



**UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**CARRERA DE MECÁNICA**

Trabajo de Integración  
Curricular previa la obtención  
del Grado Académico de  
Ingeniero Mecánico.

**Proyecto de Investigación:**

**DISEÑO AERODINÁMICO DE UN ALERÓN TRASERO FABRICADO CON  
MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA APLICADO EN UN  
VEHÍCULO DE COMPETICIÓN**

**Autor:**

ROBINSON ALEXANDER CEVALLOS MANZABA

**Director de Proyecto de Investigación**

ING. CRISTIAN PAÚL TOPA CHUQUITARCO, M.Sc.

**Quevedo – Los Ríos – Ecuador**

**2024**



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **ROBINSON ALEXANDER CEVALLOS MANZABA**, declaro que la investigación aquí descrita es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**ROBINSON ALEXANDER CEVALLOS MANZABA**

**C.I.: 0928087774**



## CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Ing. Cristian Paúl Topa Chuquitarco, M.Sc.**, Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante **Robinson Alexander Cevallos Manzaba**, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado "**Diseño aerodinámico de un alerón trasero fabricado con materiales compuestos de matriz polimérica aplicado en un vehículo de competición**", previo a la obtención del título de **Ingeniero Mecánico**, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.



Firmado electrónicamente por:  
CRISTIAN PAUL TOPA  
CHUQUITARCO

---

**Ing. Cristian Paúl Topa Chuquitarco, M.Sc.**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**



## CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

El suscrito, **Ing. Cristian Paúl Topa Chuquitarco, M.Sc.**, mediante el presente cumpla en presentar a usted, el informe de Proyecto de Investigación titulado "**Diseño aerodinámico de un alerón trasero fabricado con materiales compuestos de matriz polimérica aplicado en un vehículo de competición**". Presentado por el estudiante **Robinson Alexander Cevallos Manzaba**, egresado de la Carrera de Mecánica, que fue revisado bajo mi dirección según la Resolución del Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, que se ha desarrollado de acuerdo al Reglamento de la Unidad de Integración Curricular de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y cumple con el requerimiento de análisis de COMPILATIO el cual avala los niveles de originalidad en un 96 % y similitud 4 %, del trabajo investigativo. Valido este documento para que el estudiante siga con los trámites pertinentes, de acuerdo como lo establece el Reglamento.

 CERTIFICADO DE ANÁLISIS  
magister

**DISEÑO AERODINÁMICO DE UN ALERÓN TRASERO FABRICADO CON MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA APLICADO EN UN VEHÍCULO DE COMPETICIÓN**

**4%** Textos sospechosos

**4% Similitudes**  
< 1% similitudes entre comillas  
0% entre las fuentes mencionadas  
< 1% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: DISEÑO AERODINÁMICO DE UN ALERÓN TRASERO FABRICADO CON MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA APLICADO EN UN VEHÍCULO DE COMPETICIÓN.pdf	ID del documento: 1cc3a0ffa8f32909e3e108dba883ca700bec5d9b	Tamaño del documento original: 4.45 MB	Depositante: CRISTIAN PAUL TOPA CHUQUITARCO	Fecha de depósito: 14/3/2024	Tipo de carga: interface	fecha de fin de análisis: 14/3/2024	Número de palabras: 18.652	Número de caracteres: 136.557
--	--	--	---	------------------------------	--------------------------	-------------------------------------	----------------------------	-------------------------------

Ubicación de las similitudes en el documento:



Firmado electrónicamente por:  
**CRISTIAN PAUL TOPA CHUQUITARCO**

**Ing. Cristian Paúl Topa Chuquitarco, Ms.c.**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**CARRERA DE MECÁNICA**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**Título:**

"Diseño aerodinámico de un alerón trasero fabricado con materiales compuestos de matriz polimérica aplicado en un vehículo de competición"

Presentado al Consejo Directivo de Facultad como requisito previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Aprobado por:



Firmado electrónicamente por:  
**OMAR ARTURO**  
**CEVALLOS MUÑOZ**

---

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

Ing. Omar Arturo Cevallos Muñoz, M.Sc.



Firmado electrónicamente por:  
**YUSIMIT KARINA**  
**ZAMORA HERNANDEZ**

---

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

Ing. Yusimit Karina Zamora Hernández, M.Sc.



Firmado electrónicamente por:  
**GABRIEL ALEJANDRO**  
**ARELLANO ORTIZ**

---

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

Ing. Gabriel Alejandro Arellano Ortiz, M.Sc.

QUEVEDO – LOS RÍOS – ECUADOR

2024

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi familia, docentes y amigos por haberme guiado por el sendero del bien y hacer de mí, una persona responsable y con valores.

**Robinson Alexander Cevallos Manzaba**

## **DEDICATORIA**

Este proyecto es dedicado para mis padres; Ramón Cevallos y Mercedes Manzaba; por haber depositado su confianza en mí y hacer posible este gran logro.

**Robinson Alexander Cevallos Manzaba**

## RESUMEN Y PALABRAS CLAVES

Este proyecto se centra en el diseño y análisis aerodinámico de un alerón posterior fabricado con un compuesto de matriz polimérica (PMC) para su implementación en vehículos de competición. Los objetivos incluyen la determinación del ángulo de ataque óptimo y la ubicación eficiente del alerón para maximizar la carga aerodinámica, un análisis de Interacción Fluido-Estructura (FSI) utilizando epoxi - bjjao, la validación del epoxi - bjjao frente a compuestos poliméricos convencionales y pruebas de un prototipo en un túnel aerodinámico. Se destaca la importancia de optimizar la eficiencia aerodinámica en vehículos de competición, especialmente mediante alerones posteriores. Se aborda la limitación de los materiales metálicos tradicionales y se introduce el PMC como una alternativa ligera y flexible. El diseño se basa en perfiles aerodinámicos recomendados por la Federación Internacional del Automóvil (FIA), buscando mejorar la estabilidad y agarre a altas velocidades. El estudio concluye que un ángulo de ataque de  $-14^\circ$  maximiza la carga aerodinámica, validando los resultados con simulaciones computacionales. El análisis FSI del epoxi - bjjao revela deformaciones y esfuerzos máximos, comparándose con otros compuestos. Se desaconseja el uso del epoxi - bjjao en componentes aerodinámicos debido a su baja resistencia y excesiva deformación. Las pruebas en el túnel aerodinámico respaldan las simulaciones fluidodinámicas, aunque se recomienda la validación física. Este proyecto busca mejorar la eficiencia y rendimiento aerodinámico en vehículos de competición, ofreciendo perspectivas valiosas para el diseño y selección de materiales en alerones posteriores.

**Palabras claves:** Alerón posterior, Carga aerodinámica, Compuesto de matriz polimérica, Condiciones de contornos, Dominio computacional, Interacción Fluido - Estructura.

## ABSTRACT AND KEYWORDS

This project focuses on the design and aerodynamic analysis of a rear wing made of a polymer matrix composite (PMC) for implementation in motorsport vehicles. The objectives include determining the optimal angle of attack and efficient placement of the wing to maximize downforce, a Fluid-Structure Interaction (FSI) analysis using epoxy - bijao, validation of epoxy - bijao against conventional polymer composites, and testing of a prototype in a wind tunnel. The importance of optimizing aerodynamic efficiency in motorsport vehicles is highlighted, especially through rear wings. The limitation of traditional metallic materials is addressed, and PMC is introduced as a lightweight and flexible alternative. The design is based on aerodynamic profiles recommended by the Fédération Internationale de l'Automobile (FIA), aiming to improve stability and grip at high speeds. The study concludes that an angle of attack of  $-14^\circ$  maximizes downforce, validating the results with computational simulations. The FSI analysis of epoxy - bijao reveals maximum deformations and stresses, comparing it to other composites. The use of epoxy - bijao in aerodynamic components is discouraged due to its low strength and excessive deformation. Wind tunnel tests support the fluid dynamics simulations, although physical validation is recommended. This project aims to improve aerodynamic efficiency and performance in motorsport vehicles, offering valuable insights for the design and selection of materials in rear wings.

**Keywords:** Boundary conditions, Computational domain, Downforce, Fluid – Structure Interaction, Polymer matrix composite.

## TABLA DE CONTENIDO

PORTADA.....	i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS .....	ii
CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN .....	iii
CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO .....	iv
CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
DEDICATORIA .....	vii
RESUMEN Y PALABRAS CLAVES .....	viii
ABSTRACT AND KEYWORDS .....	ix
TABLA DE CONTENIDO.....	x
CÓDIGO DUBLIN .....	xi
GLOSARIO DE TÉRMINOS Y FÓRMULAS.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	2
1.1. Problema de la investigación.....	3
1.1.1. Planteamiento del problema .....	3
1.1.2. Formulación del problema.....	4
1.1.3. Sistematización del problema.....	4
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivo general .....	5
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. Justificación.....	6
CAPÍTULO II FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	7
2.1. Marco conceptual .....	8
2.1.1. Aerodinámica.....	8

2.1.2. Fuerza y momento aerodinámicos.....	8
2.1.3. Coeficientes aerodinámicos.....	11
2.1.4. Perfil aerodinámico.....	13
2.1.5. Centro de presión.....	14
2.1.6. Ángulo de ataque.....	15
2.1.7. Perfil simétrico y de curvatura.....	15
2.1.8. Envergadura.....	16
2.1.9. Distribución de la presión sobre un perfil aerodinámico.....	17
2.1.10. Número de Mach.....	18
2.1.11. Número de Reynolds.....	18
2.1.12. Dispositivos aerodinámicos en vehículos.....	19
2.1.13. Alerón posterior.....	20
2.1.14. Clasificación del alerón posterior.....	20
2.1.15. Placas laterales.....	21
2.1.16. Túnel aerodinámico subsónico.....	22
2.2. Marco referencial.....	23
<b>CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>25</b>
3.1. Localización.....	26
3.2. Tipo de investigación.....	26
3.2.1. Investigación documental.....	26
3.2.2. Investigación correlacional.....	26
3.3. Métodos de investigación.....	27
3.3.1. Método deductivo-inductivo.....	27
3.3.2. Método experimental.....	27
3.4. Fuentes de recopilación de información.....	27
3.4.1. Fuentes primarias.....	27
3.4.2. Fuentes secundarias.....	27

3.5. Diseño de la investigación.....	27
3.6. Instrumentos de investigación .....	28
3.6.1. Simulación numérica .....	28
3.6.2. Túnel de viento .....	28
3.6.3. Análisis de resultados .....	28
3.7. Tratamiento de los datos .....	28
3.8. Recursos humanos y recursos materiales .....	29
3.8.1. Recursos humanos .....	29
3.8.2. Recursos materiales .....	29
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	30
4.1. Diseño.....	31
4.1.1. Vehículo de turismo .....	31
4.1.2. Perfil aerodinámico.....	31
4.1.3. Conjunto del alerón posterior .....	32
4.2. Dominio computacional .....	34
4.2.1. Mallado del perfil aerodinámico (bidimensional) .....	34
4.2.2. Mallado del vehículo (bidimensional).....	35
4.2.3. Mallado del alerón posterior (tridimensional).....	36
4.3. Condiciones de contorno y condiciones de volumen .....	36
4.3.1. Condiciones de contorno y de volumen para el perfil aerodinámico .....	37
4.3.2. Condiciones de contorno y de volumen para el vehículo .....	39
4.3.3. Condiciones de contorno para el alerón posterior .....	40
4.4. Resultados.....	41
4.4.1. Cálculos previos .....	41
4.4.2. Análisis CFD del perfil aerodinámico .....	48
4.4.3. Análisis CFD del vehículo .....	56
4.4.4. Análisis CFD del alerón posterior .....	63

4.4.5. Análisis estructural estático del alerón posterior .....	69
4.5. Validación aerodinámica en túnel de viento .....	74
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	80
5.1. Conclusiones.....	81
5.2. Recomendaciones .....	83
CAPÍTULO VI BIBLIOGRAFÍA .....	85
6.1. Referencias bibliográficas .....	86
CAPÍTULO VII ANEXOS .....	89

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Parámetros empleados en la generación de la capa límite [18].</i> .....	34
Tabla 2 <i>Condiciones de contorno y de volumen para el perfil aerodinámico.</i> .....	38
Tabla 3 <i>Condiciones de contorno y de volumen para el vehículo.</i> .....	39
Tabla 4 <i>Condiciones de contorno y de volumen para el alerón posterior.</i> .....	42
Tabla 5 <i>Coefficiente de sustentación analítico para el perfil aerodinámico.</i> .....	47
Tabla 6 <i>Coefficiente de arrastre del perfil aerodinámico a <math>70 \text{ m s}^{-1}</math>.</i> .....	49
Tabla 7 <i>Coefficiente de sustentación del perfil aerodinámico a <math>70 \text{ m s}^{-1}</math>.</i> .....	50
Tabla 8 <i>Coefficiente de arrastre y sustentación del vehículo a <math>70 \text{ m s}^{-1}</math>.</i> .....	57
Tabla 9 <i>Coefficiente de arrastre y sustentación del alerón posterior a <math>70 \text{ m s}^{-1}</math>.</i> .....	63
Tabla 10 <i>Propiedades representativas de los materiales empleados.</i> .....	69
Tabla 11 <i>Esfuerzos, deformaciones y elongaciones máximos en el alerón.</i> .....	70
Tabla 12 <i>Comparación de las velocidades del flujo cerca del prototipo del alerón a una velocidad del flujo libre de <math>3.73 \text{ m s}^{-1}</math>.</i> .....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Tendencia histórica de los coeficientes de resistencia en un vehículo [3].</i> .....	8
Figura 2 <i>Descomposición de la fuerza aerodinámica en un vehículo.</i> .....	9
Figura 3 <i>Representación de la componente vertical de la fuerza aerodinámica con respecto a la dirección del viento.</i> .....	10
Figura 4 <i>Definición del área de planta en un perfil aerodinámico.</i> .....	12
Figura 5 <i>Esquema de un perfil aerodinámico (NACA 4520).</i> .....	13
Figura 6 <i>Componentes de la fuerza aerodinámica en el centro de presión y en un diferencial de superficie del perfil aerodinámico.</i> .....	14
Figura 7 (a) <i>Representación de un vehículo al momento de girar y, (b) efecto estabilizador en un vehículo cuando el centro de presión se desplaza hacia atrás.</i> .....	15
Figura 8 <i>Efecto de la curvatura del perfil aerodinámico sobre los coeficientes de sustentación y resistencia aerodinámica [8].</i> .....	16
Figura 9 <i>Distribución de la presión alrededor un perfil NACA 4520 con una incidencia de (a) 0°, (b) 5°, (c) 10° y, (d) 15°.</i> .....	17
Figura 10 <i>Clasificación de los flujos según el número de Mach [3][12].</i> .....	18
Figura 11 <i>Vista posterior de un vehículo (a) con alerón simple, y (b) con alerón multielementos.</i> .....	20
Figura 12 <i>Esquema gráfico de la importancia de las placas laterales en un alerón posterior.</i> .....	21
Figura 13 <i>Túnel de viento (a) de circuito abierto y, (b) de circuito cerrado [7].</i> .....	22
Figura 14 <i>Ubicación de la UTEQ, extensión La María.</i> .....	26
Figura 15 <i>Peugeot 380 TCR [20].</i> .....	31
Figura 16 <i>Perfil aerodinámico WTCR.</i> .....	32
Figura 17 <i>Conjunto del alerón posterior.</i> .....	32
Figura 18 <i>Alerón posterior.</i> .....	33
Figura 19 <i>Placa lateral.</i> .....	33
Figura 20 <i>Dominio computacional para el perfil aerodinámico.</i> .....	35
Figura 21 <i>Dominio computacional para el vehículo.</i> .....	36
Figura 22 <i>Dominio computacional para el alerón posterior.</i> .....	37
Figura 23 <i>Condiciones de contorno y de volumen para el perfil aerodinámico.</i> .....	38
Figura 24 <i>Condiciones de contorno y de volumen para el vehículo.</i> .....	40

Figura 25	<i>Condiciones de contorno y de volumen para el alerón posterior.</i>	41
Figura 26	<i>Espesor y curvatura máximos obtenidos en XFLR5.</i>	46
Figura 27	<i>Coefficiente de sustentación analítico del perfil aerodinámico.</i>	48
Figura 28	<i>Coefficiente de arrastre y sustentación del perfil aerodinámico a <math>70 \text{ m s}^{-1}</math>.</i>	51
Figura 29	<i>Coefficiente de presión del perfil aerodinámico a <math>70 \text{ m s}^{-1}</math>.</i>	52
Figura 30	<i>Campo de velocidad y presión del perfil aerodinámico a (a) <math>0^\circ</math>, y (b) <math>-14^\circ</math>.</i>	54
Figura 31	<i>Coefficiente de arrastre y sustentación del vehículo a <math>70 \text{ m s}^{-1}</math>.</i>	58
Figura 32	<i>Campo de velocidad y presión del vehículo (a) sin accesorios aerodinámicos, y (b) con alerón posterior.</i>	60
Figura 33	<i>Coefficiente de presión del vehículo a <math>70 \text{ m s}^{-1}</math>.</i>	62
Figura 34	<i>Campo de presión sobre el alerón (a) bidimensional, (b) tridimensional sin placas laterales, y (c) tridimensional con placas laterales.</i>	64
Figura 35	<i>Campo de velocidades del alerón posterior en (a) la parte central, (b) al extremo del alerón, (c) en las placas laterales, y (d) líneas de flujo sobre el componente aerodinámico.</i>	67
Figura 36	<i>Asignación de las condiciones mecánicas para el análisis estructural.</i>	70
Figura 37	<i>Campo de (a) esfuerzos, y (b) deformaciones en el alerón posterior.</i>	72
Figura 38	<i>(a) Túnel de viento, y (b) secciones del equipo [26].</i>	74
Figura 39	<i>Materiales para la fabricación del prototipo de ensayo.</i>	75
Figura 40	<i>Prototipo del alerón.</i>	76
Figura 41	<i>Ubicación de los puntos de análisis en el prototipo del alerón.</i>	77
Figura 42	<i>Fase de ensayo.</i>	77
Figura 43	<i>Comparación de los resultados del ensayo en el túnel aerodinámico frente a la simulación fluidodinámica.</i>	79

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 <i>Coeficiente de arrastre.</i> .....	11
Ecuación 2 <i>Coeficiente de sustentación.</i> .....	11
Ecuación 3 <i>Coeficiente de viento cruzado.</i> .....	11
Ecuación 4 <i>Velocidad del fluido.</i> .....	12
Ecuación 5 <i>Coeficiente de momento de balanceo.</i> .....	12
Ecuación 6 <i>Coeficiente de momento de guiñada.</i> .....	12
Ecuación 7 <i>Coeficiente de momento de cabeceo.</i> .....	12
Ecuación 8 <i>Relación de aspecto.</i> .....	17
Ecuación 9 <i>Coeficiente de presión.</i> .....	17
Ecuación 10 <i>Número de Mach.</i> .....	18
Ecuación 11 <i>Número de Reynolds.</i> .....	19
Ecuación 12 <i>Coeficiente de fricción en la superficie.</i> .....	43
Ecuación 13 <i>Esfuerzo cortante sobre una superficie.</i> .....	43
Ecuación 14 <i>Velocidad de rozamiento.</i> .....	43
Ecuación 15 <i>Altura de la primera celda.</i> .....	44
Ecuación 16 <i>Coeficiente de sustentación analítico para un perfil aerodinámico.</i> .....	45

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 <i>Extracto de 2022 FIA WTCR Technical Regulations</i> .....	90
Anexo 2. <i>Solicitud de homologación del vehículo Peugeot 308 TCR</i> .....	93

## CÓDIGO DUBLIN

Título:	Diseño aerodinámico de un alerón posterior fabricado con compuesto de matriz polimérica aplicado en vehículos de competición			
Autor:	<u>Cevallos Manzaba, Robinson Alexander</u>			
Palabras clave:	Carga aerodinámica	Condiciones de contornos	Dominio computacional	Interacción Fluido-Estructura
Fecha de publicación:				
Editorial:	Quevedo – UTEQ "La María", 2024			
Resumen:	<p>Este proyecto se centra en el diseño y análisis aerodinámico de un alerón posterior fabricado con un compuesto de matriz polimérica (PMC) para su implementación en vehículos de competición. Los objetivos incluyen la determinación del ángulo de ataque óptimo y la ubicación eficiente del alerón para maximizar la carga aerodinámica, un análisis de Interacción Fluido-Estructura (FSI) utilizando epoxi - bijao, la validación del epoxi - bijao frente a compuestos poliméricos convencionales y pruebas de un prototipo en un túnel aerodinámico. Se destaca la importancia de optimizar la eficiencia aerodinámica en vehículos de competición, especialmente mediante alerones posteriores, se destaca. Se aborda la limitación de los materiales metálicos tradicionales y se introduce el PMC como una alternativa ligera y flexible. (...)</p>			
Abstract:	<p><b>This project focuses on the design and aerodynamic analysis of a rear wing made of a polymer matrix composite (PMC) for implementation in motorsport vehicles. The objectives include determining the optimal angle of attack and efficient placement of the wing to maximize downforce, a Fluid-Structure Interaction (FSI) analysis using epoxy - bijao, validation of epoxy - bijao against conventional polymer composites, and testing of a prototype in a wind tunnel. The importance of optimizing aerodynamic efficiency in motorsport vehicles is highlighted, especially through rear wings. The limitation of traditional metallic materials is addressed, and PMC is introduced as a lightweight and flexible alternative. (...)</b></p>			
Descripción	115 hojas: dimensiones, 29 x 21 cm + CD-ROM			
URI:				

## GLOSARIO DE TÉRMINOS Y FÓRMULAS

$a_\infty$  : velocidad del sonido [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$A$  : superficie proyectada [ $\text{m}^2$ ]

$\alpha$  : ángulo de ataque [ $^\circ$ , rad]

$AR$  : relación de aspecto [-]

$b$  : envergadura [m]

$\bar{c}$  : longitud de cuerda promedio [m]

$C_{CW}(\alpha)$  : coeficiente de viento cruzado en función del ángulo de ataque [-]

$C_D(\alpha)$  : coeficiente de arrastre en función del ángulo de ataque [-]

$C_f$  : coeficiente de fricción superficial [-]

$C_L(\alpha)$  : coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque [-]

$C_{M,x}(\alpha)$  : coeficiente de momento de balanceo en función del ángulo de ataque [-]

$C_{M,y}(\alpha)$  : coeficiente de momento de guiñada en función del ángulo de ataque [-]

$C_{M,z}(\alpha)$  : coeficiente de momento de cabeceo en función del ángulo de ataque [-]

$C_p$  : coeficiente de presión [-]

$\Delta P$  : presión estática [Pa]

$\Delta s$  : altura de la primera celda [m]

$F_{CW}$  : fuerza de viento cruzado [N]

$F_D$  : fuerza de arrastre [N]

$F_L$  : fuerza de sustentación ó carga aerodinámica [N]

$h/c$  : curvatura máxima del perfil aerodinámico [%]

$L$  : longitud característica [m]

$\mu$  : viscosidad dinámica [ $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ]

$M$  : número de Mach [-],

$M_x$  : momento de balanceo [N m]

$M_y$  : momento de guiñada [N m]

$M_z$  : momento de cabeceo [N m]

$\nu$  : viscosidad cinemática [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]

$P_\infty$  : presión atmosférica [Pa]

$P$  : presión sobre el perfil aerodinámico [Pa]

$P_{din}$  : presión dinámica [Pa]

$Re$  : Número de Reynolds [-]

$\rho$  : densidad del aire [ $\text{kg m}^{-3}$ ]

$V_{\infty}$  : velocidad del fluido [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$V_{fric}$  : velocidad de rozamiento [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$V_v$  : velocidad del vehículo [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$V_w$  : velocidad del viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$\tau_{pared}$  : esfuerzo cortante sobre una superficie [Pa]

$x$  : distancia de referencia donde se aplican los momentos [m]

$y^+$  : factor  $y^+$  [-]

## INTRODUCCIÓN

La aerodinámica juega un papel crucial en el rendimiento de los vehículos de competición. En este contexto, los alerones posteriores son elementos clave para optimizar el flujo de aire y mejorar la estabilidad y el agarre del vehículo a altas velocidades. El presente proyecto tiene como objetivo el diseño y análisis aerodinámico de un alerón posterior fabricado con un compuesto de matriz polimérica (PMC, de su abreviatura del inglés) para su aplicación en vehículos dedicados a la competición.

Los alerones posteriores tradicionales fabricados con materiales metálicos, y que en su mayoría se construyen con aluminio, presentan ciertas limitaciones en cuanto a su peso, flexibilidad y resistencia a la fatiga. Los PMC ofrecen una alternativa atractiva debido a su ligereza, flexibilidad y capacidad de adaptarse a diferentes formas geométricas.

Con la ayuda de herramientas tecnológicas como los softwares CAD y CAE, se procede a desarrollar el diseño del alerón posterior basado en un perfil aerodinámico para posteriormente realizar el análisis aerodinámico sobre este componente del vehículo. Esto es con la finalidad de encontrar una óptima configuración que permita generar más carga aerodinámica en el vehículo que ayude a mantener una mejor estabilidad a altas velocidades. Así mismo, la presión ejercida por el aire en el componente aerodinámico hace que este tenga un comportamiento estructural provocando esfuerzos y deformaciones. Por ello es importante la selección de un material adecuado; entre ellos, los compuestos de matriz polimérica son una alternativa frente al aluminio. Las pruebas en un túnel de viento permiten corroborar que las simulaciones aerodinámicas estén realizadas adecuadamente; además, también es posible analizar el comportamiento del flujo de aire alrededor del alerón.

Se espera que el diseño del alerón posterior diseñado proporcione una mejora en la eficiencia aerodinámica del vehículo, lo que se traducirá en una mayor estabilidad y agarre a altas velocidades. Además, se espera que el alerón de PMC sea más ligero y resistente que un alerón de material metálico.

**CAPÍTULO I**  
**CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

## **1.1. Problema de la investigación**

### ***1.1.1. Planteamiento del problema***

Uno de los mayores desafíos al momento de la construcción de vehículos de competencia son los problemas relacionados con la aerodinámica. Es por tal razón que un componente clave en el diseño de los vehículos es el alerón posterior. Pero el inconveniente que presentan los profesionales al momento de diseñar el componente es encontrar el perfil aerodinámico adecuado. Dicho perfil debe cumplir con la función de reducir la resistencia aerodinámica y aumentar la fuerza de sustentación del vehículo hacia el suelo.

El alerón posterior se diseña con el fin de crear carga aerodinámica, lo que se puede lograr mediante la manipulación de los elementos de diseño del perfil aerodinámico, como la longitud de la cuerda del perfil, el ángulo de ataque, y el material utilizado para su construcción. Sin embargo, cualquier modificación realizada para aumentar la fuerza de sustentación puede aumentar la resistencia aerodinámica, reduciendo la velocidad del vehículo. Por lo tanto, al momento de realizar el diseño se debe considerar una compensación al modificar el alerón posterior.

### **Diagnóstico.**

El inconveniente presentado durante el diseño de los vehículos de competencia se relaciona con el estudio de su geometría y aerodinámica, de manera que permita obtener mayor eficiencia aerodinámica debido a las curvas adecuadas del diseño en el vehículo, ahorrando combustible y aumentando la estabilidad a altas velocidades. La implementación de dispositivos aerodinámicos como el alerón posterior, permite controlar el flujo de aire en la parte posterior del vehículo minimizando la fuerza de arrastre y aumentando la carga aerodinámica.

## **Pronóstico.**

Al seleccionar un perfil con un borde de ataque representativo, produce un aumento en la superficie del alerón, creando más fuerza de sustentación y a su vez una mayor resistencia aerodinámica. Otro factor que afecta a los vehículos es su rendimiento debido al ángulo de ataque del perfil. En vista que un ángulo muy pronunciado permitirá desarrollar mayor carga aerodinámica, también facilita la inestabilidad del vehículo a altas velocidades. Por otro lado, si el ángulo de ataque es paralelo a las corrientes del flujo, la eficiencia para reducir la resistencia aerodinámica es ineficaz. Pero esto ocurre más con perfiles aerodinámicos simétricos.

### ***1.1.2. Formulación del problema***

¿Cómo se puede optimizar el diseño aerodinámico de un alerón posterior fabricado con un compuesto de matriz polimérica para mejorar la carga aerodinámica y reducir la fuerza de arrastre en los vehículos de competición?

### ***1.1.3. Sistematización del problema***

¿Cuáles son las características óptimas en el diseño de los alerones posteriores que permiten mejorar el desempeño aerodinámico de los vehículos de competencia?

¿Cómo la relación fluido-estructural, entre la aerodinámica y el desempeño estructural de un alerón posterior fabricado con un compuesto de matriz polimérica, contribuye a optimizar el diseño en vehículos de competencia?

¿Cómo se comparan los esfuerzos y deformaciones obtenidos de la simulación estructural del alerón posterior, utilizando el compuesto epoxi-bijao, con los de otros compuestos comerciales?

¿En qué medida el ensayo en túnel de viento proporciona la validación y aseguramiento de los resultados fluidodinámicos obtenidos de la simulación?

## **1.2. Objetivos**

### ***1.2.1. Objetivo general***

Realizar el diseño aerodinámico de un alerón posterior fabricado con compuesto de matriz polimérica para la aplicación en vehículos de competición.

### ***1.2.2. Objetivos específicos***

- Determinar el ángulo de ataque óptimo y la ubicación más eficiente del alerón posterior en relación con el vehículo, para la generación de más carga aerodinámica.
- Realizar un análisis de Interacción Fluido - Estructura (FSI) del componente automotriz utilizando epoxi - bñjao como material, para la evaluación de su comportamiento estructural estático.
- Validar el epoxi-bñjao como material para componentes aerodinámicos automotrices, comparando sus esfuerzos y deformaciones con compuestos poliméricos convencionales.
- Someter a prueba un prototipo a escala del alerón en un túnel aerodinámico, para la corroboración de los resultados fluidodinámicos obtenidos en la simulación.

### **1.3. Justificación**

La investigación tiene como objetivo abordar los desafíos relacionados con la aerodinámica en el diseño de vehículos de competición. Centrándose en el diseño de un alerón posterior fabricado con un compuesto de matriz polimérica. La importancia radica en el impacto que tiene la aerodinámica en el rendimiento y eficiencia de estos vehículos.

Esto se logra mediante la identificación de las características óptimas en el diseño del componente y la evaluación de su rendimiento aerodinámico y estructural. De esta manera, mejorando la carga aerodinámica y reduciendo la fuerza de arrastre en los vehículos de competición durante el desarrollo a altas velocidades. Contribuyendo de esta manera a un mejor desempeño en la competición automovilística, aumentando la estabilidad del vehículo y reduciendo el consumo de combustible.

Por esta razón, la investigación permite que se beneficie el sector automotriz debido al aporte de solución efectiva a los problemas relacionados con la aerodinámica, enfocado en el diseño de los alerones posteriores. De tal manera que la implementación del diseño optimizado permita obtener una ventaja competitiva en términos de rendimiento. Además, el uso de compuestos de matriz polimérica en la construcción del alerón posterior contribuye a la reducción del peso total del vehículo. Además, de ser una guía para futuras investigaciones relacionadas con la eficiencia aerodinámica en los vehículos de competencia.

La viabilidad del estudio está respaldada por herramientas como la ingeniería asistida con Ansys, que permite realizar simulaciones multifísicas (interacción fluido-estructura) en donde se corrobora el rendimiento aerodinámico y estructural del alerón posterior. Además, para una mayor confiabilidad de los resultados, el ensayo en un prototipo a escala del perfil aerodinámico en el túnel de viento proporciona valiosos resultados de dinámica de fluidos que se compara con los resultados de la simulación fluidodinámica.

**CAPÍTULO II**  
**FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN**

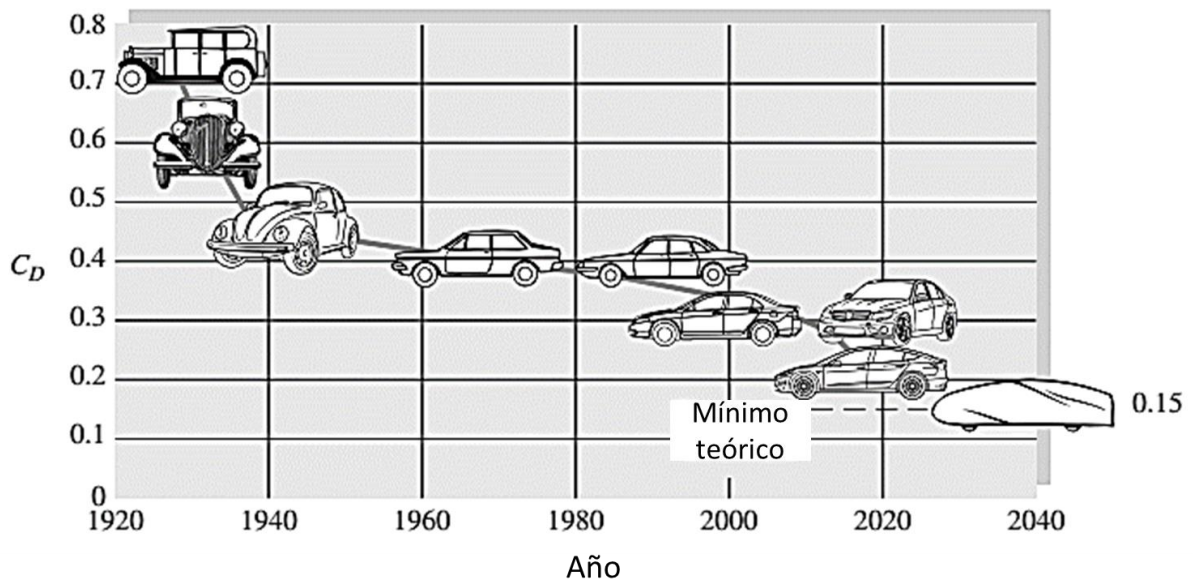
## 2.1. Marco conceptual

### 2.1.1. Aerodinámica

La aerodinámica se ha convertido en el factor competitivo dominante en las carreras de alto rendimiento [1]. La aerodinámica es la ciencia que estudia los flujos de aire. Tiene una influencia determinante en el diseño de los automóviles, pues gracias a ella se puede reducir el consumo de combustible y mejorar el comportamiento direccional a velocidades elevadas. Un vehículo tiene una buena aerodinámica cuando ofrece la menor resistencia posible al aire. Un valor de coeficiente de arrastre igual a 1 es el que opone una superficie plana enfrentada contra el aire. Cuanto menor sea el coeficiente de arrastre de un vehículo mejor será su aerodinámica [2]. Los parámetros aerodinámicos generalmente se determinan en un túnel de viento [1].

**Figura 1**

*Tendencia histórica de los coeficientes de resistencia en un vehículo [3].*



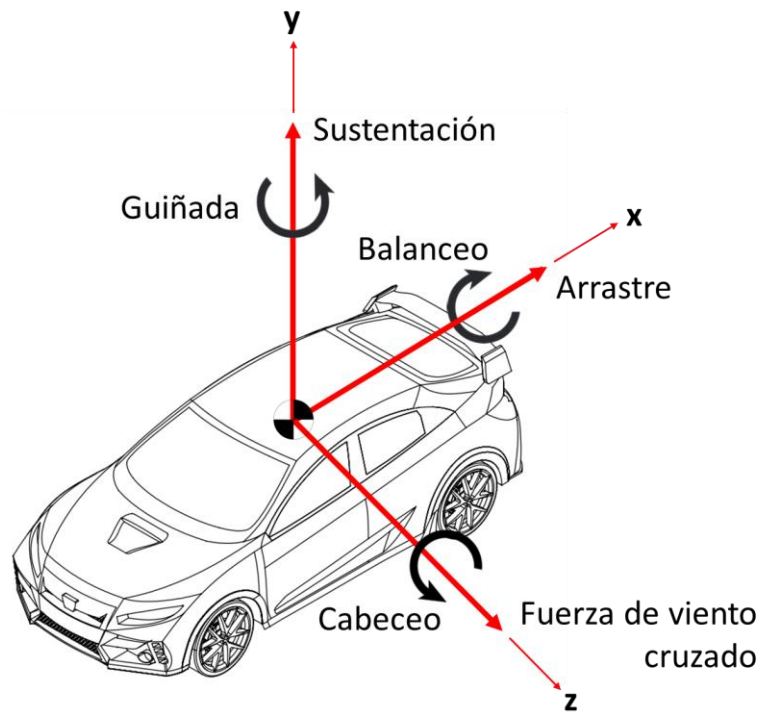
### 2.1.2. Fuerza y momento aerodinámicos

En un vehículo, la fuerza aerodinámica es generada cuando una corriente de aire fluye sobre y por debajo de este [2]. El aire que pasa junto a cualquier cuerpo debe desviarse de su trayectoria original; tales desviaciones conducen a cambios en la velocidad del aire. Además, la viscosidad del aire genera fuerzas de fricción que tienden a resistir el flujo de aire. Como

resultado de estos procesos, el vehículo experimenta una fuerza y un momento aerodinámicos [4]. Es convencional y conveniente separar la fuerza aerodinámica y el momento en tres componentes cada uno, teniendo como origen en el centro de presión.

**Figura 2**

*Descomposición de la fuerza aerodinámica en un vehículo.*



### **2.1.2.1. Arrastre ( $F_D$ )**

El arrastre es el componente de la fuerza que actúa en la dirección opuesta a la línea del movimiento, o en la misma dirección que el movimiento de la corriente no perturbada. Es la fuerza que resiste el movimiento del vehículo. No hay ambigüedad con respecto a su dirección o sentido. Por lo tanto, la fuerza de arrastre es siempre perpendicular a la fuerza de sustentación [4].

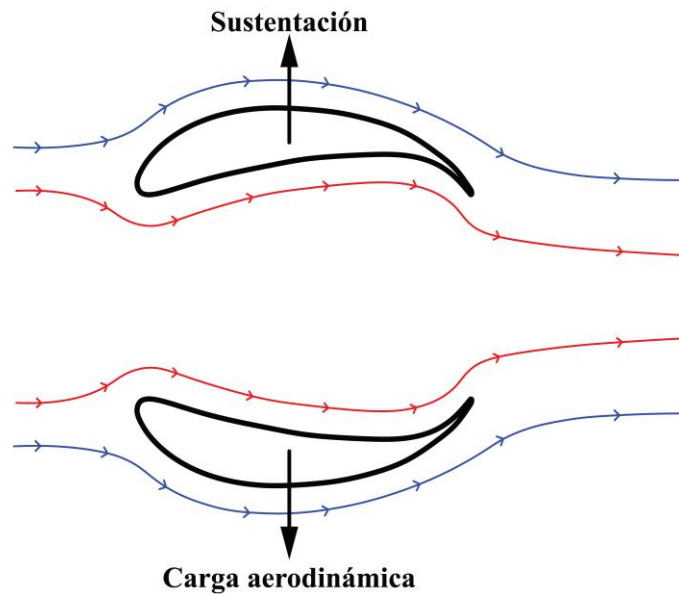
### **2.1.2.2. Sustentación ( $F_L$ )**

La sustentación es el componente de la fuerza que actúa perpendicular a la dirección del movimiento o, en el marco de referencia del vehículo, de la corriente no perturbada [4]. Para

el análisis en vehículos, es conocida como carga aerodinámica, ya que actúa hacia abajo con la finalidad de crear una fuerza que evite la elevación del vehículo.

### Figura 3

Representación de la componente vertical de la fuerza aerodinámica con respecto a la dirección del viento.



#### 2.1.2.3. Fuerza de viento cruzado ( $F_{CW}$ )

La fuerza de viento cruzado es el componente de la fuerza aerodinámica mutuamente perpendicular a la sustentación y la resistencia, es decir, en una dirección en sentido de la envergadura [4]. Esta componente de la fuerza aerodinámica se suele omitir en el análisis de vehículos, ya que al nivel del suelo la incidencia del viento es despreciable, pero es significativa en ciertos casos como se muestra en la Figura 7.

#### 2.1.2.4. Balanceo ( $M_x$ )

El balanceo es el momento que tiende a hacer que el vehículo rote alrededor de la dirección del movimiento, es decir, tiende a presionar un extremo lateral del vehículo y elevar el otro [4].

### 2.1.2.5. *Guiñada ( $M_y$ )*

La guiñada es el momento que tiende a hacer que el vehículo gire alrededor de su eje vertical, es decir, tiende a girar el vehículo hacia un lado o hacia el otro [4].

### 2.1.2.6. *Cabeceo ( $M_z$ )*

El cabeceo es el momento que actúa en el vehículo que contiene la sustentación (negativa o hacia abajo) y el arrastre [4].

### 2.1.3. *Coefficientes aerodinámicos*

El arrastre aerodinámico aumenta con el cuadrado de la velocidad. Para obtener coeficientes de carga adimensionales, se debe dividir por  $V_\infty^2$ . Dichos coeficientes son independientes de la velocidad del objeto y dependen únicamente de la forma del objeto. En consecuencia, la definición de los coeficientes de arrastre  $C_D$ , sustentación  $C_L$  y de viento cruzado  $C_{CW}$  es la siguiente [1]:

$$C_D(\alpha) = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$C_L(\alpha) = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$C_{CW}(\alpha) = \frac{F_{CW}}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad \text{Ecuación 3}$$

La agrupación de las variables  $\frac{1}{2} \rho V_\infty^2$  viene a constituir la presión dinámica ( $P_{din}$ ).

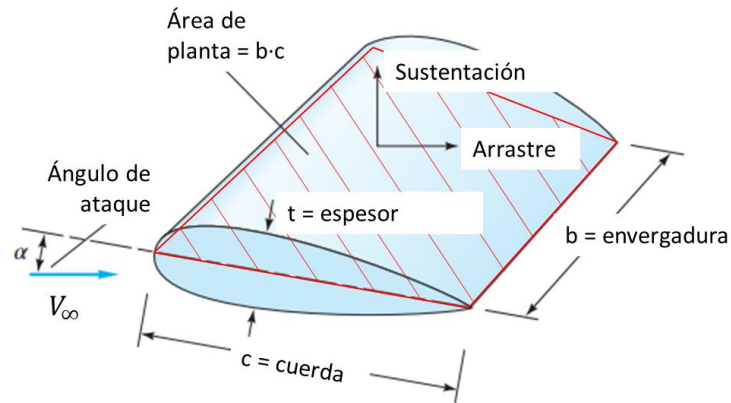
El área o superficie proyectada  $A$  suele ser uno de los tres tipos [3]:

- Área frontal, el cuerpo visto desde la corriente; adecuado para cuerpos gruesos y contundentes, como esferas, cilindros, automóviles, camiones, misiles, proyectiles y torpedos,

- Área de planta, el área del cuerpo vista desde arriba; adecuado para cuerpos anchos y delgados como alerones e hidroalas,
- Área húmeda, habitual para superficies de buques y barcazas.

**Figura 4**

*Definición del área de planta en un perfil aerodinámico.*



Al utilizar datos de arrastre u otros datos de fuerza del fluido, es importante tener en cuenta qué longitud y área se utilizan para escalar los coeficientes medidos.

La velocidad del fluido está determinada por [5]:

$$V_\infty = V_v \pm V_w \tag{Ecuación 4}$$

Además de las fuerzas aerodinámicas, son de interés los efectos de momento sobre un punto de referencia 0, que están ligado también por coeficientes de momentos aerodinámicos [1]:

$$C_{M,x}(\alpha) = \frac{M_x}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A x} \tag{Ecuación 5}$$

$$C_{M,y}(\alpha) = \frac{M_y}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A x} \tag{Ecuación 6}$$

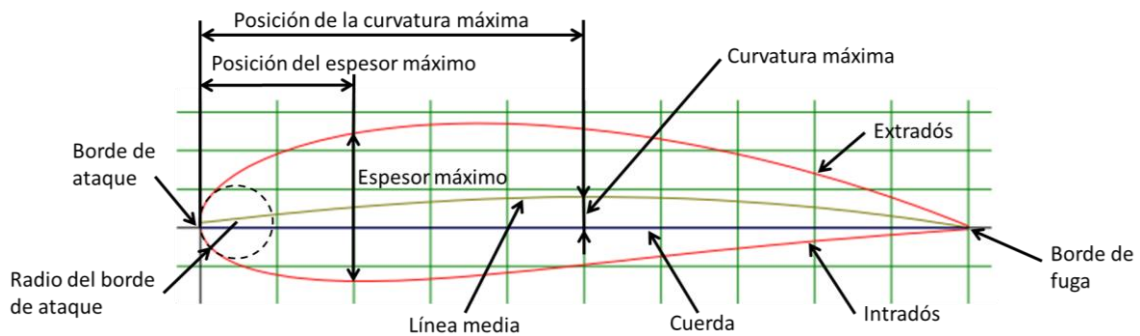
$$C_{M,y}(\alpha) = \frac{M_y}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A x} \quad \text{Ecuación 7}$$

#### 2.1.4. Perfil aerodinámico

El principal componente de un alerón es el perfil aerodinámico y es el elemento que se encarga de generar la carga aerodinámica buscada [6]. Dicho elemento se compone de varias secciones tal y como se ve a continuación.

**Figura 5**

*Esquema de un perfil aerodinámico (NACA 4520).*



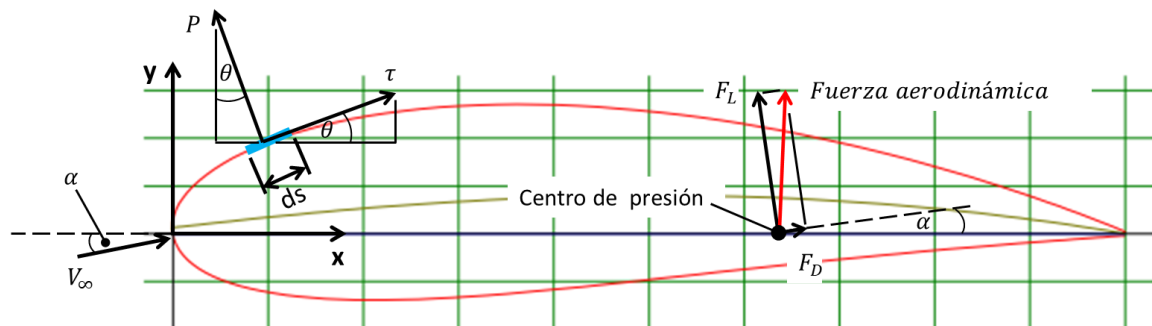
La línea media (de curvatura) es el locus de puntos a medio camino entre las superficies del extradós (depresión) e intradós (sobrepresión) medida perpendicularmente a la propia línea media. Los puntos delante y detrás de la línea de curvatura media son los bordes de ataque y de fuga, respectivamente. La línea recta que conecta los bordes de ataque y de fuga es la línea de cuerda del perfil aerodinámico, y la distancia precisa desde el borde de ataque hasta el borde de fuga medida a lo largo de la línea de cuerda se designa simplemente como cuerda  $c$  del perfil aerodinámico. La curvatura es la distancia máxima entre la línea media y la línea de cuerda, medida perpendicularmente a la línea de cuerda. El espesor es la distancia entre las superficies superior e inferior, también medida perpendicular a la línea de la cuerda. La forma del perfil aerodinámico en el borde de ataque suele ser circular, con un radio de borde de ataque de aproximadamente  $0.02c$  [7].

### 2.1.5. Centro de presión

Cuando el aire fluye sobre el perfil aerodinámico, hay fuerzas en cada punto de la superficie del perfil aerodinámico, incluida la presión  $P$  (perpendicular al perfil aerodinámico) y el esfuerzo cortante por fricción  $\tau$  (tangente al perfil aerodinámico). La fuerza resultante generada por esta fuerza distribuida es la fuerza aerodinámica, y el punto de acción de la fuerza resultante se denomina centro de presión. La componente de la fuerza resultante en la dirección de entrada es la resistencia o arrastre  $F_D$ , y la componente perpendicular a la dirección de entrada es la sustentación  $F_L$  [8].

**Figura 6**

*Componentes de la fuerza aerodinámica en el centro de presión y en un diferencial de superficie del perfil aerodinámico.*



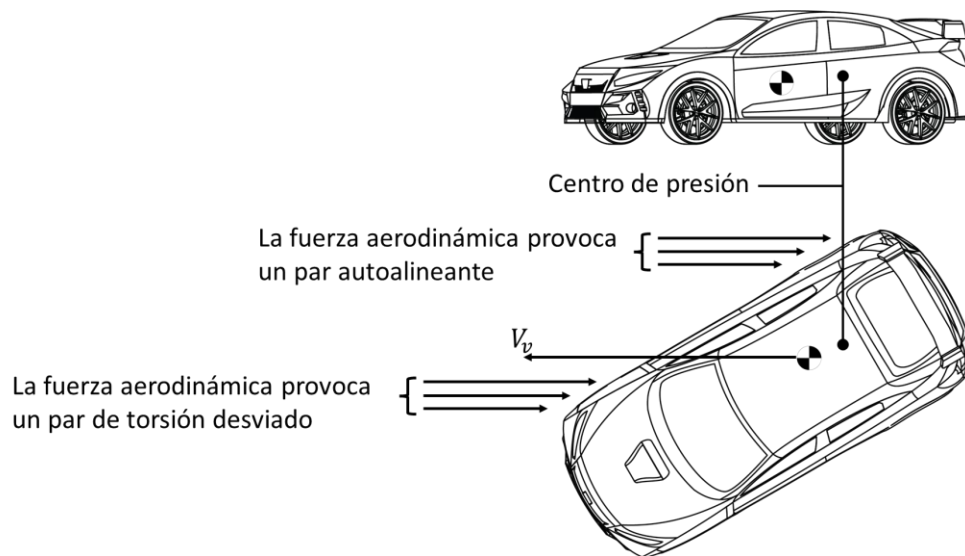
En un vehículo, el centro de presión debe estar cerca del centro de gravedad para un comportamiento de conducción equilibrado. Pero, el objetivo es que el centro de presión se mueva hacia atrás a medida que aumenta la velocidad del automóvil. De hecho, los conductores son más rápidos a bajas velocidades con sobreviraje y a altas velocidades con subviraje (Figura 7 (a)). Sin embargo, el centro de presión no solo es de interés para la dinámica vertical del automóvil, sino que también influye significativamente en la dinámica lateral. Para un manejo estable en vientos cruzados y en grandes ángulos de guiñada, el centro de presión debe estar detrás del centro de gravedad. Si el centro de presión está detrás del centro de gravedad, la fuerza aerodinámica genera un momento estabilizador de guiñada inversa (Figura 7 (b)) [9].

### 2.1.6. Ángulo de ataque

En el plano del perfil aerodinámico, el ángulo entre el flujo entrante y la cuerda se define como el ángulo geométrico de ataque del perfil aerodinámico. Para las cuerdas, la desviación hacia arriba del flujo entrante es positiva y la desviación hacia abajo es negativa, por lo que el ángulo de ataque se puede dividir en positivo y negativo [8].

### Figura 7

(a) Representación de un vehículo al momento de girar y, (b) efecto estabilizador en un vehículo cuando el centro de presión se desplaza hacia atrás.



La sustentación aumenta aproximadamente de manera lineal con el ángulo de ataque hasta que el flujo de aire se separa en la parte inferior del perfil aerodinámico [9]. El aumento del ángulo conlleva un aumento del coeficiente, hasta cierto punto en el cual el perfil aerodinámico entrará en pérdida debido a la separación del flujo de la superficie inferior del alerón (Figura 8). Los perfiles de curvatura, respecto a los simétricos, obtienen mejores coeficientes, pero llegan anticipadamente al ángulo de pérdida [6].

### 2.1.7. Perfil simétrico y de curvatura

Los perfiles aerodinámicos se clasifican por su forma en simétricos, que presentan las siguientes características:

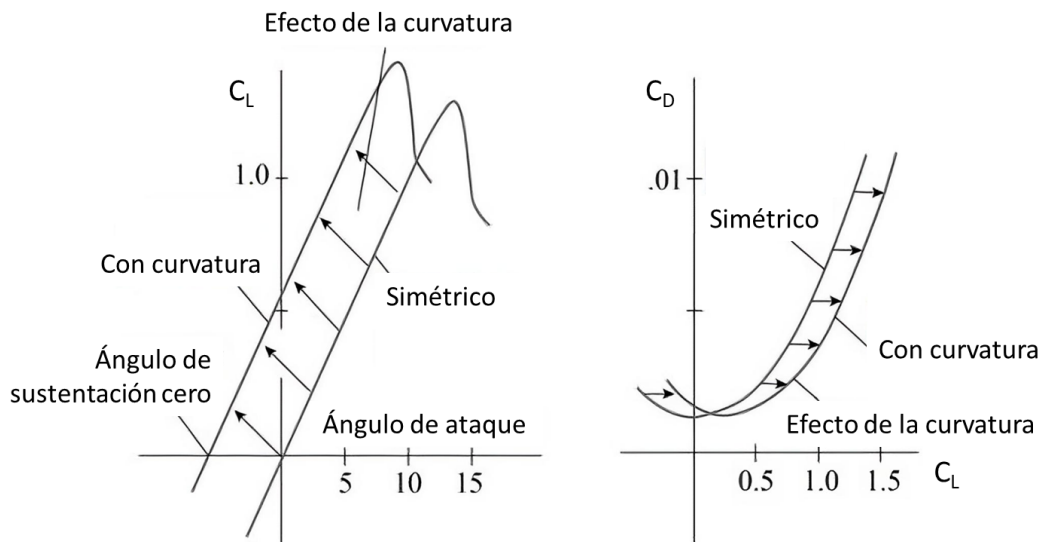
- Sin curvatura,
- Con aplicaciones en álabes rotativos, porque estas apenas varían su centro de presión,
- Rendimiento aceptable en condiciones alternantes,
- Bajo costo, y
- Facilidad de construcción [10].

En cambio, hay los perfiles con curvatura o asimétricos, que se describen a continuación:

- Superficie superior diferente a la inferior, generalmente con más curvatura,
- Se puede lograr mayores cargas aerodinámicas que con los simétricos, debido a la curvatura [10].

### Figura 8

*Efecto de la curvatura del perfil aerodinámico sobre los coeficientes de sustentación y resistencia aerodinámica [8].*



#### 2.1.8. Envergadura

La envergadura es conocida como el ancho de un perfil aerodinámico, y la relación de envergadura con la cuerda es la relación de aspecto. Los aviones tienen unas relaciones de aspecto muy altas mientras que los vehículos las tienen muy bajas. Si se utiliza una relación de aspecto elevada para un alerón con un mismo ángulo de ataque, el coeficiente de sustentación  $C_L$  aumenta [11]. La relación de aspecto se define como [3]:

$$AR = \frac{b^2}{A} = \frac{b}{\bar{c}} \quad \text{Ecuación 8}$$

En alerones de vehículos, la longitud de la cuerda es constante a lo largo de la envergadura, por lo que  $\bar{c} = c$ .

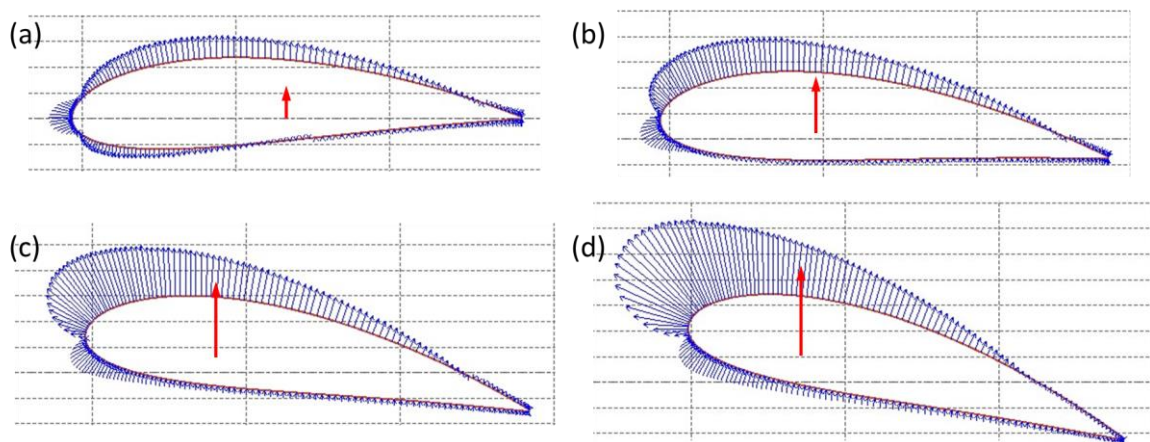
### 2.1.9. Distribución de la presión sobre un perfil aerodinámico

La distribución de la presión a lo largo de una línea de corriente o superficie a menudo se describe mediante el coeficiente de presión adimensional  $C_p$  [1]. Si el flujo no es viscoso, se puede demostrar que la velocidad del flujo en el borde de salida es cero, lo que implica que el coeficiente de presión es +1. Pero en un flujo real, el cuerpo más el espesor de desplazamiento de la capa límite tiene un ancho finito en el borde de salida, por lo que la velocidad del flujo no cae a cero y, por lo tanto, el coeficiente de presión es menor que +1 [4].

$$C_p = \frac{\Delta P}{P_{din}} = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad \text{Ecuación 9}$$

**Figura 9**

*Distribución de la presión alrededor un perfil NACA 4520 con una incidencia de (a) 0°, (b) 5°, (c) 10° y (d) 15°.*



### 2.1.10. Número de Mach

El número de Mach es la relación entre la velocidad de flujo y la velocidad del sonido [7]:

$$M = \frac{V_{\infty}}{a_{\infty}} \quad \text{Ecuación 10}$$

#### 2.1.10.1. Regímenes de flujo según el número de Mach

De todas las formas de subdividir y describir diferentes flujos aerodinámicos, la distinción basada en el número de Mach es la más frecuente. Por definición, el flujo es localmente [7]:

- subsónico si  $M < 1$ ,
- sónico si  $M = 1$ ,
- supersónico si  $M > 1$ .

**Figura 10**

*Clasificación de los flujos según el número de Mach [3][12].*

Número de Mach				
0.3	0.8	1.0	1.2	5
Incompresible		Compresible		
Subsónico		Transónico	Supersónico	Hipersónico

### 2.1.11. Número de Reynolds

Al considerar los procesos de flujo, debe tenerse en cuenta que las fuerzas de fricción se transmiten entre la superficie y el aire, que extraen energía del flujo. Debido a esta retirada de energía, un flujo laminar puede convertirse en un flujo turbulento. En un flujo laminar, todos los procesos de flujo tienen lugar paralelos entre sí, de modo que las capas individuales no se mezclan entre sí. En contraste, un flujo turbulento tiene un campo de flujo tridimensional con una distribución de velocidad aleatoria. Las pérdidas por fricción causadas por un flujo turbulento son significativamente mayores que las causadas por un

flujo laminar. En relación con estos dos tipos de flujos, el número de Reynolds juega un papel importante. Se define como [1]:

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} L}{\mu} = \frac{V_{\infty} L}{\nu} \quad \text{Ecuación 11}$$

Se puede relacionar el número de Reynolds y el número de Mach, de tal manera que [3]:

- $M \leq 0.4$  : el número de Reynolds es importante, el número de Mach no,
- $0.4 < M < 1.0$  : el número de Reynolds y el número de Mach son importantes,
- $M > 1.0$  : el número de Reynolds no es importante, el número de Mach sí.

Si  $Re = (V_{\infty} L)/\nu$ , donde  $V_{\infty}$  es la velocidad promedio de la corriente y  $L$  es la longitud o espesor transversal de la capa de corte, se producen los siguientes rangos aproximados [3]:

- $0 < Re < 1$ : movimiento laminar “progresivo” altamente viscoso,
- $1 < Re < 100$  : laminar, fuerte dependencia del número de Reynolds,
- $10^2 < Re < 10^3$  laminar, teoría de la capa límite conveniente,
- $10^3 < Re < 10^4$  : transición a la turbulencia,
- $10^4 < Re < 10^6$  : turbulento, moderada dependencia del número de Reynolds,
- $10^6 < Re < \infty$  : turbulento, ligera dependencia del número de Reynolds.

### ***2.1.12. Dispositivos aerodinámicos en vehículos***

Si se adaptan adecuadamente a los vehículos, los dispositivos aerodinámicos adicionales pueden ayudar a proporcionar una mejor estabilidad de conducción y reducir la resistencia hacia la eficiencia del combustible o el logro de un mayor rendimiento [13]. Los componentes más llamativos y, al mismo tiempo, junto con la parte inferior de la carrocería,

más efectivos para generar carga aerodinámica son los perfiles aerodinámicos cuando se usan como alerones delanteros o posteriores [1]. Existen más componentes aerodinámicos que ayuda a mejorar la eficiencia aerodinámica de los vehículos de competición, pero en esta investigación solo se centra en el alerón posterior.

### ***2.1.13. Alerón posterior***

El alerón posterior es una de las partes esenciales del paquete aerodinámico en los vehículos de competición, cuya función principal es aumentar la carga aerodinámica en diversas condiciones de la carretera a alta velocidad. Sin embargo, la existencia del alerón posterior aumenta inevitablemente la resistencia aerodinámica del automóvil [14].

### ***2.1.14. Clasificación del alerón posterior***

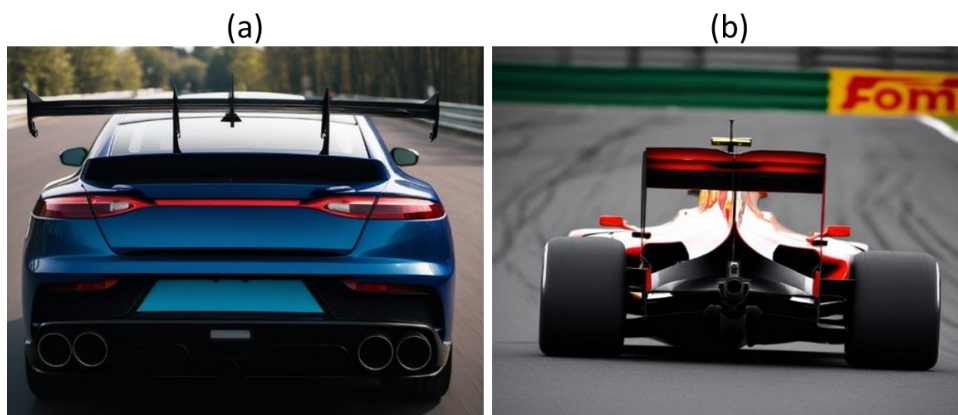
Según el número de perfiles aerodinámicos presentes, los alerones se clasifican en:

#### ***2.1.14.1. Alerón simple***

Los alerones de un solo elemento o simples constan de un solo perfil aerodinámico que es el que genera toda la carga aerodinámica. Los automóviles GT o los de rally utilizan este tipo de alerón [15, p. 16]. Genera menos carga y resistencia aerodinámica que los alerones multielementos, pero a su vez el estudio para el diseño es más sencillo (Figura 11 (a)) [6].

### **Figura 11**

*Vista posterior de un vehículo (a) con alerón simple, y (b) con alerón multielementos.*



*Nota.* Imágenes generadas con Midjourneyai.

#### ***2.1.14.2. Alerón multielementos***

Los alerones multielementos constan de varios perfiles aerodinámicos lo que les permite tener más superficie de alerón, lo cual incrementa la carga aerodinámica (Figura 11 (b)).

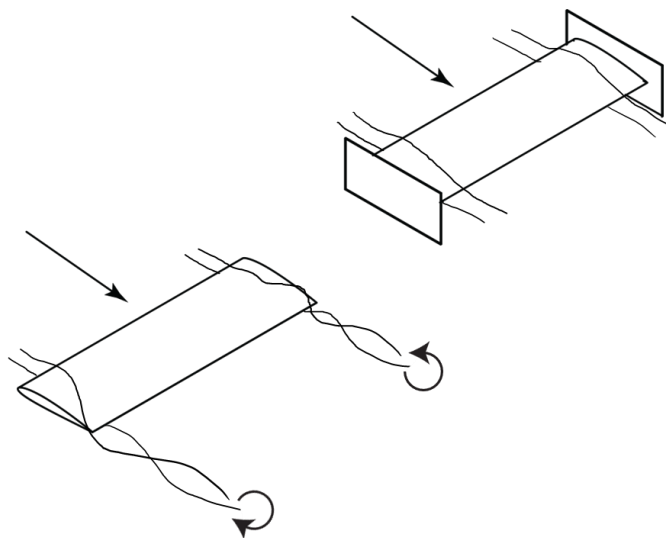
Estos alerones multielementos provocan más carga aerodinámica que los simples, por lo tanto, son los que más se utilizan en los automóviles de competición, a no ser que la reglamentación lo prohíba. En la Fórmula 1, los alerones están limitados a un número máximo de tres elementos [15]. Además, el estudio realizado para el diseño de estos es más laborioso y costoso ya que las variables de diseño se multiplican, convirtiéndolo en una opción menos viable que el caso anterior para vehículos de competición [6].

### **2.1.15. Placas laterales**

En el alerón posterior de un vehículo, el flujo alrededor del borde lateral (punta) debe considerarse ya que la diferencia de presión entre las superficies superior e inferior no se puede mantener, generando fuertes vórtices de punta que reducen su efectividad [13]. La intensidad del vórtice depende de la diferencia de presión y, como resultado el flujo en el medio de la envergadura se desvía [16]. Para superar este problema de flujo de fugas, se utilizan placas laterales para separar ambas superficies del alerón manteniendo un efecto bidimensional en la punta y mejorando su eficiencia (Figura 12). Aumentar el tamaño de la placa lateral aumenta la generación de carga aerodinámica y mejora tanto la aceleración de guiñada del vehículo como las curvas en estado estable [13]. En vehículos de turismo para competición no es posible el soporte lateral con derivas debido a la geometría de éste, es por ello por lo que el soporte se coloca en el centro [15].

### **Figura 12**

*Esquema gráfico de la importancia de las placas laterales en un alerón posterior.*

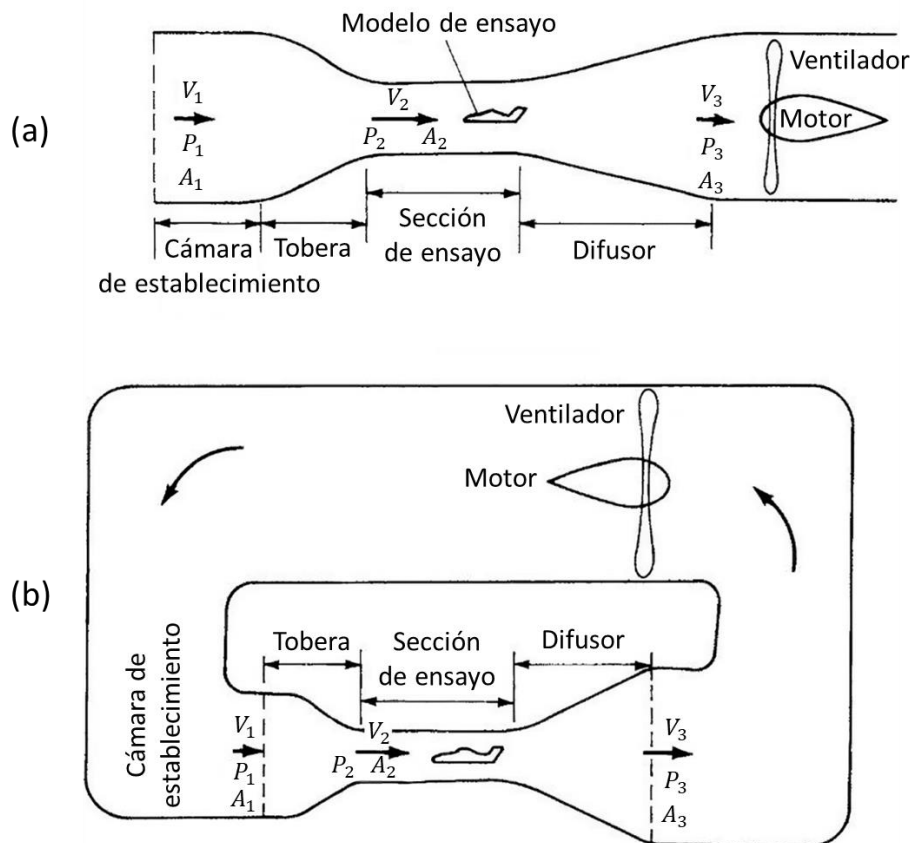


### 2.1.16. Túnel aerodinámico subsónico

Un túnel de viento de baja velocidad es un gran Venturi donde el flujo de aire es impulsado por un ventilador conectado a algún tipo de accionamiento del motor. Las aspas del ventilador del túnel de viento son similares a las hélices de los aviones y están diseñadas para extraer el flujo de aire a través del circuito del túnel. El túnel de viento puede ser de circuito abierto, donde el aire se extrae en la parte delantera directamente de la atmósfera y se expulsa por la parte posterior, de nuevo directamente a la atmósfera (Figura 13 (a)); o el túnel de viento puede ser un circuito cerrado, donde el aire del escape se devuelve directamente a la parte delantera del túnel a través de un conducto cerrado que forma un bucle (Figura 13 (b)) [7].

**Figura 13**

*Túnel de viento (a) de circuito abierto y, (b) de circuito cerrado [7].*



### **2.1.16.1. Teoría de la Semejanza**

La similitud geométrica, cinemática y dinámica entre el flujo alrededor del modelo y el flujo alrededor del obstáculo real es necesaria para que los ensayos en túnel con un modelo a escala sean válidos. Esto se traduce en una variedad de aplicaciones. Además de que el modelo de ensayo sea una réplica aerodinámica del cuerpo real, también se requiere la igualdad de ciertos parámetros adimensionales en ambos flujos, el real y el generado en el túnel de viento. El número de Reynolds y el número de Jensen son sin duda los parámetros más relevantes en construcción, donde las velocidades son pequeñas en relación con la del sonido (y, por lo tanto, los efectos de compresibilidad son despreciables) y los cuerpos a ensayar suelen ser muy rígidos [17].

## **2.2. Marco referencial**

Krishnamurthy [18] resalta la importancia del dominio computacional en la simulación aerodinámica, estableciendo como mínimo una distancia de 30 veces la cuerda del perfil aerodinámico en todas las direcciones. Esta medida asegura que las superficies del dominio no afecten la solución en las zonas próximas al perfil.

En cuanto a la capa límite, el autor recomienda una discretización con 20 a 40 celdas, utilizando un factor de crecimiento de 1.2 o inferior. La altura de la primera celda debe ajustarse para obtener un factor  $y^+$  de 1, que es crucial para capturar con precisión los efectos viscosos en la región cercana al perfil.

Adam *et al.* [19] proponen dos criterios de calidad para evaluar la calidad del dominio computacional en simulaciones aerodinámicas: oblicuidad y ortogonalidad. Estos criterios son importantes para garantizar que la malla sea precisa y eficiente, y que los resultados de la simulación sean confiables.

La oblicuidad mide qué tan cerca está una cara o celda de ser equilátera o equiangular. Un valor de oblicuidad de 0 indica que la cara o celda es equilátera, mientras que un valor de 1 indica que es completamente perpendicular. El valor máximo admisible para la oblicuidad suele ser menor a 0.95, ya que valores mayores pueden afectar la precisión de la solución.

La ortogonalidad mide qué tan cerca están las aristas de una celda de ser perpendiculares entre sí. Un valor de ortogonalidad de 1 indica que las aristas son perfectamente perpendiculares, mientras que un valor de 0 indica que son completamente paralelas. La ortogonalidad mínima recomendada suele ser mayor a 0.1, ya que valores menores pueden afectar la eficiencia de la simulación.

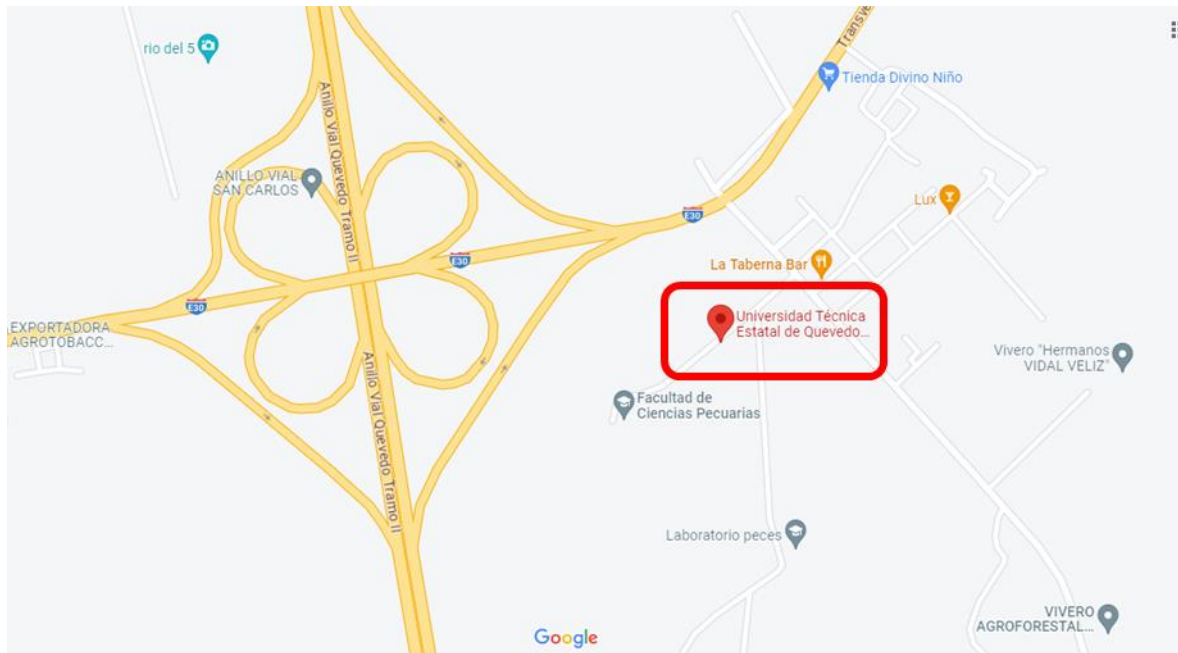
**CAPÍTULO III**  
**METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### 3.1. Localización

Este proyecto de investigación se ha desarrollado en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Campus La María, ubicada en la ciudad Quevedo, provincia Los Ríos.

**Figura 14**

*Ubicación de la UTEQ, extensión La María.*



### 3.2. Tipo de investigación

#### 3.2.1. Investigación documental

Se ha revisado la literatura científica existente sobre el diseño aerodinámico de alerones posteriores, así como sobre el uso de compuestos de matriz polimérica en aplicaciones automotrices.

#### 3.2.2. Investigación correlacional

Se ha relacionado las variables de estudio entre el diseño del alerón posterior, las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre él, y la resistencia del material seleccionado ante dichas cargas. Esto se logra ajustando el ángulo de ataque del alerón posterior a diferentes velocidades.

### **3.3. Métodos de investigación**

#### ***3.3.1. Método deductivo-inductivo***

Se ha utilizado para generar suposiciones sobre el efecto del diseño del alerón posterior en el rendimiento aerodinámico del vehículo. Por ejemplo, se supone que los alerones posteriores con un diseño más agresivo producen más carga aerodinámica y menos arrastre.

#### ***3.3.2. Método experimental***

Se ha utilizado este método para corroborar las suposiciones establecidas sobre el diseño de alerones, variando de esta manera las fuerzas aerodinámicas que actúan en el alerón.

### **3.4. Fuentes de recopilación de información**

#### ***3.4.1. Fuentes primarias***

Para la realización de la investigación se ha hecho uso de fuentes de información original de primera mano, como el resultado de ideas, conceptos, teorías, resultados de investigaciones, normas. Lo que permite tener una discretización en los resultados de la simulación numérica del alerón posterior para vehículos de competición.

#### ***3.4.2. Fuentes secundarias***

Se ha utilizado varias fuentes de investigación más recientes sobre el diseño de alerones para vehículos; ya que la información puede variar con el tiempo, siendo más relevantes las publicaciones de los últimos años. También se incluye los resultados obtenidos de la simulación numérica.

### **3.5. Diseño de la investigación**

El diseño de la presente investigación se basa en la manipulación de una o más variables de tal manera que la eficiencia aerodinámica sea la mejor, medir el efecto de dichas variables sobre el perfil aerodinámico, y la validación de la simulación mediante un túnel de viento.

## **3.6. Instrumentos de investigación**

### ***3.6.1. Simulación numérica***

Se utiliza un software de simulación de ingeniería asistida por computadora (CAE) para realizar análisis multidisciplinarios de la relación multifísica del componente automotriz. En este caso, se utilizan principalmente técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y Análisis de Elementos Finitos (FEA) para evaluar el rendimiento aerodinámico y estructural del alerón posterior.

### ***3.6.2. Túnel de viento***

Se realiza una prueba experimental en un túnel de viento para corroborar los resultados fluidodinámicos obtenidos en la simulación. Este instrumento permite someter el prototipo a escala del perfil aerodinámico seleccionado a diferentes velocidades y condiciones de flujo, para evaluar su comportamiento aerodinámico en condiciones reales.

### ***3.6.3. Análisis de resultados***

Una vez obtenidos los datos de simulación y de los ensayos en el túnel de viento, se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos. Se utilizan técnicas de análisis de esfuerzos y deformaciones para validar los resultados estructurales obtenidos y compararlos con los valores admisibles del material empleado en el alerón posterior.

## **3.7. Tratamiento de los datos**

Los tratamientos de datos utilizados en esta investigación son fundamentales para obtener información confiable sobre el comportamiento del alerón posterior y evaluar su rendimiento aerodinámico y estructural. Estos tratamientos permiten tomar decisiones informadas en el proceso de diseño y desarrollo del componente.

### **3.8. Recursos humanos y recursos materiales**

#### ***3.8.1. Recursos humanos***

- Ing. Cristian Topa
- Ing. Gloria Bolio
- Ing. Antonio Mendoza
- Ing. Lourdes Ramos
- Ing. Erick García
- Dr. Esteban Valencia

#### ***3.8.2. Recursos materiales***

- Túnel de viento
- Computador
- Prototipo del alerón posterior
- Resina epoxi
- Fibras de bijao
- Crema desmoldante
- Túnel de viento
- Anemómetro de filamento

**CAPÍTULO IV**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

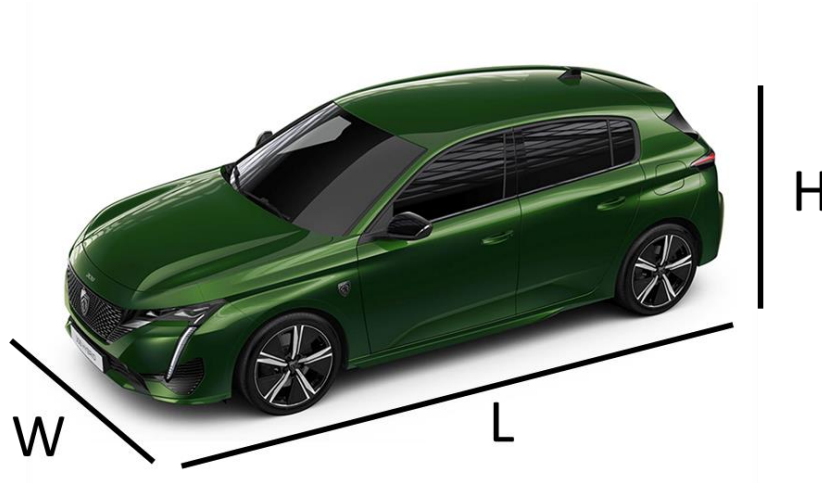
## 4.1. Diseño

### 4.1.1. Vehículo de turismo

El automóvil elegido para el análisis mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es un Peugeot 380 TCR [20], el cual alcanza una velocidad máxima de  $250 \text{ km h}^{-1}$  ( $70 \text{ m s}^{-1}$ ). Las dimensiones totales de este vehículo son de  $4324 \text{ mm}$  de longitud ( $L$ ),  $1950 \text{ mm}$  de ancho ( $W$ ) y  $1440 \text{ mm}$  de altura ( $H$ ). Además, la distancia libre entre el vehículo y el suelo es de  $60 \text{ mm}$ .

#### Figura 15

*Peugeot 380 TCR* [20].

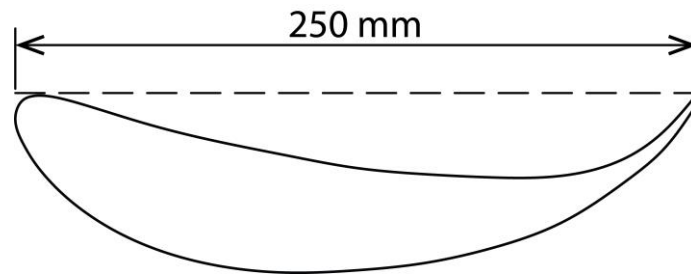


### 4.1.2. Perfil aerodinámico

El perfil aerodinámico se ha diseñado según las especificaciones de la normativa '2022 FIA WTCR Technical Regulations', que establece los requisitos para los vehículos de turismo destinados a la competición. En la Sección 4.4 de dicha normativa se detallan las características que deben cumplir los dispositivos aerodinámicos. Para esta investigación, nos centramos exclusivamente en los elementos que conforman el conjunto del alerón posterior. Puedes encontrar más detalles en el Anexo 1, donde se adjunta la información extraída de la normativa. El diseño del alerón se llevó a cabo utilizando el software SolidWorks, el cual tiene una cuerda de  $250 \text{ mm}$  y un borde de fuga redondeado de  $2 \text{ mm}$ , como se ilustra en la Figura 16.

**Figura 16**

*Perfil aerodinámico WTCR.*

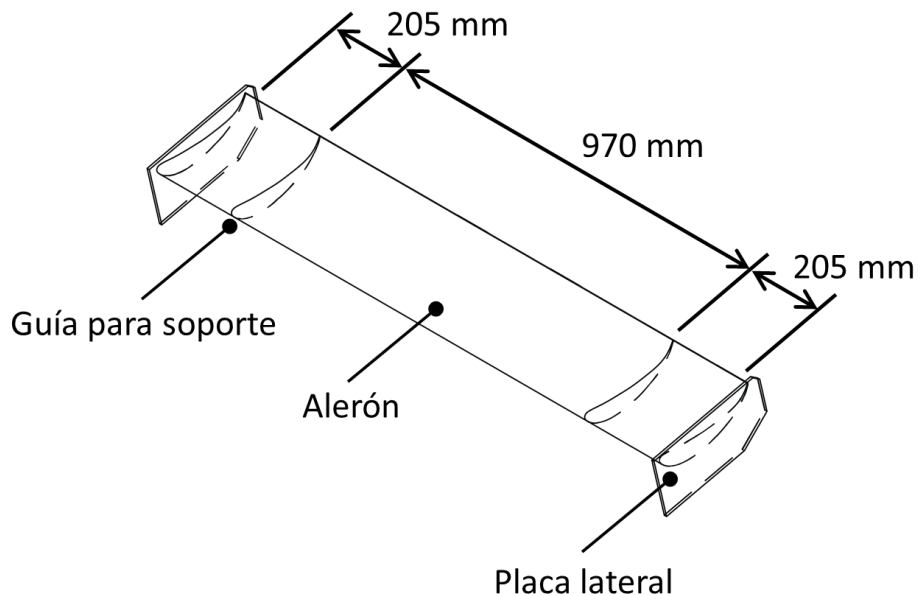


#### **4.1.3. Conjunto del alerón posterior**

El conjunto del alerón posterior está compuesto por tres elementos: el alerón en sí, las placas laterales y los soportes, como se señala en la figura a continuación.

**Figura 17**

*Conjunto del alerón posterior.*

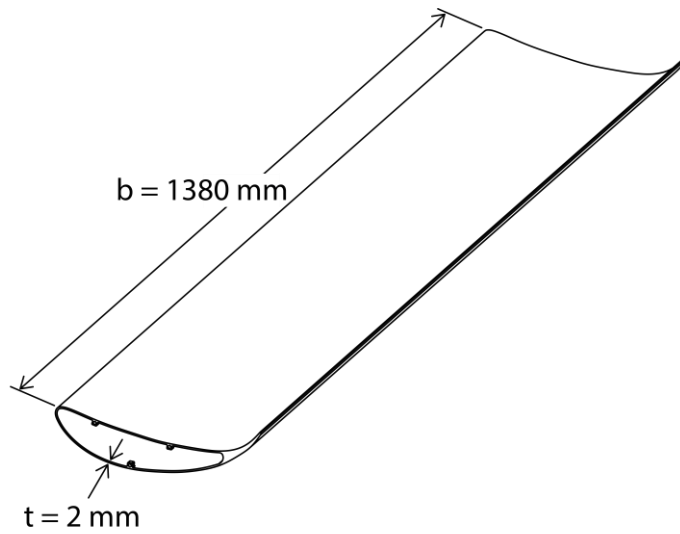


##### **4.1.3.1. Alerón posterior**

Utilizando el perfil aerodinámico como base, se lleva a cabo una extrusión de 1380 mm para crear el elemento sólido, correspondiente a la envergadura del alerón establecida en la normativa '2022 FIA WTCR Technical Regulations'. Con el objetivo de mantener el alerón liviano, se ha diseñado como una estructura hueca con un espesor interno de 2 mm.

**Figura 18**

*Alerón posterior.*

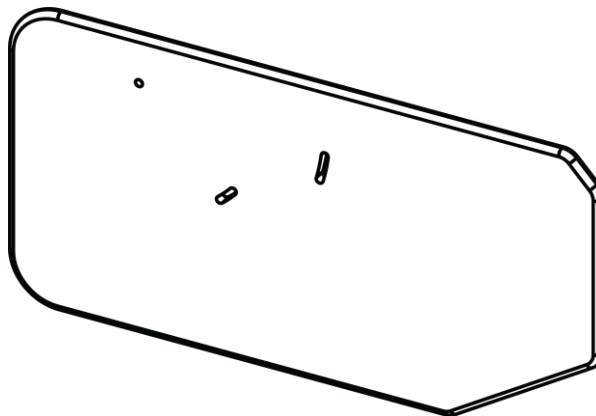


#### **4.1.3.2. Placas laterales**

Las placas laterales han sido diseñadas conforme a las especificaciones de la normativa '2022 FIA WTCR Technical Regulations'. Estas placas presentan un espesor de  $6 \text{ mm}$  y cuentan con redondeo en todas sus aristas, garantizando así su conformidad con los requisitos establecidos.

**Figura 19**

*Placa lateral.*



#### 4.1.3.3. *Diseño de los soportes*

En este caso, no es preciso realizar el diseño detallado del soporte; simplemente se indican como líneas de guía, como se muestra en la Figura 17. Estas líneas de guía cumplen la función de establecer la condición de apoyo fijo durante el análisis estructural estático.

## 4.2. Dominio computacional

El proceso de mallado se realiza de manera integral mediante Meshing, un módulo dentro del software Ansys, utilizando tanto elementos estructurales (hexaédricos) como no estructurales (tetraédricos). Se asegura la calidad del mallado siguiendo los criterios de oblicuidad y ortogonalidad, los cuales se detallan en el Marco referencial. La Tabla 1 proporciona una descripción de los parámetros utilizados para generar la capa límite tanto en el perfil aerodinámico como en el vehículo dentro del dominio computacional. Con el objetivo de capturar la capa límite en las paredes con mayor precisión, se implementa un factor  $y^+$  que garantiza la obtención de resultados confiables en la subcapa viscosa.

**Tabla 1**

*Parámetros empleados en la generación de la capa límite [18].*

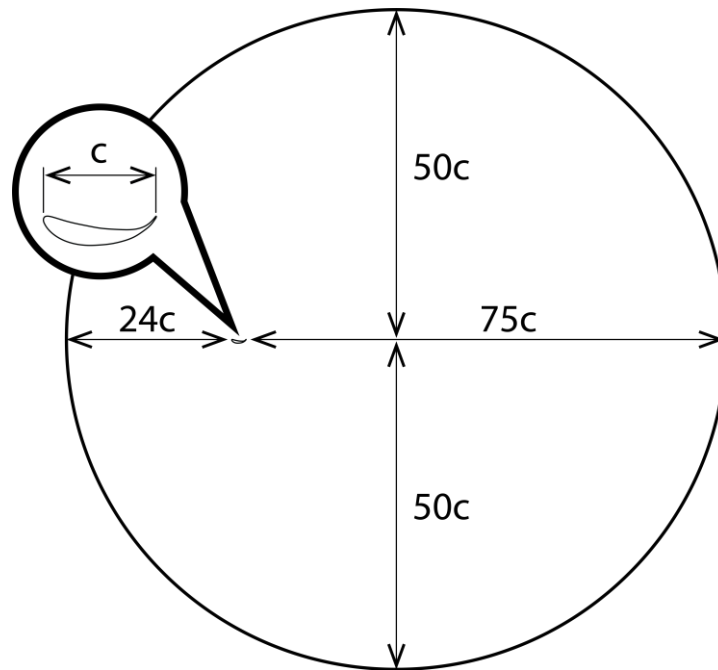
Parámetro	Valor
Factor $y^+$	1
Factor de crecimiento	1.1; 1.2
Cantidad total de capas	20; 25

#### 4.2.1. *Mallado del perfil aerodinámico (bidimensional)*

Para el diseño del perfil aerodinámico, se realiza el mallado generando tres dominios computacionales con diferentes cantidades de celdas. Esto se lleva a cabo con el propósito de validar la convergencia de la malla. Se utiliza una superficie de control *Tipo O* de diámetro  $100c$  con un refinamiento alrededor del perfil aerodinámico, así como en la dirección de generación de la estela. Para la generación de la capa límite alrededor de las paredes, se utilizan 25 celdas.

**Figura 20**

*Dominio computacional para el perfil aerodinámico.*



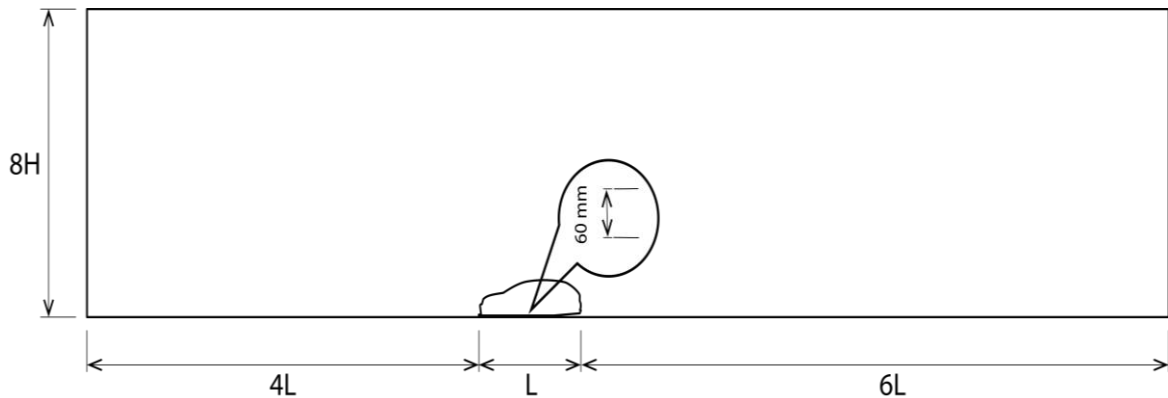
#### **4.2.2. Mallado del vehículo (bidimensional)**

De manera análoga, se procede a construir el dominio computacional para analizar conjuntamente el rendimiento del perfil aerodinámico en el vehículo. Dado que el ángulo de pérdida del perfil aerodinámico es conocido, se utiliza una superficie de control rectangular, ya que la dirección del flujo de aire es completamente horizontal. La cantidad promedio de celdas para las configuraciones de análisis es de aproximadamente 450000 celdas.

En este dominio, se realiza un refinamiento sobre el vehículo y en la dirección de generación de la estela. Se implementa una capa límite de 20 celdas alrededor del vehículo, mientras que para el perfil aerodinámico se mantienen las 25 celdas. Este enfoque garantiza una representación precisa de la interacción entre el perfil aerodinámico y el vehículo en el análisis conjunto.

**Figura 21**

*Dominio computacional para el vehículo.*



*Nota.* Las dimensiones para el dominio computacional del vehículo están basadas en la información proporcionada por Yuan *et al.* [21].

#### **4.2.3. Mallado del alerón posterior (tridimensional)**

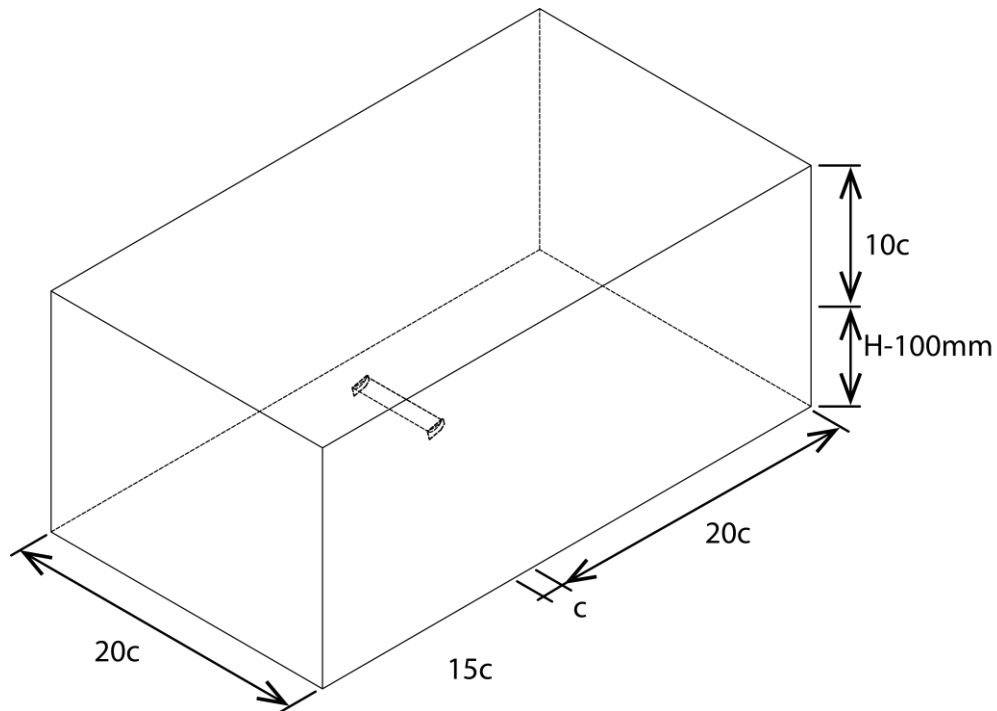
Se procede a generar las celdas para el análisis fluidodinámico tridimensional, considerando las placas laterales del alerón posterior. Las dimensiones del dominio se han determinado de acuerdo con Povitsky y Pierson [22], quienes sugieren una distancia de 14 veces la cuerda en todas las direcciones del dominio. Sin embargo, en este caso, se han ajustado ciertas distancias, dado que la velocidad de análisis se encuentra dentro del rango subsónico incompresible, enfocándonos exclusivamente en la generación de la estela (Figura 22). Además, se crean dos dominios computacionales adicionales: uno para el alerón posterior sin las placas laterales y otro con condición de simetría en las paredes laterales, estos destinados a efectos de comparación.

#### **4.3. Condiciones de contorno y condiciones de volumen**

Las especificaciones que se establecen en los límites del dominio computacional para definir el comportamiento del fluido en esas áreas se conocen como condiciones de contorno. Son necesarios para encontrar una solución precisa y viable al problema de flujo. Las condiciones de volumen son especificaciones dentro del dominio computacional que se establecen para definir las propiedades del fluido en áreas específicas.

**Figura 22**

*Dominio computacional para el alerón posterior.*



#### **4.3.1. Condiciones de contorno y de volumen para el perfil aerodinámico**

En la Tabla 2, se proporciona un desglose detallado de las características que definen las condiciones de contorno y las condiciones de volumen empleadas en la simulación fluidodinámica del perfil aerodinámico. Además, se especifica el modelo de turbulencia seleccionado y el método de solución utilizado. Es relevante destacar que en esta configuración no se tienen en cuenta los efectos del suelo, permitiendo así un análisis con un flujo totalmente libre. Esto es algo que se aleja de los valores reales, pero que sirven para encontrar el ángulo de ataque óptimo para la generación de mayor carga aerodinámica.

La Figura 23 complementa la información visual al presentar la disposición espacial de las condiciones de contorno y de volumen detalladas en la Tabla 2. Este recurso visual proporciona una referencia clara para comprender la ubicación y relación entre los diversos parámetros utilizados en la simulación, facilitando la interpretación y validación de los resultados obtenidos.

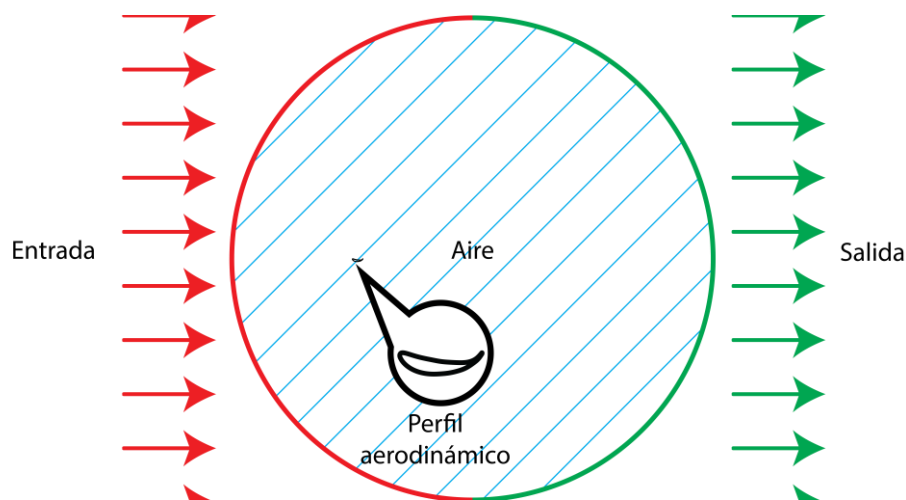
**Tabla 2**

*Condiciones de contorno y de volumen para el perfil aerodinámico.*

Condición de contorno	Tipo	Variable
Entrada	Velocidad de entrada	$V_{\infty} = 70 \text{ m s}^{-1}$ $\alpha = [0, -25; -1]^\circ$ <sup>1 2</sup> [23] $T = 300 \text{ K}$ $P_{atm} = 0 \text{ kPa}$ (manométrica) Intensidad de turbulencia = 1 % [21] Relación de viscosidad turbulenta = 20 % [21]
Salida	Presión de salida	$T = 300 \text{ K}$ $P_{atm} = 0 \text{ kPa}$ Intensidad de turbulencia = 1 % Relación de viscosidad turbulenta = 20 %
Perfil aerodinámico	Pared	Pared estacionaria Sin deslizamiento Cero rugosidad (ideal)
Condición de volumen	Tipo	Variable
Aire	Fluido	$\rho = 1.225 \text{ kg m}^{-3}$ [24] $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [24]
<b>Modelo de turbulencia</b>		$k - \omega$ SST (2 ecuaciones) Consideración de la ecuación de la energía Estado estable
<b>Otras condiciones</b>		Profundidad = 1 m (envergadura) <sup>3</sup> Área = 0.25 m <sup>2</sup> Consideración de la gravedad = 9.81 m s <sup>-2</sup>
<b>Método de solución</b>	Coupled	Gradiente: Basado en celdas de mínimos Presión: Segundo orden Momento, Energía cinética turbulenta, Razón de disipación específica, Energía: Segundo orden contra el viento

**Figura 23**

*Condiciones de contorno y de volumen para el perfil aerodinámico.*



<sup>1</sup> [valor mínimo, valor máximo; incremento]

<sup>2</sup> El ángulo de ataque es representado mediante el vector unitario en sus componentes x-y.

<sup>3</sup> Los resultados de la fuerza aerodinámica son en función de la longitud de envergadura.

### 4.3.2. Condiciones de contorno y de volumen para el vehículo

De manera similar, se integran las condiciones de contorno que configuran el dominio computacional del vehículo. En este contexto, se incluye la condición de contorno del suelo, a la cual se le suma una velocidad de traslación y dirección idéntica a la del flujo de aire incidente. Adicionalmente, se establece una pared en la parte superior del dominio computacional para simular la atmósfera circundante. La Tabla 3 detalla las condiciones aplicadas, proporcionando una referencia para comprender el marco de la simulación.

**Tabla 3**

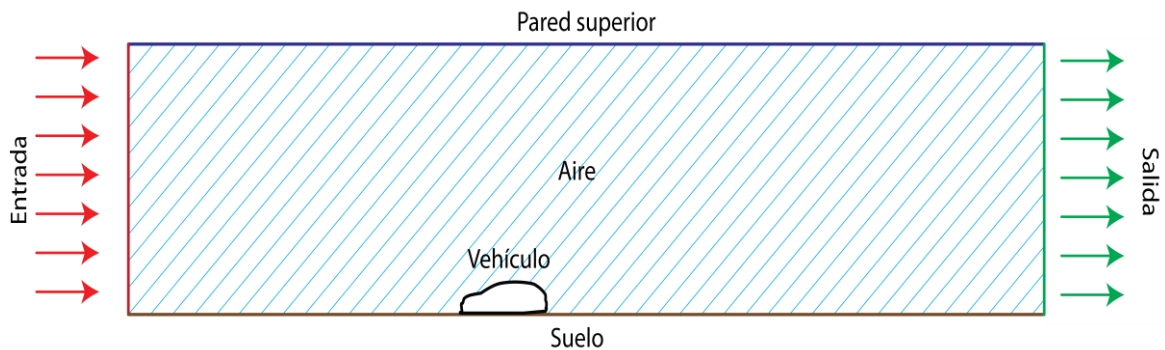
*Condiciones de contorno y de volumen para el vehículo.*

Condición de contorno	Tipo	Variable
Entrada	Velocidad de entrada	$V_{\infty} = 70 \text{ m s}^{-1}$ $T = 300 \text{ K}$ $P_{atm} = 0 \text{ kPa}$ <i>Intensidad de turbulencia = 1 %</i> <i>Relación de viscosidad turbulenta = 20 %</i>
Salida	Presión de salida	$T = 300 \text{ K}$ $P_{atm} = 0 \text{ kPa}$ <i>Intensidad de Turbulencia = 1 %</i> <i>Relación de viscosidad turbulenta = 20 %</i>
Pared superior	Pared	<i>Pared estacionaria</i> <i>Con deslizamiento</i>
Suelo	Pared	<i>Pared en movimiento</i> $V_{suelo} = V_{\infty}$
Vehículo Perfil aerodinámico	Pared	<i>Pared estacionaria</i> <i>Sin deslizamiento</i> <i>Cero rugosidad</i>
Condición de volumen	Tipo	Variable
Aire	Fluido	$\rho = 1.225 \text{ kg m}^{-3}$ $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$
Modelo de turbulencia		$k - \omega \text{ SST}$ <i>Consideración de la ecuación de la energía</i> <i>Estado estable</i>
Otras condiciones		<i>Profundidad = 1 m</i> <i>Área = 1.38 m<sup>2</sup>, 1.63 m<sup>2</sup></i> <i>Consideración de la gravedad = 9.81 m s<sup>-2</sup></i>
Método de solución	Coupled	Gradiente: Basado en celdas de mínimos Presión: Segundo orden Momento, Energía cinética turbulenta, Razón de disipación específica, Energía: Segundo orden contra el viento

La Figura 24 ofrece una representación visual que complementa la información contenida de la Tabla 3. En esta figura, se observa de manera gráfica la disposición y configuración espacial de las condiciones de contorno, lo que facilita la comprensión visual del dominio computacional del vehículo y del suelo en relación con el flujo de aire

### Figura 24

*Condiciones de contorno y de volumen para el vehículo.*



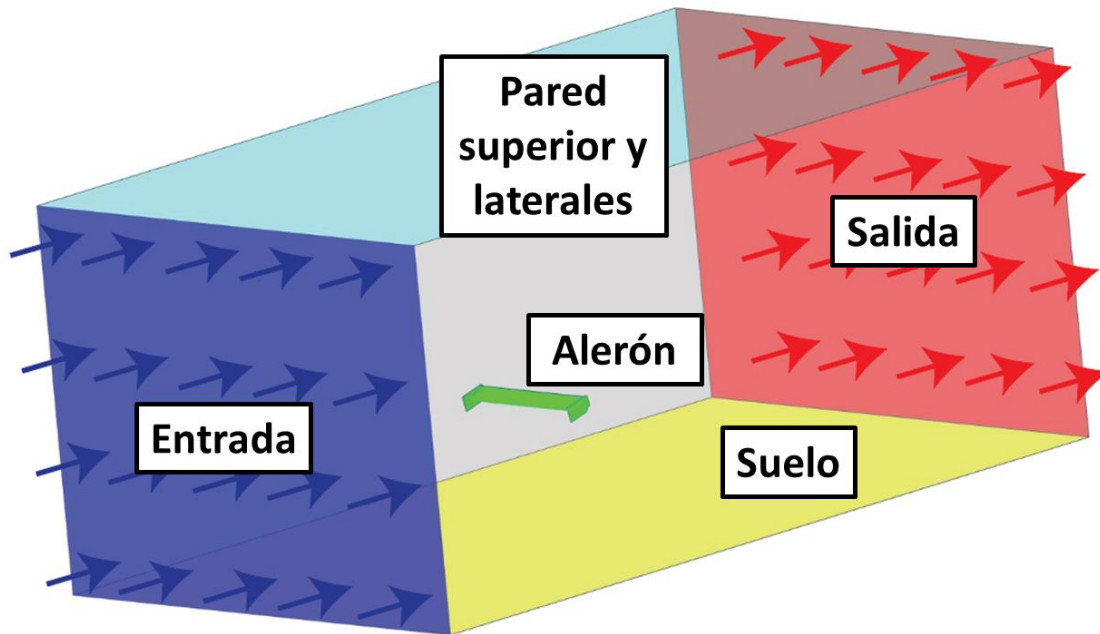
#### 4.3.3. Condiciones de contorno para el alerón posterior

En la simulación fluidodinámica del alerón posterior, se utilizan condiciones de contorno similares a las aplicadas en el análisis bidimensional del vehículo. Sin embargo, al analizar este componente aerodinámico en un dominio tridimensional, las paredes laterales comparten las mismas características que la pared superior. Además, se toman en cuenta los efectos del suelo, incorporando la condición correspondiente en la pared inferior del dominio.

La cantidad de celdas promedio generadas para esta simulación es de aproximadamente  $4.8 \times 10^6$ , asegurando una representación detallada y precisa del comportamiento fluidodinámico del alerón posterior.

**Figura 25**

*Condiciones de contorno y de volumen para el alerón posterior.*



En la Tabla 4, se detallan las condiciones de contorno y de volumen empleadas en el análisis tridimensional del alerón posterior. En este caso, al incorporar las paredes laterales, se asignan las mismas condiciones que a la pared superior, ya que estas áreas están ubicadas lejos del objeto de análisis, que es el alerón posterior. Este enfoque asegura una consistencia en las condiciones aplicadas a las distintas partes del dominio, contribuyendo a una simulación fluidodinámica coherente y representativa del comportamiento del alerón en un entorno tridimensional.

#### **4.4. Resultados**

##### **4.4.1. Cálculos previos**

Antes de iniciar un análisis aerodinámico alrededor de un objeto, es crucial verificar si el fluido, en este caso, el aire utilizado en las simulaciones se comporta como incompresible o compresible. Si el aire se comporta como un fluido incompresible, simplificaría significativamente el proceso del método numérico de la simulación, llevando a una convergencia más rápida y facilitando la implementación del modelo computacional. Este paso inicial es esencial para seleccionar de manera adecuada los enfoques y parámetros en la simulación fluidodinámica, optimizando así la eficiencia del análisis aerodinámico.

**Tabla 4***Condiciones de contorno y de volumen para el alerón posterior.*

Condición de contorno	Tipo	Variable
Entrada	Velocidad de entrada	$V_{\infty} = 70 \text{ m s}^{-1}$ $T = 300 \text{ K}$ $P_{atm} = 0 \text{ kPa}$ <i>Intensidad de turbulencia = 1 %</i> <i>Relación de viscosidad turbulenta = 20 %</i>
Salida	Presión de salida	$T = 300 \text{ K}$ $P_{atm} = 0 \text{ kPa}$ <i>Intensidad de Turbulencia = 1 %</i> <i>Relación de viscosidad turbulenta = 20 %</i>
Paredes laterales Pared superior	Pared	<i>Pared estacionaria</i> <i>Con deslizamiento</i>
Suelo	Pared	<i>Pared en movimiento</i> $V_{suelo} = V_{\infty}$
Alerón posterior	Pared	<i>Pared estacionaria</i> <i>Sin deslizamiento</i> <i>Cero rugosidad</i>
Condición de volumen	Tipo	Variable
Aire	Fluido	$\rho = 1.225 \text{ kg m}^{-3}$ $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$
<b>Modelo de turbulencia</b>		<i>k - <math>\omega</math> SST</i> <i>Consideración de la ecuación de la energía</i> <i>Estado estable</i>
<b>Otras condiciones</b>		$\text{Área} = 0.3485 \text{ m}^2$ <i>Consideración de la gravedad = <math>9.81 \text{ m s}^{-2}</math></i>
<b>Método de solución</b>	Coupled	Gradiente: Basado en celdas de mínimos Presión: Segundo orden Momento, Energía cinética turbulenta, Razón de disipación específica, Energía: Segundo orden contra el viento

Mediante el número de Mach, es factible determinar si el aire exhibe un comportamiento incompresible o no. La velocidad del sonido  $a_{\infty}$  se establece en  $340.29 \text{ m s}^{-1}$  en condiciones estándar [24]. Por lo tanto, el número de Mach a una velocidad de  $70 \text{ m s}^{-1}$  se calcula como:

$$M = \frac{V_{\infty}}{a_{\infty}}$$

$$M = \frac{70 \text{ m s}^{-1}}{340.29 \text{ m s}^{-1}}$$

$$M = 0.21$$

Entonces, al revisar la Figura 10, se observa que el valor calculado es inferior a 0.3, indicando que el flujo de aire se encuentra en el régimen subsónico incompresible. Cuando el número de Mach es menor o igual a 0.4, se opta por considerar únicamente el número de Reynolds en la simulación, el cual está vinculado con la velocidad y la longitud de análisis. Para calcular el número de Reynolds del perfil aerodinámico y del vehículo, se utilizan los datos proporcionados en las Tabla 2 y Tabla 3, respectivamente.

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} L}{\mu}$$

$$Re_{perfil\ aerodinámico} = \frac{1.225\ kg\ m^{-3} \cdot 70\ m\ s^{-1} \cdot 0.25\ m}{1.7894 \times 10^{-5}\ kg\ m^{-1}\ s^{-1}}$$

$$Re_{perfil\ aerodinámico} = 1.2 \times 10^6$$

$$Re_{vehículo} = \frac{1.225\ kg\ m^{-3} \cdot 70\ m\ s^{-1} \cdot 4.324\ m}{1.7894 \times 10^{-5}\ kg\ m^{-1}\ s^{-1}}$$

$$Re_{vehículo} = 2.07 \times 10^7$$

Dado que ambos números de Reynolds se encuentran en el rango de  $10^6 < Re < \infty$ , se concluye que el flujo de aire es completamente turbulento. De análisis en párrafos anteriores, es trascendente tomar con mayor precisión la capa límite que se forma en la superficie del perfil aerodinámico y del vehículo. Para lograr esto, se procede a calcular la altura de la primera celda utilizando las siguientes ecuaciones [3]. Este ajuste es fundamental para garantizar una representación adecuada de los fenómenos turbulentos en la simulación fluidodinámica.

$$C_f = \frac{0.026}{Re^{1/7}} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\tau_{pared} = \frac{C_f \rho V_{\infty}^2}{2} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\tau_{pared} = \frac{C_f \rho V_{\infty}^2}{2} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\Delta s = \frac{y^+ \mu}{V_{fric} \rho}$$

Ecuación 15

Entonces:

$$C_{f, \text{ perfil aerodinámico}} = \frac{0.026}{(1.2 \times 10^6)^{\frac{1}{7}}}$$

$$C_{f, \text{ perfil aerodinámico}} = 3.52 \times 10^{-3}$$

$$C_{f, \text{ vehículo}} = \frac{0.026}{(2.07 \times 10^7)^{\frac{1}{7}}}$$

$$C_{f, \text{ vehículo}} = 2.34 \times 10^{-3}$$

$$\tau_{pared, \text{ perfil aerodinámico}} = \frac{3.52 \times 10^{-3} \cdot 1.225 \text{ kg m}^{-3} \cdot (70 \text{ m s}^{-1})^2}{2}$$

$$\tau_{pared, \text{ perfil aerodinámico}} = 10.6 \text{ Pa}$$

$$\tau_{pared, \text{ vehículo}} = \frac{2.34 \times 10^{-3} \cdot 1.225 \text{ kg m}^{-3} \cdot (70 \text{ m s}^{-1})^2}{2}$$

$$\tau_{pared, \text{ vehículo}} = 7.03 \text{ Pa}$$

$$V_{fric, \text{ perfil aerodinámico}} = \sqrt{\frac{10.6 \text{ Pa}}{1.225 \text{ kg m}^{-3}}}$$

$$V_{fric, \text{ perfil aerodinámico}} = 2.94 \text{ m s}^{-1}$$

$$V_{fric, \text{ vehículo}} = \sqrt{\frac{7.03 \text{ Pa}}{1.225 \text{ kg m}^{-3}}}$$

$$V_{fric, \text{ vehículo}} = 2.40 \text{ m s}^{-1}$$

$$\Delta S_{\text{perfil aerodinámico}} = \frac{1 \cdot 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}}{2.94 \text{ m s}^{-1} \cdot 1.225 \text{ kg m}^{-3}}$$

$$\Delta S_{\text{perfil aerodinámico}} = 4.97 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\Delta S_{\text{vehículo}} = \frac{1 \cdot 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}}{2.40 \text{ m s}^{-1} \cdot 1.225 \text{ kg m}^{-3}}$$

$$\Delta S_{\text{vehículo}} = 6.10 \times 10^{-6} \text{ m}$$

#### 4.4.1.1. Coeficiente de sustentación analítico para el perfil aerodinámico

Antes de avanzar con la simulación aerodinámica, es factible calcular analíticamente el coeficiente de sustentación en un perfil aerodinámico. Siguiendo la 'Teoría del perfil aerodinámico' según White [3], se establece que el coeficiente de sustentación para un perfil aerodinámico con envergadura finita es:

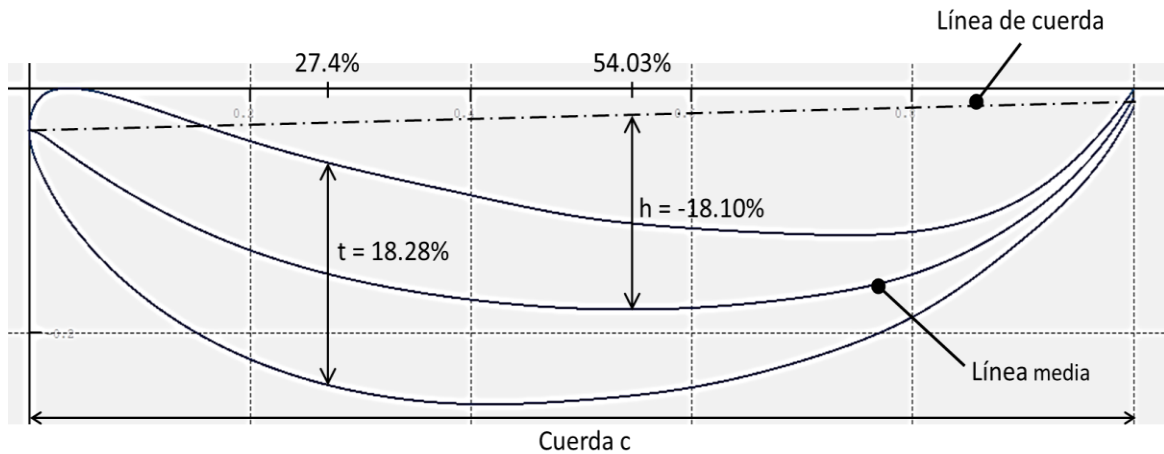
$$C_L = \frac{2\pi \sin\left(\alpha + 2\frac{h}{c}\right)}{1 + \frac{2}{AR}} \quad \text{Ecuación 16}$$

La relación de aspecto, que representa la proporción entre la envergadura y la cuerda de un perfil aerodinámico, se calcula de manera directa, brindando una visión general de la geometría del perfil. Sin embargo, para obtener información más detallada sobre las características específicas del perfil, como el espesor máximo ( $t$ ) y la curvatura máxima ( $h$ ), se recurre al software XFLR5.

Esta herramienta especializada no solo proporciona valores numéricos, sino que también visualiza gráficamente la ubicación de estos parámetros en relación con la cuerda, como se muestra en la Figura 26. La precisión y la comprensión de estos detalles son fundamentales para comprender y predecir con precisión el comportamiento aerodinámico del perfil en diversas condiciones.

**Figura 26**

*Espesor y curvatura máximos obtenidos en XF5.*



Entonces:

$$AR = \frac{1 \text{ m}}{0.25 \text{ m}}$$
$$AR = 4$$

$$\frac{h}{c} = -0.181$$

Además, al considerar la relación de aspecto y la curvatura máxima como datos conocidos, se procede al cálculo del coeficiente de sustentación, resultado que se muestran en la Tabla 5. La Figura 27, por su parte, proporciona una representación visual de los valores del coeficiente de sustentación obtenidos mediante el cálculo analítico.

La curva resultante muestra una pendiente constante, reflejando un crecimiento progresivo a medida que se incrementa el ángulo de ataque. Sin embargo, es importante destacar que esta representación teórica no refleja fielmente el comportamiento práctico. En la realidad, existe un punto crítico donde la sustentación alcanza su valor máximo y, a partir del ángulo de pérdida, comienza a disminuir. Este fenómeno, conocido como el punto de estancamiento o de pérdida, es crucial para comprender las limitaciones y los límites operativos del perfil aerodinámico. La curva analítica proporciona una visión inicial, pero la consideración de estos aspectos prácticos es esencial para una evaluación más precisa del rendimiento aerodinámico en situaciones reales. A continuación, se tabulan los resultados obtenidos del coeficiente de sustentación analítico mediante la siguiente tabla.

**Tabla 5***Coefficiente de sustentación analítico para el perfil aerodinámico.*

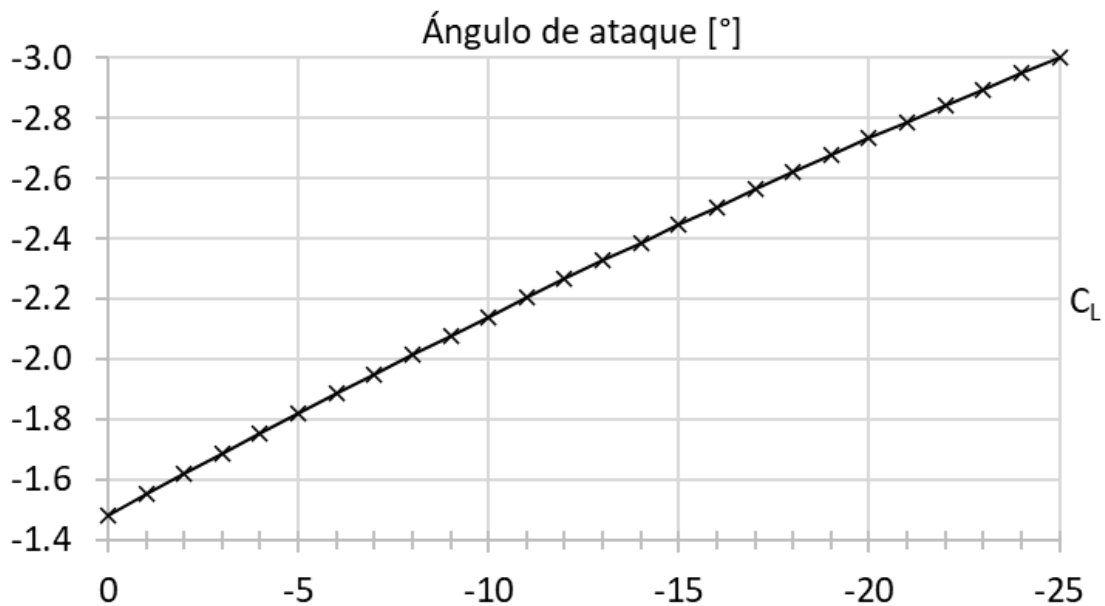
---

Ángulo de ataque		$C_L$
grados	radianes	
0	0.000000	-1.4834
-1	-0.017453	-1.5516
-2	-0.034907	-1.6192
-3	-0.052360	-1.6864
-4	-0.069813	-1.7531
-5	-0.087266	-1.8192
-6	-0.104720	-1.8848
-7	-0.122173	-1.9498
-8	-0.139626	-2.0142
-9	-0.157080	-2.0780
-10	-0.174533	-2.1411
-11	-0.191986	-2.2036
-12	-0.209440	-2.2655
-13	-0.226893	-2.3266
-14	-0.244346	-2.3871
-15	-0.261799	-2.4468
-16	-0.279253	-2.5057
-17	-0.296706	-2.5639
-18	-0.314159	-2.6214
-19	-0.331613	-2.6780
-20	-0.349066	-2.7338
-21	-0.366519	-2.7888
-22	-0.383972	-2.8429
-23	-0.401426	-2.8961
-24	-0.418879	-2.9485
-25	-0.436332	-3.0000

---

**Figura 27**

*Coefficiente de sustentación analítico del perfil aerodinámico.*



#### **4.4.2. Análisis CFD del perfil aerodinámico**

Para confirmar la convergencia de la malla, se emplearon tres dominios computacionales con distintas cantidades de celdas, lo que generó variaciones mínimas en los coeficientes de arrastre y sustentación. Los resultados de estas simulaciones se presentan en las Tabla 6 y Tabla 7.

La Figura 28 exhibe gráficamente los datos recopilados en ambas tablas, destacando de manera más evidente en el gráfico del coeficiente de sustentación el punto de pérdida, indicando el ángulo donde se logra la máxima sustentación o carga aerodinámica. A partir de este ángulo crítico, el coeficiente de sustentación disminuye gradualmente, mientras que el coeficiente de arrastre muestra un aumento con una pendiente más pronunciada.

**Tabla 6***Coefficiente de arrastre del perfil aerodinámico a 70 m s<sup>-1</sup>.*

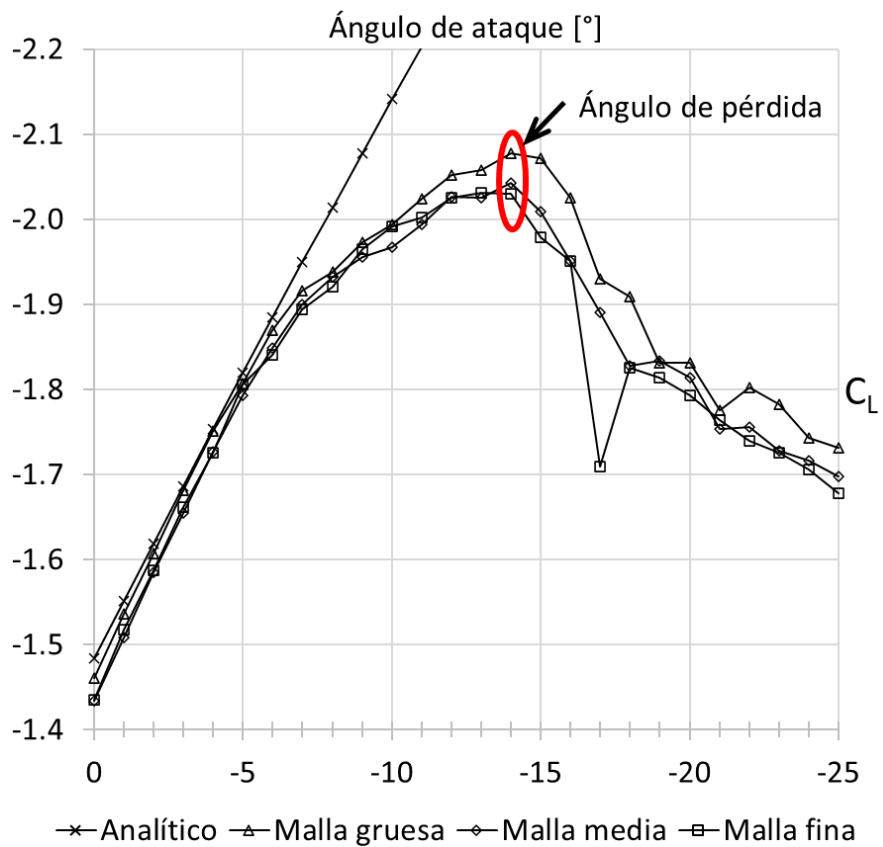
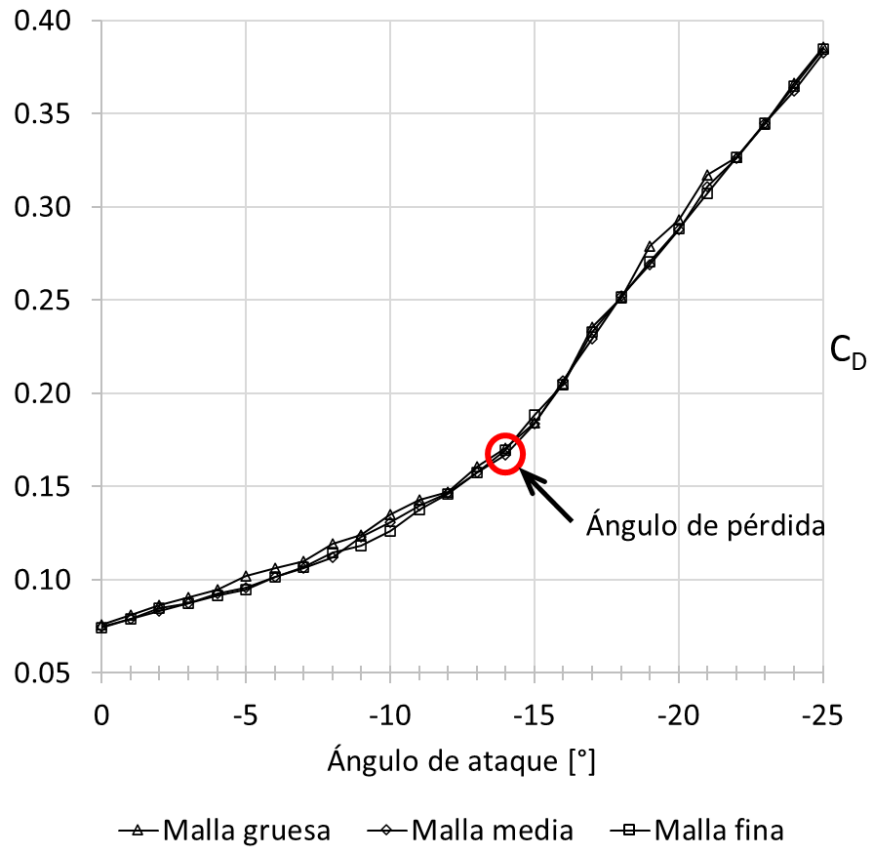
Ángulo de ataque	Malla gruesa 144022 celdas	Malla media 497706 celdas	Porcentaje de variación MG - MM	Malla fina 1885772 celdas	Porcentaje de variación MM - MF
0	0.0759	0.0748	1.46	0.0745	0.50
-1	0.0809	0.0788	2.67	0.0788	0.06
-2	0.0863	0.0833	3.55	0.0846	1.50
-3	0.0907	0.0872	4.07	0.0874	0.29
-4	0.0950	0.0924	2.78	0.0916	0.84
-5	0.1018	0.0959	6.19	0.0945	1.48
-6	0.1062	0.1015	4.61	0.1017	0.18
-7	0.1100	0.1062	3.62	0.1070	0.79
-8	0.1194	0.1119	6.75	0.1147	2.48
-9	0.1239	0.1231	0.71	0.1184	3.97
-10	0.1350	0.1310	3.06	0.1262	3.76
-11	0.1429	0.1397	2.28	0.1375	1.58
-12	0.1471	0.1464	0.44	0.1462	0.20
-13	0.1605	0.1576	1.84	0.1573	0.20
-14	0.1704	0.1714	0.58	0.1696	0.47
-15	0.1843	0.1836	0.35	0.1884	2.52
-16	0.2049	0.2069	0.96	0.2044	1.21
-17	0.2353	0.2292	2.63	0.2330	1.63
-18	0.2511	0.2524	0.51	0.2515	0.37
-19	0.2790	0.2688	3.78	0.2704	0.57
-20	0.2933	0.2877	1.97	0.2882	0.18
-21	0.3174	0.3107	2.16	0.3074	1.07
-22	0.3268	0.3261	0.19	0.3265	0.12
-23	0.3446	0.3447	0.02	0.3448	0.05
-24	0.3664	0.3621	1.18	0.3645	0.67
-25	0.3857	0.3825	0.83	0.3846	0.54

**Tabla 7***Coefficiente de sustentación del perfil aerodinámico a 70 m s<sup>-1</sup>.*

Ángulo de ataque	Analítico	Malla gruesa 144022 celdas	Porcentaje de variación A - MG	Malla media 497706 celdas	Porcentaje de variación MG - MM	Malla fina 1885772 celdas	Porcentaje de variación MM - MF
0	-1.4834	-1.4606	1.56	-1.4339	1.87	-1.4356	0.12
-1	-1.5516	-1.5364	0.99	-1.5087	1.83	-1.5175	0.58
-2	-1.6192	-1.6076	0.73	-1.5849	1.43	-1.5877	0.18
-3	-1.6864	-1.6812	0.31	-1.6548	1.59	-1.6621	0.44
-4	-1.7531	-1.7513	0.10	-1.7264	1.44	-1.7254	0.06
-5	-1.8192	-1.8073	0.66	-1.7934	0.78	-1.8054	0.66
-6	-1.8848	-1.8696	0.81	-1.8483	1.15	-1.8404	0.43
-7	-1.9498	-1.9156	1.78	-1.9001	0.82	-1.8937	0.34
-8	-2.0142	-1.9379	3.93	-1.9320	0.31	-1.9212	0.56
-9	-2.0780	-1.9734	5.30	-1.9551	0.94	-1.9651	0.51
-10	-2.1411	-1.9942	7.37	-1.9676	1.35	-1.9912	1.19
-11	-2.2036	-2.0247	8.84	-1.9936	1.56	-2.0024	0.44
-12	-2.2655	-2.0515	10.43	-2.0266	1.23	-2.0248	0.09
-13	-2.3266	-2.0583	13.04	-2.0248	1.65	-2.0309	0.30
-14	-2.3871	-2.0775	14.90	-2.0430	1.69	-2.0298	0.65
-15	-2.4468	-2.0714	18.12	-2.0088	3.12	-1.9785	1.53
-16	-2.5057	-2.0257	23.70	-1.9508	3.84	-1.9513	0.02
-17	-2.5639	-1.9306	32.80	-1.8907	2.11	-1.7099	10.58
-18	-2.6214	-1.9094	37.29	-1.8277	4.47	-1.8252	0.14
-19	-2.6780	-1.8309	46.27	-1.8342	0.18	-1.8143	1.10
-20	-2.7338	-1.8313	49.28	-1.8144	0.93	-1.7934	1.17
-21	-2.7888	-1.7761	57.02	-1.7530	1.31	-1.7639	0.61
-22	-2.8429	-1.8023	57.74	-1.7560	2.63	-1.7394	0.96
-23	-2.8961	-1.7825	62.47	-1.7274	3.19	-1.7253	0.12
-24	-2.9485	-1.7431	69.16	-1.7159	1.58	-1.7064	0.56
-25	-3.0000	-1.7317	73.24	-1.6972	2.03	-1.6781	1.13

**Figura 28**

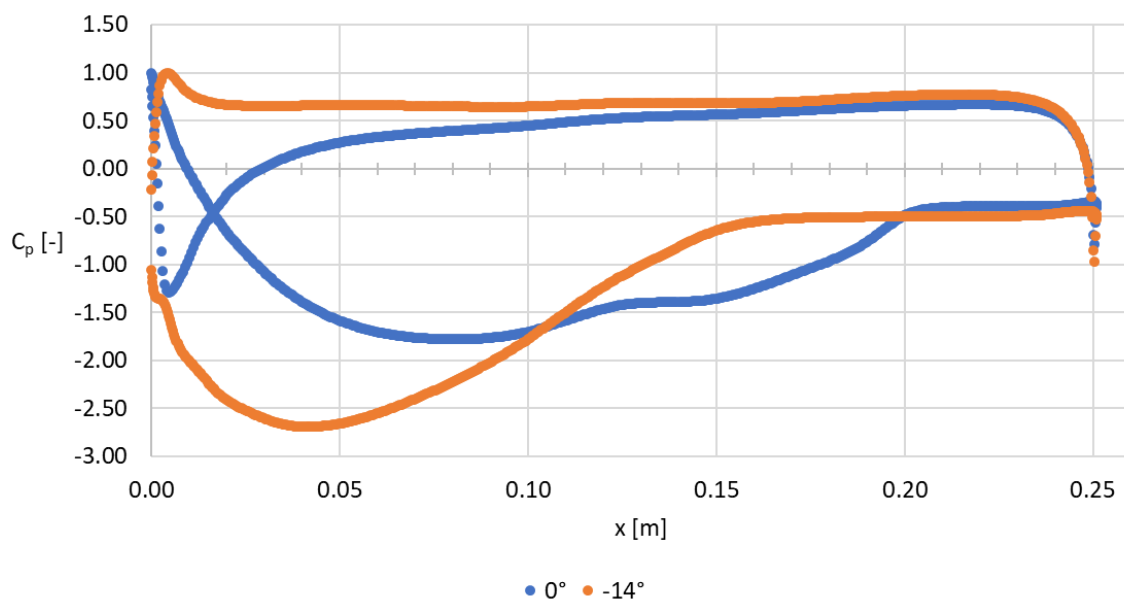
*Coefficiente de arrastre y sustentación del perfil aerodinámico a  $70 \text{ m s}^{-1}$ .*



Habiendo identificado que el ángulo de ataque que produce el mayor coeficiente de sustentación es  $-14^\circ$ , se realiza una comparación en la Figura 29 entre los coeficientes de presión a  $0^\circ$  y  $-14^\circ$ . En cuanto al coeficiente de sustentación analítico, hasta los  $-6^\circ$  mantiene una proximidad con las simulaciones, pero más allá de este punto, se observa la dificultad de mantener esta idealidad. Estas comparaciones y observaciones son esenciales para evaluar la validez de la simulación y ajustar los resultados a las condiciones reales de funcionamiento del perfil aerodinámico.

**Figura 29**

*Coficiente de presión del perfil aerodinámico a  $70 \text{ m s}^{-1}$ .*



En el análisis del coeficiente de presión, un valor positivo indica que las presiones se encuentran por encima de la presión de referencia (presión atmosférica), y este coeficiente no debe exceder de 1; generalmente, se sitúa sobre el intradós o la zona de sobrepresión. Mientras que el valor de 0 indica una zona de estancamiento, generalmente ubicada en el borde de ataque; es decir, la presión es igual a la presión de referencia.

Por otro lado, los valores negativos representan las presiones negativas que se encuentran en el extradós, donde existen depresiones o zonas de baja presión. La interpretación de estos coeficientes es esencial para comprender las variaciones locales de presión sobre el perfil aerodinámico, lo que contribuye a una evaluación detallada del comportamiento aerodinámico en diferentes áreas de este.

En la figura anterior, se observa que a un ángulo de ataque de  $-14^\circ$  se genera una sobrepresión en toda la parte superior del perfil aerodinámico, lo que contribuye significativamente a la generación de carga aerodinámica. En contraste, con un ángulo de ataque de  $0^\circ$ , en el intradós se inicia con una depresión desde el borde de ataque, pero aproximadamente a  $0.15c$  se produce una transición hacia una zona de sobrepresión.

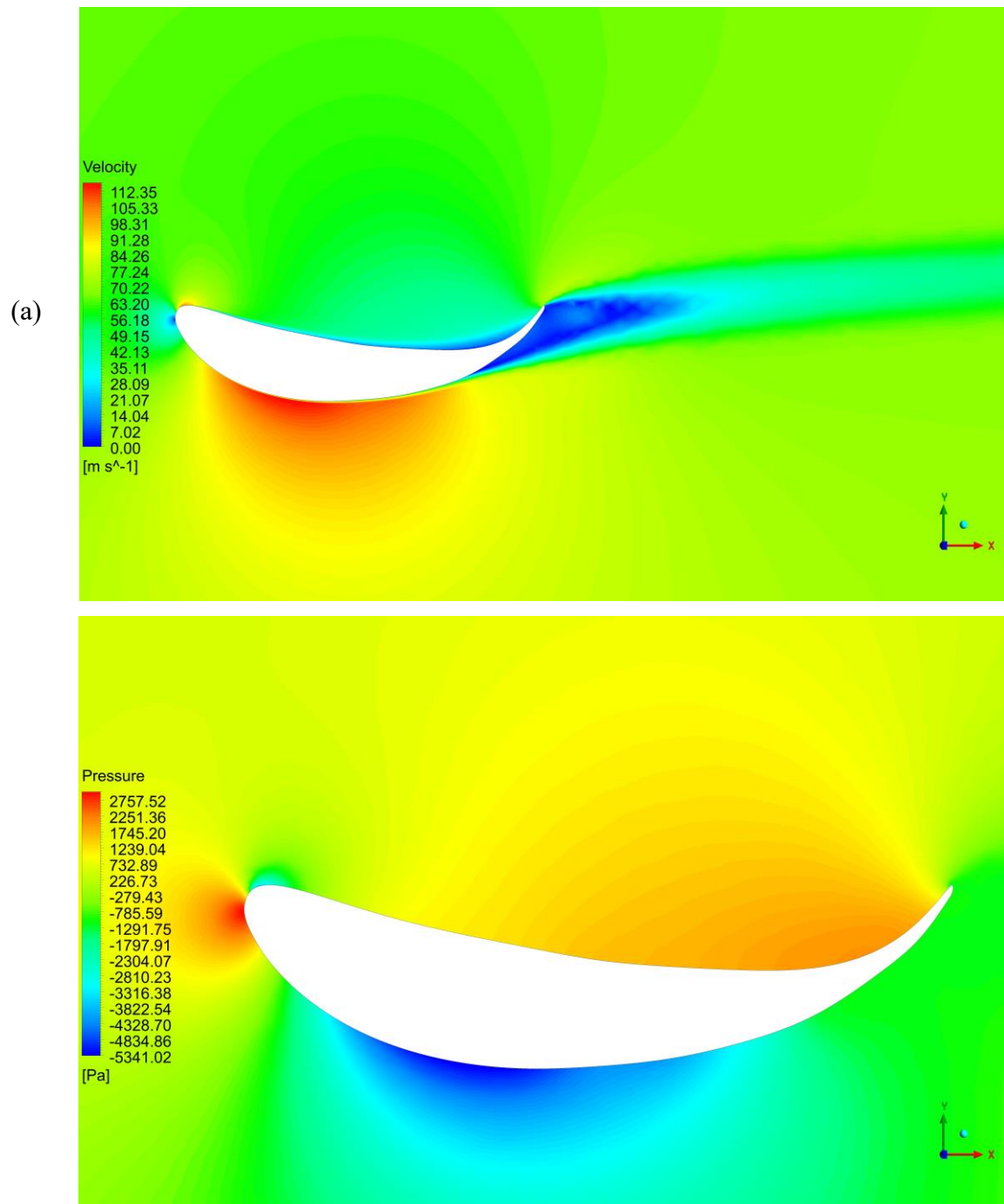
En el extradós, por otro lado, se experimenta inicialmente una sobrepresión, pero alrededor de  $0.05c$  se presenta una zona de depresión. En marcado contraste, a  $-14^\circ$  no se observa este tipo de cambios en las presiones sobre el perfil aerodinámico, lo que resalta la influencia significativa del ángulo de ataque en la distribución de las presiones y, por ende, en el rendimiento aerodinámico del perfil.

En la Figura 30, se presentan los campos de velocidad y presión correspondientes a los ángulos de ataque de  $0^\circ$  y  $-14^\circ$ . En estas representaciones, los tonos más rojos indican valores más altos, mientras que los tonos más azules representan valores más bajos. Al trabajar con aire considerado como un fluido incompresible, se puede aplicar la Ecuación de Bernoulli, que establece que la velocidad y la presión son inversamente proporcionales. En otras palabras, en las zonas con menor velocidad, se experimentan presiones más elevadas, mientras que en las zonas con mayor velocidad se generan presiones más bajas, incluyendo zonas de presiones negativas.

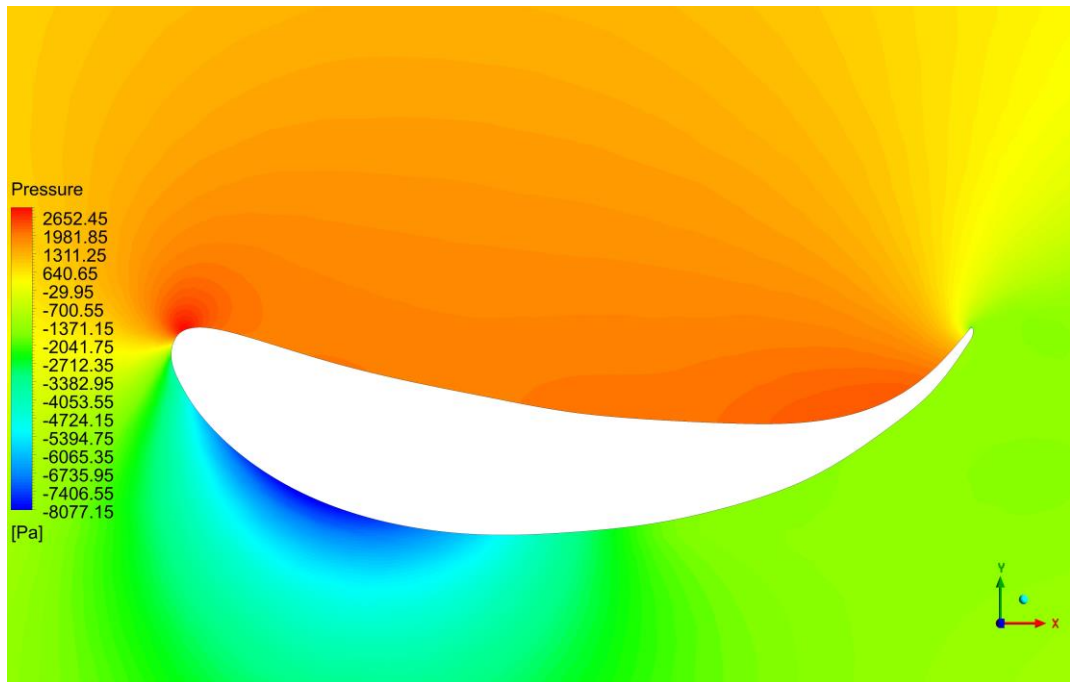
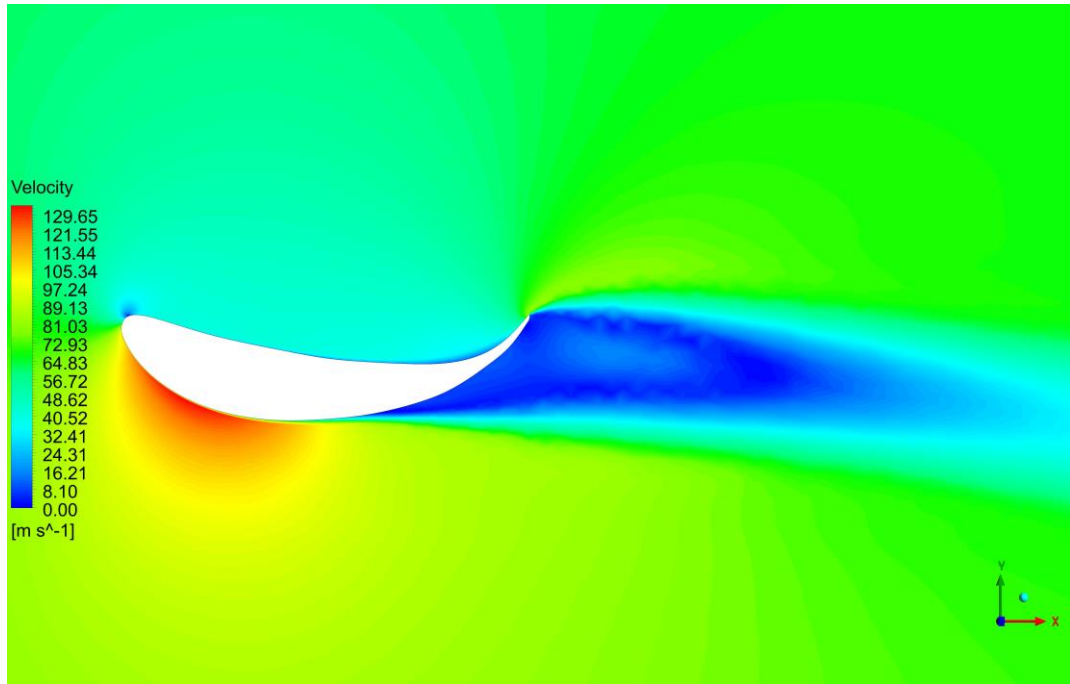
Es importante señalar que, en cualquier análisis de fluidos, la velocidad en las paredes se mantiene en cero debido a los esfuerzos cortantes generados en la capa límite, resultado de la viscosidad del fluido. Este fenómeno refleja la interacción compleja entre la velocidad del flujo y la distribución de presiones en la superficie del perfil aerodinámico, contribuyendo a una comprensión más profunda del comportamiento aerodinámico en diferentes condiciones de ángulo de ataque.

**Figura 30**

*Campo de velocidad y presión del perfil aerodinámico a (a)  $0^\circ$ , y (b)  $-14^\circ$ .*



(b)



En ambas configuraciones de ángulo de ataque, es evidente que en la zona del borde de fuga se observan velocidades muy bajas, lo que resulta en turbulencia y deja un rastro visible de la estela detrás del perfil. En la parte superior del perfil, las velocidades son más bajas en comparación con el lado inferior, dando lugar a zonas de sobrepresión en el intradós. Por el contrario, en el extradós se presentan presiones negativas. Este marcado diferencial de presión conduce a que la fuerza de sustentación actúe hacia abajo, generando así carga aerodinámica.

La distribución asimétrica de velocidades y presiones en la superficie del perfil aerodinámico destaca la complejidad de la interacción fluidodinámica y la influencia directa del ángulo de ataque en la generación de fuerzas aerodinámicas. Este análisis detallado proporciona una visión clara de los fenómenos turbulentos y los patrones de flujo que son fundamentales para comprender y optimizar el rendimiento aerodinámico en aplicaciones prácticas.

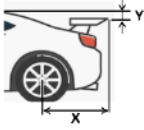
#### ***4.4.3. Análisis CFD del vehículo***

De manera análoga, se aborda el análisis del vehículo, para lo cual se ha elaborado una tabla con diversas configuraciones que especifican la ubicación del perfil aerodinámico. En esta tabla, se utiliza el primer valor ( $X$ ) para representar la longitud entre el eje posterior y el borde de fuga del perfil aerodinámico, mientras que el segundo valor ( $Y$ ) indica la altura desde el nivel máximo del techo hasta el perfil aerodinámico, en dirección hacia abajo. Este enfoque permite explorar cómo la posición y la geometría del perfil aerodinámico afectan las características aerodinámicas del vehículo en términos de arrastre y sustentación.

Con base en los datos recopilados de la Tabla 8, se ha generado una gráfica que combina los coeficientes de arrastre y sustentación mediante puntos. El propósito de esta representación gráfica es facilitar la evaluación y selección de la configuración óptima para la ubicación del alerón posterior. Al observar la gráfica, se destaca que la configuración 7 se distingue por generar la mayor carga aerodinámica, evidenciada por su elevado coeficiente de sustentación. Sin embargo, es crucial interpretar este resultado con cautela, ya que un alto coeficiente de sustentación no necesariamente implica que el alerón posterior esté aportando la fuerza requerida. Más bien, sugiere que este componente aerodinámico está desempeñando la función de reajustar la dirección del flujo aguas abajo.

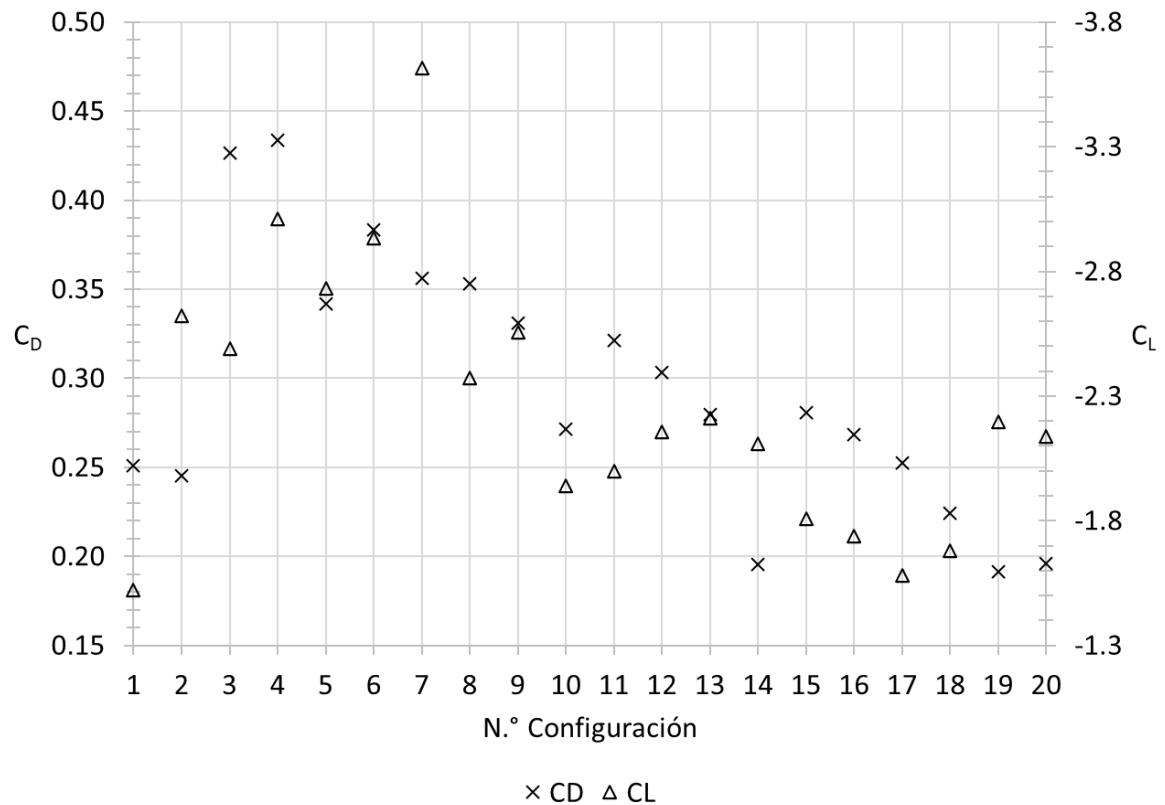
Es importante tener en cuenta que el análisis aerodinámico del alerón se ve afectado cuando se consideran los efectos del suelo, ya que este componente se encuentra a una altura relativamente baja. La interacción con el suelo genera una reacción de empuje significativa. Además, la configuración 7 es una de las que produce el mayor arrastre, superando el doble del arrastre del vehículo sin accesorio aerodinámico. Este hallazgo subraya la complejidad de encontrar un equilibrio entre la generación de sustentación adicional y el control del arrastre, aspectos fundamentales en el diseño efectivo de un alerón posterior.

**Tabla 8***Coefficiente de arrastre y sustentación del vehículo a  $70 \text{ m s}^{-1}$ .*

	Número de configuración	$C_D$	$C_L$	
Vehículo sin accesorios aerodinámicos	1	0.2508	-1.5231	
Vehículo con divisor frontal	2	0.2452	-2.6215	
900 - 0	3	0.4267	-2.4901	
1000 - 0	4	0.4335	-3.0093	
1000 - 100	5	0.3418	-2.7306	
1100 - 0	6	0.3831	-2.9354	
1100 - 100	7	0.3562	-3.6160	
1200 - 0	8	0.3532	-2.3712	
1200 - 100	9	0.3311	-2.5547	
1200 - 200	10	0.2716	-1.9414	
Vehículo con alerón posterior	1300 - 0	11	0.3211	-1.9992
1300 - 100	12	0.3035	-2.1567	
1300 - 200	13	0.2795	-2.2132	
1300 - 300	14	0.1954	-2.1081	
1430 - 0	15	0.2807	-1.8088	
1430 - 100	16	0.2684	-1.7379	
1430 - 200	17	0.2526	-1.5814	
1430 - 300	18	0.2243	-1.6787	
1430 - 400	19	0.1915	-2.1962	
1430 - 500	20	0.1962	-2.1396	

**Figura 31**

*Coefficiente de arrastre y sustentación del vehículo a  $70 \text{ m s}^{-1}$ .*



Esta configuración, específicamente la número 7, podría resultar adecuada para un vehículo que requiera una alta carga aerodinámica para mejorar su estabilidad, como es común en vehículos de carreras. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que esta mayor carga aerodinámica se traduce también en un considerable aumento del arrastre, lo que podría no ser ideal para la eficiencia del combustible.

Por otro lado, al observar la configuración 19, se destaca por generar el menor arrastre, manteniendo al mismo tiempo una carga aerodinámica significativa, pero muy por debajo de la configuración 7. Esta configuración se presenta como una opción favorable para vehículos que buscan un equilibrio entre la eficiencia del combustible y la estabilidad, como es el caso de los autos familiares. Este punto de vista podría ser especialmente valioso para optimizar el rendimiento aerodinámico en condiciones de uso cotidiano, donde la eficiencia del combustible juega un papel fundamental.

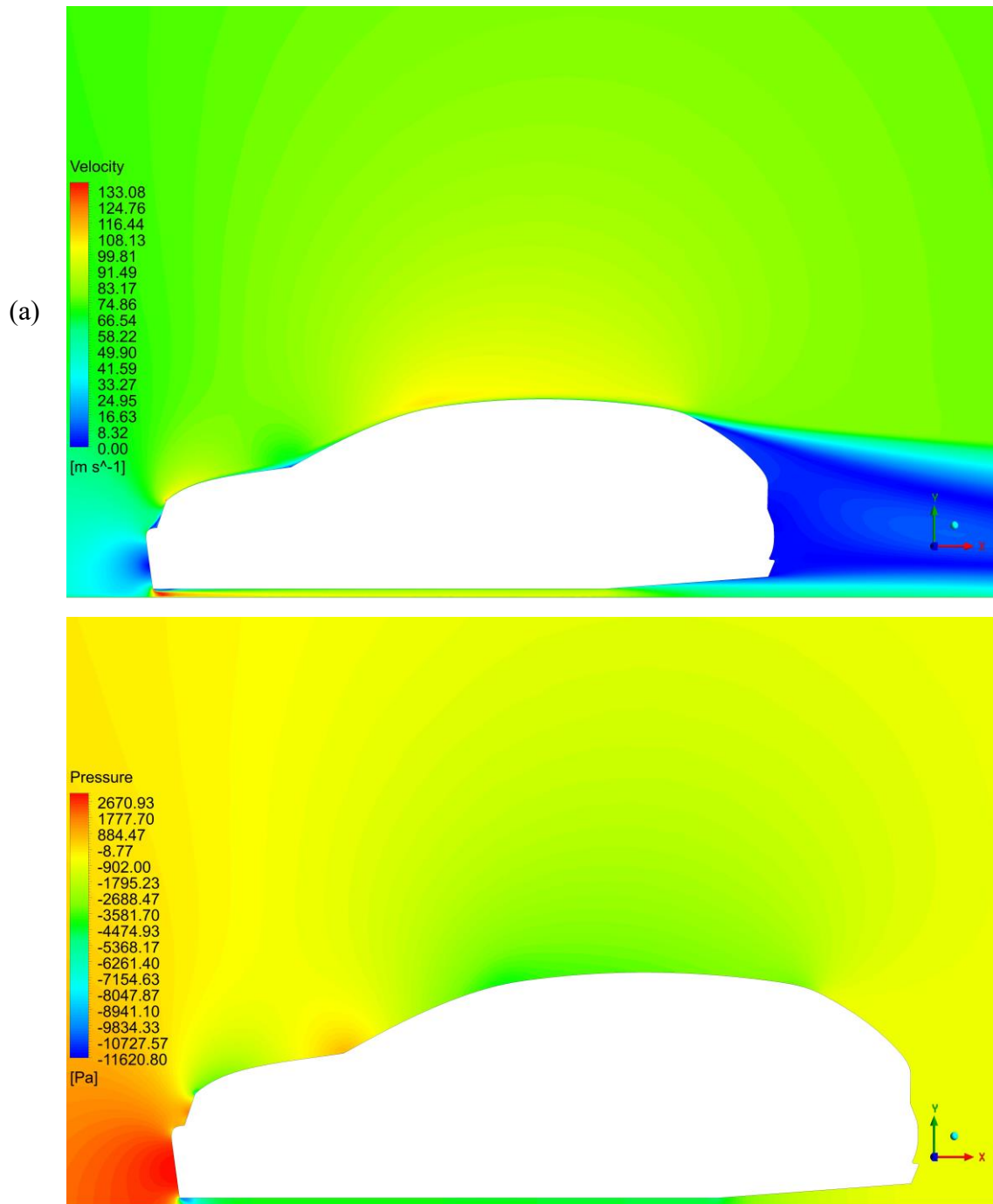
En la configuración óptima seleccionada (7), no es preciso afirmar que el coeficiente aerodinámico del vehículo en la configuración 1 y 2 se mantiene constante en todos los ajustes. Esto se debe a que, al encontrarse cerca de distintos objetos a una distancia aproximada, la aerodinámica del vehículo se ve afectada por la interacción con las superficies circundantes, como se ha mencionado con anterioridad al abordar la reacción de empuje. En este contexto, es fundamental destacar las variaciones en los coeficientes aerodinámicos, ya que la presencia de objetos cercanos, paredes o el suelo puede generar cambios significativos en la fuerza aerodinámica.

El coeficiente de arrastre del vehículo y del alerón es de 0.3471 y 0.0091, respectivamente, mientras que los coeficientes de sustentación son -3.4052 y -0.2108, respectivamente. Como se puede observar, el coeficiente de sustentación del alerón experimentó una drástica disminución. Este fenómeno se atribuye a la influencia de los efectos de pared del vehículo y del suelo. Esta observación se valida mediante el análisis tridimensional, que incorpora el efecto del suelo, en comparación con el análisis bidimensional del perfil aerodinámico, donde se considera un flujo totalmente libre. Este contraste destaca la importancia de tener en cuenta la interacción compleja con las superficies circundantes para obtener resultados más precisos en la evaluación de los coeficientes aerodinámicos.

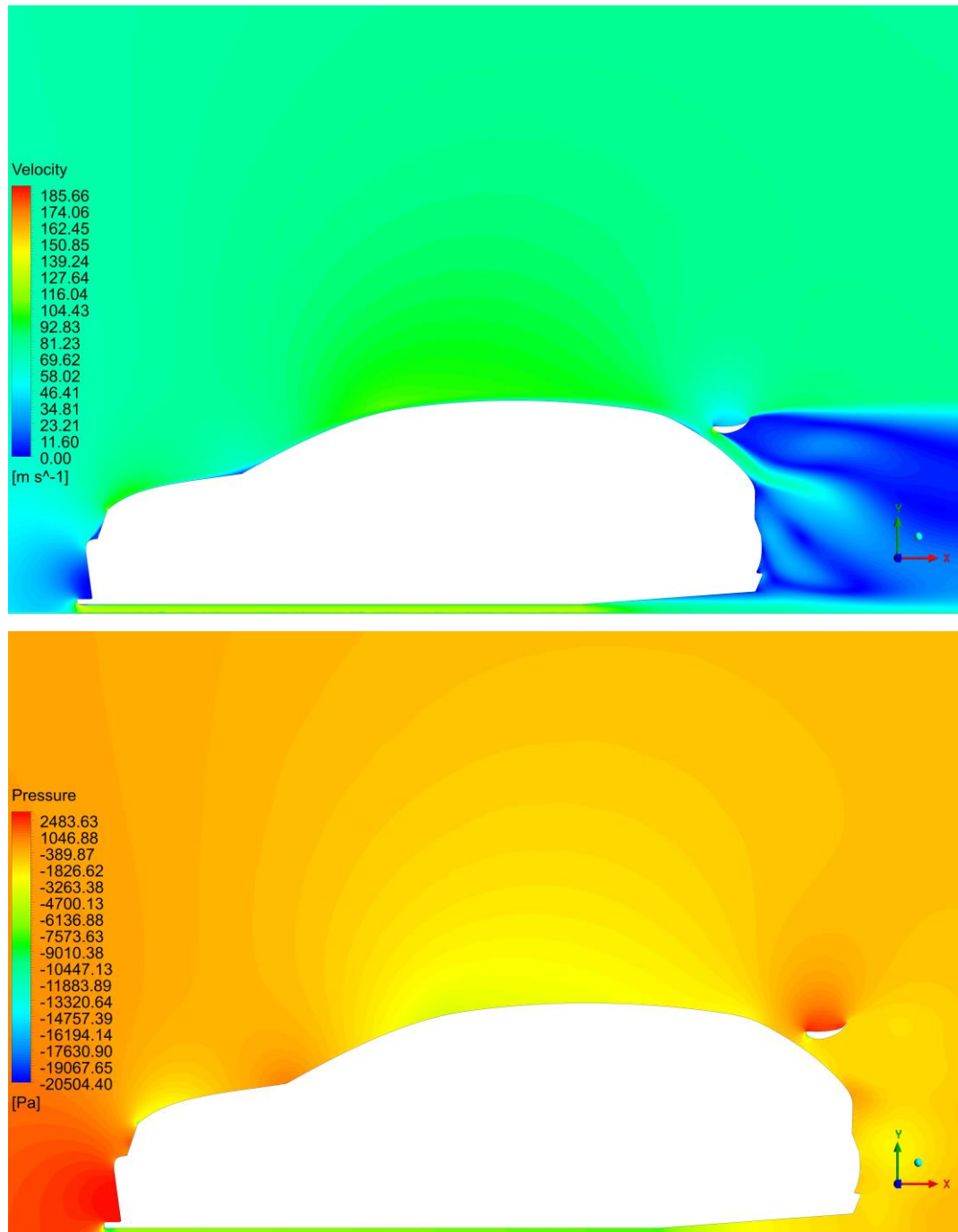
En la Figura 32 se presentan los campos de velocidades y presiones correspondientes a tres configuraciones: el vehículo sin accesorios aerodinámicos, el vehículo con divisor frontal y el vehículo con alerón posterior ajustado al ángulo de ataque que ofrece el mejor coeficiente de sustentación. En el diagrama de presión del vehículo equipado con divisor frontal y alerón posterior, se observa claramente un campo de presión más pronunciado en comparación con las otras dos configuraciones.

**Figura 32**

*Campo de velocidad y presión del vehículo (a) sin accesorios aerodinámicos, y (b) con alerón posterior.*



(b)

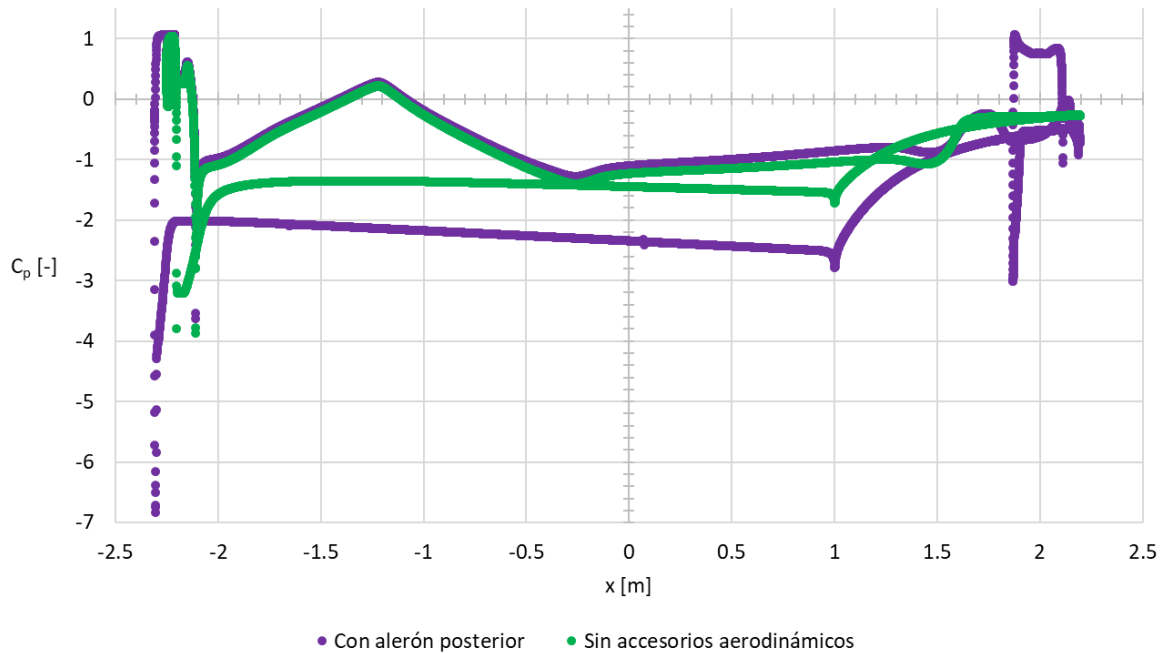


Este fenómeno subraya la generación de una carga aerodinámica significativamente mayor cuando el ángulo de ataque del componente posterior está ajustado a  $-14^\circ$ . La presión adicional generada en estas condiciones contribuye a mejorar la estabilidad y el rendimiento aerodinámico del vehículo. Al examinar el campo de velocidades, se observa que la configuración óptima genera una zona de turbulencia significativamente mayor. Este fenómeno, de cierta manera, afecta el rendimiento general del vehículo. Esta observación se respalda con el aumento del coeficiente de arrastre en comparación con la configuración del

vehículo sin accesorios aerodinámicos. La introducción de un componente adicional, como el alerón posterior ajustado al ángulo de ataque óptimo, contribuye a la generación de un vacío más pronunciado, lo que resulta en un aumento de la presión en la parte posterior del vehículo.

**Figura 33**

*Coefficiente de presión del vehículo a  $70 \text{ m s}^{-1}$ .*



En los tres campos de presiones, se destaca claramente una zona de alta presión justo en el inicio del parabrisas del vehículo, y este fenómeno es aún más evidente en el diagrama del coeficiente de presión, donde se observa una sobrepresión notable en ese punto de análisis. Esta variación se atribuye al cambio en la geometría entre la parte delantera y el parabrisas del vehículo. A diferencia del coeficiente de presión del alerón, que se mantiene constante en comparación con el análisis anterior, las curvas de la parte inferior del vehículo son particularmente notables.

En la configuración óptima, se genera una mayor depresión en esta área, contribuyendo así a obtener el mejor coeficiente de sustentación. Este resultado positivo se logra gracias a la influencia combinada de los componentes aerodinámicos agregados en la parte delantera y posterior del vehículo.

#### 4.4.4. Análisis CFD del alerón posterior

Como se ha mencionado en secciones anteriores, es crucial reconocer que el coeficiente de sustentación se verá afectado por el efecto del suelo, que genera una reacción significativa debido a la altura a la que se encuentra el componente aerodinámico. Con el propósito de validar esta afirmación, se han llevado a cabo tres configuraciones, detalladas en la Tabla 9. Estas configuraciones adicionales permiten evaluar de manera más específica cómo la interacción con el suelo influye en los coeficientes aerodinámicos, proporcionando así una comprensión más completa de los efectos en juego.

**Tabla 9**

*Coficiente de arrastre y sustentación del alerón posterior a  $70 \text{ m s}^{-1}$ .*

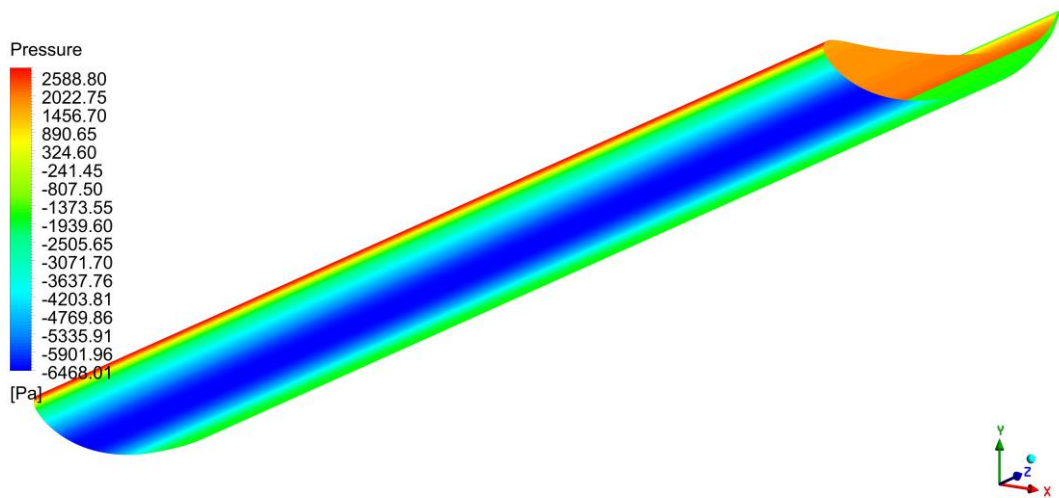
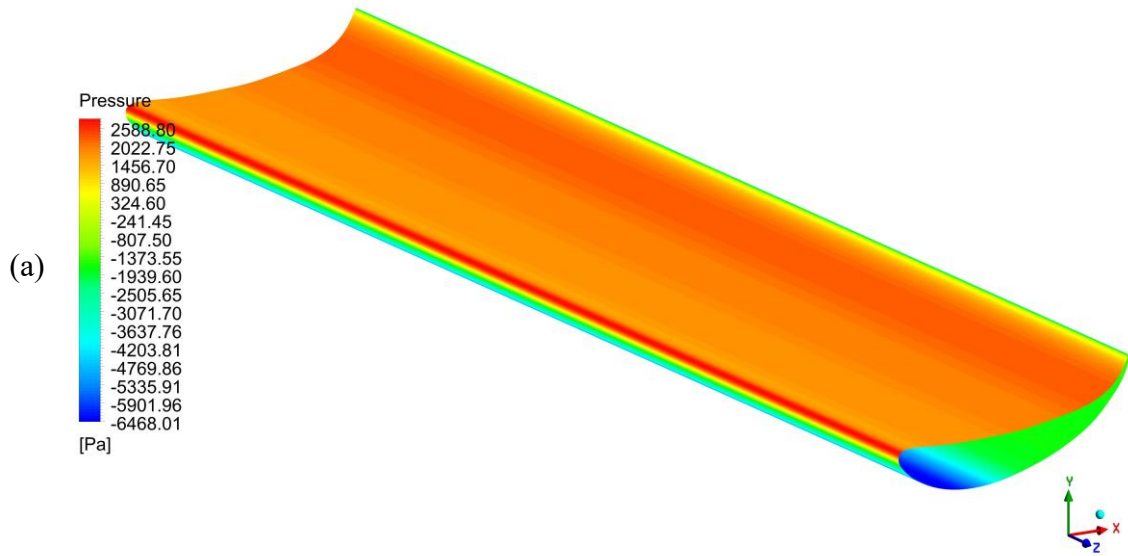
	$C_D$	$C_L$
Bidimensional		
<i>Profundidad = 1.38 m</i>	<b>0.2301</b>	<b>-1.6876</b>
<i>Área = 0.345 m<sup>2</sup></i>		
Tridimensional (solo alerón)	<b>0.3211</b>	<b>-1.5874</b>
<i>Área = 0.345 m<sup>2</sup></i>		
Tridimensional (conjunto)	0.0084 (placas laterales)	0.0008 (placas laterales)
<i>Área = 0.3485 m<sup>2</sup></i>	0.3022 (alerón)	-1.6275 (alerón)
	<b>0.3106</b>	<b>-1.6267</b>

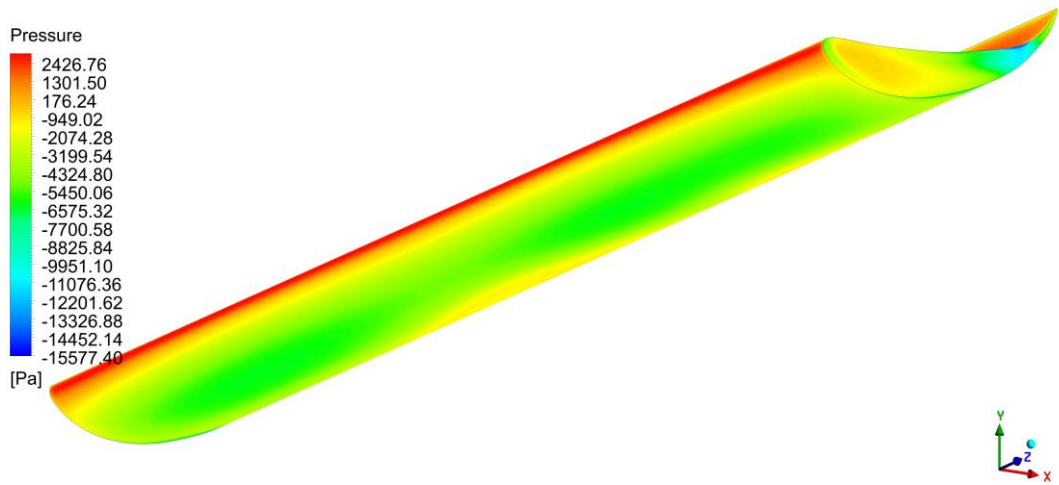
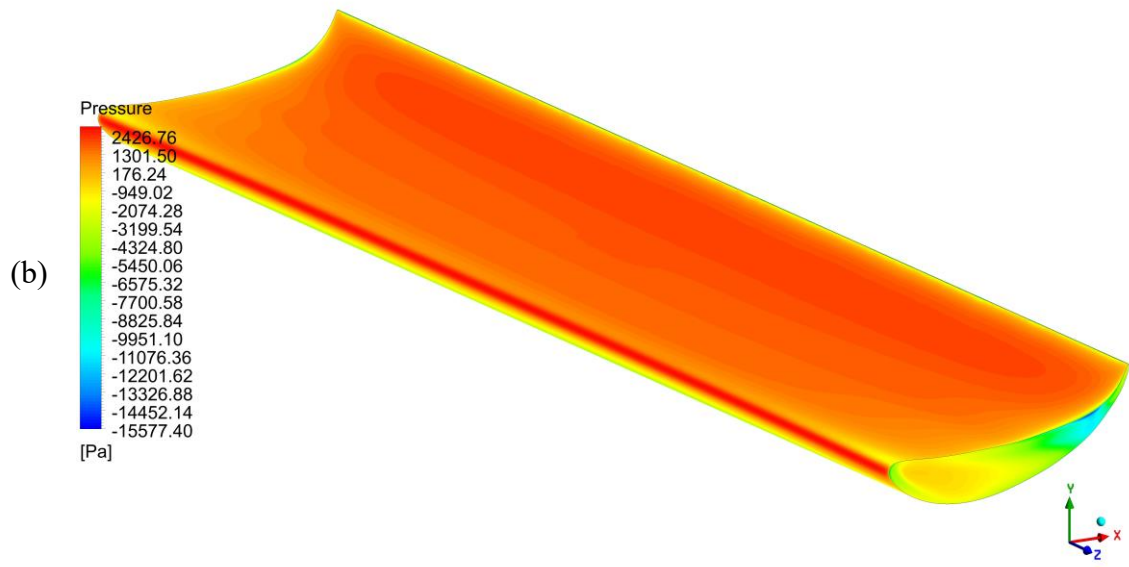
Se evidencia un margen de variación del 3.6 % en el coeficiente de sustentación entre el análisis bidimensional y el tridimensional que considera las placas laterales. Por otro lado, la variación es del 5.9 % entre el análisis bidimensional y el tridimensional que solo contempla el alerón. Este error se relaciona con la función de las placas laterales, que readaptan el flujo de aire en los extremos del alerón, influyendo de manera notable en la generación de sustentación.

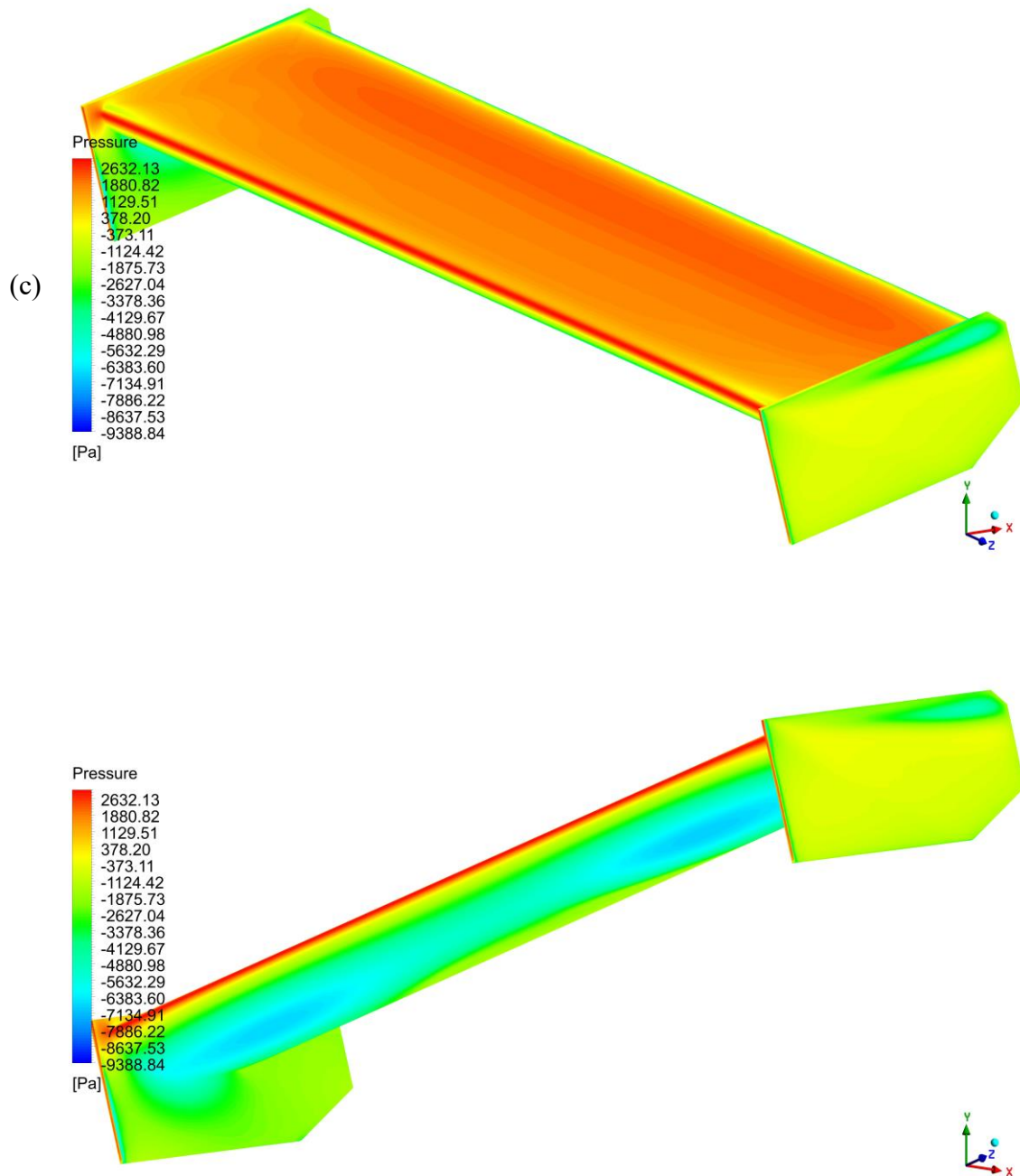
Por otra parte, la variación en el coeficiente de arrastre es considerablemente mayor. Esto se atribuye al hecho de que en el análisis "bidimensional", en realidad, no se trata de una verdadera representación 2D en la parte fluidodinámica. En su lugar, se lleva a cabo un análisis 2.5D que considera una envergadura infinita, de la cual se selecciona una parte (profundidad) especificada en las condiciones de contorno del perfil aerodinámico y del vehículo. Esta diferencia en la consideración de la geometría contribuye a una variación más pronunciada en el coeficiente de arrastre entre los análisis bidimensional y tridimensional.

**Figura 34**

*Campo de presión sobre el alerón (a) bidimensional, (b) tridimensional sin placas laterales, y (c) tridimensional con placas laterales.*





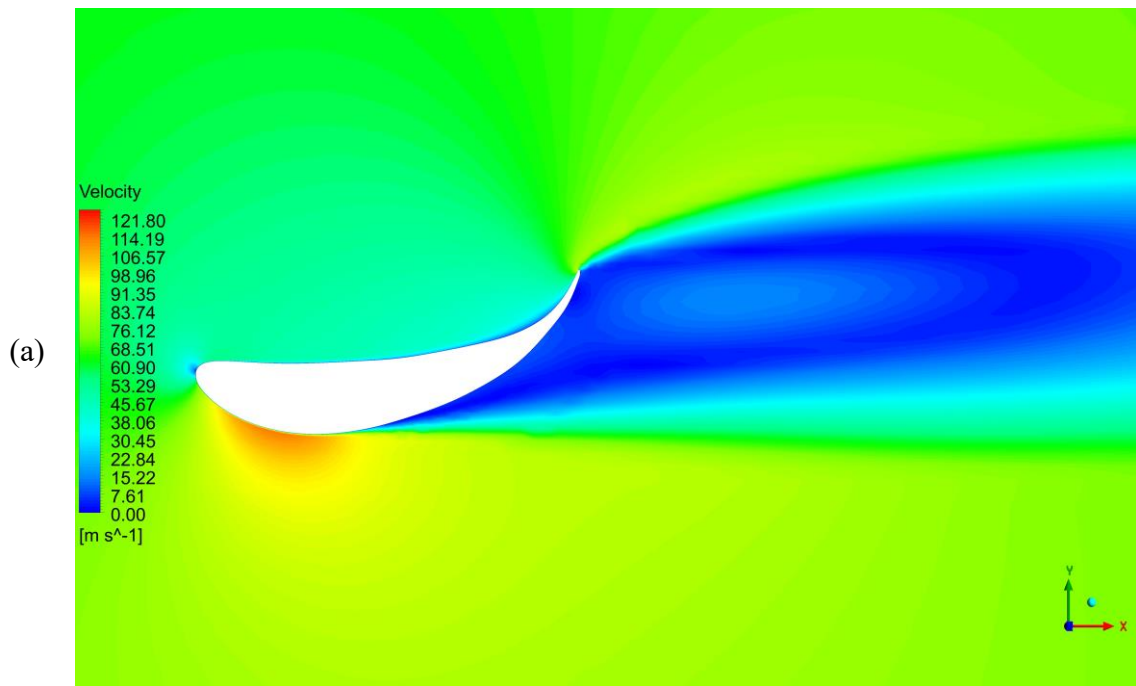


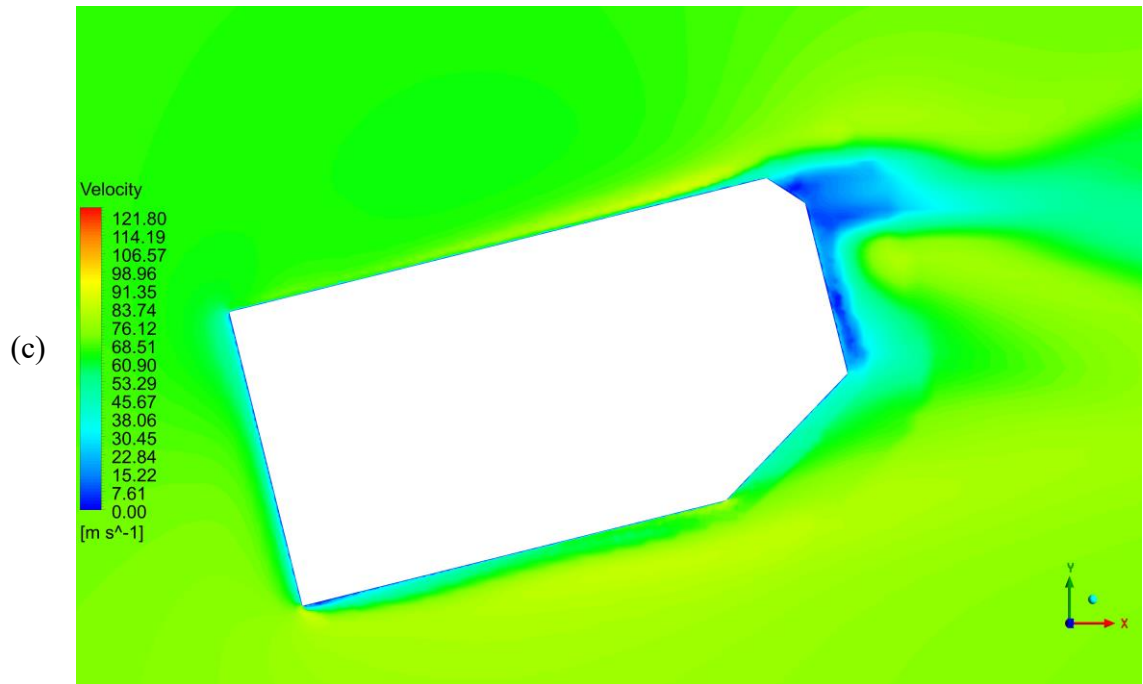
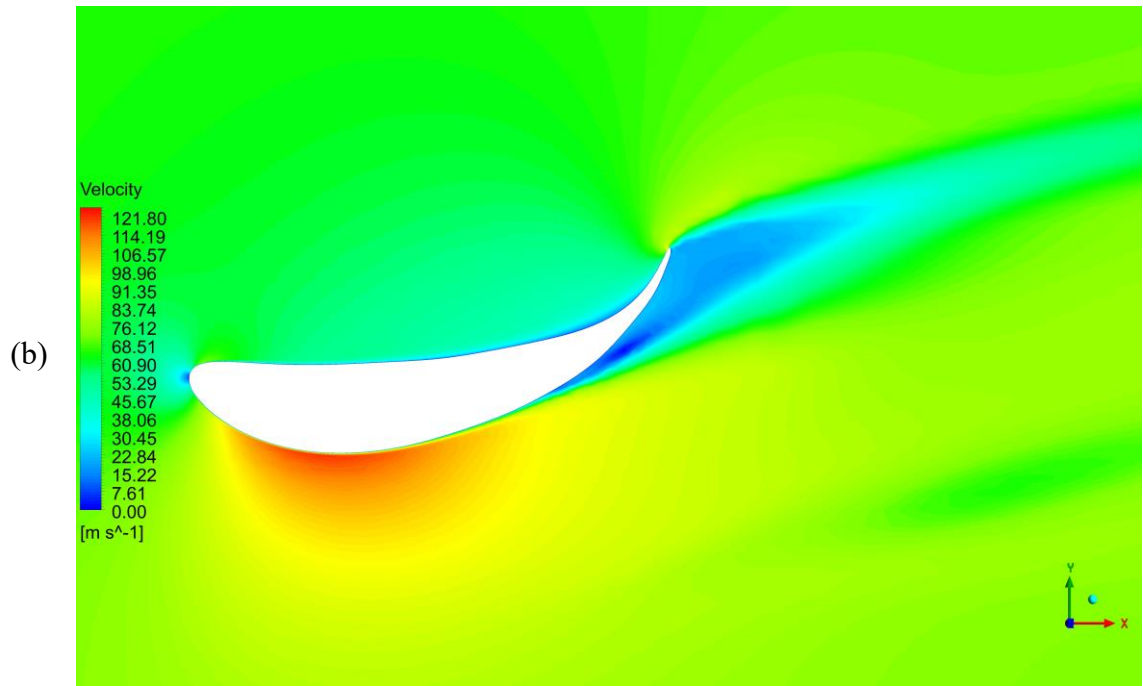
Cuando se examina el campo de presión sobre el alerón en un análisis bidimensional, este permanece constante a lo largo de la envergadura. En cambio, en el análisis tridimensional, a medida que nos acercamos a los extremos, se observa una variación en la presión y en la velocidad del flujo cercano (Figura 34). Esta diferencia se debe a la consideración más detallada de la geometría y las interacciones tridimensionales en el análisis tridimensional, que captura de manera más precisa los efectos del flujo en los extremos del alerón.

El campo de presión experimenta variaciones sobre el alerón debido a los cambios de velocidad en el fluido en diferentes puntos del componente, resultado del efecto de la Ecuación de Bernoulli en un fluido incompresible. En la parte central del alerón posterior, el campo de velocidades se mantiene similar al análisis bidimensional. No obstante, a medida que nos acercamos hacia los extremos, se observan variaciones en el campo de velocidades debido a los efectos del comportamiento del flujo en los bordes. Estas variaciones son consecuencia de la representación más detallada de la geometría y las interacciones tridimensionales en el análisis tridimensional, que refleja con mayor precisión la complejidad del flujo alrededor del alerón (Figura 35).

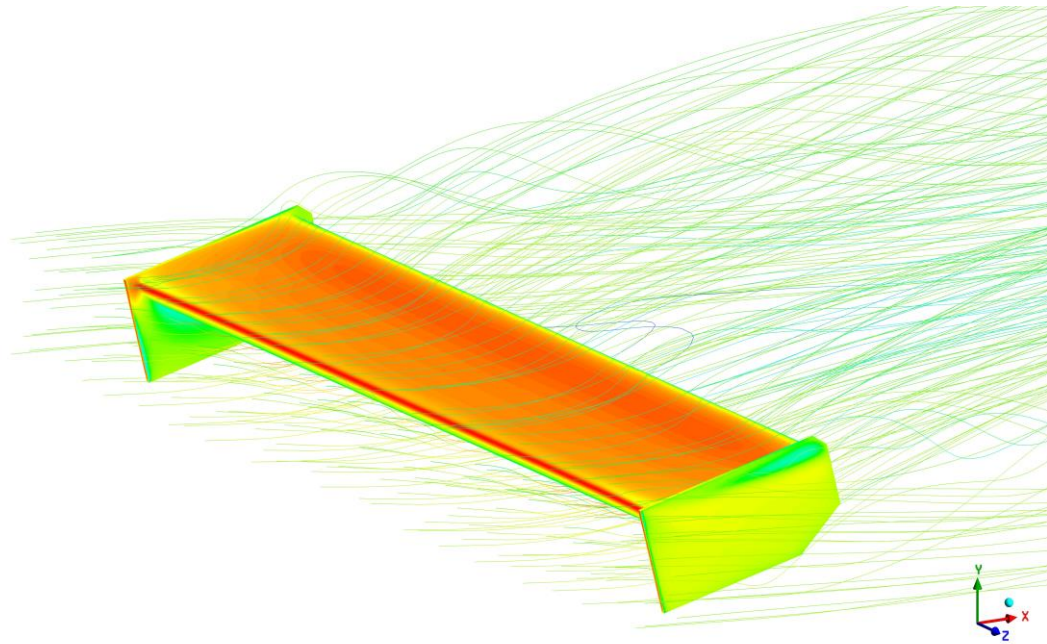
**Figura 35**

*Campo de velocidades del alerón posterior en (a) la parte central, (b) al extremo del alerón, (c) en las placas laterales, y (d) líneas de flujo sobre el componente aerodinámico.*





(d)



#### 4.4.5. Análisis estructural estático del alerón posterior

La distribución de presión que actúa sobre el alerón posterior genera fuerzas al aplicarse sobre su superficie, dando lugar a esfuerzos y deformaciones en el elemento estructural. Por esta razón, es crucial tener conocimiento de las propiedades del material con el cual se pretende construir el alerón posterior. Estas propiedades se detallan en la siguiente tabla. En este contexto, se incluye la densidad, ya que se considera la influencia de la fuerza de la gravedad en el análisis estático lineal. Las propiedades del compuesto epoxi – bñjao son proporcionadas por Cabezas [25] mediante una mezcla con una proporción volumétrica 70 – 30.

**Tabla 10**

*Propiedades representativas de los materiales empleados.*

Material	Densidad kg m <sup>-3</sup>	Esfuerzo último de tracción MPa	Módulo de elasticidad GPa	Elongación mm mm <sup>-1</sup>
Epoxi – bñjao [25]	934	10.198	1.182	0.02127
Epoxi – carbono <sup>4</sup>	1451	513	59.16	0.0092
Epoxi – vidrio E <sup>5</sup>	1850	780	35	0.0244

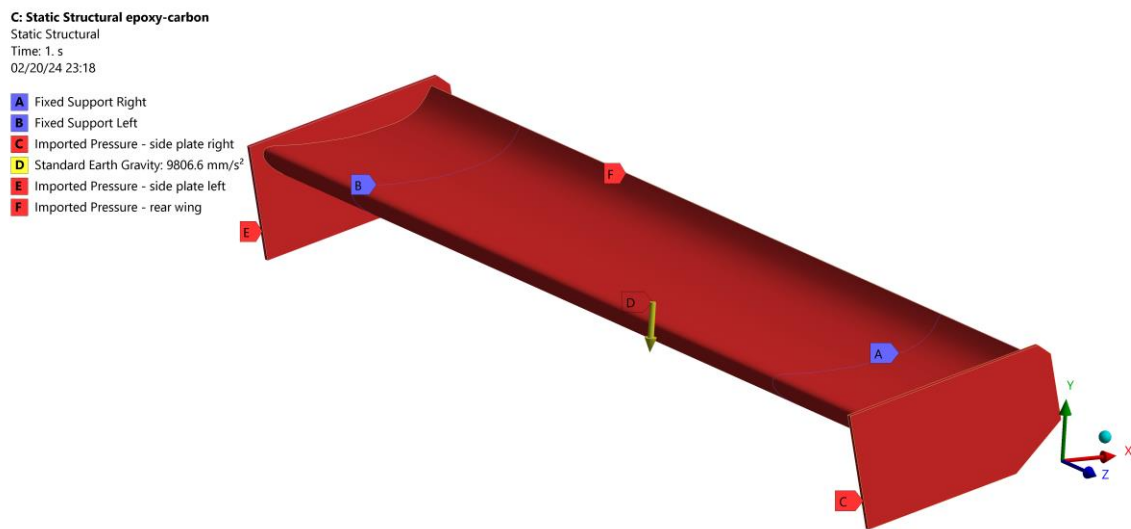
<sup>4</sup> Propiedades obtenidas de la biblioteca de materiales de Ansys.

<sup>5</sup> Propiedades obtenidas de la biblioteca de materiales de Ansys.

Como se detalló en la Sección 4.1.3.3, se implementan soportes fijos en las líneas guías ubicadas a cada lado del alerón, a una distancia de 205 mm desde los extremos. Estos soportes simbolizan la conexión del componente aerodinámico con los soportes. Además de considerar las presiones sobre el alerón obtenidas en el análisis fluidodinámico, se incorpora la condición de la gravedad estándar para contemplar el peso de la estructura.

**Figura 36**

*Asignación de las condiciones mecánicas para el análisis estructural.*



A continuación, se presenta una tabla comparativa que resume los valores máximos obtenidos para los esfuerzos y deformaciones en el componente aerodinámico. Asimismo, se adjuntan las imágenes pertinentes que proporcionan una visualización más detallada de estos resultados.

**Tabla 11**

*Esfuerzos, deformaciones y elongaciones máximas en el alerón.*

Material	Esfuerzo MPa	Deformación mm
Epoxi – bijao	27.9	18.1
Epoxi – carbono	20.8	1.9
Epoxi – vidrio E	22.1	1.8

A través de la Figura 37, es posible visualizar la distribución y el comportamiento de los esfuerzos y deformaciones en el conjunto aerodinámico. Con el fin de ofrecer una perspectiva más detallada, se incorporan las representaciones gráficas correspondientes a la parte superior e inferior del alerón.

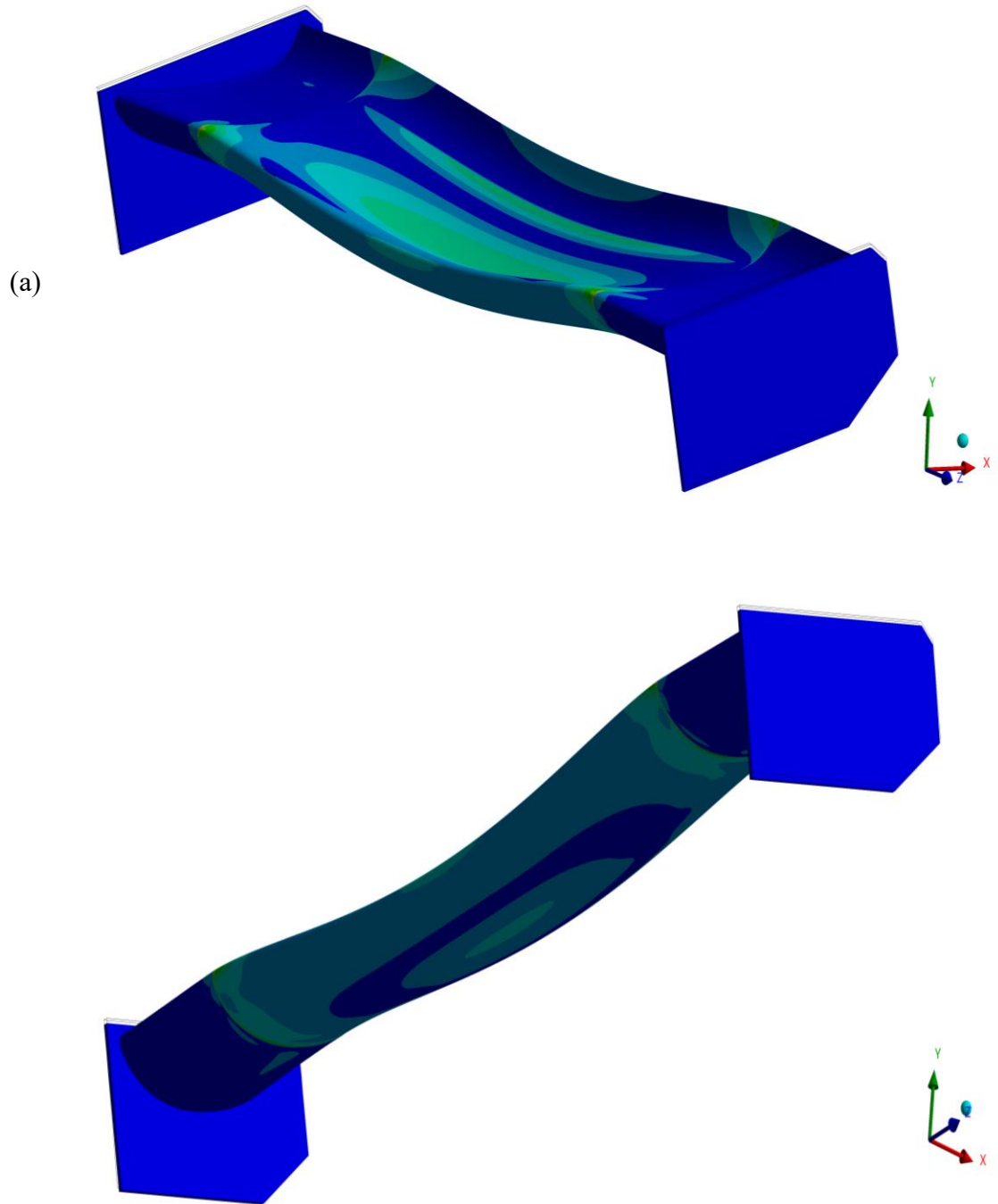
No se incluyen los resultados específicos para cada material, ya que la representación mediante la colorimetría es consistente, variando únicamente los valores de los resultados obtenidos. El esfuerzo máximo se registra precisamente en la parte frontal del alerón, donde está fijado mediante los soportes. Este comportamiento es coherente con la especificación de soportes fijos, ya que en esta región se generan fuerzas y momentos internos de reacción al restringirse los 6 grados de libertad. Respecto a la deformación máxima, esta se produce en la parte central del componente aerodinámico, atribuible a la fuerza resultante de la distribución de presiones actuando en el centroide del alerón.

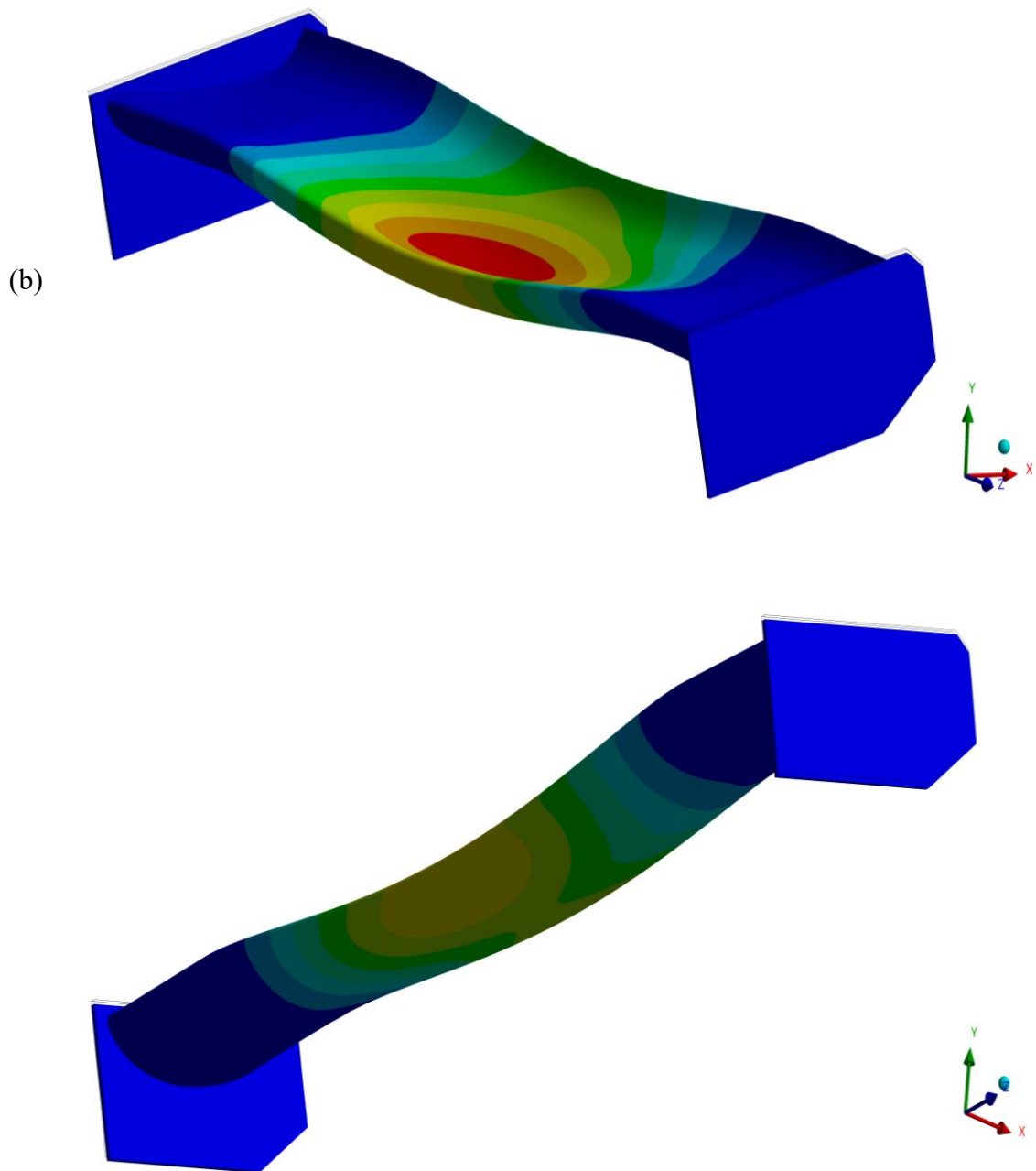
Como se observa, el compuesto epoxi – bijao soporta un mayor esfuerzo en la zona de los soportes, lo que no es favorable en comparación con el epoxi – carbono o el epoxi – vidrio E. Esto se debe a que se trata de un material completamente novedoso, lo que demanda investigaciones más exhaustivas. En su estudio, el autor emplea una única combinación volumétrica de 70 – 30, con fibras cortas dispuestas de forma aleatoria. Actualmente, este material no cumple con los estándares de fabricación debido a su excesiva deformación y baja resistencia, indicando la necesidad de una mayor investigación y desarrollo.

Por ello, se puede deducir que el compuesto epoxi – bijao es muy ligero, pero debe de soportar un esfuerzo mayor que los otros materiales, representando una gran deformación considerablemente bajo carga, lo que puede afectar la aerodinámica del alerón. Por tal razón este compuesto no se recomienda para aplicaciones donde la rigidez es crucial. En cuanto al compuesto epoxi – carbono, logra soportar un esfuerzo menor que el epoxi – vidrio E, pero con una deformación ligeramente mayor. El epoxi – carbono es un material ideal para alerones donde la rigidez y la ligereza son importantes. Y, por último, el epoxi – vidrio E es el material más denso, pero con una deformación mucho menor del resto.

**Figura 37**

*Campo de (a) esfuerzos, y (b) deformaciones en el alerón posterior.*





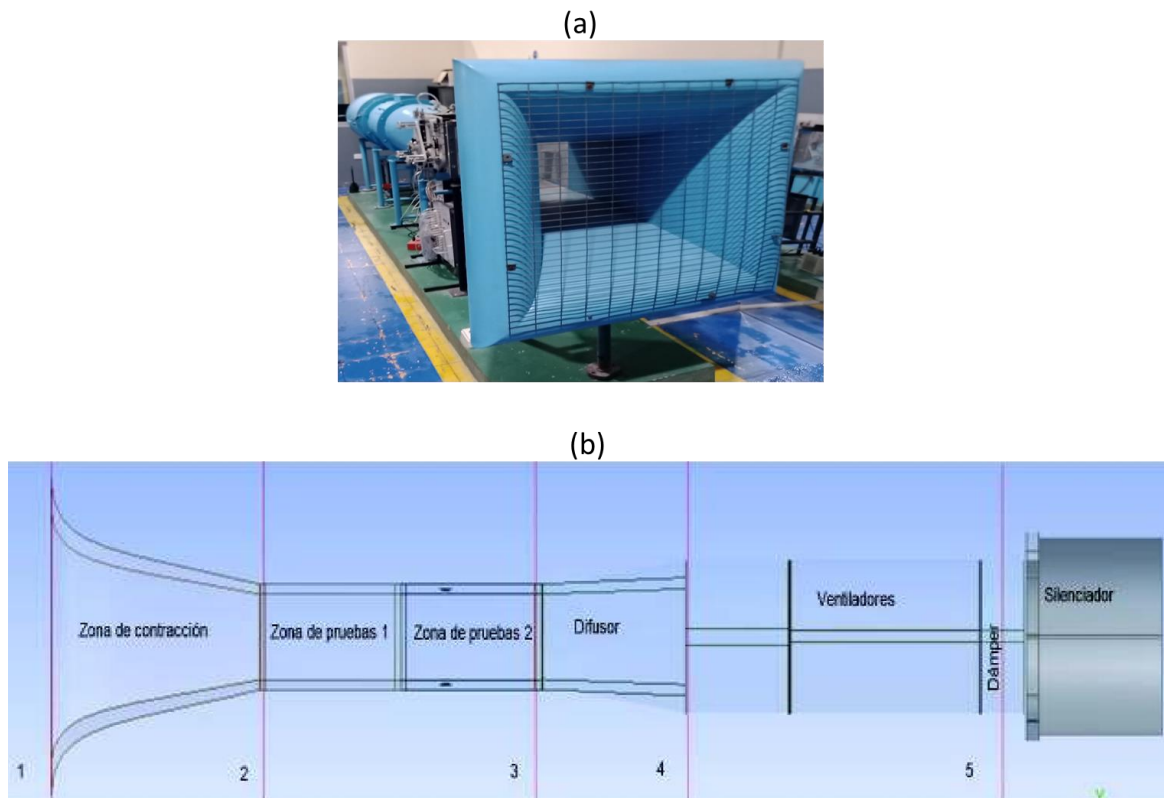
Tras el análisis de materiales, se determina que el epoxi – carbono destaca como la opción más favorable para el alerón posterior de vehículos orientados a la competición. Este material ofrece una combinación excepcional de alta resistencia a la deformación y peso ligero, aspectos cruciales en aplicaciones de alto rendimiento. Por otro lado, el epoxi – bñao no es recomendado en situaciones donde la rigidez desempeña un papel crucial. Aunque el epoxi – vidrio E surge como una alternativa viable, su mayor peso en comparación con el epoxi – carbono debe ser considerado al tomar decisiones de diseño.

#### 4.5. Validación aerodinámica en túnel de viento

El Laboratorio de Mecánica de Fluidos y Turbomáquinas de la Escuela Politécnica Nacional está equipado con un túnel de viento. Este dispositivo puede alcanzar una notable velocidad de ensayo de hasta  $32.9 \text{ m s}^{-1}$ , brindando un entorno controlado para investigaciones en aerodinámica. La cámara de ensayo, con dimensiones de  $0.3 \times 0.3 \times 0.3 \text{ m}^3$ , proporciona el espacio necesario para realizar experimentos detallados y precisos [26]. A continuación, se detallan las secciones que conforman este túnel aerodinámico.

**Figura 38**

(a) Túnel de viento, y (b) secciones del equipo [26].



Para la construcción del prototipo del alerón posterior se ha empleado una escala de reducción para la cuerda de 1:2.5; quedando así una cuerda de 100 mm y una envergadura de 200 mm, respetando las dimensiones de la cámara de ensayo. Los materiales utilizados para la fabricación del prototipo de prueba son un molde de impresión 3D, las fibras de bijao, resina epoxi y crema antiadherente. En cuanto a la composición volumétrica de la mezcla del compuesto, se ha considerado la misma por el autor del estudio Cabezas, que es 70-30.

**Figura 39**

*Materiales para la fabricación del prototipo de ensayo.*

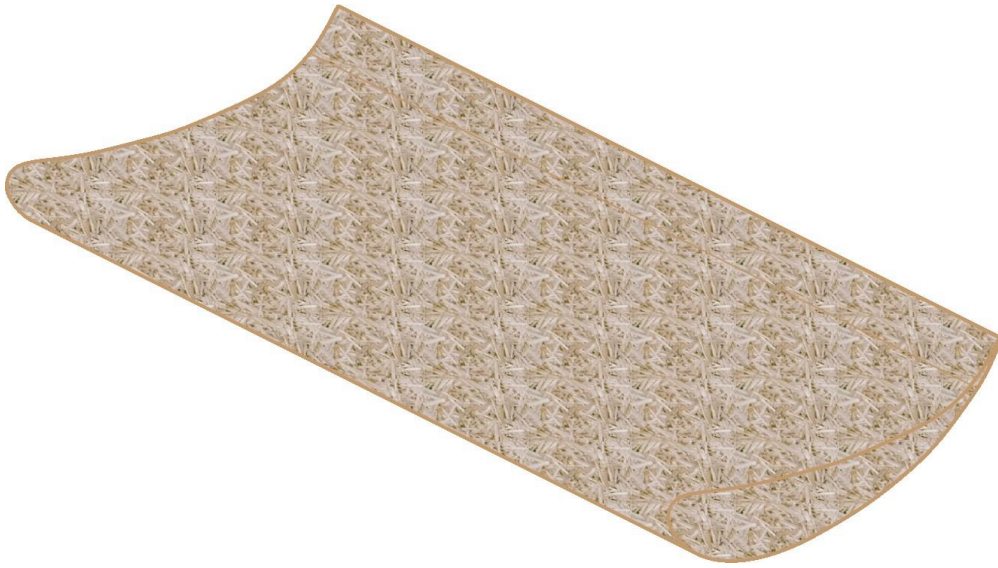


Durante el ensayo, se utilizó un anemómetro de filamento para medir la velocidad del flujo en puntos específicos y registrar la temperatura ambiente. Esta metodología permitió calcular con precisión las velocidades del flujo en diferentes ubicaciones. Posteriormente, se llevó a cabo una comparación detallada entre los resultados obtenidos a través de este ensayo de velocidades y los resultados derivados de la simulación fluidodinámica. Para garantizar una comparación precisa, el modelo se escaló de acuerdo con las dimensiones específicas del túnel de viento. Este análisis busca validar la simulación y evaluar su concordancia con las condiciones reales del flujo en el túnel aerodinámico.

La aplicación de la Teoría de la Semejanza se torna compleja debido a las variaciones en las condiciones atmosféricas, como la presión y densidad del aire, que difieren según la ubicación geográfica del túnel de viento. En este contexto, se opta por desarrollar un modelo de simulación que refleje las dimensiones específicas de la cámara de ensayo, así como los valores de presión y temperatura característicos de la ubicación. La sección transversal de la cámara de ensayo es de  $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$ , con una presión atmosférica de  $72 \text{ kPa}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  y una velocidad de entrada de  $3.73 \text{ m s}^{-1}$ . Dada la limitación de espacio en la cámara de ensayo, se recomienda una cuerda de  $100 \text{ mm}$  y una envergadura de  $200 \text{ mm}$  para el prototipo del alerón construido con epoxi – bijao.

## Figura 40

*Prototipo del alerón.*

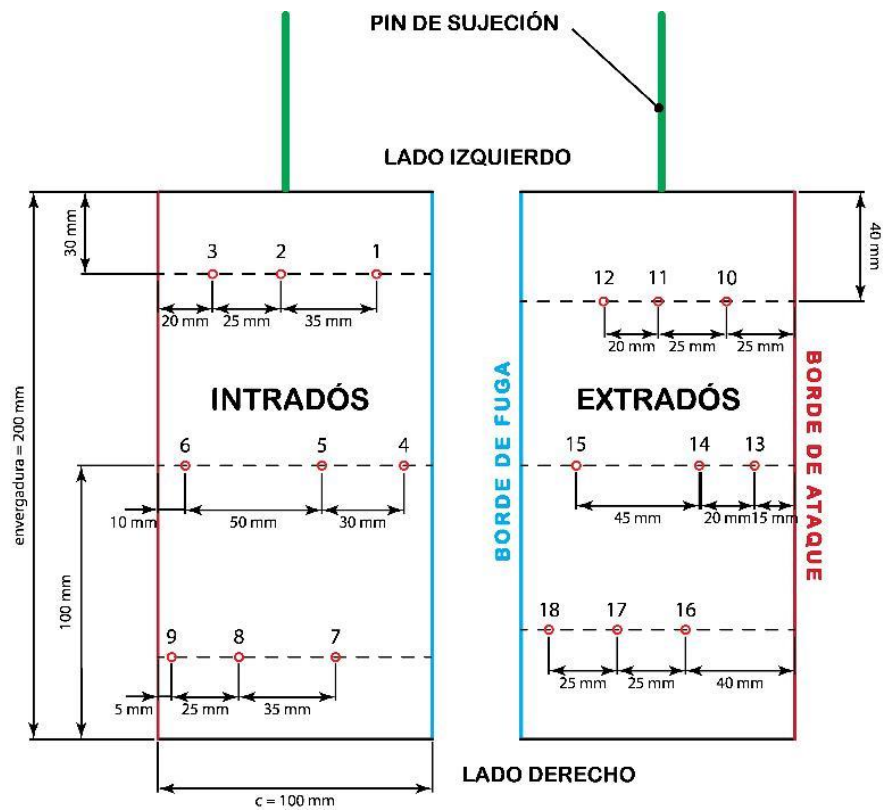


Para la medición de la velocidad sobre el alerón, es esencial establecer puntos específicos que posibiliten la ubicación del filamento del anemómetro. Se han designado un total de 18 puntos, distribuidos en 9 puntos en el intradós y 9 puntos adicionales en el extradós. Estos puntos de análisis se inician a una distancia proporcionada por la cuerda desde el borde de ataque, identificado en la Figura 41 mediante una línea de color rojo, y se extienden hacia el borde de fuga, representado por una línea azul.

La Tabla 12 presenta la comparación de los resultados de velocidades obtenidos durante el ensayo en el túnel aerodinámico, considerando distintos ángulos de ataque. Se focaliza en los ángulos de  $0^\circ$  y  $-14^\circ$ , siendo este último el ángulo de pérdida identificado en el análisis fluidodinámico del perfil utilizado para el alerón posterior. La comparación entre las variaciones de velocidad del modelo computacional y las medidas obtenidas con el anemómetro revela que las discrepancias se mantienen por debajo del 20% (Figura 43). Este nivel de variación puede considerarse aceptable, especialmente teniendo en cuenta que el método de medición con el anemómetro fue completamente manual. Es importante destacar que la medición manual introduce posibles errores debido a movimientos no intencionados durante la toma de medidas, hasta que el valor se estabiliza en el instrumento.

**Figura 41**

*Ubicación de los puntos de análisis en el prototipo del alerón.*



**Figura 42**

*Fase de ensayo.*



**Tabla 12**

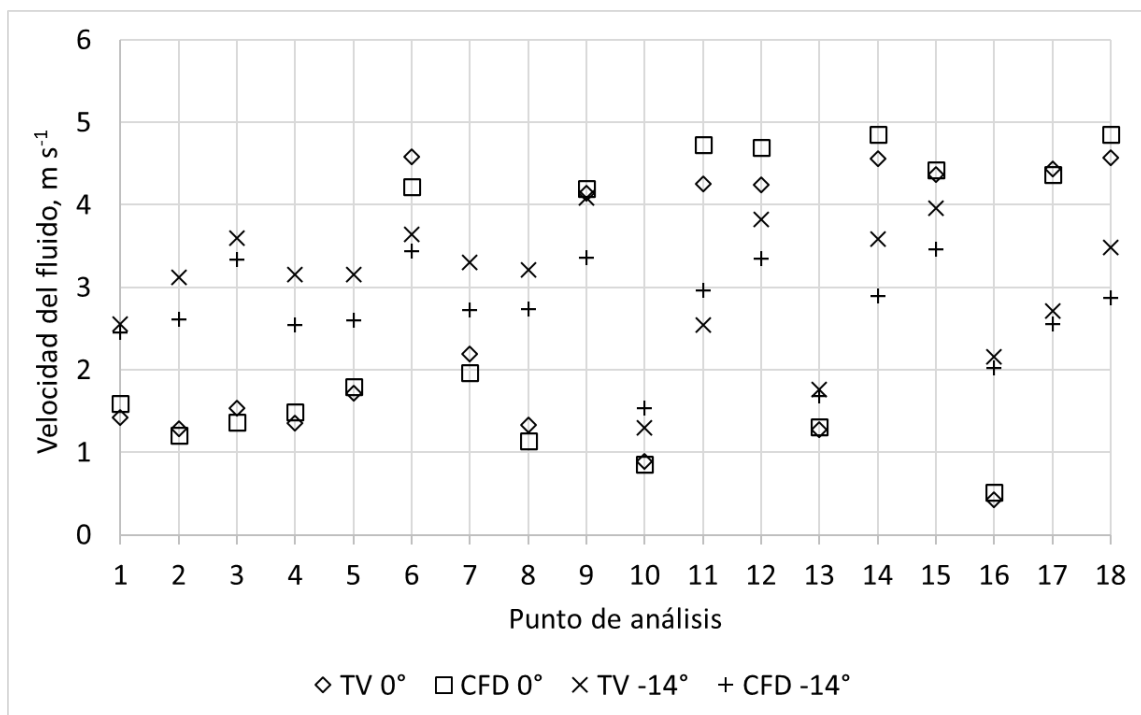
*Comparación de las velocidades del flujo cerca del prototipo del alerón a una velocidad del flujo libre de  $3.73 \text{ m s}^{-1}$ .*

<b>Ángulo de ataque <math>0^\circ</math></b>			
Puntos de análisis	Velocidad Túnel de viento $\text{m s}^{-1}$	Velocidad Simulación $\text{m s}^{-1}$	Porcentaje de variación
1	1.42	1.59	11.9718
2	1.29	1.21	6.2016
3	1.54	1.37	11.0390
4	1.35	1.49	10.3704
5	1.72	1.80	4.6512
6	4.58	4.22	7.8603
7	2.19	1.97	10.0457
8	1.33	1.14	14.2857
9	4.14	4.20	1.4493
10	0.89	0.85	4.4944
11	4.25	4.73	11.2941
12	4.24	4.70	10.8491
13	1.28	1.31	2.3438
14	4.56	4.85	6.3596
15	4.37	4.42	1.1442
16	0.43	0.51	18.6047
17	4.44	4.37	1.5766
18	4.57	4.85	6.1269
<b>Ángulo de ataque <math>-14^\circ</math></b>			
Puntos de análisis	Velocidad Túnel de viento $\text{m s}^{-1}$	Velocidad Simulación $\text{m s}^{-1}$	Porcentaje de variación
1	2.56	2.45	4.2969
2	3.12	2.61	16.3462
3	3.6	3.34	7.2222
4	3.16	2.54	19.6203
5	3.16	2.6	17.7215
6	3.64	3.44	5.4945
7	3.3	2.72	17.5758
8	3.21	2.74	14.6417
9	4.08	3.36	17.6471
10	1.3	1.53	17.6923
11	2.54	2.96	16.5354
12	3.82	3.35	12.3037
13	1.76	1.68	4.5455
14	3.58	2.89	19.2737
15	3.96	3.46	12.6263
16	2.16	2.02	6.4815
17	2.71	2.55	5.9041
18	3.48	2.87	17.5287

Otro factor para considerar es la variabilidad en la distancia del filamento del anemómetro con respecto a la superficie del alerón en los diferentes puntos de medición. Esta discrepancia en la distancia puede contribuir a las variaciones observadas en las velocidades registradas. Es crucial señalar que estos errores considerables están influenciados directamente por el factor humano en el proceso de medición, subrayando la importancia de implementar métodos de medición más precisos y automáticos en futuras investigaciones.

**Figura 43**

*Comparación de los resultados del ensayo en el túnel aerodinámico frente a la simulación fluidodinámica.*



**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 5.1. Conclusiones

- En este estudio, se ha determinado que el perfil aerodinámico recomendado por la Federación Internacional del Automóvil (FIA) para vehículos de turismo para la competición alcanza su máxima carga aerodinámica a un ángulo de ataque de  $-14^\circ$ , conocido como ángulo de pérdida. Superar este valor disminuiría la carga aerodinámica mientras aumenta progresivamente el arrastre. Para validar el diseño, se realizaron simulaciones computacionales con distintas cantidades de celdas, y los resultados obtenidos fueron consistentes. Considerando una malla de tamaño mediano, los coeficientes de arrastre y sustentación a la velocidad máxima del vehículo ( $70 \text{ m s}^{-1}$ ) para un ángulo de  $0^\circ$  fueron 0.0748 y  $-1.4339$ , respectivamente. En cambio, para un ángulo de  $-14^\circ$ , estos coeficientes fueron 0.1714 y  $-2.0430$ , respectivamente, lo que representa un aumento del 42 % en la carga aerodinámica en comparación con  $0^\circ$  en un análisis de flujo totalmente libre. Al evaluar la aplicación de un alerón en el vehículo, se obtuvo un coeficiente de sustentación total de  $-3.6160$ , un 38 % más alto que un vehículo equipado solo con un divisor frontal. La ubicación óptima para este componente aerodinámico es a  $1100 \text{ mm}$  horizontalmente desde el eje de tracción posterior hasta el borde de fuga, y  $100 \text{ mm}$  verticalmente descendente desde el punto más alto del techo.
- Se realizó el análisis de Interacción Fluido-Estructura (FSI) del alerón de epoxi – balsa, lográndose evaluar el comportamiento estructural estático del componente ante las presiones generadas por el flujo de aire a altas velocidades. Según datos de una investigación previa, el compuesto epoxi – balsa muestra una densidad notablemente baja en comparación con otros materiales, aunque los resultados de ensayos realizados por el autor indican que presenta una resistencia limitada. Las presiones calculadas en el análisis fluidodinámico provocan deformaciones de hasta  $18.1 \text{ mm}$  en el alerón posterior, con un esfuerzo máximo de  $27.9 \text{ MPa}$ . Estos esfuerzos máximos se localizan precisamente en la zona de los soportes del componente aerodinámico. Una posible solución para reducir la deformación sería disminuir la distancia entre los soportes.

- Se ha validado la idoneidad del epoxi – bijao en la construcción de componentes aerodinámicos para vehículos de competición a través de una comparación del análisis estructural estático con dos materiales comúnmente utilizados en la fabricación de estos dispositivos: el compuesto epoxi – carbono y el epoxi – vidrio E. De los tres materiales considerados, el epoxi – bijao resultó ser el más ligero, mientras que el epoxi – vidrio E fue el más denso. Sin embargo, en términos de deformaciones, el nuevo compuesto mostró la mayor deformación, frente al epoxi – vidrio E registrando la mínima ( $1.8\text{ mm}$ ) y el epoxi – carbono alcanzando una deformación de  $1.9\text{ mm}$ . El problema principal surge al evaluar los esfuerzos generados por la distribución de presiones. En este aspecto, el epoxi – carbono demostró tener la mejor resistencia entre los tres materiales, con un esfuerzo máximo de  $20.8\text{ MPa}$ , en comparación con los  $27.9\text{ MPa}$  y  $22.1\text{ MPa}$  del epoxi – bijao y el epoxi – vidrio E, respectivamente. Por estas razones, se desaconseja el uso del epoxi – bijao en la fabricación de elementos aerodinámicos como el alerón posterior. El material más recomendable para estas aplicaciones es el epoxi – carbono gracias a su combinación de alta resistencia a la deformación y ligereza. Cabe mencionar que el epoxi – bijao, al ser un material completamente nuevo, aún requiere de investigaciones más profundas que consideren diversas configuraciones del compuesto.
- Basándose en los ensayos que se ha sometido un prototipo del alerón en el túnel aerodinámico, se puede afirmar que los resultados de las simulaciones fluidodinámicas son confiables, dado que el porcentaje de variación respecto al ensayo real no supera el 20 %. El procedimiento en el túnel de viento consistió en medir las velocidades del flujo cerca del prototipo del alerón mediante un anemómetro de filamento. Se seleccionaron 18 puntos de análisis en el alerón, nueve en el intradós y nueve en el extradós. Las mediciones se llevaron a cabo con el alerón en ángulos de ataque de  $0^\circ$  y  $-14^\circ$ . Debido a las condiciones atmosféricas, como la presión local, que difiere de la presión estándar utilizada en las simulaciones preliminares, la aplicación de la Teoría de la Semejanza resulta complicada. Por esta razón, se optó por construir un modelo computacional con las mismas dimensiones y características del túnel de ensayo para comparar los resultados obtenidos. En conclusión, se puede afirmar que el uso de herramientas de simulación es confiable, ya que proporciona resultados precisos. No obstante, se recomienda validar estos cálculos mediante la fabricación y ensayo de un prototipo físico después de la simulación.

## 5.2. Recomendaciones

- Para mejorar el proyecto, se sugiere llevar a cabo investigaciones adicionales que se centren en la influencia específica de la geometría del alerón en la generación de carga aerodinámica. Esto implica explorar variables como la altura, curvatura y otros aspectos geométricos relevantes para comprender mejor su impacto en el rendimiento. Además, se recomienda realizar una evaluación detallada de la sensibilidad del diseño a diversas condiciones de flujo, incluyendo variaciones en la velocidad y la turbulencia. Este análisis contribuirá a comprender cómo el alerón responde a diferentes entornos aerodinámicos. Asimismo, se insta a optimizar la ubicación del alerón con el objetivo de maximizar la carga aerodinámica y minimizar el arrastre, considerando no solo el diseño geométrico sino también la posición precisa en el vehículo. Además, es crucial tener en cuenta las limitaciones prácticas de fabricación e implementación del diseño en un vehículo real, garantizando que las soluciones propuestas sean factibles y efectivas en condiciones del mundo real.
- Para enriquecer la investigación, se sugiere emprender un estudio para investigar la influencia de diversos materiales compuestos en el comportamiento estructural del alerón. Esto permitirá evaluar las propiedades específicas de cada material y su impacto en la funcionalidad del componente aerodinámico. Además, se recomienda llevar a cabo una evaluación integral de la resistencia del alerón, abordando aspectos como carga estática, dinámica y fatiga. Esto contribuirá a comprender mejor la durabilidad y la capacidad de respuesta del alerón bajo diferentes condiciones de carga. Asimismo, se insiste a optimizar el diseño del alerón con el objetivo de mejorar su resistencia y rigidez estructural, considerando tanto la geometría como los materiales utilizados. Es sugerible realizar pruebas experimentales para validar los resultados obtenidos mediante el análisis FSI. Este enfoque experimental brindará una validación práctica de los datos simulados y garantizará la precisión y la confiabilidad de los hallazgos.

- Para avanzar en la investigación del alerón, se sugiere llevar a cabo una indagación para identificar y evaluar nuevos materiales compuestos y metálicos; como aleaciones de aluminio, con propiedades mejoradas, priorizando aspectos como resistencia y ligereza. Esto permitirá explorar opciones innovadoras que podrían potenciar el rendimiento del alerón. Posteriormente, se propone realizar pruebas comparativas de estos materiales, sometiéndolos a condiciones de carga realistas. Estas pruebas brindarán datos fundamentales para comprender cómo se comportan los materiales en situaciones prácticas y permitirán seleccionar aquellos que demuestren un desempeño óptimo. Al tomar decisiones sobre materiales, se aconseja considerar factores como el costo, la disponibilidad y la facilidad de fabricación. Este enfoque integral garantizará que los materiales seleccionados no solo cumplan con los requisitos técnicos, sino que también sean viables desde el punto de vista económico y logístico. Y, se recomienda desarrollar criterios de selección específicos para la fabricación de alerones, teniendo en cuenta las propiedades críticas identificadas durante la investigación.
- Para lograr una caracterización completa del alerón, se recomienda llevar a cabo pruebas en diversas condiciones de flujo, abarcando un rango amplio de velocidades y niveles de turbulencia. Utilizar técnicas de medición precisas, como anemómetros y sensores de presión, será crucial para obtener datos confiables y detallados sobre el comportamiento del alerón en diferentes escenarios. Además, se sugiere comparar de manera rigurosa los resultados experimentales obtenidos con las mediciones del modelo físico con los resultados de las simulaciones computacionales previas. Esta comparación permitirá identificar posibles disparidades entre la realidad y las predicciones teóricas. En caso de discrepancias, se sugiere mejorar el modelo computacional ajustándolo para que coincida más estrechamente con los datos experimentales. Este enfoque iterativo entre pruebas físicas y simulaciones computacionales contribuirá a perfeccionar la comprensión del comportamiento del alerón, permitiendo un diseño más preciso y eficiente en futuras aplicaciones.

**CAPÍTULO VI**  
**BIBLIOGRAFÍA**

## 6.1. Referencias bibliográficas

- [1] L. Frömmig, “Aerodynamics”, en *Basic Course in Race Car Technology*, Springer, 2023, pp. 141–253. doi: 10.1007/978-3-658-38470-8\_6.
- [2] F. B. Iskandar, “Estudio de la aerodinámica en los vehículos”, *Universidad Autónoma del Caribe*, vol. 4, núm. 2, pp. 66–70, 2006, [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496251108011>
- [3] F. White, *Fluid mechanics*, 9a ed. McGraw-Hill, 2021.
- [4] E. L. Houghton, P. W. Carpenter, S. H. Collicott, y D. T. Valentine, *Aerodynamics for engineering students*, 7a ed. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [5] R. Pütz y T. Serné, *Race car handling optimization*. Springer, 2022. doi: 10.1007/978-3-658-35200-4.
- [6] J. Martínez, “Estudio y diseño aerodinámicos de un alerón trasero para un coche deportivo”, Tesis de grado, Universitat Politècnica de Catalunya, 2021. Consultado: el 21 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/365775>
- [7] J. Anderson, *Fundamentals of aerodynamics*, 5a ed. McGraw-Hill, 2013.
- [8] P. Liu, *Aerodynamics*. Springer, 2022. doi: 10.1007/978-981-19-4586-1.
- [9] M. Trzesniowski, *Complete vehicle*. Springer, 2023. doi: 10.1007/978-3-658-39667-1.
- [10] J. García, “Diseño y posterior estudio aerodinámico de un alerón trasero de un automóvil de competición”, Tesis de grado, Universidad de Jaén, 2016.
- [11] D. Sola, “Diseño y análisis de un alerón trasero para un vehículo de competición utilizando material compuesto con fibras naturales”, Tesis de grado, Universitat Politècnica de València, 2019. Consultado: el 26 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/128577>
- [12] J. Anderson, *Hypersonic and high-temperature gas dynamics*, 2a ed. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [13] M. da Silva, “Multidisciplinary design analysis and optimisation of rear wings for sports cars”, Tesis de maestría, Técnico Lisboa, 2016. Consultado: el 21 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/records/iHR5EoxE9jb-IAKsrhCTXIbAeYuYxyvNS0tT>

- [14] Z. Yang, W. Gu, y Q. Li, “Aerodynamic design optimization of race car rear wing”, en *2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering*, IEEE, 2011, pp. 642–646. doi: 10.1109/CSAE.2011.5952758.
- [15] R. Campos, “Diseño de un alerón de un vehículo de competición: comparación de la simulación aerodinámica numérica y la simulación aerodinámica experimental”, Tesis de maestría, Universitat Politècnica de Catalunya, 2008. Consultado: el 21 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2099.1/5359>
- [16] C. Zhang, *Aerodynamic study on the vehicle shape parameters with respect to ground simulation*. Springer, 2021. doi: 10.1007/978-3-658-33439-0.
- [17] J. Meseguer, A. Sanz, S. Franchini, y S. Pindado, “Túneles aerodinámicos para ensayos de medida de cargas de viento en edificios”, en *I Jornada Nacional de Investigación en la Edificación*, Instituto de Microgravedad Ignacio Da Riva (UPM), 2007. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/46787/>
- [18] R. Krishnamurthy, “The art and science of meshing airfoil”, GridPro Blog. [En línea]. Disponible en: <https://blog.gridpro.com/the-art-and-science-of-meshing-airfoil/>
- [19] N. M. Adam, O. H. Attia, A. O. Al-Sulttani, H. A. Mahmood, A. As’arry, y K. A. Md Rezali, “Numerical Analysis for Solar Panel Subjected with an External Force to Overcome Adhesive Force in Desert Areas”, *CFD Letters*, vol. 12, núm. 9, pp. 60–75, 2020, doi: 10.37934/cfdl.12.9.6075.
- [20] TCR Series, “Peugeot 308 TCR”. [En línea]. Disponible en: <https://www.tcr-series.com/homologated-cars/item/peugeot-308-tcr>
- [21] H. Yuan, Z. Yang, y Q. Li, “Effects of installation environment on flow around rear view mirror”, *Journal of Passenger Cars*, vol. 10, núm. 2, 2017, doi: 10.4271/2017-01-1517.
- [22] A. Povitsky y K. C. Pierson, “Vorticity confinement applied to accurate prediction of convection of wing tip vortices and induced drag”, *Int J Comput Fluid Dyn*, vol. 35, núm. 3, pp. 143–156, 2021, doi: 10.1080/10618562.2020.1856822.
- [23] N. Shelil, “2D numerical simulation study of airfoil performance”, *Wind Energy Science*, vol. 45, 2021.
- [24] National Aeronautics and Space Administration, “U.S. Standard Atmosphere”, 1976. [En línea]. Disponible en: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19770009539>
- [25] J. Cabezas, “Caracterización mecánica de un compuesto de matriz epoxi reforzado con fibras de bijao (*Calathea Lutea*) para la industria automotriz”, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, 2024.

- [26] C. Topa, “Análisis de instrumentación y simulación de un túnel de viento subsónico de ciclo abierto”, Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19133>

**CAPÍTULO VII**  
**ANEXOS**

# Anexo 1

## Extracto de 2022 FIA WTCR Tecnical Regulations.

WMSC 15.12.2021

	<p>The removal of door soundproofing material and decorative strips is allowed. Original inner trim panels must be replaced and be made from plastics (including composite materials) at least 1mm thick. The panels must totally cover the door, its handles, locks and window winding mechanisms.</p> <p>Air inlets for driver cooling in the area of the external mirrors are accepted (Certification).</p>
4.1.3	<p><b>Engine &amp; Luggage Compartments</b></p> <p>The soundproofing, decorative, insulating material and parts may be removed. (Certification)</p>
4.2	<p><b>Windscreen and windows</b></p> <p>The use of the mass production windscreen is permitted. The use of electric heated glass windscreen of artisanal production is allowed (Certification). Plastic windscreen (polycarbonate or PMMA ensuring the same transparency as the original glass) with the same shape of the reference part, with or without heating with minimum thickness 5.85mm is allowed. (Certification) Anti-intrusion arm(s) or support(s) for Plastic Windscreen may be used. (Certification) The addition of a maximum of 4 protective transparent films on its external face is permitted.</p> <p>Plastic rear window min. 3.85mm is allowed. (Certification)</p> <p>The internal face of side and rear glass windows as well as the glass rear-view mirrors must be covered with a transparent and colorless plastic safety film with a maximum thickness of 0.1mm in order to avoid the shattering and spraying of glass in the event of an accident. It must be fitted in a manner that facilitates checking.</p>
4.3	<p><b>Exterior</b></p>
4.3.1	<p>Bodywork - General</p> <p>A maximum of 3 holes (maximum diameter of 12.5 mm) are permitted for the team in order to use supplementary measuring devices (radio, temperature, pressure, and similar). Other up to 4 similar holes are allowed for promoter use. If a device is not used during a competition, the corresponding hole must be sealed off and the exterior of the bodywork must retain its original appearance.</p> <p>The only body parts that can be replaced and changed in shape are:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Front bumper; Shape resemble the original without bolted license plate support(s), must be approved prior to production; no dive planes allowed.</li><li>- Front fenders' lower edge behind the wheel may not be higher than front door's bottom border. Shape must be approved prior to production (no louvres allowed)</li><li>- Side sills (these may be added if not present in the production car)</li><li>- Rear wheel arch extensions</li><li>- Rear door bulge compatible with the rear arch extensions</li><li>- Rear bumper; Shape resemble the original must be approved prior to production</li><li>- Wheel arch liners</li></ul> <p>No flat floor behind the vertical plane tangent to the back side of the front wheels and the foremost point of the rear bumper. Engine bay protection panel between the frame rails are permitted. (Certification)</p> <p>It is not allowed to tape the joints or use self-made gaskets (foam, rubber, etc.) between bodywork panels. The hood's and boot lid's original position may not be changed.</p> <p>Door and bonnet seals may be removed.</p> <p>Installation of air jacks The bodywork may be modified over a maximum area of 100 cm<sup>2</sup> to create housing for the air jack connector. The connector for the feeding of compressed air must be situated rearward of the rear axle centreline and must not protrude beyond the surface of the bodywork.</p> <p>Roof hatch for access to the cockpit</p> <p>Roof Hatch installation for access to the cockpit is permitted. Hatch and quick fasteners must be homologated. (Certification)</p>
4.4	<p><b>Aerodynamic devices</b></p> <p>Rear wing with wing profile, brackets and side plates (Certification) The original car's devices must be removed and must be replaced with one compulsory rear wing made up of:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• One aluminium extruded wing profile (WSC delivery corresponding to the profile defined below) or</li><li>• Specific part produced following exactly the WSC rear wing dimensions<ul style="list-style-type: none"><li>o Material: aluminium or fibre reinforced plastic</li><li>o production drawings will be delivered for certification</li><li>o The angle adjustment will use 1 (one) axis of rotation. (for cars certified after 2019)</li><li>o scrutineering jigs will be delivered on request to the manufacturers.</li></ul></li></ul>

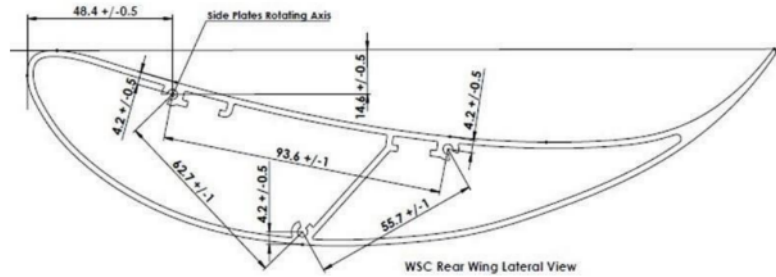
FIA Sport - Technical Department  
© WSC - 2020-2022.

These FIA WTCR Technical Regulations are based on the TCR Technical Regulations which are the property of WSC. WSC has granted a license to the FIA and the official promoter of the Cup for the sole purposes of the organization of the FIA WTCR - FIA World Touring Car Cup. WSC reserves all its rights. Reproduction or use of this document, in whole or in part, without WSC's written permission is prohibited.

FIA Public

Rear wing profile definition & dimensions:

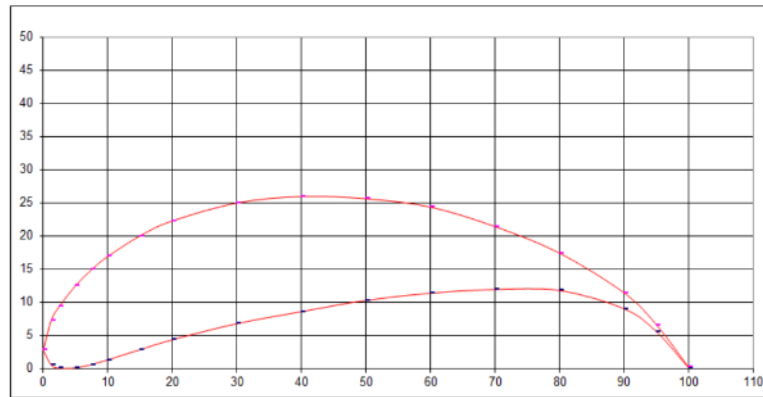
- Straight, adjustable, single piece with no flap
- Type BE 183-176 +/- 0.5mm
- Chord = 250 +/- 1 mm
- Width = 1380 +/- 1 mm
- Trailing edge thickness = 2mm +/- 0.5mm



WSC Rear Wing Lateral View

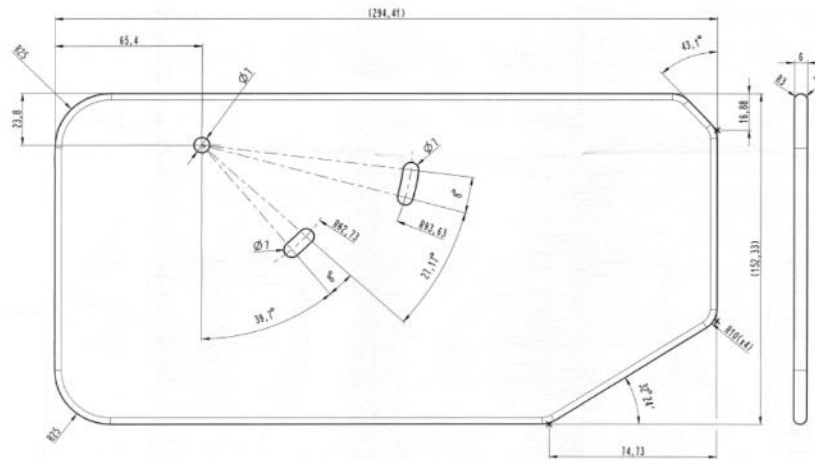
Be 183-176 Ro = 2.69 | Xo = 2.69 | -Yo = 2.79

x %	0	1.25	2.5	5	7.5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100
-Yv	2.79	0.53	0.07	0.1	0.62	1.32	2.86	4.35	6.79	8.8	10.02	11.4	11.95	11.8	9.03	5.58	0.1
-Yo	2.79	7.31	9.4	12.52	14.95	16.94	20.05	22.3	25.01	25.98	25.65	24.39	21.44	17.43	11.43	6.63	0.2



• 2 Brackets

- Dismountable, flat, plane surface perpendicular to wing profile surface.
- Mounted on the boot lid or on the rear window and to the lower or to the upper wing profile surface.
- Min. transversal distance between both supports and between supports and side plates = 100mm.
- The leading edge must be rounded with a constant radius.
- The trailing edge may be chamfered to a max. of 20 mm (min. thickness at the trailing edge = 2 mm).



- 2 side plates; All edges will be rounded with at least R3mm
  - Dismountable, flat, continuous surface perpendicular to profile centreline.
  - Side plates may rotate with respect to the wing profile.
  - This device must be rigid and offer no possibility for the penetration of air (groove, hole, opening, etc.).
  - Material: aluminium, plastic

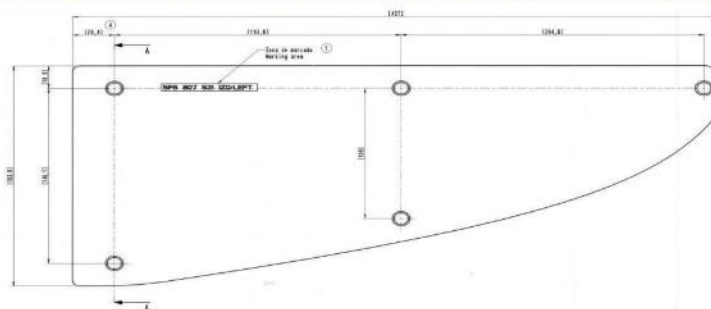
No element of the rear wing may be located beyond the following limits:

- X = 1050 mm from rear axle centreline.
- Z = Highest point of roof.

The front splitter: (Certification)

- Part produced following exactly the WSC CAD model (see drawings below) front splitter's dimensions (length, width and angles, front overhang, vertical projection, sections of areas licked by the airstream)
- lateral prolongation in "x" for cars with bigger front overhang is allowed (max. 50mm in "y")
- The distance between splitter's contour vertical projection and bumper fixation contact area on the front splitter is limited as follows:
  - In the middle area, ( $y = \pm 400$  mm), will be between 35 and 85mm.
  - outside  $y = \pm 400$  mm is limited to max. 210mm.
  - In the transition area to the wheel arch limited to max. 45 mm.
- The layout of the areas covered by the bumper is accordant to the FIA WTCR Technical Passport.
- The areas next to wheel arches (Detail D) may remain flat.
- production drawings will be delivered for certification
- scrutineering jigs for external contour, leading edge and lower face will be delivered on request
- 2 embedded skid pads, Steel,  $1.2 \pm 0.1$ mm, max area: 600cm<sup>2</sup> each (shape and fixations are accordant to the FIA WTCR Technical Passport, use is optional).

The foremost edge of the front splitter at  $y=0$  will protrude the bumper contour by max. 35mm in vertical projection.



## Anexo 2.

### Solicitud de homologación del vehículo Peugeot 308 TCR.



FEDERATION INTERNATIONALE DE L'AUTOMOBILE

#### TC COMMITTEE – 2016 REQUEST FORM

Chemin de Blandonnet 2 – 1215 Genève 15 – SUISSE

Tél. +41 22 544 44 00 – Fax +41 22 544 44 74

[committee.tc@fia.com](mailto:committee.tc@fia.com)

#### Request details

Request number (to be completed by the Committee) : TC – R 2016/14

Request date: 11/05/2016

Championship(s) concerned:  FIA World Touring Car Championship  
 FIA European Touring Car Cup

\*Please select the Championship/Cup concerned.

#### Details concerning the applicant

Company name:

Type: (manufacturer/team)

Manufacturer  Team

\* Please select the appropriate status.

First name: Franck

Last name (legal representative): Tiné

Title( position/function): Sporting Director

Address: 8 Rue des Chênes  
67250 Soultz-sous-Forêts

Country: France

Phone: +33388067500

Fax: +33388067505

Mobile: +33628753378

Email: [f.tine@sebastienloebracing.com](mailto:f.tine@sebastienloebracing.com)

#### Details relating to the vehicle concerned

Make and model: Peugeot 308 Racing Cup

FIA homologation number/

National homologation number:

Chassis frame number:

#### Full description of the request

Request(s):

We kindly ask the TC Committee to accept the participation of the car model Peugeot 308 Racing Cup in ETCC 2016 under TCN2 class regulations, as per Sporting Regulations article number 10 c)

Reason(s):

We plan to take part in ETCC 2016 with two Peugeot 308 Racing Cup cars in the Nürburgring round.

#### Missions concerned (to be completed by the Committee)

- 1) examination of any request for a technical change concerning the homologation form of a vehicle,
- 2) conformity with the spirit of the FIA Super 2000 Regulations,
- 3) prohibition of any developments that would result in a significant increase in the costs of cars,

- 4) examination of any request from competitor wishing to take part in an FIA event with a car complying with national regulations.
- 5) to review at the end of each season the relative performance of the various different formats of vehicles and any other parameters, with the objective of maintaining equal opportunity for all competitors. Any recommendations for the following season will be proposed beforehand to the Touring car Commission for approval.
- 6) at any moment during the season, to reconsider the technical dispensations granted for performance reasons.

**Decision (to be completed by the Committee)**

- Accepted as requested
- Accepted subject to the approval of the TC Technical Working Group
- Accepted subject to the approval of the TC Commission
- Refused
- Suspended
- Accepted with the following modifications/conditions:

Accepted by the TWG on:

Accepted to take part in the 2016 ETCC in TCN2 (according to article 10c of the ETCC sporting regulations) subject to satisfactory technical inspection and compliance of the cars registered.  
The min weight to apply in relation with the BoP will be: 1185Kg

Conditions fulfilled on:

Reason:

**Period of validity/application of the decision (to be completed by the Committee)**

This decision comes into effect:

- with immediate application
- from : (exact date)
- from the following Event:

- and is applicable:
- until further notice.
  - for the above-mentioned Event(s) only.

**Signatures of the Committee members**

Alan Gow

Dennis Carter

Bernard Niclot





**DECISION NUMBER: TC – R 2016/14**

**Time of notification**

Hours: 15.00 Date: 24/05/2016

This decision is notified to the applicant concerned in accordance with the applicable Sporting Regulations and TC Committee Internal Regulations.  
It is available via the private area of the FIA website [www.fia.com](http://www.fia.com)  
It has been sent, for information, to the FIA Officials concerned, to the Secretary General of the FIA (sport).  
Right of protest: The decisions taken by the TC Committee may not form the subject of an appeal.