficiente de arrastre de 0.0005732, en cambio, el vehículo sin alerón presenta un coeficiente de 0.0003167, por consecuencia es una mejora en términos de eficiencia aerodinámica. Igualmente, se validó que el vehículo cuando tiene alerón presenta un incremento en la sustentación del vehículo, en este caso es de 0.00066022, generando mayor resistencia al aire. Es decir, al actuar la fuerza en la dirección del eje Y (fuerza vertical) provoca que el vehículo se presione más sobre el suelo y por ende aumente la adherencia al asfalto, así el vehículo presenta mejor estabilidad y tracción a altas velocidades. Sin embargo, el no poseer alerón también tiene sus ventajas, porque ofrece una menor resistencia a la aerodinámica, de esta forma el vehículo alcanza mayores velocidades con el menor esfuerzo del motor.

Bibliografía

- Hybrid. (2024). *Mazda D*Análisis, uno a uno, de todos los LMP1 de Le Mans .
pistonudos.com. <https://pistonudos.com>
- Scalemates. (2020). *Mazda 767B 1992 JSPC*. <https://www.scalemates.com/es/kits/hasegawa-20539-alexel-mazda-767b-1992-jspc--1372923>
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., & Rothmayer, A. P. (2020). *Fundamentals of fluid mechanics* (8th ed.). Wiley.
- Logan, D. L. (2012). *A first course in the finite element method* (5th ed.). Cengage Learning.
- Hucho, W. H. (2013). *Aerodynamics of road vehicles: From fluid mechanics to vehicle engineering* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Watkins, G. (2021). *Mazda 787B: Cuando un "hypercar" rotativo dominó Le Mans*. Motorsport. <https://es.motorsport.com/lemans/news/Mazda-787b-Le-Mans-rotativo-wankel/6628119/>
- Autodesk. (2024). *F.E.A*. <https://www.autodesk.com/latam/solutions/finite-element-analysis>
- Autodesk. (2024). *Elementos Finitos*. <https://www.autodesk.com/latam/solutions/finite-element-analysis>
- Popoca, P. (2013). *Principio de Bernoulli*. <https://www.oneair.es/principio-de-bernoulli/> Air. (s.f.). *Bernoulli*. <https://www.oneair.es/principio-de-bernoulli/>
- Engineering. (2024). *Coeficiente de arrastre*. <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-coeficiente-de-arrastre-caracteristicas-de-arrastre-definicion/>
- Finders. (2024). *Aerodinámica*.
<https://rentingfinders.com/glosario/aerodinamica/#:~:text=La%20aerodin%C3%A1mica%20es%20una%20ciencia,el%20veh%C3%ADculo%20seg%C3%BAAn%20sus%20formas>

Andes. (s.f.). *FLUENT Y CFX*. <https://tecnologia.uniandes.edu.co/ansys-fluent/Library.co>.

(2024). *FLUENT Y CFX*. <https://1library.co/article/ansys-cfx-proceso-de-modelado-y-simulaci%C3%B3n.q290w1ez>

Escobar, J. (2022). *Mazda 787B*. Autobild. <https://www.autobild.es/reportajes/increible-historia-mazda-787b-1087851>

Soler, E. (2024). *Ansys*.

<https://www.nysplm.com/ansys/#:~:text=Ansys%20es%20el%20Software%20%C3%ADder,una%20%C3%BAnica%20plataforma%20de%20trabajo>

F1Technical.net. (2024). *Formula 1*. <https://www.f1technical.net/> IndyCar. (2024). *IndyCar*.

<https://www.indycar.com/>

Championship. (2024). *World Endurance Championship (WEC)*. <https://www.fiaawec.com/> Paine,

D. (2022). *NASCAR*. <https://www.nascar.com/news-media/2024/07/03/how-does-nascars-overtime-policy-compare-to-other-sports/>

GmbH. (2024). *Rally (WRC)*. <https://www.wrc.com/>

DMT. (2024). *Turismo (DMT, BTCC, WTCR)*. <https://www.dtm.com/en> World. (2013). *Formula*

E. <https://www.fiaformulae.com/en>

Katz, J. (1996). *Race car aerodynamics*. Barnes & Noble.

<https://www.barnesandnoble.com/w/race-car-aerodynamics-j-katz/1112511085>

Aerodinámica F1. (s.f.). *Alerón trasero F1*. <https://www.aerodinamicaf1.com/aerodinamica-en-la-formula-1/el-aleron-trasero/>

Katz, J. (1996). *Race car aerodynamics*. Barnes & Noble.

<https://www.barnesandnoble.com/w/race-car-aerodynamics-j-katz/1112511085>

Watkins, G. (2021). *Hipercoches Le Mans: Velocidad máxima, normas y diferencias con LMP1*.

Motorsport Network. <https://lat.motorsport.com/lemans/news/caracteristicas-hipercoches-lemans-wec-velocidad-costos-2021/6649628/>

Muñoz. (s.f.). *Fuerzas en vuelo*. Recuperado el 4 de febrero de 2025, de https://manualvuelo.es/1pbav/13_fuerz.html#toc132

Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., & Rothmayer, A. P. (2020). *Fundamentals of fluid mechanics* (8th ed.). Wiley.