



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“Influencia de superficies adicionales en parámetros aerodinámicos en un automóvil deportivo y el efecto de un alerón de ala centrípeta en el flujo”

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

David Zavala Salgado

DIRECTOR DE TESIS

Dr. William Vicente y Rodríguez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la mejor atención durante mi paso por ella, y por acogerme día con día en las aulas. Así como, por la formación de excelentes profesionales y ciudadanos que ayudan en el desarrollo de diferentes ámbitos tecnológicos, científicos y sociales, y que permiten seguir posicionando el nombre de nuestra amada Universidad en lo más alto.

A la Facultad de Ingeniería, por darme a conocer lo bello que es el mundo de la ingeniería, así como a sus excelentes académicos por brindarme la mejor formación profesional y proporcionarme las bases sobre las que forjaré mi futuro como profesionista.

A todos los profesores con los que cursé materias durante mi paso por la Facultad, pero sobre todo a aquellos que la relación fue más allá de las aulas y me brindaron sabios consejos y enseñanzas para mi formación profesional, pero sobre todo para el día con día.

De manera distintiva al Dr. William Vicente y Rodríguez, por ser parte fundamental de mi formación académica; clases, servicio social y el presente trabajo de tesis. Por todo el tiempo compartido, el apoyo y consejos brindados en el tiempo de conocernos; sobre todo, en la orientación y motivación para siempre dirigir mi camino hacia el éxito. Por todo esto y más; con cariño, respeto y admiración, muchas gracias.

Al M.I. Isaac Fonseca Cruz, por brindarme cimientos sólidos del Diseño Mecánico y sobre todo la orientación brindada para el desarrollo del modelo CAD del presente trabajo. Gracias por el tiempo brindado.

Al Dr. Rogelio González Oropeza, por los consejos brindados y el tiempo compartido durante mi estancia en la CIPIA y la asignatura de motores. Por la motivación para siempre continuar adelante a pesar de las diferentes adversidades que se pueden presentar en el camino.

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS



A todo el personal del laboratorio de Termofluidos, que me acogieron desde el primer día que llegué, sobre todo al M.I. Francisco González por todo el conocimiento que me transmitió y por las experiencias compartidas que me hacían pasar un buen rato durante la realización del servicio social.

Al Instituto de Ingeniería, en particular al laboratorio de Dinámica de Fluidos Computacional, por brindarme el equipo necesario para la realización de las simulaciones CFD del presente trabajo de tesis.

A Eduardo, por el tiempo compartido, por el apoyo que me brindó durante mi realización del servicio social, de manera especial quiero agradecerle por aconsejarme todo este tiempo, tanto en el ámbito personal como en mi trabajo de tesis. Aprecio todo el apoyo que me brindaste con la familiarización del programa Ansys y por las recomendaciones acerca de las simulaciones del presente trabajo.

A Javier Alejandro Rosas por todos los consejos y apoyo brindado con Ansys, en especial con la orientación acerca del uso y de los métodos de solución del programa.

Al honorable miembro del jurado, por sus valiosas recomendaciones para enriquecer el presente trabajo.

RESUMEN

Este trabajo de tesis presenta el análisis numérico del flujo en un automóvil deportivo Audi R8®, así como la influencia de añadir un alerón de perfil base NACA 6412. En el modelo numérico se resuelven las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento, vía la alternativa de ecuaciones promediadas (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation, RANS) . La turbulencia del flujo se simula con el modelo K- ϵ realizable. Las ecuaciones se resuelven mediante un método de volúmenes finitos. El acoplamiento presión-velocidad se resuelve con la técnica SIMPLEC.

Los resultados numéricos son validados con datos experimentales y de simulaciones numéricas de otros trabajos de la literatura abierta en términos del vehículo sin alerón. Los análisis incluyen la cuantificación de fuerzas de arrastre, sustentación y lateral, así como sus respectivos coeficientes. Cuando el alerón es incluido en la parte trasera del vehículo se presentó un aumento considerable en la carga aerodinámica, sin un cuantioso incremento en los parámetros relacionados con el arrastre, por lo que el alerón utilizado presentó un buen balance de fuerzas. Adicionalmente, se identificó como el ala centrípeta interactúa con el flujo y su función como auxiliar en un flujo curvo, o en su defecto el paso de un vehículo por una curva.

SIMBOLOS Y ABREVIATURA

%	Porcentaje
°	Grado
≈	Aproximadamente
AoA	Ángulo de ataque
A _{Px}	Área proyectada en x
A _{Py}	Área proyectada en y
A _{Pz}	Área proyectada en z
CB	Caso base
CA	Caso alerón
CAAC	Caso alerón de ala centripeta
CFD	Dinámica de fluidos computacional
CAD	Diseño asistido por computadora
C _D	Coefficiente de arrastre
C _L	Coefficiente de sustentación
C _Z	Coefficiente fuerza lateral
cm	Centímetro
D	Longitud característica
ECT	Energía cinética turbulenta
F _D	Fuerza de arrastre
F _L	Fuerza de sustentación
F _Z	Fuerza lateral
g	gramo
G	Constante de gravitación universal (9.81 m/s ²)
kg	Kilogramo
m	Metro
mm	Milímetro
μ	Viscosidad dinámica del aire (1.74x10 ⁻⁵ Pa·s)
N	Newton

NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
P	Presión
Pa	Pascal
Re	Número de Reynolds $Re = \frac{\rho \bar{u} D}{\mu}$
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure- Linked Equations
s	Segundo
TI	Intensidad turbulenta
TVR	Tasa de viscosidad de turbulencia
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
u	Componente de la velocidad en dirección x
\bar{V}	Velocidad
v	Componente de la velocidad en dirección y
w	Componente de la velocidad en dirección z
∇	Gradiente
∇ ²	Laplaciano
ΔP	Diferencial de presión

TABLA DE CONTENIDO GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Interés sobre el estudio	2
1.2 Objetivo de la tesis:	5
1.3 Objetivos particulares:	5
2. ECUACIONES DE TRANSPORTE.....	6
2.1 Continuidad	6
2.2 Conservación de la cantidad de movimiento.....	6
2.3 Turbulencia.....	10
2.4 Promediado de las ecuaciones de transporte	11
3. MÉTODO NUMÉRICO.....	14
3.1 Método de volúmenes finitos	14
4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO	21
4.1 Configuración a simular, caso base	21
4.2 Superficie añadida (Alerón)	23
4.2.1. Diseño de alerón	24
4.3. Discretización y detalles numéricos.....	27
4.3.1 Condiciones de frontera.....	28
4.3.2 Malla.....	29
4.4. Resultados. Caso base sin alerón (CB). $Re= 9.2 \times 10^6$	30
4.4.2. Validación de resultados. Caso base sin alerón.....	36
4.4.3. Resultados. Variación del Re. Casos sin alerón.	39
4.4.4. Resultados. Fuerzas y coeficientes. Variación del Re. CB.....	47
4.5. Caso con alerón (CA).....	49
4.5.1. Resultados. Caso base con alerón. $Re= 9.2 \times 10^6$	49
4.5.2. Resultados. Variación del Re. Caso con alerón.	56
4.5.3. Resultados. Fuerzas y coeficientes. Variación del Re. CA.....	64
4.5.4. Resultados. Comparación entre el caso base sin y con alerón	66
4.6. Caso alerón de ala centrípeta (CAAC)	69
4.6.1. Resultados del caso alerón de ala centrípeta. Ángulo roll de 15°	70
4.6.2. Resultados. Variación del ángulo roll. Caso alerón de ala centrípeta.....	77
4.6.3. Resultados. Fuerzas y coeficientes. Variación del ángulo roll. CAAC.	86
4.7. Caso alerón ala centrípeta en trayectoria curva (CAAC en trayectoria curva).....	89
4.7.1. Resultados. CAAC en trayectoria curva. Ángulo roll de 15°	90
4.7.2. Resultados. Variación del ángulo roll. CAAC en trayectoria curva.	96
4.7.3. Resultados. Fuerzas y coeficientes. Variación del ángulo roll. Caso alerón de ala centrípeta en trayectoria curva.....	101

5. CONCLUSIONES.....	104
6. APÉNDICE	107
7. REFERENCIAS y BIBLIOGRAFÍA.....	110

TABLA DE CONTENIDO DE FIGURAS, TABLAS Y ESQUEMAS POR CAPÍTULO

Figuras

<i>Figura 1.1.</i> Alerón ala centrípeta Zenvo TSR-S®	4
<i>Figura 2.1.</i> Representación de la turbulencia	11
<i>Figura 3.1.</i> Representación del sistema discretizado en volúmenes finitos.....	15
<i>Figura 3.2.</i> Diagrama esquemático de un volumen de control bidimensional.....	16
<i>Figura 4.1.</i> Dibujo exterior y dimensiones Audi R8® en mm.....	21
<i>Figura 4.2</i> Modelo base CAD Audi R8.	22
<i>Figura 4.3.</i> Modelo base Audi R8 simplificado.....	23
<i>Figura 4.4.</i> Flujo de aire sobre ala.	23
<i>Figura 4.5.</i> Flujo de aire sobre ala invertida.....	24
<i>Figura 4.6.</i> Perfil alar NACA 6412.	24
<i>Figura 4.7.</i> Longitud y cuerda del alerón.....	25
<i>Figura 4.8.</i> Configuración alerón con endplates.	26
<i>Figura 4.9.</i> Dominio computacional.....	27
<i>Figura 4.10.</i> Condiciones de frontera y sistema de coordenadas.	28
<i>Figura 4.11.</i> Mallado del dominio computacional.....	29
<i>Figura 4.12.</i> Contorno de velocidad. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso base	32
<i>Figura 4.13.</i> Contorno de presión. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso base	33
<i>Figura 4.14.</i> Contorno de Energía Cinética Turbulenta. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso base.	34
<i>Figura 4.15.</i> Vectores de velocidad. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso base.	34
<i>Figura 4.16.</i> Líneas de flujo. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso base	35
<i>Figura 4.17.</i> Contorno de velocidad. Validación	37
<i>Figura 4.18.</i> Contorno de presión. Validación.....	38
<i>Figura 4.19.</i> Vectores de velocidad. Validación	38
<i>Figura 4.20.</i> Contornos de velocidad. Variación Re . Caso base.....	40
<i>Figura 4.21.</i> Vectores de velocidad. Variación Re . Caso base	42
<i>Figura 4.22.</i> Contornos de Energía Cinética Turbulenta. Variación Re . Caso base	43
<i>Figura 4.23.</i> Contornos de presión. Variación Re . Caso base	44
<i>Figura 4.24.</i> Líneas de flujo. Variación Re . Caso base	46
<i>Figura 4.25.</i> Fuerzas generadas sobre el vehículo. Caso Base.....	48
<i>Figura 4.26.</i> Coeficientes de arrastre y sustentación del vehículo. Caso Base.	48
<i>Figura 4.27.</i> Modelo Audi R8 con alerón.....	49
<i>Figura 4.28.</i> Contorno de velocidad. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso con alerón	52
<i>Figura 4.29.</i> Contorno de presión. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso con alerón.....	53
<i>Figura 4.30.</i> Contorno de ECT. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso con alerón.	54
<i>Figura 4.31.</i> Vectores de velocidad. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso alerón.....	54
<i>Figura 4.32.</i> Líneas de flujo. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso con alerón	55

<i>Figura 4.33.</i> Contornos de velocidad. Variación Re. Caso con alerón.....	57
<i>Figura 4.34.</i> Vectores de velocidad. Variación Re. Caso con alerón	59
<i>Figura 4.35.</i> Contornos de ECT. Variación Re. Caso con alerón.....	60
<i>Figura 4.36.</i> Contornos de presión. Variación Re. Caso con alerón	61
<i>Figura 4.37.</i> Líneas de flujo. Variación Re. Caso con alerón	63
<i>Figura 4.38.</i> Fuerzas generadas sobre el vehículo. Caso con alerón.....	65
<i>Figura 4.39.</i> Coeficientes de arrastre y sustentación del vehículo. Caso con alerón.	65
<i>Figura 4.40.</i> Fuerzas de arrastre y sustentación del vehículo sin (CB) y con (CA) alerón.	67
<i>Figura 4.41.</i> Coeficientes de arrastre y sustentación del vehículo sin (CB) y con (CA) alerón.	68
<i>Figura 4.42.</i> Modelo Audi R8 con alerón de ala centrípeta, ángulo roll de 15°	69
<i>Figura 4.43.</i> Contorno de velocidad. Caso alerón de ala centrípeta. Ángulo roll 15°	72
<i>Figura 4.44.</i> Contorno de presión. Caso alerón de ala centrípeta. Ángulo roll 15°	73
<i>Figura 4.45.</i> Contorno de ECT. Caso alerón de ala centrípeta. Ángulo roll 15°	74
<i>Figura 4.46.</i> Vectores de velocidad. Caso alerón de ala centrípeta. Ángulo roll 15°	75
<i>Figura 4.47.</i> Líneas de flujo. Caso alerón de ala centrípeta. Ángulo roll 15°	76
<i>Figura 4.48.</i> Contornos de velocidad. Variación ángulo roll. Caso alerón de ala centrípeta. ...	78
<i>Figura 4.49.</i> Vectores de velocidad. Variación ángulo roll. Caso alerón de ala centrípeta.....	79
<i>Figura 4.50.</i> Contornos de ECT. Variación ángulo roll. Caso alerón de ala centrípeta.	81
<i>Figura 4.51.</i> Contornos de presión. Variación ángulo roll. Caso alerón de ala centrípeta.....	83
<i>Figura 4.52.</i> Líneas de flujo. Variación ángulo roll. Caso alerón de ala centrípeta.	86
<i>Figura 4.53.</i> Fuerzas de sustentación en los extremos del alerón de ala centrípeta.....	87
<i>Figura 4.54.</i> Fuerzas generadas sobre el vehículo CAAC	88
<i>Figura 4.55.</i> Coeficientes de arrastre, sustentación y lateral del vehículo CAAC	88
<i>Figura 4.56.</i> Modelo Audi R8 ala centrípeta, simulando el paso por una curva a la derecha... ..	89
<i>Figura 4.57.</i> Modelo Audi R8 ala centrípeta, componentes de la velocidad.	89
<i>Figura 4.58.</i> Contorno de velocidad. CAAC en trayectoria curva. Ángulo roll 15°	91
<i>Figura 4.59.</i> Contorno de presión. CAAC en trayectoria curva. Ángulo roll 15°	92
<i>Figura 4.60.</i> Contorno de ECT. CAAC en trayectoria curva. Ángulo roll 15°	93
<i>Figura 4.61.</i> Vectores de velocidad. CAAC en trayectoria curva. Ángulo roll 15°	94
<i>Figura 4.62.</i> Líneas de flujo. CAAC en trayectoria curva. Ángulo roll 15°	95
<i>Figura 4.63.</i> Contornos de velocidad. Variación del ángulo roll. CAAC en trayectoria curva. ...	96
<i>Figura 4.64.</i> Vectores de velocidad. Variación del ángulo roll. CAAC en trayectoria curva.	97
<i>Figura 4.65.</i> Contornos de ECT. Variación del ángulo roll. CAAC en trayectoria curva	98
<i>Figura 4.66.</i> Contornos de presión. Variación del ángulo roll. CAAC en trayectoria curva.	99
<i>Figura 4.67.</i> Líneas de flujo. Variación del ángulo roll. CAAC en trayectoria curva.....	100
<i>Figura 4.68.</i> Fuerzas generadas sobre el vehículo. CAAC en trayectoria curva	102
<i>Figura 4.69.</i> Coeficientes C_D , C_L y C_z del vehículo. CAAC en trayectoria curva	103
<i>Figura A.</i> Diagrama esquemático de celdas.	107

Tablas

Tabla 4.1. Fuerzas generadas sobre los 2 tipos de alerón.....	26
Tabla 4.2. Comparación de resultados con la literatura	37
Tabla 4.3. Re con su respectiva velocidad del flujo.....	39
Tabla 4.4. Fuerzas y coeficientes obtenidos caso base	47
Tabla 4.5. Fuerzas y coeficientes obtenidos caso alerón	64
Tabla 4.6. Fuerzas y coeficientes obtenidos caso alerón de ala centrípeta.....	86
Tabla 4.7. Fuerzas y coeficientes obtenidos caso alerón de ala centrípeta en curva	101

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Durante mucho tiempo ha importado el análisis aerodinámico de las superficies, las cuales están sometidas al paso de algún flujo externo. Desde la trayectoria que toma una pelota de tenis, hasta las fuerzas que influyen sobre el ala de un avión permitiendo con esto, que sea posible volar. Todo esto comprende una gran área de investigación, no solo en la actualidad sino durante mucho tiempo atrás. Lo cual ha permitido grandes avances, como el poder superar la velocidad del sonido con una bala, o un jet, que un ciclista alcance una mayor velocidad, incluso que un buzo se pueda desplazar eficazmente en el agua, entre otros casos más.

En la actualidad existe un sector que tiene un gran auge con respecto a la aerodinámica, que es el sector automovilístico; hoy en día es una de las áreas donde más relevancia toma este aspecto y no solo a nivel de competencia: F1, NASCAR, Indycar, etc. Es un factor clave en el diseño de coches deportivos de lujo, debido a que siempre se busca alcanzar la máxima velocidad posible, teniendo en cuenta diversos factores: diseño atractivo a la vista, menor peso posible, cantidad de componentes factibles (alerón, difusor, aletas, etc).

En el caso de autos más económicos como son los de serie, todo aquel que posee una mejor accesibilidad al público en general, la aerodinámica también es un factor importante, en particular lo que tiene que ver con el consumo de combustible, el cual es el principal afectado por la resistencia opuesta por el aire al avance del vehículo; aunque no es lo único que afecta, ya que aquí se tienen agentes externos, relacionados con el motor, tipo de conducción, tipo de vehículo, etc.

La aerodinámica es muy importante, sobre todo cuando se habla de velocidad, un aspecto importante en este tema, es la fuerza de arrastre, la cual se presenta en dirección contraria al movimiento de un cuerpo y es el principal impedimento para que cualquier objeto pueda alcanzar una mayor velocidad, puede ser muy grande o casi nula, dependiendo de varios elementos, como la capa límite y su desprendimiento, velocidad a la que el objeto atraviesa el fluido, densidad y viscosidad del mismo. También, la geometría que posee el cuerpo en cuestión es

muy relevante. Todo lo antes mencionado indica que el arrastre es parte fundamental para que un cuerpo pueda incrementar su velocidad sin gran esfuerzo.

Adicional al arrastre, existe otra fuerza igual de importante y posee una variedad de aplicaciones, fuerza de sustentación. Esta permite que un avión pueda volar o que un automóvil consiga “adhesión” al piso, debido a que esta fuerza es perpendicular a la dirección de movimiento del cuerpo. En ocasiones, se elimina esta fuerza, o es prácticamente nula, con objeto de evitar cualquier efecto no deseado sobre el cuerpo.

Con lo previamente expuesto se aprecia que el arrastre y la sustentación son fuerzas que van sumamente relacionadas entre sí. Un alerón es un componente que permite modificar estas dos fuerzas, de acuerdo al escenario requerido, consecuente a esto es posible obtener resultados diferentes:

- Aumento o disminución de las dos fuerzas
- Aumento de sustentación y disminución de arrastre
- Aumento de arrastre y disminución de sustentación

En este caso, el estudio trata sobre el efecto de un alerón sobre los parámetros aerodinámicos de un automóvil deportivo, en términos de fuerzas de arrastre, de sustentación y lateral.

1.1 Interés sobre el estudio

Con lo anteriormente expuesto, se realiza un análisis del flujo de aire a través de un automóvil deportivo (Audi R8®). Inicialmente se estudia el coche de serie sin ninguna modificación, y posterior se agrega un alerón, con esto último se busca aumentar la carga aerodinámica del automóvil sin que la fuerza de arrastre incremente en exceso. Tomando como punto de comparación el artículo: “*Influencia aerodinámica de superficies añadidas en características de rendimiento de un automóvil deportivo*” [1], en el cual se realiza un análisis de flujo para diferentes números de Reynolds, para los 4 casos que presentan (caso base, ala simple, doble ala y ala tipo cuña), se obtienen los coeficientes de arrastre y sustentación para su respectivo caso. Adicionalmente, se ejecuta un análisis experimental del caso base

[1]. Muguran Thangadurai, Rajesh Kumar, Subhas Chandra Rana, Dipankar Chatterjee, “Aerodynamic Influence of Added Surfaces on the Performance Characteristics of a Sports Car”, Springer, June 2019.

en un túnel de viento con un modelo a escala del automóvil, obteniendo diferentes parámetros como; fuerzas ejercidas y coeficientes resultantes. En cuanto a los demás casos el análisis se realiza únicamente por medio de simulaciones CFD.

En el caso del alerón de ala centrípeta se utiliza como punto de referencia y no de comparación el artículo de Janusz et. al [20], donde realizan simulaciones CFD en diferentes casos, caso base, añadiendo un alerón y variando su ángulo de ataque (AoA), alerón de ala centrípeta variando ángulo de ataque y de roll del mismo. Particularmente, ellos [20] realizan un análisis experimental del automóvil en tamaño real, donde en específico estudian el efecto del alerón de ala centrípeta sobre el automóvil sobre los diferentes parámetros de estudio, como fuerzas laterales, de sustentación y de arrastre.

El análisis de flujo en el presente trabajo tiene la opción de ejecutarse por medio de un análisis experimental y un análisis numérico con CFD. El estudio experimental se puede realizar con un modelo a escala del automóvil, añadiendo el prototipo del alerón que se ajuste a la escala de este. El modelo se introduce a un túnel de viento y se realizan las mediciones de las fuerzas resultantes a diferentes velocidades del flujo de aire. Este análisis está sujeto a la disponibilidad del túnel de viento en el laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ingeniería UNAM para su implementación.

Por otro lado, los avances en materia de informática han permitido que el empleo de simulaciones numéricas sea menos costoso y requiera de menores recursos, tanto computacionales como temporales. Este método es de gran ayuda, porque nos da resultados muy cercanos a lo que sucedería en la realidad, casi exactos. Los resultados cada vez son más confiables y los modelos más sofisticados, permitiendo así la obtención de resultados muy fiables.

Para el desarrollo y análisis de este sistema se utiliza un código de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), en el cual se realizan las simulaciones pertinentes con la finalidad de obtener diferentes parámetros, como presiones, velocidades, fuerzas de arrastre, sustentación (carga aerodinámica), laterales, así como sus respectivos coeficientes.

[20]. Janusz Ryszard Piechna, Krzysztof Kurec, Jakub Broniszewski, "Influence of the car movable aerodynamic elements on fast road car cornering", Energies, January 2022.

El código se basa en el promediado de las ecuaciones de Navier Stokes, y la solución de estas ecuaciones se hace mediante el método de volúmenes finitos, el cual se programa en el código de CFD Ansys Fluent. Para la turbulencia se utiliza el método $k-\epsilon$ realizable. Y la simulación se realiza en estado estacionario.

Adicional al análisis antes mencionado, se realiza un caso especial el cual consta en colocar sobre el automóvil el alerón añadido al vehículo, pero en otra configuración, denominada de “ala centrípeta”, **Figura 1.1**. Este tipo de elementos se conocen en la actualidad como aerodinámica activa, y este contribuye al tener un viento cruzado o analógicamente cuando el automóvil viaja a lo largo de una curva. Este alerón tiene la particularidad de inclinarse lateralmente, cambiando el ángulo de roll, dependiendo de las condiciones de la curva. Al momento de tomar una curva el alerón se eleva dependiendo de la dirección de esta, por ejemplo, si la vuelta es hacia la derecha, el ala se inclina posicionando el lado derecho a una mayor altura y viceversa. Esto permite que el automóvil tenga una mayor adherencia al piso y consecuentemente poder encadenar la curva a una mayor velocidad sin riesgo de perder el control. Para analizar este efecto, dos simulaciones son realizadas, la primera simula que el vehículo circula en dirección recta, sin ningún cambio, mientras la segunda imita el paso del vehículo a través de una curva.



Figura 1.1. Alerón ala centrípeta Zenvo TSR-S®

Fuente: [ZenvoAutomotive.com](https://zenvoautomotive.com) [2]

[2]. <https://zenvoautomotive.com/tsr-s/>

1.2 Objetivo de la tesis:

- Analizar numéricamente la influencia de superficies adicionales en la aerodinámica del flujo en un automóvil deportivo, así como el efecto de un alerón de ala centrípeta en la aerodinámica del flujo, en términos de fuerza de arrastre, de sustentación y lateral, y sus correspondientes coeficientes.

1.3 Objetivos particulares:

- Simular numéricamente el flujo que circula sobre un automóvil deportivo.
- Validar el modelo numérico por comparación con datos experimentales y datos numéricos de la literatura abierta.
- Analizar los efectos aerodinámicos generados a partir de la adición de un alerón en un automóvil deportivo.
- Analizar el efecto aerodinámico del alerón de ala centrípeta (centripetal wing) sobre el vehículo, en trayectoria recta y curva.
- Variar el número de Reynolds para el modelo base (sin modificar) y modelo con alerón.
- Variar el ángulo roll en el alerón de ala centrípeta
- Obtener para cada caso los respectivos parámetros aerodinámicos del flujo.

CAPÍTULO 2. ECUACIONES DE TRANSPORTE

2. ECUACIONES DE TRANSPORTE

En este apartado se abordarán las ecuaciones de transporte que gobiernan el paso del automóvil a través del aire, que es exactamente igual a que el flujo de aire atraviese el vehículo cuando este se encuentra en reposo. Las ecuaciones son conservación de masa y cantidad de movimiento, la de energía para este caso no se utiliza debido a que no considera transferencia de calor o generación de calor por esfuerzos normales o tangenciales. Se tiene que considerar que el flujo es turbulento y multidimensional. Las ecuaciones que se presentan están dadas para un sistema de coordenadas cartesianas.

2.1 Continuidad

La ecuación de continuidad (2.1) se utiliza para expresar la conservación de masa y puede escribirse como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (2.1)$$

De forma simplificada puede reescribirse como el gradiente de la velocidad (2.2):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{v} \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (2.2)$$

Donde ρ y \bar{v} respectivamente, son la densidad y velocidad del flujo de aire por el que atraviesa el vehículo.

2.2 Conservación de la cantidad de movimiento

La ecuación (2.3) que describe la conservación de la cantidad de movimiento es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \bar{v} \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \vec{\tau}_{ij} + \rho g \quad (2.3)$$

Donde P es la presión, $\vec{\tau}_{ij}$ es el tensor de esfuerzos (2.4).

$$\vec{\tau}_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \rightarrow \text{Tensor de esfuerzos} \quad (2.4)$$

2. ECUACIONES DE TRANSPORTE

Aplicado a las 3 direcciones (x,y,z), las expresiones resultantes nos dan las 3 componentes de la ecuación de Cauchy quedando de la siguiente forma:

Dirección x:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u w) = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{xz}) + \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.5a)$$

Dirección y:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v w) = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{yz}) + \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} \quad (2.5b)$$

Dirección z:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho w u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho w v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w w) = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{zx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{zy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{zz}) + \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} \quad (2.5c)$$

Para obtener las ecuaciones de Navier Stokes, se debe expresar el tensor de esfuerzos $\vec{\tau}_{ij}$ en términos de las incógnitas primarias, densidad, presión y velocidad.

Esto se puede realizar mediante las ecuaciones constitutivas que nos permiten escribir las componentes del tensor de esfuerzo en términos del campo de velocidad y del campo de presión. La primera acción que se hace es separar los esfuerzos de presión y los esfuerzos viscosos. Cuando un fluido se mueve, la presión actúa hacia dentro normal, pero también pueden existir esfuerzos viscosos. La ecuación (2.6) se generaliza para fluidos en movimiento como:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Donde se introduce un nuevo tensor $\vec{\sigma}_{ij}$, denominado tensor de esfuerzos viscosos. Este estudio se concentra para fluidos newtonianos, que se definen como los fluidos para los que el esfuerzo de corte es linealmente proporcional a la razón de deformación por corte. Donde por definición el tensor de esfuerzo es linealmente proporcional al tensor de razón de deformación. Se supone un flujo incompresible (ρ =constante). Además, también se supone flujo isotérmico: los cambios locales de temperatura son pequeños o inexistentes. Una consecuencia subsiguiente de la

última suposición es que las propiedades de fluido (viscosidad dinámica μ y la viscosidad cinemática ν) también son constantes.

Con dichas suposiciones se puede demostrar que el tensor de esfuerzo viscoso se reduce a:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} \quad (2.7)$$

La ecuación (2.7) expresa el tensor de esfuerzos viscosos para un fluido incompresible con propiedades constantes.

Donde ε_{ij} , es el tensor de razón de deformación, la ecuación (2.8) muestra que el esfuerzo es linealmente proporcional a la deformación. En coordenadas cartesianas las nueve componentes del tensor de esfuerzos viscosos quedan:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Con lo anterior, el tensor de esfuerzo de la ecuación (2.6), expresado en coordenadas cartesianas se convierte en:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Si se sustituye la ecuación (2.9) en las 3 componentes cartesianas de la ecuación de Cauchy, considerando para la dirección x, la ecuación (2.5a) se convierte en:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + 2\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.1.1)$$

2. ECUACIONES DE TRANSPORTE

Después de reordenar los términos viscosos de la ecuación (2.1.2), la ecuación queda expresada de la siguiente forma:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]$$
$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right]$$

El término entre paréntesis es la ecuación de continuidad o de conservación de masa, por lo que se hace 0, y los tres últimos términos se les reconoce también como Laplaciano de la componente de velocidad u en coordenadas cartesianas, Por lo tanto, la componente x de la ecuación de cantidad de movimiento puede reescribirse como:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \nabla^2 u \quad (2.1.2a)$$

Para las dos componentes restantes y y z sucede lo mismo y quedan expresadas de la siguiente forma:

Dirección y:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \nabla^2 v \quad (2.1.2b)$$

Dirección z:

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \nabla^2 w \quad (2.1.2c)$$

Unir las 3 componentes en una ecuación vectorial, da como resultado la ecuación de Navier-Stokes (2.1.3) para flujo incompresible con viscosidad constante:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{dt} = -\nabla P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.1.3)$$

Las componentes de la ecuación (2.1.3) se dedujeron en coordenadas cartesianas, la forma vectorial de la ecuación (2.1.3) es válida para cualquier sistema coordenado ortogonal.

2.3 Turbulencia

Este es un fenómeno muy presente en los fluidos, y como se puede ver en las secciones anteriores se definieron las ecuaciones que describen el movimiento de un flujo. Las ecuaciones anteriores están hechas para poder estudiar flujos laminares y turbulentos, aunque su aplicación es muy limitada en casos prácticos. Lo anterior conlleva que las ecuaciones deban adaptarse para poder ser utilizadas en el análisis de un flujo turbulento. Antes de describir las ecuaciones se analiza la turbulencia con la finalidad de entender la complejidad de este fenómeno, como tal la turbulencia no tiene una definición, pero esta se puede describir observando los efectos en el comportamiento del fluido.

Una forma sencilla de definir a la turbulencia sería, una inestabilidad que sufre un fluido en su movimiento, y en vez de seguir una trayectoria paralela, se forman trayectorias en forma de torbellinos o sinusoidal, lo anterior provocado por variaciones en la velocidad y presión del flujo.

La técnica de ecuaciones promediadas de Navier Stokes, resuelve las ecuaciones presentadas anteriormente para el flujo turbulento al momento que el flujo de aire empieza a recorrer la superficie del vehículo. La técnica RANS puede entenderse como una variación local de una propiedad Φ del fluido con respecto al tiempo en el flujo turbulento.

En la **Figura 2.1** se puede observar la discrepancia de las escalas temporales y la naturaleza caótica de este fenómeno que hacen casi imposible su desarrollo analítico. Sin embargo, los flujos turbulentos pueden manejarse de manera estadística en función de la variable Φ que presente cualquier propiedad.

La propiedad antes mencionada está definida por un término medio y un término fluctuante (ϕ'). El manejo estadístico permite que existan cambios abruptos en las variables espacial y temporal, gracias a esto se puede tener un manejo matemático de las ecuaciones de transporte. Lo antes expuesto con respecto a las variables es la base de la alternativa de simulación numérica RANS, la cual utiliza las ecuaciones en función de los valores medios y fluctuantes. Las ecuaciones se promedian y se resuelven con un método numérico. No obstante, el promediado de las ecuaciones es una técnica que implica un manejo matemático complejo y la aparición de términos adicionales los cuales serán descritos de manera específica en el siguiente apartado.

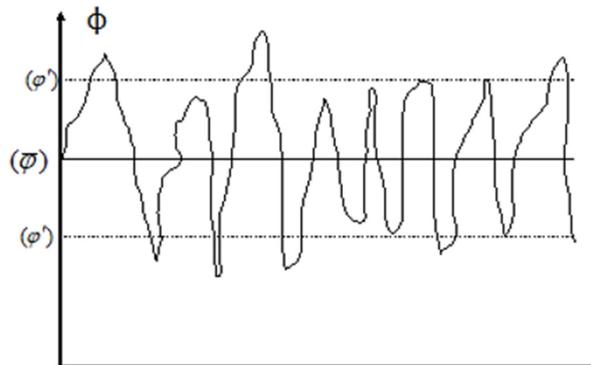


Figura 2.1. Representación de la turbulencia

2.4 Promediado de las ecuaciones de transporte

En la mayor parte de los problemas de interés práctico, el flujo es turbulento, como el caso de estudio del presente trabajo. Una característica de este tipo de flujos es la variación aleatoria e irregular tanto en el espacio como en el tiempo de las propiedades del fluido.

Una de las alternativas para la simulación de flujos, es el promediado de las ecuaciones instantáneas de conservación. Con este método, se promedian todas las fluctuaciones de las escalas temporales y se resuelven ecuaciones de transporte para los valores medios de las propiedades del fluido. Estas ecuaciones no son cerradas, por lo cual se requieren modelos que reemplacen términos no cerrados.

Cuando en el flujo existen variaciones en la densidad, se pueden usar dos tipos de promedio dependiendo del caso. El promedio de Reynolds, en el cual la densidad se considera como constante [3], y el otro es el promedio de Favre [4], en el cual la densidad es variable.

Con fines ilustrativos se representa con el símbolo Φ , cualquier propiedad transportada, los valores instantáneos de estas propiedades son definidos en términos de un promedio y una fluctuación turbulenta.

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi' \quad (2.1.4)$$

$$\Phi = \tilde{\Phi} + \Phi'' \quad (2.1.5)$$

Los dos promedios $\bar{\Phi}$ y $\tilde{\Phi}$ están definidos de la siguiente forma:

$$\bar{\Phi} = \lim_{n_e \rightarrow \infty} \frac{1}{n_e} \sum_{i=1}^{n_e} \Phi^i \rightarrow \text{promediado de Reynolds} \quad (2.1.6)$$

$$\tilde{\Phi} = \lim_{n_e \rightarrow \infty} \frac{1}{n_e} \sum_{i=1}^{n_e} \rho^i \Phi^i \rightarrow \text{promediado de Favre} \quad (2.1.7)$$

Donde Φ^i es la muestra i del conjunto de realizaciones de n^e de un experimento.

Una de las razones de aplicar el promedio de Favre en las ecuaciones instantáneas de transporte, es porque cuando se aplica dicho promedio se generan ecuaciones muy sencillas que no incluyen modificaciones a las fluctuaciones que puedan existir en la densidad, en las ecuaciones resultantes.

Si se aplica el promedio de Favre a las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento se obtienen las siguientes ecuaciones [5]:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \vec{V}) = 0 \quad (2.1.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \vec{V}) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \vec{V} \vec{V}) = -\nabla \bar{P} + \nabla \cdot (\overline{\bar{\rho} \vec{V}' \vec{V}'}) + \bar{\rho} \vec{g} \quad (2.1.9)$$

[3]. K. K. Kuo. Principles of Combustion. Jonh Wiley, 1986.

[4]. A. Favre. Problems of Hydrodynamics and Continuum Mechanics. SIAM, 1969.

[5]. J. Warnatz, U. Mass, R. W. Dibble. Combustion. Springer. 1996

Los términos turbulentos $(\overline{\rho V'' V''})$, es un término desconocido que requiere modelización, y se puede consultar en [6] y [7].

Nótese que, el caso de estudio del presente trabajo de tesis, no requiere el promediado de Favre ya que no existen cambios de densidad, debido a que se considera que la fricción generada entre el flujo y la superficie del vehículo no es demasiado alta para aumentar la temperatura del fluido, por lo tanto el cambio en la densidad es despreciable. El paso del flujo a través de la superficie del automóvil genera un flujo turbulento, por lo que el promediado de Reynolds será el más adecuado para estudiar el flujo turbulento sobre el automóvil.

[6]. S. A. Shetty, H. Mitchel, M. de Tezanos Pinto, F. Papa, R. L. Cerro. Heat Transfer Performance of Fintubes with Solid Versus Serrated Fins. Avances en Ingeniería Química 8-1 (1998) 16-23.

[7]. E. Martínez, W. Vicente, M. Salinas, G. Soto. Single-phase experimental analysis of heat transfer in helically finned heat exchangers. Applied Thermal Engineering 29 (2009) 2205-2210.

CAPÍTULO 3. MÉTODO NUMÉRICO

3. MÉTODO NUMÉRICO

En esta sección se aborda el método por el cual se puede dar solución a las ecuaciones presentadas anteriormente, ya que estas no pueden ser resueltas de manera analítica debido a que son ecuaciones diferenciales de segundo orden y hasta el momento no existe ningún método analítico por el cual puedan ser resueltas.

El desarrollo de la dinámica de fluidos computacional, así como los grandes avances en materia de computación, han dado paso a que surjan varias alternativas para dar solución a las ecuaciones del apartado anterior, las cuales gobiernan el movimiento del flujo. Una alternativa para la resolución de estas ecuaciones es el *método de volúmenes finitos*, el cual es sencillo y numéricamente eficiente, se obtienen resultados muy parecidos a lo que sucede en la realidad, además de que se ha convertido en una de las técnicas más utilizadas en las simulaciones de 3 dimensiones.

3.1 Método de volúmenes finitos

Mediante una ecuación general, se pueden representar las ecuaciones medias de continuidad, cantidad de movimiento y del modelo de turbulencia, donde la variable dependiente está representada por $\tilde{\phi}$:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{\phi}) + \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{\phi}) - \nabla \cdot (\Gamma_\phi\nabla\tilde{\phi}) = \bar{S}_\phi \quad (3.1)$$

Donde Γ_ϕ es el coeficiente de difusión y S_ϕ es el término fuente. Los términos del lado izquierdo de la ecuación (3.1) son el término transitorio, convectivo y difusivo, respectivamente. Los términos Γ_ϕ y S_ϕ están especificados para cada variable $\tilde{\phi}$. En el caso de la ecuación de continuidad, $\tilde{\phi} = 1$.

Esta ecuación general (3.1), se puede discretizar con el método de volúmenes finitos. Con este método, el dominio se divide en pequeños volúmenes de control **Figura 3.1**, asociando a cada uno de ellos un punto nodal. De manera similar, se discretiza el tiempo en intervalos temporales. La ecuación diferencial resultante, se integra en cada volumen de control y en cada intervalo temporal, y el resultado es una ecuación discretizada que relaciona los valores de $\tilde{\phi}$ para un determinado grupo de puntos nodales. Esta ecuación algebraica expresa el principio de conservación de $\tilde{\phi}$ en el volumen finito, de la misma manera que la ecuación diferencial lo expresa para un volumen infinitesimal. La ecuación algebraica para un nodo P puede expresarse en forma general como:

$$a_P \tilde{\phi}_P = \sum_{i,I=E,W,N,S,H,L} a_i \tilde{\phi}_I + a_T \tilde{\phi}_T + B \quad (3.2)$$

Donde el subíndice I representa las celdas vecinas, i la cara entre las celdas P e I , T el valor correspondiente en el intervalo temporal anterior, y B el término fuente. La deducción detallada de la ecuación (3.2) puede consultarse en ([8] y [9]), así como en un gran número de textos de dinámica de fluidos computacional.

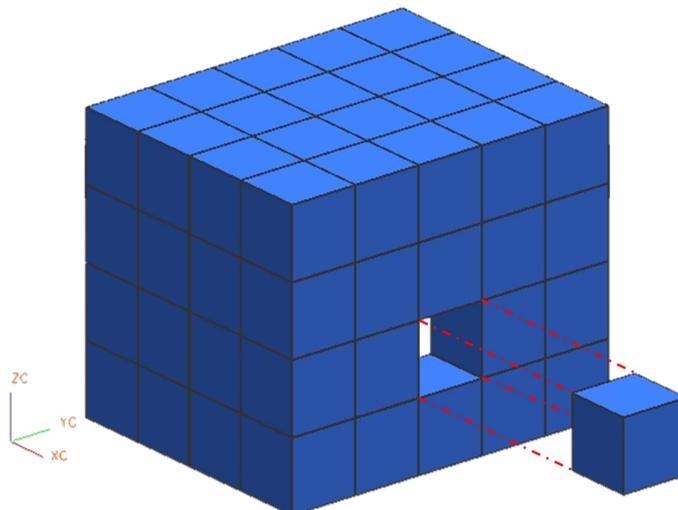


Figura 3.1. Representación del sistema discretizado en volúmenes finitos

[8]. A. Nir. Heat Transfer and Friction Factor Correlations for Crossflow over Staggered Finned Tube Banks. Heat Transfer Engineering 12-1 (1991) 43-58.

[9]. Hailing Wu, Diana Ma, Massoud Kaviany. Peripheral fins for blockage robustness. International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 2514–2520.

En el caso de una malla cartesiana, escalonada (“staggered”) y uniforme (celdas de iguales dimensiones espaciales), se puede emplear por sencillez un volumen de control bidimensional, como el que se muestra en la **Figura 3.2** (el espesor de la celda en dirección z puede considerarse la unidad.) En una malla escalonada, las variaciones se encuentran definidas en el centro de la celda, mientras que las componentes de velocidad en cada dirección, correspondientes a la celda, se encuentran desplazadas a las caras de la celda.

En la **Figura 3.2**, se muestra la notación de la celda y de sus vecinas. Dada una celda P , sus vecinas se nombrarán según las iniciales de los puntos cardinales (en inglés) en las direcciones “ x ” e “ y ”, así como “*Low*” y “*High*” en la dirección z . Las caras de la celda se nombran con la misma nomenclatura, pero con letras minúsculas. A su vez, el tiempo también se discretiza. Las celdas en la dirección temporal se llaman intervalos temporales. La celda P en el paso temporal se nota como T .

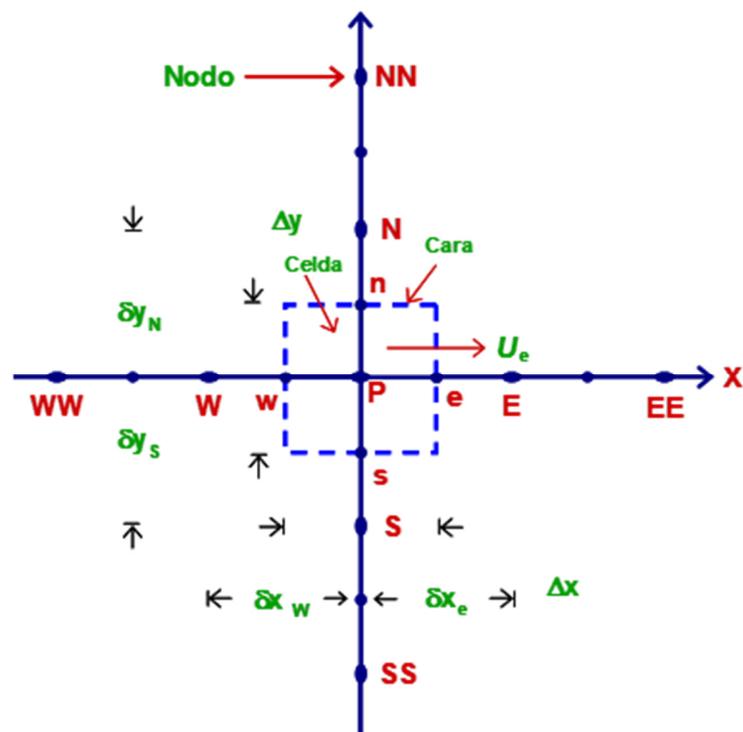


Figura 3.2. Diagrama esquemático de un volumen de control bidimensional

A continuación, se presentan los términos de la ecuación discretizada (3.2).

Definiendo tres expresiones mediante los símbolos F , D , y Pe como:

$$F = \bar{\rho} \tilde{v}_i, \quad D = \frac{\Gamma}{\delta_i}, \quad Pe = \frac{F}{D} \quad (3.5)$$

Donde v_i es la velocidad en la cara i , δ_i es la distancia entre los nodos que incluyen la cara i y Pe es de número de Peclet, que es una relación entre la convección y la difusión. Las expresiones para F y D representan el efecto de los términos convectivo y difusivo, respectivamente, de la ecuación de transporte (3.1).

Los coeficientes a_i de la ecuación (3.2) son:

$$a_i = D_i f(|Pe|_i) + \max(-F_i, 0) \quad (3.6)$$

Los valores F y D en la cara de la celda de la ecuación (3.6) son:

$$F_i = (\bar{\rho} \tilde{v})_i \Delta_i \quad D_i = \frac{\Gamma_i \Delta_i}{(\delta_i)}, \quad i=n, s, e, w \quad (3.7)$$

donde Δ_i es la longitud de la cara i .

Para determinar F_i se necesita conocer $\bar{\rho}$ y \tilde{u}_i en la cara de la celda. El cálculo del término convectivo de la ecuación de transporte (3.1) requiere también el conocimiento de la variable escalar, $\tilde{\phi}$, en la cara de la celda. La velocidad \tilde{v}_i está calculada en la cara de la malla escalonada; pero $\bar{\rho}$ y $\tilde{\phi}$ están calculados en el nodo y necesitan ser interpolados a la cara para calcular los coeficientes a_i de la ecuación discretizada (3.2).

La obtención de estas variables en la cara de la celda es importante para la precisión y convergencia de la solución. El cálculo de $\bar{\rho}$ y $\tilde{\phi}$ da lugar a los llamados esquemas de discretización. La función $f(|Pe|)$ de la ecuación (3.6) depende del esquema de interpolación; por ejemplo, en el esquema de diferencias desplazadas, $f(|Pe|) = 1$. Para el sistema híbrido [1]:

$$f(|Pe|) = \max(0.1 - 0.5|Pe|) \quad (3.8)$$

En el **Apéndice** se presentan estos esquemas de discretización lineales con más detalle, ya que se utilizarán en esta tesis en la discretización del término convectivo de las ecuaciones de cantidad movimiento y modelo de turbulencia

El coeficiente para el término transitorio es:

$$a_T = \frac{\bar{\rho}_T \Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (3.9)$$

Para el cálculo del término D_i (3.7) se necesita obtener el coeficiente de difusión, Γ , en la cara de la celda. El coeficiente Γ no es necesariamente una constante, probablemente puede ser función de valores variables que se conocen en los nodos (por ejemplo, la temperatura) y por tanto es necesario interpolarlo en la cara. Esta interpolación puede ser aritmética o armónica. Como ejemplo, para la cara e, estas interpolaciones son:

$$\Gamma_e = \frac{\Delta x (\Gamma_P + \Gamma_E)}{2\delta_{X_e}} \quad \Gamma_e = \frac{2\delta_{X_e}}{\Delta x \left(\frac{1}{\Gamma_P} + \frac{1}{\Gamma_E} \right)} \quad (3.10)$$

El término fuente de la ecuación general (3.1), \bar{S}_ϕ , se linealiza como:

$$\bar{S}_\phi = \bar{S}_{\phi,c} \bar{S}_{\phi,v} \tilde{\phi}_P \quad (3.11)$$

donde el término $\bar{S}_{\phi,c}$ se elige de acuerdo a la relación existente entre \bar{S}_ϕ y $\tilde{\phi}$, en caso de depender el primero del segundo. El objetivo de la linealización del término fuente es mejorar la convergencia de la solución.

Con esta suposición, los términos B y a_p de la ecuación (3.2) son:

$$B = \bar{S}_{\phi,c} \Delta x \Delta y + a_T \tilde{\phi}_T \quad (3.12)$$

$$a_p = a_e + a_w + a_n + a_s + a_T - \bar{S}_{\phi,v} \Delta x \Delta y \quad (3.13)$$

La ecuación (3.2) se aplica en cada celda del dominio, para cada $\bar{\phi}$ y para cada paso temporal Δt , por lo que se tiene un sistema de ecuaciones lineales (los coeficientes a pueden depender, directa o indirectamente de $\bar{\phi}$, por lo que el sistema es realmente pseudo-lineal). Para resolver este sistema de ecuaciones se puede utilizar cualquier método de resolución de ecuaciones lineales.

En el cálculo de las velocidades a partir de las ecuaciones de cantidad de movimiento, se tiene el inconveniente de que la presión, cuyo gradiente aparece como término fuente en las ecuaciones de cantidad de movimiento, no tiene una ecuación propia para calcularla. Una solución ampliamente utilizada, es transformar la ecuación de continuidad en una ecuación para la presión.

Entre los algoritmos iterativos que se basan en este procedimiento, están los de la familia SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure- Linked Equations), ([9], [10] y [11]). El algoritmo utilizado en esta tesis para resolver el problema de acoplamiento velocidad-presión pertenece a esta familia.

El proceso de solución de este sistema de ecuaciones es iterativo y durante éste, las ecuaciones del sistema, en general, no se cumplen; el balance entre la parte izquierda y derecha de la ecuación se denomina residuo. La convergencia del proceso iterativo se da cuando los residuos disminuyen.

Para procurar acelerar esta convergencia, se utiliza un método de relajación de algunas de las variables dependientes y propiedades. Se emplean dos tipos de relajación: la inercial y la lineal. La relajación inercial se emplea para las velocidades y los parámetros de turbulencia, y aumenta la diagonal de la matriz de coeficientes el agregar a la ecuación de cualquier variable $\tilde{\phi}$, el término fuente:

$$\bar{S}_{\phi,r} = \frac{\bar{\rho}V_P}{\Delta t_f} (\tilde{\phi}_P^{(n-1)} - \tilde{\phi}_P^{(n)}) \quad (3.14)$$

donde V_P es el volumen de la celda P, Δt_f es el intervalo de tiempo falso y el superíndice n se refiere al número de iteración.

[9]. Hailing Wu, Diana Ma, Massoud Kaviany. Peripheral fins for blockage robustness. International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 2514–2520.

[10]. Zhengguo Zhang, Dabin Ma, Xiaoming Fang y Xuenong Gao. Experimental and numerical heat transfer in a helically baffled heat exchanger combined with one three-dimensional finned tube. Chemical Engineering and Processing 47 (2008) 1738–1743.

[11]. V. Ganapathy. Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design Applications and Calculations, Marcel Dekker, New York, 2003.

Para la presión y la densidad se emplea la relajación lineal dada por:

$$\tilde{\phi}_P^{(n)} = \alpha \tilde{\phi}_P^{sol} + (1 - \alpha) \tilde{\phi}_P^{(n-1)} \quad (3.15)$$

donde α es el factor de relajación, el superíndice “sol” se refiere al valor de la propiedad proporcionado por el “solver” en la iteración actual. El factor de relajación α , normalmente toma valores entre 0 y 1.

El criterio de convergencia utilizado para detener el proceso iterativo para un paso temporal dado y pasar al siguiente es tal que, para cada variable, la suma de los valores absolutos de los residuos en todo el dominio sea menor que un determinado porcentaje de un valor de referencia.

En este trabajo, se usa el código de Dinámica de Fluidos Computacional Ansys Fluent [12], para resolver las ecuaciones que describen la aerodinámica del flujo sobre el automóvil (Audi R8), recordando que son, la de continuidad, de cantidad de movimiento, y de turbulencia.

[12]. <https://forum.ansys.com>

CAPÍTULO 4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

Para el caso de estudio del presente trabajo se eligió un automóvil deportivo Audi R8® como modelo base para poder examinar la aerodinámica del coche en términos de fuerza de arrastre, sustentación y lateral, así como sus respectivos coeficientes. Después, una superficie es agregada para estudiar efecto que tiene este componente sobre las características aerodinámicas del mismo, antes mencionadas. En este caso, la superficie añadida es el llamado alerón, que se colocó en la parte trasera del automóvil. Adicionalmente, se varió el número de Reynolds (Re) del flujo y en el ala centrípeta se inclinó el alerón lateralmente para analizar su impacto en los parámetros aerodinámicos.

4.1 Configuración a simular, caso base.

El dibujo exterior del Audi R8® se muestra en la **Figura 4.1**, así como las dimensiones [13].

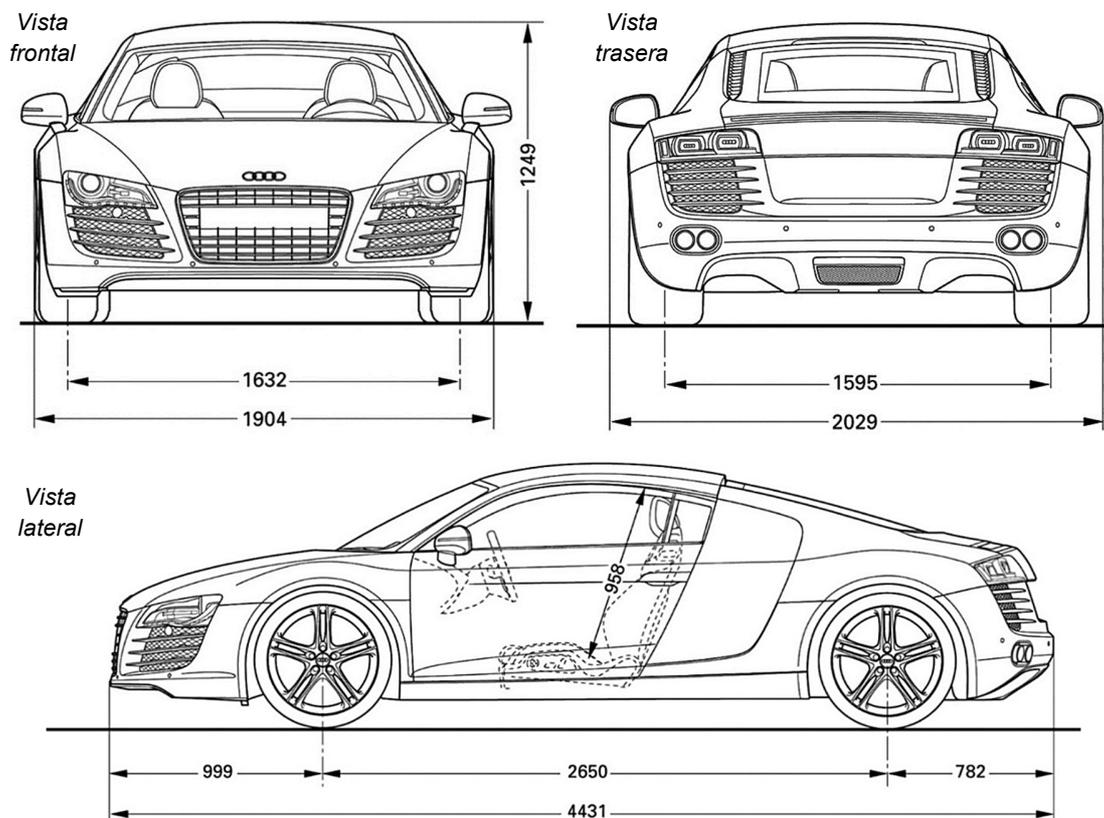


Figura 4.1. Dibujo exterior y dimensiones Audi R8® en mm.

[13]. <https://www.audi.com/en/models/rs-r8/r8.html>
<https://www.audi-mediacycenter.com/en>

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

El modelo base y alerón se desarrollaron con la ayuda de los programas CAD Inventor® y Solidworks®, y se muestran en la **Figura 4.2**.

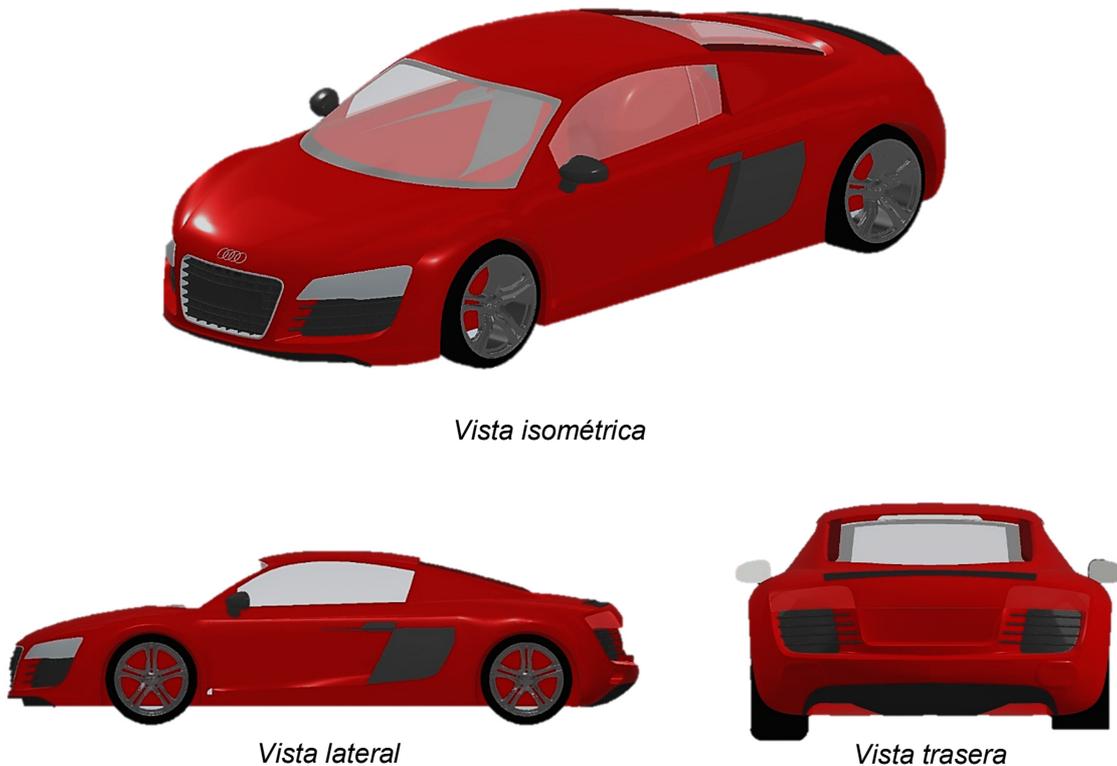


Figura 4.2 Modelo base CAD Audi R8.

Con el modelo base del automóvil (**Figura 4.2**) se realizaron las primeras simulaciones, pero la malla generada resultó muy compleja debido al detalle del modelo, así como la elevación exagerada en el tiempo de cálculo que tomaba la simulación. Por lo tanto, se tuvo la necesidad de remover algunos elementos como faros, parrillas, vidrios y rines, realizando un modelo más simplificado y al mismo tiempo, conservando la esencia de la forma del vehículo. En la **Figura 4.3** se observa el modelo simplificado, el cual se utilizó para poder realizar el análisis de flujo en el código numérico Ansys Fluent-19.

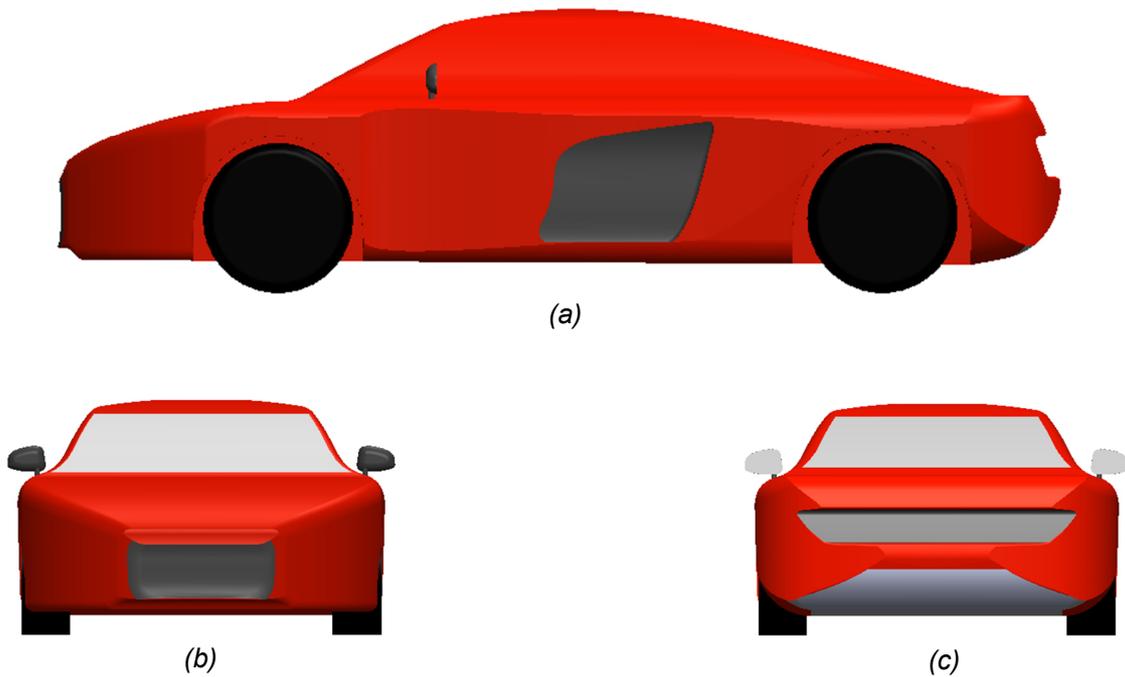


Figura 4.3. Modelo base Audi R8 simplificado. a) Vista lateral, b) Vista frontal, y c) Vista trasera.

4.2 Superficie añadida (Alerón)

El ala o mejor llamado alerón en aeronáutica, es un cuerpo cuyo propósito es hacer que el aire recorra una mayor distancia en uno de sus bordes provocando un aumento de velocidad y por tanto una caída de presión como lo establece la ecuación de Bernoulli. Este efecto provoca que en un borde exista una mayor presión que en su contrario, generando un efecto llamado sustentación. **Figura 4.4.**

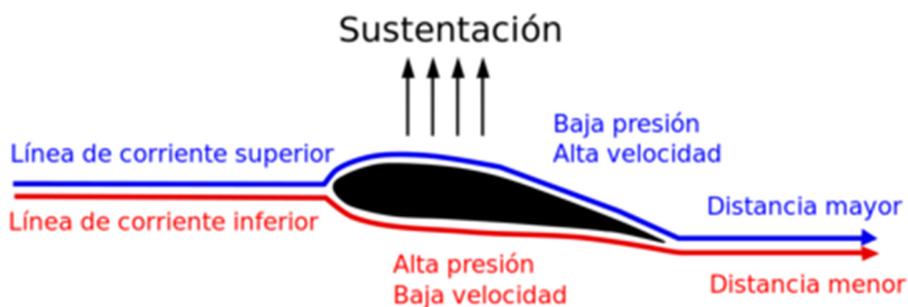


Figura 4.4. Flujo de aire sobre ala.
Fuente: [Xataka.com](https://www.xataka.com) [14]

[14]. <https://www.xataka.com/vehiculos/2020-todavia-no-entendemos-todo-queaviones-se-mantienen-en-aire>

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

En aeronáutica este efecto permite que un avión pueda elevarse y volar por los aires, en el automovilismo esta geometría se gira 180° sobre su eje de dirección del flujo, generando el mismo efecto, pero en dirección contraria, provocando como efecto la llamada carga aerodinámica o downforce. Como consecuencia de esto, el automóvil puede tener una mayor adherencia al suelo. **Figura 4.5.**

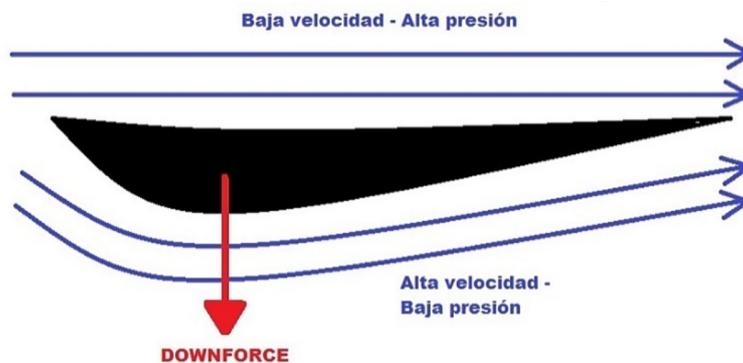


Figura 4.5. Flujo de aire sobre ala invertida.
Fuente: [Wordpress.com](#) [15]

La fuerza de sustentación generada va a depender del ángulo de ataque del ala, cuanto mayor sea el ángulo se puede generar una mayor carga, pero a la vez se incrementa la fuerza de arrastre, por lo que siempre se debe de hacer una relación de estas dos fuerzas para tener el mejor rendimiento del ala.

4.2.1. Diseño de alerón

Revisando la base de datos de perfiles alares NACA ([16], [17] y [18]). Se optó por escoger un perfil alar NACA 6412 como base **Figura 4.6**, debido a que, comparando con otros tipos de perfiles alares, posee una geometría casi simétrica, lo que ayuda a que no exista mucha fuerza de arrastre, adicionalmente posee una buena relación entre su C_D y C_L , motivos por los cuales se optó por este perfil alar.

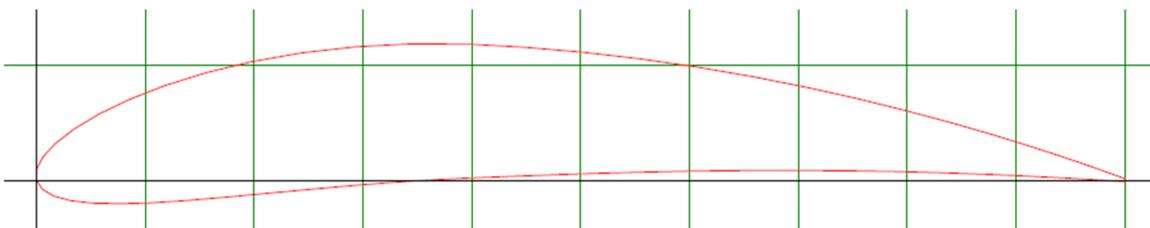


Figura 4.6. Perfil alar NACA 6412.
Fuente: [Airfools.com](#) [18]

[15]. <https://secretosf1.wordpress.com/2010/03/15/los-alerones-principiosbasicos/>
[16]. Ira H. Abbott, Albert E. von Doenhoff, Louis S. "Summary of airfoil data", NASA, 1945.
[17]. <https://www.nasa.gov/image-feature/langley/100/naca-airfoil>
[18]. <http://airfoiltools.com/index>

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

Como se muestra en la **Figura 4.7**. La longitud del alerón es proporcional al ancho del carro 1920[mm], la cuerda del alerón es de 415[mm] correspondiente aproximadamente al 10% de la longitud del carro, valor que se toma ya que corresponde aproximadamente a la mitad de la distancia que existe entre la parte trasera del automóvil y el centro de la rueda trasera. El espesor máximo es de 74.5[mm]. El alerón es curvo y no recto debido a que la parte trasera del automóvil también lo es, esto genera una mejor interacción entre la parte trasera del auto y el alerón.

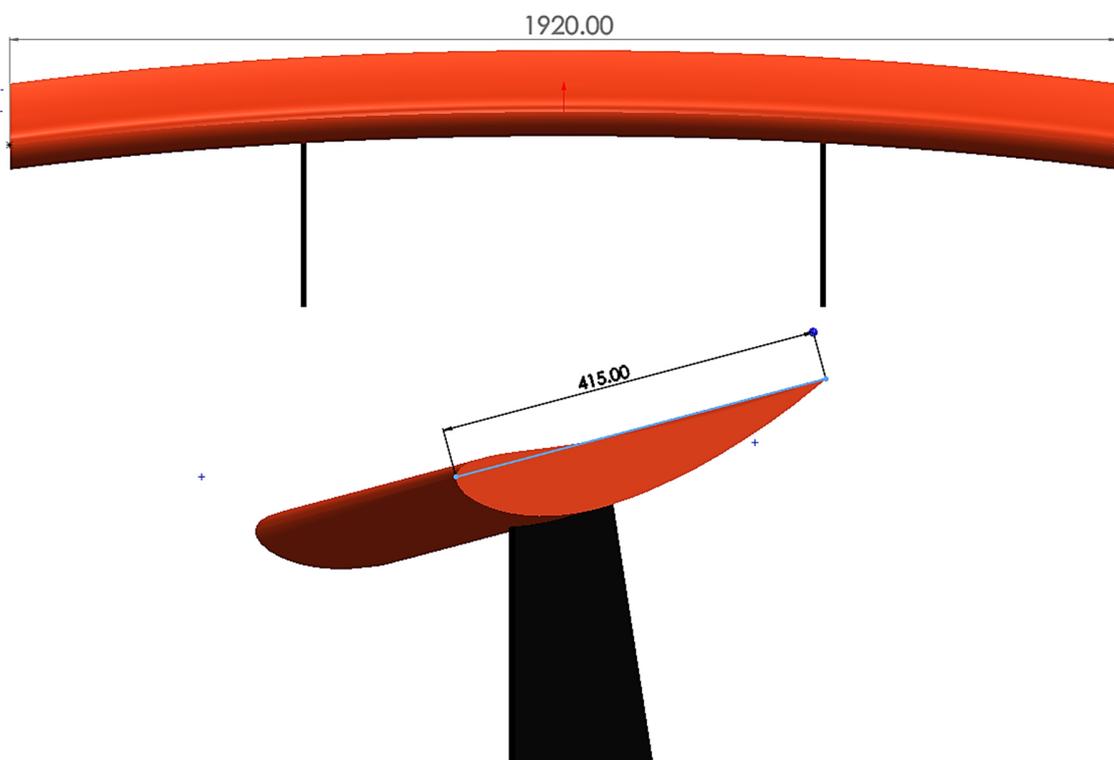


Figura 4.7. Longitud y cuerda del alerón.

Se colocaron endplates en los extremos de este para evitar la formación de vórtices laterales, o en su defecto disminuir el tamaño de estos con la finalidad de tener un flujo más estable sobre la superficie del ala, generando menor turbulencia. Se realizó la simulación y comparación de fuerzas de los 2 casos, con y sin endplate, con la finalidad de analizar si el flujo sobre el alerón resultaba beneficiado o perjudicado. En la **Tabla 4.1**, se aprecian las fuerzas de arrastre y sustentación generadas para diferentes valores de velocidad.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

Tabla 4.1. Fuerzas generadas sobre los 2 tipos de alerón

Velocidad [m/s]	Alerón con endplate		Alerón sin endplate	
	F_D [N]	F_L [N]	F_D [N]	F_L [N]
30	126.78	-784.98	120.89	-636.47
40	158.45	-1185.64	152.59	-992.72
50	185.683	-1748.23	180.101	-1595.54

De acuerdo con la **Tabla 4.1** se puede apreciar que la fuerza de sustentación negativa generada en el alerón con endplates es mayor que la del alerón sin endplates, aunque la fuerza de arrastre es un poco mayor que la resultante en el alerón sin endplates. Sin embargo, esta diferencia es relativamente pequeña, considerando que se busca obtener mayor carga aerodinámica con el menor arrastre posible. La carga aerodinámica obtenida es superior y la fuerza de arrastre es ligeramente mayor, por lo que el alerón con endplates **Figura 4.8** será la configuración elegida.

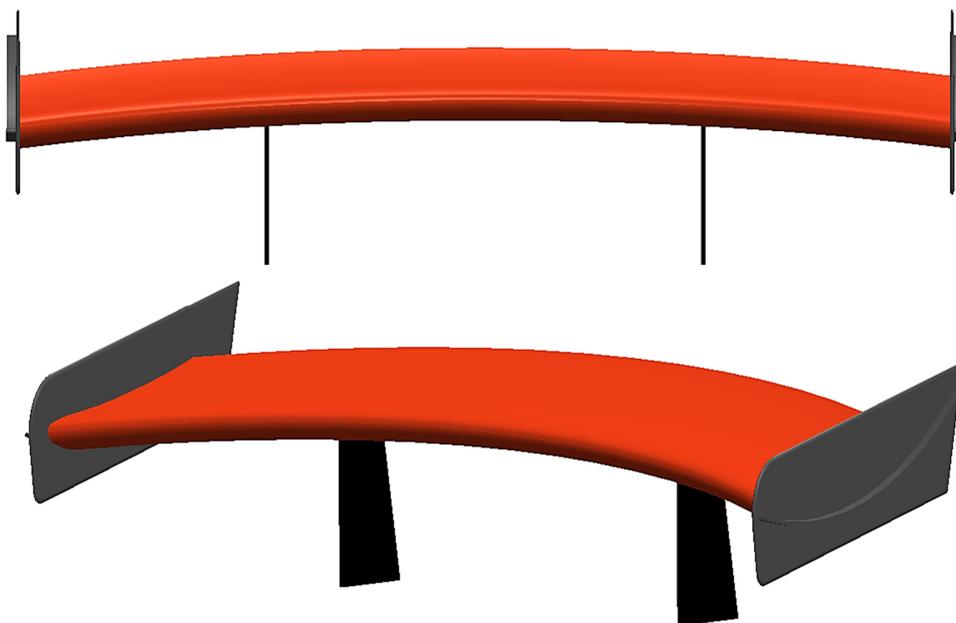


Figura 4.8. Configuración alerón con endplates.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

4.3. Discretización y detalles numéricos

Los cálculos computacionales fueron realizados en 2 estaciones de trabajo de especificaciones:

- Dell XPS, Intel Core I7-4770, 32Gb RAM, 8 procesadores @ (3.4GHz)
- Lenovo, Intel Core I7-8700, 16Gb RAM, 12 procesadores @ (3.20GHz)

Para las simulaciones del caso base y caso con alerón se utilizó un recinto como dominio computacional, de medidas: 17[m] x 5[m] x 5[m]. En este dominio se colocó un cuerpo de influencia de medidas: 8.5[m] x 1.5[m] x 2.5[m]; esto alrededor del automóvil con el fin de obtener mejores resultados de los efectos generados alrededor del automóvil.

Se utilizó un plano de simetría en XY para partir el automóvil por la mitad, el automóvil es simétrico por lo que los resultados obtenidos son los mismos de un lado u otro, esto ayuda significativamente a reducir el número de celdas de la malla, como consecuencia se ahorra memoria computacional y se disminuye el tiempo de simulación. Todo lo antes mencionado se muestra en la **Figura 4.9**.

Para todos los casos se empleó el esquema de turbulencia k- ϵ realizable, y SIMPLEC para el esquema de acoplamiento velocidad-presión. En la discretización espacial se utiliza segundo orden para todos los esquemas. Se realizaron alrededor de 4000 iteraciones para llegar a la convergencia.

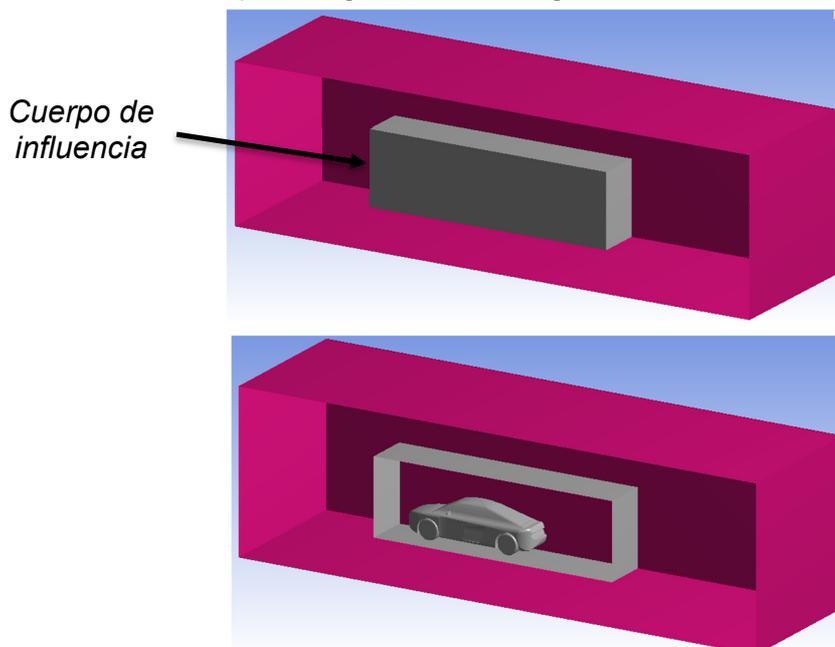


Figura 4.9. Dominio computacional

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

4.3.1 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera utilizadas en los modelos se pueden visualizar en la **Figura 4.10** y fueron las siguientes:

- Entrada del flujo (dirección x) a diferentes velocidades de 15, 35, 45, 60 y 84 m/s, con una TI de 3% y una TVR de 10
- Salida, presión 0 para dirigir el flujo en esa dirección con una TI de 5% y una TVR de 10.
- Cuerpo del automóvil con una condición de no deslizamiento
- Plano de simetría que parte al carro por la mitad
- Condición de simetría con deslizamiento en la pared superior y lateral del dominio, se le dio esta condición con el fin de hacer que estas paredes no afecten al flujo de aire ya que un entorno abierto estas paredes no existen. Fue analizada la distancia de alejamiento para evitar tener un incremento exagerado en el número de celdas del dominio computacional.
- Piso por donde circula el automóvil con condición de no deslizamiento para el caso base de comparación mostrado en la sección 4.4.2. (velocidad del flujo 30 m/s), para las demás simulaciones se utiliza condición de deslizamiento a la misma velocidad de entrada del fluido respectivamente, con la finalidad de imitar el paso del vehículo por una pista.

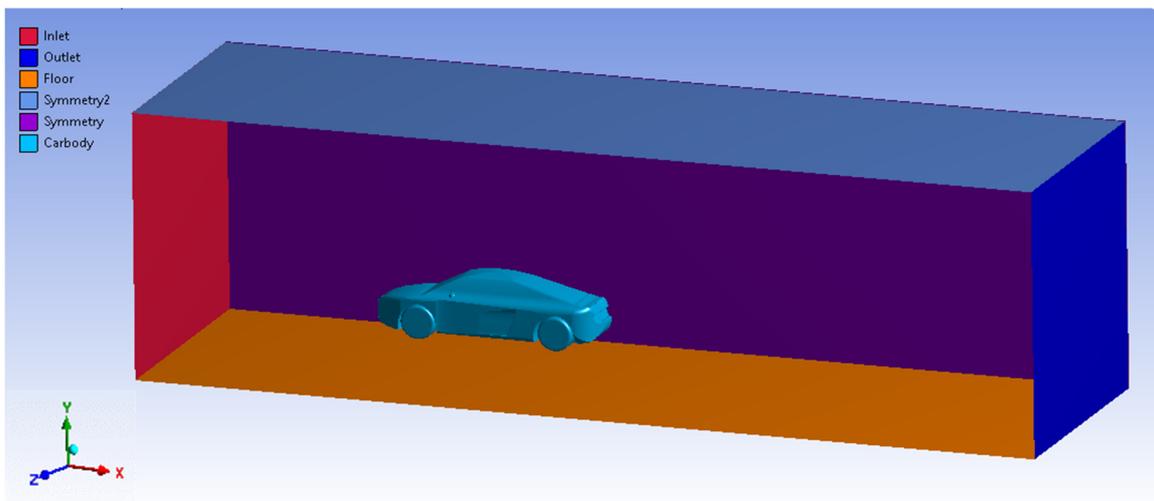


Figura 4.10. Condiciones de frontera y sistema de coordenadas.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

4.3.2 Malla

Se probaron diferentes tamaños de mallas para estudiar la independencia de los resultados con la misma. Se realizaron pruebas para un mismo caso con mallas de 6, 7, 8.8, 9.5 y 10M de celdas; los valores obtenidos son casi idénticos a partir de la malla de 8.8M; difiriendo estos en menos de 1.5%, por lo que se optó por la malla de 8.8M para reducir el tiempo de cálculo, además de que los resultados son relativamente los mismos con respecto a las mallas de 9.5 y 10M. Para el caso del modelo con alerón la malla incremento a 9.2M debido a esta superficie añadida sobre el auto.

En la **Figura 4.11** se puede visualizar la malla principal, tiene un tamaño de elemento de 0.35m, la cual corresponde al recinto que encierra al vehículo. Adicionalmente, se tiene un body sizing sobre el cuerpo de influencia 0.035m, y un body face de 0.012m correspondiente a las caras del automóvil. Se añadió un inflation de 5 capas y un tamaño de 0.272m alrededor del automóvil y el piso para poder visualizar mejor los efectos cerca de estos.

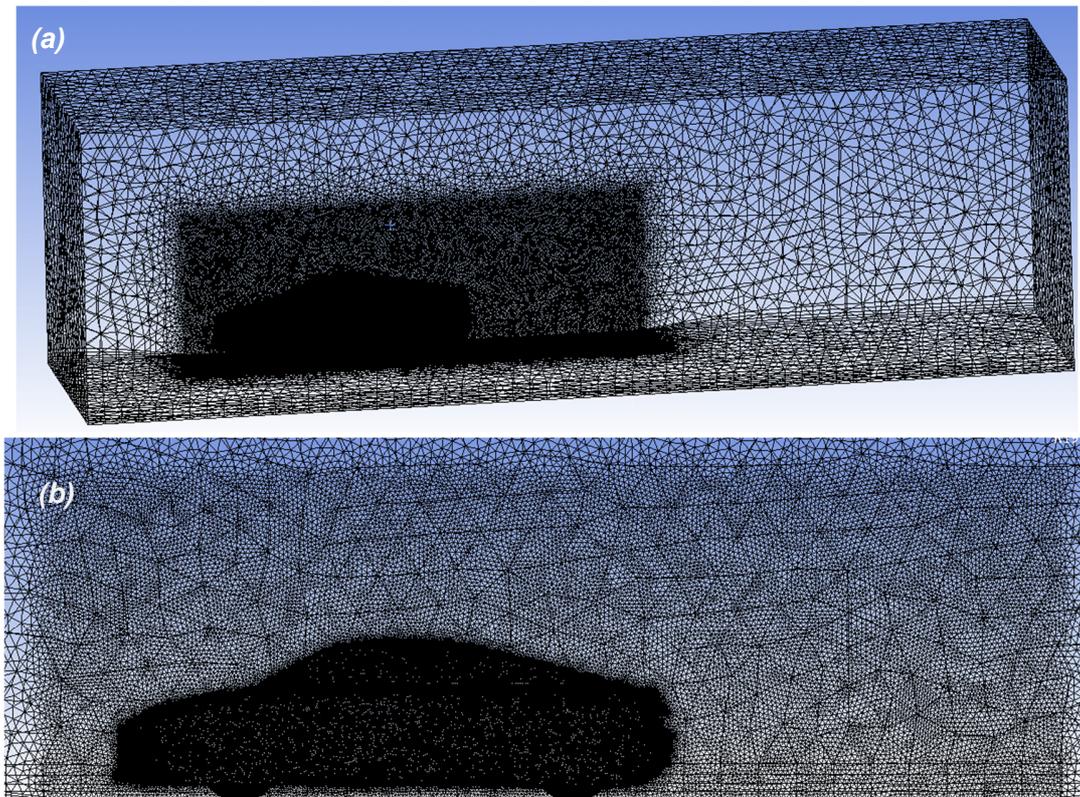


Figura 4.11. Mallado del dominio computacional.
a) Vista tridimensional, y b) Vista en el plano medio.

4.4. Resultados. Caso base sin alerón. $Re= 9.2 \times 10^6$.

Con los datos anteriores y una velocidad en el flujo de 30 m/s se genera un caso base (CB) para presentar el comportamiento del flujo en términos de velocidad, presión y energía cinética turbulenta.

La **Figura 4.12.** presenta el contorno de velocidad del aire en un plano medio del automóvil, cuando éste rodea la superficie del mismo. Conforme el flujo avanza, éste impacta en la parte frontal del vehículo, que produce que el fluido, prácticamente se detenga con una velocidad de casi 0, punto de estancamiento. Después, el flujo avanza y conforme recorre el capó va aumentando su velocidad hasta llegar al parabrisas en donde se vuelve a detener el flujo; volviendo a alcanzar éste una velocidad próxima a cero. La máxima velocidad se alcanza en el techo, para después empezar a disminuir en la parte trasera del vehículo, en donde incluso se forma una zona de recirculación por la separación de la capa límite del flujo en la parte superior de la cajuela. En esta zona se presentan velocidades negativas debido a esta región de recirculación. Adicionalmente en las **Figuras 4.12b. y 4.12c.** se aprecia que se forma una zona conjunta de recirculación, debida a la separación del flujo frontal y lateral. La forma de estas zonas depende del punto de desprendimiento de la capa límite y es una de las principales causas del arrastre generado en el vehículo.

En la **Figura 4.13.** se aprecia el contorno de presión sobre la superficie del vehículo. En el punto de estancamiento del fluido de la parte frontal del automóvil se encuentra la presión máxima. Después, en el parabrisas, debido a las bajas velocidades existentes en esa zona, se vuelve a tener una zona de relativa alta presión. Es en el techo, donde se tiene la zona de menor presión, así como en la parte trasera donde se tiene la región de recirculación; cabe recordar que, en estos casos, la velocidad y la presión tienen comportamientos opuestos. En la región próxima al suelo se tiene una relativa alta presión. La diferencia de presiones (ΔP) que existe entre el suelo y el techo del vehículo es la causante de una fuerza de sustentación que se produce en el automóvil.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

La **Figura 4.14.** muestra la energía cinética turbulenta del flujo alrededor del automóvil. Esta variable permite establecer las zonas donde se tiene turbulencia en el flujo. Nótese que estas fluctuaciones se dan, principalmente, en la zona de recirculación del fluido de la parte posterior del vehículo, que es además, una zona de relativa baja presión. Estas fluctuaciones dependen directamente de la velocidad del fluido u objeto y sobre todo lo perturbado que viaje el flujo. En esta zona de recirculación, las fluctuaciones del flujo son de $\pm 6.5\text{m/s}$.

Los vectores de velocidad en la parte trasera del automóvil son mostrados en la **Figura 4.15.** En esta figura se ilustra el movimiento de la zona de recirculación, así como su interacción con el fluido más alejado. En la parte inferior del vehículo, el fluido presenta una relativa alta velocidad.

Finalmente, en la **Figura 4.16.** se muestran las líneas de trayectoria del flujo. Estas líneas indican el recorrido del fluido y la forma como rodea al vehículo. El flujo se divide hacia la parte superior e inferior del vehículo, así como hacia las partes laterales. En la parte inferior se observa que el flujo rodea las llantas para así salir por la parte trasera del auto. En la parte superior, el fluido rodea toda la superficie del automóvil para después separarse en las partes trasera y lateral. En la parte posterior del vehículo son formadas dos zonas de recirculación que, prácticamente, son del tamaño de la parte posterior del coche.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

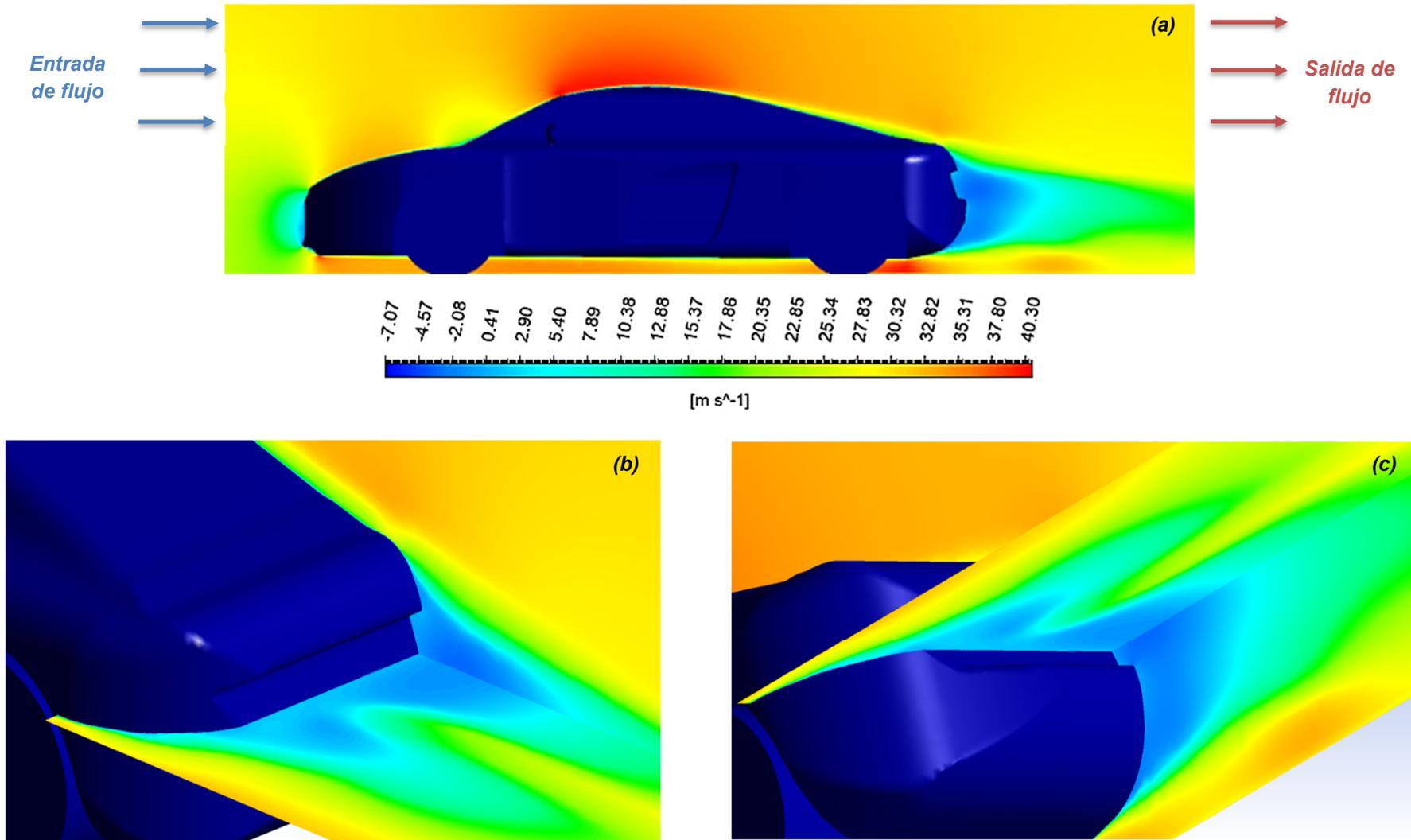


Figura 4.12. Contorno de velocidad.

a) Vista lateral del plano medio, b), y c) Vistas tridimensionales de las zonas de recirculación (parte trasera). $Re=9.2 \times 10^6$. Caso base.

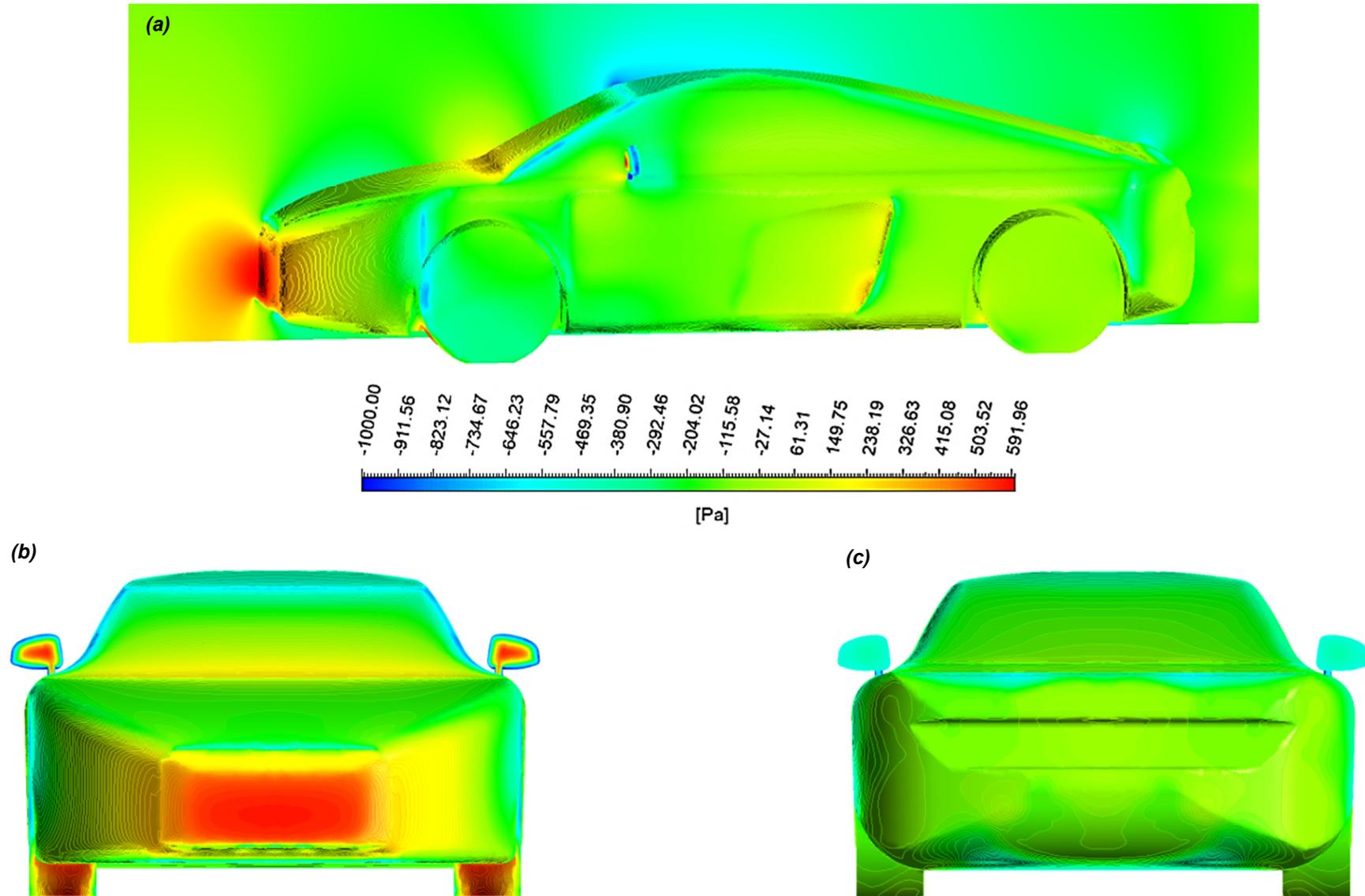


Figura 4.13. Contorno de presión.
a) Vista lateral del plano medio, b) Vista frontal, y c) Vista trasera. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso base.

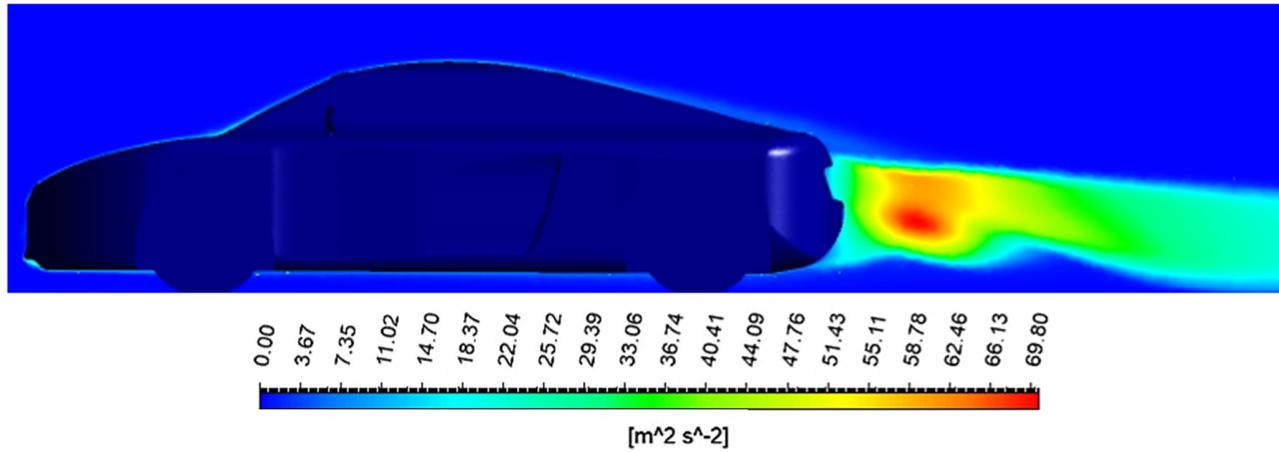


Figura 4.14. Contorno de Energía Cinética Turbulenta. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso base.

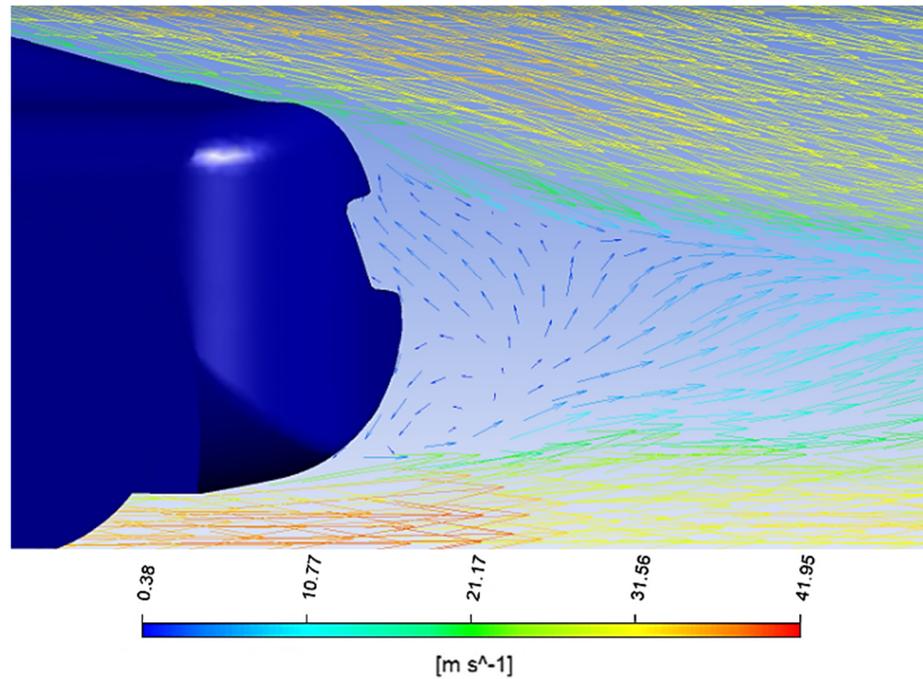


Figura 4.15. Vectores de velocidad. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso base.

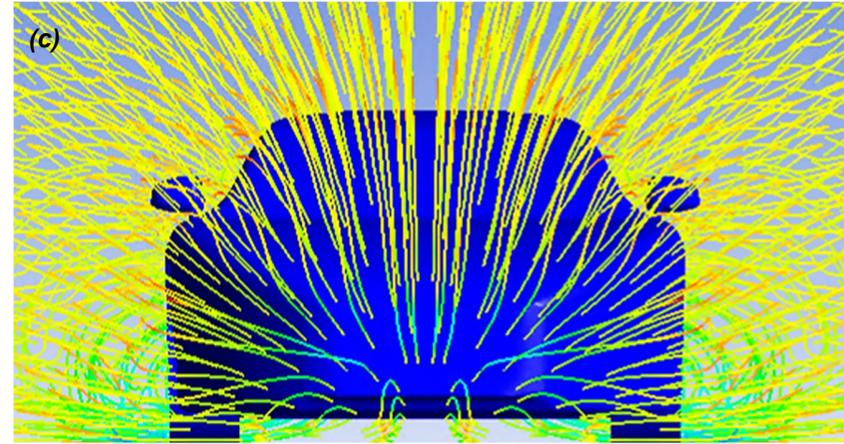
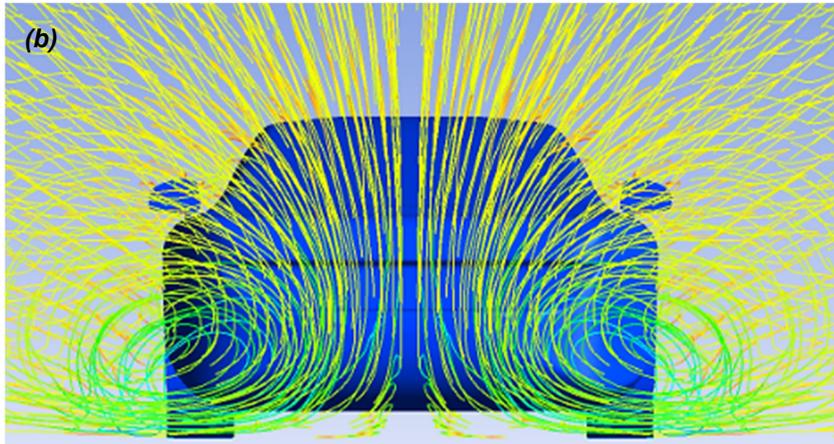
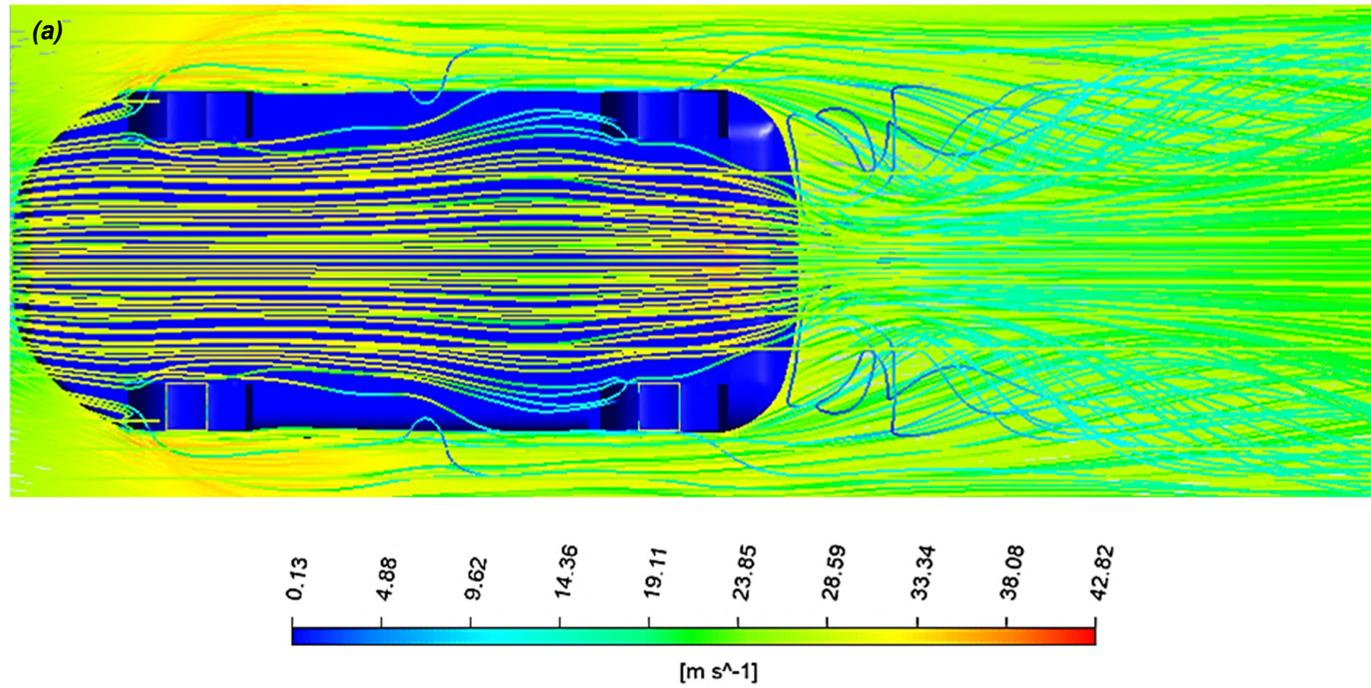


Figura 4.16. Líneas de flujo.
a) Vista inferior, b) Vista trasera, y c) Vista frontal. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso base.

4.4.2. Validación de resultados. Caso base sin alerón.

Para validar el modelo numérico, se hacen comparaciones con datos experimentales y de la literatura abierta. Estos datos están en términos del coeficiente de arrastre, C_D , coeficiente de sustentación, C_L , fuerzas de arrastre, F_D , y sustentación, F_L . También, son comparados de manera cualitativa los contornos de velocidad y presión. Parte de los datos anteriores son tomados de *Muguran et al.* [1].

En la **Tabla 4.2.** se aprecian los diferentes valores de fuerza y coeficientes resultantes de las simulaciones del presente trabajo, así como los de la literatura. De acuerdo con lo anterior, los valores obtenidos en este trabajo de tesis son prácticamente los mismos, con una discrepancia menor al 1% entre ellos. En términos cualitativos y como se muestra en la **Figura 4.17.** los contornos de velocidad predichos en este trabajo y el presentado por Muguran [1] sobre el vehículo en un plano medio tienen el mismo patrón y comportamiento; en la parte trasera del vehículo se presentan múltiples zonas de recirculación. La **Figura 4.18.** presenta el contorno de presión producido por el paso del fluido sobre la superficie predicho por este trabajo y el de Muguran [1]. Al igual que para los contornos de velocidad, los de presión muestran un comportamiento parecido para el techo, parte frontal y trasera del vehículo. Finalmente, la **Figura 4.19.** muestra los campos de vectores de velocidad para ambos casos. El sentido del flujo en ambos campos es muy similar, tanto en valores como en dirección.

Cabe destacar, que existen diferencias mínimas entre ambos trabajos (esta tesis y Muguran [1]). Estas pequeñas discrepancias se deben a varios factores: diferencias en el detalle del modelo del vehículo, número de celdas del mallado, y tamaño del dominio computacional. A pesar de esto, la **Tabla 4.2.** demuestra que estas diferencias son insignificantes, debido a que los resultados obtenidos son prácticamente los mismos, con un error menor al 1%.

[1]. Muguran Thangadurai, Rajesh Kumar, Subhas Chandra Rana, Dipankar Chatterjee, "Aerodynamic Influence of Added Surfaces on the Performance Characteristics of a Sports Car", Springer, June 2019.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

Tabla 4.2. Comparación de resultados con la literatura

Reynolds	Resultados obtenidos				Resultados literatura [1]		
	F_D [N]	F_L [N]	C_D	C_L	C_{Dexp}	C_D	C_L
9.2×10^6	180.05	1129.81	0.327	0.521	0.3391	0.326	0.518

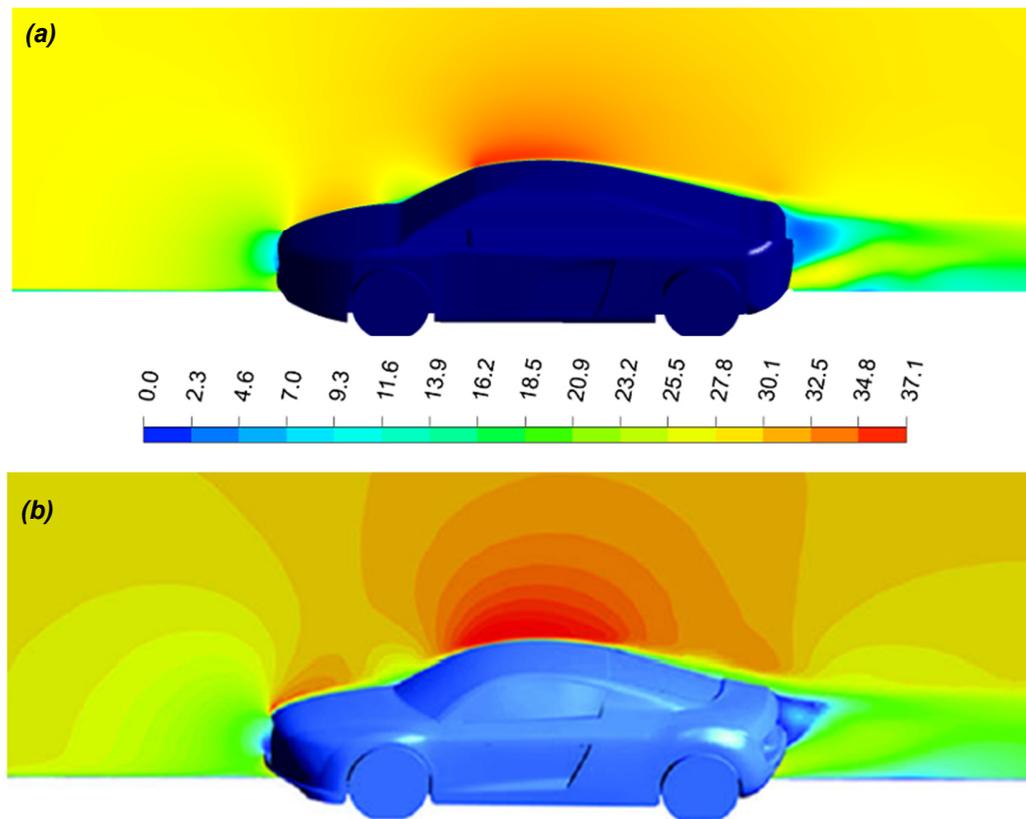


Figura 4.17. Contorno de velocidad. Validación.
a) Presente Tesis, y b) Trabajo Murugan et. al. [1]. $Re = 9.2 \times 10^6$.

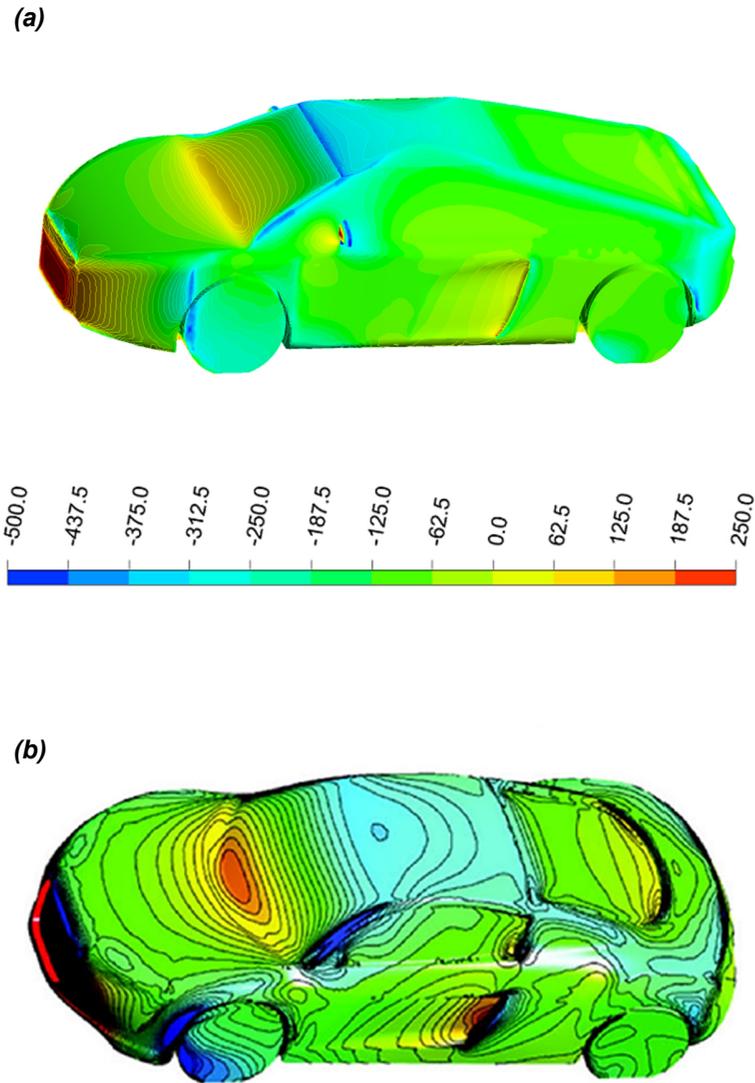


Figura 4.18. Contorno de presión. Validación.
a) Presente Tesis, y b) Trabajo Murugan et. al. [1]. $Re= 9.2 \times 10^6$.

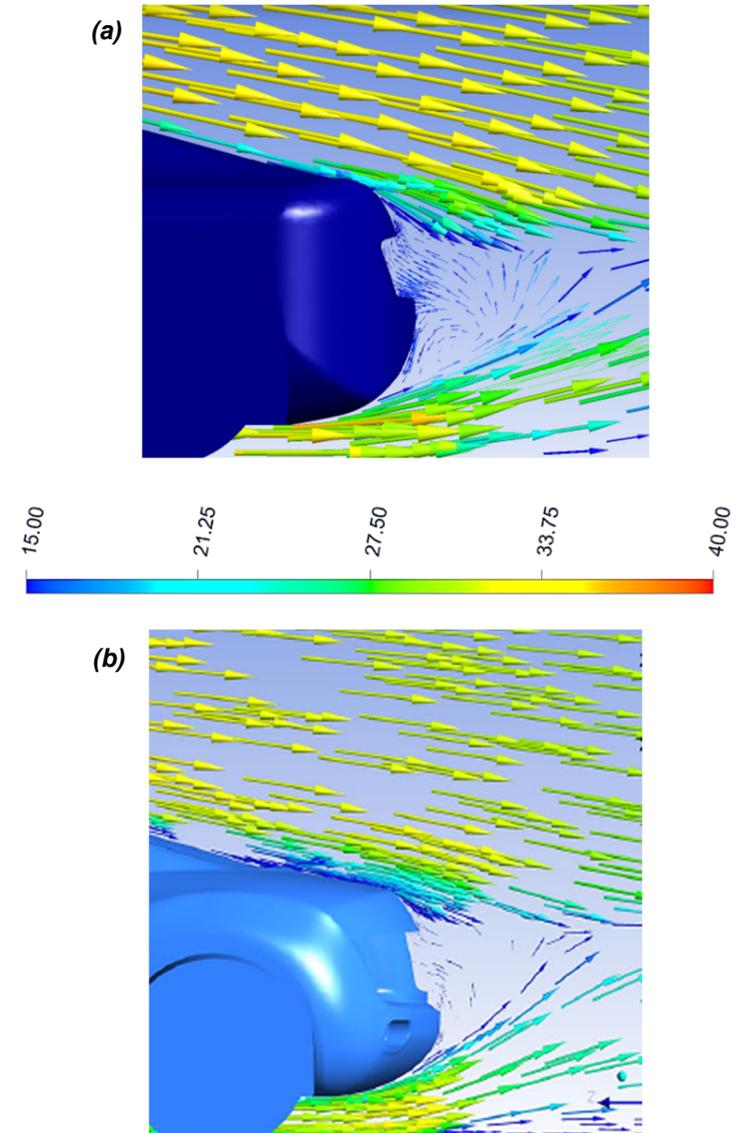


Figura 4.19. Vectores de velocidad. Validación.
a) Presente Tesis, y b) Trabajo Murugan et. al. [1]. $Re= 9.2 \times 10^6$.

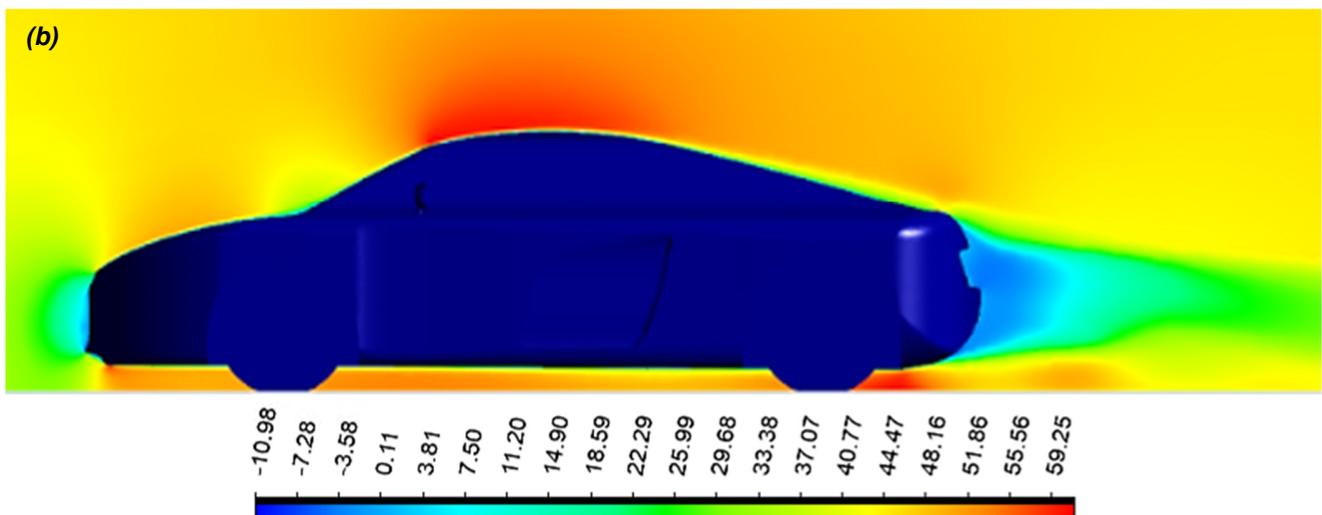
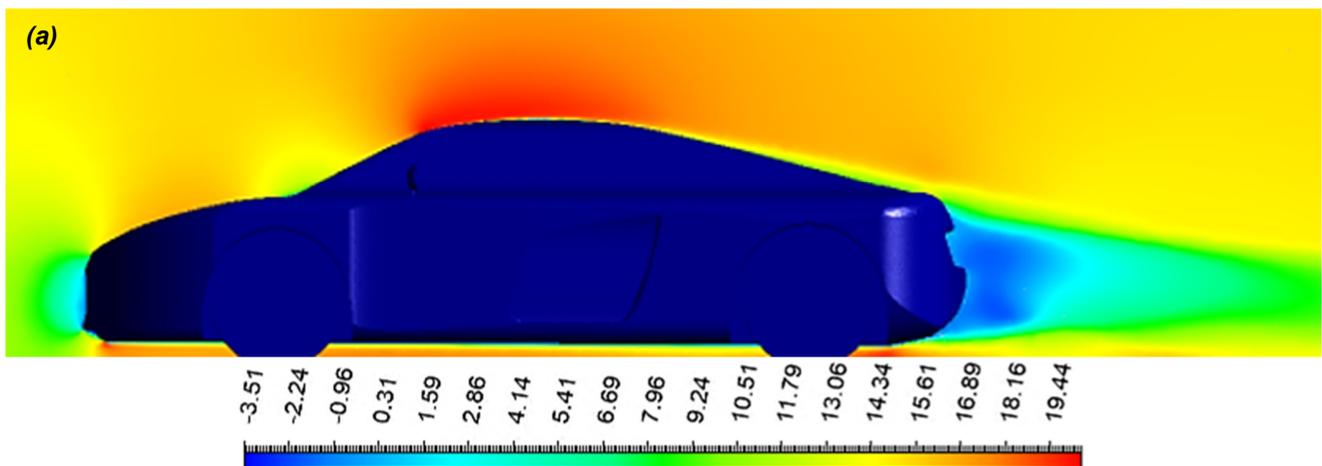
4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

4.4.3. Resultados. Contornos de velocidad y vectores, presión, energía cinética turbulenta y líneas de trayectoria, Variación del número de Re. Casos sin alerón.

Las **Figuras 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 y 4.24**, muestran los diferentes contornos de velocidad y presión, así como los vectores de velocidad y líneas de flujo, resultado de la variación del número de Reynolds. En la **Tabla 4.3**, se muestra el número de Reynolds con su correspondiente valor de la velocidad del flujo. En las figuras se observa un comportamiento muy similar, la diferencia radica en la zona de recirculación, donde se aprecia que dependiendo del número de Re, esta tiende a reducir o incrementar su tamaño.

Tabla 4.3. Re con su respectiva velocidad del flujo

Re ($\times 10^6$)	4.6	9.2	13.9	18.5	25.9
u [m/s]	15	30	45	60	84



4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

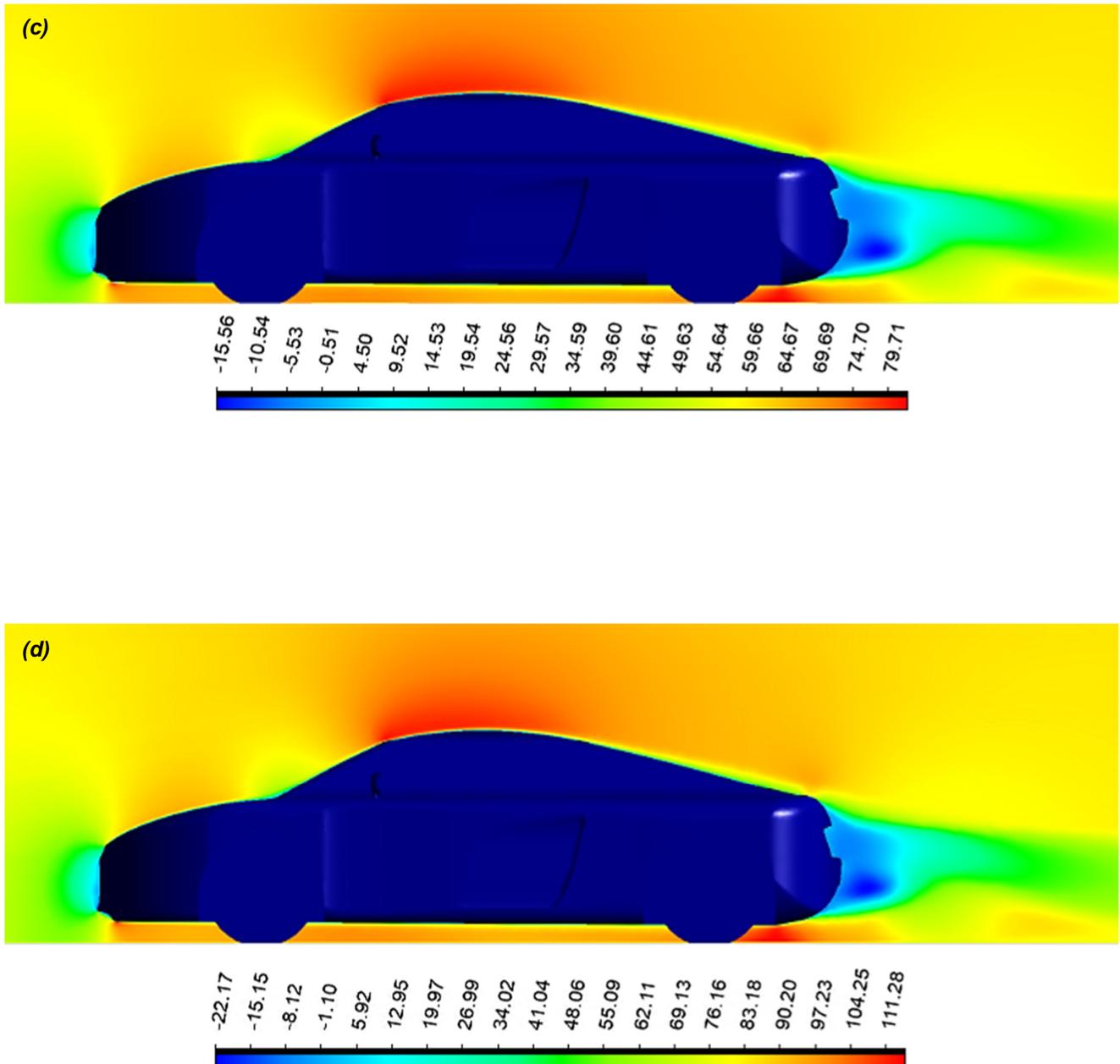
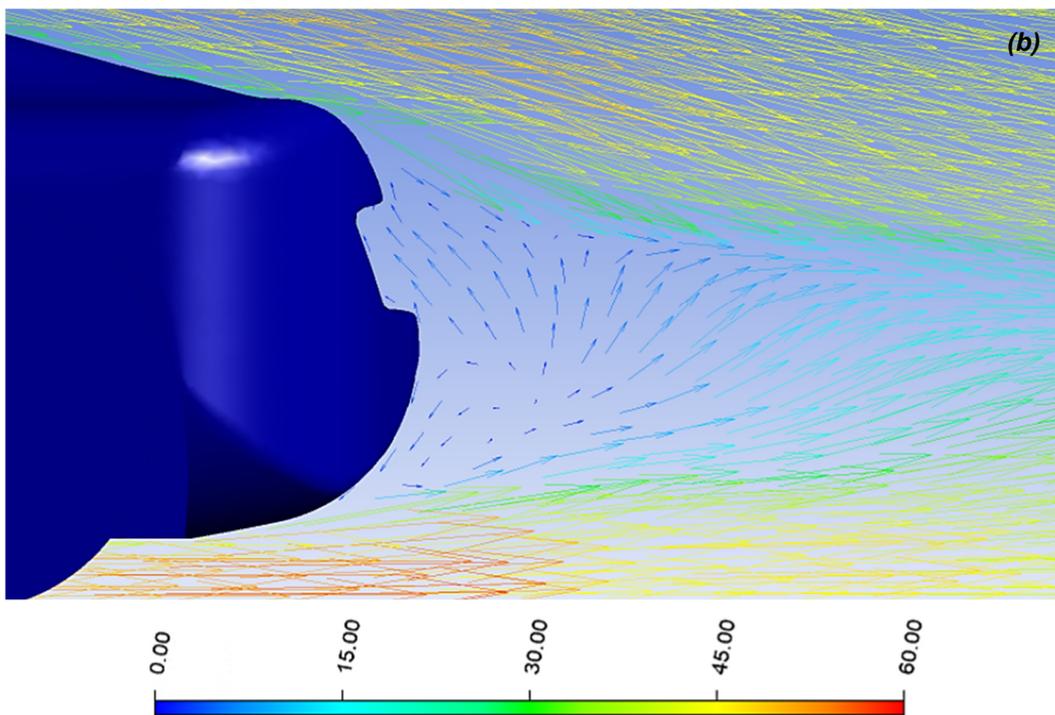
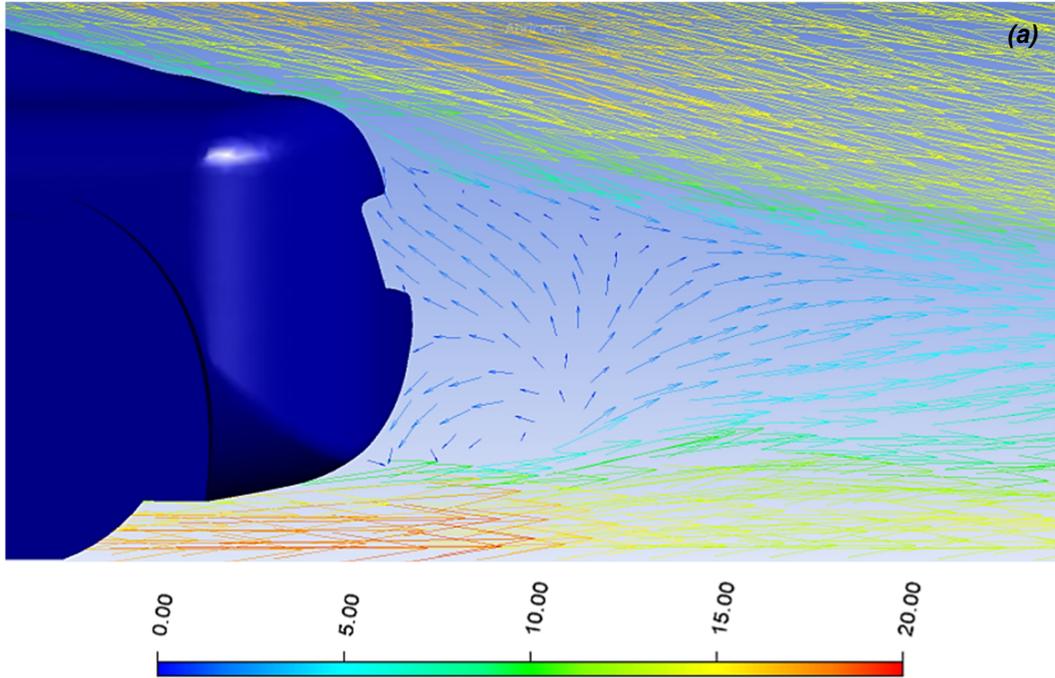


Figura 4.20. Contornos de velocidad.

a) $Re=4.6 \times 10^6$, b) $Re=13.9 \times 10^6$, c) $Re=18.5 \times 10^6$, y d) $Re=25.9 \times 10^6$. Caso Base.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO



4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

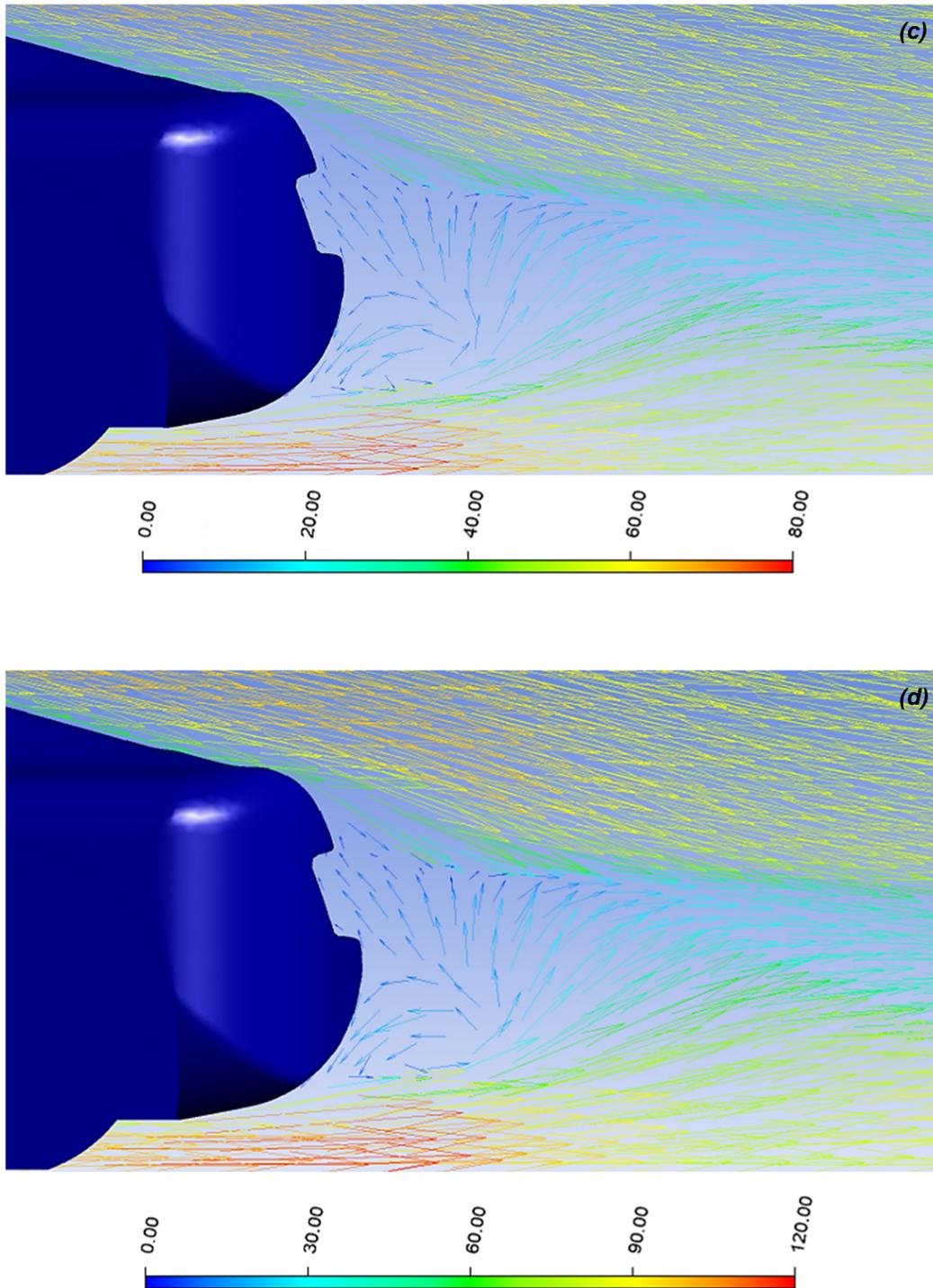


Figura 4.21. Vectores de velocidad.
a) $Re = 4.6 \times 10^6$, b) $Re = 13.9 \times 10^6$, c) $Re = 18.5 \times 10^6$, y d) $Re = 25.9 \times 10^6$. Caso Base.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

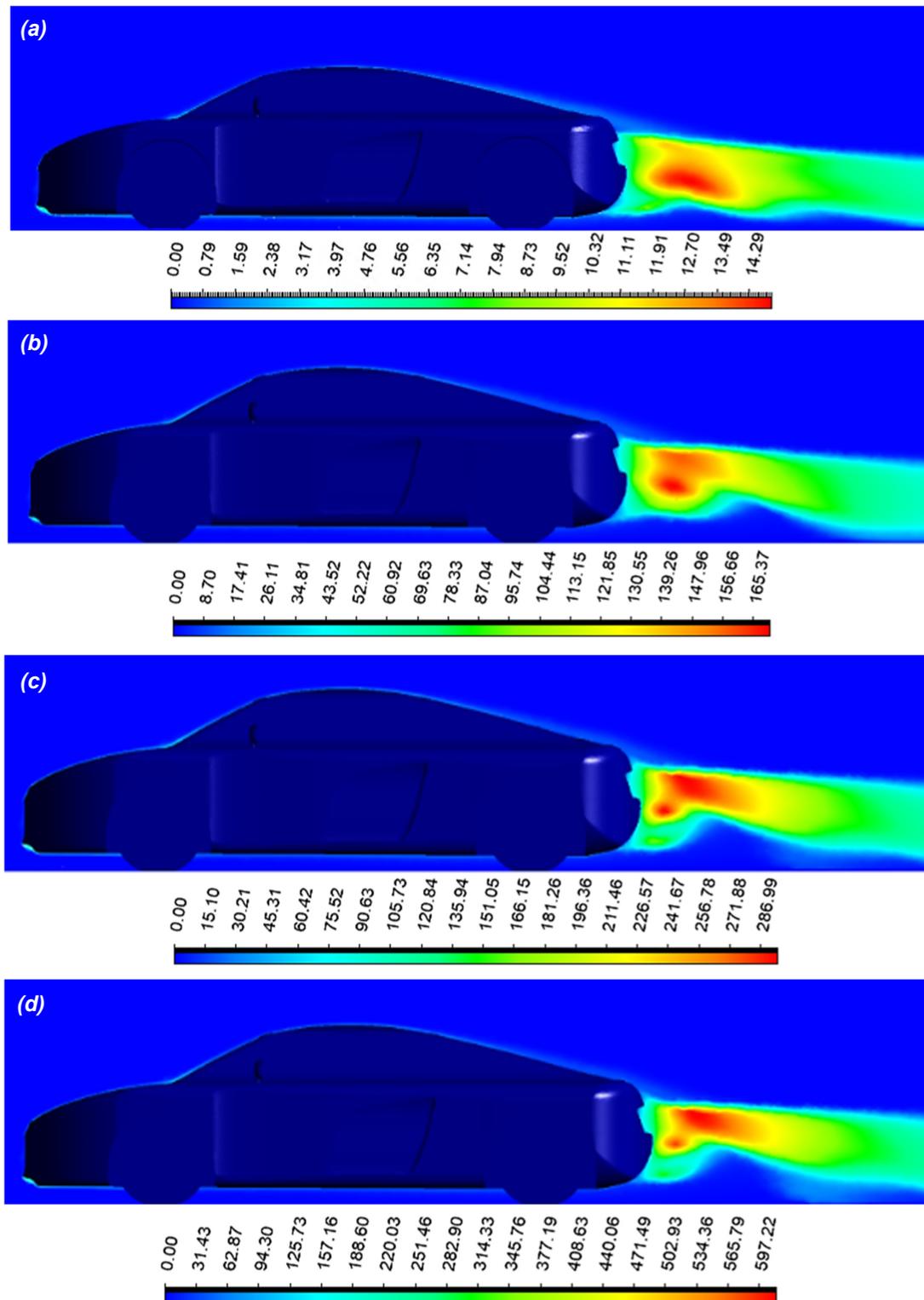


Figura 4.22. Contornos de Energía Cinética Turbulenta.

a) $Re=4.6 \times 10^6$, b) $Re=13.9 \times 10^6$, c) $Re=18.5 \times 10^6$, y d) $Re=25.9 \times 10^6$. Caso Base.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

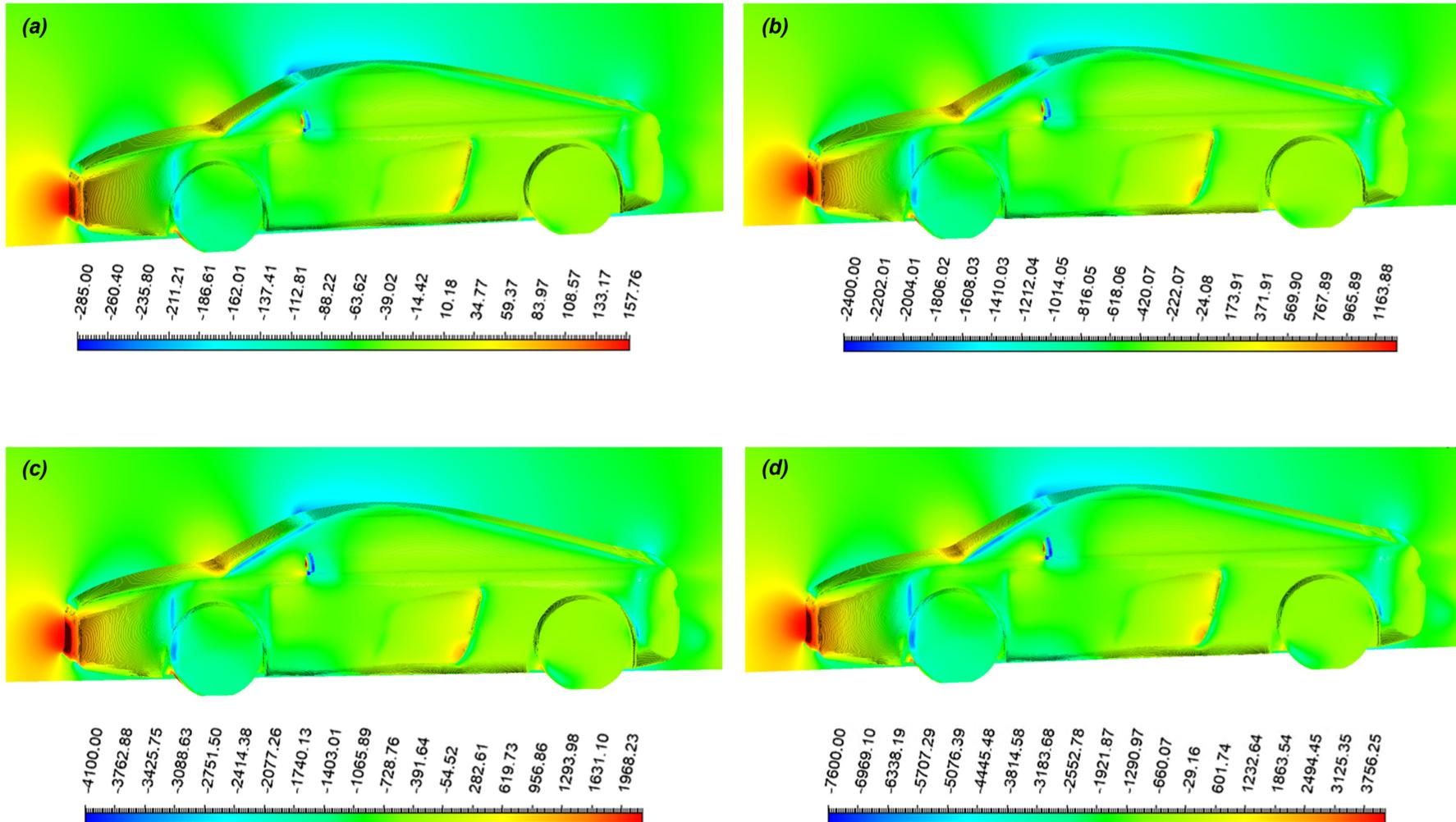
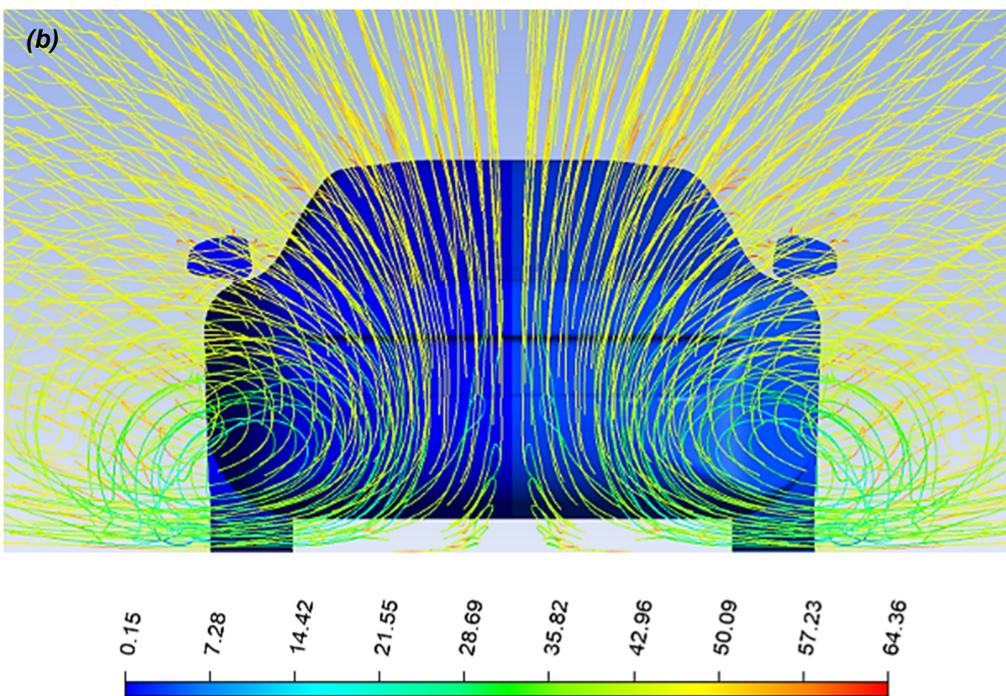
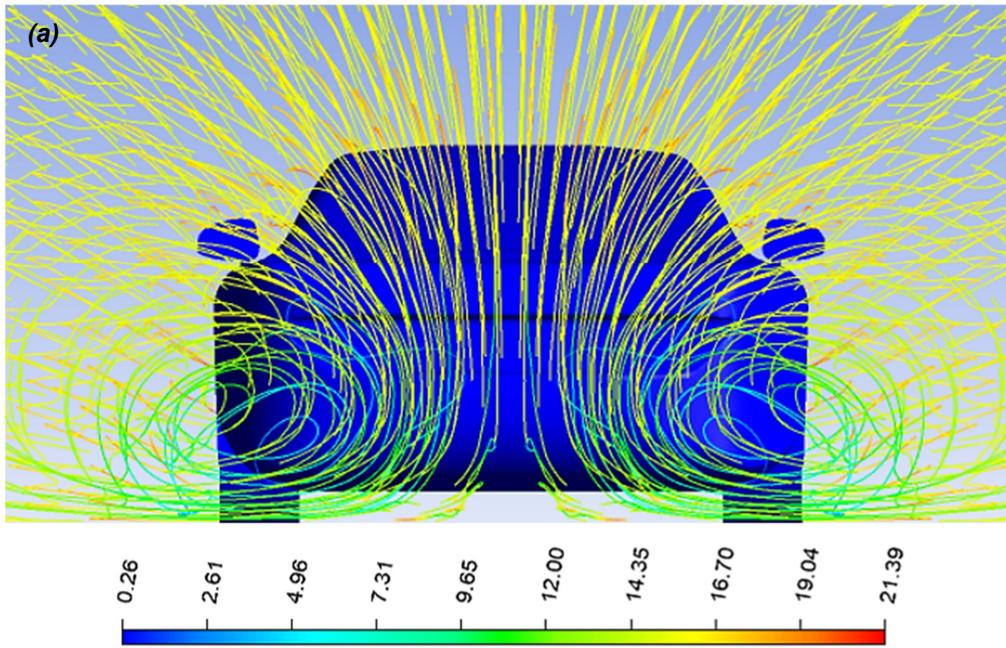


Figura 4.23. Contornos de presión.

a) $Re = 4.6 \times 10^6$, b) $Re = 13.9 \times 10^6$, c) $Re = 18.5 \times 10^6$, y d) $Re = 25.9 \times 10^6$. Caso Base.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO



4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

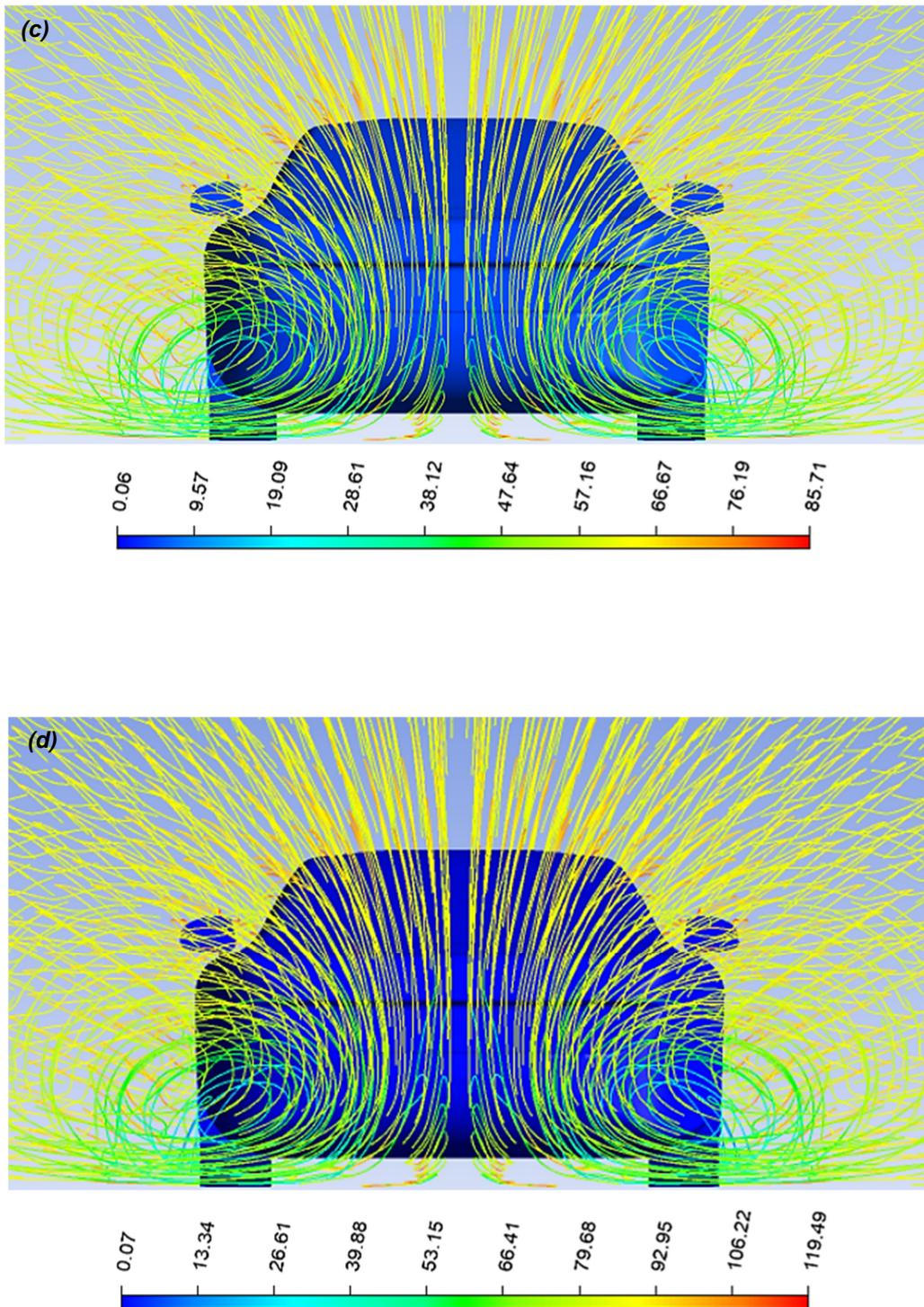


Figura 4.24. Líneas de flujo.

a) $Re=4.6 \times 10^6$, b) $Re=13.9 \times 10^6$, c) $Re=18.5 \times 10^6$, y d) $Re=25.9 \times 10^6$. Caso Base.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

4.4.4. Resultados. Fuerzas resultantes y sus coeficientes. Variación del número de Re. Caso base sin alerón.

La **Tabla 4.4** muestra las fuerzas generadas sobre el vehículo, así como sus respectivos coeficientes, resultado de las simulaciones para el caso sin alerón y el flujo con diferentes valores en el número de Re. Para este caso, se tiene que:

$$A_{Px} = 1 [m^2]$$
$$A_{Py} = 3.95[m^2]$$

Tabla 4.4. Fuerzas y coeficientes obtenidos caso base

Re (x10 ⁶)	F _D [N]	F _L [N]	C _D $C_D = \frac{2F_D}{\rho u^2 A_{Px}}$	C _L $C_L = \frac{2F_L}{\rho u^2 A_{Py}}$
4.6	45.12	279.74	0.328	0.516
9.2	180.05	1129.81	0.327	0.521
13.9	401.08	2528.44	0.324	0.518
18.5	721.43	4502.90	0.328	0.519
25.9	1419.81	8893.74	0.331	0.523

La **Figura 4.25** muestra las fuerzas de arrastre (F_D) y de sustentación (F_L) obtenidas para el presente caso, se logra apreciar que ambas fuerzas incrementan conforme el número de Re aumenta. Los coeficientes de arrastre (C_D) y de sustentación (C_L) se indican en la **Figura 4.26**, donde se aprecia que para un número de Re bajo C_D decrece mientras C_L aumenta, sin embargo cuando se incrementa el número de Re a un valor de aproximadamente 17x10⁶, ambos coeficientes comienzan a incrementar. Por lo tanto al tener una mayor velocidad en el flujo o una mayor velocidad en el vehículo, estas fuerzas de arrastre y sustentación incrementan.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

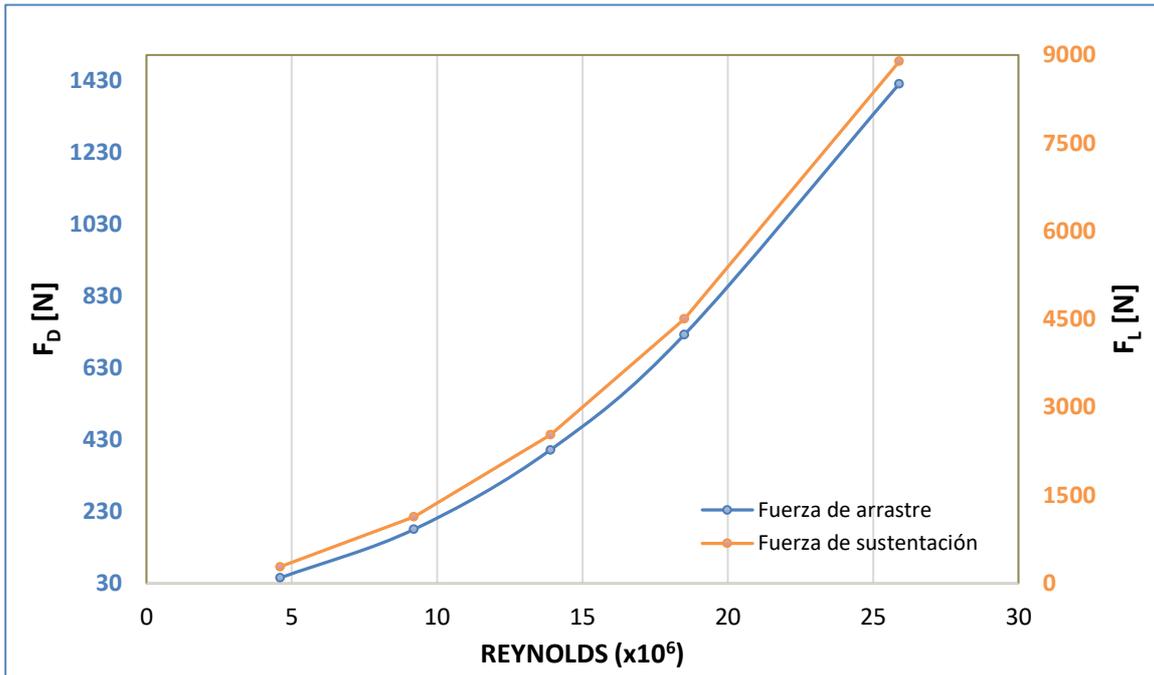


Figura 4.25. Fuerzas generadas sobre el vehículo. Caso Base.

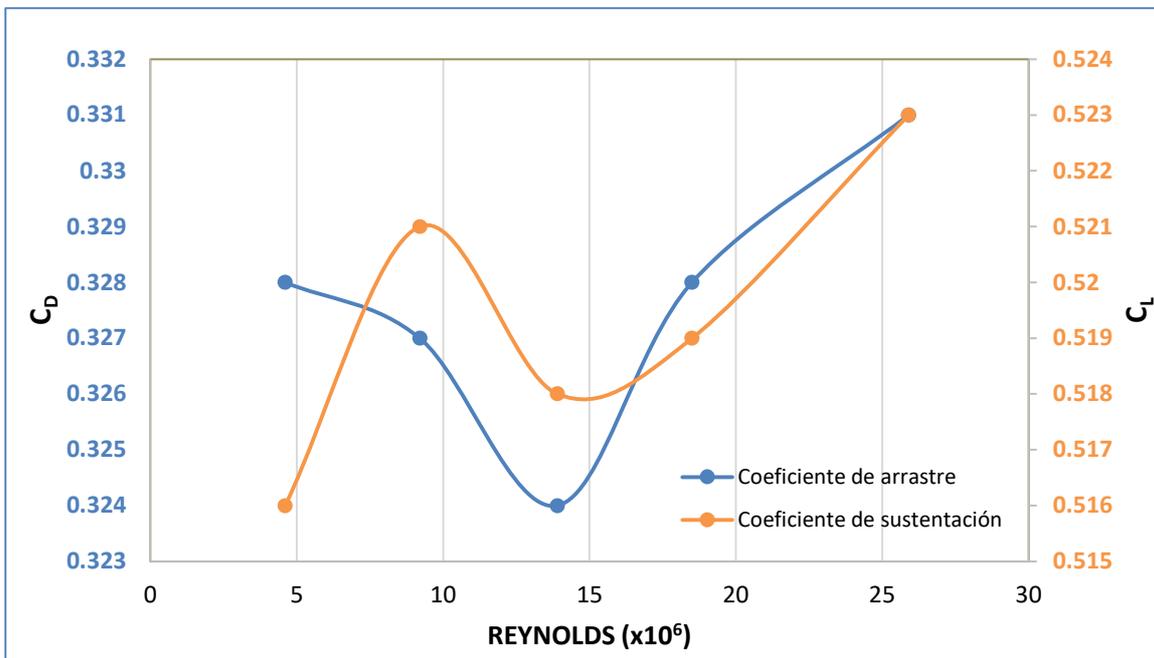


Figura 4.26. Coeficientes de arrastre y sustentación del vehículo. Caso Base.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

4.5. Caso con alerón (CA)

La **Figura 4.27.** se muestra la configuración del modelo con la superficie añadida (alerón), la cual se menciona en la sección 4.2.1.

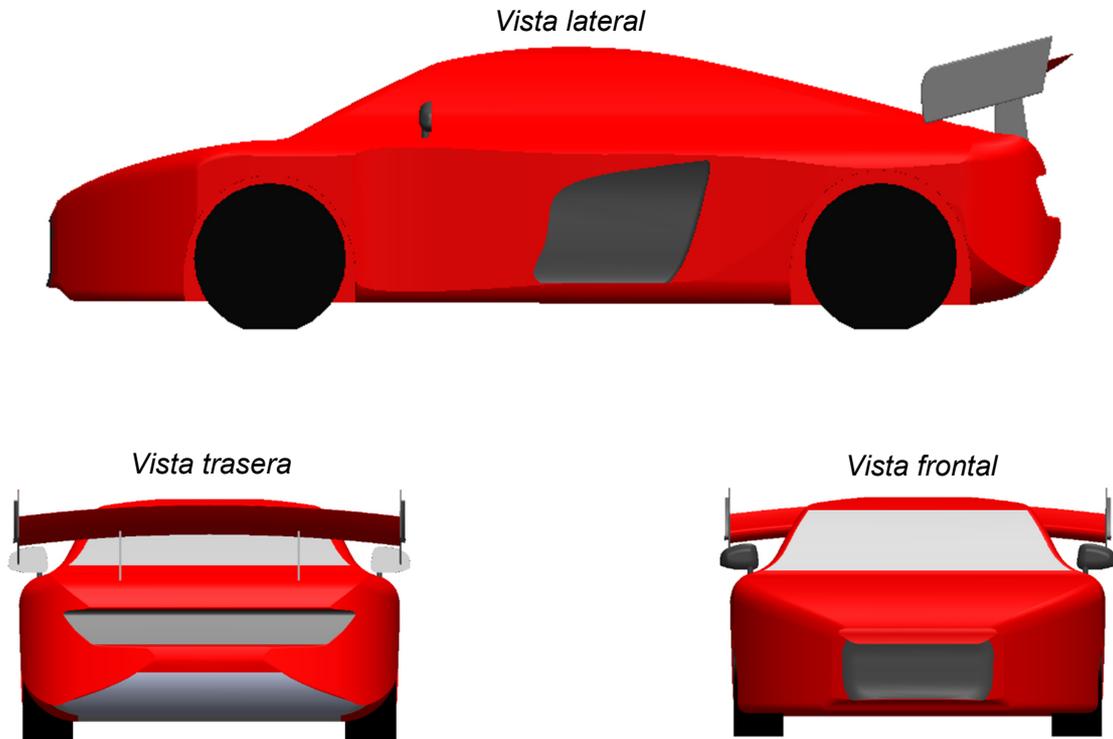


Figura 4.27. Modelo Audi R8 con alerón

4.5.1. Resultados. Caso base con alerón. $Re= 9.2 \times 10^6$.

Para el caso con la superficie añadida, alerón (caso alerón, CA), al igual que con el caso sin alerón, se establece y se simula un llamado caso base, que tiene una velocidad en el flujo de 30 m/s. El ángulo de ataque del ala corresponde a 13° . A continuación, se presentan los contornos de velocidad, presión y energía cinética turbulenta.

En la **Figura 4.28.** se presenta el contorno de velocidad del aire. En la parte de enfrente, el patrón del flujo es muy parecido al del caso base sin alerón. Las diferencias están en la parte posterior del automóvil, el alerón produce una zona de recirculación adicional, justo detrás del mismo. El flujo en la parte trasera del automóvil, atrás del maletero, tiende a subirse hacia la zona de recirculación

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

generada por el alerón; esto se debe al efecto Coandă [19] que se produce por el chorro generado debajo del alerón. El flujo pegado al piso, también se ve afectado por este fluido que se acelera en la superficie inferior del alerón.

El contorno de presión del flujo en un plano medio se muestra en la **Figura 4.29**. Este contorno es similar al resultante para el caso base sin alerón, con excepción de la parte trasera del automóvil, consecuencia de la interacción del flujo con el alerón. En la parte superior del alerón se tiene una zona de alta presión, debido a la posición de éste con respecto al flujo, mientras que en su parte inferior se tiene una zona una de baja presión (**Figura 4.29a**), debido a la aceleración del flujo en la parte de abajo del ala, provocando en esta región un decremento en la presión demuestra lo anterior. Cuanto mayor sea el ΔP entre estas dos regiones (parte superior e inferior del ala), la fuerza de sustentación (que puede ser negativa) se incrementa. En el presente trabajo, la configuración del ala genera una fuerza de sustentación negativa (carga aerodinámica) en el vehículo, mejorando la tracción del vehículo adhiriéndolo al suelo. La carga puede incrementarse si se varía el ángulo del ala, pero como consecuencia el arrastre puede aumentar significativamente.

Figura 4.30. muestra la energía cinética turbulenta. Al igual que con los contornos anteriores, la diferencia con el caso base sin alerón radica en la parte posterior del coche, en donde las fluctuaciones del flujo son mayores que para ese caso hasta en 30%. La estela producida detrás del vehículo es de un tamaño mayor que para el caso sin alerón, alcanzando una altura mayor a la posición del alerón. En esta zona de recirculación, las fluctuaciones del flujo son de $\pm 7.65\text{m/s}$.

Los vectores de velocidad en la parte trasera del automóvil se muestran en la **Figura 4.31**. La estela provocada por el alerón posee una menor altura que la que se presenta detrás del maletero del auto, aunque su longitud es mayor, a causa de la aceleración del flujo que se presenta debajo del ala. También, el flujo junto al suelo, se ve afectado por el flujo que se acelera debajo del alerón.

[19]. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/coandaeffect>

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

Finalmente, la **Figura 4.32**. muestra las líneas de trayectoria del flujo. Al igual que en el caso base sin alerón, el flujo se divide hacia la parte inferior, superior y lateral del vehículo. Adicionalmente, el flujo superior del automóvil se divide hacia la parte superior e inferior del alerón. Cuando el flujo de aire atraviesa el alerón genera dos vórtices en sus extremos, los endplates del alerón ayudan a que los vórtices sean de una menor dimensión. Como producto del desprendimiento de la capa límite del flujo, en la parte trasera del automóvil, se forman 6 zonas de recirculación: dos de mayor tamaño en la zona superior, dos de menor tamaño en la zona inferior y dos en la zona central.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

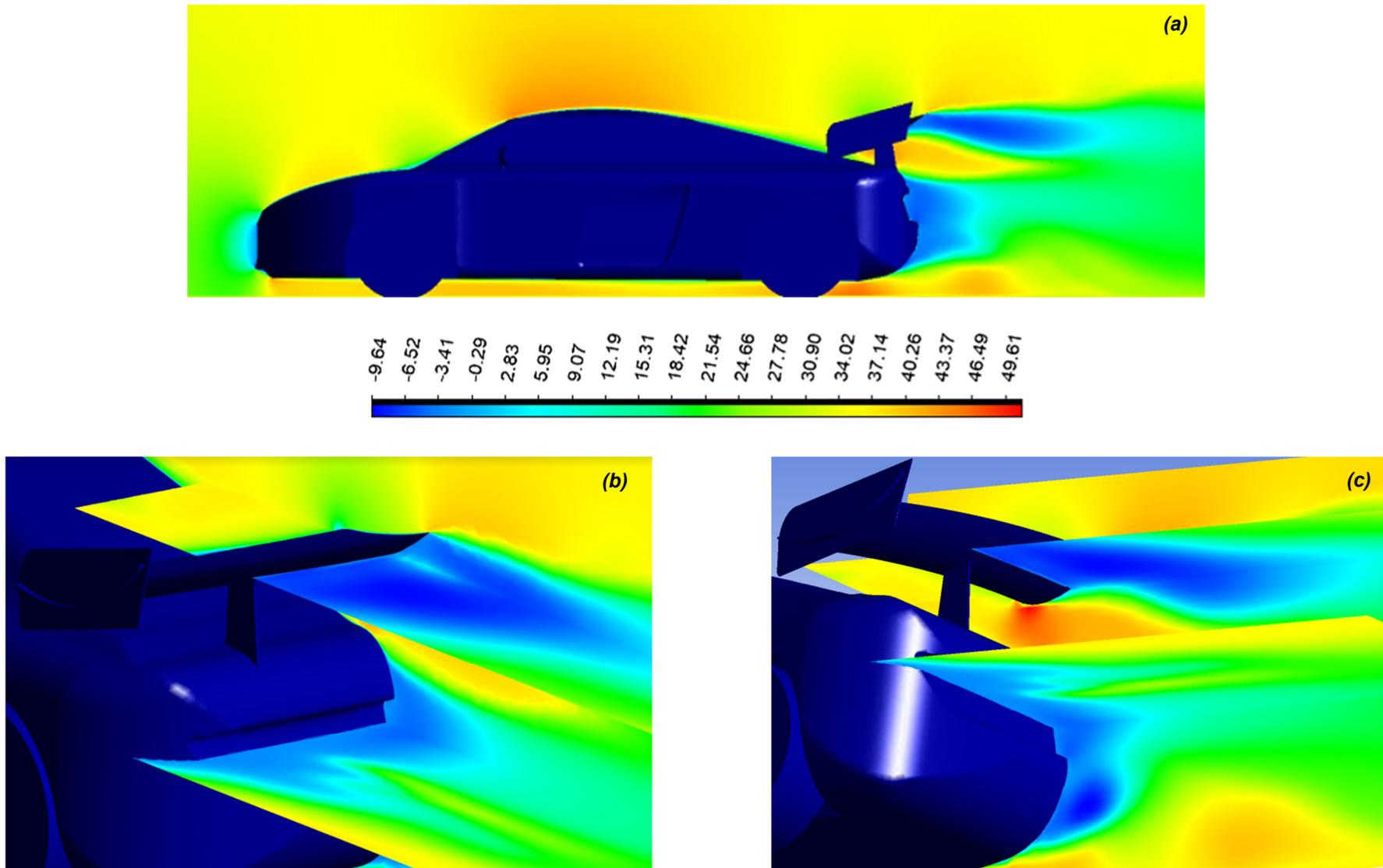


Figura 4.28. Contorno de velocidad.

a) Vista lateral del plano medio, b) y c) Vistas tridimensionales de las zonas de recirculación (parte trasera). $Re=9.2 \times 10^6$. Caso con alerón.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

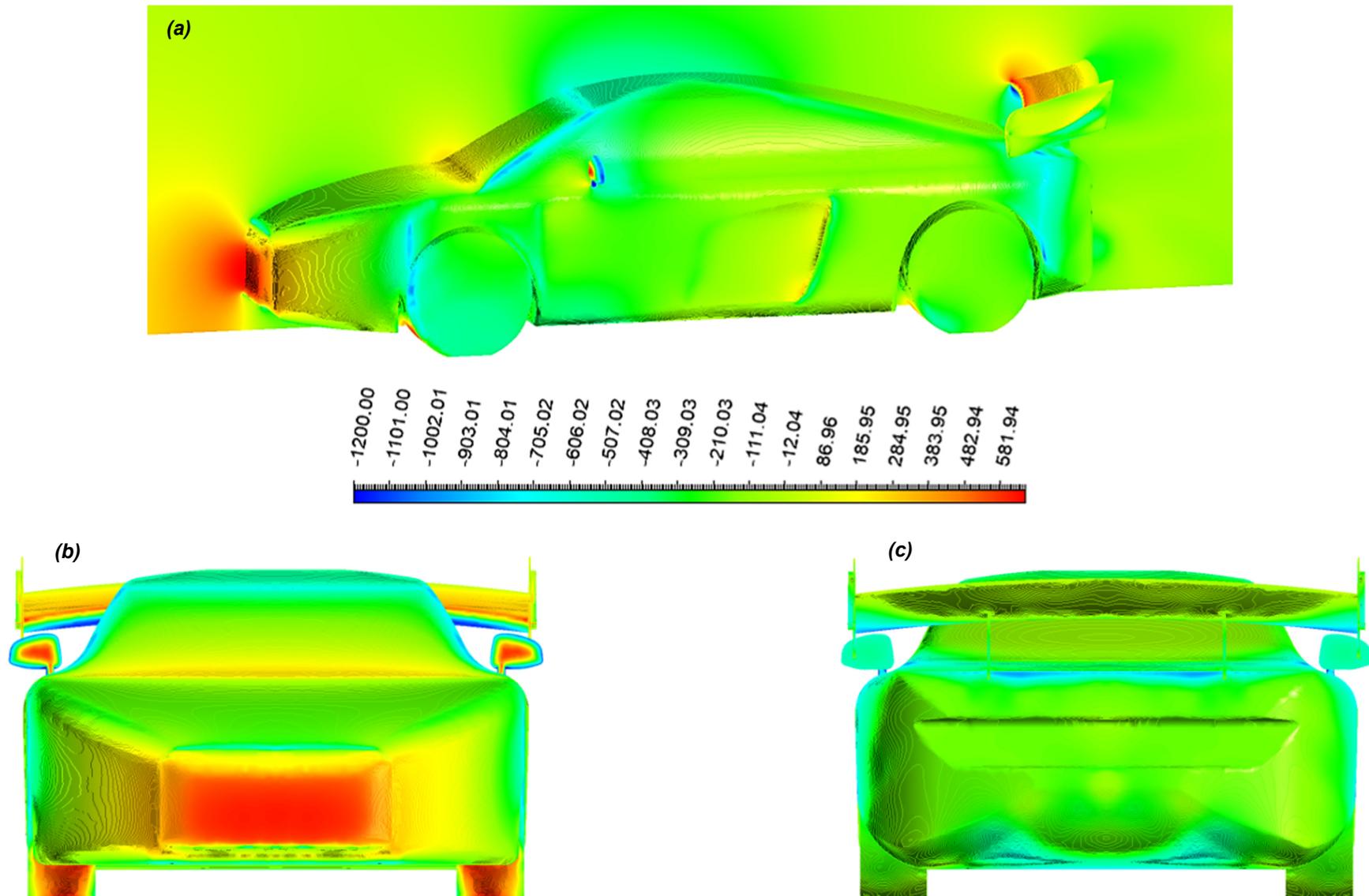


Figura 4.29. Contorno de presión.

a) Vista del plano medio, b) Vista frontal, y c) Vista trasera. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso con alerón.

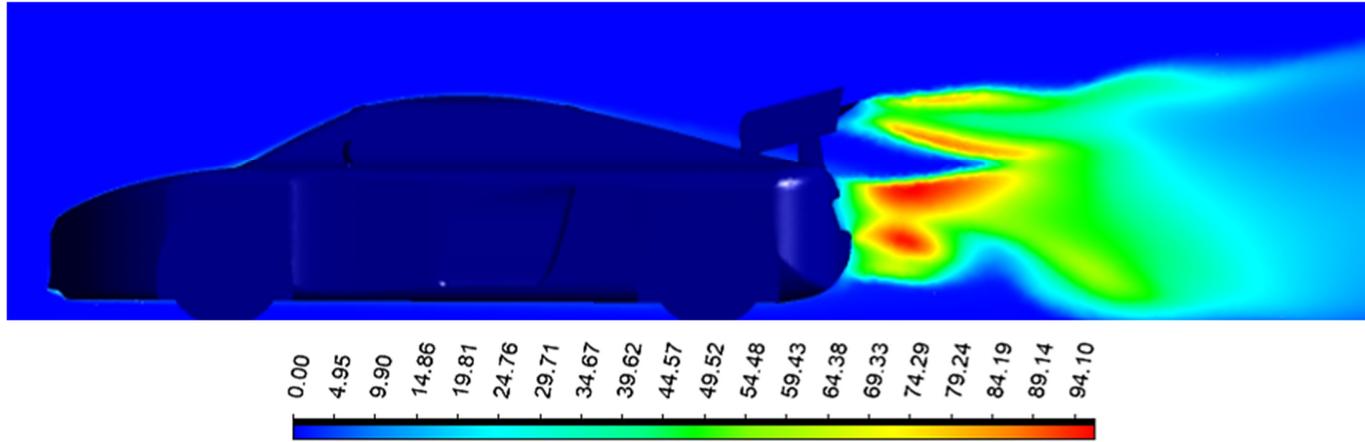


Figura 4.30. Contorno de ECT. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso con alerón.

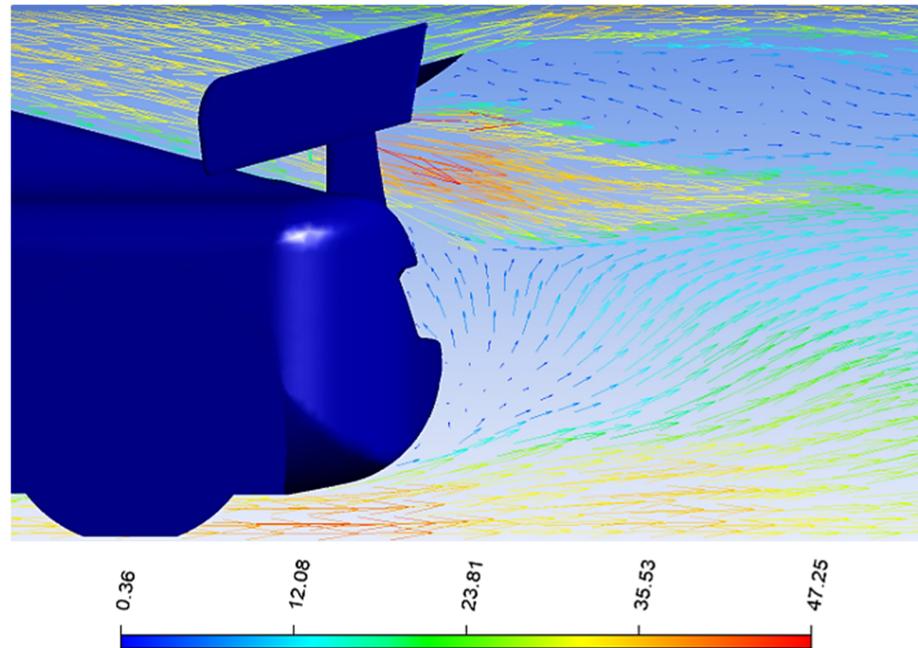


Figura 4.31. Vectores de velocidad. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso alerón.

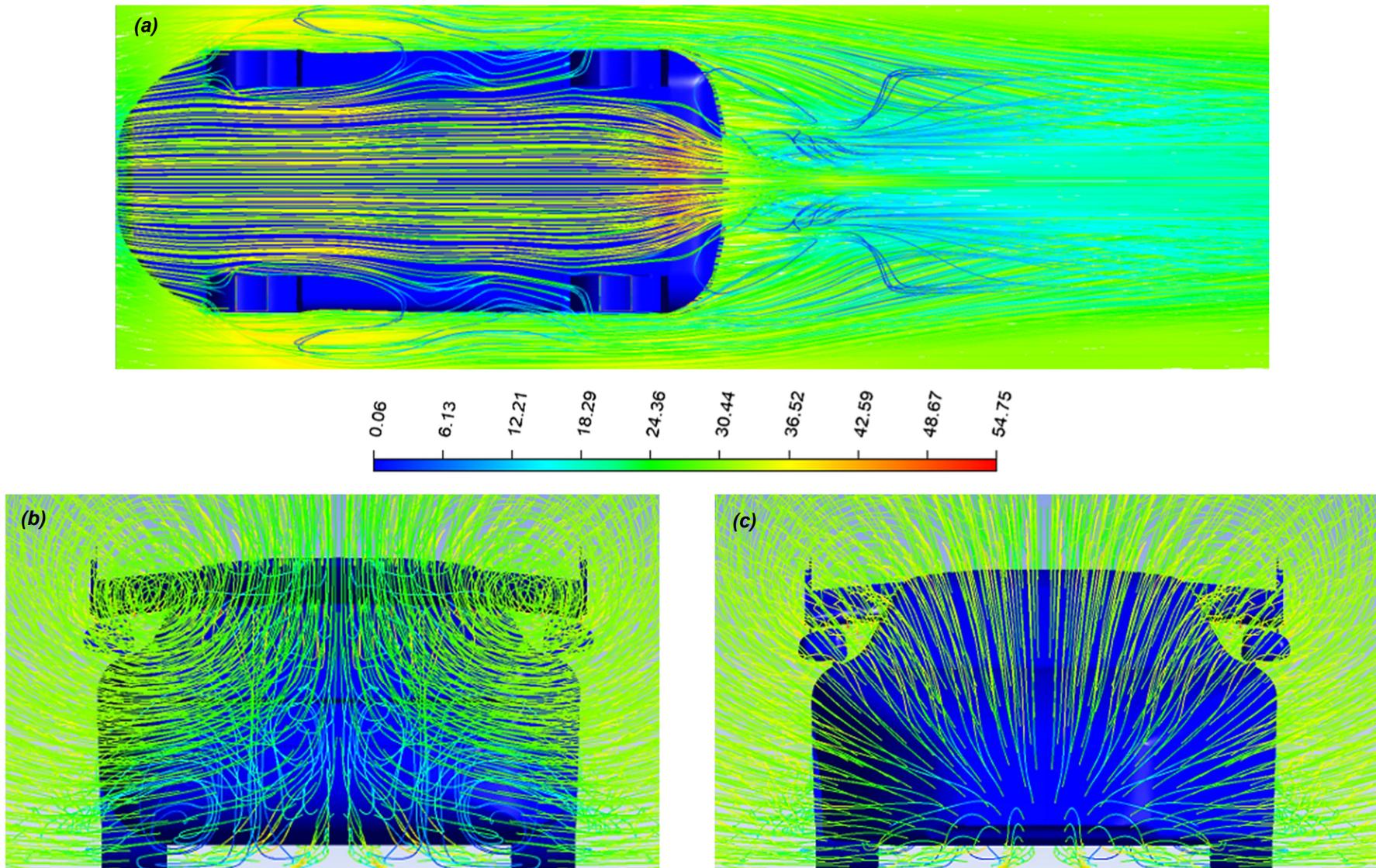


Figura 4.32. Líneas de flujo.

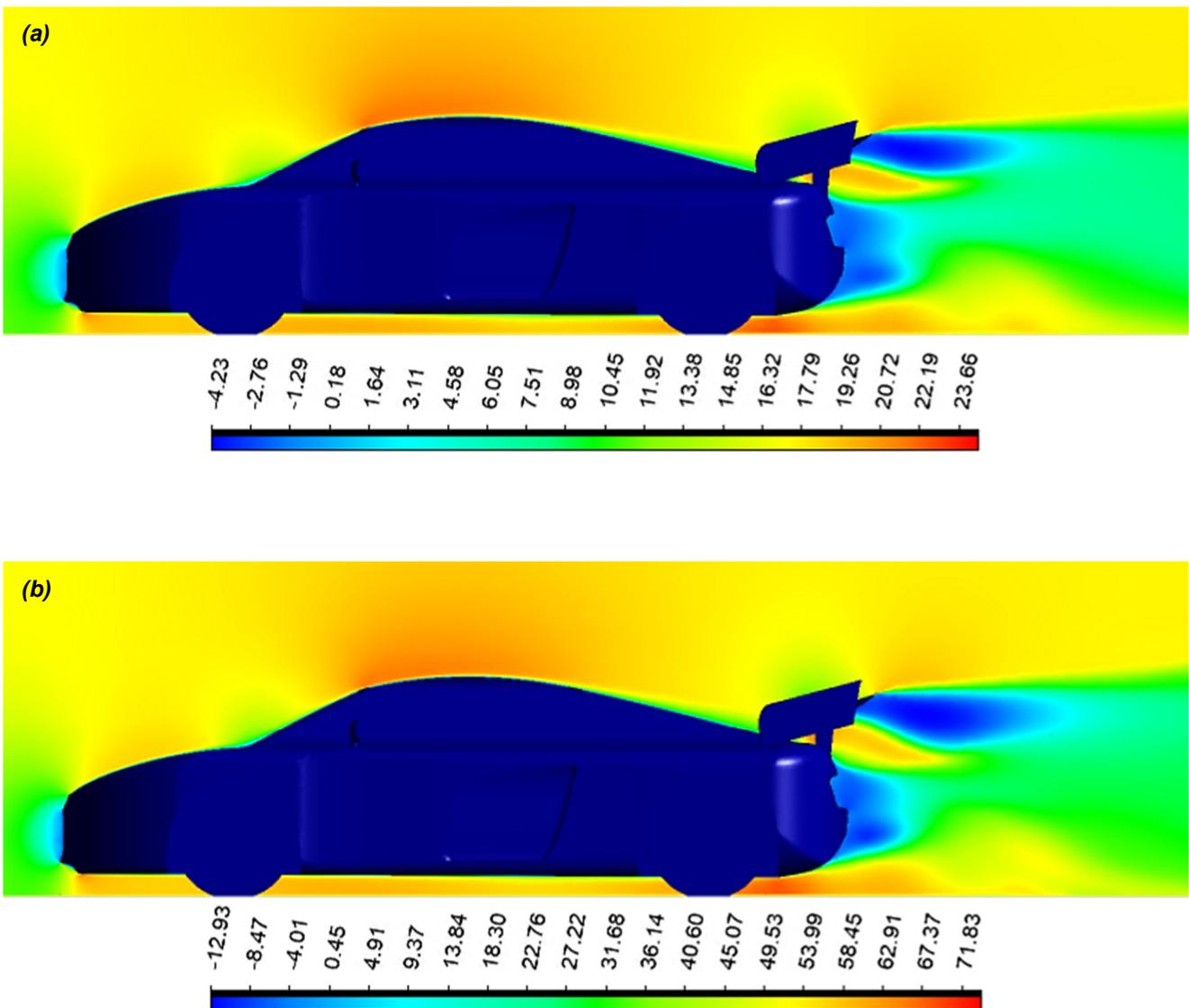
a) Vista inferior, b) Vista trasera, y c) Vista frontal. $Re=9.2 \times 10^6$. Caso alerón.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

4.5.2. Resultados. Contornos de velocidad y vectores, presión, energía cinética turbulenta y líneas de trayectoria. Variación del número de Re. Caso con alerón.

Las Figuras 4.33, 4.34, 4.35, 4.36 y 4.37, muestran los resultados obtenidos variando el número de Reynolds, el ángulo de ataque (AoA) del alerón se mantiene con el mismo valor correspondiente a 13° .

En el presente caso se produce una zona de recirculación adicional comparada con el caso sin alerón. Las zonas de recirculación generadas en el presente caso incrementan o disminuyen su tamaño dependiendo de la velocidad del flujo, en particular, se aprecia que la zona de recirculación que se genera en el alerón crece longitudinalmente (en la dirección del movimiento del automóvil), conforme el número de Re aumenta.



4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

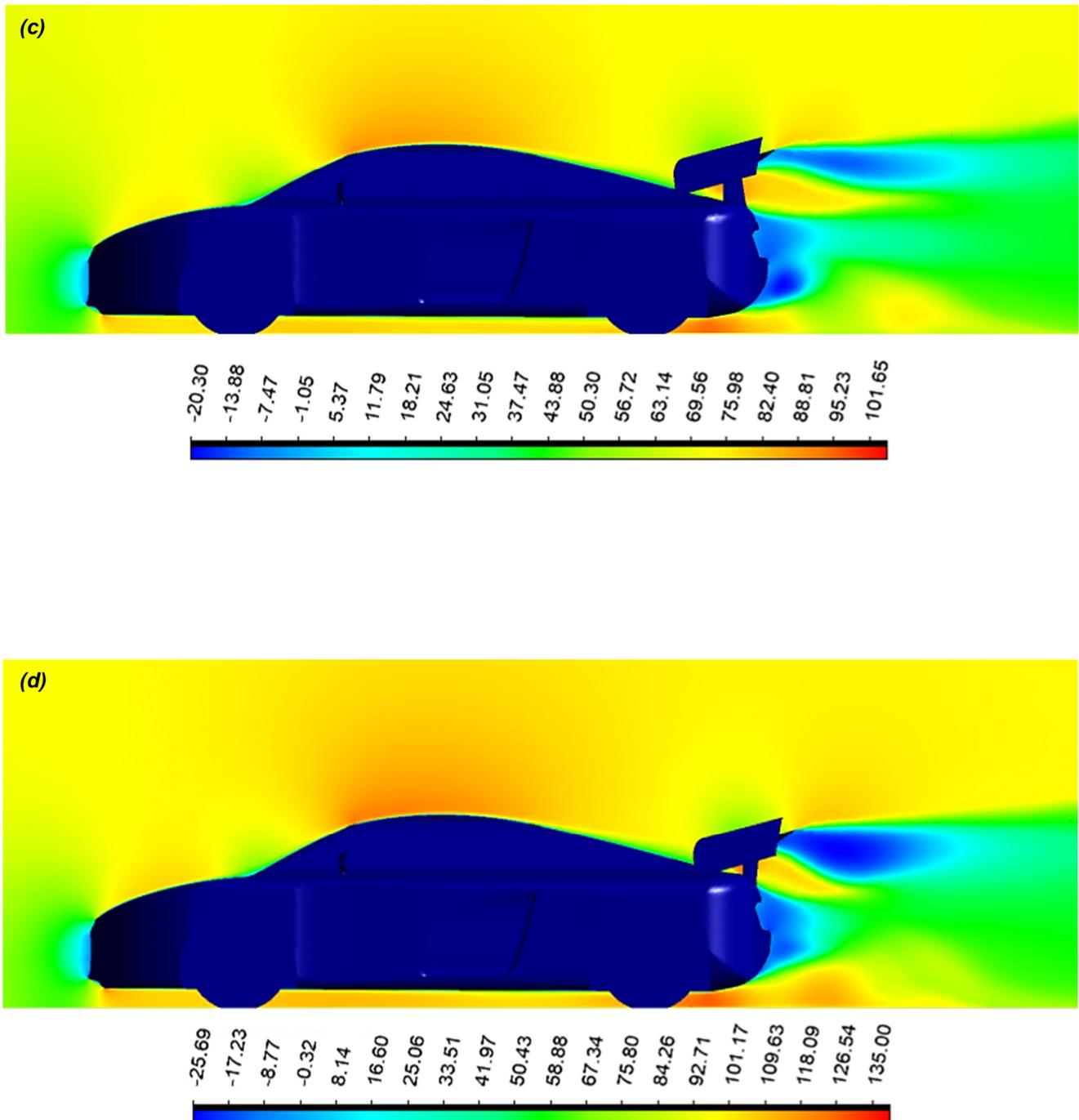
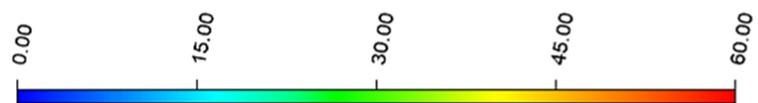
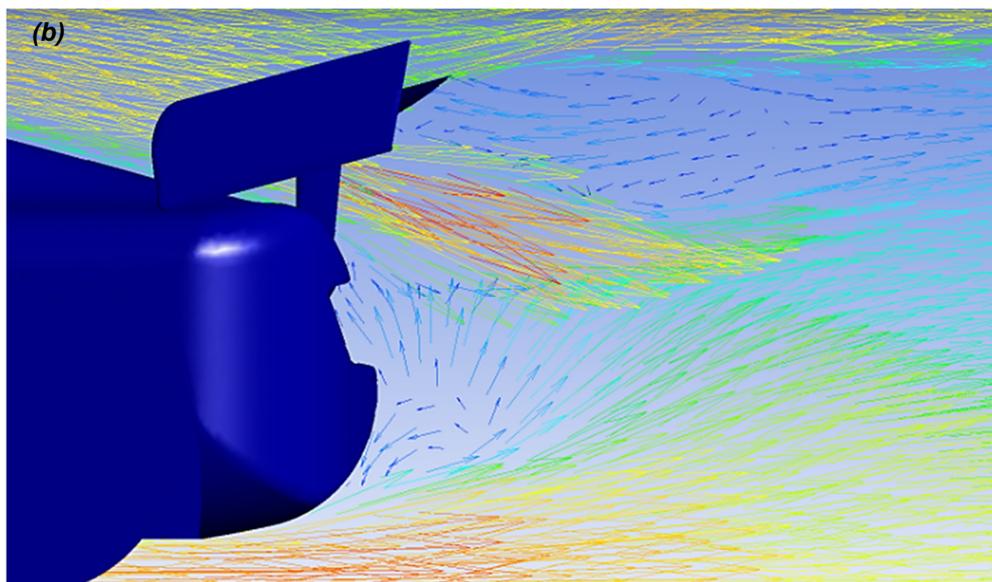
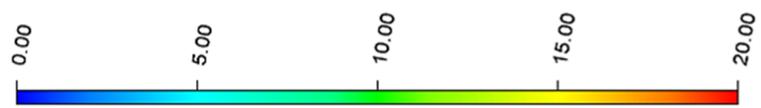
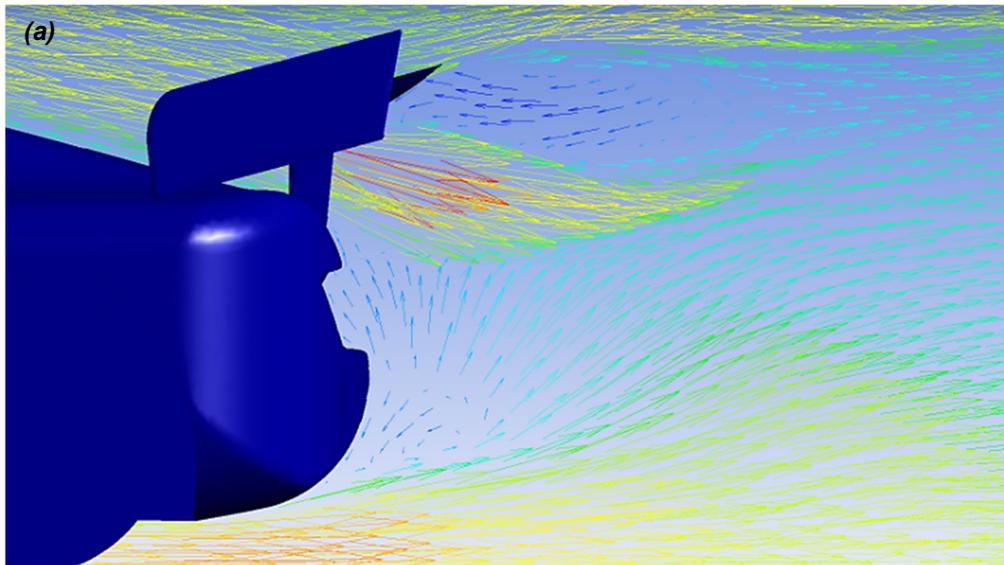


Figura 4.33. Contornos de velocidad.

a) $Re=4.6 \times 10^6$, b) $Re=13.9 \times 10^6$, c) $Re=18.5 \times 10^6$, y d) $Re=25.9 \times 10^6$. Caso con alerón.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO



4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

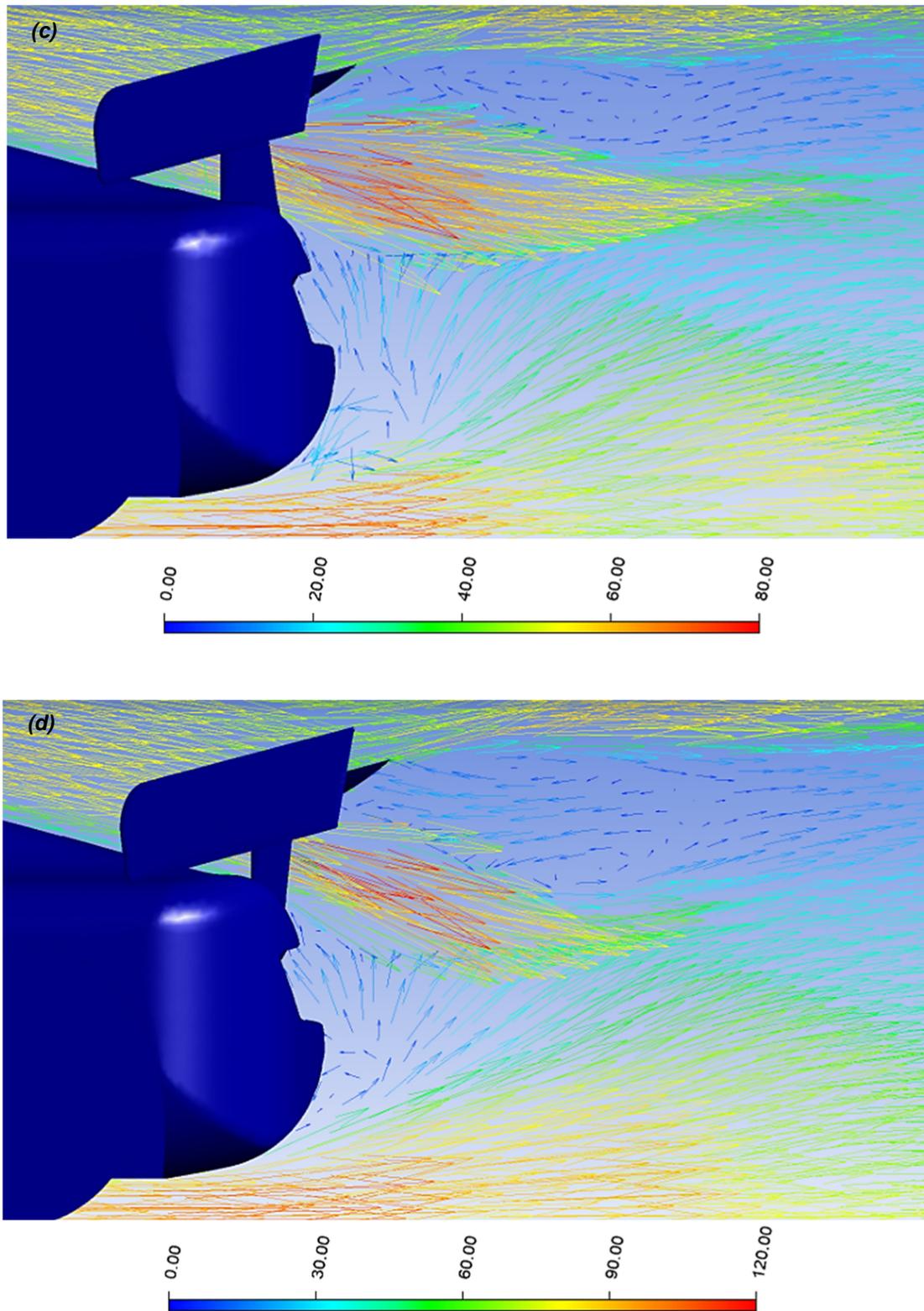


Figura 4.34. Vectores de velocidad.

a) $Re=4.6 \times 10^6$, b) $Re=13.9 \times 10^6$, c) $Re=18.5 \times 10^6$, y d) $Re=25.9 \times 10^6$. Caso con alerón.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

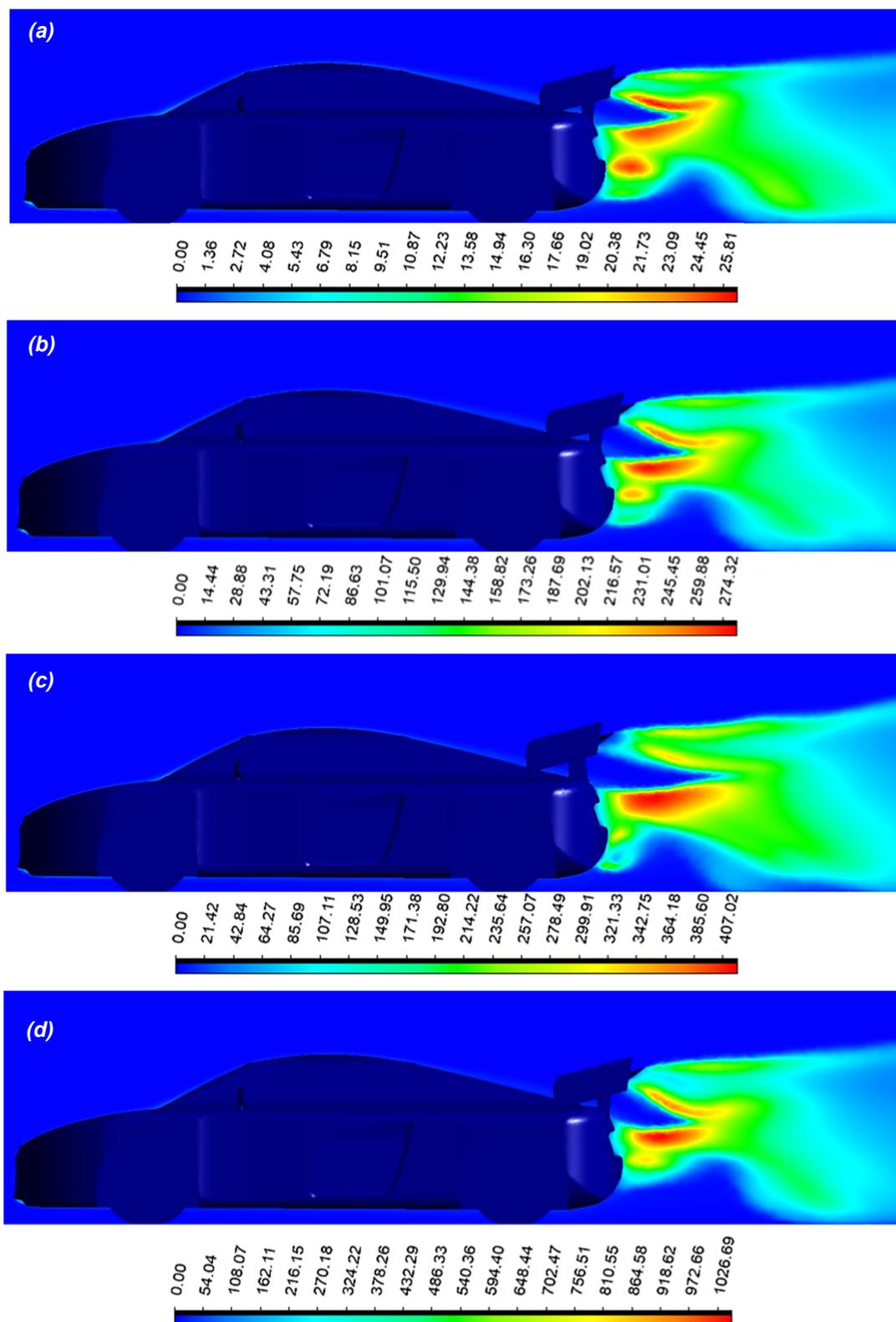


Figura 4.35. Contornos de ECT.

a) $Re=4.6 \times 10^6$, b) $Re=13.9 \times 10^6$, c) $Re=18.5 \times 10^6$, y d) $Re=25.9 \times 10^6$. Caso con alerón.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

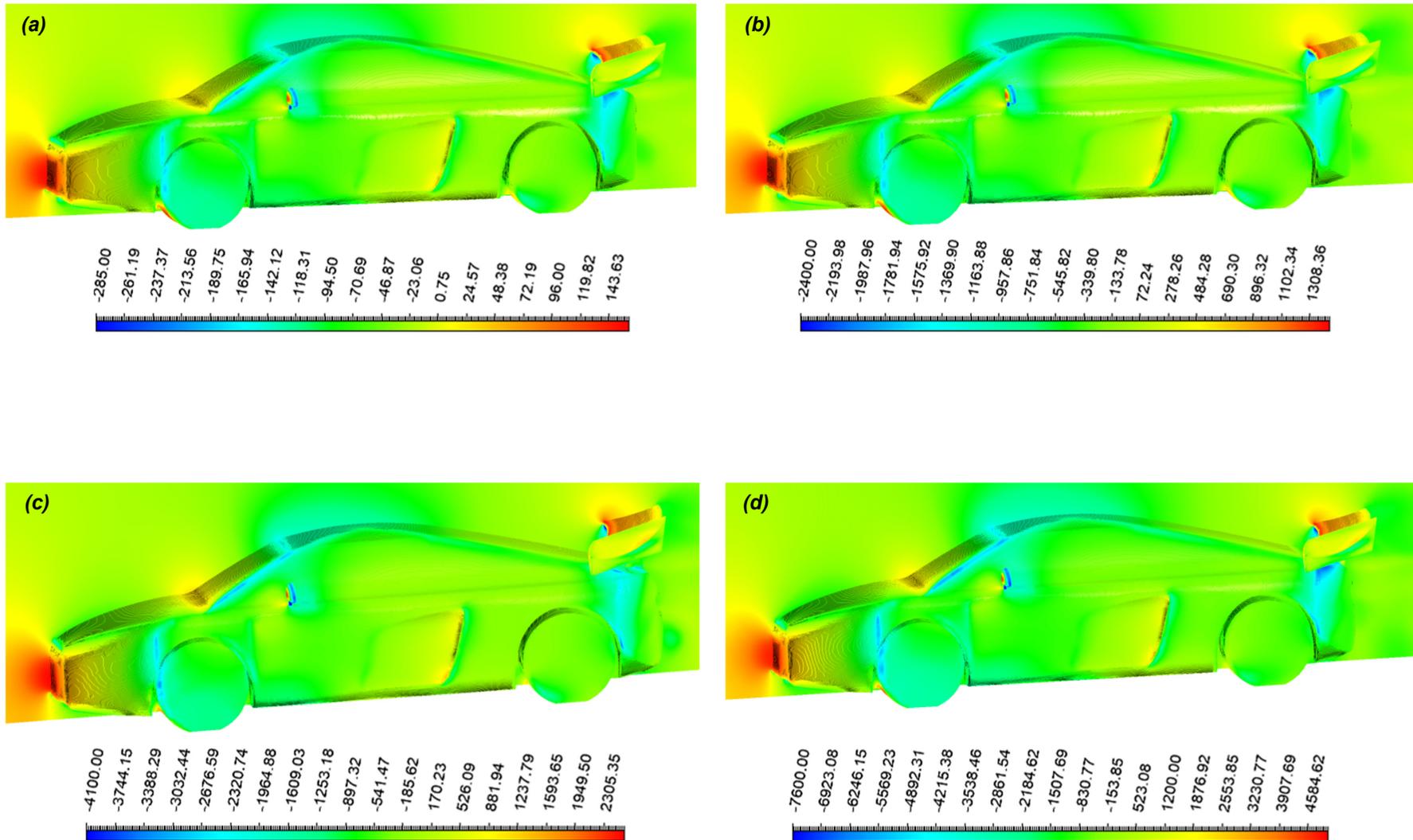
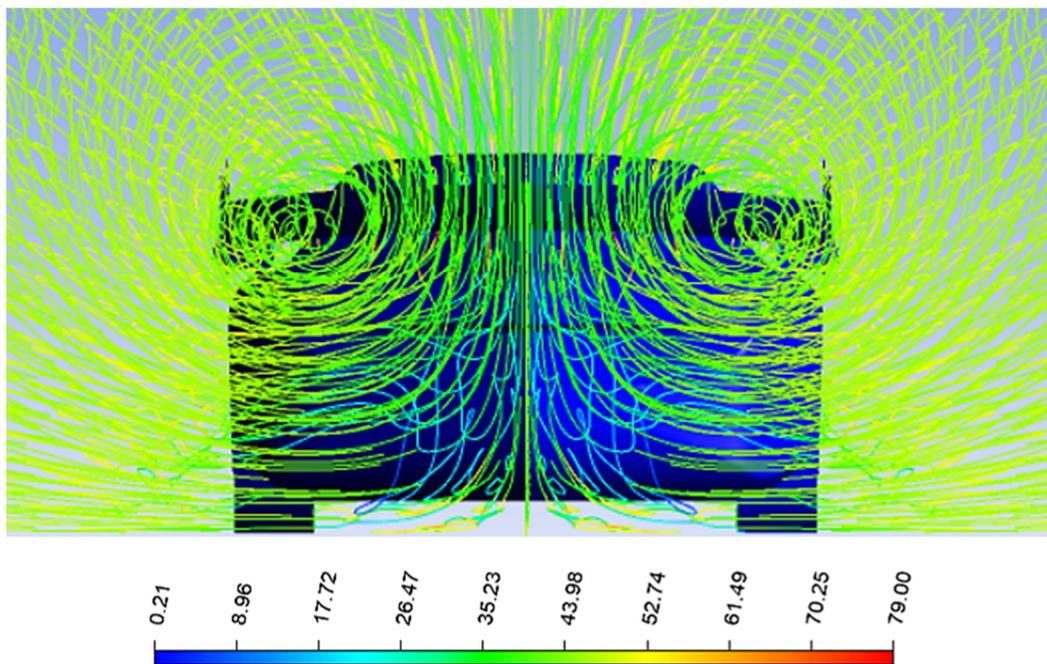
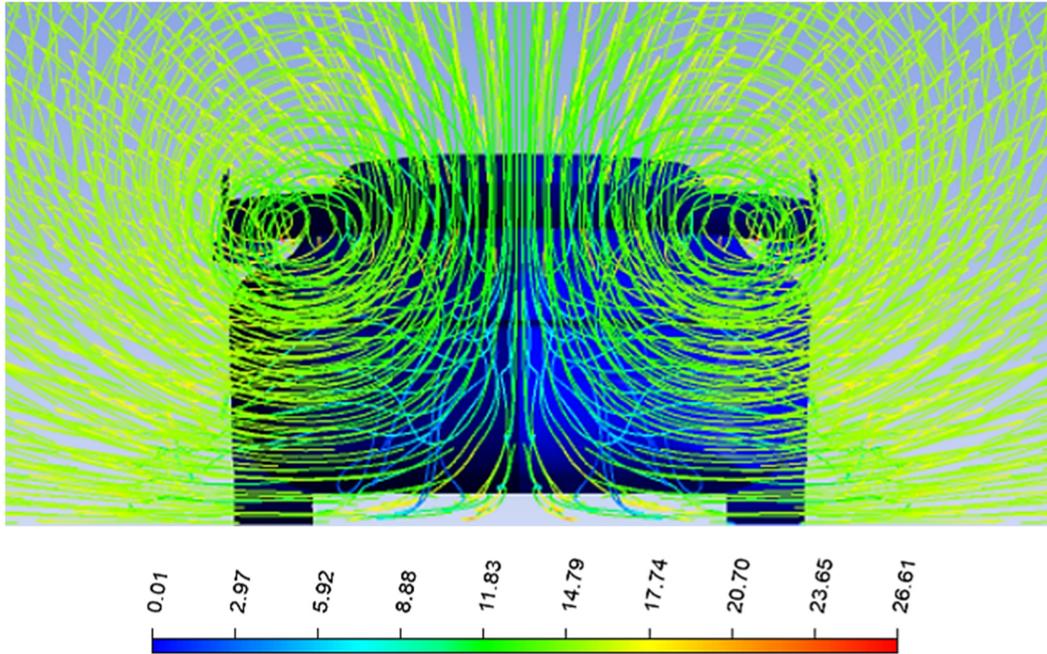


Figura 4.36. Contornos de presión.

a) $Re=4.6 \times 10^6$, b) $Re=13.9 \times 10^6$, c) $Re=18.5 \times 10^6$, y d) $Re=25.9 \times 10^6$. Caso con alerón.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO



4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

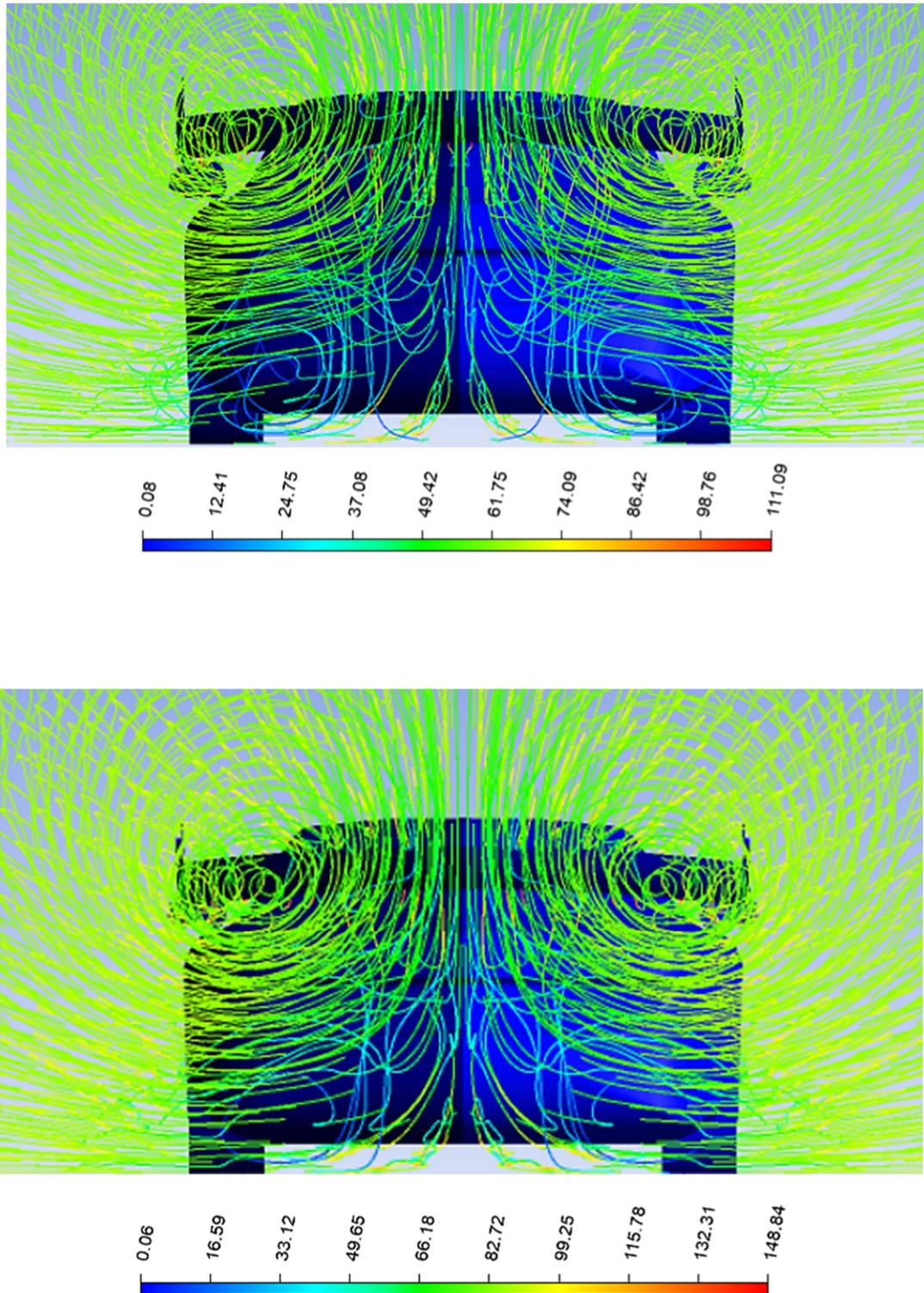


Figura 4.37. Líneas de flujo.

a) $Re = 4.6 \times 10^6$, b) $Re = 13.9 \times 10^6$, c) $Re = 18.5 \times 10^6$, y d) $Re = 25.9 \times 10^6$. Caso con alerón.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

4.5.3. Resultados. Fuerzas de arrastre y sustentación, y sus coeficientes. Variación en el número de Reynolds. Casos con alerón.

La **Tabla 4.5** muestra las fuerzas generadas sobre el vehículo, así como sus respectivos coeficientes, resultado de las simulaciones utilizando diferentes valores de Re. Además, para este caso, se tiene que:

$$A_{Px} = 1.1 [m^2]$$

$$A_{Py} = 4.12[m^2]$$

Tabla 4.5. Fuerzas y coeficientes obtenidos caso alerón

Re (x10 ⁶)	F _D [N]	F _L [N]	C _D $C_D = \frac{2F_D}{\rho u^2 A_{Px}}$	C _L $C_L = \frac{2F_L}{\rho u^2 A_{Py}}$
4.6	65.95	-22.10	0.436	-0.0391
9.2	264.72	-93.18	0.438	-0.0412
13.9	598.24	-222.39	0.44	-0.0437
18.5	1072.85	-410.45	0.443	-0.0454
25.9	2113.27	-856.06	0.446	-0.0483

Las fuerzas de arrastre (F_D) y sustentación (F_L) se muestran en la **Figura 4.38**, donde se aprecia que las fuerzas son opuestas. En la **Figura 4.39** se muestran los coeficientes de arrastre (C_D) y sustentación (C_L), donde se aprecia que el coeficiente de arrastre incrementa, mientras que el de sustentación también pero de forma negativa, esto porque el alerón incrementa la carga aerodinámica del vehículo y se genera una F_L negativa en dirección al suelo. Por lo tanto en las figuras se aprecia que la carga aerodinámica y el arrastre incrementan cuando la velocidad del flujo es mayor.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

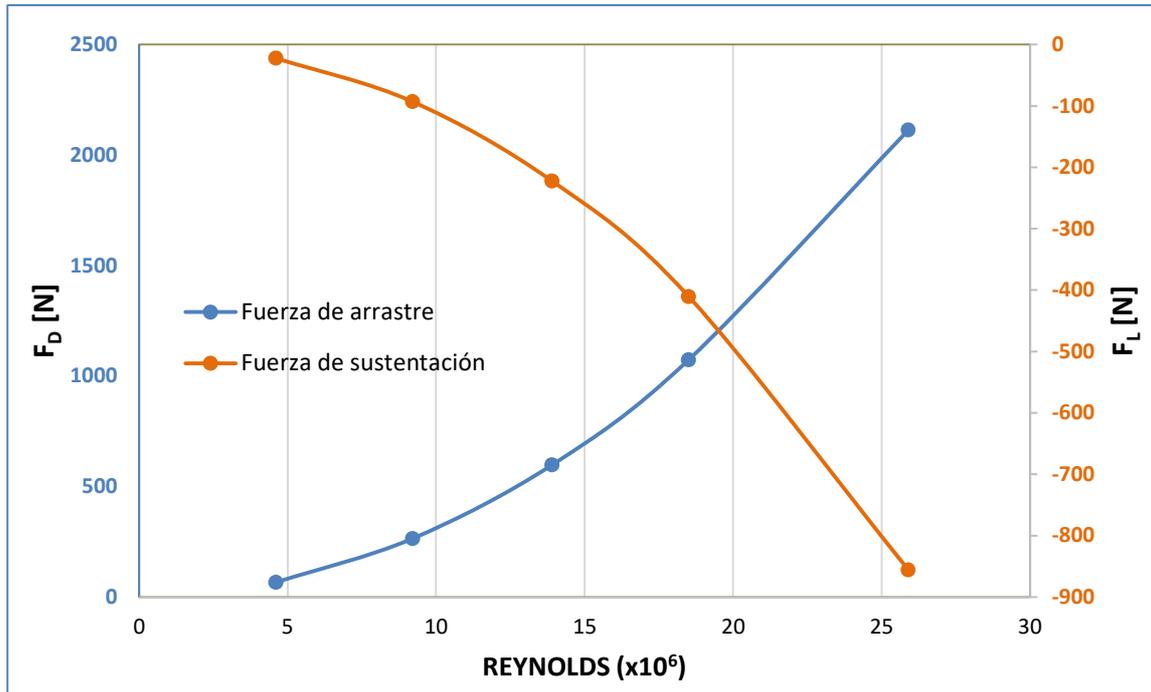


Figura 4.38. Fuerzas generadas sobre el vehículo. Caso con alerón.

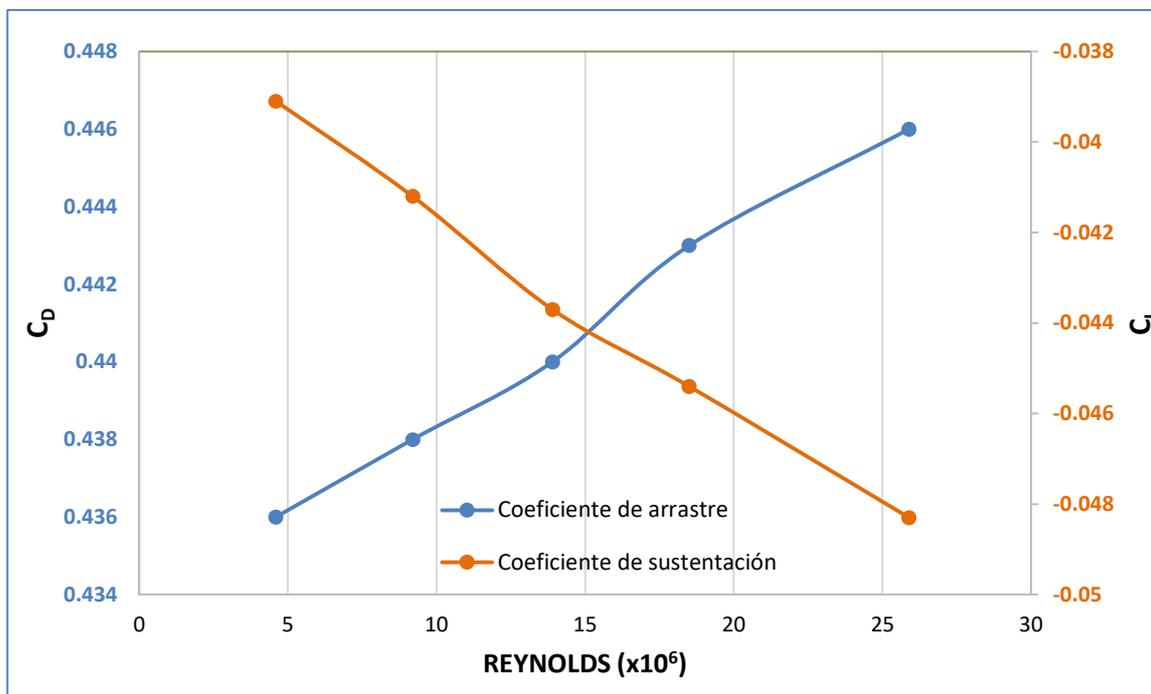


Figura 4.39. Coeficientes de arrastre y sustentación del vehículo. Caso con alerón.

4.5.4. Resultados. Comparación entre el caso base sin alerón y con alerón

En la **Figura 4.40.** se muestran las fuerzas de arrastre (F_D) y de sustentación (F_L), para el caso base sin alerón (CB) y el caso con alerón (CA). Para ambos casos, la fuerza de arrastre crece de manera exponencial conforme se incrementa el número de Reynolds. Para el caso con alerón F_D es siempre mayor y se tiene una mínima diferencia en las fuerzas cuando el $Re= 4.6 \times 10^6$.

En la **Figura 4.41.** se presentan los coeficientes de arrastre (C_D) y de sustentación (C_L) para los dos casos sin (CB) y con alerón (CA). C_D y C_L se mantienen presentando pequeñas variaciones pero sin algún comportamiento lineal. A diferencia del CA, en CB, el C_D aumenta conforme el número de Reynolds es mayor y C_L aumenta de forma negativa, lo que se traduce en aumento de la carga aerodinámica. Por lo tanto, con respecto al CB, en CA se tiene un aumento de C_D relativamente bajo ($\approx 30\%$), sin embargo se tiene un aumento considerable en la sustentación negativa (carga aerodinámica), C_L se redujo en un ($\approx 105\%$). Por lo tanto el alerón añadido es de gran utilidad, aumenta significativamente la carga aerodinámica sin un cuantioso incremento en el arrastre.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

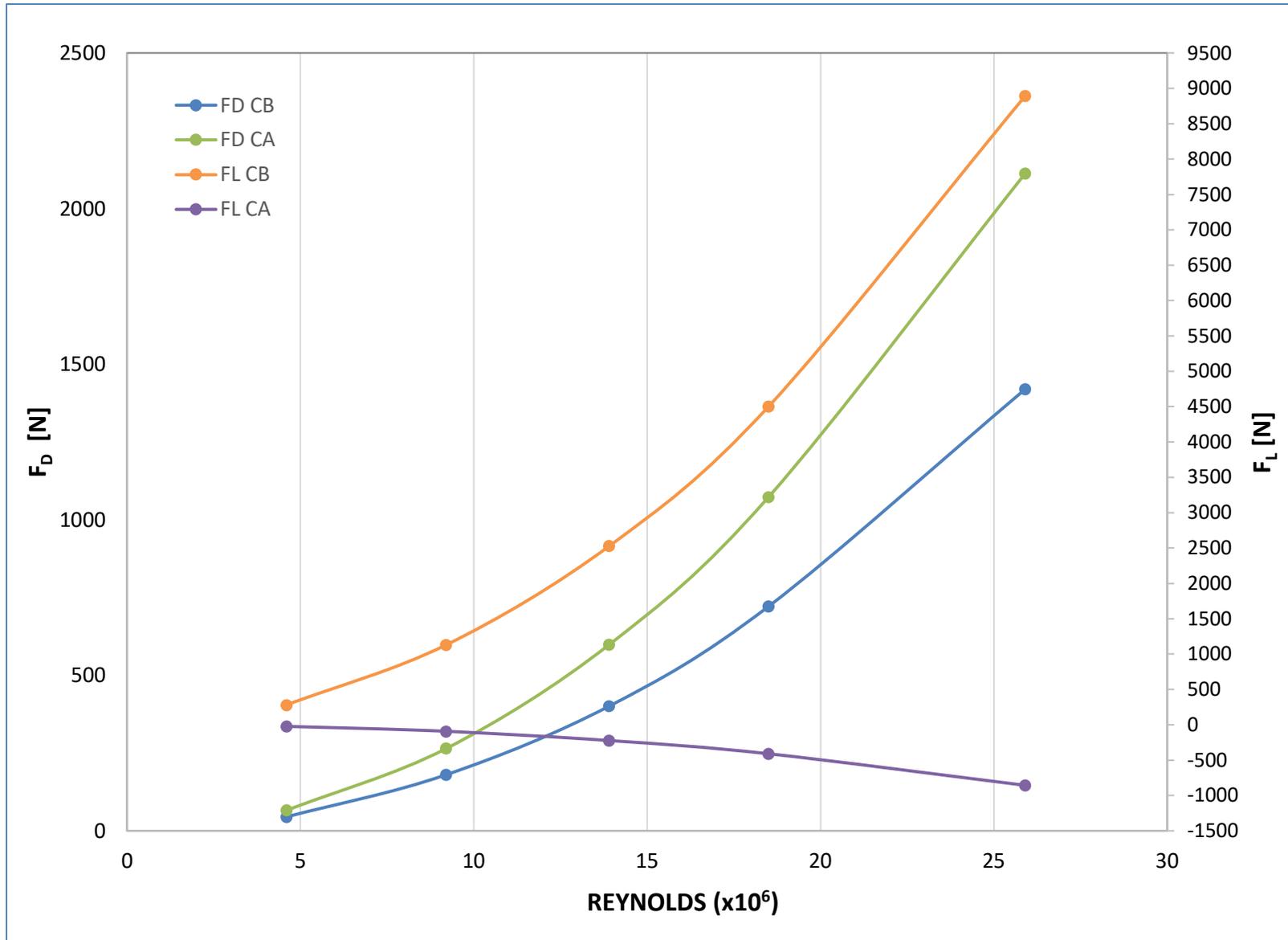


Figura 4.40. Fuerzas de arrastre y sustentación del vehículo sin (CB) y con (CA) alerón.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

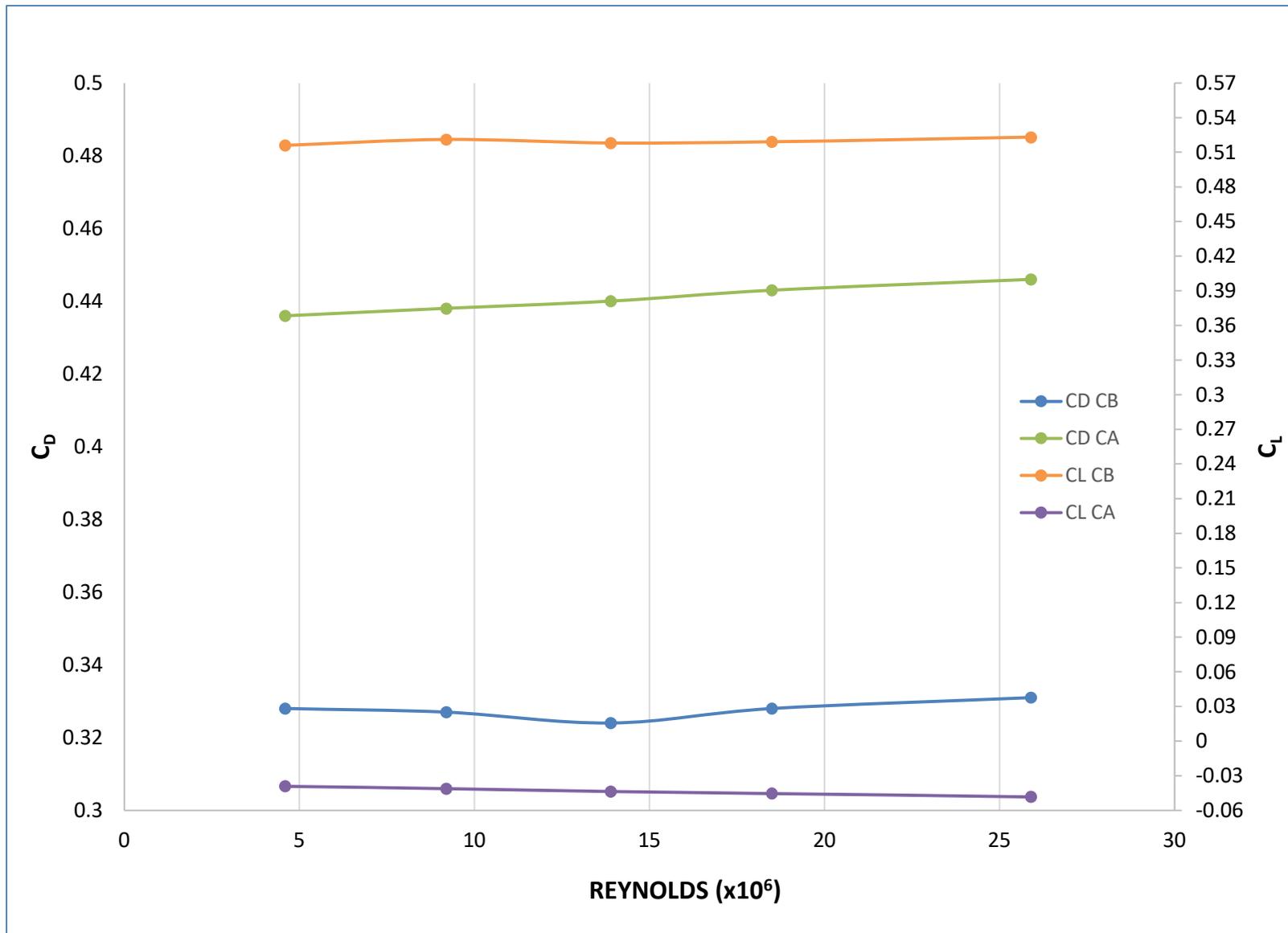


Figura 4.41. Coeficientes de arrastre y sustentación del vehículo sin (CB) y con (CA) alerón.

4.6. Caso alerón de ala centripeta (CAAC)

La **Figura 4.42.** muestra la configuración del modelo con la superficie añadida (alerón); en esta sección se utiliza un alerón de ala centripeta con un ángulo roll de 15° . Este ángulo mide la inclinación lateral del alerón con respecto al eje perpendicular de la longitud del vehículo (eje transversal).

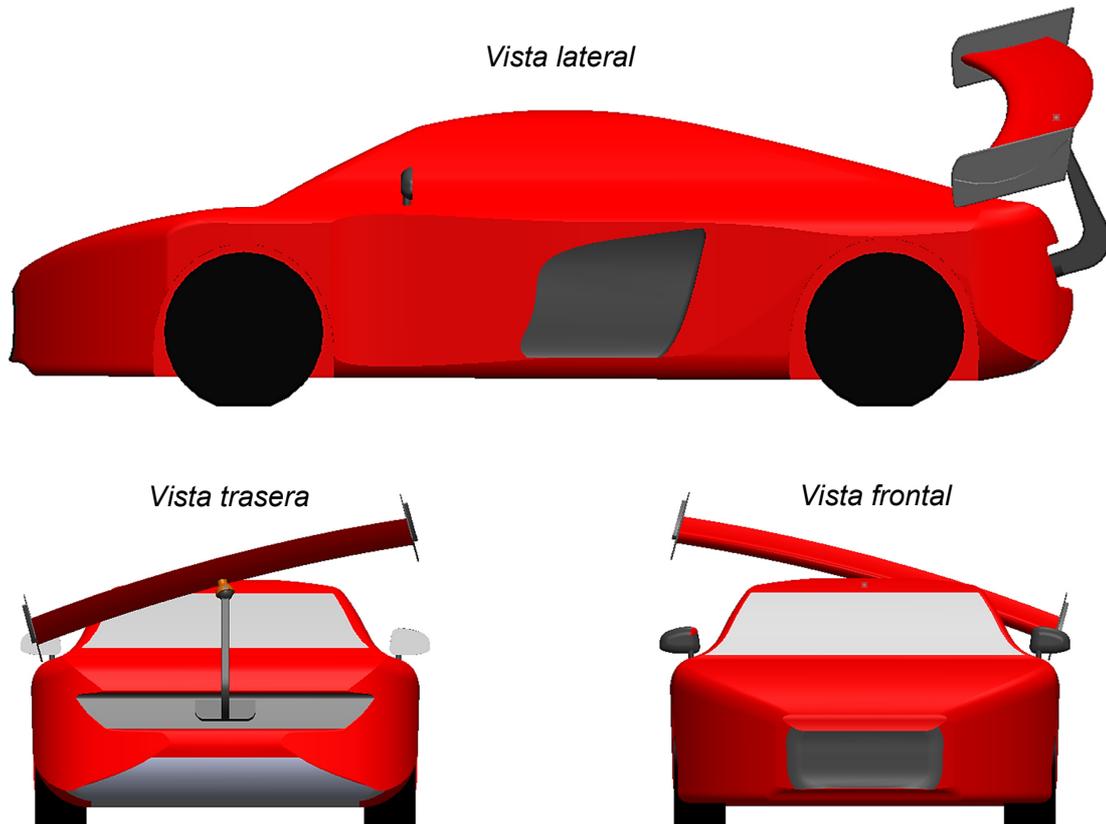


Figura 4.42. Modelo Audi R8 con alerón de ala centripeta, ángulo roll de 15° .

A diferencia de los casos anteriores, se mantiene una velocidad en el flujo de 45 m/s mientras se varía el ángulo de roll del alerón; correspondientes a 5° , 7° , 10° , 12° y 15° . Esto con el fin de analizar el efecto del ángulo sobre la carga producida en el vehículo. Además, para este caso se simula el vehículo completo debido a que ya no es simétrico por la posición del alerón. Consecuente a lo anterior aparece una fuerza resultante en la dirección z. La malla del presente caso consta de 13M de celdas, conservando las mismas operaciones de mallado y condiciones de frontera.

4.6.1. Resultados del caso alerón de ala centrípeta. Ángulo roll de 15°.

Para este caso se utiliza el máximo ángulo de roll 15°, manteniendo el mismo ángulo de ataque (AoA) de 13° que en la sección anterior, y la velocidad del flujo es de 45 m/s.

En comparación con los casos anteriores, el flujo que sale de la parte trasera del vehículo no es simétrico debido a la inclinación del alerón. La **Figura 4.43c** muestra los contornos de velocidad en la zona del alerón. En la parte derecha del alerón, donde hay un mayor espacio entre el maletero y el alerón, el flujo del chorro generado en esa zona alcanza una velocidad menor que en el lado izquierdo. Adicionalmente, el vórtice generado en esta zona, posee una mayor elevación a la de su contraparte como lo muestra de manera específica la **Figura 4.43b**, donde se aprecia que el flujo se perturba más en la parte baja del alerón que en la superior.

Con lo anteriormente mencionado cabe destacar que el flujo presenta menos fluctuaciones en la parte superior, mientras que en la parte inferior el flujo se torna muy turbulento dejando una estela de mayor dimensión cuando el flujo atraviesa esta región, como se muestra en la **Figura 4.47**. Las fluctuaciones en cada extremo del alerón se ilustran en la **Figura 4.45b**, donde estas fluctuaciones corresponden a valores de ± 8.29 m/s.

La función principal del alerón se basa en generar una fuerza lateral hacia el centro de la curva por la que circula el automóvil, en la presente sección el vehículo circula en trayectoria recta por lo tanto no se aprecia en su totalidad el principio de funcionamiento de este tipo de alerón, sin embargo en la siguiente sección se muestra el comportamiento cuando el vehículo atraviesa una curva. El alerón se inclina y la carga aerodinámica se distribuye a lo largo del ala, que se mantiene perpendicular al eje transversal del vehículo (con dirección al suelo), adicional se genera una fuerza lateral que incrementa el agarre en la parte trasera del vehículo, sobre todo en la rueda interior. La distribución de presiones en la superficie inferior del ala no es la misma y se puede apreciar en la **Figura 4.44c** y **4.44d**, lo anterior debido a la inclinación del alerón. En este caso el ΔP en la parte elevada del alerón debe ser mayor que en la inferior, pero como se aprecia en las figuras, esto no es

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

así, ya que en la superficie inferior del ala se aprecia una mayor área con presión negativa que en la parte elevada. Este tipo de alerón está diseñado únicamente para ser utilizado cuando el vehículo atraviesa una curva, por esta razón los resultados obtenidos en esta sección no son los esperados.

Finalmente, de acuerdo con [21], cuando el ala esta inclinada, la carga aerodinámica se reduce en un 3%, mientras que la fuerza centrípeta que se genera incrementa a medida que el ángulo roll aumente. Lo anterior se demuestra en la **Tabla 4.6**, a medida que el ángulo roll del alerón se aproxima a 0° , la carga aerodinámica (F_L) aumenta, pero la fuerza centrípeta/lateral (F_z) decrece.

[21]. <https://zenvoautomotive.com/zenvo-automotive-presents-tsr-s/>

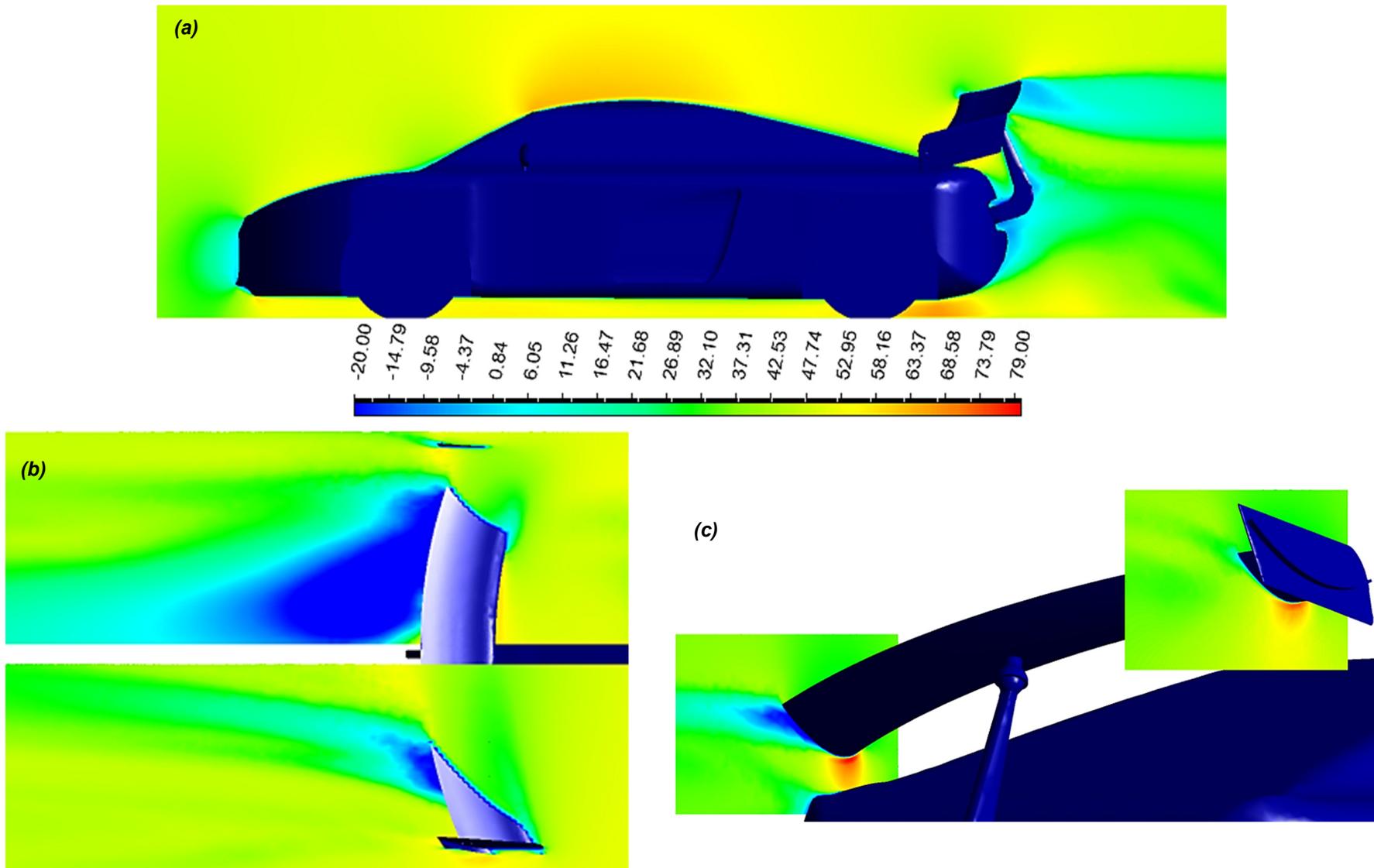


Figura 4.43. Contorno de velocidad. Caso alerón de ala centripeta.

a) Vista lateral del plano medio, b) Vista superior de planos sobre el ala, y c) Vista de planos en los extremos del ala. Ángulo roll 15°. $Re = 13.9 \times 10^6$.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

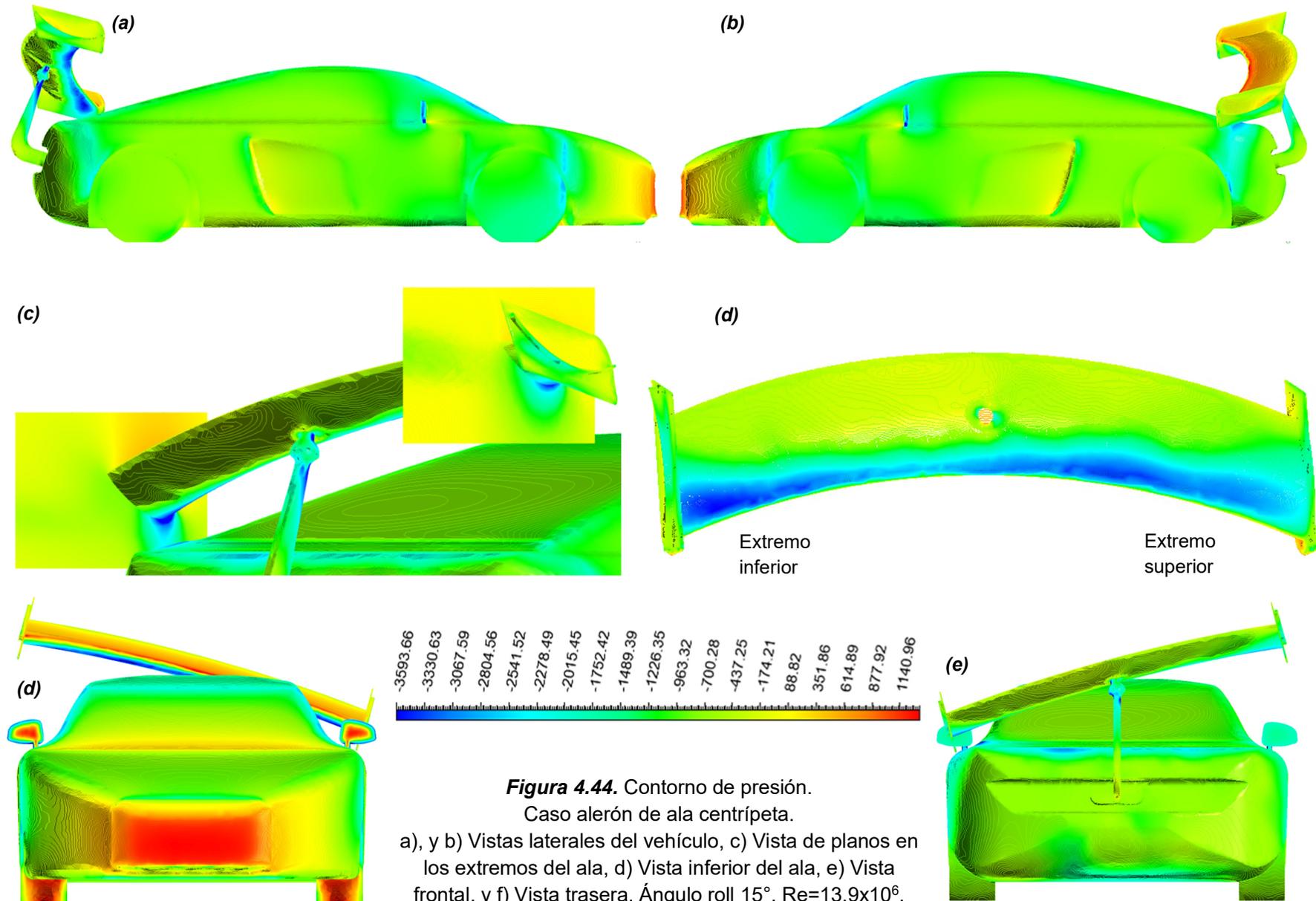


Figura 4.44. Contorno de presión.
Caso alerón de ala centripeta.
a), y b) Vistas laterales del vehículo, c) Vista de planos en los extremos del ala, d) Vista inferior del ala, e) Vista frontal, y f) Vista trasera. Ángulo roll 15°. $Re=13.9 \times 10^6$.

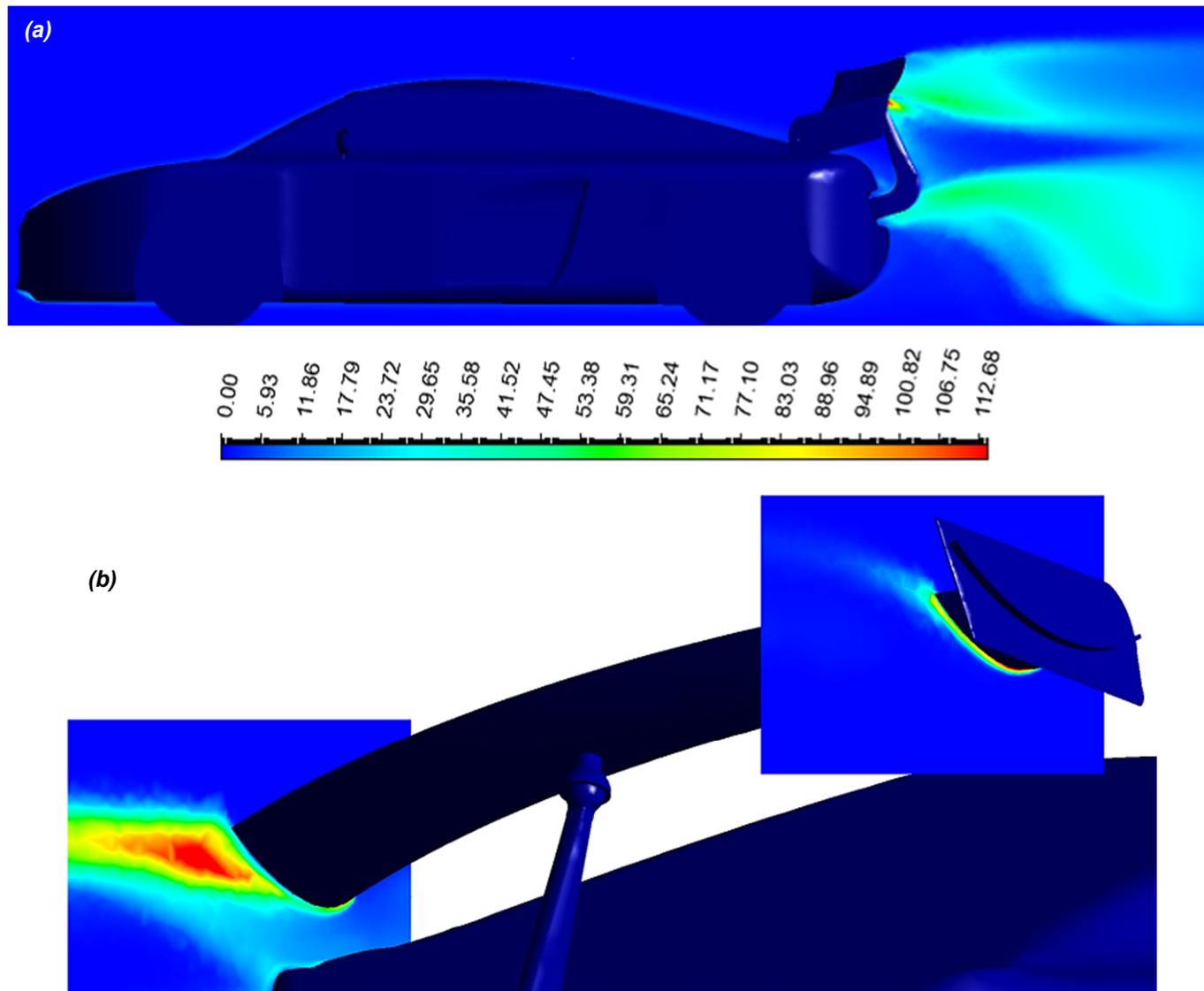


Figura 4.45. Contorno de ECT. Caso alerón de ala centripeta.

a) Vista lateral del plano medio, y b) Vista de planos en los extremos del ala. Ángulo roll 15° . $Re = 13.9 \times 10^6$.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

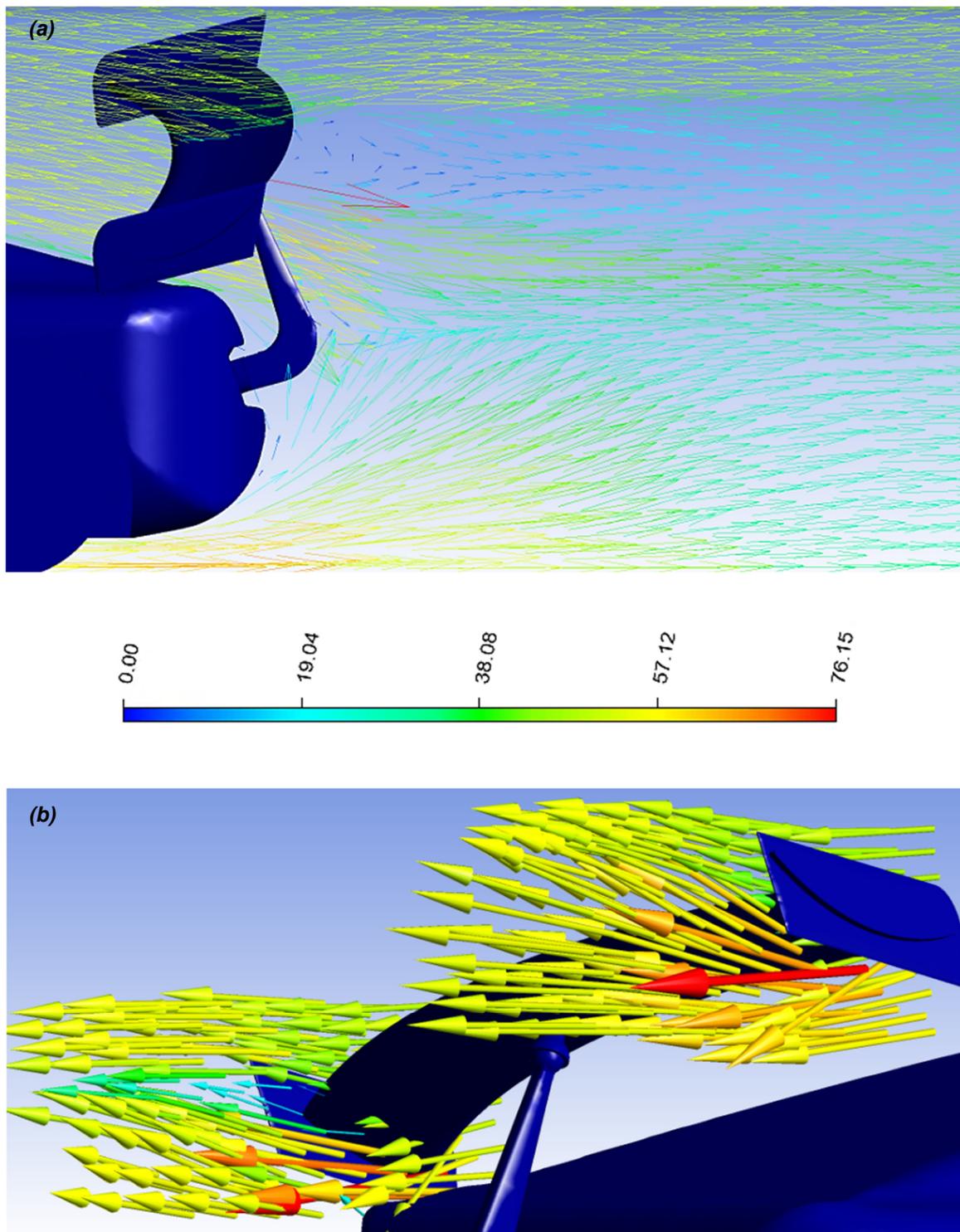


Figura 4.46. Vectores de velocidad. Caso alerón de ala centripeta.
a) Vista lateral del plano medio, y b) Vista de planos en los extremos del ala.
Ángulo roll 15° . $Re = 13.9 \times 10^6$.

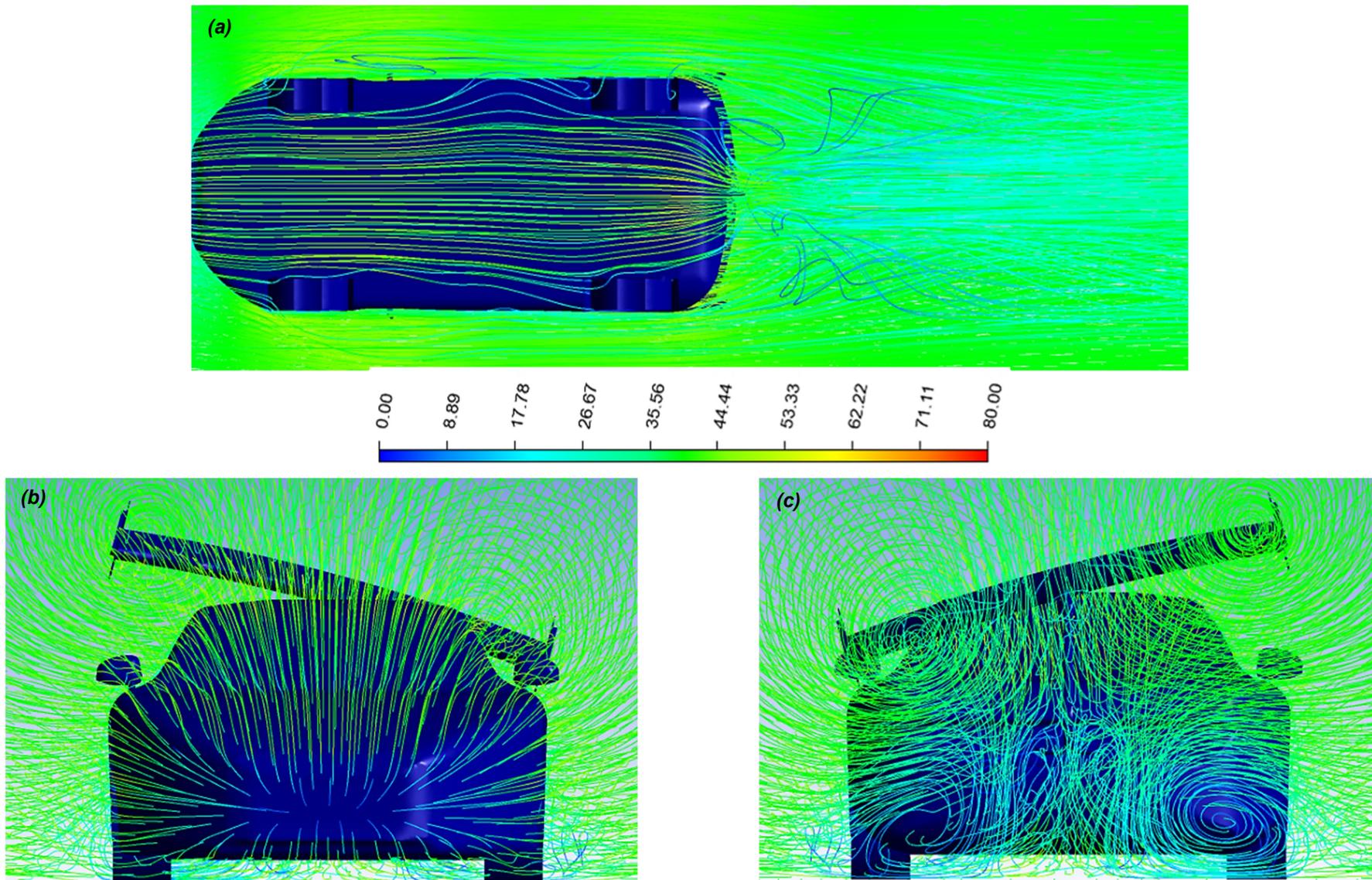
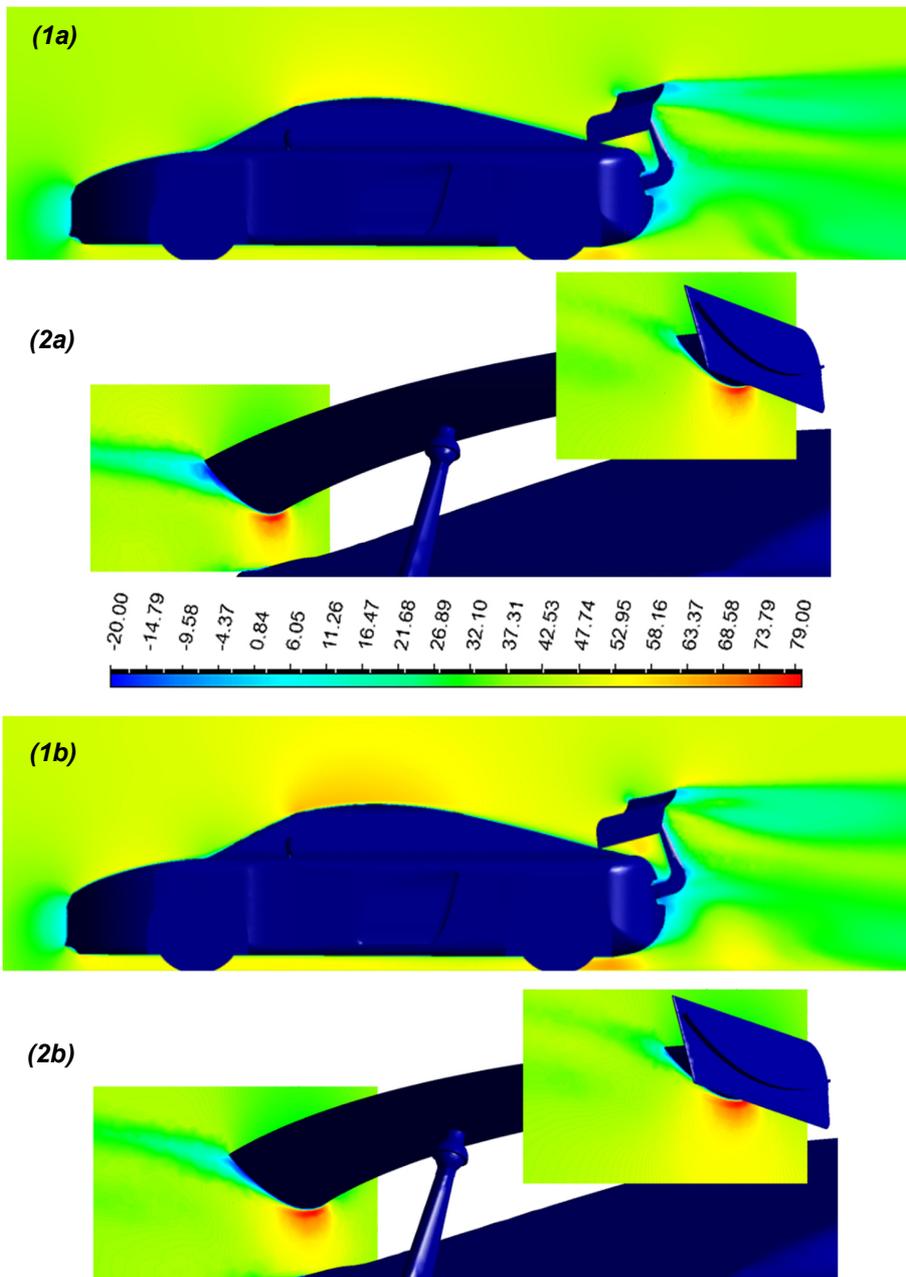


Figura 4.47. Líneas de flujo. Caso alerón de ala centripeta.
a) Vista inferior, b) Vista frontal, y c) Vista trasera. Ángulo roll 15° . $Re = 13.9 \times 10^6$.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

4.6.2. Resultados. Contornos de velocidad y vectores, presión, energía cinética turbulenta y líneas de trayectoria. Variación del ángulo roll. Caso alerón de ala centrípeta.

Las **Figuras 4.48, 4.49, 4.50, 4.51 y 4.52**, muestran los resultados obtenidos variando el ángulo roll del alerón a: 12° , 10° , 7° y 5° , el ángulo de ataque (AoA) del alerón se mantiene con el mismo valor de 13° y la velocidad del flujo es de 45m/s. Las figuras presentan un comportamiento similar, nótese que la estela en la parte baja del alerón es mayor que en la parte elevada, además estas zonas disminuyen su tamaño cuando el ángulo roll tiende a 0° .



4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

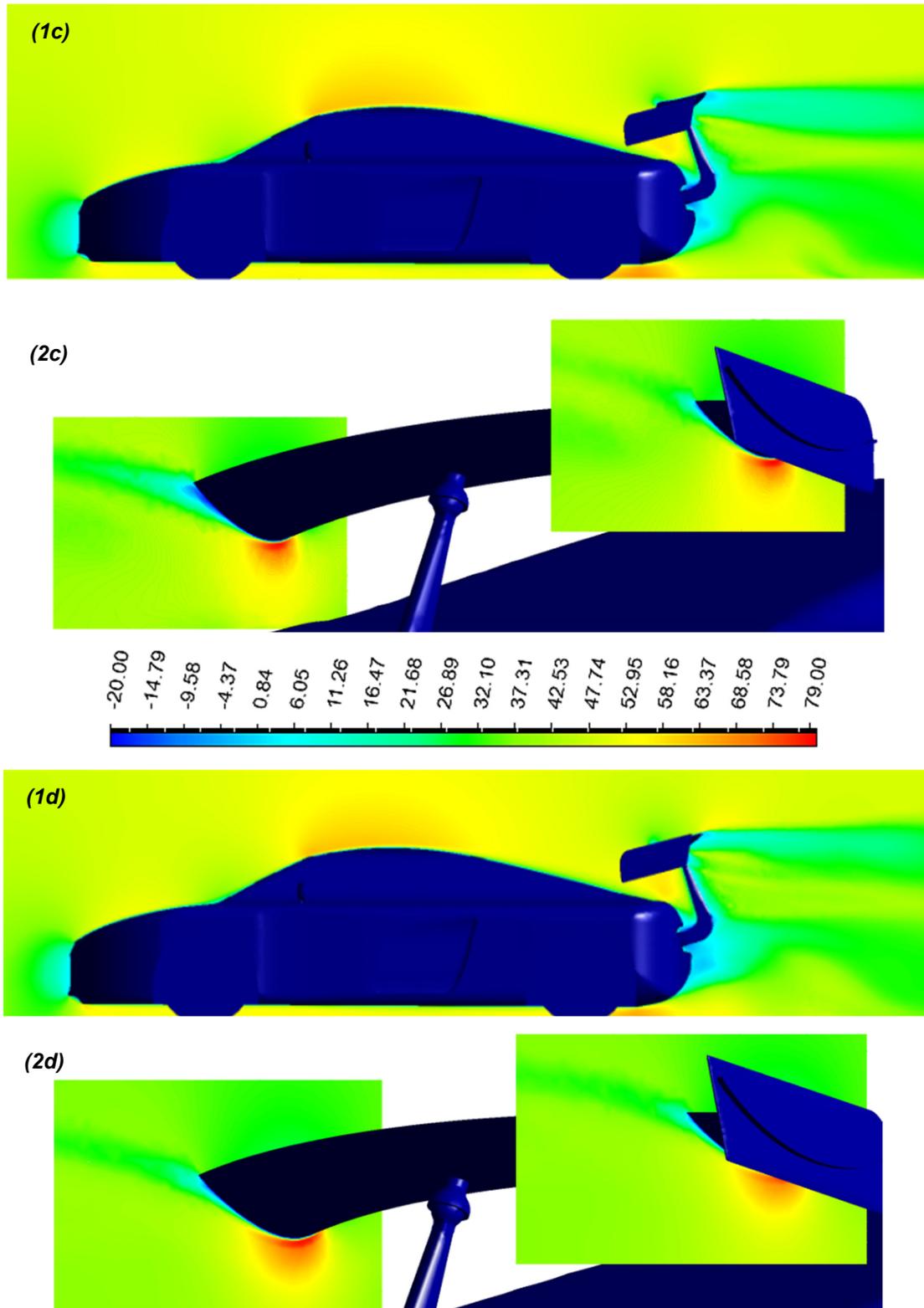


Figura 4.48. Contornos de velocidad. Caso alerón de ala centrípeta.
a) Ángulo roll 12° , b) Ángulo roll 10° , c) Ángulo roll 7° , y d) Ángulo roll 5° .

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

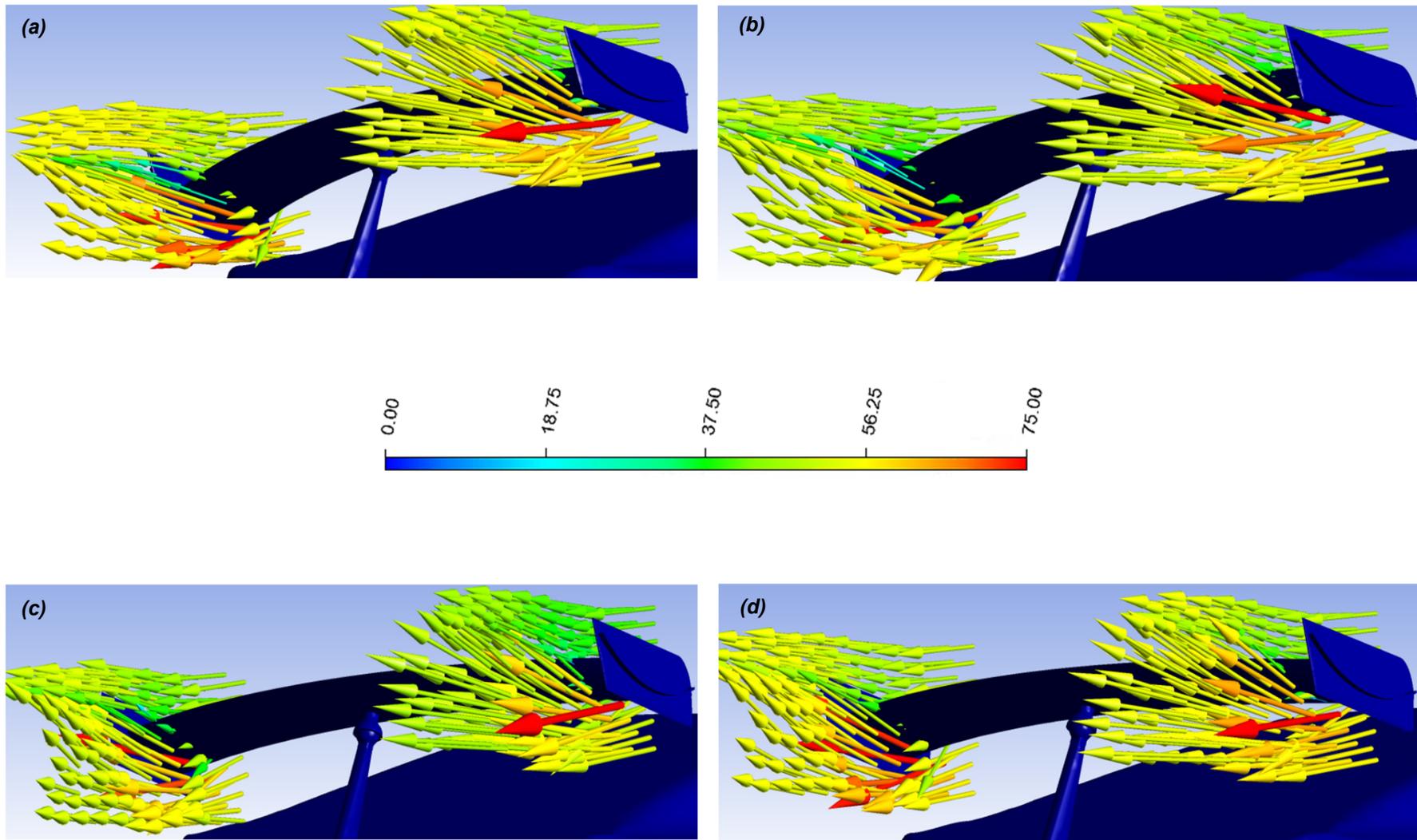
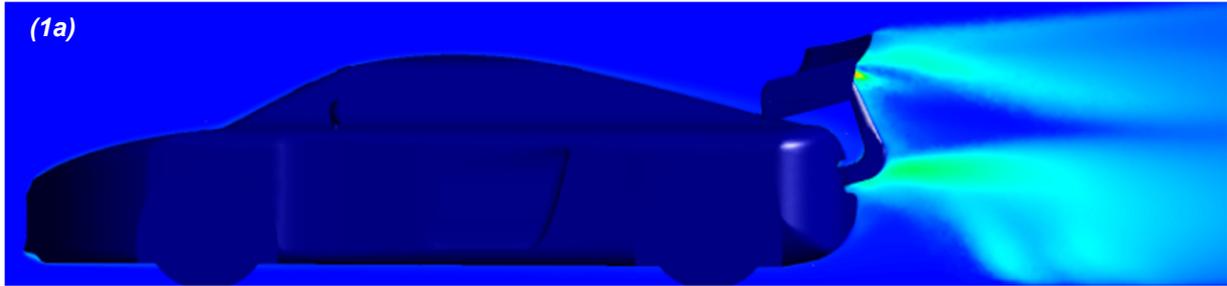
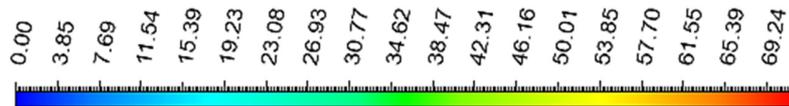


Figura 4.49. Vectores de velocidad. Caso alerón de ala centripeta.
a) Ángulo roll 12°, b) Ángulo roll 10°, c) Ángulo roll 7°, y d) Ángulo roll 5°.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO



(2a)



(2b)



4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

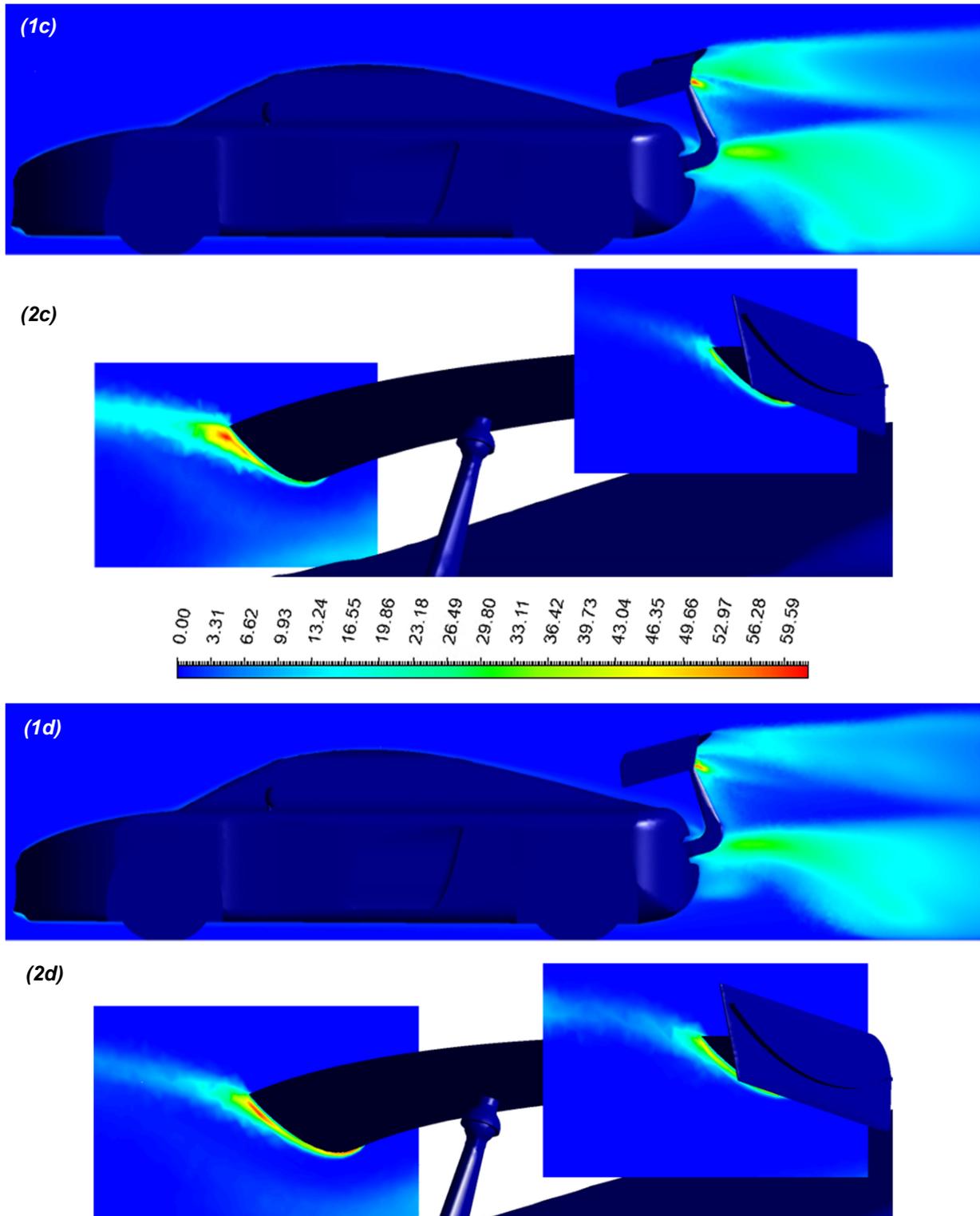
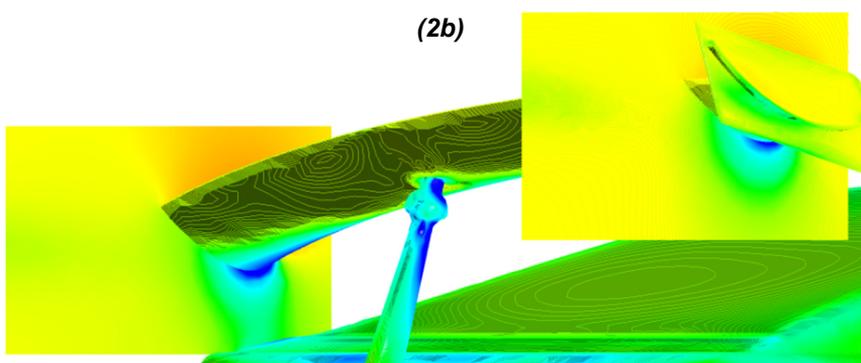
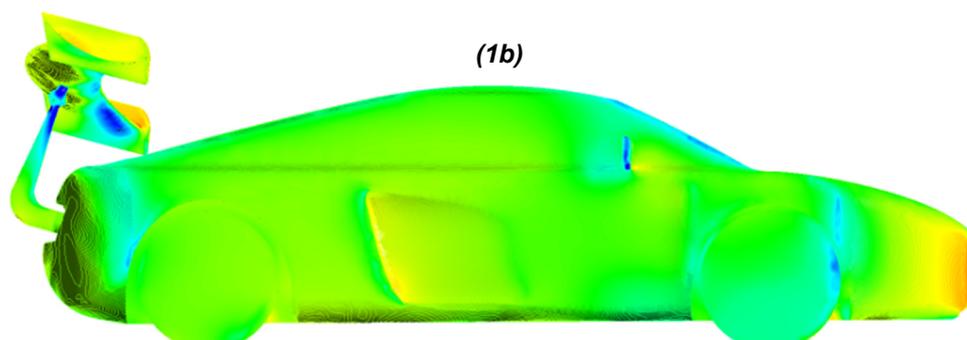
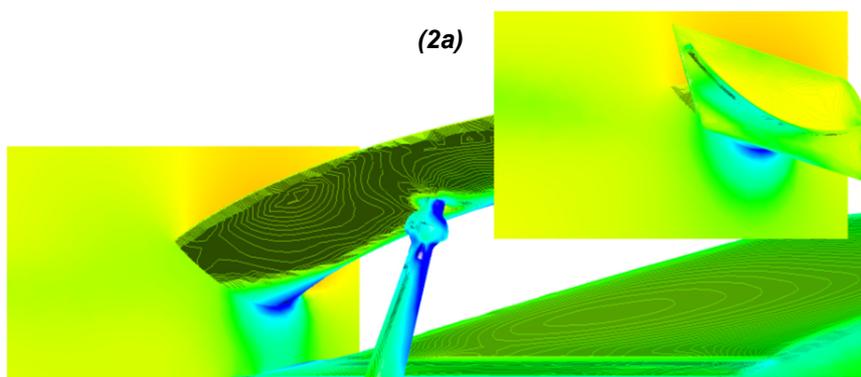
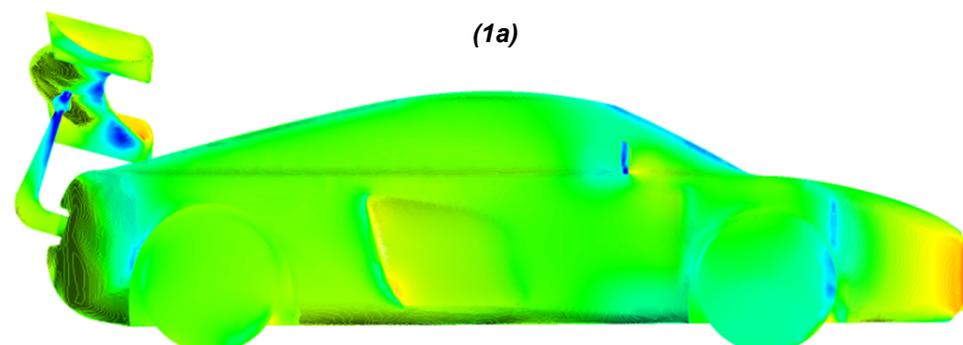


Figura 4.50. Contornos de ECT. Caso alerón de ala centrípeta.
a) Ángulo roll 12°, b) Ángulo roll 10°, c) Ángulo roll 7°, y d) Ángulo roll 5°.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO



4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

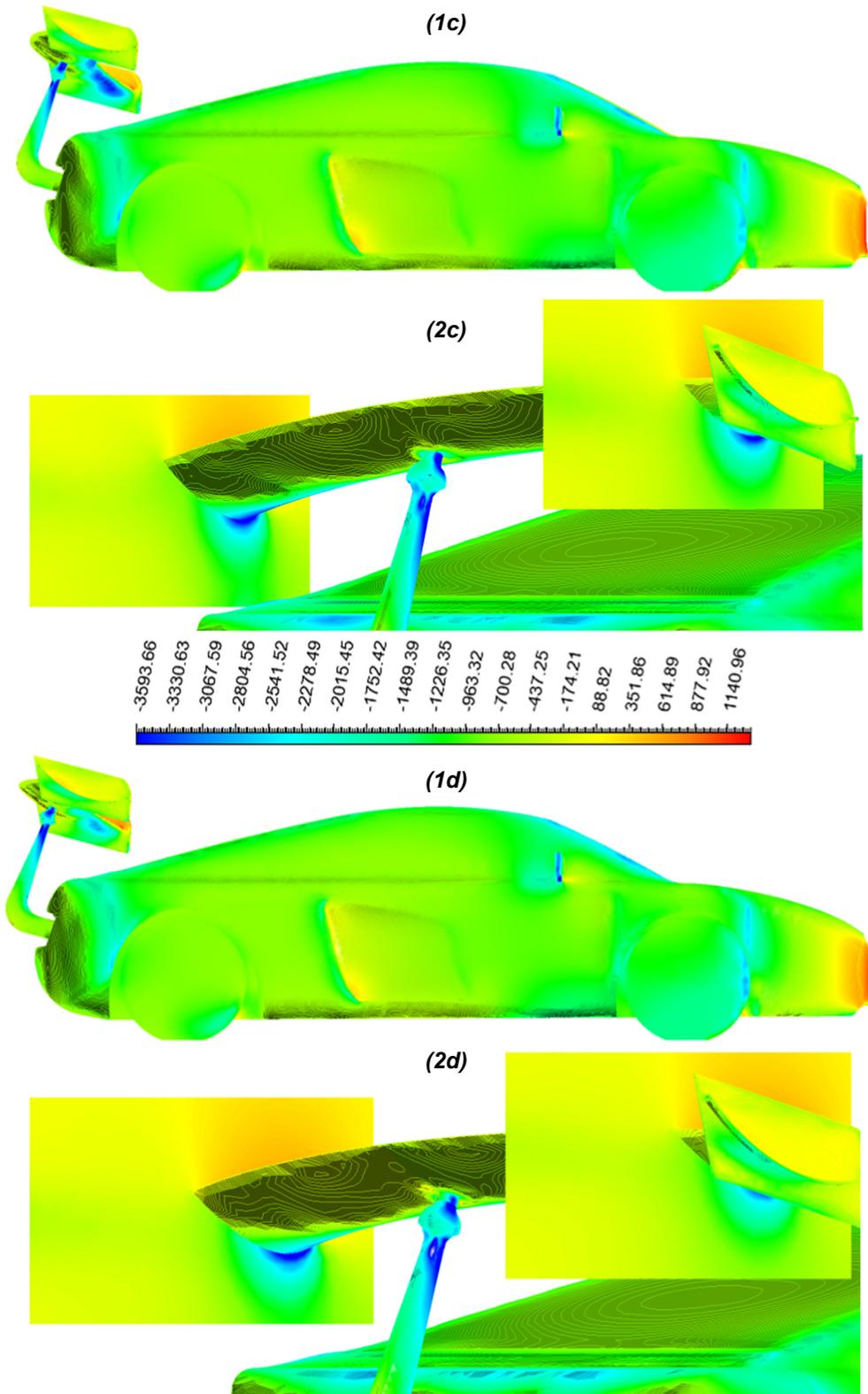
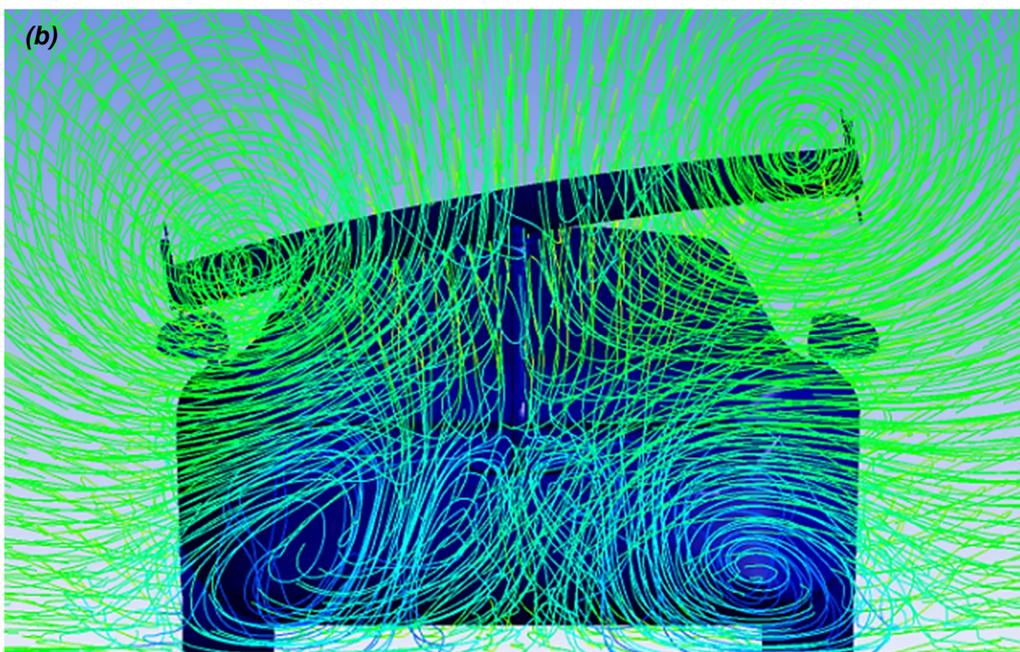
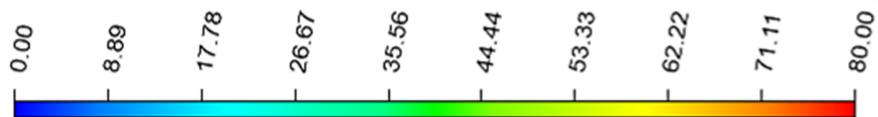
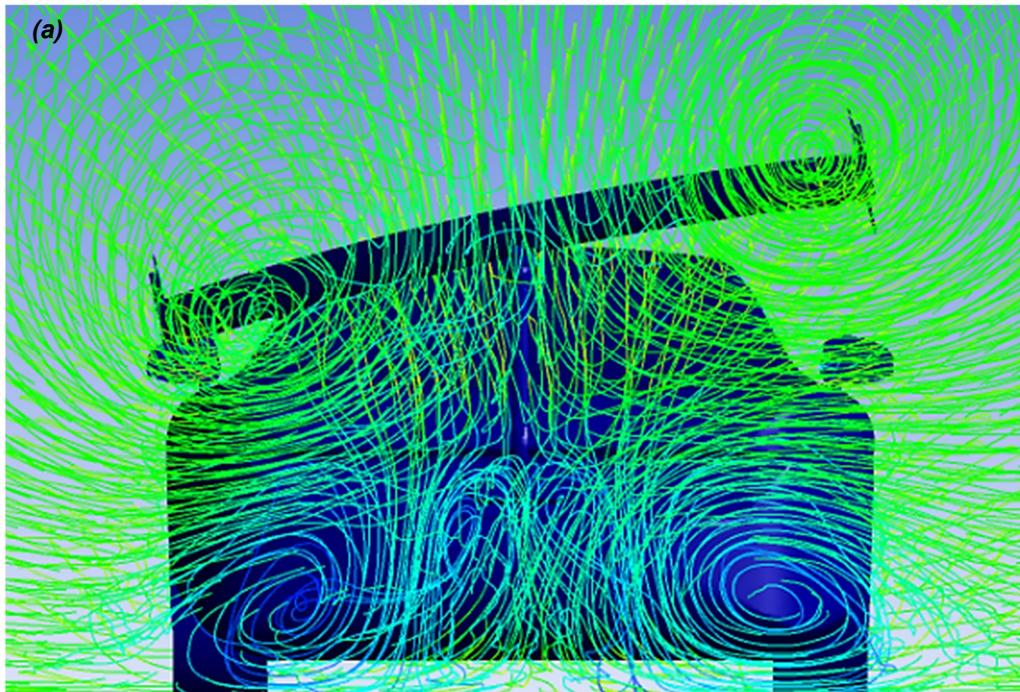
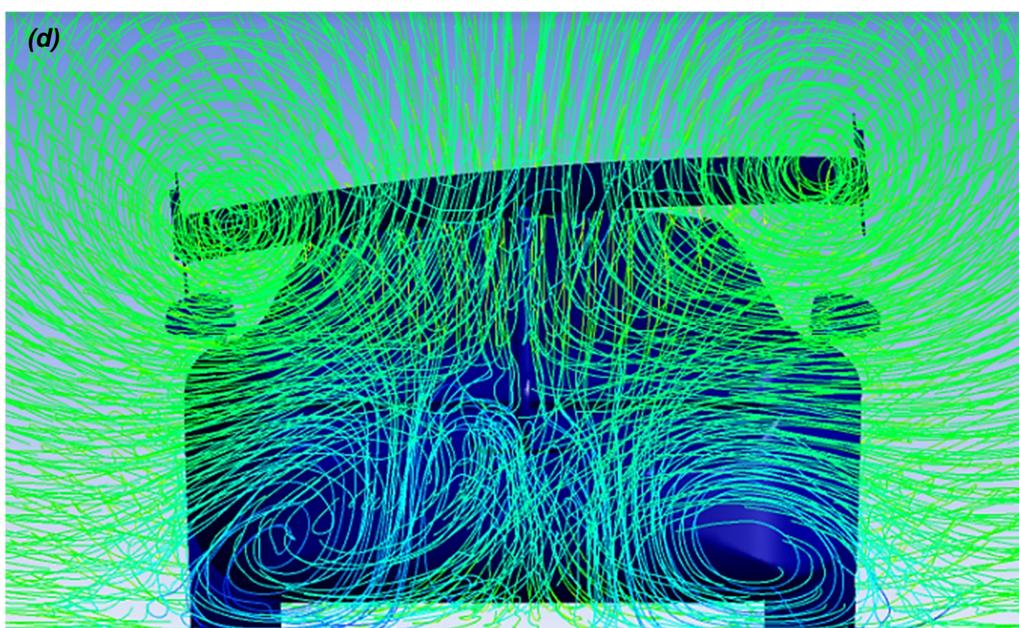
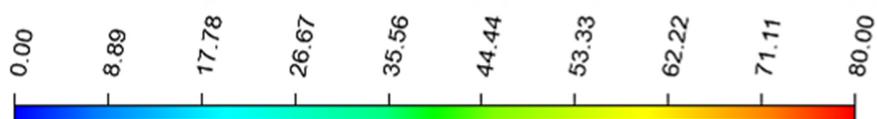
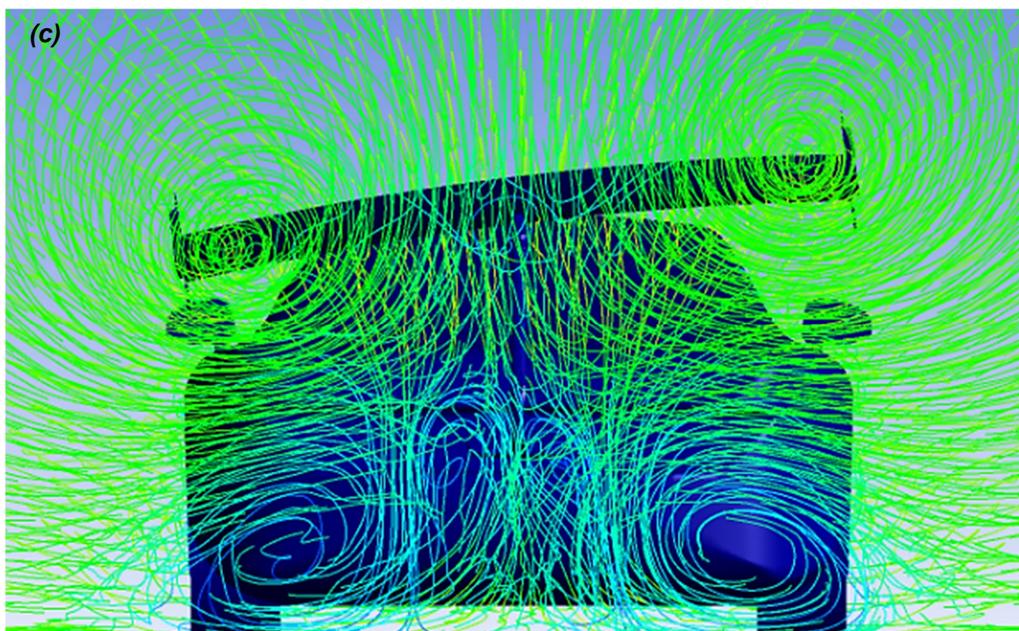


Figura 4.51. Contornos de presión. Caso alerón de ala centrípeta.
a) Ángulo roll 12°, b) Ángulo roll 10°, c) Ángulo roll 7°, y d) Ángulo roll 5°.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO



4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO



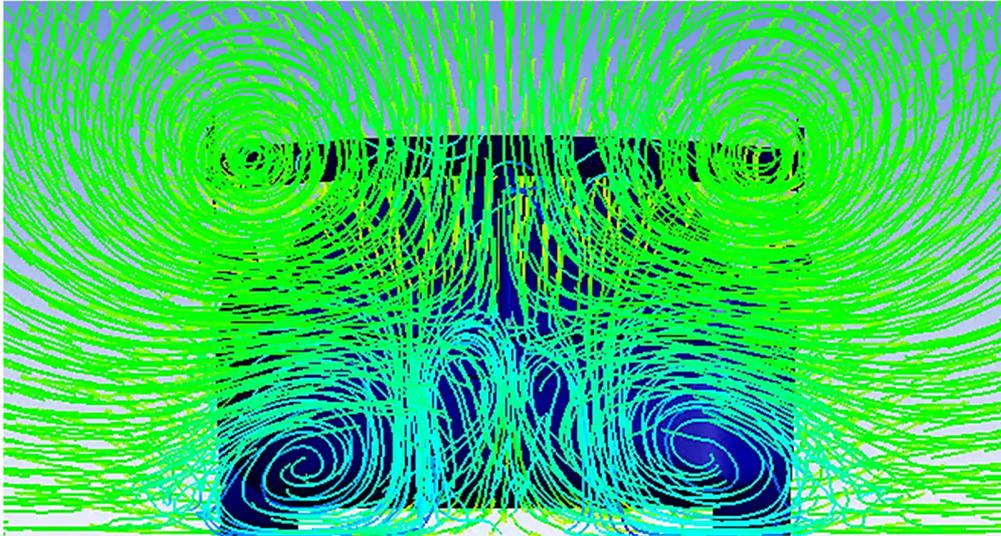


Figura 4.52. Líneas de flujo. Caso alerón de ala centrípeta.

a) Ángulo roll 12°, b) Ángulo roll 10°, c) Ángulo roll 7°, d) Ángulo roll 5°, y e) Ángulo roll 0°.

4.6.3. Resultados. Fuerzas de arrastre, sustentación y lateral y sus coeficientes. Variación del ángulo roll. Caso alerón de ala centrípeta.

La **Tabla 4.6.** muestra las fuerzas generadas sobre el vehículo, así como sus respectivos coeficientes, resultado de las simulaciones CFD para el caso alerón de ala centrípeta, utilizando diferentes ángulos roll del mismo. Además se tiene que:

$$A_{px} = 2.18 [m^2]$$

$$A_{py} = 8.12[m^2]$$

$$A_{pz} = 4.24, 4.21, 4.18, 4.14, 4.11 [m^2] \rightarrow 15^\circ, 12^\circ, 10^\circ, 7^\circ, 5^\circ \text{ respectivamente}$$

Tabla 4.6. Fuerzas y coeficientes obtenidos caso alerón de ala centrípeta

Ángulo roll [°]	F_D [N]	F_L [N]	F_z [N]	C_D $C_D = \frac{2F_D}{\rho u^2 A_{px}}$	C_L $C_L = \frac{2F_L}{\rho u^2 A_{py}}$	C_z $C_z = \frac{2F_z}{\rho u^2 A_{pz}}$
15	1234.93	-310.93	-332.88	0.458	-0.031	-0.063
12	1247.54	-320.96	-263.89	0.463	-0.032	-0.05
10	1244.79	-371.11	-249.23	0.461	-0.037	-0.048
7	1261.44	-401.20	-224.66	0.468	-0.04	-0.043
5	1260	-451.36	-157.87	0.467	-0.045	-0.031
0	1198	-461.39	-12	0.44	-0.046	-0.002

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

El principio de funcionamiento del alerón de ala centrípeta se basa en producir una fuerza de sustentación (F_L) superior en el extremo con mayor elevación del alerón con respecto a la parte trasera del vehículo; en este caso la parte derecha del automóvil. Por lo tanto, F_L es mayor en la parte más elevada del alerón, y menor en la región inferior de este. En la **Figura 4.53**, se aprecia lo previamente expresado, donde se muestran las fuerzas sobre el alerón.

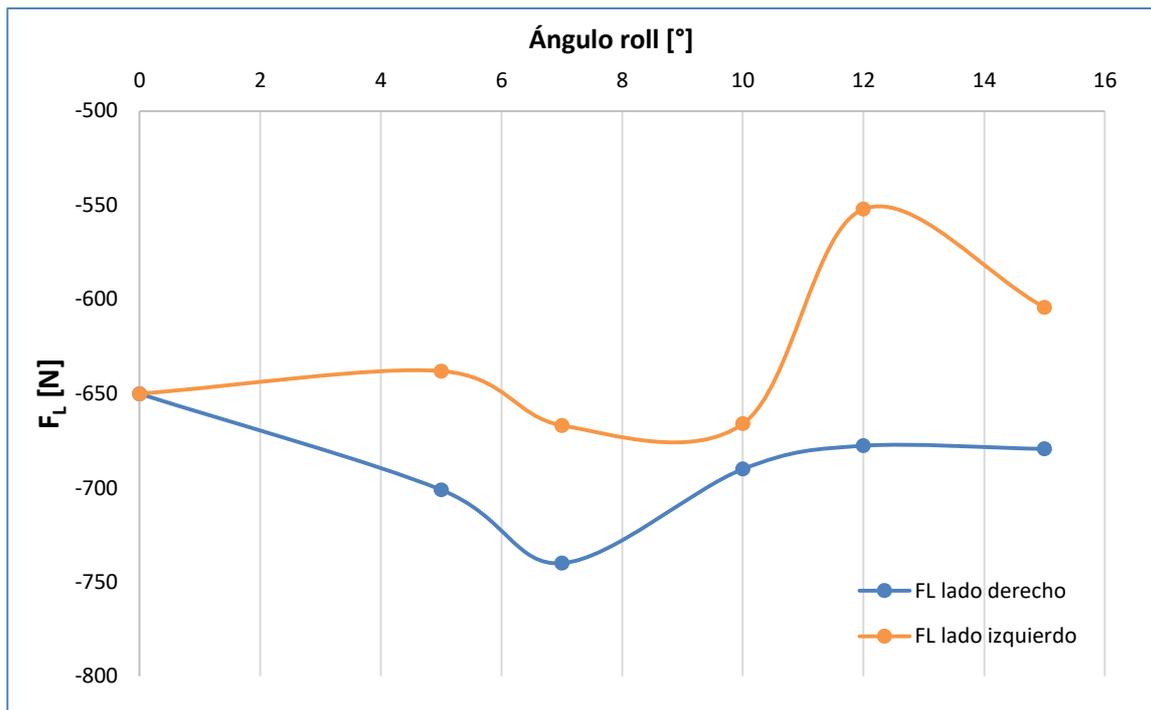


Figura 4.53. Fuerzas de sustentación en los extremos del alerón de ala centrípeta.

En la **Figura 4.54**, se muestran las fuerzas de arrastre (F_D), de sustentación (F_L) y laterales (F_z) como función del ángulo roll. Aparece la fuerza lateral debido a que la inclinación del alerón elimina la simetría del vehículo en la dirección lateral. F_D incrementa su hasta llegar a un máximo de aproximadamente 6° en el ángulo roll, después su valor empieza a disminuir. Por otro lado, en términos absolutos, mientras F_L decrece con el aumento del ángulo roll, F_z se va incrementando. Los coeficientes resultantes se muestran en la **Figura 4.55**. El coeficiente de arrastre (C_D), al igual que la fuerza presenta un máximo en 6° de ángulo roll. El coeficiente de sustentación (C_L) presenta su mínimo valor para un ángulo roll de 15° , en comparación con el coeficiente lateral (C_z) que corresponde al máximo valor.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

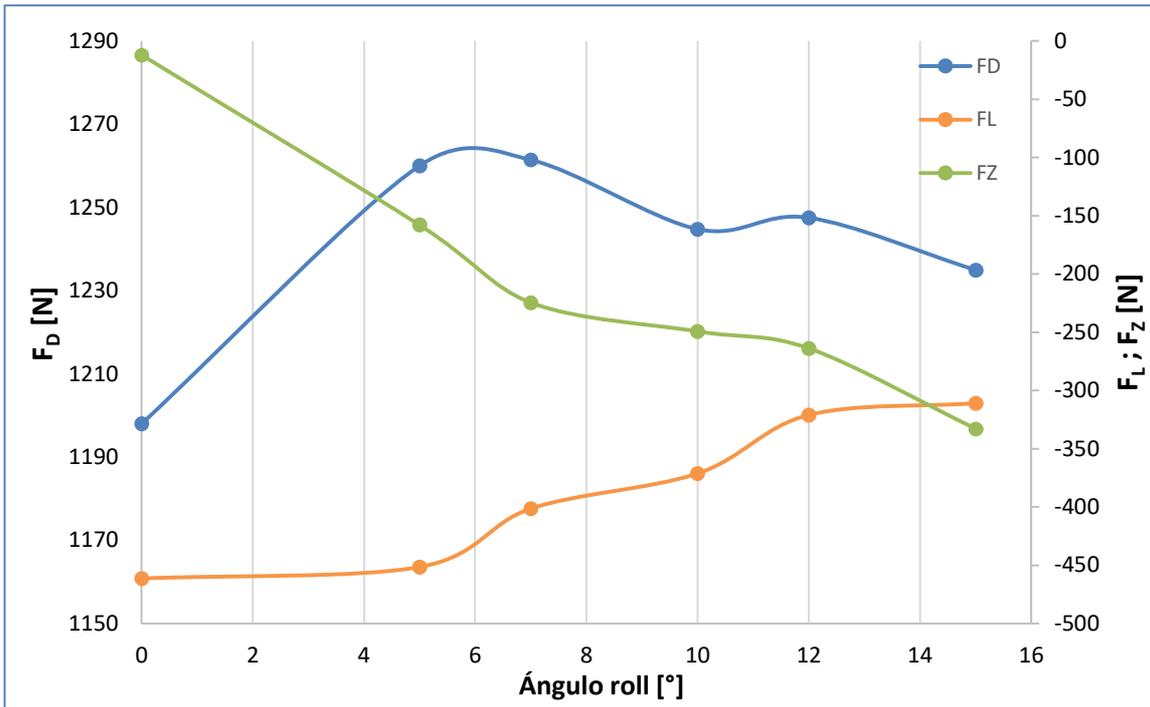


Figura 4.54. Fuerzas generadas sobre el vehículo CAAC.

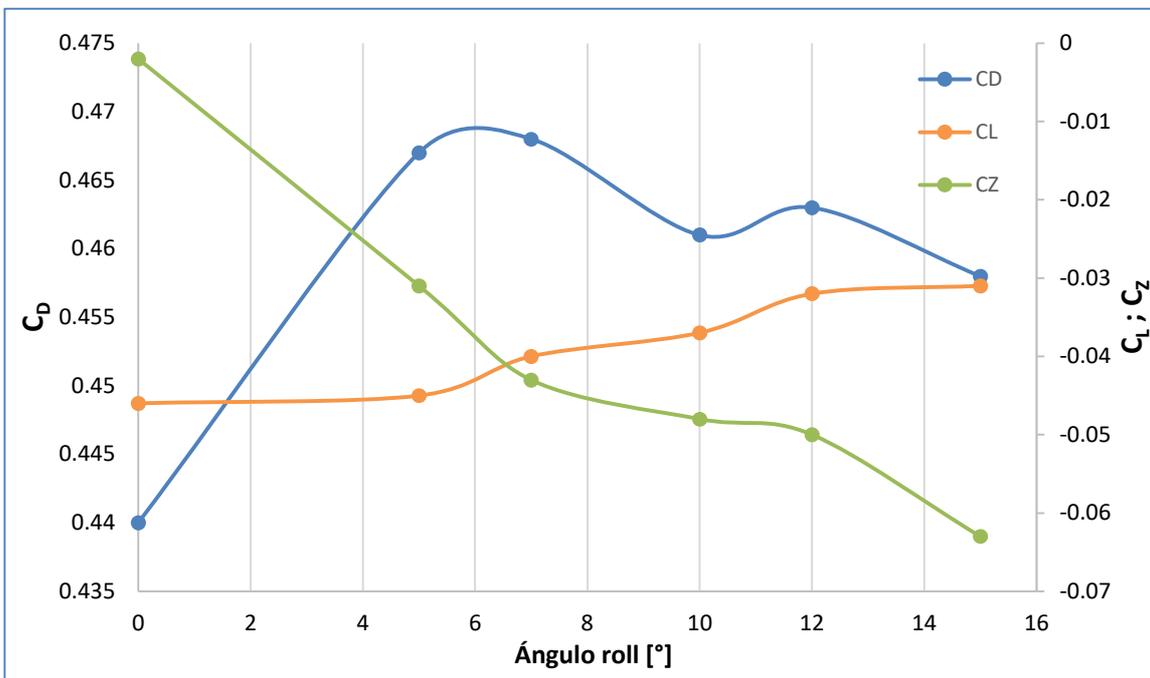


Figura 4.55. Coeficientes de arrastre, sustentación y lateral del vehículo CAAC.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

4.7. Caso alerón ala centrípeta en trayectoria curva, (CAAC en trayectoria curva).

Para el presente caso se utiliza el mismo modelo de la **Figura 4.42**. Simulando el paso del vehículo por una curva con dirección a la derecha. Como se ha expresado anteriormente, la principal función de este tipo de alerón es compensar la pérdida de tracción en las ruedas al paso de este por una curva. La configuración del presente caso se ilustra en la **Figura 4.56**.

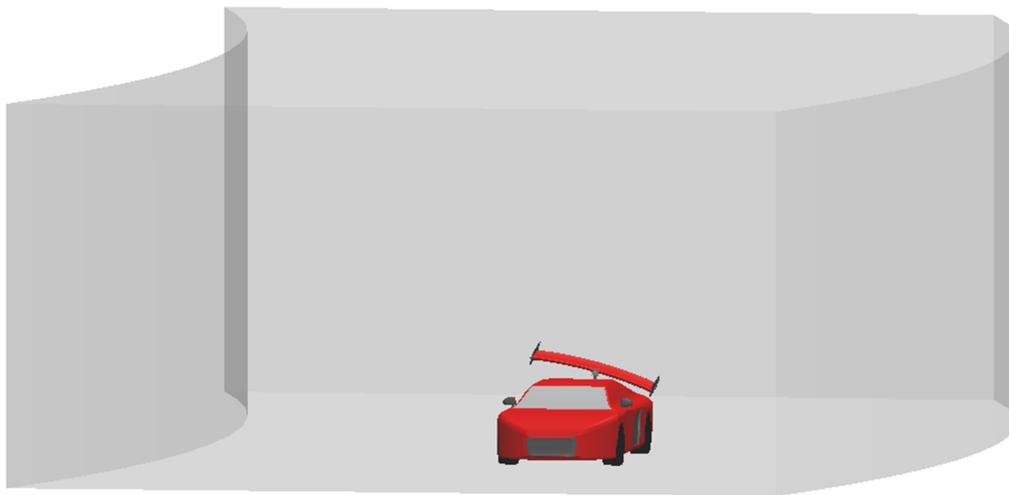


Figura 4.56. Modelo Audi R8 ala centrípeta, simulando el paso por una curva a la derecha.

Similar al caso anterior, se mantiene una velocidad en el flujo de 45 m/s, sin embargo, al ser un flujo en trayectoria curva (15.55 grados), se tienen 2 componentes de la velocidad: $u=43.35$; $w= 12.06$ [m/s], que se muestra en la **Figura 4.57**. Primero se presentará el caso con un ángulo roll de 15°. Posterior se varía el ángulo roll a 0°, 5° y 10°.

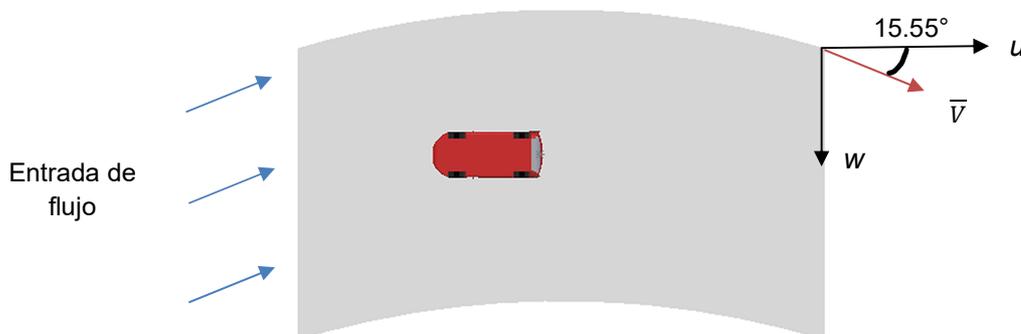


Figura 4.57. Modelo Audi R8 ala centrípeta, componentes de la velocidad.

4.7.1. Resultados del caso alerón de ala centrípeta en trayectoria curva. Ángulo roll de 15°.

De acuerdo con los contornos de velocidad, **Figura 4.58**, se muestra que el flujo en el plano medio es parecido al caso anterior (flujo en trayectoria recta). Las principales diferencias se localizan en la parte trasera, donde el flujo de aire en la parte baja del alerón se acelera más dejando una estela más larga comparada con su contraparte en la parte elevada, como se muestra en la **Figura 4.58b y 4.58c**, esta zona de recirculación es de mayor tamaño debido a la aceleración que presenta el flujo entre el alerón y el maletero del vehículo.

Estos cambios en la velocidad, hacen que en los contornos de presión, **Figura 4.59**, se presente un cambio en su valor, nótese en la **Figura 4.59d**; la parte elevada tiene mayor región de presión negativa o de vacío que se genera debajo del alerón. A diferencia del caso anterior donde el flujo era paralelo al automóvil, el extremo inferior presentaba un ΔP mayor que en la parte elevada. Cuando el flujo es curvo, el ΔP generado en el extremo elevado del alerón es mayor que cuando el flujo es recto, así, el rendimiento del alerón es el adecuado para una trayectoria curva, Este efecto ayuda significativamente a aumentar la tracción del vehículo en una curva.

Por su parte, la energía cinética en la parte trasera **Figura 4.60**, presenta fluctuaciones equivalentes a 7.3m/s, en particular los valores son inferiores al caso del flujo en trayectoria recta en un 12%. Esto es indicativo de que el alerón de ala centrípeta tiene mejor interacción con un flujo que tiene trayectoria curva.

De acuerdo con las líneas de trayectoria del flujo que se muestran en la **Figura 4.62**, se generó un menor número de vórtices que para el caso del flujo sin los efectos de la curva. Además, se muestra que el flujo saliente de la parte trasera del vehículo, toma la misma dirección que el flujo, la **Figura 4.61a** indica, igualmente, lo antes mencionado.

Para este caso se generaron las fuerzas de arrastre (F_D), sustentación (F_L) y lateral (F_z) que se muestran en la **Tabla 4.7**. De acuerdo con esta tabla, las fuerzas de sustentación crecieron con el efecto del flujo curvado.

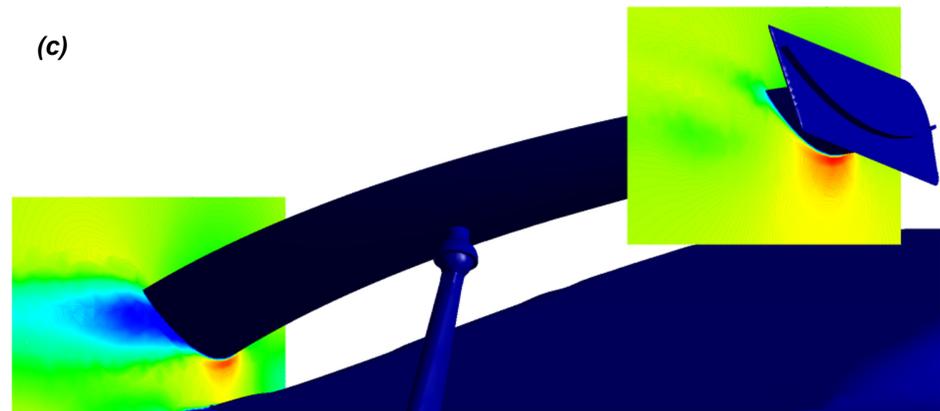
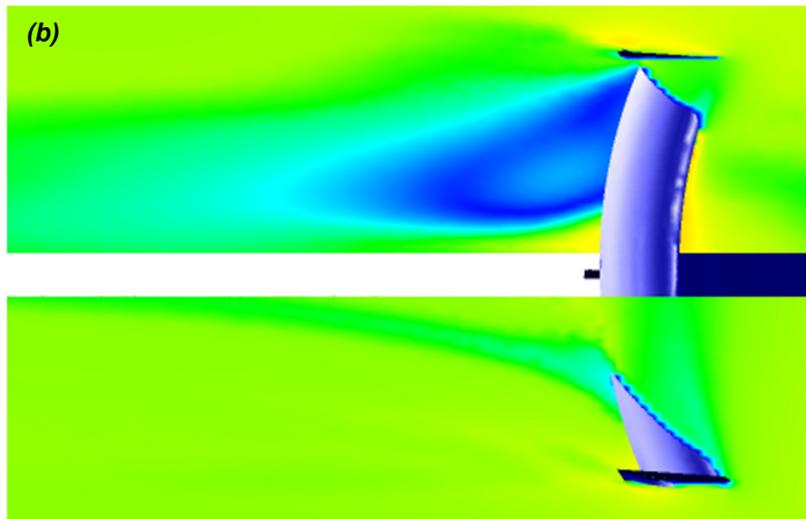
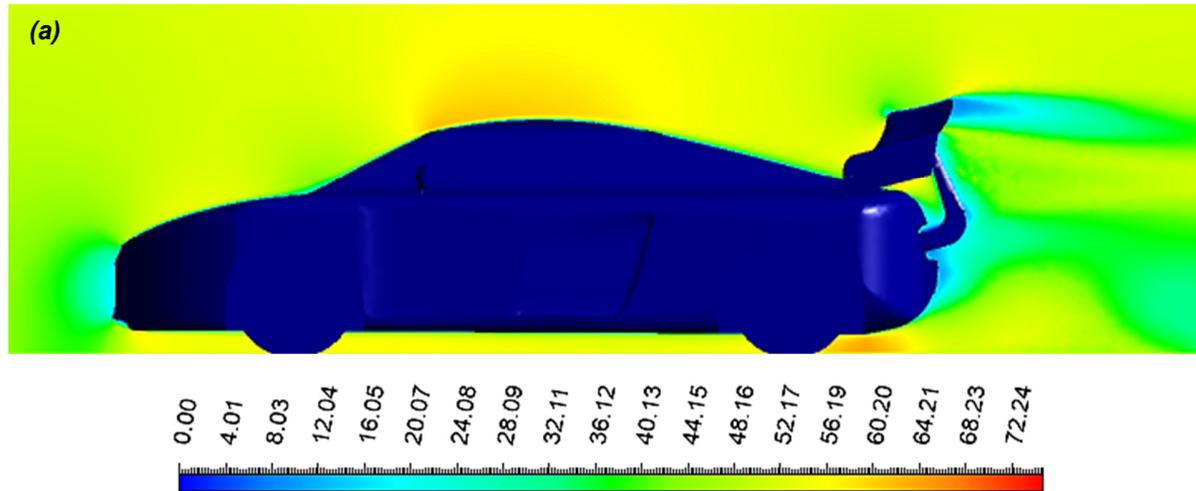


Figura 4.58. Contorno de velocidad. Caso alerón de ala centrípeta en trayectoria curva.

a) Vista lateral del plano medio, b) Vista superior de planos sobre el ala, y c) Vista de planos en los extremos del ala. Ángulo roll 15° .
 $Re=13.9 \times 10^6$.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

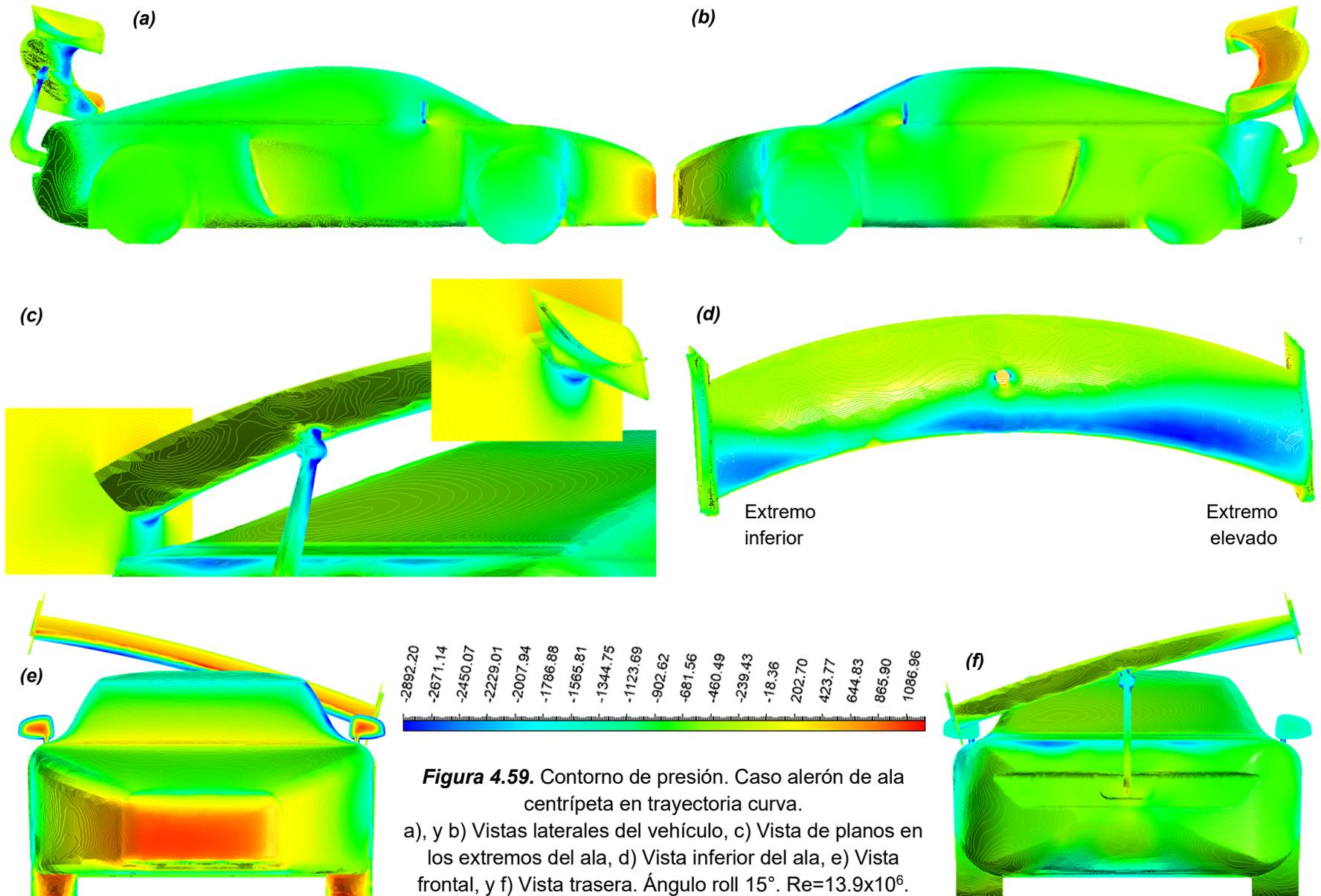


Figura 4.59. Contorno de presión. Caso alerón de ala centrípeta en trayectoria curva.
 a), y b) Vistas laterales del vehículo, c) Vista de planos en los extremos del ala, d) Vista inferior del ala, e) Vista frontal, y f) Vista trasera. Ángulo roll 15°. $Re=13.9 \times 10^6$.

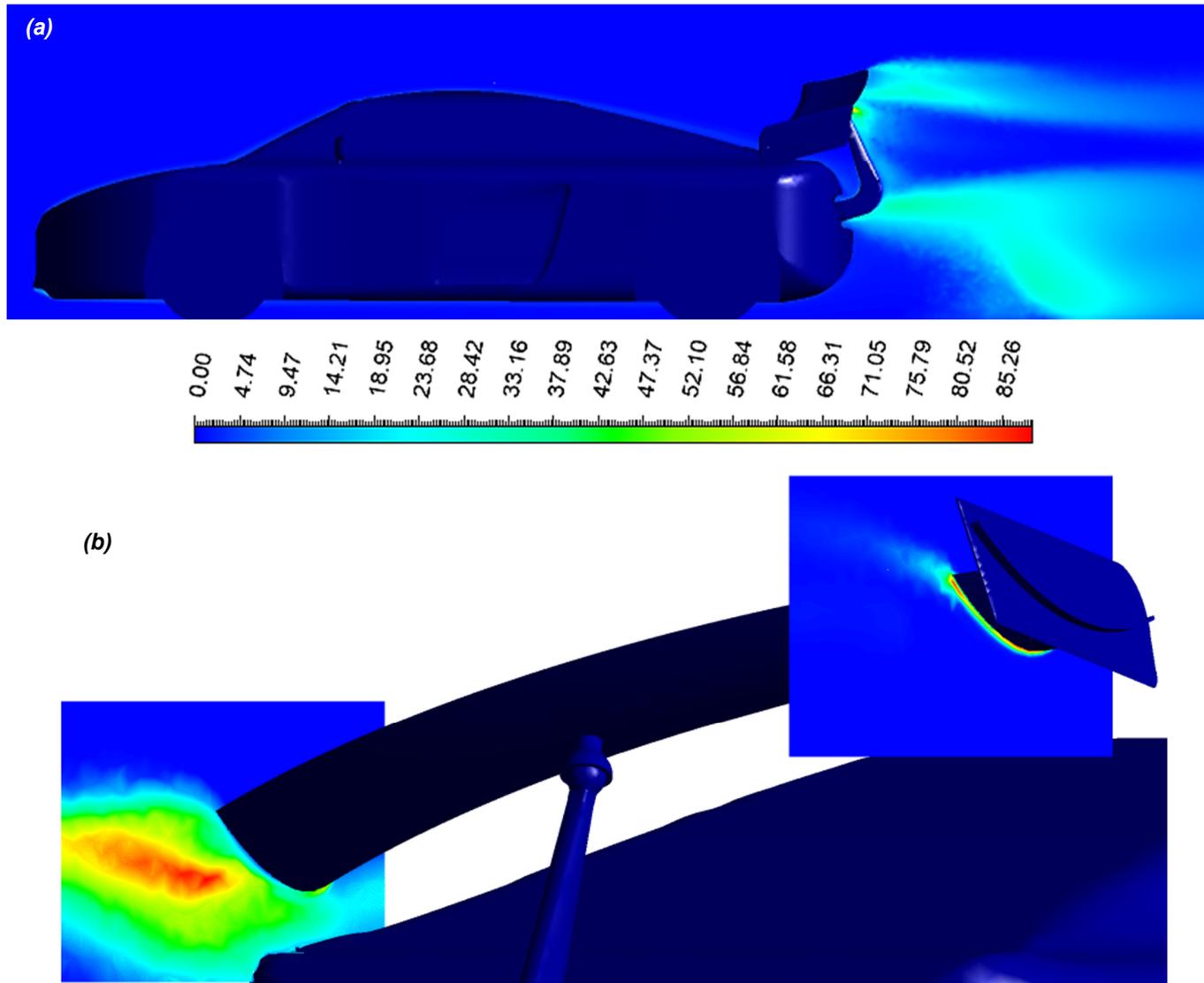


Figura 4.60. Contorno de ECT. Caso alerón de ala centrípeta en trayectoria curva.
 a) Vista lateral del plano medio, y b) Vista de planos en los extremos del ala. Ángulo roll 15° . $Re=13.9 \times 10^6$.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

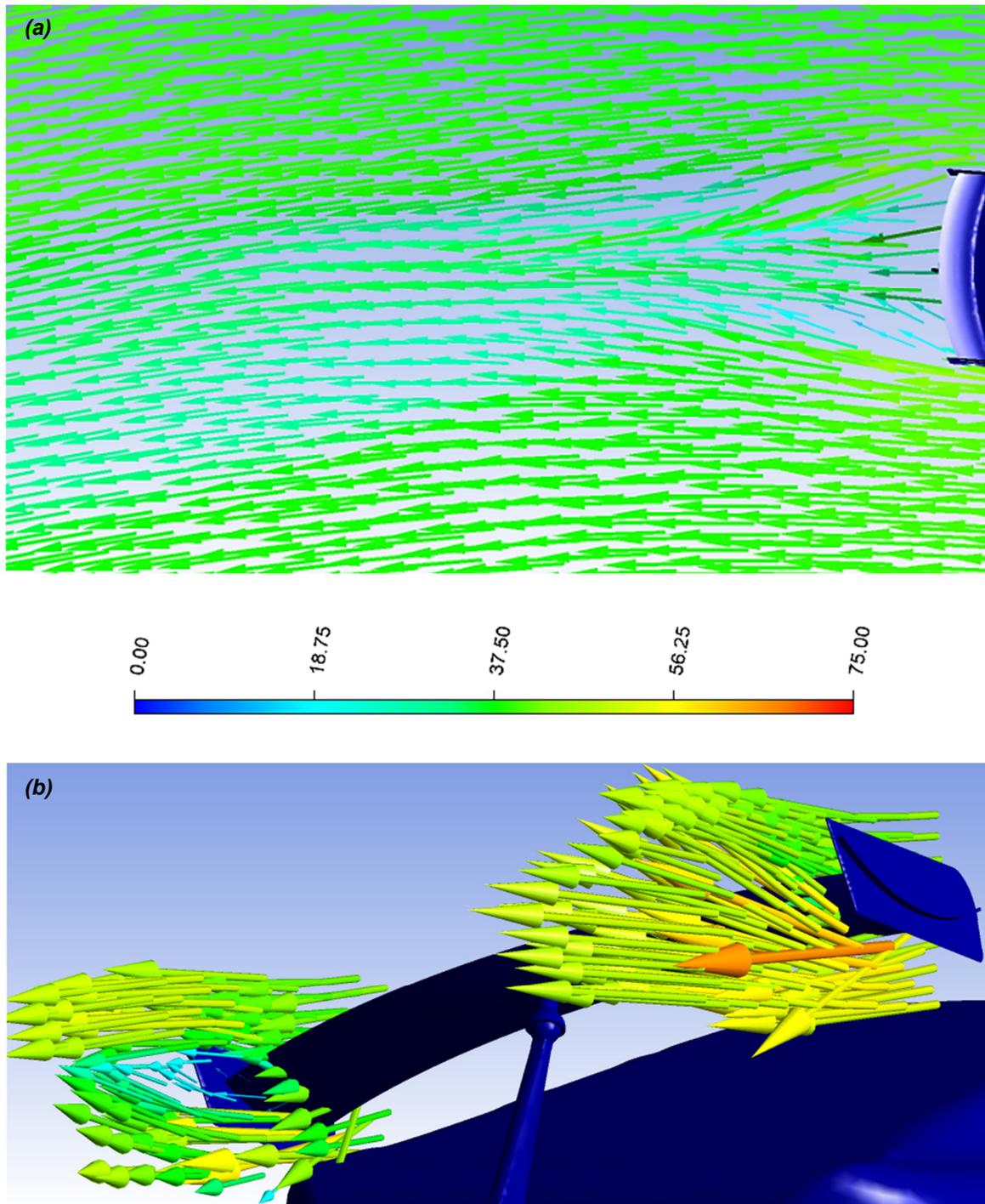


Figura 4.61. Vectores de velocidad. Caso alerón de ala centrípeta en trayectoria curva.
a) Vista superior del plano medio en el vehículo, y b) Vista de planos en los extremos del ala.
Ángulo roll 15° . $Re=13.9 \times 10^6$.

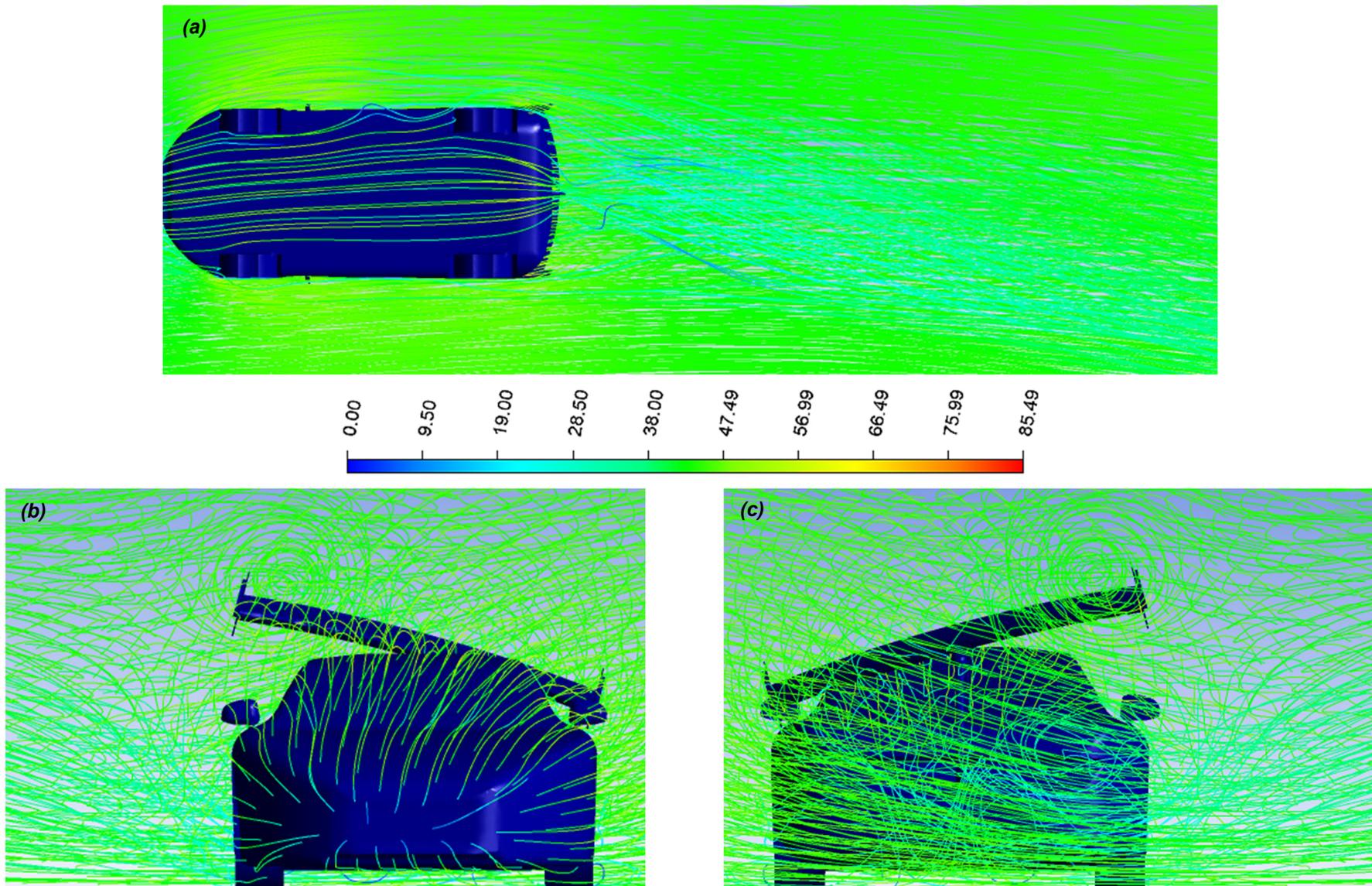
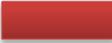


Figura 4.62. Líneas de flujo. Caso alerón de ala centrípeta en trayectoria curva. a) Vista inferior, b) Vista frontal, y c) Vista trasera. Ángulo roll 15° . $Re=13.9 \times 10^6$.



4.7.2. Resultados. Contornos de velocidad y vectores, presión, energía cinética turbulenta y líneas de trayectoria. Variación del ángulo roll. Caso alerón de ala centrípeta en trayectoria curva.

Las **Figuras 4.63, 4.64, 4.65, 4.66 y 4.67**, muestran los resultados obtenidos cuando el vehículo se encuentra tomando una curva hacia la derecha, variando el ángulo roll a: 10° , 5° y 0° , manteniendo el ángulo de ataque (AoA) a 13° . En las figuras se aprecia que la estelas en los extremos del alerón cambian de tamaño dependiendo del ángulo roll del alerón.

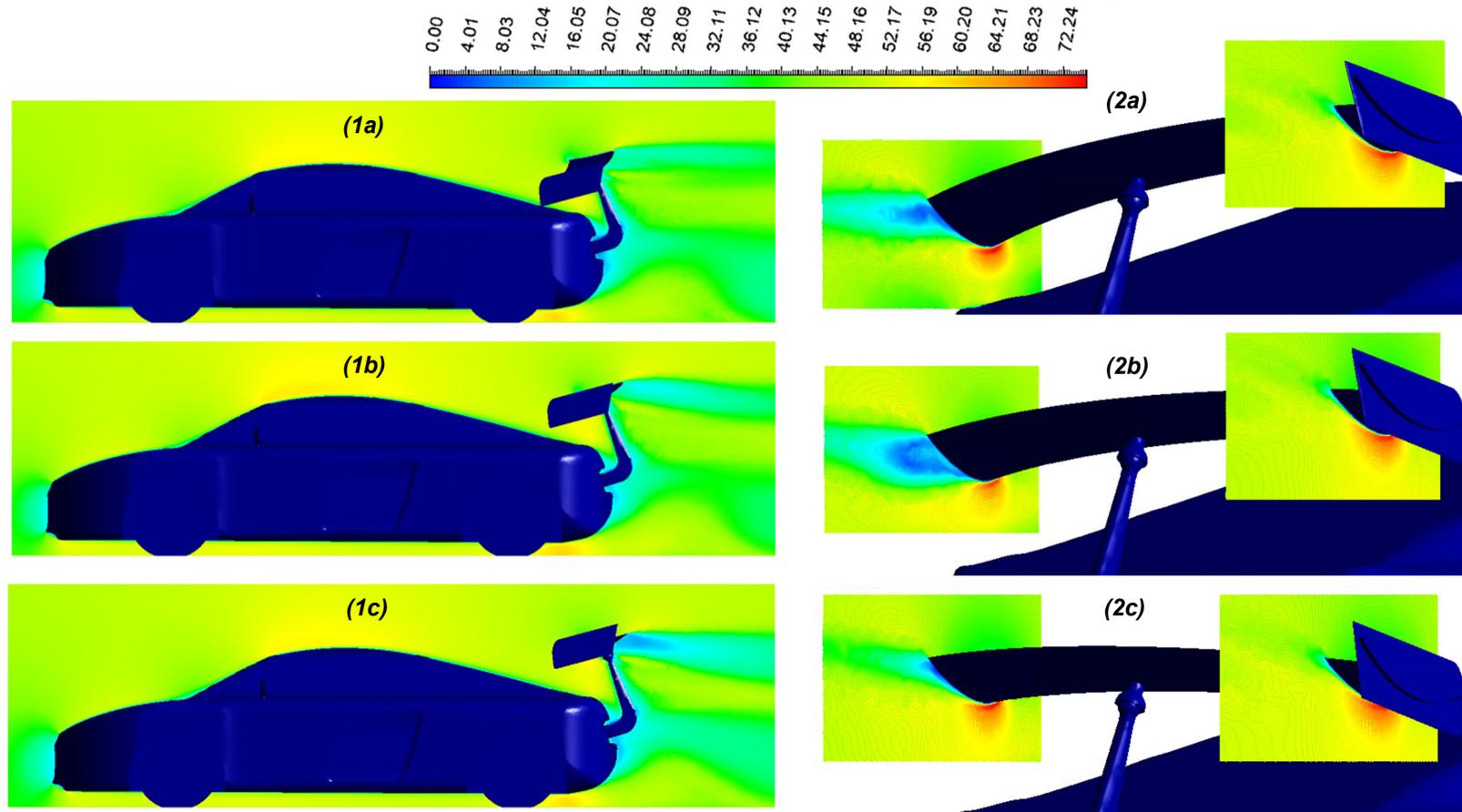


Figura 4.63. Contornos de velocidad. Caso alerón de ala centrípeta en trayectoria curva.
a) Ángulo roll 10° , b) Ángulo roll 5° , y c) Ángulo roll 0° .

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

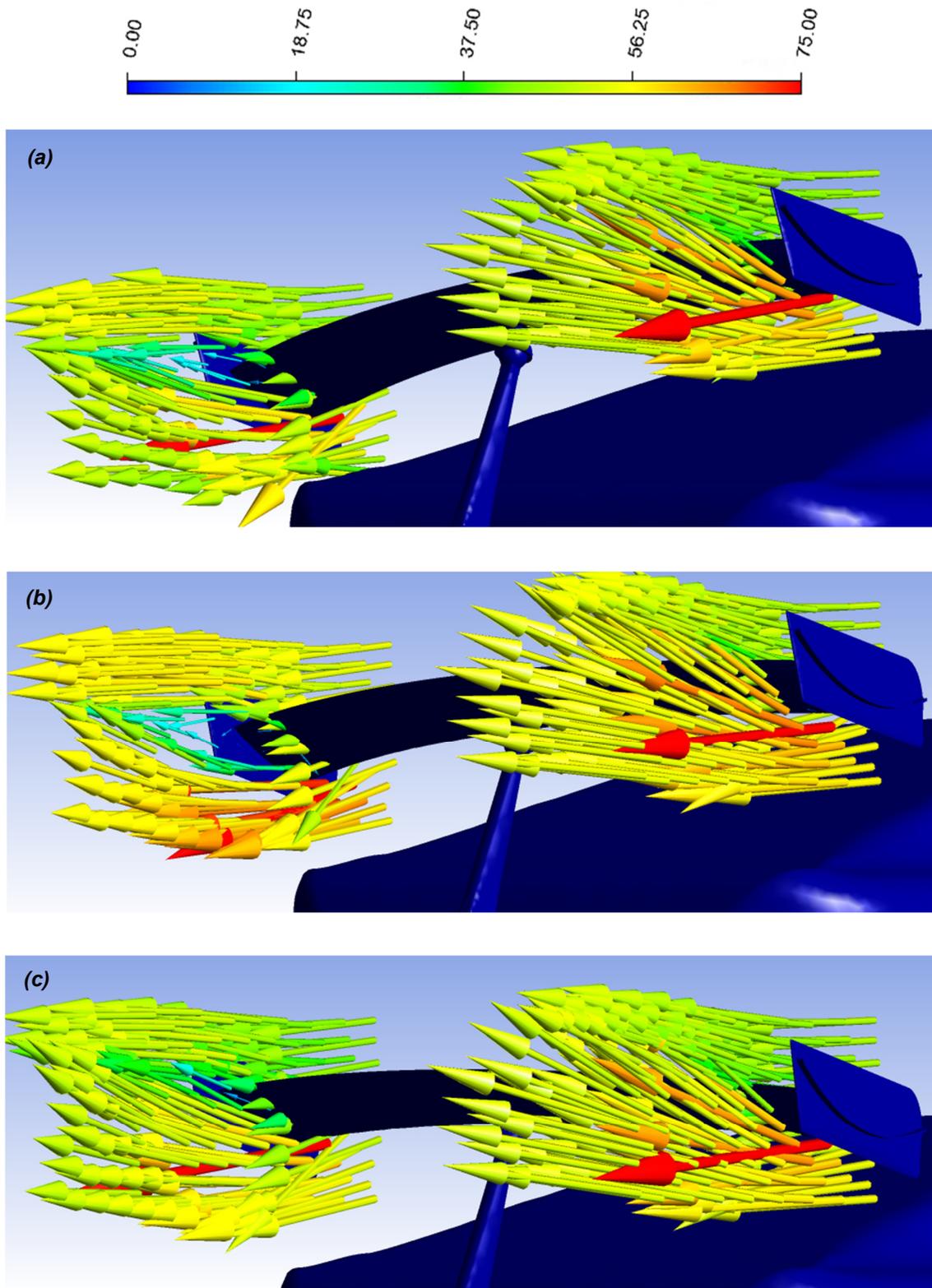


Figura 4.64. Vectores de velocidad. Caso alerón de ala centrípeta en trayectoria curva.
a) Ángulo roll 10°, b) Ángulo roll 5°, y c) Ángulo roll 0.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

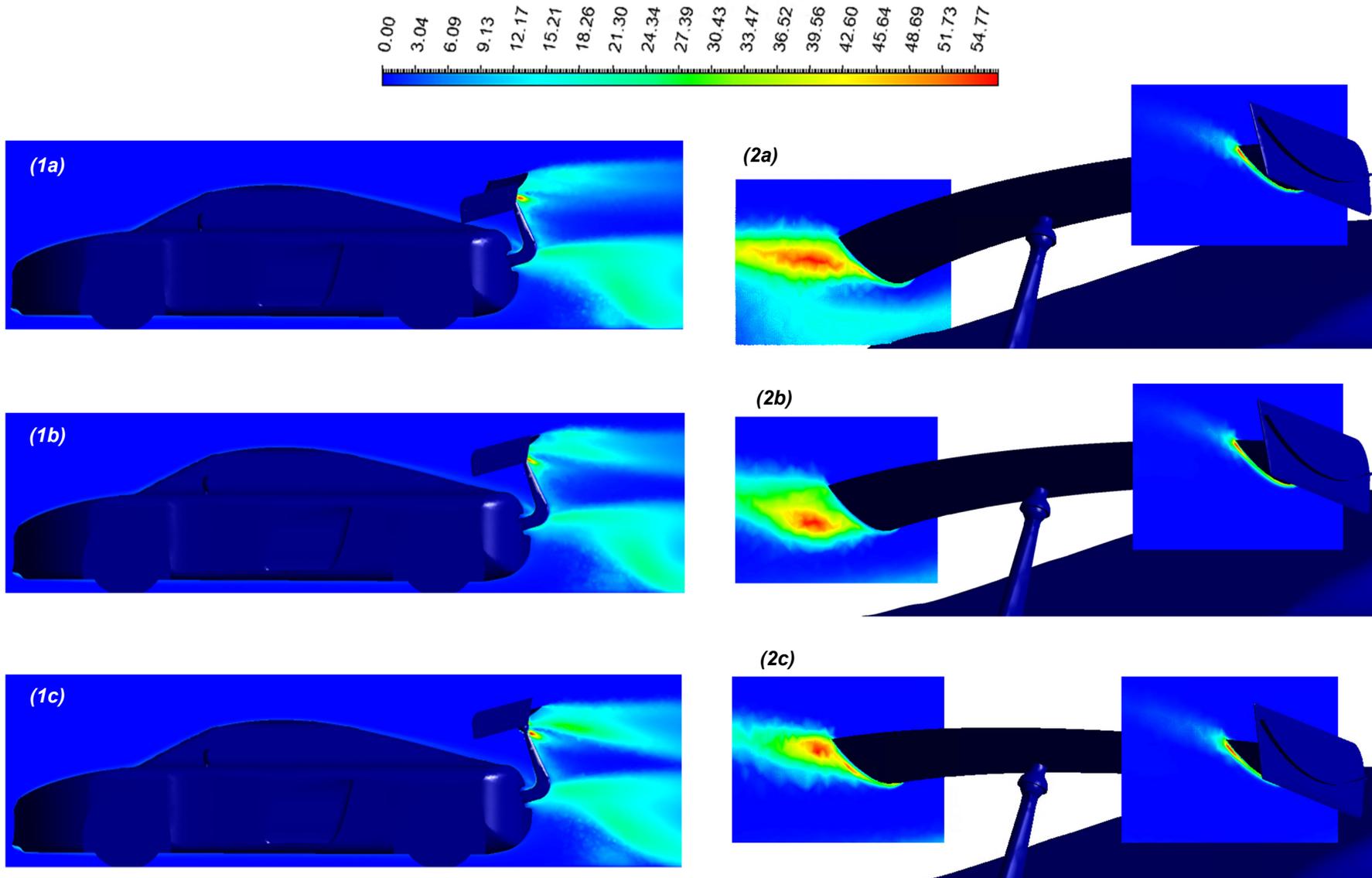


Figura 4.65. Contornos de ECT. Caso alerón de ala centrípeta en trayectoria curva
a) Ángulo roll 10° , b) Ángulo roll 5° , y c) Ángulo roll 0° .

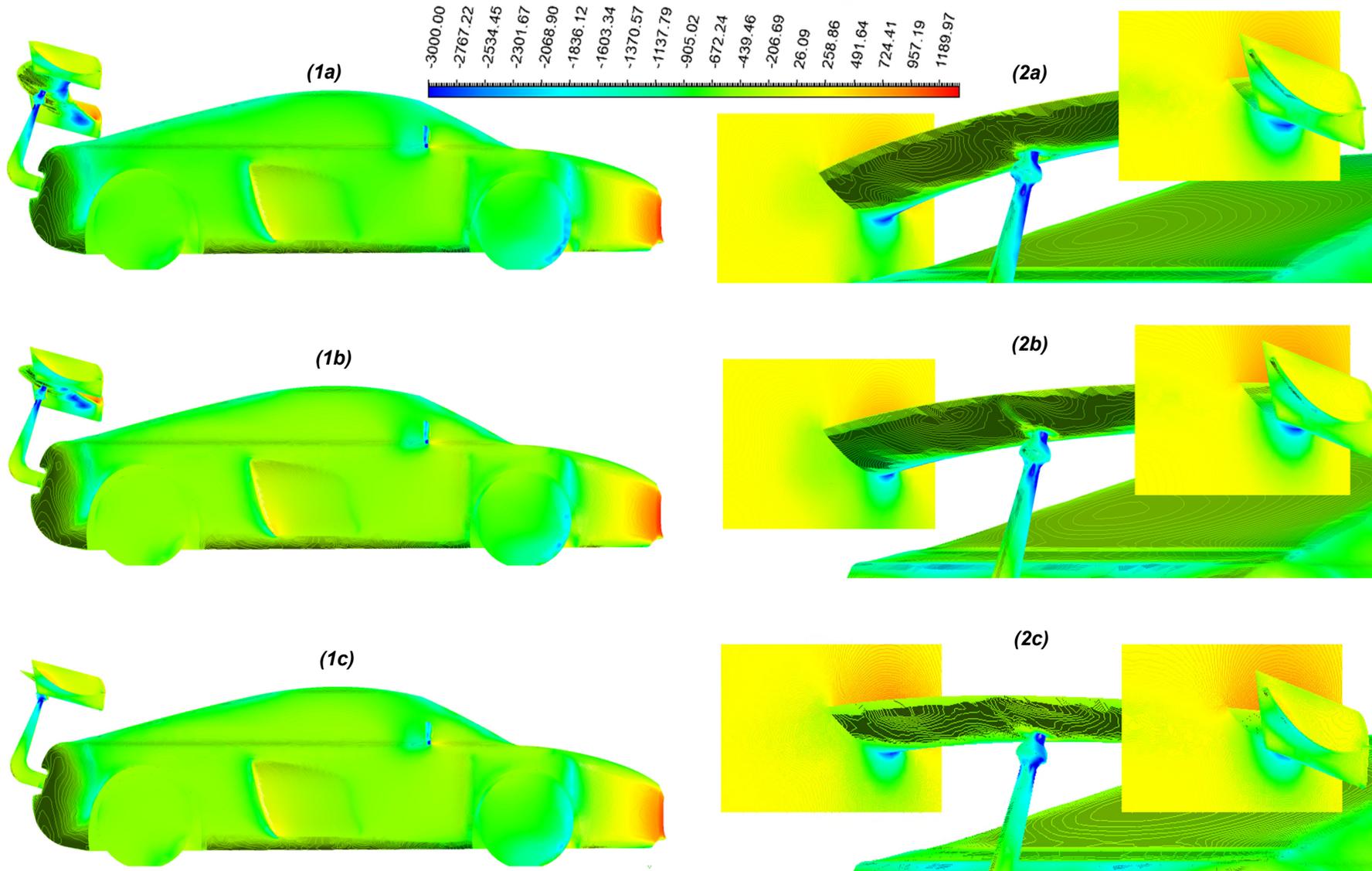


Figura 4.66. Contornos de presión. Caso alerón de ala centrípeta en trayectoria curva.
 a) Ángulo roll 10°, b) Ángulo roll 5°, y c) Ángulo roll 0°.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

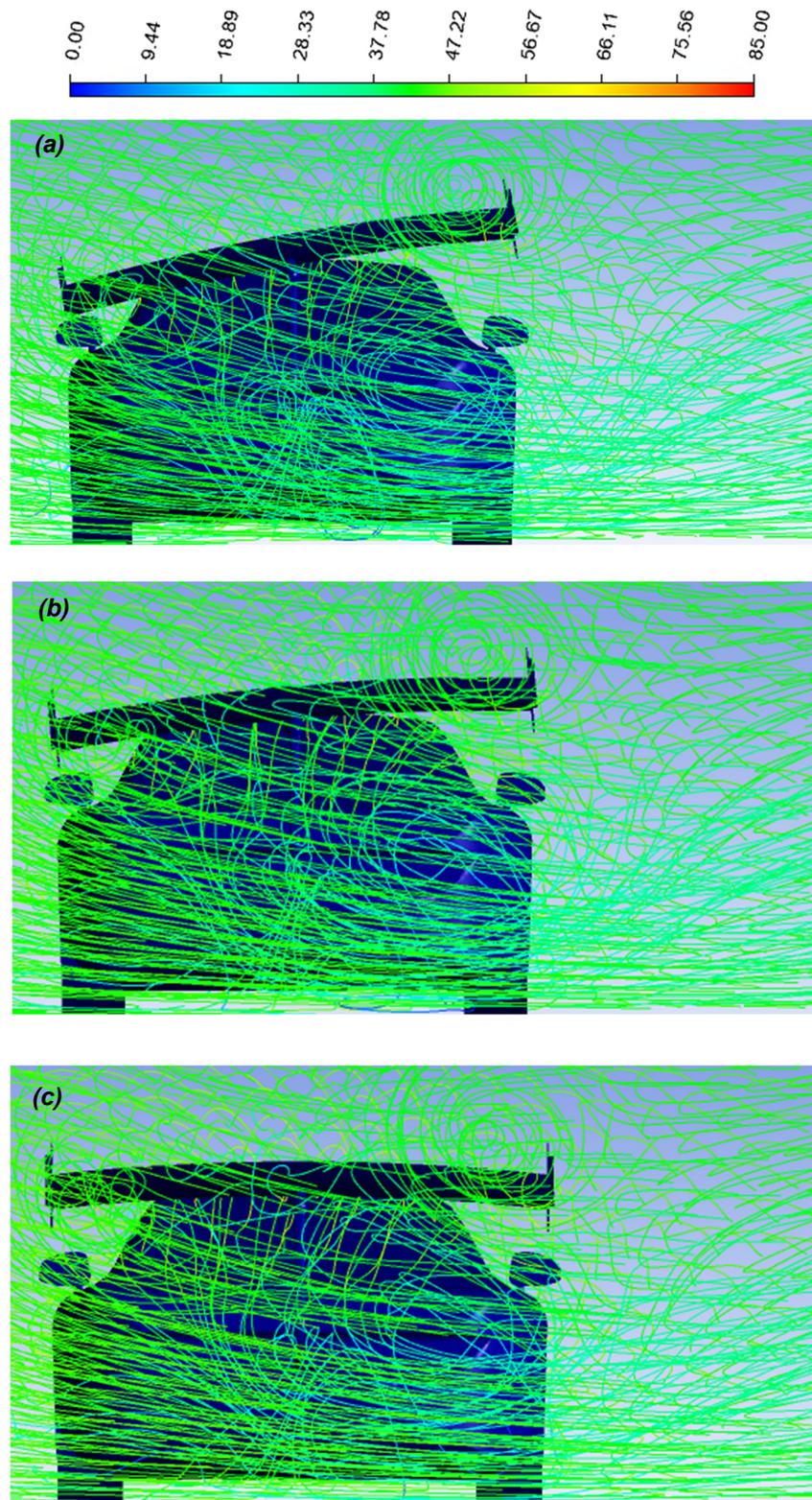


Figura 4.67. Líneas de flujo. Caso alerón de ala centripeta en trayectoria curva.
a) Ángulo roll 10°, b) Ángulo roll 5°, y c) Ángulo roll 0°.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

4.7.3. Resultados de fuerza de arrastre, de sustentación y lateral, y sus coeficientes. Variación del ángulo roll. Caso alerón de ala centrípeta en trayectoria curva.

La **Tabla 4.7**. muestra las fuerzas generadas sobre el vehículo, así como sus respectivos coeficientes, resultado de las simulaciones para el caso alerón de ala centrípeta encadenando una curva con dirección a la derecha, además se utilizan diferentes ángulos roll del mismo. Se tiene que:

$$A_{Px} = 2.18 [m^2]$$

$$A_{Py} = 8.12 [m^2]$$

$$A_{Pz} = 4.24, 4.18, 4.11, 4.04 [m^2] \rightarrow 15^\circ, 10^\circ, 5^\circ, 0^\circ \text{ respectivamente}$$

Tabla 4.7. Fuerzas y coeficientes obtenidos caso alerón de ala centrípeta en trayectoria curva.

Ángulo roll [°]	F_D [N]	F_L [N]	F_z [N]	C_D $C_D = \frac{2F_D}{\rho \bar{V}^2 A_{Px}}$	C_L $C_L = \frac{2F_L}{\rho \bar{V}^2 A_{Py}}$	C_z $C_z = \frac{2F_z}{\rho \bar{V}^2 A_{Pz}}$
15	1154.13	-258.23	-263.58	0.428	-0.025	-0.05
10	1152.15	-284.95	-154.22	0.427	-0.028	-0.029
5	1155.43	-334.16	-11.87	0.429	-0.033	-0.002
0	1090.68	-380.42	98.41	0.404	-0.037	0.019

Los datos de las fuerzas de la **Tabla 4.7** se muestran en la **Figura 4.68**. En esta figura se muestra que la fuerza lateral tiende a ser positiva conforme el ángulo roll del alerón se acerca a 0° , lo que indica que el vehículo pierde tracción en la parte interior con respecto a la curva. Nótese que el término de ala centrípeta hace honor a lo anterior, debido a que la fuerza centrípeta (signo negativo) atrae al vehículo hacia el centro de la curva, permitiéndole mejor tracción, estabilidad y velocidad en un trayecto curvilíneo. Cuando el ángulo roll del alerón es mayor, la fuerza lateral sobre el ala es mayor, permitiendo que el vehículo tenga mejor adherencia al suelo, sin tender a un efecto de vuelco del vehículo, provocado por la fuerza centrífuga. En particular se aprecia que en el caso anterior donde el vehículo lleva una trayectoria recta, de manera similar, la fuerza lateral decrece conforme el ángulo de

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

roll disminuye, la diferencia radica en los intervalos de fuerza entre cada ángulo, son relativamente pequeños en comparación con el presente caso, donde incluso para el ángulo roll de 0° se tiene una fuerza lateral positiva que indica que el vehículo pierde tracción en las ruedas de la parte interior, y posiblemente este puede volcar si esa fuerza incrementa en exceso.

Al igual que en el caso anterior, la fuerza de arrastre, alcanza un valor máximo en 6° y después disminuye ligeramente. La fuerza de sustentación cambia ligeramente con el ángulo roll. Por su parte, los coeficientes de arrastre, tienen un comportamiento similar a las fuerzas (*Figura 4.69*).

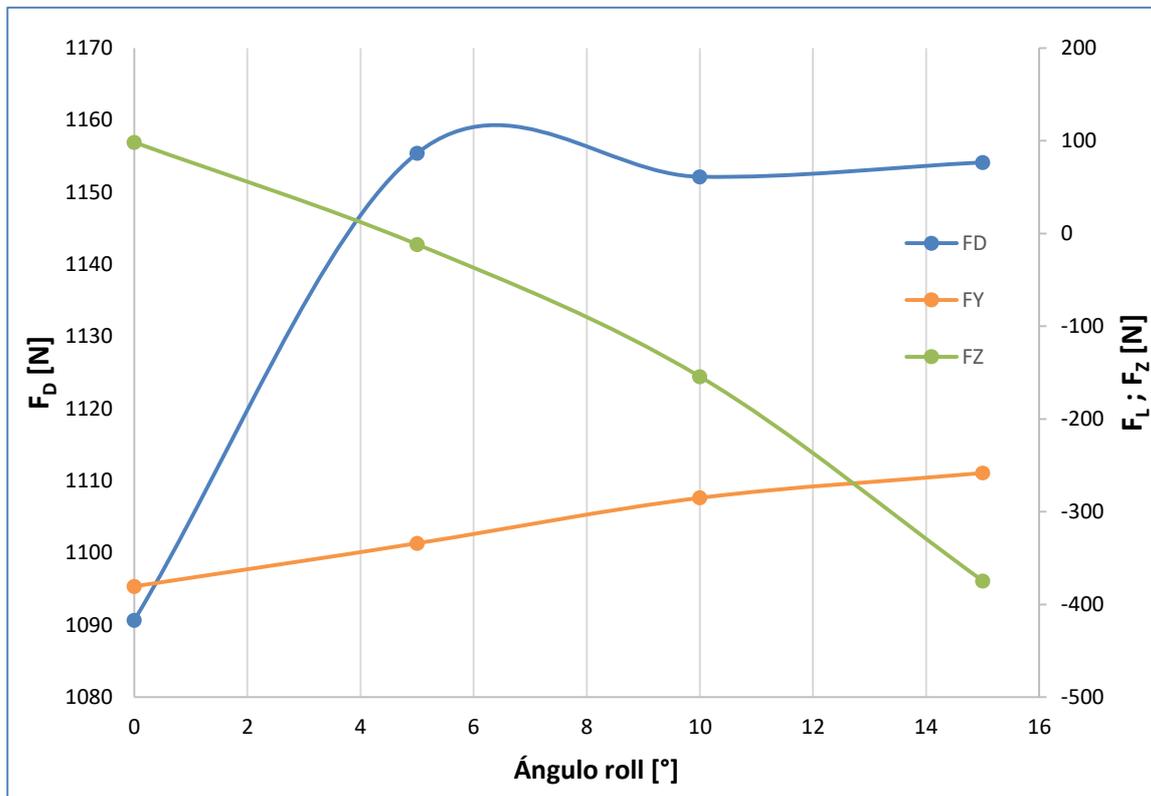


Figura 4.68. Fuerzas generadas sobre el vehículo. CAAC en trayectoria curva.

4. AERODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE UN AUTOMÓVIL DEPORTIVO

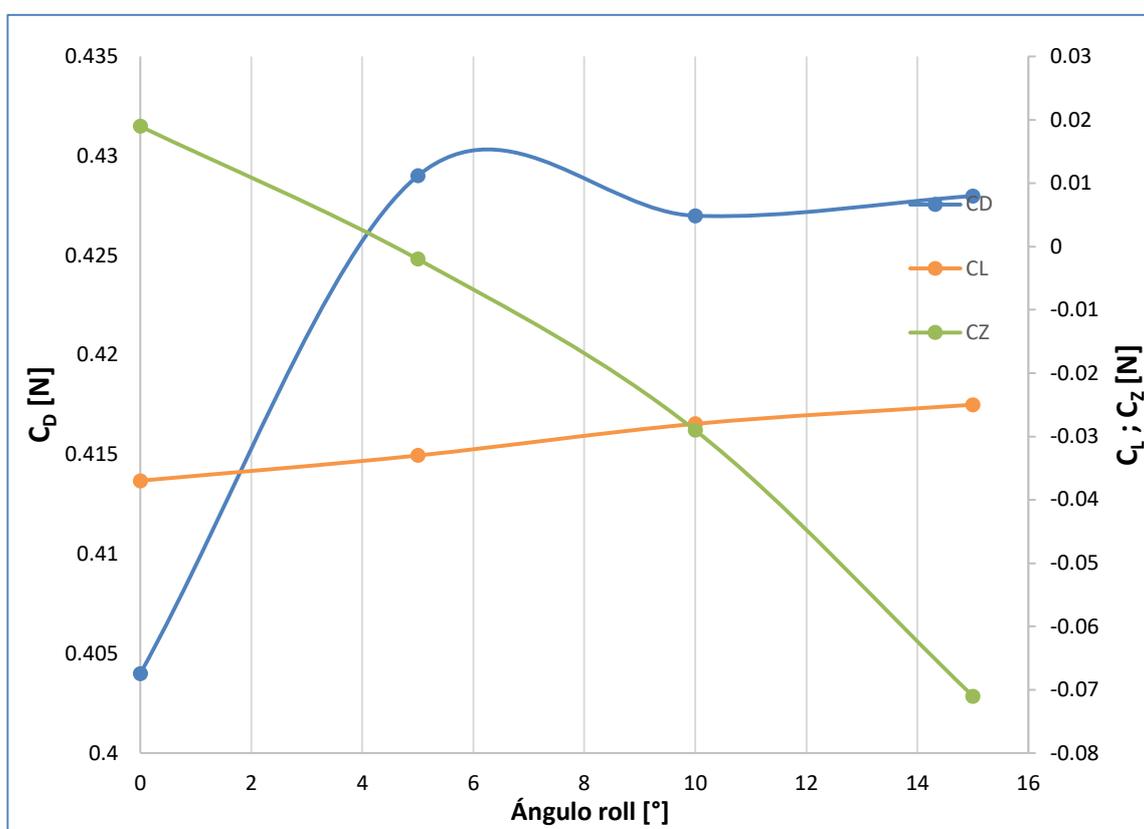


Figura 4.69. Coeficientes de arrastre, sustentación y lateral del vehículo. CAAC en trayectoria curva.

CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

Las características relacionadas a la aerodinámica externa de un automóvil deportivo Audi R8, con una superficie añadida (alerón) a la parte trasera del vehículo y la implementación de este funcionando como ala centrípeta, con la finalidad de mejorar la tracción de las ruedas del vehículo. Ha sido examinada a detalle empleando simulaciones numéricas en tres dimensiones, resolviendo las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes.

Las fuerzas, y coeficientes de arrastre y sustentación son examinadas para un caso base con y sin alerón, para 5 diferentes $Re = 4.6, 9.2, 13.9, 18.5, 25.9 (x10^6)$. El alerón que se incorporó a la parte trasera del vehículo es con un perfil base NACA 6412. El análisis realizado sobre el vehículo con una superficie añadida, sugiere que la instalación de este tipo de equipamiento aumenta el coeficiente de arrastre (C_D) en un 30% comparado con el modelo base, sin alerón. Sin embargo, es apreciado un aumento sustancial en la carga aerodinámica del automóvil, teniendo como resultado un coeficiente de sustentación negativo (C_L). Tomando como referencia un $Re = 25.9x10^6$ (velocidad en el flujo de 84m/s), la incorporación de este alerón reduce C_L a -0.048 en comparación con el modelo base C_L de 0.523, lo que representa un aumento en la carga aerodinámica de 108%.

La alta carga aerodinámica es esencial para mejorar las maniobras del vehículo a una alta velocidad, sin embargo cabe destacar que un arrastre mínimo con la tracción suficiente son la mejor combinación para mejorar la eficiencia del combustible. Por lo tanto, la selección de un perfil alar e implementación de este en un alerón, siempre depende directamente de las condiciones a las que el vehículo es sometido. Un buen diseño del alerón puede reducir en gran medida C_D y con esto minimizar los efectos con respecto a la resistencia de avance. Por todo lo anterior, es que no siempre las superficies añadidas pueden tener un buen impacto en el rendimiento del vehículo; a baja velocidad una superficie de este tipo puede perjudicar el rendimiento del auto en lugar de mejorarlo, debido a que las fuerzas de arrastre y sustentación dependen directamente de la velocidad al cuadrado.

Hoy en día se trabaja en la investigación acerca de la aerodinámica activa, un ejemplo de esto es: la implementación de un sistema hidráulico operado por

software que permite variar la altura del alerón de acuerdo a la velocidad del automóvil, teniendo la altura óptima para obtener la máxima carga aerodinámica o viceversa, alcanzar una velocidad extrema teniendo una ligera altura para reducir el arrastre, pero lo suficiente para sujetar las ruedas del vehículo y evitar que este pueda despegarse del suelo y volar. Este tipo de aditamento es común en vehículos deportivos de alta gama.

Otro ejemplo de aerodinámica activa es el uso de un alerón de ala centrípeta, el cual se estudió en el presente trabajo. Este alerón funciona con el mecanismo antes mencionado, la diferencia radica en que no solo permite variar el ángulo de ataque (AoA) del ala y funcionar como un freno de aire, cada pistón hidráulico es independiente y permite variar también el ángulo roll del alerón. Incluso se pueden variar estos ángulos al mismo tiempo dependiendo del escenario al que este sometido el vehículo. Como se ha mencionado, este tipo de alerón se utiliza para aumentar la tracción de las ruedas interiores del vehículo en una curva. El análisis realizado en la presente tesis indica que la implementación de este sistema en trayectoria recta no es óptimo. Ya que en una recta un vehículo debe ser lo más estable posible y más si este va a una velocidad muy alta, ya que cualquier perturbación en el movimiento puede causar pérdida de control de este. La inclinación del alerón genera una fuerza lateral, la cual es innecesaria debido a los efectos adversos que puede tener. Adicionalmente, la carga aerodinámica disminuye conforme el ángulo de roll aumenta, se tiene un C_L de -0.031 para el máximo ángulo roll de 15° , por lo tanto, la carga disminuye en aproximadamente un 30% con respecto al alerón sin inclinación (0°). También, C_D aumenta con respecto al caso con alerón, correspondiente a una velocidad en el flujo de 45m/s , esta resistencia al avance es ligeramente mayor cuando el alerón se encuentra inclinado.

Sin embargo cuando el vehículo pasa por una curva, el alerón cumple con su principal función de aumentar la tracción en las ruedas interiores por medio de generar una fuerza centrípeta en el alerón. La simulación muestra que esta fuerza lateral es menor con respecto al paso del vehículo en una trayectoria recta, pero se debe considerar que cuando el vehículo pasa a través de la curva aparece también, una fuerza centrífuga en dirección opuesta a la centrípeta, continuando la fuerza

resultante negativa. Esto indica que el alerón cumple con su cometido al generar una fuerza centrípeta capaz de aumentar la tracción del vehículo sobre una curva. Cuando el alerón no tiene inclinación la fuerza lateral (F_z) resultante es positiva, el coeficiente lateral (C_z) decrece significativamente en un 200% con respecto a la inclinación máxima correspondiente a 15° . Adicionalmente, C_D disminuye con respecto a los valores obtenidos en la trayectoria recta del vehículo, lo anterior no necesariamente trae beneficios, lo deseado en este tipo de análisis es reducir la fuerza de arrastre (F_D), y a la vez incrementar la carga aerodinámica (F_L) y la fuerza lateral. Sin embargo, en el presente caso al disminuir C_D , C_L disminuye también significativamente con respecto al caso en trayectoria recta, debido a esta razón puede que este tipo de alerón no esté siendo muy implementado, ya que existe una pérdida en F_L que no siempre es lo deseado. Además de que existe muy poca información acerca del rendimiento de este tipo de alerón en diferentes escenarios. Este tipo de alerón es relativamente reciente, con el paso de los años puede mejorar su funcionamiento, hasta alcanzar un punto óptimo.

Para trabajos a futuro, se recomienda analizar el alerón de ala centrípeta variando tanto el ángulo de roll, como el AoA, para diferentes ángulos de la curva por la que pasa el vehículo. El alerón incrementa la carga aerodinámica trasera, por lo tanto, analizar la adición de superficies adicionales en la parte frontal del vehículo para generar carga aerodinámica frontal, es un punto de interés que también puede ser analizado. Adicionalmente, lo antes mencionado, sería recomendable complementar el análisis con un trabajo experimental en un túnel de viento o de ser posible en condiciones reales, para validar las simulaciones en condiciones de operación reales. Finalmente analizar la transferencia de calor que tiene el motor con el flujo de aire, implementando la ecuación de la energía, es otro punto de gran interés.

6. APÉNDICE

-Esquemas de discretización

A continuación, se presentan los esquemas lineales que se usan en la discretización del término convectivo de la ecuación general (2.2).

En la formulación de la ecuación discretizada:

$$\sum \vec{F} = \int_{VC} \rho \vec{g} dV + \int_{SC} \sigma_{ij} \cdot \vec{n} dA = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial t} (\vec{V}) dV + \int_{VC} (\rho \vec{V}) \vec{V} \cdot \vec{n} dA$$

Se requiere conocer la densidad ρ y la variable escalar, ϕ , en la cara de la celda. Estas variables se calculan en el nodo de la celda, por lo que es necesario interpolar entre celdas para conocer su valor en la cara. De tal modo que el cálculo de ρ y ϕ en la cara de la celda da lugar a los llamados esquemas de discretización. La determinación de los valores de estas variables en la cara es importante para la precisión y convergencia de la solución numérica.

Enseguida se presentan los esquemas de discretización lineales y no lineales empleados en esta tesis. Estos esquemas se describirán en base al sistema de celdas que se ilustra en la **Figura A**. Como ejemplo, se obtendrá el valor de ϕ en la cara e de la celda P. La velocidad en la cara e se considerará, sin pérdida de generalidad, positiva ($u_e > 0$).

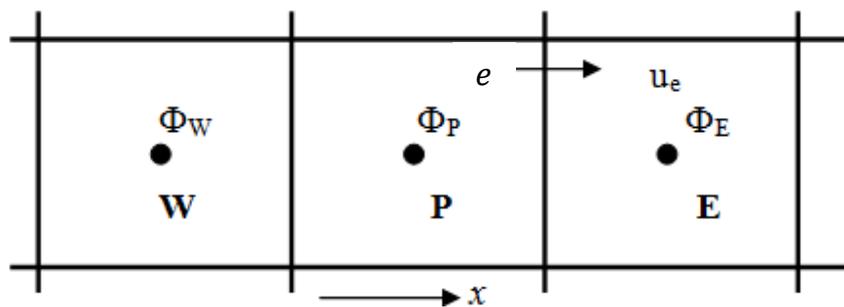


Figura A. Diagrama esquemático de celdas.

*-Esquemas lineales**Diferencias desplazadas de primer orden:*

Con este esquema se supone que el valor de la variable ϕ en la cara e es igual al nodo adyacente aguas arriba, es decir, para $u_e > 0$ [9]:

$$\phi_E = \phi_P \quad (\text{A.1})$$

Esta alternativa es de implementación sencilla, acotada y altamente estable casi bajo cualquier situación pero tiene como inconvenientes, su precisión, ser de primer orden y presentar problemas de difusión numérica. Esta falsa difusión es mayor si en el flujo hay un desalineamiento en la dirección del flujo y las líneas de malla, como por ejemplo en flujos de recirculación.

Diferencias centradas:

Este esquema supone la variación lineal de ϕ entre los nodos P y E; por tanto, el valor de la cara e es:

$$\phi_e = \frac{\phi_E + \phi_P}{2} \quad (\text{A.2})$$

Este esquema tiene una precisión de segundo orden, pero tiene el inconveniente de no estar acotado, por lo que puede presentar inestabilidades numéricas. El límite de estabilidad de este esquema viene dado en función del número de Peclet, ecuación (A.3), que es un parámetro comparativo entre los procesos convectivo y difusivo.

$$F = \bar{\rho} \tilde{v}_i, \quad D = \frac{\Gamma}{\delta_i}, \quad Pe = \frac{F}{D} \quad (\text{A.3})$$

Para situaciones en que los procesos convectivos dominan sobre los difusivos $Pe > 2$, por ejemplo, flujos con número de Reynolds altos, el esquema presenta oscilaciones numéricas.

Híbrido:

Este esquema fue introducido por Spalding y consiste en combinar los esquemas de diferencias desplazadas y centradas para calcular el valor de la propiedad ϕ en la cara del volumen de control. La selección del esquema se hace en función del número de Peclet de la celda:

- Si, $Pe \leq 2$, se usan diferencias centradas:

$$\phi_e = \frac{\phi_E + \phi_P}{2} \quad (\text{A.4})$$

- Si, $Pe > 2$ se usan diferencias desplazadas:

$$\phi_e = \phi_P, \quad Pe > 2 \quad (\text{A.5})$$

Para flujos con bajo número de Reynolds/Peclet, el esquema utilizado es el de diferencias centradas, y por tanto resulta de orden 2; sin embargo, el esquema presenta problemas asociados al esquema de diferencias desplazadas cuando el flujo está dominado por los procesos de convección $Pe > 2$.

Los esquemas lineales de alto orden presentan una buena precisión, pero no están acotados, por lo que pueden presentar oscilaciones numéricas. Su uso no es recomendado en el cálculo de cantidades que no aceptan valores negativos, o en general de cantidades acotadas, tales como concentraciones, pues las oscilaciones introducidas por el modelo pueden sacar al escalar de su dominio de definición.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

7. REFERENCIAS y BIBLIOGRAFÍA

1. Muguran Thangadurai, Rajesh Kumar, Subhas Chandra Rana, Dipankar Chatterjee, "Aerodynamic Influence of Added Surfaces on the Performance Characteristics of a Sports Car", Springer, June 2019.
2. Zenvo automotive. [citado 2021 15/Oct]; Recopilado de; <https://zenvoautomotive.com/tsr-s/>
3. K. K. Kuo. Principles of Combustion. Jonh Wiley, 1986.
4. A. Favre. Problems of Hydrodynamics and Continuum Mechanics. SIAM, 1969.
5. J. Warnatz, U. Mass, R. W. Dibble. Combustion. Springer. 1996
6. S. A. Shetty, H. Mitchel, M. de Tezanos Pinto, F. Papa, R. L. Cerro. Heat Transfer Performance of Fintubes with Solid Versus Serrated Fins. Avances en Ingeniería Química 8-1 (1998) 16-23.
7. E. Martínez, W. Vicente, M. Salinas, G. Soto. Single-phase experimental analysis of heat transfer in helically finned heat exchangers. Applied Thermal Engineering 29 (2009) 2205-2210.
8. A. Nir. Heat Transfer and Friction Factor Correlations for Crossflow over Staggered Finned Tube Banks. Heat Transfer Engineering 12-1 (1991) 43-58.
9. Hailing Wu, Diana Ma, Massoud Kaviany. Peripheral fins for blockage robustness. International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 2514–2520.
10. Zhengguo Zhang, Dabin Ma, Xiaoming Fang y Xuenong Gao. Experimental and numerical heat transfer in a helically baffled heat exchanger combined with one three-dimensional finned tube. Chemical Engineering and Processing 47 (2008) 1738–1743.
11. V. Ganapathy. Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design Applications and Calculations, Marcel Dekker, New York, 2003.
12. Ansys Fluent Forum. [citado 2021 5/Nov]; Recopilado de; <https://forum.ansys.com>
13. Audi Media center, [citado 16/Nov]; Recopilado de; <https://www.audi.com/en/models/rs-r8/r8.html>
<https://www.audi-mediacenter.com/en>
14. Xataka, [citado 2021 24/Nov]; Recopilado de; <https://www.xataka.com/vehiculos/2020-todavia-no-entendemos-todo-que-aviones-se-mantienen-aire>
15. Wordpress [citado 2021 25/Nov]; Recopilado de; <https://secretosf1.wordpress.com/2010/03/15/los-alerones-principios-basicos/>

16. Ira H. Abbott, Albert E. von Doenhoff, Louis S. "Summary of airfoil data", NASA, 1945.
17. NASA airfols, [citado 2021 16/Dic]; Recopilado de; <https://www.nasa.gov/image-feature/langley/100/naca-airfoil>
18. Airfol tools, [citado 2022 3/Ene]; Recopilado de; <http://airfoiltools.com/index>
19. Science Direct, [citado 2022 8/Feb]; Recopilado de; <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/coanda-effect>
20. Janusz Ryszard Piechna, Krzysztof Kurec, Jakub Broniszewski, "Influence of the car movable aerodynamic elements on fast road car cornering", Energies, January 2022.
21. Zenvo automotive, [citado 2022 8/Mayo]; Recopilado de; <https://zenvoautomotive.com/zenvo-automotive-presents-tsr-s/>

Artículos

- Krzysztof Kurec, Michał Remer, Janusz Piechna, "The influence of different aerodynamic setups on enhancing a sports car's braking", International Journal of Mechanical Sciences, 2019.
- Hesham Ebrahim, Robert Dominy, "Wake and surface pressure analysis of vehicles in platoon", Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2020.
- Sean McTavish, Brian McAuliffe, "Improved aerodynamic fuel savings predictions for heavy-duty vehicles using route-specific wind simulations", Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2021.
- Krzysztof Kurec, Michał Remer, Tobiasz Mayer, Sylwester Tudruj, Janusz Piechna, "Flow control for a car-mounted rear wing", International Journal of Mechanical Sciences, 2019.
- Rubel Chandra Das, Mahmud Riyad, "CFD Analysis of Passenger Vehicle at Various Angle of Rear End Spoiler", Procedia Engineering, 2016.
- Janusz Ryszard Piechna, Krzysztof Kurec, Jakub Broniszewski, "Influence of the car movable aerodynamic elements on fast road car cornering", Energies, January 2022.
- Alexander Nastov and David Caples, "Aerodynamic development of the 2019 Chevrolet Corvette C7 ZR1", SAE International, 2019.

7. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- R. E. Britter, J. C. R. Hunt and J. C. Mumford, "*The distortion of turbulence by a circular cylinder*", Journal of Fluid Mechanics, 2006.
- Marian Albers, Wolfgang Schröder, "*Lower drag and higher lift for turbulent airfoil Flow by moving surfaces*", International Journal of Heat and Fluid Flow, 2021.
- S. Hara, H. Mamori, T. Miyazaki, "*Influence of curvature on drag reduction by opposition control in turbulent Flow along a thin cylinder*", International Journal of Heat and Fluid Flow, 2020.

Libros

- Frank. M White, "*Fluid Mechanics*", 4ª edición, McGraw Hill, 826pp
- Yunus A. Cengel, John M. Cimbala, "*Mecánica de Fluidos: fundamentos y aplicaciones*", McGrawHill, 2006, 956pp
- Stephen B. Pope, "*Turbulent Flows*", 1ª edición, Cambridge, 2000, 726pp