



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN ZACATENCO
UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS

TESIS

DISEÑO Y EVALUACIÓN NUMÉRICA DE ALERÓN FRONTAL
PARA UN VEHÍCULO DE COMPETENCIA DE FÓRMULA UNO

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. ALDO SAUL LAGUNA CANALES

DIRECTORES:

DR. GUILLERMO MANUEL URRIOLAGOITIA CALDERÓN

DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA



CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO

SEPTIEMBRE 2022



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14
REP 2017

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de siendo las horas del día del mes de del se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de para examinar la tesis titulada:

del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	LAGUNA	Apellido Materno:	CANALES	Nombre (s):	ALDO SAUL
-------------------	--------	-------------------	---------	-------------	-----------

Número de registro:

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 5 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI NO **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN: El resultado análisis de Turnitin mostró 5% de similitud de coincidencia. Estas coincidencias son palabras utilizadas comúnmente en publicaciones con temas similares. El trabajo de tesis cumple el Artículo 33 del Reglamento de Estudios de Posgrado.

****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio.**

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

Se cuenta con la tesis culminada por lo que se podrá realizar el tramite para el examen de grado

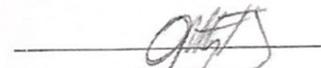
COMISIÓN REVISORA DE TESIS



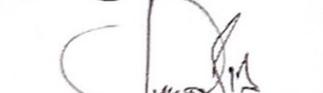
Director de Tesis
Dr. Guillermo Manuel Urriolagoitia Calderón



Presidente
Dra. Beatriz Romero Ángeles



Secretario
Dr. Francisco Javier Salgado Funes



2º Director de Tesis (en su caso)
Guillermo Urriolagoitia Sosa



3er Vocal
Dr. Jacobo Martínez Reyes


SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
ZACATENCO



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN

En la Ciudad de México el día 20 del mes de Septiembre del año 2022, el que suscribe Aldo Saul Laguna Canales alumno del programa Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica con número de registro A210541, adscrito a Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de Dr. Guillermo Manuel Urriolagoitia Calderón y Dr. Guillermo Urriolagoitia Sosa y cede los derechos del trabajo intitulado "Diseño y evaluación numérica de alerón frontal para un vehículo de competencia de Fórmula Uno", al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expresado del autor y/o directores. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección de correo lagunacanalesaldosaul@gmail.com. Si el permiso se otorga, al usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.



Aldo Saul Laguna Canales

Resumen

El ser humano desde sus inicios ha tenido la necesidad de desplazarse de un lugar a otro y para ello ha recurrido a diversos recursos, el más básico de ellos es su mismo cuerpo; sin embargo, este se encuentra sujeto al agotamiento y las restricciones de poder cargar grandes cantidades de peso, es así como surge la necesidad de buscar nuevos medios que ofrecieran de manera efectiva la posibilidad de recorrer mayores distancias o llevar grandes cargas. Los medios de transporte aparecieron para hacer frente a estas necesidades.

El automóvil surgió como un medio de transporte terrestre para todas las personas, dado a su tamaño compacto y relativa simpleza, con el paso del tiempo y el avance de la tecnología se ha convertido en un dispositivo indispensable para el transporte de personas tanto en el campo como en las grandes ciudades y como en casi todos los aspectos en los que se desarrolla el ser humano no ha estado excepto de la necesidad por demostrar quién es el mejor ya sea manejándolo o construyéndolo; es así como surgen las competencias de automovilismo, en las que la Fórmula Uno figura como la máxima categoría de competición.

El presente trabajo se enfoca en el diseño y análisis de un alerón frontal para un vehículo de *Fórmula Uno* para la temporada 2022; partiendo desde una reseña histórica del surgimiento de los medios de transporte y su paso a través del tiempo hasta el presente, posteriormente se realizó el análisis de tres alerones ya existentes por medio de simulaciones computacionales como forma de sentar un precedente del comportamiento de estos dispositivos, seguidamente se procedió a la formulación de tres propuestas totalmente nuevas que se ajustaran a la reglamentación de la *Fórmula Uno* para la temporada 2022 y de igual manera se estudió su comportamiento tanto aerodinámico como estructural para determinar cuál de las tres propuestas resultaba más efectiva, por último se llevó a cabo un ensayo experimental en túnel de viento produciendo un prototipo de la propuesta que presentó los resultados más satisfactorios en las simulaciones.

Abstract

Since the beginning, the human being has had the need to move from one place to another and for this he has resorted to various resources, the most basic of which is his own body; however, this is subject to exhaustion and the restrictions of being able to carry large amounts of weight, which is how the need arises to look for new means that effectively offer the possibility of traveling greater distances or carrying large loads. The means of transport appeared to meet these needs.

The car emerged as a means of land transportation for all people, given its compact size and relative simplicity, with the passage of time and the advancement of technology it has become an indispensable device for transporting people both in the countryside as in the big cities and as in almost all the aspects in which the human being develops, he has not been except for the need to show who is the best, either managing it or building it; This is how motor racing competitions arise, in which Formula One appears as the highest category of competition.

The present work focuses on the design and analysis of a front wing for a *Formula One* vehicle for the 2022 season; starting from a historical review of the emergence of means of transport and their passage through time to the present, later the analysis of three existing front wings was carried out through computational simulations as a way of setting a precedent for the behavior of these devices, next, three totally new proposals were formulated that would comply with the *Formula One* regulations for the 2022 season and their aerodynamic and structural behavior were also studied to determine which of the three proposals was more effective, finally an experimental test was carried out in a wind tunnel, producing a prototype of the proposal that presented the most satisfactory results in the simulations.

Índice General

Resumen	i
Abstract	ii
Índice General.....	iii
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas.....	xvi
Objetivo General	xvii
Objetivos Particulares.....	xvii
Justificación.....	xviii
Introducción	xviii

Capítulo I

I.1.- Introducción	2
I.2.- Los transportes en la antigüedad.....	5
I.3.- La <i>Edad Media</i> de los transportes.....	7
I.4.- Renacimiento e ideas para futuros transportes.....	8
I.5.- Revolución Industrial y el transporte terrestre.....	9
I.6.- Motor de combustión interna	16
I.6.1.- El automóvil moderno	19
I.7.- La <i>Federación Internacional del Automóvil, Fórmula Uno</i> y los <i>Grandes Premios</i>	24
I.8.- Planteamiento del Problema.....	28
I.9.- Sumario	29
I.10.- Referencias.....	29

Capítulo II

II.1.- Generalidades sobre la aerodinámica y alerones en el automovilismo.....	35
II.2.- Fuerzas que actúan sobre una aeronave	42
II.3.- <i>Teorema de Bernoulli</i>	43
II.4.- Efecto <i>Magnus</i>	44
II.5.- Perfiles aerodinámicos.....	44
II.6.- Coeficientes aerodinámicos	45
II.7.- Influencia del ángulo de ataque	46
II.8.- Capa límite.....	47
II.9.- Vórtices.....	49
II.10.- Efecto suelo.....	50
II.11.- Método del Elemento Finito	51

II.12.- Método del Elemento Finito y el software <i>ANSYS® Workbench</i>	53
II.13.- Sumario	54
II.14.- Referencias	55

Capítulo III

III.1.- Introducción	58
III.2.- <i>McLaren MP4/4</i>	58
III.2.1.- Modelado del alerón en programa <i>CAD</i>	59
III.2.2.- Análisis numérico aerodinámico	60
III.2.3.- Módulo de geometría	60
III.2.4.- Método de discretizado	61
III.2.5.- Aplicación de las condiciones de frontera	61
III.2.6.- Solución numérica	62
III.2.7.- Resultados de la evaluación numérica	62
III.3.- <i>Williams FW31</i>	66
III.3.1.- Modelado del alerón en programa <i>CAD</i>	66
III.3.2.- Análisis numérico aerodinámico	67
III.3.3.- Módulo de geometría	67
III.3.4.- Método de discretizado	67
III.3.5.- Aplicación de las condiciones de frontera	68
III.3.6.- Solución numérica	69
III.3.7.- Resultados de la evaluación numérica	69
III.4.- <i>Mercedes-AMG W12</i>	73
III.4.1.- Modelado del alerón en programa <i>CAD</i>	73
III.4.2.- Análisis numérico aerodinámico	74
III.4.3.- Módulo de geometría	74
III.4.4.- Método de discretizado	74
III.4.5.- Aplicación de las condiciones de frontera	75
III.4.6.- Solución numérica	76
III.4.7.- Resultados de la evaluación numérica	76
III.5.- Interpretación de resultados	80
III.6.- Sumario	81
III.7.- Referencias	81

Capítulo IV

IV.1.- Introducción	84
IV.2.- Diseño general	84
IV.3.- Propuesta 1; <i>MICC-75</i>	85
IV.3.1.- Implementación del modelo	86
IV.3.2.- Análisis numérico aerodinámico	87
IV.3.3.- Acoplamiento multi-físico	98
IV.3.4.- Análisis numérico estático estructural	98

IV.4.- Propuesta 2; <i>CLV-54</i>	112
IV.4.1.- Implementación del modelo	112
IV.4.2.- Análisis numérico aerodinámico	113
IV.4.3.- Acoplamiento multi-físico	124
IV.4.4.- Análisis numérico estático estructural	124
IV.5.- Propuesta 3; <i>JJRC-10</i>	137
IV.5.1.- Implementación del modelo	137
IV.5.2.- Análisis numérico aerodinámico	137
IV.5.3.- Acoplamiento multi-físico	149
IV.5.4.- Análisis numérico estático estructural	149
IV.6.- Comparación de resultados	162
IV.7.- Sumario	164
IV.8.- Referencias	164
Capítulo V	
V.1.- Introducción	167
V.2.- Características del túnel de viento	167
V.3.- Dimensionado e impresión del alerón <i>MICC-75</i> para pruebas.....	168
V.4.- Puesta a punto y ejecución de la prueba	170
V.5.- Comprobación del ensayo 1	177
V.6.- Comprobación del ensayo 2	181
V.7.- Comprobación del ensayo 3	184
V.8.- Sumario.....	187
V.9.- Referencias	187
Conclusiones.....	1890
Anexos.....	193
Anexo 1	194
Anexo 2.....	194
Anexo 3.....	195
Anexo 4.....	196
Anexo 5.....	199
Anexo 6.....	203

Índice de Figuras
Capítulo I

Figura I.1.- Carreta de transporte antigua.....	2
Figura I.2.- Una de las primeras locomotoras de vapor	3
Figura I.3.- Antiguo auto de carreras.....	3
Figura I.4.- Poster del <i>Gran Premio de Mónaco</i> de 1950	4
Figura I.5.- Nuevo monoplaza para el <i>Campeonato 2022</i> de la <i>Fórmula Uno</i>	4
Figura I.6.- Barco de remos del antiguo Egipto	6
Figura I.7.- Carro de guerra antiguo	6
Figura I.8.- Carruaje de la <i>Edad Media</i>	7
Figura I.9.- Instrumentos de navegación medievales	8
Figura I.10.- Retrato de <i>Leonardo Da Vinci</i> y uno de sus inventos	9
Figura I.11.- Destrucción del <i>barco de Papin</i>	10
Figura I.12.- Ilustración de la <i>máquina de Savery</i>	11
Figura I.13.- Ilustración de la <i>máquina de Newcomen</i>	11
Figura I.14.- Postal inglesa en conmemoración de <i>James Watt</i> y su máquina.....	14
Figura I.15.- El <i>Fadier de Caugnot</i>	15
Figura I.16.- La locomotora <i>Blucher</i> de <i>Stephenson</i>	16
Figura I.17.- El <i>motor de Lenoir</i>	17
Figura I.18.- Retrato de <i>Nikolaus Otto</i> junto a su motor	18
Figura I.19.- <i>Gottlieb Daimler</i> y <i>Wilhelm Maybach</i>	19
Figura I.20.- <i>Karl Benz</i> y su <i>Patent Motorwagen</i>	20
Figura I.21.- <i>Daimler</i> en como pasajero de uno de sus primeros modelos de 4 ruedas	21
Figura I.22.- <i>Mercedes 35 HP</i> de 1901	22
Figura I.23.- <i>Curved Dash Oldsmobile</i> de 1901.....	23
Figura I.24.- <i>Henry Ford</i> montado en su cuadriciclo	23
Figura I.25.- Vehículo alistándose para competir en la <i>Gordon Bennett Cup</i> de 1902.....	25
Figura I.26.- <i>Mercedes voiture</i> en el <i>Gran Premio</i> de Francia de 1908.....	26
Figura I.27.- <i>Giuseppe Farina</i> primer campeón de <i>Fórmula Uno</i> en un <i>Alfa Romeo 158</i>	28

Capítulo II

Figura II.1.- <i>Curtiss</i> en su “ <i>June Bug</i> ”	36
Figura II.2.- <i>Porsche Spyder</i> con el alerón diseñado por <i>May</i>	37
Figura II.3.- <i>Chaparral 2E</i> de 1966	37
Figura II.4.- <i>Lotus 49B</i> de 1967	38
Figura II.5.- <i>March 711</i> con su “alerón de ala elíptica”	39
Figura II.6.- <i>Williams FW07</i> , la epitome del efecto suelo.....	40
Figura II.7.- <i>McLaren</i> con el primer alerón complejo en 1984.....	40
Figura II.8.- <i>Mercedes</i> de 2018 con un alerón extremadamente complejo	41
Figura II.9.- Diseño básico de alerón para la temporada 2022 de <i>Fórmula Uno</i>	42
Figura II.10.- <u>Fuerzas que actúan sobre una aeronave</u>	42

Figura II.11.- <i>Tubo de Venturi</i>	43
Figura II.12.- Efecto <i>Magnus</i>	44
Figura II.13.- Geometría del perfil aerodinámico	45
Figura II.14.- Diferentes ángulos de ataque	47
Figura II.15.- Capa límite	48
Figura II.16.- Comportamiento de capa límite	48
Figura II.17.- Vórtices en la punta del ala	49
Figura II.18.- Regiones de vórtices	50
Figura II.19.- Alerón trasero poco eficiente generando vórtices en sus puntas	50
Figura II.20.- Efecto suelo en un automóvil.....	51
Figura II.21.- Discretizado del continuo	52
Figura II.22.- Niveles de discretizado	52
Figura II.23.- Clasificación de modelo según número de dimensiones	53
Figura II.24.- Proceso realizado por el software computacional.....	54

Capítulo III

Figura III.1.- Diversos modelos de <i>Fórmula Uno</i> , <i>McLaren MP4/4</i> de 1988, <i>Williams FW31</i> de 2009 y <i>Mercedes-AMG W12</i> de 2021, respectivamente	58
Figura III.2.- Modelo de alerón frontal de <i>McLaren MP4/4</i>	59
Figura III.3.- Volumen de control <i>McLaren MP4/4</i>	60
Figura III.4.- Discretizado del alerón de <i>McLaren MP4/4</i>	61
Figura III.5.- Condiciones de frontera <i>McLaren MP4/4</i>	62
Figura III.6.- Vista general de la presión sobre el alerón del <i>McLaren MP4/4</i>	62
Figura III.7.- Vista frontal de la presión sobre el alerón del <i>McLaren MP4/4</i>	63
Figura III.8.- Vista superior e inferior de la presión sobre el alerón del <i>McLaren MP4/4</i>	63
Figura III.9.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón del <i>McLaren MP4/4</i> sobre el plano medio	63
Figura III.10.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón del <i>McLaren MP4/4</i> a 250 mm del plano medio.....	64
Figura III.11.- Velocidad del viento sobre alerón del <i>McLaren MP4/4</i> en plano medio del alerón	64
Figura III.12.- Velocidad del viento sobre alerón del <i>McLaren MP4/4</i> a 100 mm del plano medio del alerón.....	64
Figura III.13.- Velocidad del viento sobre alerón del <i>McLaren MP4/4</i> a 250 mm del plano medio del alerón.....	65
Figura III.14.- Velocidad del viento sobre alerón del <i>McLaren MP4/4</i> a 500 mm del plano medio del alerón.....	65
Figura III.15.- Vista lateral del flujo de vórtice alrededor del alerón del <i>McLaren MP4/4</i>	65
Figura III.16.- Modelo de alerón frontal de <i>Williams FW31</i>	67
Figura III.17.- Volumen de control <i>Williams FW31</i>	68
Figura III.18.- Discretizado del alerón de <i>Williams FW31</i>	68
Figura III.19.- Condiciones de frontera <i>Williams FW31</i>	69
Figura III.20.- Vista general de la presión sobre el alerón del <i>Williams FW31</i>	69

Figura III.21.- Vista frontal de la presión sobre el alerón del <i>Williams FW31</i>	70
Figura III.22.- Vista superior e inferior de la presión sobre el alerón del <i>Williams FW31</i>	70
Figura III.23.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón del <i>Williams FW31</i> sobre el plano medio	70
Figura III.24.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón del <i>Williams FW31</i> a 250 mm del plano medio.....	71
Figura III.25.- Velocidad del viento sobre alerón del <i>Williams FW31</i> en plano medio del alerón	71
Figura III.26.- Velocidad del viento sobre alerón del <i>Williams FW31</i> a 100 mm del plano medio del alerón.....	71
Figura III.27.- Velocidad del viento sobre alerón del <i>Williams FW31</i> a 250 mm del plano medio del alerón.....	72
Figura III.28.- Velocidad del viento sobre alerón del <i>Williams FW31</i> a 500 mm del plano medio del alerón.....	72
Figura III.29.- Vista lateral del flujo de vórtice alrededor del alerón del <i>Williams FW31</i>	72
Figura III.30.- Modelo de alerón frontal del <i>Mercedes-AMG W12</i>	74
Figura III.31.- Volumen de control <i>Mercedes-AMG W12</i>	75
Figura III.32.- Discretizado del alerón de <i>Mercedes-AMG W12</i>	75
Figura III.33.- Condiciones de frontera <i>Mercedes-AMG W12</i>	76
Figura III.34.- Vista general de la presión sobre el alerón del <i>Mercedes-AMG W12</i>	76
Figura III.35.- Vista frontal de la presión sobre el alerón del <i>Mercedes-AMG W12</i>	77
Figura III.36.- Vista superior e inferior de la presión sobre el alerón del <i>Mercedes-AMG</i> <i>W12</i>	77
Figura III.37.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón del <i>Mercedes-AMG</i> <i>W12</i> sobre el plano medio.....	77
Figura III.38.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón del <i>Mercedes-AMG</i> <i>W12</i> a 250 mm del plano medio.....	78
Figura III.39.- Velocidad del viento alerón del <i>Mercedes-AMG W12</i> en plano medio del alerón	78
Figura III.40.- Velocidad del viento sobre alerón del <i>Mercedes-AMG W12</i> a 100 mm del plano medio del alerón.....	78
Figura III.41.- Velocidad del viento sobre alerón del <i>Mercedes-AMG W12</i> a 250 mm del plano medio del alerón.....	79
Figura III.42.- Velocidad del viento sobre alerón del <i>Mercedes-AMG W12</i> a 500 mm del plano medio del alerón.....	79
Figura III.43.- Vista lateral del flujo de vórtice alrededor del alerón del <i>Mercedes-AMG</i> <i>W12</i>	79
Figura III.44.- Fuerzas del viento que actúan sobre el vehículo	81

Capítulo IV

Figura IV.1.- Volúmenes de referencia	85
Figura IV.2.- Planos de referencia para construcción	85
Figura IV.3.- Alerón <i>MICC-75</i>	86

Figura IV.4.- Perfil <i>GOE-195</i>	86
Figura IV.5.- Diseño conceptual del <i>MICC-75</i>	87
Figura IV.6.- Volumen de control	88
Figura IV.7.- Discretizado del alerón <i>MICC-75</i>	88
Figura IV.8.- Condiciones de frontera <i>MICC-75</i>	89
Figura IV.9.- Vista general de la presión sobre el alerón <i>MICC-75</i>	90
Figura IV.10.- Vista frontal de la presión sobre el alerón <i>MICC-75</i>	90
Figura IV.11.- Vista superior e inferior de la presión sobre el alerón <i>MICC-75</i>	90
Figura IV.12.- Vista superior de la presión ejercida sobre el suelo del alerón <i>MICC-75</i>	91
Figura IV.13.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>MICC-75</i> sobre el plano medio.....	91
Figura IV.14.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>MICC-75</i> a 100 mm del plano medio.....	91
Figura IV.15.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>MICC-75</i> a 250 mm del plano medio.....	92
Figura IV.16.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>MICC-75</i> a 500 mm del plano medio.....	92
Figura IV.17.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>MICC-75</i> a 750 mm del plano medio.....	92
Figura IV.18.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>MICC-75</i> a 950 mm del plano medio.....	93
Figura IV.19.- Velocidad del viento sobre alerón <i>MICC-75</i> en plano medio del alerón	93
Figura IV.20.- Velocidad del viento sobre alerón <i>MICC-75</i> a 100 mm del plano medio del alerón.....	93
Figura IV.21.- Velocidad del viento sobre alerón <i>MICC-75</i> a 250 mm del plano medio del alerón.....	94
Figura IV.22.- Velocidad del viento sobre alerón <i>MICC-75</i> a 500 mm del plano medio del alerón.....	94
Figura IV.23.- Velocidad del viento sobre alerón <i>MICC-75</i> a 750 mm del plano medio del alerón.....	94
Figura IV.24.- Velocidad del viento sobre alerón <i>MICC-75</i> a 950 mm del plano medio del alerón.....	95
Figura IV.25.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>MICC-75</i> sobre plano medio	95
Figura IV.26.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>MICC-75</i> a 100 mm sobre plano medio.....	95
Figura IV.27.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>MICC-75</i> a 250 mm sobre plano medio.....	96
Figura IV.28.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>MICC-75</i> a 500 mm sobre plano medio.....	96
Figura IV.29.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>MICC-75</i> a 750 mm sobre plano medio.....	96
Figura IV.30.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>MICC-75</i> a 950 mm sobre plano medio.....	97

Figura IV.31.- Flujo de vórtice alrededor del alerón <i>MICC-75</i>	97
Figura IV.32.- Vista lateral del flujo de vórtice alrededor del alerón <i>MICC-75</i>	97
Figura IV.33.- Acoplamiento multi-físico para el <i>MICC-75</i>	98
Figura IV.34.- Geometría del <i>MICC-75</i> en <i>Static Structural</i>	99
Figura IV.35.- Discretizado del alerón <i>MICC-75</i>	99
Figura IV.36.- Condiciones de frontera del <i>MICC-75</i>	100
Figura IV.37.- Desplazamientos totales en el <i>MICC-75</i> (Vista isométrica).....	101
Figura IV.38.- Desplazamientos totales en el <i>MICC-75</i> desde la vista frontal (la silueta en negro es la figura del alerón antes de deformarse).....	101
Figura IV.39.- Desplazamientos nominales del eje X en el <i>MICC-75</i> (Vista isométrica)	102
Figura IV.40.- Desplazamientos nominales del eje X en el <i>MICC-75</i> (Vista superior).....	102
Figura IV.41.- Desplazamientos nominales del eje Y en el <i>MICC-75</i> (Vista isométrica)	102
Figura IV.42.- Desplazamientos nominales del eje Y en el <i>MICC-75</i> (Vista superior).....	103
Figura IV.43.- Desplazamientos nominales del eje Z en el <i>MICC-75</i> (Vista isométrica).....	103
Figura IV.44.- Desplazamientos nominales del eje Z en el <i>MICC-75</i> (Vista lateral)	103
Figura IV.45.- Deformaciones unitarias totales en el <i>MICC-75</i> (Vista isométrica).....	104
Figura IV.46.- Deformaciones unitarias totales en el <i>MICC-75</i> (Vista superior e inferior)...	104
Figura IV.47.- Esfuerzos equivalentes <i>Von Mises</i> en el <i>MICC-75</i> (Vista isométrica).....	104
Figura IV.48.- Esfuerzos equivalentes <i>Von Mises</i> en el <i>MICC-75</i> (Vista superior e inferior)	105
Figura IV.49.- Esfuerzos nominales en el eje X en el <i>MICC-75</i> (Vista isométrica).....	105
Figura IV.50.- Esfuerzos nominales en el eje X en el <i>MICC-75</i> (Vista superior e inferior)..	105
Figura IV.51.- Esfuerzos nominales en el eje Y en el <i>MICC-75</i> (Vista isométrica).....	106
Figura IV.52.- Esfuerzos nominales en el eje Y en el <i>MICC-75</i> (Vista superior e inferior)..	106
Figura IV.53.- Esfuerzos nominales en el eje Z en el <i>MICC-75</i> (Vista isométrica)	106
Figura IV.54.- Esfuerzos nominales en el eje Z en el <i>MICC-75</i> (Vista superior e inferior) ..	107
Figura IV.55.- Esfuerzos cortantes en el plano XY en el <i>MICC-75</i> (Vista isométrica).....	107
Figura IV.56.- Esfuerzos cortantes en el plano XY en el <i>MICC-75</i> (Vista superior e inferior)	107
Figura IV.57.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en el <i>MICC-75</i> (Vista isométrica)	108
Figura IV.58.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en el <i>MICC-75</i> (Vista superior e inferior)	108
Figura IV.59.- Esfuerzos cortantes en el plano XZ en el <i>MICC-75</i> (Vista isométrica)	108
Figura IV.60.- Esfuerzos cortantes en el plano XZ en el <i>MICC-75</i> (Vista superior e inferior)	109
Figura IV.61.- Esfuerzos principales máximos en el <i>MICC-75</i> (Vista isométrica)	109
Figura IV.62.- Esfuerzos principales máximos en el <i>MICC-75</i> (Vista superior e inferior) ...	109
Figura IV.63.- Esfuerzos principales mínimos en el <i>MICC-75</i> (Vista isométrica)	110
Figura IV.64.- Esfuerzos principales mínimos en el <i>MICC-75</i> (Vista superior e inferior)....	110
Figura IV.65.- Alerón <i>CLV-54</i>	112
Figura IV.66.- Perfil <i>ISA-960</i>	112
Figura IV.67.- Diseño conceptual de <i>CLV-54</i>	113
Figura IV.68.- Volumen de control	114
Figura IV.69.- Discretizado del alerón <i>CLV-54</i>	114

Figura IV.70.- Condiciones de frontera para el <i>CLV-54</i>	115
Figura IV.71.- Vista general de la presión sobre el alerón <i>CLV-54</i>	115
Figura IV.72.- Vista frontal de la presión sobre el alerón <i>CLV-54</i>	116
Figura IV.73.- Vista superior e inferior de la presión sobre el alerón <i>CLV-54</i>	116
Figura IV.74.- Vista superior de la presión ejercida sobre el suelo del alerón <i>CLV-54</i>	116
Figura IV.75.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>CLV-54</i> sobre el plano medio.....	117
Figura IV.76.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>CLV-54</i> a 100 mm del plano medio.....	117
Figura IV.77.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>CLV-54</i> a 250 mm del plano medio.....	117
Figura IV.78.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>CLV-54</i> a 500 mm del plano medio.....	118
Figura IV.79.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>CLV-54</i> a 750 mm del plano medio.....	118
Figura IV.80.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>CLV-54</i> a 950 mm del plano medio.....	118
Figura IV.81.- Velocidad del viento sobre alerón <i>CLV-54</i> en plano medio del alerón	119
Figura IV.82.- Velocidad del viento sobre alerón <i>CLV-54</i> a 100 mm del plano medio del alerón	119
Figura IV.83.- Velocidad del viento sobre alerón <i>CLV-54</i> a 250 mm del plano medio del alerón	119
Figura IV.84.- Velocidad del viento sobre alerón <i>CLV-54</i> a 500 mm del plano medio del alerón	120
Figura IV.85.- Velocidad del viento sobre alerón <i>CLV-54</i> a 750 mm del plano medio del alerón	120
Figura IV.86.- Velocidad del viento sobre alerón <i>CLV-54</i> a 950 mm del plano medio del alerón	120
Figura IV.87.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>CLV-54</i> sobre plano medio .	121
Figura IV.88.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>CLV-54</i> a 100 mm sobre plano medio.....	121
Figura IV.89.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>CLV-54</i> a 250 mm sobre plano medio.....	121
Figura IV.90.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>CLV-54</i> a 500 mm sobre plano medio.....	122
Figura IV.91.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>CLV-54</i> a 750 mm sobre plano medio.....	122
Figura IV.92.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>CLV-54</i> a 950 mm sobre plano medio.....	122
Figura IV.93.- Flujo de vórtice alrededor del alerón <i>CLV-54</i>	123
Figura IV.94.- Vista lateral del flujo de vórtice alrededor del alerón <i>CLV-54</i>	123
Figura IV.95.- Acoplamiento multi-físico para el <i>CLV-54</i>	124
Figura IV.96.- Geometría del <i>CLV-54</i> en <i>Static Strucutral</i>	125
Figura IV.97.- Discretizado del alerón <i>CLV-54</i>	125

Figura IV.98.- Condiciones de frontera del <i>CLV-54</i>	126
Figura IV.99.- Desplazamientos totales en el <i>CLV-54</i> (Vista isométrica)	126
Figura IV.100.- Desplazamientos totales en el <i>CLV-54</i> desde la vista frontal (la silueta en negro es la figura del alerón antes de deformarse).....	127
Figura IV.101.- Desplazamientos nominales del eje X en el <i>CLV-54</i> (Vista isométrica).....	127
Figura IV.102.- Desplazamientos nominales del eje X en el <i>CLV-54</i> (Vista superior)	127
Figura IV.103.- Desplazamientos nominales del eje Y en el <i>CLV-54</i> (Vista isométrica).....	128
Figura IV.104.- Desplazamientos nominales del eje Y en el <i>CLV-54</i> (Vista superior)	128
Figura IV.105.- Desplazamientos nominales del eje Z en el <i>CLV-54</i> (Vista isométrica)	128
Figura IV.106.- Desplazamientos nominales del eje Z en el <i>CLV-54</i> (Vista lateral)	129
Figura IV.107.- Deformaciones unitarias totales en el <i>CLV-54</i> (Vista isométrica)	129
Figura IV.108.- Deformaciones unitarias totales en el <i>CLV-54</i> (Vista superior e inferior) ...	129
Figura IV.109.- Esfuerzos equivalentes <i>Von Mises</i> en el <i>CLV-54</i> (Vista isométrica).....	130
Figura IV.110.- Esfuerzos equivalentes <i>Von Mises</i> en el <i>CLV-54</i> (Vista superior e inferior)	130
Figura IV.111.- Esfuerzos nominales en el eje X en el <i>CLV-54</i> (Vista isométrica).....	130
Figura IV.112.- Esfuerzos nominales en el eje X en el <i>CLV-54</i> (Vista superior e inferior) ..	131
Figura IV.113.- Esfuerzos nominales en el eje Y en el <i>CLV-54</i> (Vista isométrica).....	131
Figura IV.114.- Esfuerzos nominales en el eje Y en el <i>CLV-54</i> (Vista superior e inferior) ..	131
Figura IV.115.- Esfuerzos nominales en el eje Z en el <i>CLV-54</i> (Vista isométrica)	132
Figura IV.116.- Esfuerzos nominales en el eje Z en el <i>CLV-54</i> (Vista superior e inferior)...	132
Figura IV.117.- Esfuerzos cortantes en el plano XY en el <i>CLV-54</i> (Vista isométrica)	132
Figura IV.118.- Esfuerzos cortantes en el plano XY en el <i>CLV-54</i> (Vista superior e inferior)	133
Figura IV.119.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en el <i>CLV-54</i> (Vista isométrica).....	133
Figura IV.120.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en el <i>CLV-54</i> (Vista superior e inferior)	133
Figura IV.121.- Esfuerzos cortantes en el plano XZ en el <i>CLV-54</i> (Vista isométrica).....	134
Figura IV.122.- Esfuerzos cortantes en el plano XZ en el <i>CLV-54</i> (Vista superior e inferior)	134
Figura IV.123.- Esfuerzos principales máximos en el <i>CLV-54</i> (Vista isométrica).....	134
Figura IV.124.- Esfuerzos principales máximos en el <i>CLV-54</i> (Vista superior e inferior)....	135
Figura IV.125.- Esfuerzos principales mínimos en el <i>CLV-54</i> (Vista isométrica).....	135
Figura IV.126.- Esfuerzos principales mínimos en el <i>CLV-54</i> (Vista superior e inferior)	135
Figura IV.127.- Alerón <i>JJRC-10</i>	137
Figura IV.128.- Perfil <i>S4320</i>	137
Figura IV.129.- Diseño conceptual del <i>JJRC-10</i>	138
Figura IV.130.- Volumen de control	139
Figura IV.131.- Discretizado del alerón <i>JJRC-10</i>	139
Figura IV.132.- Condiciones de frontera <i>JJRC-10</i>	140
Figura IV.133.- Vista general de la presión sobre el alerón <i>JJRC-10</i>	140
Figura IV.134.- Vista frontal de la presión sobre el alerón <i>JJRC-10</i>	141
Figura IV.135.- Vista superior e inferior de la presión sobre el alerón <i>JJRC-10</i>	141
Figura IV.136.- Vista superior de la presión ejercida sobre el suelo del alerón <i>JJRC-10</i>	141

Figura IV.137.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>JJRC-10</i> sobre el plano medio.....	142
Figura IV.138.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>JJRC-10</i> a 100 mm del plano medio.....	142
Figura IV.139.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>JJRC-10</i> a 250 mm del plano medio.....	142
Figura IV.140.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>JJRC-10</i> a 500 mm del plano medio.....	143
Figura IV.141.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>JJRC-10</i> a 750 mm del plano medio.....	143
Figura IV.142.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón <i>JJRC-10</i> a 950 mm del plano medio.....	143
Figura IV.143.- Velocidad del viento sobre alerón <i>JJRC-10</i> en plano medio del alerón.....	144
Figura IV.144.- Velocidad del viento sobre alerón <i>JJRC-10</i> a 100 mm del plano medio del alerón.....	144
Figura IV.145.- Velocidad del viento sobre alerón <i>JJRC-10</i> a 250 mm del plano medio del alerón.....	144
Figura IV.146.- Velocidad del viento sobre alerón <i>JJRC-10</i> a 500 mm del plano medio del alerón.....	145
Figura IV.147.- Velocidad del viento sobre alerón <i>JJRC-10</i> a 750 mm del plano medio del alerón.....	145
Figura IV.148.- Velocidad del viento sobre alerón <i>JJRC-10</i> a 950 mm del plano medio del alerón.....	145
Figura IV.149.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>JJRC-10</i> sobre plano medio	146
Figura IV.150.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>JJRC-10</i> a 100 mm sobre plano medio.....	146
Figura IV.151.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>JJRC-10</i>	146
Figura IV.152.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>JJRC-10</i> a 500 mm sobre plano medio.....	147
Figura IV.153.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>JJRC-10</i> a 750 mm sobre plano medio.....	147
Figura IV.154.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón <i>JJRC-10</i> a 950 mm sobre plano medio.....	147
Figura IV.155.- Flujo de vórtice alrededor del alerón <i>JJRC-10</i>	148
Figura IV.156.- Vista lateral del flujo de vórtice alrededor del alerón <i>JJRC-10</i>	148
Figura IV.157.- Acoplamiento multi-físico para el <i>JJRC-10</i>	149
Figura IV.158.- Geometría del <i>JJRC-10</i> en <i>Static Structural</i>	150
Figura IV.159.- Discretizado del alerón <i>JJRC-10</i>	150
Figura IV.160.- Condiciones de frontera del <i>JJRC-10</i>	151
Figura IV.161.- Desplazamientos totales en el <i>JJRC-10</i> (Vista isométrica).....	151
Figura IV.162.- Desplazamientos totales en el <i>JJRC-10</i> desde la vista frontal (la silueta en negro es la figura del alerón antes de deformarse).....	152
Figura IV.163.- Desplazamientos nominales del eje X en el <i>JJRC-10</i> (Vista isométrica).....	152

Figura IV.164.- Desplazamientos nominales del eje X en el <i>JJRC-10</i> (Vista superior)	152
Figura IV.165.- Desplazamientos nominales del eje Y en el <i>JJRC-10</i> (Vista isométrica).....	153
Figura IV.166.- Desplazamientos nominales del eje Y en el <i>JJRC-10</i> (Vista superior)	153
Figura IV.167.- Desplazamientos nominales del eje Z en el <i>JJRC-10</i> (Vista isométrica)	153
Figura IV.168.- Desplazamientos nominales del eje Z en el <i>JJRC-10</i> (Vista lateral).....	154
Figura IV.169.- Deformaciones unitarias totales en el <i>JJRC-10</i> (Vista isométrica)	154
Figura IV.170.- Deformaciones unitarias totales en el <i>JJRC-10</i> (Vista superior e inferior)..	154
Figura IV.171.- Esfuerzos equivalentes <i>Von Mises</i> en el <i>JJRC-10</i> (Vista isométrica)	155
Figura IV.172.- Esfuerzos equivalentes <i>Von Mises</i> en el <i>JJRC-10</i> (Vista superior e inferior)	155
Figura IV.173.- Esfuerzos nominales en el eje X en el <i>JJRC-10</i> (Vista isométrica)	155
Figura IV.174.- Esfuerzos nominales en el eje X en el <i>JJRC-10</i> (Vista superior e inferior)	156
Figura IV.175.- Esfuerzos nominales en el eje Y en el <i>JJRC-10</i> (Vista isométrica)	156
Figura IV.176.- Esfuerzos nominales en el eje Y en el <i>JJRC-10</i> (Vista superior e inferior)	156
Figura IV.177.- Esfuerzos nominales en el eje Z en el <i>JJRC-10</i> (Vista isométrica).....	157
Figura IV.178.- Esfuerzos nominales en el eje Z en el <i>JJRC-10</i> (Vista superior e inferior)..	157
Figura IV.179.- Esfuerzos cortantes en el plano XY en el <i>JJRC-10</i> (Vista isométrica)	157
Figura IV.180.- Esfuerzos cortantes en el plano XY en el <i>JJRC-10</i> (Vista superior e inferior)	158
Figura IV.181.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en el <i>JJRC-10</i> (Vista isométrica).....	158
Figura IV.182.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en el <i>JJRC-10</i> (Vista superior e inferior)	158
Figura IV.183.- Esfuerzos cortantes en el plano XZ en el <i>JJRC-10</i> (Vista isométrica).....	159
Figura IV.184.- Esfuerzos cortantes en el plano XZ en el <i>JJRC-10</i> (Vista superior e inferior)	159
Figura IV.185.- Esfuerzos principales máximos en el <i>JJRC-10</i> (Vista isométrica).....	159
Figura IV.186.- Esfuerzos principales máximos en el <i>JJRC-10</i> (Vista superior e inferior) ..	160
Figura IV.187.- Esfuerzos principales mínimos en el <i>JJRC-10</i> (Vista isométrica)	160
Figura IV.188.- Esfuerzos principales mínimos en el <i>JJRC-10</i> (Vista superior e inferior) ...	160

Capítulo V

Figura V.1.- Vista lateral y frontal de la cámara de pruebas del túnel de viento	167
Figura V.2.- Vista isométrica de la cámara de pruebas del túnel de viento.....	168
Figura V.3.- Fotografía del túnel de viento	168
Figura V.4.- Vista isométrica del túnel con la pared divisoria	169
Figura V.5.- Vista isométrica del modelo listo para impresión	170
Figura V.6.- Prototipo a escala del <i>MICC-75</i>	170
Figura V.7.- Varilla de sujeción.....	171
Figura V.8.- Escudo para la varilla	171
Figura V.9.- <i>MICC-75</i> montado en la cámara de pruebas	171
Figura V.10.- Dispositivos de medición del túnel de viento	172

Figura V.11.- Dinamómetro digital	172
Figura V.12.- Modelo en posición para prueba	173
Figura V.13.- Volumen de control de simulación de ensayo	178
Figura V.14.- Discretizado del <i>MICC-75</i> a escala.....	178
Figura V.15.- Condiciones de frontera para el ensayo 1	179
Figura V.16.- Vista general de la presión sobre el <i>MICC-75</i> durante el ensayo 1	179
Figura V.17.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del <i>MICC-75</i> sobre el plano medio durante el ensayo 1	180
Figura V.18.- Velocidad del viento sobre el <i>MICC-75</i> en el plano medio durante el ensayo 1	180
Figura V.19.- Vista lateral línea de flujo alrededor del <i>MICC-75</i> sobre plano medio durante el ensayo 1	180
Figura V.20.- Condiciones de frontera para el ensayo 2	182
Figura V.21.- Vista general de la presión sobre el <i>MICC-75</i> durante el ensayo 2	182
Figura V.22.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del <i>MICC-75</i> sobre el plano medio durante el ensayo 2	183
Figura V.23.- Velocidad del viento sobre el <i>MICC-75</i> en el plano medio durante el ensayo 2	183
Figura V.24.- Vista lateral línea de flujo alrededor del <i>MICC-75</i> sobre plano medio durante el ensayo 2	183
Figura V.25.- Condiciones de frontera para el ensayo 3	185
Figura V.26.- Vista general de la presión sobre el <i>MICC-75</i> durante el ensayo 3	185
Figura V.27.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del <i>MICC-75</i> sobre el plano medio durante el ensayo 3	185
Figura V.28.- Velocidad del viento sobre el <i>MICC-75</i> en el plano medio durante el ensayo 3	186
Figura V.29.- Vista lateral línea de flujo alrededor del <i>MICC-75</i> sobre plano medio durante el ensayo 3	186

Índice de Tablas
Capítulo III

Tabla III.1.- Características generales del <i>McLaren MP4/4</i>	59
Tabla III.2.- Fuerzas sobre el alerón del <i>McLaren MP4/4</i>	66
Tabla III.3.- Características generales del <i>Williams WF31</i>	66
Tabla III.4.- Fuerzas sobre el alerón del <i>Williams FW31</i>	73
Tabla III.5.- Características generales del <i>Mercedes-AMG W12</i>	73
Tabla III.6.- Fuerzas sobre el alerón del <i>Mercedes-AMG W12</i>	80
Tabla III.7.- Resumen de resultados para los tres casos de estudio	80

Capítulo IV

Tabla IV.1.- Reglamentación técnica de la <i>Fórmula Uno 2022</i>	84
Tabla IV.2.- Posiciones de los planos de referencia	85
Tabla IV.3.- Ángulos de ataque máximos para los perfiles en el <i>MICC-75</i>	87
Tabla IV.4.- Fuerzas sobre el alerón <i>MICC-75</i>	98
Tabla IV.5.- Especificaciones de la fibra de carbono	100
Tabla IV.6.- Resultados del análisis estático estructural	110
Tabla IV.7.- Ángulos de ataque máximos para los perfiles en el <i>CLV-54</i>	113
Tabla IV.8.- Fuerzas sobre el alerón <i>CLV-54</i>	123
Tabla IV.9.- Resultados del análisis estático estructural	136
Tabla IV.10.- Ángulos de ataque máximos para los perfiles en el <i>JJRC-10</i>	138
Tabla IV.11.- Fuerzas sobre el alerón <i>JJRC-10</i>	148
Tabla IV.12.- Resultados del análisis estático estructural	161
Tabla IV.13.- Resumen de resultados aerodinámicos para las tres propuestas evaluadas	162
Tabla IV.14.- Resumen de resultados estructurales para las tres propuestas evaluadas	162

Capítulo V

Tabla V.1.- Condiciones ambientales	173
Tabla V.2.- Resultados medidos durante la prueba	176
Tabla V.3.- Fuerzas sobre el <i>MICC-75</i> en simulación de ensayo 1	181
Tabla V.4.- Fuerzas sobre el <i>MICC-75</i> en simulación de ensayo 2	184
Tabla V.5.- Fuerzas sobre el <i>MICC-75</i> en simulación de ensayo 3	186
Tabla V.6.- Comparativa de fuerzas sobre el <i>MICC-75</i>	187

Objetivo General

Proponer un diseño de alerón frontal para un vehículo de *Fórmula Uno* que se adapte a la nueva normativa vigente en 2022.

Objetivos Particulares

- Realizar la evaluación numérica del comportamiento del alerón frontal del vehículo *McLaren MP4/4*.
- Realizar la evaluación numérica del comportamiento del alerón frontal del vehículo *Williams WF31*.
- Realizar la evaluación numérica del comportamiento del alerón frontal del vehículo *Mercedes-AMG W12*.
- Presentar una propuesta de un nuevo alerón frontal utilizando el perfil aerodinámico *GOE-195* y llevar a cabo la caracterización de su comportamiento mediante evaluación numérica.
- Presentar una propuesta de un nuevo alerón frontal utilizando el perfil aerodinámico *ISA-960* y llevar a cabo la caracterización de su comportamiento mediante evaluación numérica.
- Presentar una propuesta de un nuevo alerón frontal utilizando el perfil aerodinámico *S4320* y llevar a cabo la caracterización de su comportamiento mediante evaluación numérica.
- Seleccionar la propuesta más eficiente y producir un prototipo para su estudio experimental en túnel de viento.

Justificación

En la actualidad la *Fórmula Uno* es el escenario de mayor importancia dentro de las competencias automovilismo lo que lo convierte también en una de las mayores plataformas para la prueba de nuevas tecnologías y tendencias dentro del diseño aerodinámico de vehículos automotores; sin embargo, debido a diversas cuestiones se ha creado un sesgo entre los participantes de esta competencia con el paso de los años que ha sido difícil de acortar incluso con variados cambios en la reglamentación, para eliminar este inconveniente la *FIA* ha decidido dar un total reinicio al diseño de los vehículos y dejar a todos las escuderías en igualdad de condiciones con la entrada en vigencia de un nuevo reglamento que supone un total rediseño de los vehículos.

Como resultado de este cambio de reglamentación los equipos tienen el camino libre para presentar diseños novedosos que den resultados eficientes para la competencia. Es así como el presente trabajo busca ofrecer una propuesta de un alerón totalmente nuevo que pueda ser usado en competencia dotando al monoplaza de eficiencia aerodinámica de manera eficaz gracias a los análisis numéricos realizados por simulación por medio del método del elemento finito y su posterior estudio de manera experimental en túnel de viento.

Introducción

El avance de los automóviles ha sido vertiginoso desde su aparición hace más de un siglo, prácticamente desde su aparición se comenzó a competir para saber quién podía producir el mejor vehículo; muchos campeonatos diferentes han surgido con el paso de los años, pero el más importante es el campeonato de la *Fórmula Uno*. Sin embargo, este campeonato también evoluciona y la nueva regulación técnica que estará vigente a partir de la temporada 2022 de este campeonato trae consigo la necesidad de desarrollar nuevos elementos nuevos y nunca antes vistos que brinden buen desempeño a los vehículos pero que a su vez resulten competitivos y trabajen de manera adecuada.

En el capítulo 1 se presenta una breve reseña historia del surgimiento de los automóviles y las competencias automovilísticas partiendo de la aparición de los medios de transporte, su paso a través del tiempo y como se han ido adaptando al surgimiento de nuevas tecnologías.

En el segundo capítulo se presenta la teoría y los conocimientos científicos necesarios para comprender el funcionamiento de un dispositivo aerodinámico como es el caso de los alerones para los vehículos de *Fórmula Uno*.

En el capítulo 3 se realiza una caracterización del funcionamiento de tres diferentes alerones de diferentes épocas para poder comprender como estos han evolucionado y sentar un antecedente del comportamiento aerodinámico de estos dispositivos, para ello se realizan análisis numéricos para iguales condiciones en los tres casos de estudio.

En el capítulo 4 se presentan tres posibles propuestas de alerón frontal que se ajustan totalmente a la nueva normativa, de igual manera para poder conocer su comportamiento aerodinámico y determinar la mejor propuesta estos serán sometidos a análisis numéricos a idénticas condiciones. Con los resultados de estos análisis es posible establecer cuál es la mejor opción para ser llevada a la etapa de pruebas experimentales.

En el quinto y último capítulo se presenta el desarrollo y resultados obtenidos de la prueba experimental en túnel de viento para conocer las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre la propuesta seleccionada.

Capítulo I

I.1.- Introducción

Cuando se habla de la historia del automóvil, se debe recordar que este invento inicio primordialmente como un medio de transporte para el ser humano. El avance del ser humano se ha caracterizado por el desarrollo de tecnología que le sea de utilidad para adaptarse al medio en el que se encuentra. Incluso antes del asentamiento de los primitivos seres humanos nómadas para formar los primeros pueblos y civilizaciones, se sabe que estos ya hacían uso de primitivas herramientas que significan los primeros pasos del desarrollo de tecnología por parte de la especie humana, estas herramientas eran de utilidad para la caza y recolección [I.1]. Asimismo, se sabe que el uso de la rueda fue uno de los hitos más grandes en el desarrollo de la tecnología por parte del Hombre, ya que resultaba un medio para poder mover y transportar objetos con mayor facilidad. Es aquí donde se puede señalar el comienzo de los medios de transporte; las primeras carretas tenían la finalidad de ayudar a los hombres antiguos a transportar productos de un poblado a otro para el intercambio de mercancías (Figura I.1) [I.1 y I.2].



Figura I.1.- Carreta de transporte antigua

Con el crecimiento de las ciudades vino un intercambio de culturas y bienes que impulso el desarrollo social y aumento la necesidad de buscar más y mejores medios de transportes; la carreta, los botes y los animales de transporte fueron los principales medios de transporte en la antigüedad durante mucho tiempo [I.3]. La época donde se dio el cambio más radical a la tecnología del ser humano fue la llamada *Revolución Industrial*, donde gracias al desarrollo de la máquina de vapor se vuelve posible producir medios de transporte más eficientes para conectar al mundo entero de una manera más rápido y eficaz [I.4]. El ferrocarril, los grandes buques o transatlánticos y el propio automóvil son algunos de los inventos que descienden de la aparición de la máquina de vapor (Figura I.2) [I.5].

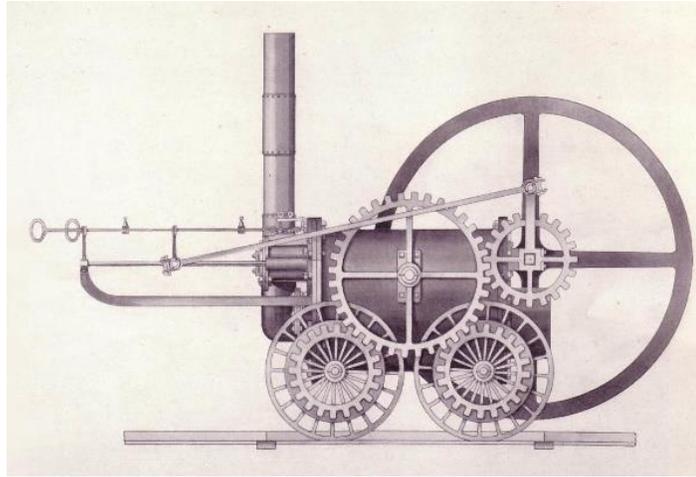


Figura I.2.- Una de las primeras locomotoras de vapor

Aunque el automóvil surgió como solamente un medio de transporte, con el paso del tiempo la necesidad de adaptarlo para realizar otras tareas que ayudaran al ser humano, hizo que surgieran nuevas variantes del automóvil, como los camiones pesados, que ayudaban a transportar mercancías en grandes cantidades de una sola vez. Pero el automóvil no solo vino a satisfacer las necesidades que tenía el ser humano de transporte, sino que también se ha encargado de satisfacer la necesidad por competir para ser el mejor. Esta necesidad da paso al origen de las competencias automovilísticas, donde no sólo se compiten para saber quién es el mejor conduciendo un automóvil, sino también para saber quién puede construir el automóvil más veloz y eficiente [I.6 y I.7].

Las primeras grandes competencias de automovilismo surgieron en países de Europa como Francia y Alemania, pero rápidamente de la mano de la expansión del automóvil en todo el mundo, igualmente se expandieron las competencias automovilísticas (Figura I.3) [I.8].



Figura I.3.- Antiguo auto de carreras

La *Federación Internacional del Automóvil (FIA)* surge para regular la reglamentación y especificaciones técnicas que se debían seguir en competencias de automóviles de diferentes categorías. A mediados del siglo pasado la *FIA* decide organizar un campeonato mundial donde equipos y pilotos de todo el mundo puedan competir para saber quien es el mejor en el deporte automotor. Este campeonato lleva el nombre de *Fórmula Uno* y se mantiene vigente hasta la actualidad, con competencias que tienen sede a lo largo de todo el mundo y que se denominan Grandes Premios (Figura I.4) [I.9].



Figura I.4.- Poster del *Gran Premio de Mónaco* de 1950

La *Fórmula Uno* ha sido el escenario de pruebas para tecnologías nuevas que hagan a los automóviles más eficientes. Esto con la finalidad de a la postre poder adaptarlas a los automóviles que se ofrecen en el mercado y el hecho de la constante competencia tecnológica hacen que la *Fórmula Uno* este siempre en constante evolución y adaptación. La nueva gran revolución dentro del campeonato de la *Fórmula Uno* se da para la temporada 2022, con un cambio drástico dentro de las especificaciones técnicas para la competencia, llevando a un rediseño casi completo del automóvil y propiciando a la aparición de nuevos avances tecnológicos (Figura I.5) [I.10].



Figura I.5.- Nuevo monoplaza para el *Campeonato 2022* de la *Fórmula Uno*

Diseño y evaluación numérica de alerón frontal
para un vehículo de competencia de Fórmula Uno

I.2.- Los transportes en la antigüedad

Desde el momento en que los antiguos primates que se volvieron bípedos y dejaron atrás su vida en los árboles se encontraron con la necesidad de estar en constante movimiento, ya fuera para conseguir alimento, buscar refugio o escapar de algún depredador. Todo esto lo hacían gracias al uso de sus piernas que cada vez se hacían más fuertes y resistentes. Pero el ser humano siempre busca la manera de hacer las cosas lo más fáciles posibles y es por ello que comenzó a buscar nuevas formas de transportarse [I.11].

La idea de que la rueda por su mera simpleza fue uno de los primeros grandes inventos del ser humano puede resultar muy lógica para muchas personas, pero la realidad es que surgió incluso después del desarrollo de la agricultura y la ganadería [I.12]. En un principio el humano desarrollo trineos simples utilizando troncos pequeños y ramas de madera atadas con hierbas o con tiras de cuero. Los primitivos transportes principalmente eran usados para cargar los productos que se recolectaban, eso incluía partes de las presas que cazaban [I.13].

Durante el *Periodo Neolítico* es que el Hombre de la antigüedad cambia su estilo de vida nómada y se da cuenta que puede satisfacer su necesidad de alimento, si el mismo cultiva los productos que antes recolectaba de los árboles y las plantas. De igual manera puede disponer de carne y pieles, si en lugar de seguir a las manadas de animales para cazar. El mismo se encarga del cuidado y protección de estos para su consumo. Estos cambios propician el surgimiento de los primeros pueblos, que a su vez dan paso a las primeras grandes civilizaciones de las que se sabe [I.14]. Es dentro de estas primeras civilizaciones que aparece la rueda, aunque su propósito en un principio era como la base de una mesa giratoria para la producción de alfarería [I.15].

Grandes civilizaciones como la Mesopotámica y la egipcia comenzaron a utilizar la rueda en las primeras carretas y carros jalados por personas o animales de carga para transportar mercancías, cargas pesadas e incluso personas con alto status social. Igualmente, los medios de transporte acuáticos aparecieron debido a que estas civilizaciones se desarrollaron cerca de grandes ríos, las barcas eran utilizadas para la pesa y los primeros barcos de remos al igual que barcos sencillos con velas cuadradas se utilizaban para el transporte de mercancías y personas de un pueblo a otro (Figura I.6) [I.16].

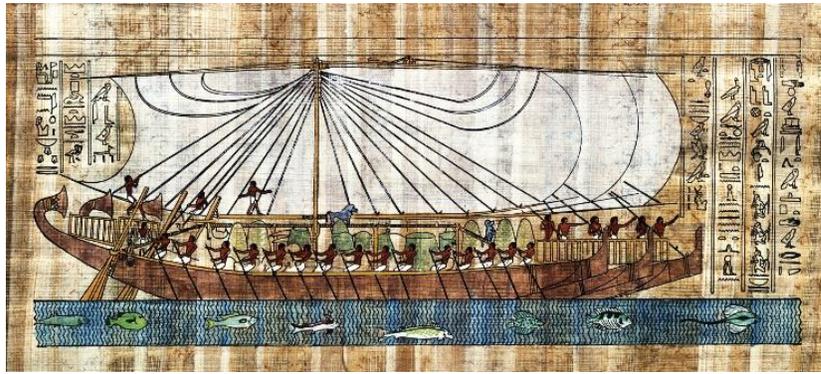


Figura I.6.- Barco de remos del antiguo Egipto

Sin embargo, el constante crecimiento de la población de estas civilizaciones y la necesidad de mayores recursos hacia que entraran en guerra con otros pueblos por el control de territorio y la adquisición de esclavos. Estos conflictos obligaban a que la tecnología fuera adaptada al propósito de la guerra, los carros de guerra (llamados cuadrigas posteriormente en Roma) fueron de gran utilidad durante los conflictos armados gracias a que desde estas carretas jaladas por caballos era posible que un arquero lanzara una flecha sin la desventaja de encontrarse estático (Figura I.7). Un soldado con la espada o lanza podía realizar ataques más rápidos y resultaba un blanco difícil al estar en constante movimiento. Los barcos de remos se volvieron más grandes para transportar gran cantidad de soldados [I.17].



Figura I.7.- Carro de guerra antiguo

El ariete hace su aparición en esta época, esta arma tenía la función de romper muros o puertas al generar un impacto con gran fuerza contra estos objetos. Aunque no resulta ser un medio de transporte, este iba montado sobre un carro con ruedas para transportarlo hasta el lugar donde

deseaba ser utilizado, se puede ver como la tecnología se adaptaba a las necesidades de las personas incluso en situaciones donde la destrucción era la meta [I.18].

I.3.- La *Edad Media* de los transportes

Durante la época antigua prevaleció un estado de expansionismo de las grandes civilizaciones, esto se traduce en un gran periodo de tiempo donde el mundo se vio envuelto en grandes guerras y periodos de auge de grandes imperios, así como su caída [I.19]. La *Edad Media* es un periodo de la historia de la humanidad abarca desde el Siglo V hasta finales del Siglo XV [I.20], donde la idea de expansión y conquista de las grandes civilizaciones antiguas continuo vigente. Es por ello que, aunque se tuvieron grandes avances dentro de los campos de la Arquitectura, las técnicas de Agricultura, la crianza de animales, la Filosofía, las artes y por supuesto el desarrollo de las armas y las tácticas de guerra. Los medios de transporte sufrieron muy pocos cambios. En el transporte terrestre seguía siendo predominante el empleo de animales como el caballo como medio de transporte, al igual que el uso de carretas y carruajes jalados por animales (Figura I.8). En el transporte acuático también se vio una escasa evolución, salvo por la aparición de los barcos de velas más complejos que eran impulsados por las corrientes de aire [I.21].



Figura I.8.- Carruaje de la *Edad Media*

A pesar de que los medios como transporte durante este periodo no tuvieron cambios notables dentro de su naturaleza, si sufrieron cambios respecto a la calidad con la que se fabricaban ya que durante este periodo de la humanidad hubo un progreso a las técnicas artesanales de trabajo de los materiales como la madera y los metales. De igual manera las tácticas de orientación hicieron

posible hacer más eficiente el transporte; los mapas estelares y el conocimiento de la posición de las estrellas en el cielo nocturno eran de gran importancia para los navegantes para poder encontrar mejores rutas comerciales, al igual en tierra el uso de mapas y la construcción de puentes y caminos para librar obstáculos hacia más sencillo seguir rutas que aminoran el tiempo de transporte de un lugar a otro [I.22].

Se tiene registro que alrededor del año 1270 se comenzaron a utilizar las cartas de navegación en los barcos, esto aunado al uso del astrolabio significaba el poder seguir una ruta comercial con una mayor precisión, evitando retrasos y contratiempos (Figura I.9). Estas cuestiones hicieron del transporte marítimo destacara mucho más que el transporte terrestre [I.23].



Figura I.9.- Instrumentos de navegación medievales

I.4.- Renacimiento e ideas para futuros transportes

El periodo del Renacimiento estuvo marcado por una corriente de pensamiento que revaloraba las antiguas ideas filosóficas de los antiguos griegos y romanos al igual que un impulso al desarrollo del arte, la ciencia y la religión. Este cambio de pensamiento se vio apoyado por el desarrollo de la imprenta; gracias a que con esta se podían imprimir mayor cantidad de libros, las ideas se podían transmitir a una mayor cantidad de lectores y por consecuencia nuevos conocimientos y pensamientos pudieron salir a la luz [I.24].

A pesar de que desde la antigüedad hasta prácticamente entrada la *Revolución Industrial*, la naturaleza de los medios de transporte no sufriera cambios considerables debe hacerse notar que durante el *Renacimiento* se concibieron grandes ideas que posteriormente sirvieron de inspiración para el desarrollo de grandes inventos dentro de los medios de transporte [I.25]. Uno de los

principales personajes que aportaron grandes ideas fue el polímata *Leonardo Da Vinci* (Figura I.10), en cuyos escritos ha sido posible dar cuenta de bocetos de máquinas para poder volar y bucear, entre muchas otras [I.26].

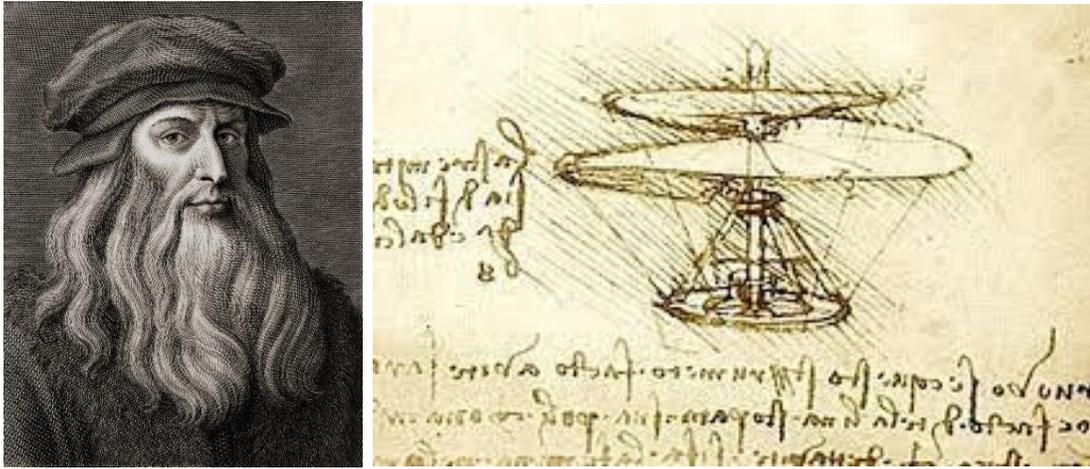


Figura I.10.- Retrato de *Leonardo Da Vinci* y uno de sus inventos

I.5.- Revolución Industrial y el transporte terrestre

Se dice que la Revolución industrial comienza con la aparición de la máquina de vapor desarrollada por *James Watt* a mediados del Siglo XVIII en Inglaterra [I.25]. Sin embargo, la verdad es que el auge de las industrias manufactureras había comenzado ya mucho tiempo atrás gracias al uso de ruedas y molinos hidráulicos [I.26].

La creciente necesidad por aumentar la producción y cómo hacerlo de una manera más eficiente, trajo consigo el desarrollo de nuevos inventos que venían a satisfacer esa necesidad. La *máquina de Watt* resolvía el problema de obtener una fuente de energía mecánica que no necesitara de la mano de obra del ser humano o las bestias de trabajo [I.27]. Para hablar de la máquina de vapor primero se debe conocer que *Watt* no fue el primero en desarrollar una máquina de este tipo, antes que él otros como *Savery* y *Newcomen*, ya habían incursionado en el campo de las máquinas impulsadas por medio del vapor y a su vez debido a que las máquinas de vapor funcionan gracias al incremento de la presión y el vacío en su interior es que debemos remontarnos a los estudios realizados por Evangelista Torricelli acerca de la presión atmosférica [I.28 y I.29]. *Torricelli* quien era alumno de *Galileo Galilei*, propuso en 1644 que la presión ejercida por una atmosfera era equivalente aproximadamente a la presión ejercida por una columna de mercurio de 760 mm de altura y que esta presión se ve disminuida conforme se encuentra por encima del nivel del mar.

Tres años más tarde esto se comprobó con un experimento donde se llevó un barómetro a la cima de una montaña en la que al realizar la medición se pudo identificar el descenso de la altura de la columna de mercurio de este barómetro había sido de 80 mm [I.30].

Gracias a los estudios de *Torricelli* fue que, en el año 1690, *Denis Papin* desarrolla una de las primeras máquinas de vapor para generar un trabajo mecánico. La *máquina de Papin* consistía de un embolo dentro de un cilindro que contenía agua, al calentar el agua esta generaba vapor, el cual al aumento de presión hacia elevar el embolo y al enfriarse el embolo decencia, reiniciando el ciclo; aunque de una manera muy sencilla y rudimentaria, este sistema significaba el inicio de sistemas más complejos para generar movimiento a través del empleo del vapor [I.31].

Para el año de 1707, *Papin* decidió aplicar su máquina a la práctica y gasto todos sus fondos para construir un barco impulsado por su nuevo invento, para demostrar el poder de su *máquina Papin* se propuso hacer un viaje desde la ciudad de Kassel, Alemania hasta Londres, Inglaterra. Sin embargo, su hazaña llamo la atención de un grupo de remeros locales que vieron en su máquina a un adversario peligroso y la noche del 25 de septiembre de 1707 se decidieron a destruir el barco de *Papin* (Figura I.15), quien después de esta tragedia decidió ir a Inglaterra y poco tiempo después falleció [I.32].

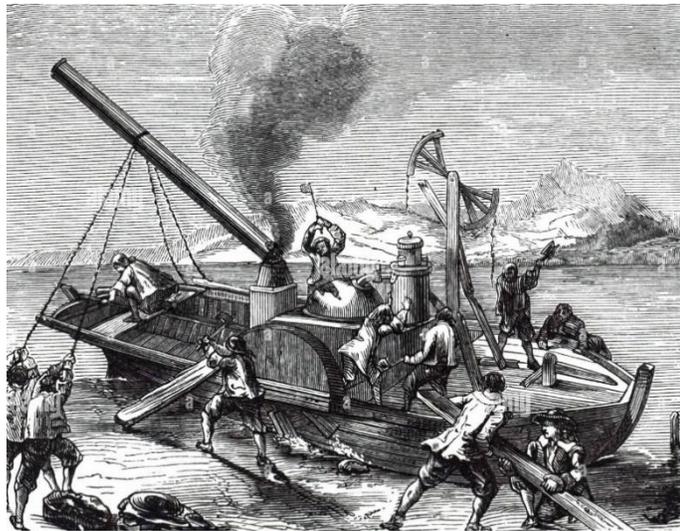


Figura I.11.- Destrucción del *barco de Papin*

El siguiente personaje que logró un avance en la tecnología de las máquinas propulsadas por vapor fue el inglés *Thomas Savery* (Figura I.16), quien en 1698 obtuvo una patente para una máquina que bombeaba agua con la ayuda de vapor, después de una demostración delante del rey *Guillermo III*.

Esta máquina funcionaba por medio de un tubo largo que se encontraba sumergido dentro de la fuente de agua que se deseaba bombear, este tubo se encontraba conectado a una caldera, un sistema de válvulas conectadas al tubo y a la caldera hacían posible que por el efecto del vacío que se generaba debido al enfriamiento del vapor el agua fuera bombeada del fondo del tubo hasta la cima de este [I.33]. En 1699 hizo una demostración práctica de su invento frente a la *Royal Society*, lo que le valió que ese mismo año, el Parlamento le otorgara una ampliación al monopolio de su patente hasta 1730. Publico poco tiempo después un libro titulado *The Miner's Friend*, donde describe el funcionamiento de su máquina. Aunque a principios del Siglo XVIII la máquina gozo de una buena demanda comercial, su éxito no fue muy grande debido a que la columna de agua que se podía elevar no era lo suficientemente alta para ser utilizada en el drenaje de minas de gran profundidad [I.34].

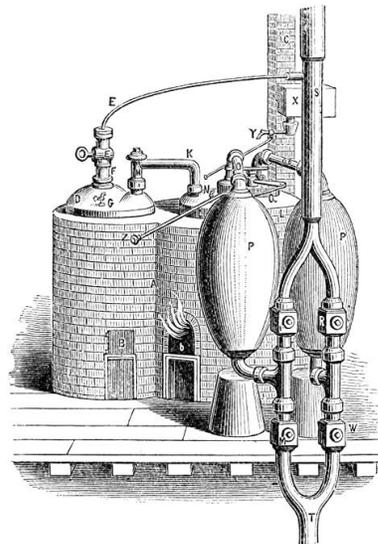


Figura I.12.- Ilustración de la *máquina de Savery*

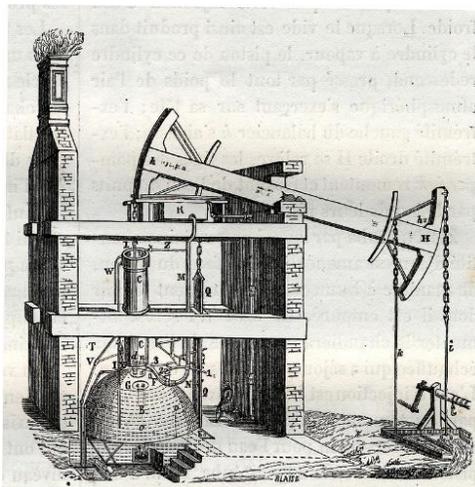


Figura I.13.- Ilustración de la *máquina de Newcomen*

El siguiente individuo en hacer aportes al desarrollo de las máquinas de vapor fue *Thomas Newcomen*, quien produjo una de las primeras máquinas exitosas accionadas por vapor (Figura I.13). *Newcomen* con asistencia de su ayudante *John Calley* se dieron a la tarea de fabricar una máquina que para 1712, ya era completamente funcional, al igual que la *máquina de Savery*, esta requería de un cilindro donde se llevaba a cabo un vacío por medio de la condensación de vapor y fue concebida para el bombeo de agua. La diferencia radicaba en la constitución del sistema, debido a que la *máquina de Newcomen* poseía un balancín del cual un extremo se encontraba conectado al cilindro de vacío y el otro extremo estaba conectado al sistema de bombeo [I.35]. Podría parecer que *Newcomen* se basó en la *máquina de Savery*. Sin embargo, los desarrollos de ambas máquinas se dieron de manera paralela a una a la otra y la similitud de ambas se debe a que los dos inventores basaron sus estudios en el trabajo realizado por *Papin* [I.36].

En 1767, fue publicado un estudio detallado sobre la eficiencia de las *máquinas de vapor de Savery* y *Newcomen*, que fue publicado por *John Smeaton*. A pesar de que *Smeaton* no desarrolló ninguna máquina nueva, sí introdujo mejoras al sistema de *Newcomen*, al darse cuenta en el estudio que realizó, que la eficiencia de estas máquinas era bastante deficiente debido a la pérdida de la energía calorífica. Las mejoras que le hizo a la *máquina de Newcomen* hicieron que pudiera duplicar la eficiencia ya para el año 1774. Sin embargo, incluso con esta gran mejora el potencial térmico aprovechado por la máquina era de tan solo el 1%, lo que implicaba que se necesitara una gran cantidad de combustible para su funcionamiento, pese a esto para los propietarios de las máquinas no resultaba un inconveniente muy grande ya que la mayoría era usada en minas de carbón, en las que usaban el carbón de menor calidad para su operación [I.37].

El nombre de *James Watt* está asociado a la máquina de vapor como el inventor de esta, pero como se ha dejado claro varios otros lo precedieron. Lo que es cierto es que las innovaciones que trajo *Watt* provocaron el auge del uso de esta máquina. A la edad de 21 años *Watt* se encontraba trabajando para la universidad de Glasgow, Inglaterra como Mecánico de Instrumentos de precisión y fue ahí donde tuvo la oportunidad de tener un acercamiento a una de las *máquinas de vapor de Newcomen* que era propiedad de la universidad y se encontraba al mando del químico *Joseph Black*. *Watt* anunció que la baja eficiencia de la máquina se debía a deficiencias de diseño debido a que la máquina realizaba el calentamiento y condensación del vapor en el mismo cilindro, con esto en mente, se puso a la tarea de diseñar una máquina donde la condensación del vapor se

llevara a cabo en un recinto separado manteniendo de esta manera el cilindro siempre a alta temperatura, evitando así pérdidas de energía calorífica [I.37]. Cabe destacar que *Joseph Black* hizo grandes investigaciones sobre Termodinámica, dentro de sus estudios se puede destacar que definió la disparidad entre las ideas de calor y temperatura. Además, introdujo los conceptos de *calor latente* y *calor específico*. Desarrolló una gran amistad con *James Watt* a quien ayudo a llevar a cabo la fabricación de su máquina e incluso aportó un gran apoyo financiero para poder llevar a cabo el proyecto [I.38].

Para mayo de 1765, *Watt* tenía ya la solución al problema de eficiencia de la *máquina de Newcomen*. Además, ya había planificado la construcción y funcionamiento de su máquina, pero fue hasta enero de 1769 cuando obtuvo el registro de su patente para una máquina de vapor con un condensador externo. Lamentablemente debido a contratiempos para conseguir los materiales necesarios. Así como, herramienta y mano de obra especializada para la producción de su innovación, las dos primeras *máquinas de Watt* entraron en funcionamiento hasta 1776. Otro de los obstáculos que frenaron la producción de la *máquina de Watt* fue la falta de financiamiento económico, el primer socio comercial de *Watt* fue *John Roebuck* quien se fue a la quiebra debido al excesivo ritmo de inversión que requería el desarrollo de la máquina. Esto llevó a *Watt* a detener por un tiempo progreso del proyecto y a aceptar un empleo como Ingeniero Civil en Londres, donde amigos suyos le presentaron a *Matthew Boulton*, quien era un productor industrial que poseía varias empresas en la localidad de Soho. *Boulton* decidió asociarse con *Watt* en 1774, para que este pudiera consumir la producción de su máquina. Sin embargo, un nuevo problema obstaculizaba el camino de *Watt*, la patente que poseía solo sería vigente por ocho años más, algo que *Boulton* consideraba poco tiempo para sacar provecho del producto, que así que *Watt* solicitó al Parlamento una extensión de la vigencia de la patente, la extensión le fue concedida en 1775 con un plazo de valides hasta el final del siglo [I.38].

La sociedad de *Watt* y *Boulton* fue bastante fructífera y como resultado de ella 496 máquinas salieron al mercado, de las cuales 164 fueron usadas como bombas de agua en minas, 24 en altos hornos para la producción de acero, 308 fueron ocupadas para abastecer de energía a otras maquinarias que requerían de movimiento rotativo [I.39]. A pesar del éxito que tuvo *Watt* desde un comienzo, siempre se mantuvo tratando de perfeccionar su máquina haciendo mejoras para incrementar el desempeño. Este esfuerzo se vio reflejado en la manera en que su máquina marco

el desarrollo de la humanidad haciendo que su nombre fuera recordado como parte importante de la expansión de la industrialización y por lo tanto de la modernidad [I.40].

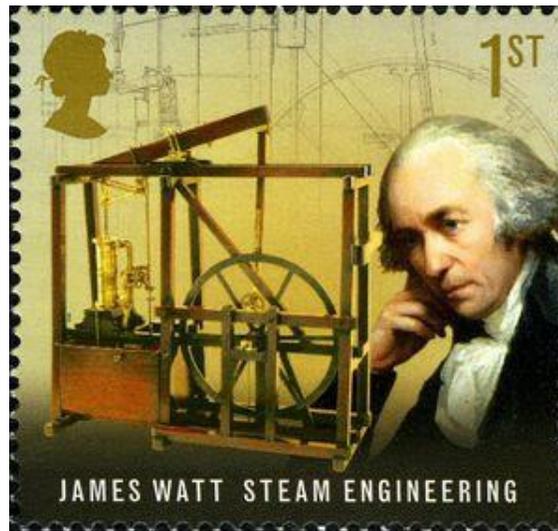


Figura I.14.- Postal inglesa en conmemoración de *James Watt* y su máquina

Como se vio anteriormente el desarrollo de la máquina de vapor ayudó al desarrollo de las industrias de la minería, producción de acero, entre muchas otras. Este avance no sólo implicó que las industrias produjeran más productos sino también su flujo de producción se viera aumentado, esto causó que los productos de tuvieran que distribuir de una manera veloz y eficiente. Sin embargo, las primeras máquinas de vapor eran demasiado grandes y presentaban un riesgo en caso de tener fallas que podían implicar explosiones, se tuvo que esperar a que la evolución de este medio de propulsión diera como resultado una máquina de un tamaño menor con una mejor eficiencia de consumo de combustible para poder hacer productivo el transporte impulsado por vapor. Esta necesidad no se mantuvo mucho tiempo ya que el progreso dio como resultado lo que se buscaba y fue aquí que la máquina de vapor hizo también su incursión en el ámbito del transporte [I.41].

La aplicación del vapor como medio de propulsión para vehículos terrestres se remonta a 1769 cuando *Nicholas-Joseph Cugnot* presentó un vehículo impulsado por una caldera de vapor con el propósito del transporte de artillería en situaciones de batalla. Su máquina presentó fallas en el sistema de alimentación y fue rechazada por el ministro de guerra francés. Al año siguiente construyó otro prototipo llamado *Fardier a Vapeur* (Figura I.15), lamentablemente igual presentaba fallas de diseño que la hacían imposible de manejar y por ello se construyeron muy pocos [I.42].

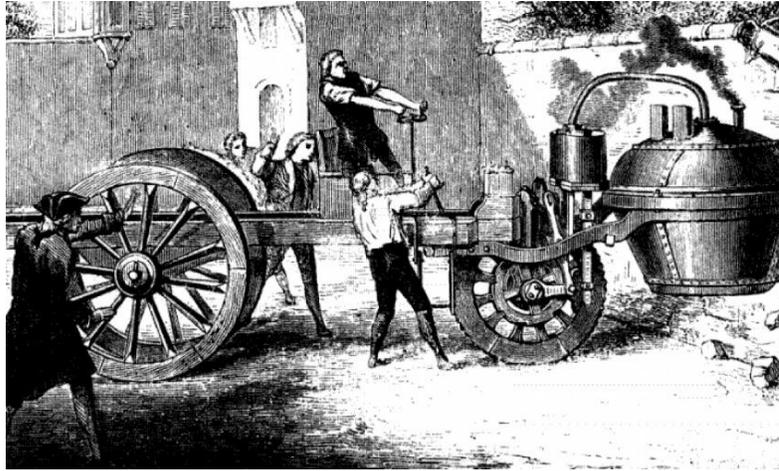


Figura I.15.- El *Fadier de Caugnot*

El propio *James Watt* hizo el intento de fabricar un carruaje que fuera propulsado por una máquina de vapor, de 1757 a 1758 trabajó en esta idea, pero nunca la terminó y quedó inconclusa. El ayudante de *Watt*, *William Murdock* se dio a la tarea de desarrollar un vehículo de locomoción independiente y en 1784 fabricó un modelo de lo que se considera la primera motocicleta que se conoce [I.42].

Hasta el momento los intentos de poner una máquina de vapor sobre un dispositivo que se lograra mover de manera autónoma no habían tenido los mejores resultados, fue gracias al inglés *Richard Trevithick* que se logró el progreso del transporte terrestre a vapor. *Trevithick* fusionó las ideas de un carruaje impulsado a vapor y el uso de los rieles para mantener el dispositivo sobre una vía fija, dando así el nacimiento de la locomotora. *Trevithick* logró en la víspera de Navidad de 1801 poner en funcionamiento un carruaje de vapor a alta presión, logrando transportar personas en ella a una velocidad superior de 8 millas por hora, demostró ser superior al poder subir una pendiente de 800 m de longitud manteniendo la velocidad en comparación con los carros de caballos que reducían su velocidad. [I.42]. Para 1804 introdujo al diseño de su máquina mejoras como el uso de una chimenea vertical para el vapor, manómetros y válvulas de seguridad para la caldera. El 21 de febrero de ese año hizo una demostración de su locomotora sobre una vía de Hierro desde la herrería de Penydarran hasta el canal Glamorganshire, el recorrido era de 15.5 km, logró llevar una carga de 10 toneladas además de 70 pasajeros, manteniendo la velocidad de 8 kilómetros por hora [I.43]. A pesar de los desarrollos de *Trevithick* del carruaje de vapor, este sufrió algunos traspiés debido a que los gremios de conductores y constructores de carros de caballos en Inglaterra los veían como

un rival a su medio de trabajo, algunos de estos Hombres tenían influencia en el parlamento y lograron hacer que se autorizara una restricción en 1830 contra estos [I.44].

George Stephenson en 1814 logro producir una locomotora llamada *Blucher* (Figura I.16). Esta máquina era capaz de jalar ocho vagones con treinta toneladas de Carbón y podía llegar a una velocidad de 6.5 kilómetros por hora y aunque no era tan eficiente como se esperaba obtuvo buenos resultados. Durante los siguientes años *Stephenson* siguió perfeccionando su locomotora y en 1824 fundo la que sería la primera fábrica de locomotoras en Inglaterra. Posteriormente el gobierno de este país le solicito construir las dos primeras rutas de vías férreas destinadas al transporte de personas del Reino Unido, estos iban de Stockton a Darlington y de Liverpool a Manchester [I.45].

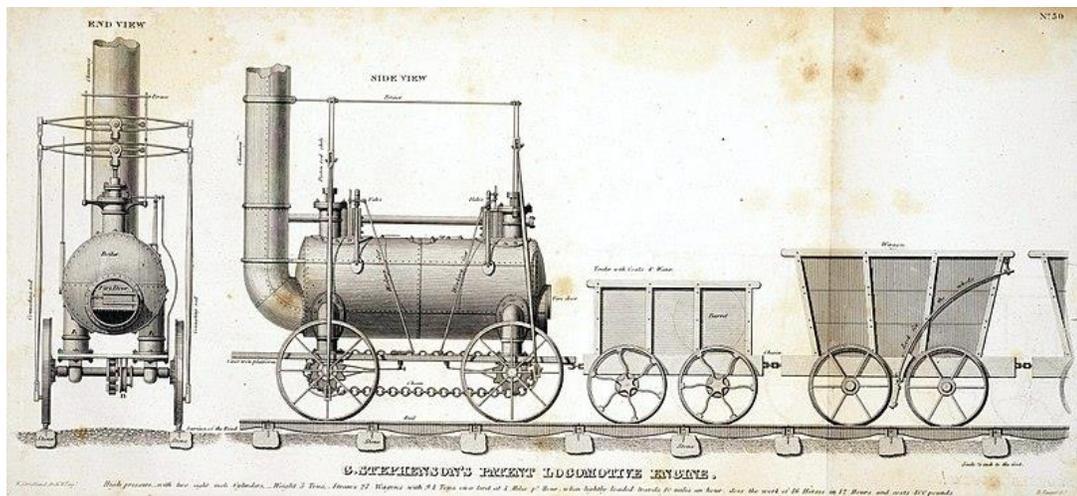


Figura I.16.- La locomotora *Blucher* de *Stephenson*

Durante décadas posteriores más aditamentos y mejoras hicieron del ferrocarril el transporte terrestre de mayor expansión por su capacidad de transportar grandes cargas, así como por su velocidad; tanto en Inglaterra, Europa y Estados Unidos significo la expansión de los mercados y la manera de unir ciudades que se encontraban muy alejadas unas de otras [I.46].

I.6.- Motor de combustión interna

La *Segunda Revolución Industrial* es un periodo de cambios en la forma de vida de la humanidad caracterizado por un gran aumento de tecnología e innovaciones que siguen vigentes hasta nuestros días. Este periodo tiene comienzo hacia finales del Siglo XIX, los cambios que se dieron giran en torno al surgimiento de la electricidad y el petróleo como fuentes de energía. Grandes inventos como el radio y el teléfono hicieron su aparición para comunicar a más personas, pero fue el motor

de combustión interna y su incursión en los medios de transporte los que ayudaron a recortar las distancias que separaban a las personas [I.47].

La primera aparición del motor de combustión interna llegó de la mano de *François Isaac de Rivaz*, quien logró construir en 1807 el primer vehículo impulsado por un motor de combustión interna. Este motor utilizaba como combustible una mezcla de hidrogeno y aire [I.48]. En 1854, *Eugenio Barsanti y Felipe Matteuci*, dieron a conocer su motor de combustión interna, siendo este uno de los primeros motores exitosos de los que se conoce [I.49]. *Jean Joseph Etienne Lenoir* construyó en 1859, un motor de 2 tiempos y un cilindro el cual fue de los primeros en utilizar una bujía para provocar la reacción del combustible dentro del cilindro (Figura I.17). Tres años después *Lenoir* adaptó este motor a un vehículo de tres ruedas, que fue nombrado como *Hippomobile* que se puede traducir como caballo móvil [I.48 y I.49]. Este motor funcionaba con una mezcla de gas de hulla y aire; a pesar de ser muy ruidoso y presentar constantes sobrecalentamientos cuando no era bien refrigerado, este motor resultó de los primeros éxitos en el mercado llegando a vender alrededor de 500 unidades [I.50].

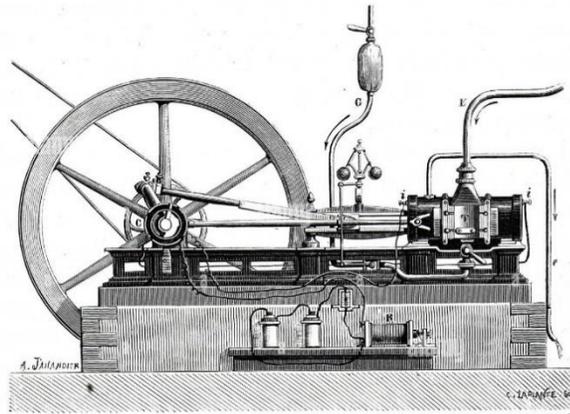


Figura I.17.- El motor de Lenoir

Alphonse Eugene Beau de Rochas fue el primero en comprender que la compresión del combustible previa a la combustión traería mejoras sustanciales al desempeño del motor y es por ello que desarrolló los principios teóricos de lo que se convertiría en el motor de cuatro tiempos. En 1862 *de Rochas* presentó una solicitud de patente presentando el diseño de este motor, cuya característica principal era que la combustión se llevaba a cabo cuando el pistón se encontraba en el punto muerto superior lo que supone la mayor compresión del combustible y a la vez la autoinflamación del combustible. Esa idea tiempo después se convertiría en el principio de funcionamiento de los

motores de Diesel. Por falta de pago la patente de Beau de Rochas no fue publicada, pero sentó las bases para que Otto diera a conocer su trabajo [I.51].

Nikolaus August Otto se le recuerda como el creador del motor de cuatro tiempos. Sin embargo, comenzó fabricando motores de dos tiempos sin compresión previa, estos apenas superaban la eficiencia de los *motores de Lenoir* [I.52]. En 1876, *Otto* construyó su primer motor de cuatro tiempos que tenía una potencia de 3 HP y funcionaba a una velocidad nominal de 180 rpm. Ese mismo año presentó la patente de este invento, por desgracia fue demandado varios años después por utilizar los conceptos de *Beau de Rochas* y en 1884 su patente perdió validez en Alemania. Aun así, el mérito de este invento se le reconoce a él debido a ser el primero en producirlo de manera exitosa. [I.52]. *Otto* llegó a vender más de 50 000 unidades de su motor durante los primeros diecisiete años de existencia de su empresa, tal fue el éxito de su máquina, que a partir de 1890 casi de manera universal todos los motores se basan en el funcionamiento del llamado ciclo Otto (Figura I.18) [I.53].

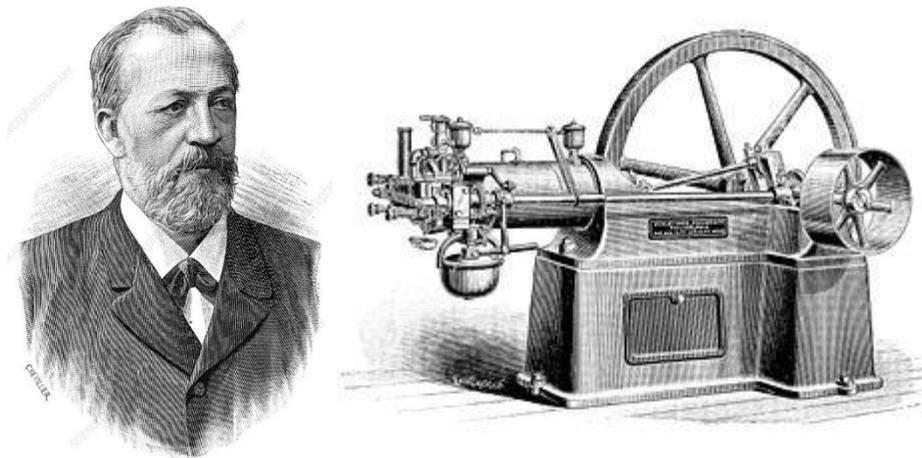


Figura I.18.- Retrato de *Nikolaus Otto* junto a su motor

El progreso de los motores de combustión interna que usan combustible pesado se le debe a *Rudolf Diesel* quien en 1892 patentara la idea de su máquina y en 1897 lograra fabricarlo por primera vez de manera exitosa. El *motor Diesel* aprovecha los principios de la termodinámica al hacer que la combustión se produzca sin la necesidad de un medio precursor sino por la simple compresión del combustible, esto le favorece su eficiencia térmica [I.54]. *Gottlieb Daimler* dejó la compañía *Deutz* en 1882 llevándose consigo a *Wilhelm Maybach*. Esto debido a los constantes roces con *Otto*. Ese mismo año se establecieron en un taller cerca de Stuttgart, ahí se dieron a la tarea de fabricar un

motor que usara gasolina como combustible para remplazar al gas de hulla que usaban todos los demás motores de la época, el resultado fue un motor de 1 HP a 600 rpm con un peso de 50 kg al que *Daimler* nombro *Standuhr* ya que su forma le recordaba un reloj de pie. En noviembre de 1885, ya tenían una versión más pequeña de este motor y decidieron incorporarlo a un vehículo de madera parecido a una bicicleta, la llamaron *Reitwagen* y es la primera motocicleta con motor de combustión interna de la que se conoce, *Maybach* realizo un recorrido con esta motocicleta alcanzando una velocidad de 12 kilómetros por hora, dejando demostrado la eficiencia de sus motores impulsados por gasolina (Figura I.19) [I.55].

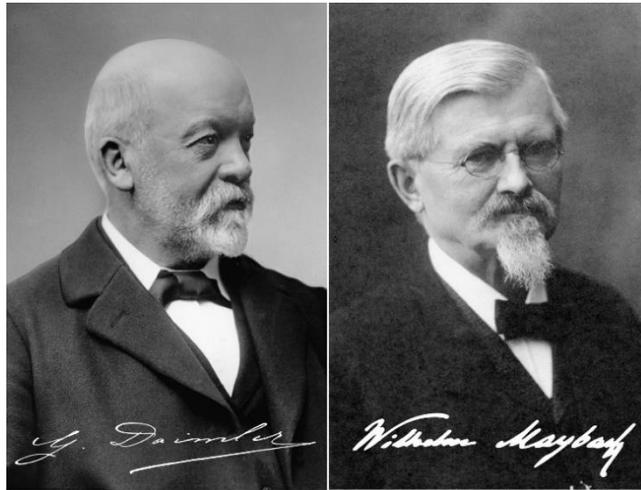


Figura I.19.- *Gottlieb Daimler* y *Wilhelm Maybach*

Aunque *Karl Benz* fue otro ingeniero alemán que igual contribuyo al desarrollo de los motores de gasolina, su éxito se debe en gran medida a que popularizo su uso en los automóviles como medio de potencia; es por ello que más adelante se hablara de él [I.56].

I.6.1.- El automóvil moderno

Como ya se ha visto, los vehículos autónomos aparecieron hace mucho tiempo, casi a la par del uso de la máquina de vapor en las industrias. Sin embargo, los automóviles como se conocen en la actualidad hicieron su aparición de la mano del Ingeniero alemán *Karl Benz*.

Karl Friedrich Benz estudio ingeniería mecánica y desde joven mostro interés por el desarrollo de los motores; en 1877 inicio la tarea de producir un motor de dos tiempos, para 1879 ya estaba terminado y enseguida logró patentarlo, lo que a la postre resultara en la creación de una empresa de motores llamada *Gasmotoren Fabrik Mannheim* en 1882. Por desgracia *Benz* no concordaba

con sus socios. En 1883 decidió abandonarla y para comenzar de nuevo. En 1883, *Benz* junto con sus nuevos socios *Max Kaspar Rose* y *Friedrich Esslinger* fundan la compañía *Benz & Cie*, la cual es la empresa fabricante de automóviles más antigua de la historia [I.57]. El primer automóvil de *Benz* sale a la luz en 1884 (Figura I.20), esta era básicamente un triciclo con un motor de gasolina de 4 cilindros en la parte posterior, llantas de rayos y un sistema de transmisión con cadena, el vehículo fue llamado *Benz Patent Motorwagen*, pero fue hasta el 29 de enero de 1886 que obtuvo la patente, siendo la primera de un automóvil impulsado por un motor de gasolina [I.58 y 59].

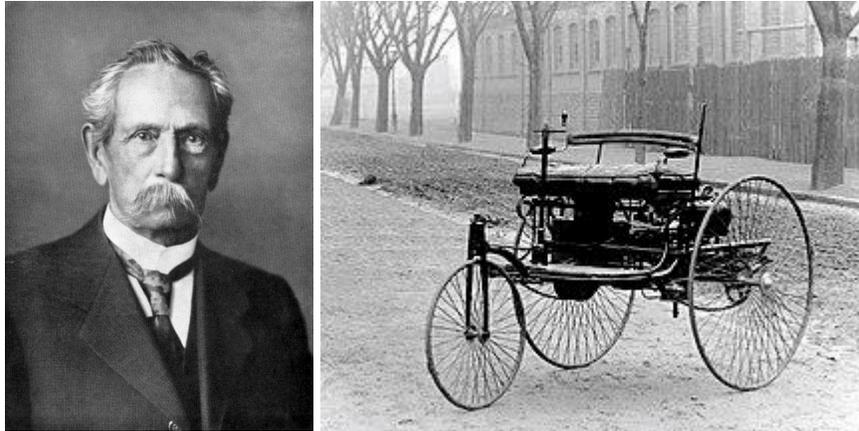


Figura I.20.- Karl Benz y su Patent Motorwagen

En 1889, *Benz* presentó en la exhibición de Paris un automóvil con cuatro ruedas en lugar de tres como sus primeros modelos. Ya en 1893, *Benz* había vendido 25 automóviles y la demanda seguía creciendo. Lo que llevo a que en 1899 la marca *Benz* fuera la mayor fabricante de automóviles en el mundo con una producción de 572 unidades por año [I.58]. Pese a que *Benz* fue un pionero en la fabricación de automóviles, la creciente competencia en su mayor parte por compañías francesas hizo que comenzara a decaer y ceder terreno frente a las innovaciones tecnológicas que presentaban sus rivales [I.60].

Paralelamente al avance que tenía *Benz* con sus vehículos los alemanes *Daimler* y *Maybach* seguían teniendo progresos en la industria automotriz. En 1886 fabricaron su primer automóvil usando una carroza a la que le adaptaron un motor *Standuhr* de 1.1 HP, la transmisión se llevaba a cabo por medio de un sistema de bandas haciendo que el vehículo pudiera alcanzar los 12 kilómetros por hora [I.61]. Al igual que *Benz*, *Daimler* y *Maybach* presentaron un modelo de automóvil de cuatro ruedas en la exhibición de Paris de 1889, esta demostración atrajo la atención de inversionistas y el 28 de noviembre de 1890 fundaron la compañía *Daimler-Motoren-Gesellschaft* conocida igual

solo como *DMG* [I.57] que se especializaba principalmente en la producción de motores con *Maybach* a la cabeza del departamento de diseño. En 1892, la compañía vendió su primer automóvil de cuatro ruedas (Figura I.21) y en 1898 Maybach introdujo a sus modelos el radiador moderno, con la forma de panal de abejas [I.62].



Figura I.21.- *Daimler* en como pasajero de uno de sus primeros modelos de 4 ruedas

La industria automotriz francesa se desarrolló después que la alemana. Sin embargo, es en Francia donde ve una creciente expansión y de ello deriva que en este país se llevará a cabo en 1895 la primer gran carrera de automóviles de la que se conoce. El recorrido era Paris-Burdeos-Paris con una distancia de 1200 km. El ganador de la carrera fue el francés *Emile Constant Levassor*, con un biplaza propulsado por un *motor Daimler* colocado en la parte delantera del vehículo, demostrando ser más efectivo este diseño de motor delantero [I.63].

Infortunadamente y a pesar de la gran cantidad de logros tecnológicos, así como del éxito que estaba teniendo su empresa, *Gottlieb Daimler* falleció el 6 de marzo de 1900 [I.64]. Ese mismo año, el empresario y dueño de un equipo de carreras *Emil Jellinek*, convenció a *Maybach* de que le construyera un automóvil innovador para competir en carreras automovilísticas. El resultado fue lo que muchos consideran el primer automóvil moderno, un vehículo de 1200 kg, equipado con un motor de 4 cilindros en línea de 5.9 L y una potencia de 35 HP, con un radiador de panal y un chasis de acero. El auto fue nombrado *Mercedes 35 HP* en honor a la hija de *Jellinek*, aunque su nombre era *Adrienne*. El 22 de diciembre de ese año el vehículo se le entregó a *Jellinek*, pero viendo el excelente producto que habían fabricado, la compañía comenzó a producirlo al público en 1901

(Figura I.22) y en septiembre de 1902 la *DMG* registro de manera oficial el nombre para que todos sus modelos lo llevaran [I.65].

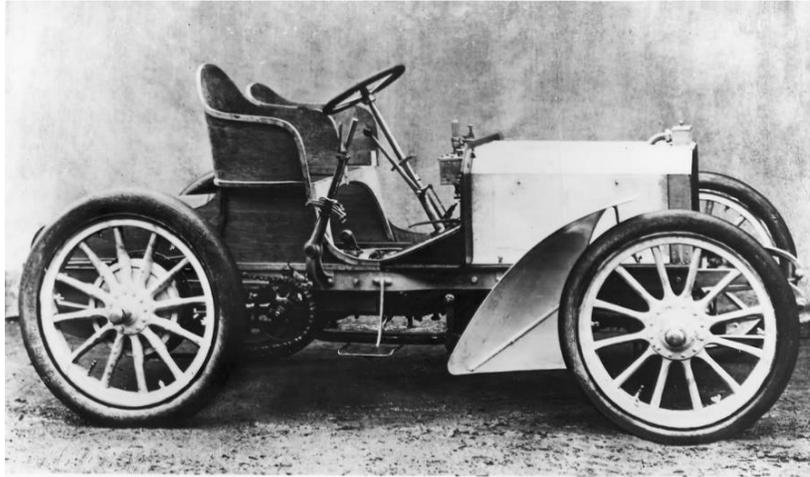


Figura I.22.- Mercedes 35 HP de 1901

Así como en Europa, en los Estados Unidos el automóvil igual tuvo una gran expansión y un fuerte crecimiento. En este país fue donde se popularizó el término *automóvil* que proviene de la palabra francesa *automobile* (de la misma manera que se escribe en inglés) al contrario de Europa donde no tenía un término común [I.60]. El primer automóvil impulsado a gasolina que se construyó en Estados Unidos fue obra de los hermanos *Charles* y *Frank Duryea*, quienes fabricaron el primer vehículo usando un motor de un cilindro adaptado a un sencillo carro, podía alcanzar las 8 millas por hora. La manufactura se llevó a cabo en Springfield, Massachusetts donde los hermanos tenían un taller y la construcción estuvo culminada en septiembre de 1893 [I.65].

El automóvil se siguió expandiendo cada vez más en todo el mundo dando como resultado la aparición de nuevas compañías productoras de automóviles. Sin embargo, muchas de estas no perduraron hasta nuestros tiempos, pero no sin dejar registro de sus ideas y avances tecnológicos al progreso del automóvil. Tal es el caso de la ya extinta *Oldsmobile* que fue la primera compañía en producir un automóvil en masa, este vehículo era el *Curved Dash Oldsmobile* desarrollado por el fundador de la compañía *Ransom Eli Olds* en 1901 (Figura I.23) y que salió al mercado con un precio de venta de 650 dólares [I.66]. La fabricación de este automóvil se llevaba a cabo en una de las primeras líneas de producción donde se agregaban pieza por pieza hasta completar el trabajo, así como el uso de piezas intercambiables. Con el éxito de este automóvil que para 1903 vendía 4 000 unidades, también llegó el éxito a la ciudad de Detroit en Estados Unidos donde se encontraba

asentada esta compañía y que a la postre se convertiría en la cuna de la industria automotriz en el país norteamericano [I.67 y I.68].



Figura I.23.- *Curved Dash Oldsmobile* de 1901

Aunque la Oldsmobile inicio con la producción en masa de automóviles en Estados Unidos, el personaje que haría una completa revolución no solo a la industria automotriz sino a toda la industria manufacturera mundial fue el famoso *Henry Ford* [I.69]. *Ford* consiguió en 1891 un trabajo en la compañía eléctrica *Edison Illuminating Co* y durante sus tiempos libres comenzó el desarrollo de lo que sería su primer automóvil, fue llamado *cuadriciclo* y era un pequeño vehículo impulsado por un motor de gasolina de dos cilindros que generaba 4 HP. Tenía un peso de 500 libras y podía alcanzar una velocidad de 25 millas por hora (Figura I.24). El vehículo hizo su debut el 4 de junio de 1896 en las calles de Detroit y sería vendido después por 200 dólares [I.70].

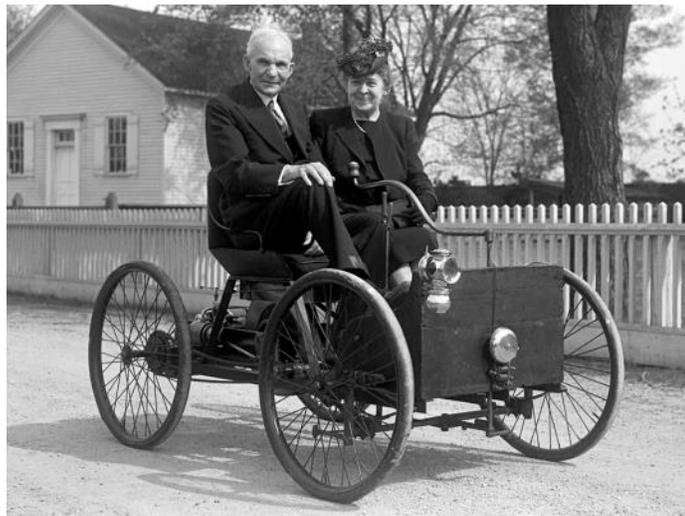


Figura I.24.- *Henry Ford* montado en su cuadriciclo

Diseño y evaluación numérica de alerón frontal
para un vehículo de competencia de Fórmula Uno

La *Ford Motor Company* había experimentado con su primer modelo demasiadas variantes llevando a sus automóviles a volverse vehículos de lujo. Sin embargo, se dieron cuenta que esto mantenía las ganancias a un ritmo poco constante, fue así que decidieron volver a lo simple y convertir al automóvil en un dispositivo común para todas las personas. En el otoño e 1908 fue introducido al mercado el *modelo T*, también conoció como *Tin-Lizzie* o *Flivver*, este automóvil era sencillo y aunque un tanto básico lo compensaba con la calidad de su construcción, llamado *el auto universal* por Ford [I.71].

I.7.- La Federación Internacional del Automóvil, Fórmula Uno y los Grandes Premios

Antes de comenzar de hablar de cómo es que surgieron estas tres entidades, es necesario proporcionar una breve definición para no caer en confusión de significado dentro del deporte automotor. La *Federación Internacional del Automóvil* también conocida solo como *FIA*, es una organización mundial que se encarga de regular, apoyar y dotar de reconocimiento a las competencias de automovilismo a nivel mundial, está conformada por organizaciones de 146 países [I.72].

La *Fórmula Uno* es la máxima categoría de la *FIA*, destinado a vehículos monoplasas esta competición está dividida en el campeonato de constructores y el campeonato de pilotos, la categoría celebra una temporada cada año y a lo largo de la temporada se llevan un número determinado de carreras que son conocidas con el nombre de *Gran Premio*. Los equipos que compiten en esta categoría son llamados Escuderías y estas deben presentar 2 pilotos y 2 vehículos en cada temporada para poder obtener puntos, los puntos se otorgan dependiendo de la posición en la que terminen la carrera los pilotos; ya que el marcado del campeonato de pilotos y el de constructores se mantiene aislado uno de otro, es posible que una escudería sea campeona, pero no así el piloto campeón pertenezca a esta escudería [I.73].

Como ya se mencionó antes, las competencias automovilísticas comenzaron en Francia alrededor de 1895, pero en el resto de Europa y en Estados Unidos igual fueron en aumento y cada vez más clubes de fanáticos de las competencias fueron apareciendo en todo el mundo. En 1899 el magnate estadounidense *James Gordon Bennett Jr.* tuvo la idea de organizar una competencia de automovilismo a nivel mundial y fue así que surgió la *Gordon Bennett Cup*, se realizaba una vez al año y tenía representación de 3 marcas de los países de Francia, Bélgica, Gran Bretaña,

Alemania, Italia y Estados Unidos. Además, no se contaba con un reglamento que limitara las características técnicas de los vehículos. Por fortuna y para mantener la competencia más justa en 1902 los comités de los países competidores acordaron implementar una “formula” que debían seguir los automóviles para poder competir (Figura I.25) [I.74].



Figura I.25.- Vehículo alistándose para competir en la *Gordon Bennett Cup* de 1902.

Para 1903 los organizadores del evento decidieron cambiar el formato de las carreras que se desarrollaban en circuitos callejeros a circuitos cerrados en algunos de los primeros autódromos que se construyeron especialmente para estos grandes eventos [I.75]. La necesidad de una entidad reguladora de estas competencias llevo a la creación de la *Association Internationale des Automobile Clubs Reconnus* (ancestro de la actual *FIA*), que estaba representada por organismos o clubes de las naciones participantes en competencias automovilísticas [I.75].

En 1906, el *Automobile Club de France*, entro en desacuerdo con el comité organizador de la *Gordon Bennett Cup* debido a que estaban limitados a tres equipos representantes por nación. Francia en esa época era uno de los países con mayor cantidad de fabricantes de automóviles, esto hizo que los franceses pidieran una mayor participación de sus equipos y al verse rechazados decidieron organizar su propio evento que se llevó a cabo en *Le Mans* y al que llamaron *Grand Prix* [I.75 y I.76].

En 1907, otros países como Alemania e Italia comenzaron a organizar sus propios eventos automovilísticos; el *Kaiserpreis* y la *Targa Florio* fueron los nombres respectivamente de estas naciones, y eran el equiparable en importancia del *Grand Prix* francés [I.74]. Las regulaciones tuvieron un gran cambio en 1908 ya que se introdujeron dos categorías de automóviles de carreras,

en una seguirían corriendo los grandes autos con un peso máximo de 1000 kg. Mientras en la otra categoría estarían automóviles más pequeños y livianos llamados *voiture legere* o simplemente *voiturette* (Figura I.26). Debido al alto costo que representaba competir en la categoría de autos grandes, muchos de los equipos pequeños decidieron ingresar a la *voiturette* haciendo de esta categoría la más atractiva y competitiva. Los cambios en la reglamentación se mantuvieron fluctuando durante varios años hasta que en 1914 los organizadores del *Grand Prix* decidieron imponer un límite al tamaño de los motores que se usaban de 4.5 litros de cilindrada, ya que en los dos años anteriores el equipo ganador había sido *Peugeot* con autos impulsados por motores monstruosos de 7.6 litros y 5.6 litros respectivamente; esto resulto en una mayor competencia por parte de todos los equipos. Por desgracia la primera guerra mundial hizo que el mundo del deporte automovilístico se viera frenado ya que muchos de los constructores que participaban en estos eventos tuvieron que dedicarse a la fabricación de equipo bélico para sus naciones [I.74 y I.76].

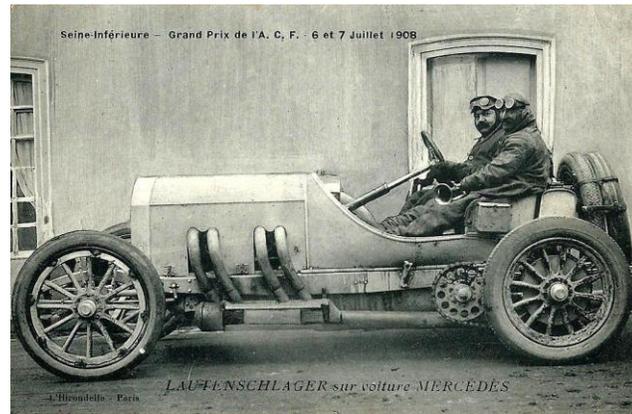


Figura I.26.- Mercedes voiture en el Gran Premio de Francia de 1908

Las competencias automovilistas no solo han servido para demostrar quién es el más veloz sobre la pista sino también para demostrar quién es el que puede resistir corriendo durante más tiempo y es por esto que surgieron las carreras de resistencia, donde se mezcla la velocidad y la durabilidad de los vehículos a las más altas exigencias. Una de las primeras competencias de resistencia surgió en los Estados Unidos en 1911 y es conocida como las 500 millas de Indianápolis, en su momento esta carrera fue el equiparable a el Grand Prix francés. Una de las competencias de resistencia más famosas y reconocidas a nivel mundial son las *24 horas de LeMans*, la cual tuvo su origen en el año de 1923 [I.74]. Posterior a la guerra, Francia anuncio que reanudaría las competencias automovilísticas en su país con una *Grand Prix* en el año de 1921 que se llevaría a cabo en *Le Mans*, imitando las reglas técnicas que tenían las *500 de Indianápolis*, los franceses decidieron que

los autos cumplieran con un formato de motores de 3 litros máximos de cilindrada y un peso total del vehículo no menor a 800 kg [I.77]. A pesar de que las competencias automovilísticas eran grandes eventos que se organizaban en muchas naciones, hasta el momento no había ningún campeonato o temporada que determinara un absoluto campeón a nivel mundial. Fue en 1925 que la *Association Internationale des Automobile Clubs Reconnus* decidió presentar un formato de campeonato mundial que consistía en una temporada de varias carreras que serían puntuadas. El método de puntuación era conocido como *Sistema de Mínimo Puntaje* ya que al ganador se le otorgaba un punto, el segundo lugar dos puntos, el tercero tres puntos y para el resto 4 puntos. Sin embargo, el no iniciar la carrera o completarla parcialmente igual era causa de recibir puntos, al final de la temporada el campeón era el que lograba acumular menor cantidad de puntos. Las temporadas de 1925 hasta 1927 transcurrieron de esta manera sin problema alguno, pero durante las temporadas de 1928 hasta 1930 no se logró tener un calendario lo suficientemente largo para poder decretar un legítimo campeón usando este sistema. Es por ello, que en 1931 la *Association Internationale des Automobile Clubs Reconnus* introdujo el *Campeonato Europeo de Pilotos*, dando así un mayor reconocimiento a los pilotos y no solo a los equipos participantes. El formato de puntuación de este campeonato era similar al de mínimo puntaje, pero con algunos pequeños cambios, lo que logro que dicho campeonato se lograra celebrar sin problemas hasta 1938; por desgracia, el comienzo de la segunda guerra mundial hizo imposible el desarrollo de la temporada de 1939 y este campeonato tuvo que ser suspendido [I.76 y I.78].

Posterior a la guerra en 1945, la *Association Internationale des Automobile Clubs Reconnus* tuvo una reestructuración y cambio su nombre por el de *Fédération Internationale de l'Automobile (FIA)* [I.9], con este cambio vino igual un ajuste a las categorías en las que se corría, la *FIA* introdujo estándares más elevados y el concepto de las *Fórmulas A, B y C* que posteriormente se nombrarían *Formula 1, 2 y 3* respectivamente [I.76].

La Federación Internacional de Motociclismo llevo a cabo su primer campeonato mundial tanto como pilotos como para constructores. Esto impulso a la *FIA* a realizar lo propio y en 1950 la *FIA* lanza el *Campeonato Mundial de Pilotos de la Formula 1* (Figura I.27) con un calendario de seis carreras en Europa que incluían los circuitos de Gran Bretaña, Mónaco, Suiza, Bélgica, Francia e Italia, además de las 500 millas de Indianápolis. Este campeonato incluía un nuevo sistema de puntaje máximo donde los puntos eran repartidos dependiendo la posición que habían obtenido al

final de la carrera, resultando como campeón quien acumulara mayor cantidad de puntos [I.76 y I.77].



Figura I.27.- Giuseppe Farina primer campeón de *Fórmula Uno* en un *Alfa Romeo 158*

Los primeros campeonatos de la *Formula 1* tuvieron un formato de vehículos monoplazas con motores de 4.5 litros y 12 cilindros situados la frente, los equipos italianos se hicieron con el dominio de la categoría seguidos muy de cerca por los alemanes (*Mercedes-Benz*) [I.79]. Cabe destacar que el único equipo que ha participado en todas las temporadas de la *Fórmula Uno* ha sido el equipo Ferrari [I.77]. En 1958, se introdujo paralelo al *Campeonato Internacional de Pilotos*, el *Campeonato de Constructores de Fórmula Uno* para premiar al mejor equipo a lo largo de la temporada, dejando de esta manera sentadas las bases de la manera en la que se desarrolla el serial hasta la actualidad [I.76].

I.8.- Planteamiento del Problema

En la actualidad las competencias automovilísticas representan un gran campo de pruebas para nuevas tecnologías, la *Fórmula Uno* siendo la categoría más importante del automovilismo es el escenario de la más alta ingeniería automotriz; pese a que esta categoría cuenta con una normativa que estimula la competencia de manera equilibrada, la brecha en el aspecto de competitividad creada por los equipos que más recursos invierten en el desarrollo de sus vehículos ha hecho que las últimas temporadas disputadas en esta categoría sean completamente dominadas por solo un selecto número de escuderías convirtiendo el campeonato en un deporte monótono que ha ido perdiendo fanáticos.

A raíz de esta situación la *FIA* tomo la decisión de reformular completamente el reglamento técnico y administrativo a partir de la temporada 2022 con la finalidad de dejar en igualdad de condiciones a todos los participantes del campeonato; en lo técnico el diseño general del automóvil sufrirá un

total reinicio, creando la necesidad de que las escuderías tengan que presentar propuestas nuevas que se ajusten a la nueva reglamentación pero que a su vez los hagan competitivos.

Dentro del paquete aerodinámico de un vehículo de *Fórmula Uno*, el alerón frontal resulta ser el elemento de mayor importancia ya que este tiene la tarea de aumentar la adherencia a la pista y reducir la resistencia al flujo de aire; un mal diseño en este dispositivo puede tener consecuencias negativas para su rendimiento en competencia e incluso puede llegar a terminar en un desenlace lamentable dentro de la pista cuando este presenta excesivas deficiencias.

Es por esto que el presente trabajo busca ofrecer una propuesta de alerón frontal que cumpla de manera efectiva con los requerimientos de funcionalidad solicitados para este dispositivo ajustándose al cambio de reglamentación pero que a su vez demuestre ser eficaz durante la competencia.

I.9.- Sumario

En este capítulo se hace un repaso de la historia del surgimiento de los medios de transporte desde el origen de la rueda pasando por la invención de la máquina de vapor y el motor de combustión interna hasta llegar al surgimiento del campeonato de la *Fórmula Uno*. Con ello se busca la comprensión de la manera en que estos medios se han ido adaptando a las necesidades del hombre por tener maquinas más eficientes que respondan a los cambios tecnológicos.

I.10.- Referencias

- 1.- García-Hernán, D., *Historia Universal XXI Capítulos Fundamentales*, Ed. Punto de Vista Editores, pp 58-79, 2013.
- 2.- Derry, T. K. y Williams, T. I., *Historia de la Tecnología, Vol. 1; Desde la Antigüedad hasta 1750*, Ed. Siglo XXI, pp 275-308, 1995.
- 3.- Barchilón, M., *Historia del Transporte; De la rueda a los coches voladores, La Vanguardia*, pp 1-3, 2019.
- 4.- Silva-Otero, A. y Mata-de Grossi, M., *La Llamada Revolución Industrial*, Ed. Universidad Católica, Andrés Bello, pp 149-150, 2005.
- 5.- Babini, J., *Las Revoluciones Industriales*, Ed. Centro Editor de América Latina, pp 63-76, 1970.
- 6.- Martínez-Pastor, E. y Vega-Delado, G., *El automóvil en la historia; Luces y sombras, INNOVA Research Journal*, Vol. 2, No. 7, pp 133-170, 2017.

- 7.- Parra-Plaza, F. J., Vílchez-Conesa, M. P. y Francisco-Palacios C. F., La satisfacción de las necesidades psicológicas básicas en función de la formación y experiencia del deportista: características socio-deportivas, *Journal of Psychology and Education*, Vol. 13, No. 2, pp 113-123, 2018.
- 8.- Sachs, W., *For the Love of the Automobile; Looking Back into the History of Our Desires*, Ed. University of California Press, pp 6-7, 1992.
- 9.- Naess, H. E., *A History of Organizational Change*, Ed. Palgrave-MacMillan, pp 36- 38, 2020.
- 10.- Castro, X. y Rana, Z. A., Aerodynamic and structural design of a 2022 Formula One front wing assembly, *Fluids*, Vol. 5, pp 237-259, 2020.
- 11.- Sparisci, L., La tecnología en Roma, *Revista de Filosofía Universal de Costa Rica*, Vol. 14, No. 59, pp 129-133, 1986.
- 12.- Ventura, D., *¿Dónde se Inventó la Rueda y por qué Tardó Tanto en Aparecer?*, BBC News Mundo, pp 1-2, 2017.
- 13.- Islas-Rivera, V. M. y Lelis-Zaragoza, M., *Análisis de los Sistemas de Transporte*, Publicación Técnica, No. 37, Ed. Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, 2007.
- 14.- Carrada, G., *La Prehistoria del Hombre; Del Origen al Neolítico*, Ed. Editex, 2000.
- 15.- Piero, V., *Los Transportes; Del Trineo a la Rueda, de la Vela al Vapor, de la Mongolfiera al Jet*, Ed. Everest, 1995.
- 16.- Roux, G., *Mesopotamia; Historia Política, Económica y Cultural*, Ed. Akal, pp 29-30, 1987.
- 17.- García-Sánchez, J., *Viajes por el Antiguo Imperio Romano*, Ed. Nowtilus, 2016.
- 18.- Roldán-Hervás, J. M., *Historia de Roma*, Ed. Ediciones Universidad Salamanca, 1995,
- 19.- Cairns, T., *La Edad Media*, 3ª edición, Ed. Cambridge University Press, 2001.
- 20.- Claramunt, S. y Portela, E., González, M. y Mitre, E., *Historia de la Edad Media*, Ed. Planeta, 1992.
- 21.- Freire-Seoane, M. J. y González-Laxe, F., *Economía de Transporte Marítimo*, Ed. Netbiblo, pp 105-106, 2003.
- 22.- Samarkin, V. V., *Geografía Histórica de Europa Occidental en la Edad Media*, Ed. Akal, pp 172-175, 1976.
- 23.- Aguiar-Aguilar, M., Los primeros instrumentos de navegación que viajaron a América, *Mélanges de la Casa de Velázquez*, Vol. 49, No. 1, pp 1-3, 2019.

-
- 24.- Jeans, J., *Historia de la Física; Hasta Mediados del Siglo XX*, Ed. Fondo de Cultura Económica, pp 193-196, 2016.
- 25.- García-Arancón, M. R., Ciencia y Tecnología en la Edad Media y el Renacimiento, *Anuario de Historia de la Iglesia*, No. 12, pp 373-376, 2002.
- 26.- Tomasini, M. C., Las Máquinas de Leonardo Da Vinci, *Ciencia y Tecnología*, No. 12, pp 27-36, 2012.
- 27.- Íñigo-Fernández, L. E., *Breve Historia de la Revolución Industrial*, Ed. Nowtilus, pp 99-106, 2012.
- 28.- Domínguez, A. B., *La Revolución Industrial; Algunos Logros de la Ingeniería*, Ed. Academia Nacional de Ingeniería, pp 170-202, 2012.
- 29.- Matteucci, M., *History of the Motor Car*, Ed. Crown Publishers, 1970.
- 30.- Herrera, R. M., Historia del experimento barométrico, *Revista Pensamiento Matemático*, No. 2, pp 1-14, 2012.
- 31.- Robinson, H. W., Denis Papin (1647-1712), *The Royal Society Journal of the History of Science*, Vol. 5, No. 1, pp 47-50, 1947.
- 32.- Barros, P. y Bravo, A., Historia de los inventos, *Sucesos*, No. 12, pp 35-126, 2013.
- 33.- Cunningham, R. E., Historias del vacío: La ingeniería y la nada, *Petrotecnia*, N° 6, pp 92-105, 2009.
- 34.- Savery, T., *The Miner's Friend*, Ed. Outlook, 2020.
- 35.- Valencia-Giraldo, A., El gran musculo mecánico; La máquina de vapor, *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, No. 23, pp 120-139, 2001.
- 36.- Lucendo, J., *80 Siglos de Invenciones; Diccionario de los Inventos*, Ed. Jorge Lucendo, 2019.
- 37.- Basalla, G., *La Evolución de la Tecnología*, Ed. Drakontos, pp 52-57, 2011.
- 38.- Smeaton, J., *The Miscellaneous Papers of John Smeaton, Civil Engineer, ...*, Ed. The Brooke, Printer, 1814.
- 39.- Boulton, M. y Watt, J., *The Selected Papers of Boulton & Watt: The engine partnership, 1775-1825*, Ed. MIT Press, 1981.
- 40.- Smiles, S., *Lives of Boulton and Watt*, Ed. John Murray, 1865.
- 41.- Hannavy, J., *The Governor: Controlling the Power of Steam Machines*, Ed. Pen & Sword, 2021.
- 42.- Moreno, J., *Prehistoria del Ferrocarril*, Ed. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, pp 121-140, 2018.
-

-
- 43.- Trevithick, F., *Life of Richard Trevithick: With an Account of His Inventions*, Ed. Cambridge University Press, 2011.
- 44.- Skempton, A. W. y Chrimes, M., *A Biographical Dictionary of Civil Engineers in Great Britain and Ireland*, Ed. Thomas Telford, pp 723-724, 2002.
- 45.- Hourly History, *George Stephenson; A Life from Beginning to End*, Ed. Hourly History, 2017.
- 46.- Capel, H., Ferrocarril, territorio y ciudades, *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, Vol. XII, No. 17, pp 742-798, 2007.
- 47.- Friedman, M., La segunda revolución industrial, *Ciencia Política; Revista Trimestral para América Latina y España*, Vol. 33, pp 49-58, 1995.
- 48.- Lucendo, J., *Las Edades del Automóvil*, Ed. Jorge Lucendo, pp 10-76, 2019.
- 49.- Gaviria-Ríos, J. E., Mora-Guzmán, J. H. y Ramiro-Agudelo, J., historia de los motores de combustión interna, *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, No. 25, pp 68-78, 2002.
- 50.- Payri, F. y Desantes, J. M., *Motores de Combustión Interna Alternativos*, Ed. Reverté, pp 8-14, 2015.
- 51.- London, R., *History of the Automobile; 1769-1945*, Ed. Page Publishing, 2017.
- 52.- Fanning, L. M., *Nikolaus August Otto, Father of the Internal Combustion Engine*, Ed. Leonard M. Fanning, 1955.
- 53.- Goldbeck, G., *Nikolaus August Otto*, Ed. Verlag Anst, 1957.
- 54.- Nitske, W. R. y Morrow-Wilson, C., *Rudolf Diesel, Pioneer of the Age of Power*, Ed. University of Oklahoma Press, 1965.
- 55.- Bird, A., *Gottlieb Daimler; Inventor of the Motor Engine*, Ed. Weidenfeld & Nicolson, 1962.
- 56.- Williams, B., *Karl Benz*, Ed. Scholastic Library Publishing, 1991.
- 57.- Nixon, J. C., *The Invention of the Automobile*, Ed. Edizioni Savine, pp 35-65, 2016.
- 58.- Saidler, K., *Bertha Benz's Historic Drive with the World's First Automobile*, The European Petrochemical Association, pp 3-12, 2014.
- 59.- Parissien, S., *The Life of the Automobile*, Ed. Thomas Dunne Books, pp 12-31, 2014.
- 60.- Heitmann, J. A., *The Automobile and American Life*, History Faculty Publications, N° 97, pp 1-22, 2009.
- 61.- Adler, D., *Daimler & Benz, the Complete History; The Birth and Evolution of the Mercedes-Benz*, Ed. Harper Collins, 2006.
-

-
- 62.- Gerrit von Pein, M., *100 Jahre Daimler-Motoren-Gesellschaft; 1890-1990*, Ed. Mercedes Benz, 1990.
- 63.- Flink, J. J., *The Automobile Age*, Ed. MIT Press, pp 16-17, 1990.
- 64.- Byttebier, H. T., *La Evolución de la Máquina Voladora; Desde las Alas Batientes Hasta la Estabilidad Inherente*, 1ª edición, Ed. Hugo T. Byttebier, 2021.
- 65.- Nyamwange, J. y Nyamwange, M., Major innovations in transport; Evolution of automobiles, *International Journal of Humanities and Social Science*, Vol. 4, No. 5, pp 40-45, 2014.
- 66.- Klepper, S., *Pre-entry Experience and Firm Performance in the Evolution of the US Automobile Industry*, *Advances in Strategic Management*, Vol. 21, pp 289-315, 2004.
- 67.- May, G. S., R. E. Olds; Auto industry pioneer, *The Academy of Management Review*, Vol. 4, No. 2, pp 301-303, 1979.
- 68.- Klepper, S., *The Evolution of the U.S. Automobile Industry and Detroit as Its Capital*, Ed. Carnegie Mellon University, pp 2-4, 2001.
- 69.- Lazdowski, Y. J., *Persistence and Vigilance; A View of Ford Motor Companys Accounting Over Its First Fifty Years*, Ed. Emerald Publishing, pp 5-13, 2020.
- 70.- Harter, J., *Early Automobiles; A History in Adversiting Line Art 1890-1930*, Ed. Wing Press, pp 80-86, 2015.
- 71.- Graves, R. H., *The Triumph of an Idea; The Story of Henry Ford*, Ed. Edizioni Savine, pp 49-53, 2013.
- 72.- *Reporte de Actividades 2020*, Fédération Internationale de l'Automobile, pp 6-7, 2021.
- 73.- *2021 Formula One Sporting Regulations*, Fédération Internationale de l'Automobile, pp 3-4, 2021.
- 74.- Jenkinson, D., *Grand Prix Cars*, Ed. Edizioni Savine, pp 7-13, 2015.
- 75.- Stafford, I. y Tramayne, D., *The Official Formula 1 Opus*, Ed. Opus, pp 10-19, 2013.
- 76.- Kaiser, B., *The Strategic Politics of Formula 1 Racing: Insights from Game Theory and Social Choice*, Ed. University of California-Irvine, pp 6-12, 2021.
- 77.- Serapiglia, A., Formula One; A database project from start to finish, *Information Systems Education Journal*, Vol. 16, N° 2, pp 34-39, 2018.
- 78.- Hutton, R., *Fédération Internationale de l'Automobile Centenary*, Ed. FIA, pp 38-141, 2004.
- 79.- Jenkins, M., Technological discontinuities and competitive advantage; A historical perspective on Formula 1 motor racing 1950-2006, *Journal of Management Studies*, Vol. 47, No. 5, pp 884-910, 2010.
-

Capítulo II

II.1.- Generalidades sobre la aerodinámica y alerones en el automovilismo

Para comenzar a hablar acerca de alerones es necesario definir primero que es lo que son. La palabra alerón viene del francés y significa “ala pequeña”, en las aeronaves estos dispositivos tienen la función de proporcionar control y estabilidad a la aeronave para evitar muelles de manera vertical, así mismo sirven de apoyo al momento del despegue y el aterrizaje generando sustentación. Al tratarse de dispositivos aerodinámicos, su perfil transversal suele ser muy parecido al de las alas de la aeronave, con la diferencia de que estos tienen movimiento y son controlados por la tripulación de la aeronave [II.1]. En el caso del ámbito automovilístico, los alerones tienen la función contraria al de la aeronáutica, ya que en este caso lo que se necesita es evitar que el vehículo se despegue del suelo y es por eso que en los alerones que se instalan en los automóviles de competición se colocan de manera invertida para crear carga aerodinámica y no sustentación; sin embargo, salvo esta consideración se podría decir que las características de los alerones en uno u otro sector son las mismas [II.2].

La invención de los alerones se le atribuye al inglés *Mathew Pierce Boulton* quien los desarrolló como un dispositivo de control para aviones, *Boulton* patentó su dispositivo en 1868 [II.1]. Otro personaje importante en el desarrollo y expansión del uso de los alerones fue *Glenn Curtiss*, un ingeniero estadounidense que en un inicio se dedicó a la producción de motocicletas. En 1908 *Curtiss* construyó una aeronave llamada “*June Bug*” para participar en la competencia de la *Scientific American Magazine* (Figura II.1), en la cual ganó usando un sistema de alerones móviles que estaban instalados en los extremos posteriores de las alas; esto lo convirtió oficialmente en la primera nave en volar por más de un kilómetro, a pesar de que los *Wright* lo habían logrado antes, pero sin espectadores ni tampoco en un evento oficial. Esto llamó la atención de los *Wright* y en 1909 presentaron una demanda a *Curtiss*, alegando que su nuevo dispositivo infringía una de sus patentes. *Curtiss* logró ganar la disputa debido a que en el sistema de los *Wright* las alas completas de la aeronave se movían; en cambio, en el sistema de *Curtiss* las alas estaban fijas y los alerones eran un dispositivo independiente y usado para el control del avión [II.3 y II.4].

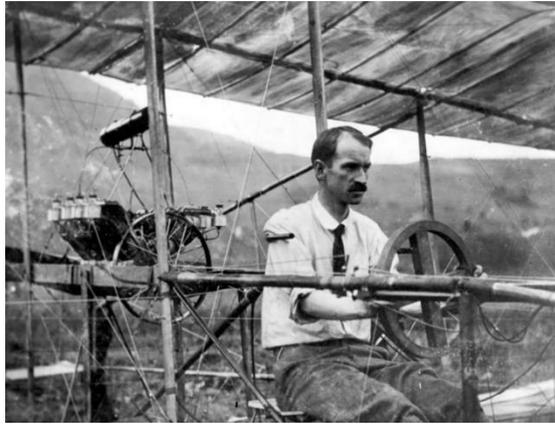


Figura II.1.- Curtiss en su “June Bug”

En 1909 el ingeniero inglés nacido en Francia, *Henri Farman* fabricó un avión biplano al que llamó “*Henri Farman III*”; esta aeronave contaba con un alerón en forma de aleta en el borde de las puntas de cada ala, siendo estos los verdaderos antepasados del alerón moderno. El diseño de *Farman* pronto fue adoptado por los otros constructores de aviones de la época, con excepción de los *Wright* quienes continuaron con su antiguo sistema, hasta 1915 cuando decidieron cambiar por este sistema más efectivo [II.5].

En el ámbito automovilístico los alerones hicieron su aparición de la mano de las carreras, debido a que muchos de los constructores que participan en estas competencias las usan como un medio para probar nuevas tecnologías que lleven a los vehículos a su mayor nivel de eficiencia y desempeño, siendo la *Fórmula Uno* el campeonato más importante de automovilismo a nivel mundial, muchas de las tecnologías de la industria automotriz han sido desarrolladas en este serial. En los inicios del automovilismo la aerodinámica de los autos no se tomaba en cuenta; fue hasta 1956 cuando el ingeniero suizo *Michael May*, equipó un *Porsche Spyder* con un alerón en la parte superior del habitáculo del piloto, justo por encima del centro de gravedad (Figura II.2); por desgracia los comisarios deportivos no permitieron que el auto compitiera y por lo tanto jamás fue usado en una carrera [II.2].



Figura II.2.- Porsche Spyder con el alerón diseñado por May

Durante los años 60's la necesidad de mejorar la aerodinámica de los automóviles siguió en aumento ya que el avance tecnológico de los motores permitía alcanzar velocidades extremadamente altas, sin embargo, un vehículo sin la suficiente eficiencia aerodinámica hacía difícil y hasta en ciertas ocasiones peligroso el manejo de estos autos.

Los siguientes avances para mejorar la aerodinámica de los vehículos hicieron que los constructores de autos de *Fórmula* optaran por fabricar carrocerías cada vez más afiladas con una altura cercana al piso, mientras que en los autos de gran turismo y resistencia se introdujo el uso de spoilers que se podrían definir como aletas que impiden el flujo de aire por debajo del auto para así evitar que este se despegue del suelo. *Ferrari* fue uno de los primeros constructores en usar spoilers en su modelo *Ferrari 300 P3* que fue construido en 1966 [II.2].

El uso de los alerones ya en un automóvil de competencia oficial se debe al ingeniero y piloto estadounidense *Jim Hall* quien, adaptando la idea de *May*, desarrollo su "*Chaparral 2E*" (Figura II.3) en Bridge Hampton, Nueva York en 1966, su vehículo contaba con un alerón trasero, lo que lo convirtió en el primer piloto en conducir un auto con alerón [II.2].



Figura II.3.- Chaparral 2E de 1966

Diseño y evaluación numérica de alerón frontal para un vehículo de competencia de Fórmula Uno

En la *Fórmula Uno* los alerones fueron introducidos por el ingeniero *Colin Chapman*, quien diseñó el *Lotus 49B* en 1967 (Figura II.4) con un alerón frontal simple, básicamente eran dos aletas rectangulares adosadas a la nariz del auto y un par de pequeños *endplates*, pero fue esto lo que abrió camino para el desarrollo de mejores alerones [II.6].



Figura II.4.- *Lotus 49B* de 1967

El siguiente desarrollo de la aerodinámica del auto en la *Fórmula Uno* se vio al siguiente año de la aparición de los alerones frontales, ahora los alerones traseros hicieron su debut en el campeonato gracias a *Ferrari* en el *Gran Premio de Bélgica* de 1968 quienes usaron alerones con perfil de alas de avión invertidas, este nuevo dispositivo fue rápidamente adoptado por otros equipos, como *Brabham* que durante el mismo fin de semana del evento decidió incorporar alerones traseros a sus vehículos [II.7].

La siguiente evolución de los alerones frontales se dio con la introducción de los *Flaps-Gurney* en 1971, que eran dispositivos que se colocaban en los extremos del alerón para evitar que se formaran vórtices que volvían inestable el automóvil. Ese mismo año apareció un nuevo concepto de alerón delantero que fue llamado “alerón de ala elíptica”; este dispositivo fue usado por primera vez por el equipo *March Engineering* en su modelo 711 (Figura II.5), sin embargo, el concepto no dio los resultados esperados y dejó de ser usado [II.6 y II.7].



Figura II.5.- March 711 con su “alerón de ala elíptica”

La aerodinámica de los automóviles en la *Fórmula Uno* siguió teniendo avances constantes, pero fue en el año de 1976 cuando un nuevo concepto apareció; el ingeniero del equipo *Lotus*, *Peter Wright* con ayuda de *Colin Chapman*, desarrolló el *Lotus 78*, que empleaba el “efecto suelo” para dotar de carga aerodinámica al automóvil. Este efecto se lograba manteniendo el auto lo más cercano posible al suelo y dotando el piso del vehículo con una forma especial parecida a un perfil alar, para así crear una zona de baja presión debajo del automóvil. Igualmente, esta nueva idea fue adoptada por otros equipos rápidamente y ese mismo año el equipo *Brabham* intentó incorporar una turbina al vehículo que, ejercía una fuerza vertical para mantener el auto pegado a la pista, utilizando la excusa de que este “ventilador” servía para refrigerar el motor lograron ganar una carrera en el campeonato del 78 antes de que les fuera prohibido por la *FIA* el uso de este sistema. Aunque el *Lotus 78* fue el primero en usar esta tecnología, no logró la eficiencia que se pronosticaba, pero al año siguiente el *Lotus 79* demostró ser un implacable vehículo logran el campeonato de la mano del piloto *Mario Andretti* [II.2].

Otros equipos en la *Fórmula Uno* dieron grandes avances en este nuevo campo del efecto suelo, siendo la escudería *Williams* quien llegó a construir el mejor monoplaza bajo este concepto; el *FW07* construido en 1979 (Figura II.6). Por desgracia la *FIA* prohibió en 1981 el uso del efecto suelo en los monoplaza del campeonato de *Fórmula Uno*, sustituyéndolo por un fondo plano que debía ser usado por todos los vehículos sin excepción, esta regla fue adoptada en otros seriales, como el campeonato de la *IndyCar* en el cual sigue vigente [II.2].



Figura II.6.- Williams FW07, la epitome del efecto suelo

Los primeros alerones complejos fueron introducidos a la *Fórmula Uno* por la escudería *McLaren* en 1984, en este alerón era posible modificar el ángulo de ataque del segundo elemento a voluntad del piloto para tener una mayor ventaja al tomar las curvas (Figura II.7) [II.6].



Figura II.7.- McLaren con el primer alerón complejo en 1984

Los desarrollos en aerodinámica siguieron avanzando durante los siguientes años, por desgracia en 1994 en el *Gran Premio de Imola*, ocurrieron dos tragedias el mismo fin de semana que costo las vidas de los pilotos *Roland Ratzenberger* y *Ayrton Senna*, esto llevo a la *FIA* a tomar acciones en 1995, modificando el reglamento para frenar un poco el desarrollo en el aspecto de aerodinámica que se estaban teniendo; entre las nuevas reglas que se introdujeron la que más llama la atención fue el uso obligatoria de un piso plano escalonado en el monoplaza, esto para reducir la carga

aerodinámica y aumentar la sensibilidad del piloto al momento de las frenadas y entradas a las curvas, haciéndolos más seguros de conducir [II.2].

El siguiente cambio notable al desarrollo de los alerones se dio en 2001 cuando la *FIA* modificó el reglamento para cambiar la altura a la que se debía encontrar el alerón frontal respecto a la pista, la altura fue de 40mm a 100mm como mínimo; esto llevó a los equipos a desarrollar alerones con ángulo diedro positivo para así contrarrestar el efecto del cambio [II.6].

A partir del año 2010, el reglamento fue modificado para restringir los grandes cambios introduciendo normas más estrictas, esto llevó al desarrollo de alerones de múltiples partes extremadamente elaborados que a su vez comenzaron a producir un sesgo entre los equipos que compiten en el campeonato de la *Fórmula Uno* (Figura II.8).

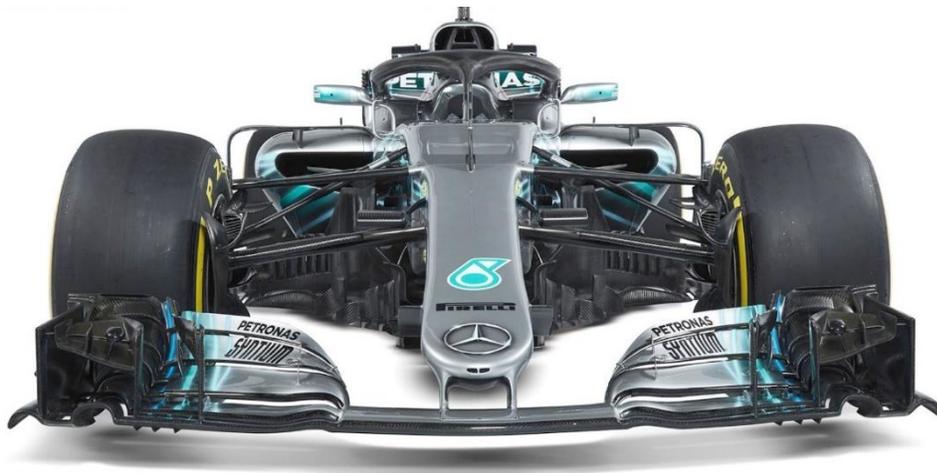


Figura II.8.- Mercedes de 2018 con un alerón extremadamente complejo

Esto llevó a una completa reorganización del reglamento por parte de la *FIA* que entró en vigor en 2022, en el que los cambios más notables serán un completo rediseño del perfil aerodinámico del auto introduciendo de nueva cuenta el efecto suelo, así como alerones frontales menos elaborados, pero más eficientes para dotar de suficiente carga aerodinámica al monoplaza que le permita mayor posibilidad de adelantamiento al rival (Figura II.9); esta idea surge de la necesidad de regresar la competitividad a las escuderías que se habían quedado rezagadas con respecto a las potencias como *Mercedes-Benz*, *Red Bull* y *Ferrari* [II.2 y II.6].



Figura II.9.- Diseño básico de alerón para la temporada 2022 de *Fórmula Uno*

II.2.- Fuerzas que actúan sobre una aeronave

Al desplazarse a través de un medio como el aire todo vehículo se ve afectado por fuerzas que influyen sobre el mientras se mueve, son cuatro las fuerzas que se conocen siendo estas: Sustentación, Arrastre, Peso y Empuje (Figura II.10). Las fuerzas de sustentación y arrastre son propiamente cualidades aerodinámicas; la sustentación es una fuerza perpendicular al sentido de movimiento de la aeronave que propicia su elevación mientras que el arrastre es una fuerza paralela al sentido del movimiento de la aeronave y que se opone al avance de esta a través del aire. El empuje es la fuerza que produce la propia aeronave (por medio de un motor) y que le permite romper la inercia, esta fuerza es contraria a la fuerza de arrastre; la última fuerza es el peso, esta es la fuerza con la que la aeronave se ve atraída al suelo y es totalmente opuesta a la fuerza de sustentación. Cuando estas fuerzas se mantienen en control y armonía es posible que la nave pueda sostener el vuelo y navegar a través del aire [II.8].

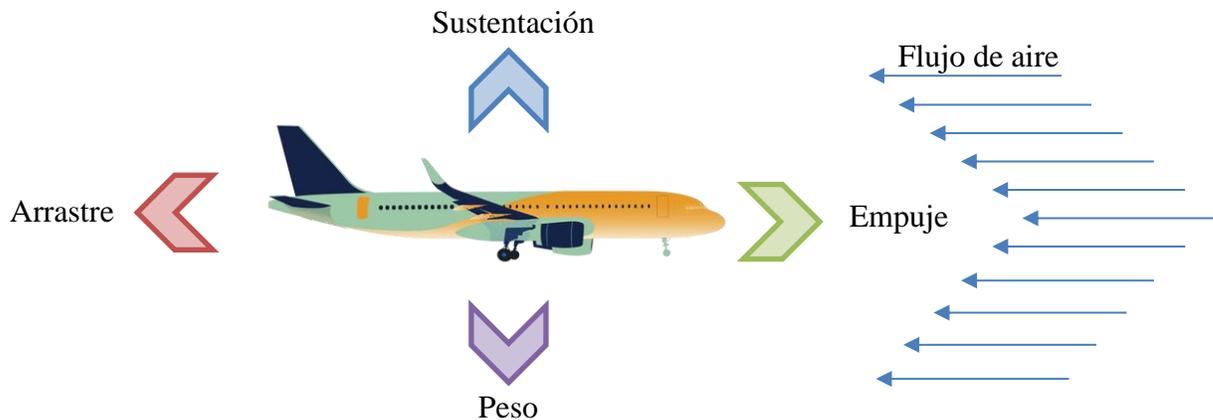


Figura II.10.- Fuerzas que actúan sobre una aeronave

Para un automóvil, a pesar de ser un vehículo terrestre este se ve afectado por el flujo del aire mientras se desplaza; en el automovilismo tener control de las fuerzas aerodinámicas de arrastre y sustentación es imperioso para lograr crear un vehículo eficiente y competitivo [II.2].

II.3.- Teorema de Bernoulli

Este principio es de gran relevancia en la mecánica de fluidos, ya que enlaza los términos de presión, velocidad y la altura para un fluido en movimiento. Fue descrito por el físico y matemático suizo *Daniel Bernoulli* en 1738 después de realizar una investigación con base en trabajos previos realizados por *Torricelli* y *Newton*; sin embargo, la formula como es conocida en la actualidad se debe al padre de *Daniel*, *Johann Bernoulli* en conjunto con el matemático suizo *Leonard Euler*. Este principio enuncio que la velocidad a la que se mueve un fluido es inversamente proporcional a la presión que ejerce; en otras palabras, mientras la velocidad de un volumen de aire se vea aumentada su presión decaerá. De manera tangible este efecto se ve aplicado al funcionamiento del *tubo de Venturi* (Figura II.11) [II.9 y II.10].

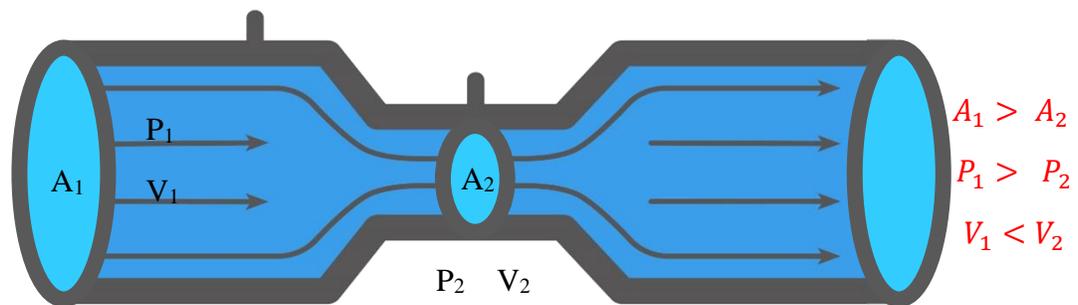


Figura II.11.- *Tubo de Venturi*

El *teorema de Bernoulli* nos dice que la velocidad V_1 es menor que la velocidad V_2 , de igual manera la presión P_1 es menor a la presión P_2 ; siendo el área transversal A_2 inferior al área transversal A_1 , en ambos casos estas variables se ven alteradas debido a la reducción del área transversal. Es posible ver en este teorema, una aplicación de la ley de la conservación de la energía; ya que las variables que se ven involucradas dentro del flujo de aire se encuentran ligadas de manera que si una de ellas aumenta o disminuye las demás igualmente se ven afectadas [II.10 y II.11].

II.4.- Efecto *Magnus*

Esta manifestación física expuesta por el alemán *Heinrich Gustav Magnus* en 1853, es un fenómeno en el que la rotación de un cuerpo altera su trayectoria cuando se mueve a través de un fluido, en este caso el aire.

Una manera de observar este efecto es en una esfera que se mueve por el aire, si esta se encuentra en rotación mientras se desplaza, se puede contemplar como el fluido se mueve más velozmente en la superficie donde la rotación tiene la misma dirección que el flujo de aire; mientras que, la velocidad se ve reducida en el lado donde la rotación va en contra del sentido de rotación (Figura II.12). Esta combinación de condiciones como dice el *teorema de Bernoulli* hace que la esfera sea afectada por una fuerza que propicia el cambio de trayectoria [II.12 y II.13]. Este fenómeno se puede apreciar de manera más casual en el fútbol cuando un balón es pateado provocando su giro, esto hará que el balón cambie su trayectoria provocando el llamado “chanfle”. Con el descubrimiento de este fenómeno llegó la idea de desarrollar una geometría que, en conjunto con el *teorema de Bernoulli* diera control al usuario de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo que se desplaza por el aire.

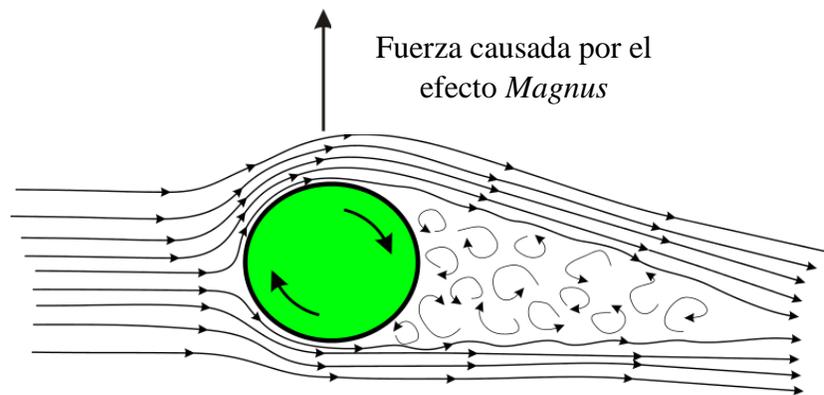


Figura II.12.- Efecto *Magnus*

II.5.- Perfiles aerodinámicos

En un cilindro el modo para lograr la sustentación es por medio del giro que este tiene al momento de entrar en contacto con el flujo de aire pero para tener completo control de la sustentación se debe aplicar el principio de *Bernoulli* a la aeronave; esto es posible si se dotan las alas de una sección transversal con una forma que interactúe con el aire de forma que propicie la sustentación

de la nave, esta geometría de sección transversal de las alas recibe el nombre de Perfil aerodinámico (Figura II.13) [II.14].

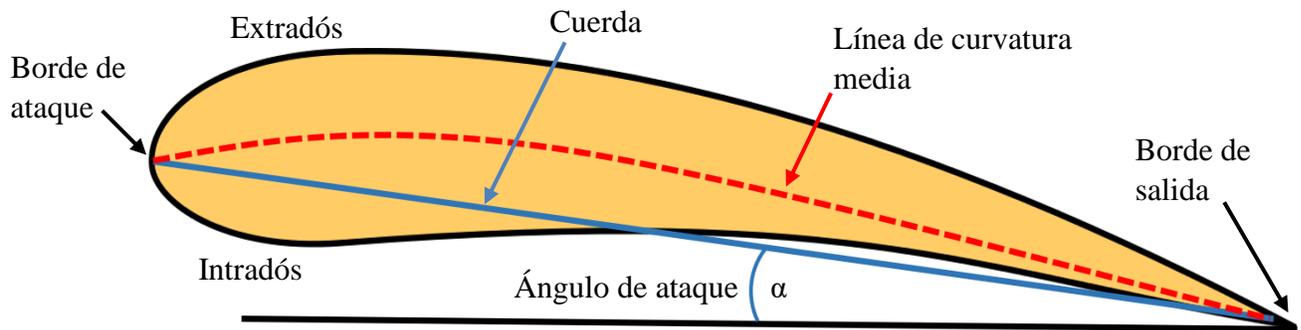


Figura II.13.- Geometría del perfil aerodinámico

La forma que posee el perfil hace posible que el flujo de aire se mueva a mayor velocidad sobre el extradós provocando una zona de baja presión en la zona superior del perfil; mientras que el flujo que se mueve sobre el intradós es de una velocidad menor, provocando así una zona de presión mayor. La combinación de estas condiciones hace posible la formación de la fuerza de sustentación la cual hace posible el vuelo de la nave [II.8 y II.15].

II.6.- Coeficientes aerodinámicos

En el campo de la aeronáutica se utilizan los coeficientes aerodinámicos estos son números adimensionales que se emplean para describir el comportamiento de un cuerpo que se mueve en el aire. Se pueden llegar a emplear varios coeficientes dependiendo el parámetro de interés; no obstante, los más empleados suelen ser los coeficientes de sustentación, resistencia y empuje lateral.

Para el cálculo de dichos coeficientes se emplean los siguientes modelos matemáticos [II.16]:

Para el coeficiente de sustentación:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad \text{II.1}$$

Donde:

C_L : Coeficiente de sustentación

L : Fuerza de sustentación

ρ : Densidad

v : Velocidad relativa entre la aeronave y el fluido

A : Área de referencia del perfil (superficie frontal perpendicular a la dirección de la fuerza)

Para el coeficiente de resistencia:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad \text{II.2}$$

Donde:

C_L : Coeficiente de resistencia

D : Fuerza de resistencia

ρ : Densidad

v : Velocidad relativa entre la aeronave y el fluido

A : Área de referencia del perfil (superficie frontal perpendicular a la dirección de la fuerza)

Para el coeficiente de empuje lateral:

$$C_Y = \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad \text{II.3}$$

Donde:

C_Y : Coeficiente de empuje lateral

Y : Empuje lateral (fuerza perpendicular al plano de simetría de la aeronave)

ρ : Densidad

v : Velocidad relativa entre la aeronave y el fluido

A : Área de referencia del perfil (superficie proyectada en el plano de simetría)

II.7.- Influencia del ángulo de ataque

Cuando se realiza un cambio en el ángulo de ataque que presenta un perfil aerodinámico este interfiere igualmente de manera directa en las fuerzas que se generan por acción del flujo de aire. Para definir el sentido del ángulo de ataque se deberá trazar una línea imaginaria paralela al suelo y que corte por el punto medio de la longitud de la cuerda del perfil, se dice que el ángulo de ataque de dicho perfil es positivo cuando el borde de ataque queda por encima de esta línea; por el

contrario, si el borde de ataque se sitúa por debajo de esta línea entonces se dice que el ángulo de ataque es negativo (Figura II.14) [II.8].

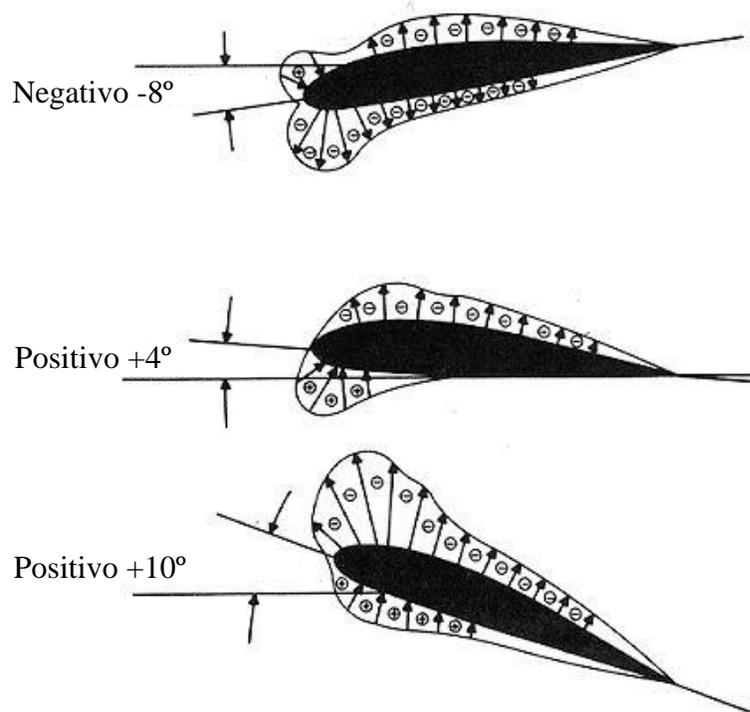


Figura II.14.- Diferentes ángulos de ataque

Como se aprecia en la figura anterior, un ángulo de ataque negativo genera sustentación con sentido negativo lo cual provocaría que la aeronave comience a descender paulatinamente. Mientras que un ángulo de ataque positivo propicia la aparición de mayores zonas tanto de baja como de alta presión que son de importancia para generar sustentación en la aeronave; sin embargo, si se sobrepasa el ángulo máximo que es de 18° se entra en pérdida, provocando que la sustentación desaparezca y la aeronave se precipite hacia el suelo [II.8 y II.15].

II.8.- Capa límite

Cuando un fluido se mueve libremente sin ningún cuerpo que obstaculice su circulación, tendrá la cualidad de que la velocidad en todos sus puntos sea la misma; pero cuando un objeto entra en contacto con este flujo, la velocidad del mismo se ve afectada produciendo el fenómeno conocido como capa límite (Figura II.15).

El concepto de capa límite fue desarrollado e introducido por el físico alemán *Ludwig Prandtl*, quien en 1904 presentó un trabajo relacionado a la interacción de fluidos viscosos en movimiento al entrar en contacto con superficies [II.17].

De manera ideal la velocidad del fluido no debería presentar variaciones al entrar en contacto con un cuerpo; sin embargo, debido a que todos los fluidos incluido el aire poseen viscosidad. El rozamiento que se produce entre el fluido y la superficie del cuerpo en cuestión provoca que la velocidad sea igual a cero y aumente gradualmente hasta ajustarse con la velocidad del fluido que no ha sido perturbado (Figura II.16). Este rozamiento genera la fuerza de resistencia a la que están sujetos todos los cuerpos que se mueven a través del aire [II.8 y II.18].

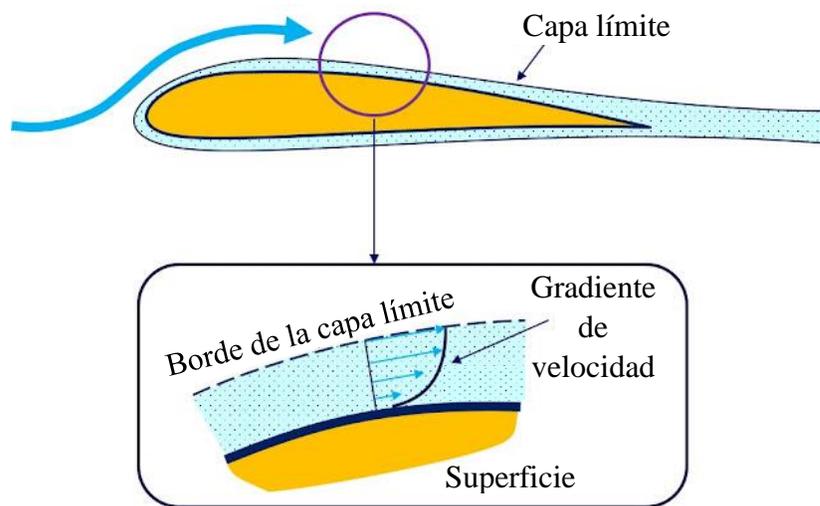


Figura II.15.- Capa límite

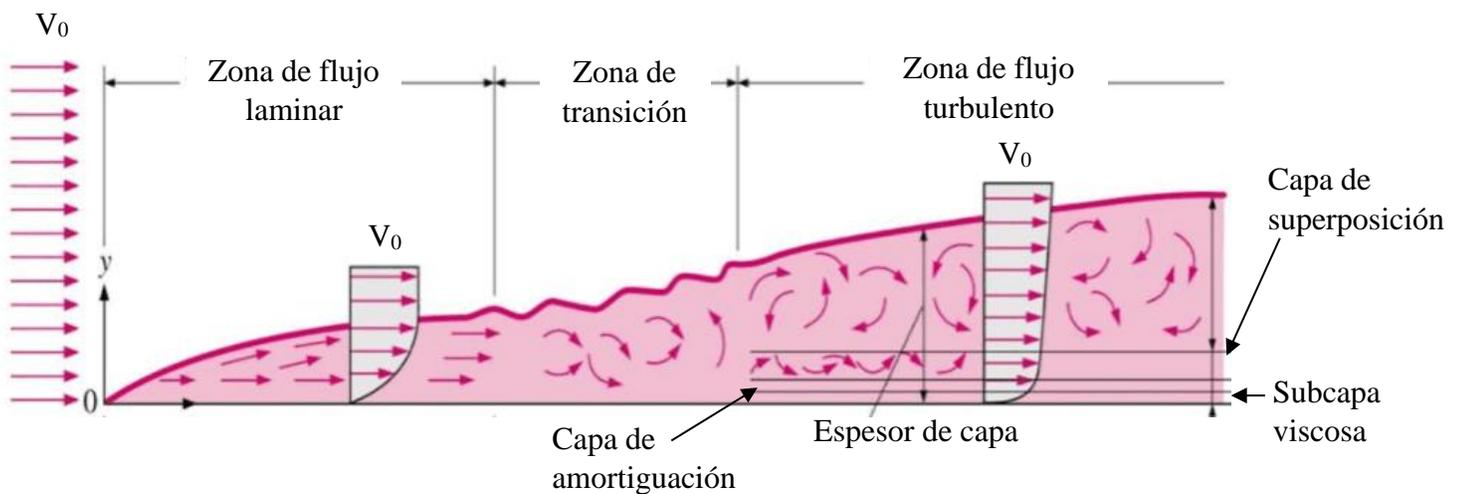


Figura II.16.- Comportamiento de capa límite

Las capas límite pueden ser de carácter de flujo laminar o turbulento y están ligadas de manera directa con el *número de Reynolds* del fluido en movimiento; dependiendo del valor de este número adimensional puede provocar la aparición de capa límite de tipo laminar, turbulenta o una combinación de ambas [II.17].

II.9.- Vórtices

En el estudio del perfil aerodinámico en dos dimensiones también llamado ala infinita, no se puede apreciar el movimiento de los flujos de aire que se mueven perpendiculares al sentido de movimiento de la aeronave. En un ala finita el aire que fluye por la superficie del intradós (inferior) tiende a dirigirse hacia la punta exterior del ala; mientras que el aire que fluye por el extradós (superior) se encamina hacia el fuselaje de la aeronave. Esta peculiaridad ocasiona la aparición de los llamados vórtices en la punta del ala (Figura II.17) [II.17 y II.19].

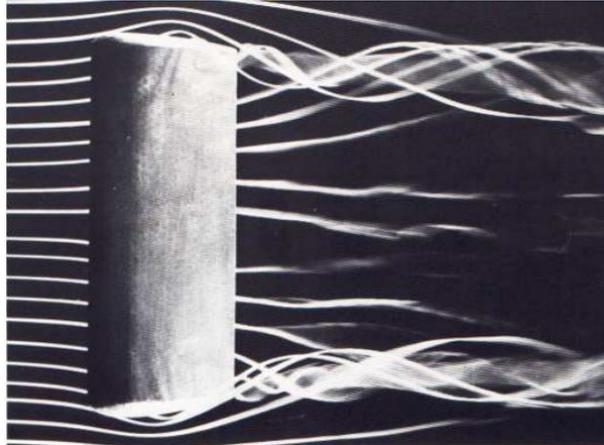


Figura II.17.- Vórtices en la punta del ala

A velocidad crucero los vórtices generan turbulencias en el aire y a su paso dejan un remanente que es llamado estela. Esta estela cuenta con regiones donde el comportamiento de los vórtices presenta diferentes características (Figura II.18). La primera es la región de enrollamiento, donde se comienzan a formar los vórtices y las mayores velocidades se encuentran al centro de este; va de la punta del ala hasta casi 20 veces la longitud de la envergadura. La siguiente es la región de vórtices, en esta los vórtices crecen y se dispersan a través del aire creando zonas grandes de turbulencias variadas; abarca una región desde 20 hasta 200 veces la longitud de la envergadura. Por último, se encuentra la región de decaimiento, aquí los vórtices comienzan a perder energía y

desaparecen paulatinamente; va desde 200 veces la longitud de la envergadura y puede llegar a superar 500 veces la longitud de la envergadura [II.19].

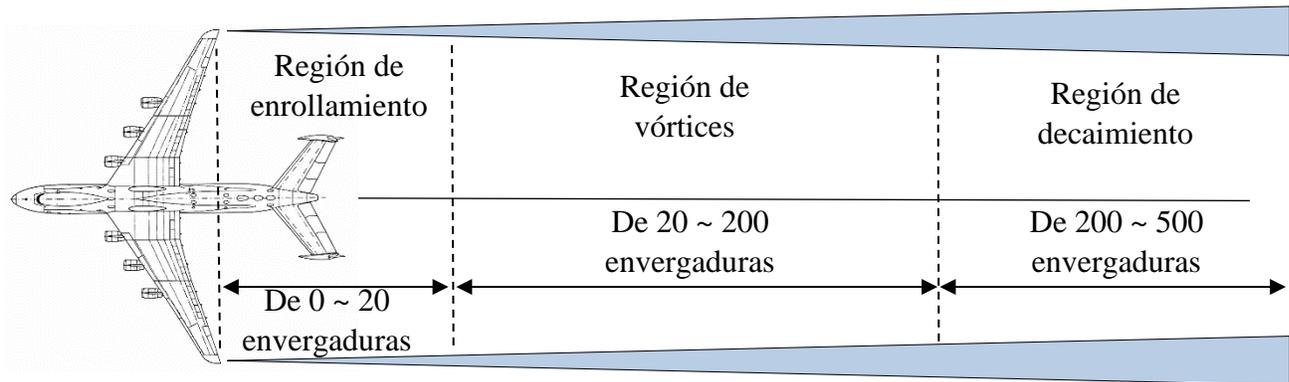


Figura II.18.- Regiones de vórtices

En el automovilismo la generación de vórtices (Figura II.19) se intenta siempre mantener al mínimo posible ya que estos generan zonas de bajas presiones por detrás del vehículo, lo que se traduce en un incremento del arrastre debido a que las presiones por delante del monoplace son mayores que las generadas por la estela; aplicando lo conocido en el *teorema de Bernoulli*, se sabe que esto producirá una fuerza que va de la zona de mayor presión a la de menor presión, lo cual es igual a una reducción a la velocidad del automóvil [II.2].



Figura II.19.- Alerón trasero poco eficiente generando vórtices en sus puntas

II.10.- Efecto suelo

Este efecto se presenta cuando la sección transversal del área por donde circula el aire debajo de la nave se ve reducido, el principio es el mismo por el cual el *tubo de Venturi* funciona. En los aviones

se presenta cuando se está próximo al suelo, mientras las alas se encuentran cercanas al piso el aire a alta presión debajo de ellas se ve aún más presurizado y ello trae consigo un aumento de la fuerza de sustentación haciendo que sea posible alcanzar el vuelo con menor impulso [II.8].

En el automovilismo este fenómeno se ve invertido; la cercanía al suelo hace disminuir la presión en la zona debajo del vehículo; mientras más cercana al suelo se encuentre la superficie inferior del vehículo mayor será el efecto, pero si se reduce demasiado el espacio entre el suelo y la superficie del vehículo este efecto se invierte debido a la interferencia de la capa límite [II.2].

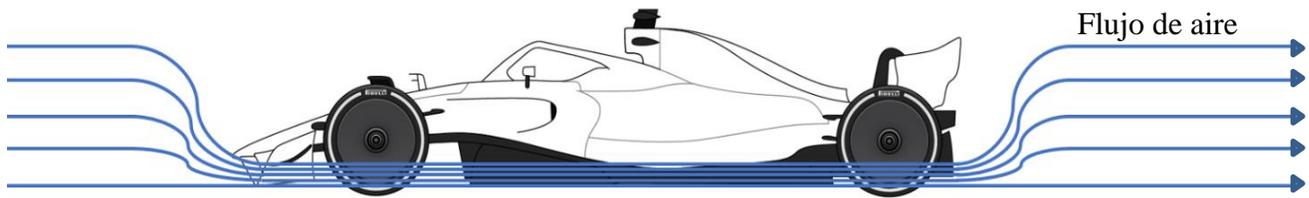


Figura II.20.- Efecto suelo en un automóvil

Para lograr recrear este efecto en un vehículo de carreras los diseñadores tratan de mantener la altura del piso del vehículo con la pista a una distancia de entre 5 y 10 centímetros habitualmente (aunque esto se encuentra sujeto a la propia reglamentación del serial donde corra el vehículo), además de proveer de un difusor en la región trasera del suelo del vehículo que permita el paulatino aumento de la presión hasta igualarse con la presión en el exterior del auto [II.7].

II.11.- Método del Elemento Finito

Este es un método que permite el análisis de un cuerpo llamado “continuo” para su estudio con mayor detalle siendo dividido en partes más pequeñas llamadas “elementos”; el método funciona examinando las relaciones de los nodos en los que tienen contacto los elementos y así tener un resultado del comportamiento de todo el sistema (Figura II.21). La finalidad de este método es facilitar la resolución de las ecuaciones que se usarían para el estudio del continuo completo; las cuales son ecuaciones diferenciales de alta complejidad, y llevándolas a poder resolverse utilizando ecuaciones lineales utilizando métodos matriciales al tratarse de elementos finitos [II.20 y II.21].

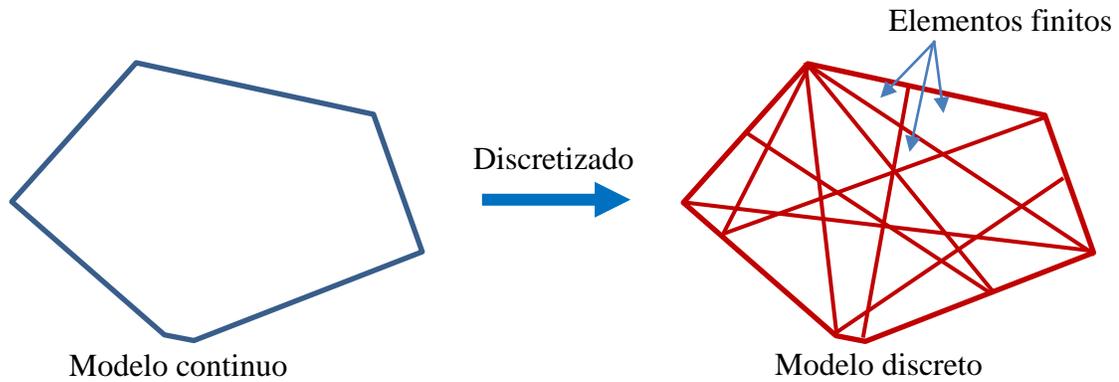


Figura II.21.- Discretizado del continuo

Para poder llevar a cabo la división del continuo en subdominios es necesario realizar el proceso de discretizado; en este proceso se forman los elementos los cuales se encuentran conectados entre sí mediante nodos, los cuales se encuentran comúnmente localizados en sus bordes, pero ocasionalmente también se pueden encontrar en su interior. Es de este modo como los infinitos grados de libertad con los que cuenta el continuo se ven limitados a un número finito de grados de libertad en el modelo discretizado [II.22 y II.23].

Mientras mayor sea la cantidad de elementos con los que cuente el modelo discretizado mayor similitud tendrá con el modelo continuo, lo que a su vez se traduce en que los resultados que se obtengan serán más aproximados a la solución real (Figura II.22); al conjunto de elementos que conforman el modelo discretizado es común llamarle “malla”, mientras mayor sea el número de elementos de la malla esta se encontrará más refinada [II.21].

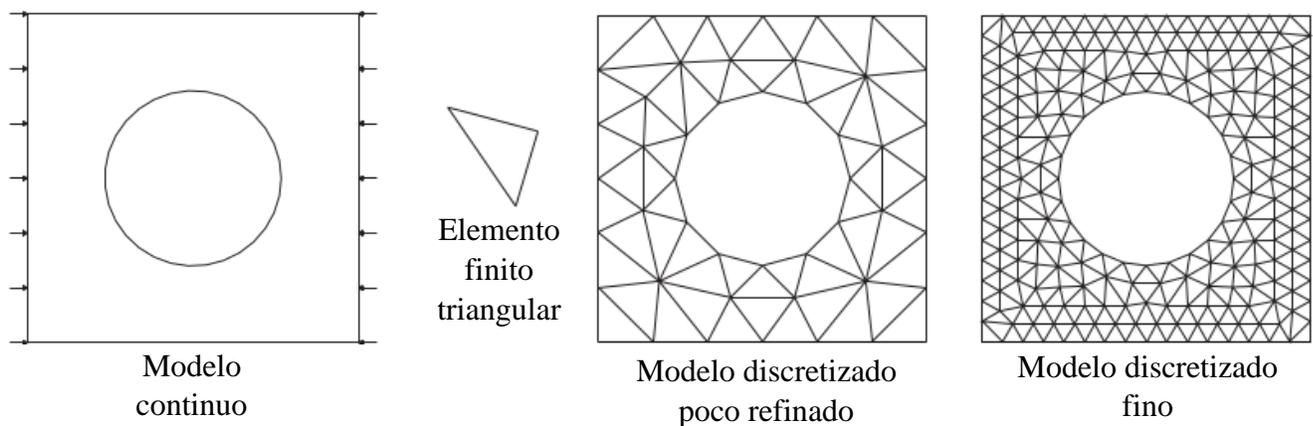


Figura II.22.- Niveles de discretizado

Es posible aplicar el método del elemento finito en tres diferentes casos dependiendo el tipo de modelo a estudiar; estos casos están ligados a las tres dimensiones del espacio físico (Figura II.23). El caso más sencillo de analizar es el unidimensional, el cual se caracteriza por ser un elemento lineal. Seguidamente se encuentra el elemento bidimensional, que son elementos de área. Por último, se encuentran los elementos tridimensionales los cuales son elementos sólidos que poseen volumen. En los tres casos las condiciones para su resolución están sujetas a las variables independientes en cada una de las dimensiones que posean; así mismo el objeto del discretizado en todos los casos es simplificar el continuo para poder llegar a una solución lo más aproximado a la realidad [II.22 y II.24].

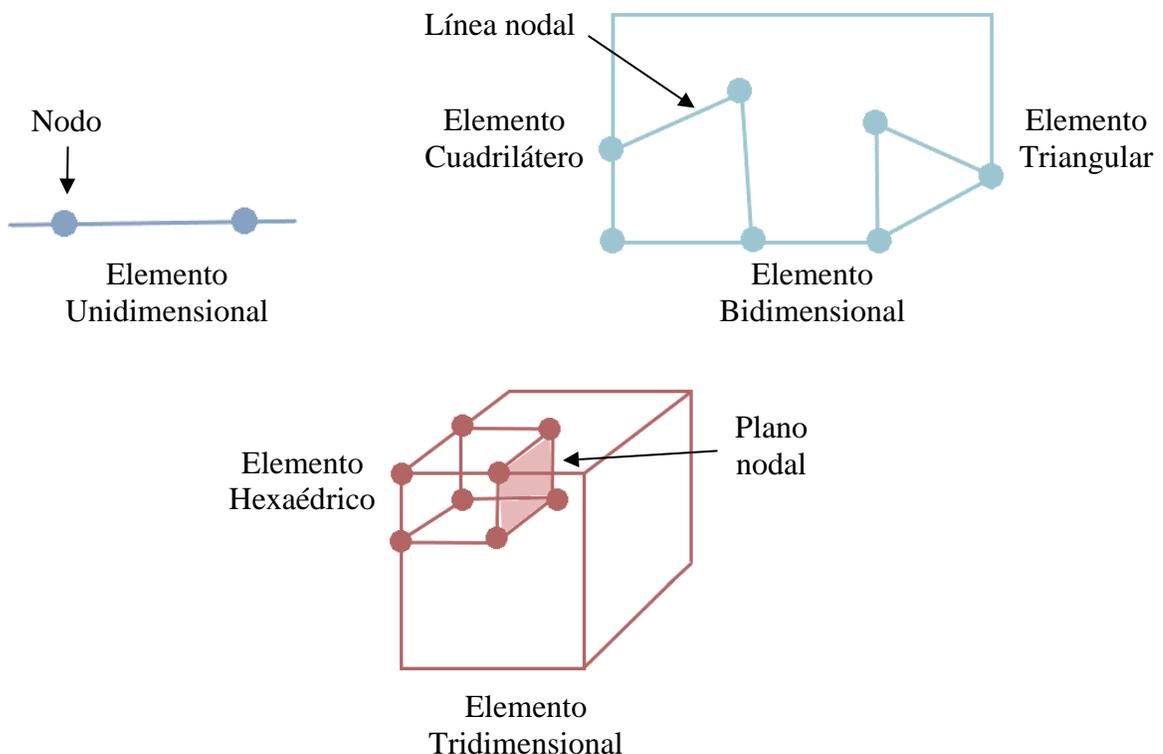


Figura II.23.- Clasificación de modelo según número de dimensiones

II.12.- Método del Elemento Finito y el software ANSYS® Workbench

Existen en el mercado una gran variedad de softwares computacionales que emplean el método del elemento finito para la resolución de problemas físicos. A pesar de la gran diversidad existente, casi todos estos softwares trabajan de una manera similar siguiendo un proceso escalonado de trabajo y utilizando módulos que están integrados en tres fases (Figura II.24) y el software ANSYS®

Workbench no es la excepción. La primera de estas fases es el preprocesador, en el cual se encuentran los módulos necesarios para llevar a cabo el modelado y completa definición del problema a resolver, también se llevaba a cabo la transición del modelo continuo al modelo discretizado por medio de la discretización del mismo y de igual forma se definen las condiciones de frontera a las cuales estará sujeto el estudio a realizar. La siguiente es la fase del procesamiento interno en el cual se llevan a cabo los cálculos internos dentro del software para coincidir en una solución numérica al problema que se está planteando; en esta fase la intervención por parte del usuario es casi nula, con la excepción de la definición de la cantidad de iteraciones matemáticas deseadas para poder coincidir en una solución. Por último, la fase de postprocesador la cual es la salida de datos por parte del software; es aquí donde se pueden obtener los resultados gráficos y numéricos del problema en cuestión [II.25 y II.26].

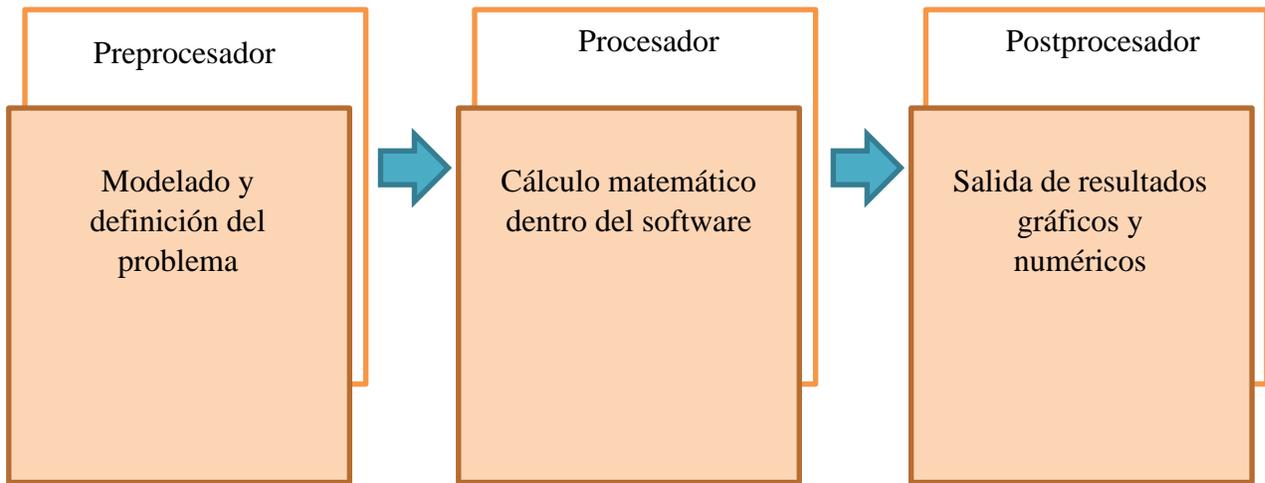


Figura II.24.- Proceso realizado por el software computacional

II.13.- Sumario

En este capítulo se hace un acercamiento a la historia de los alerones dentro de la aviación al igual que en el campo del automovilismo en especial su integración a los monoplazas usados en la *Fórmula Uno*; también se realiza una descripción de la teoría detrás del estudio de la aerodinámica, además de las fuerzas y fenómenos que entran en juego para el diseño de un vehículo aerodinámicamente efectivo. Por último, se describe el método del elemento finito y su uso por medio del software *ANSYS® Workbench* para poder abordar la solución al problema planteando en el presente trabajo.

II.14.- Referencias

- 1.- Hitchens, F. E., *The Encyclopedia of Aerodynamics*, Ed. Andrews UK Limited, pp 42-43, 2015.
- 2.- McBeath, S., *Aerodinámica del Automóvil de Competición*, Ed. Ceac, pp 17-27, 2005.
- 3.- Callander, B. D., *The Critical Twist*, Air Force Magazine, N° 9, pp 150-156, 1989.
- 4.- Cianci-Salvatore, S. y Anderson, J. D., *American Aviation Heritage*, United States Air Force, pp 12-31, 2011.
- 5.- Anderson, J. D., *Aircraft Performance and Design*, Ed. Tata McGraw-Hill, pp 6-23, 2010.
- 6.- Castro, X. y Rana, Z. A., *Aerodynamic and Structural Design of a 2022 Formula One Front Wing Assembly*, Fluids, Vol. 5, pp 237-259, 2020.
- 7.- Katz, J., *Race Car Aerodynamics; Designing for Speed*, Ed. Bentley Publishers, pp 1-14, 1995.
- 8.- Isidoro-Carmona, A., *Aerodinámica y Actuaciones del Avión*, 10ª edición, Ed. Paraninfo, pp 80-91, 2015.
- 9.- Pedroza-González, E., Ortiz-Medel, J. y Martínez-González, F., *Historia del Teorema de Bernoulli*, Acta Universitaria, Vol. 17, N° 1, pp. 39-45, 2007.
- 10.- Anderson, J. D., *Introduction to Flight; Área de Instrucción*, 3ª edición, Ed. McGraw-Hill, pp 133-146, 1989.
- 11.- Antolínez-Pérez, M.F. y Guerra-Goez F. V., *Principios de la Ecuación de Bernoulli, Aplicaciones y Esquema del Montaje Experimental*, Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, pp 1-2, 2016.
- 12.- Cuevas, J. C., Ocaña, O., Hurtado, A. e Hidalgo, S., *El efecto Magnus y La paradoja de D'Alembert: Consideraciones del Flujo Potencial*, Lat. Am. Journal Phys. and Educ., Vol. 4, N° 2, pp 394-398, 2010.
- 13.- Seifer, J., *A Review of the Magnus Effect in Aeronautics*, Progress in Aerospace Sciences Magazine, Vol. 55, pp 17-45, 2012.
- 14.- Gordillo-Arias-De Saavedra, J. M., y Riboux-Acher, G., *Introducción a la Aerodinámica Potencial*, Ed. Paraninfo, pp 1-15, 2012.
- 15.- Anderson, J. D., *Fundamentals of Aerodynamics*, Ed. McGraw-Hill, pp 15-18, 1991.
- 16.- Çengel, A. Y. y Cimbala, M. J., *Mecánica de Fluidos; Fundamentos y Aplicaciones*, 1ª edición Ed. McGraw-Hill, pp 561-601, 2006.
- 17.- Barrero-Ripoll, A. y Pérez-Saborid, A. S.-P., *Fundamentos y Aplicaciones de la Mecánica de Fluidos*, Ed. McGraw-Hill, pp 358-382, 2005.

-
- 18.- Franchini, S. y López-García, O., *Introducción a la Ingeniería Aeroespacial*, 2ª edición, Ed. Garceta, pp 80-84, 2013.
 - 19.- Hernández-Rivera, R., Hernández-Guerrero, A., Rubio-Arana, C. y Lesso-Arroyo, R., *Efecto de Aletas sobre la Generación de Vórtices en un Avión Boeing Modificado*, Memorias del 14 Congreso Internacional Anual de la SOMIM, pp 1172-1182, 2008.
 - 20.- Oñate, E., Alonso, E. E. y Casteleiro, M., *Aplicaciones del Método de los Elementos Finitos en Ingeniería*, Ed. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Barcelona, pp 1-16, 1982.
 - 21.- Fernández, M. y López, E., *El Método de los Elementos Finitos Aplicado al Análisis Estructural*, Ed. Noela, pp 31-86, 2001.
 - 22.- Celigüeta-Lizarza, J. T., *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural*, 4ª edición, Ed. UNICOPIA C.B., pp 1-8, 2011.
 - 23.- Laín-Beatove, S. e Hidalgo-Salazar, M. Á., *El Método de los Elementos Finitos y sus Aplicaciones en Ingeniería*, Ed. Universidad Autónoma de Occidente, pp 41-47, 2012.
 - 24.- Brenner, S. C. y Carstensen C., *Finite Element Methods*, Encyclopedia of Computational Mechanics, Ed. John Wiley & Sons, Ltd, Vol. 1, pp 77-80, 2004.
 - 25.- Roa-Garzón, M. A. y Garzón-Alvarado, D. A., *Introducción al Modelamiento por Elementos Finitos con ANSYS*, 1ª edición, Ed. Facultad de Ingeniería- Universidad Nacional de Colombia, pp 1-4, 2002.
 - 26.- Jaime, G. y Molina, P., *Fundamentos del Método de Elemento Finito*, 1ª edición, Ed. Ingeniería Mecánica, Universidad Mesoamericana de San Agustín, pp 1-16, 2010.

Capítulo III

III.1.- Introducción

En este capítulo se realizará el análisis aerodinámico de tres diferentes alerones empleados en la Fórmula Uno en temporadas anteriores. Esto con la finalidad de obtener un precedente del comportamiento aerodinámico de los alerones a través del paso del tiempo y poder documentar la mejor propuesta de diseño para las necesidades de la competición [III.1]. Antes de realizar los análisis, es necesario conocer las condiciones a las que se encuentran sometidos los automóviles durante una competición de automovilismo y determinar las características técnicas de cada alerón. Para llevar a cabo los análisis de manera objetiva, los tres alerones ya previamente diseñados fueron sometidos a las mismas condiciones de funcionamiento, para ello se inició del modelado de dichos alerones en un programa de diseño *CAD*. Posteriormente, con el uso del programa computacional de aplicación del Método del Elemento Finito (*ANSYS® Workbench*) obtener los resultados de las condiciones aerodinámicas que presentan estos dispositivos en pleno funcionamiento (Figura III.1).



Figura III.1.- Diversos modelos de *Fórmula Uno*, *McLaren MP4/4* de 1988, *Williams FW31* de 2009 y *Mercedes-AMG W12* de 2021, respectivamente

III.2.- *McLaren MP4/4*

El primer alerón utilizado para desarrollar el perfil comparativo, es el alerón diseñado para el *McLaren MP4/4*. Este monoplaza fue diseñado para competir en la temporada de 1988 de la *Fórmula Uno*. Se decidió utilizar este alerón como primer antecedente debido a que su palmarés

deportivo deja en claro su dominio absoluto, ya que su récord de victorias ha sido difícil de igual hasta la fecha, demostrando que se trata de un prodigio de diseño [III.2]. Las dimensiones generales se presentan en el Anexo 1.

Tabla III.1.- Características generales del *McLaren MP4/4* [III.3]

Especificaciones	
Año de Construcción	1988
Chasis	Monocasco de fibra de Carbón
Motor	Honda RA168E de 1.5 L V6-turbo
Velocidad máxima	333 km/h
Peso	540 kg
Dimensiones	Largo; 4394 mm Ancho; 2134 mm Alto; 940 mm
Resultados en la temporada	15 de 16 carreras ganadas; Ganador del campeonato de constructores.

III.2.1.- Modelado del alerón en programa CAD

Con los datos que se conocen, se puede realizar un modelo del alerón frontal utilizando el programa de diseño CAD *SolidWorks*[®], obteniendo como resultado el siguiente modelo (Figura III.2).

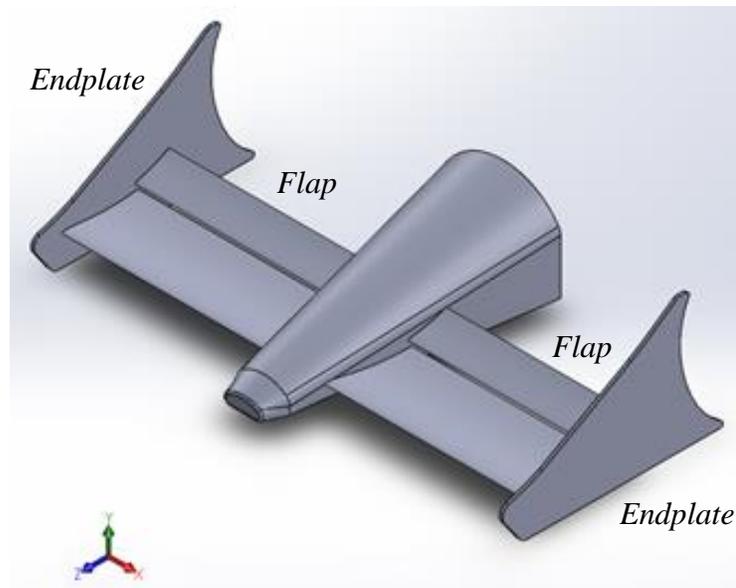


Figura III.2.- Modelo de alerón frontal de *McLaren MP4/4*

Este alerón consta de dos *flaps* que se encontraban montadas directamente sobre la nariz del vehículo, en el extremo exterior de estos *flaps* se encontraba una pieza semi-triangular conocida como *endplate*.

III.2.2.- Análisis numérico aerodinámico [III.4 y III.5]

Para poder llevar a cabo el estudio, se realizó una simulación de dinámica de fluidos sobre el alerón. Para esto se utilizó el modelo sólido del alerón sin ningún componente estructural interno. Se analizaron las presiones que el aire ejerce sobre todo el cuerpo del alerón. Así como, se obtuvo el cálculo de la fuerza de empuje vertical que soporta el dispositivo y las representaciones gráficas de las líneas de flujo alrededor del cuerpo del alerón. Para realizar la simulación se utilizó la herramienta *Fluent* del programa computacional comercial *ANSYS® Workbench*.

III.2.3.- Módulo de geometría

Es necesario tener un buen control del modelo numérico del alerón que se desarrolló en el programa computacional *CAD* para ser utilizado el módulo de geometría de la herramienta *Fluent* del programa computacional *ANSYS® Workbench*. Se exportó el modelo desde el programa *CAD* para que posteriormente se definieran las dimensiones del volumen de control. El cual tiene la forma de un prisma rectangular (Figura III.3).

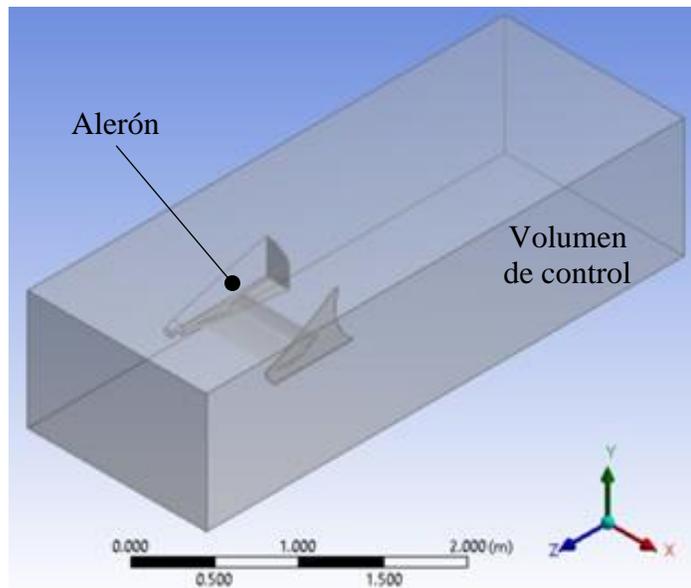


Figura III.3.- Volumen de control *McLaren MP4/4*

El volumen de control representa las zonas alrededor del alerón, en las que se desea conocer el comportamiento del fluido. Es por ello, que el modelo debe quedar inmerso dentro del volumen de control. Para poder obtener resultados precisos y evitar el consumo innecesario de recurso computacional, se decidió analizar sólo la mitad del alerón, ya que este es completamente simétrico y aplicar una condición de simetría para obtener los resultados completos (Figura III.3).

III.2.4.- Método de discretizado

En este módulo se llevó a cabo el discretizado del cuerpo de estudio con parámetros de discretizado fino, controlado y con elementos de alto orden (para poder obtener resultados precisos). El resultado del proceso de discretizado se puede apreciar de la siguiente manera (Figura III.4) [III.6].

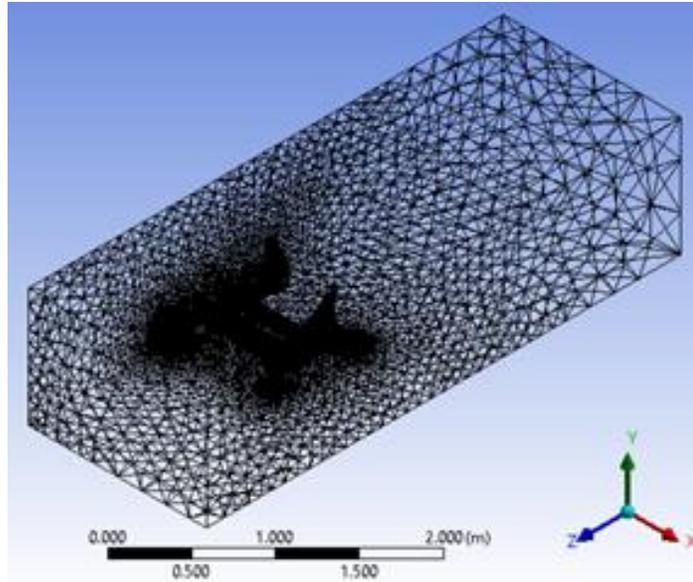


Figura III.4.- Discretizado del alerón de *McLaren MP4/4*

III.2.5.- Aplicación de las condiciones de frontera [III.7 y III.8]

Para poder realizar la simulación correctamente, se deben definir las condiciones bajo las cuales estará sometido el alerón durante el estudio. Para definir estas condiciones se debe ingresar al módulo *setup* de la herramienta *Fluent*. Dentro de este módulo se puede definir la velocidad de entrada del viento. Para este caso, así como para los demás realizados a lo largo de este trabajo de investigación, se trata de un flujo subsónico con una velocidad de fluido de 325 km/h. Siendo esta una velocidad que pueden alcanzar los vehículos que servirán como medio de estudio.

Posterior a definir las condiciones de entrada del viento, a través del volumen de control, se deben definir las condiciones de salida. En este caso, se indica el valor de presión estática, que es igual a cero. Asimismo, se definen las características que presentaran las superficies que entran en contacto con el fluido, como lo son; el suelo de la pista por la que corre el vehículo y las caras del alerón. Las cuales actúan como un elemento rígido, por el cual el aire no pasa. Una vez definidas estas condiciones se puede apreciar el volumen de control del siguiente modo (Figura III.5).

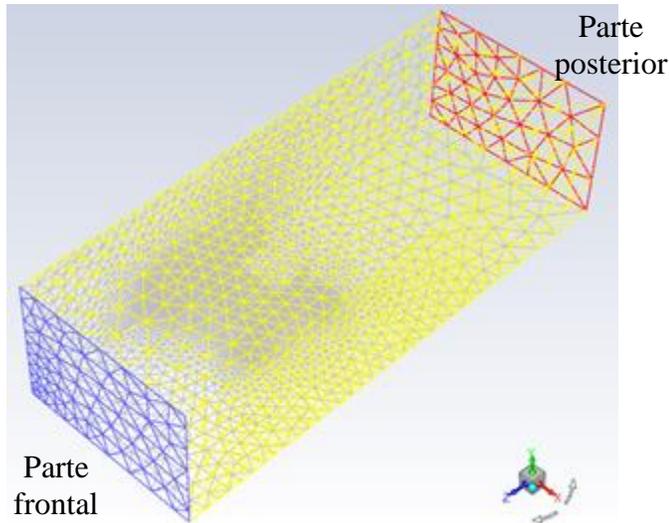


Figura III.5.- Condiciones de frontera *McLaren MP4/4*

III.2.6.- Solución numérica

En este módulo se resuelve una cantidad de ecuaciones diferenciales para poder concluir en los resultados del estudio y todo el proceso lo realiza en su totalidad el programa computacional de Método de Elemento Finito. La única intervención del usuario en este módulo es al principio para definir el número de iteraciones que realizará el programa computacional para converger en una solución. Para todos los estudios realizados en esta tesis se definió un número de 100 iteraciones en todos los casos para mantener un control de resultados unificado.

III.2.7.- Resultados de la evaluación numérica

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de manera gráfica.

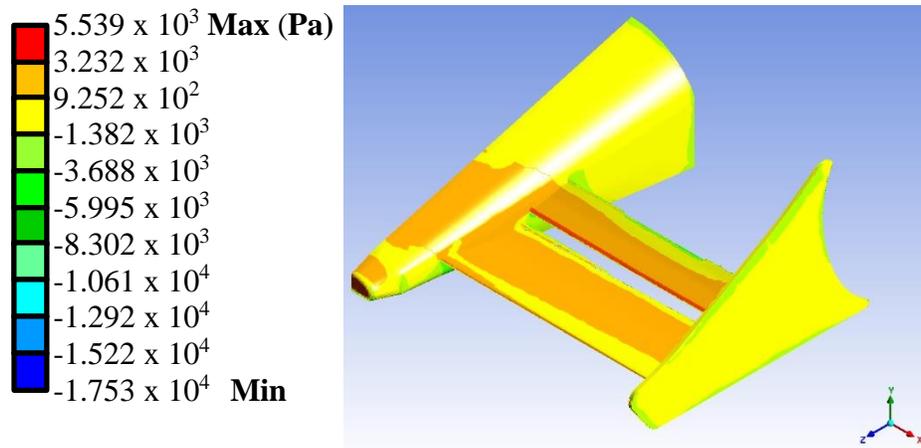


Figura III.6.- Vista general de la presión sobre el alerón del *McLaren MP4/4*

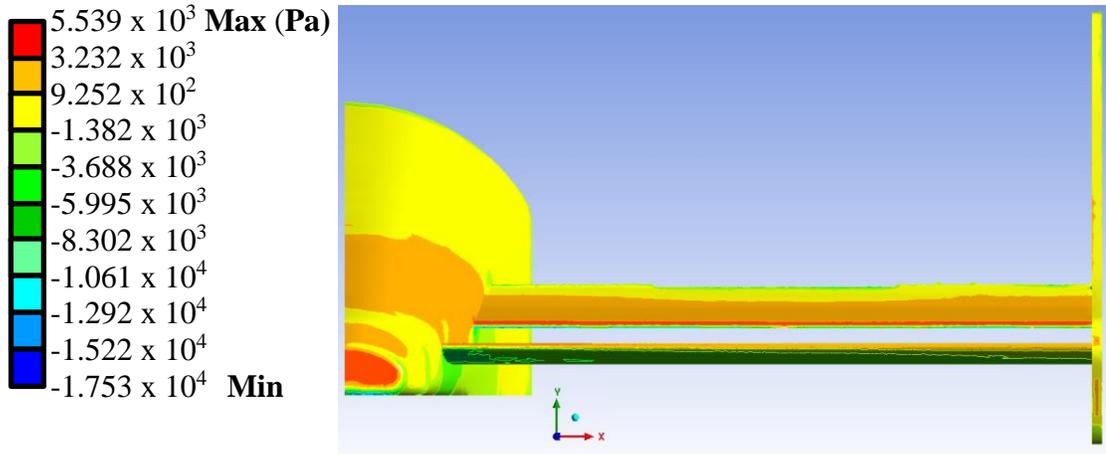


Figura III.7.- Vista frontal de la presión sobre el alerón del McLaren MP4/4

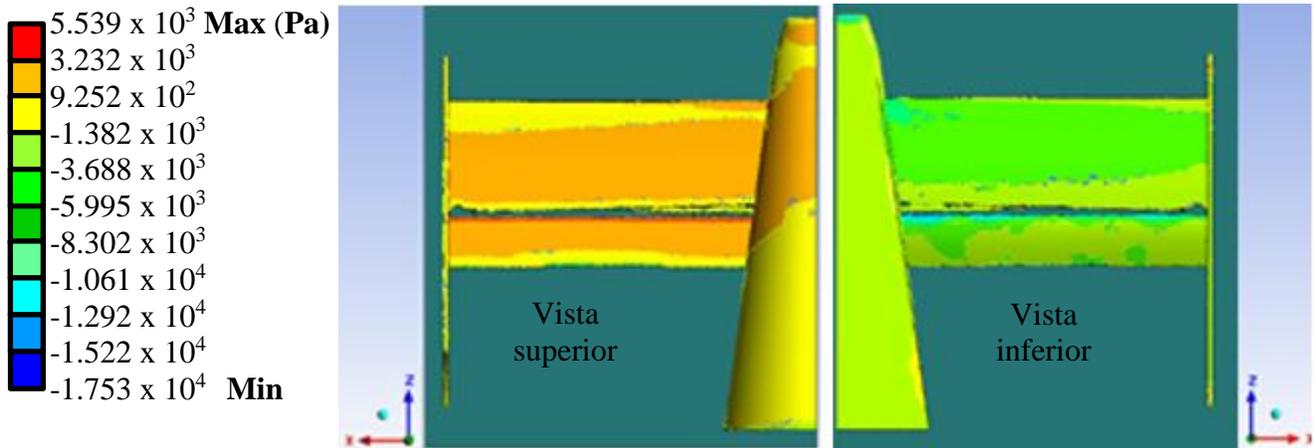


Figura III.8.- Vista superior e inferior de la presión sobre el alerón del McLaren MP4/4

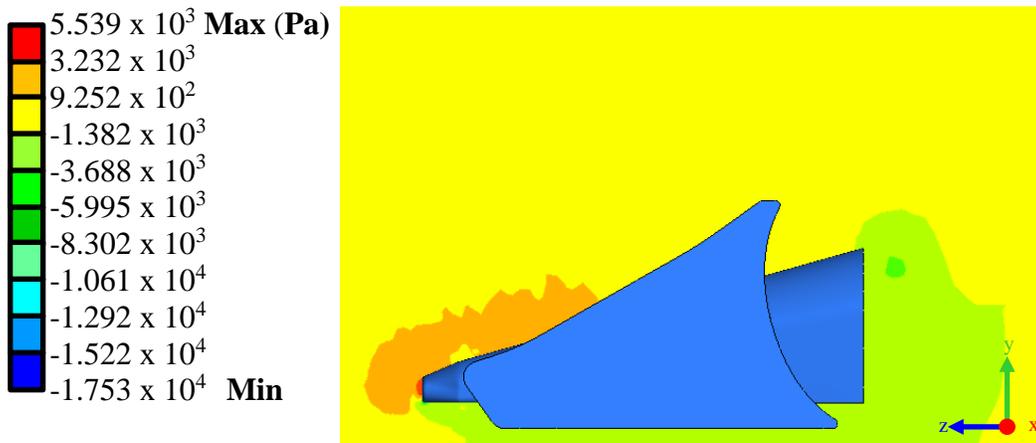


Figura III.9.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón del McLaren MP4/4 sobre el plano medio

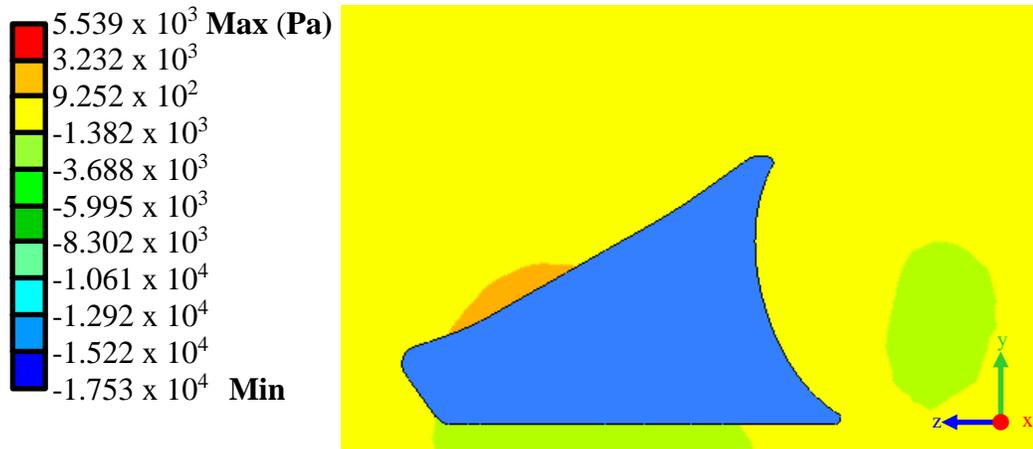


Figura III.10.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón del *McLaren MP4/4* a 250 mm del plano medio

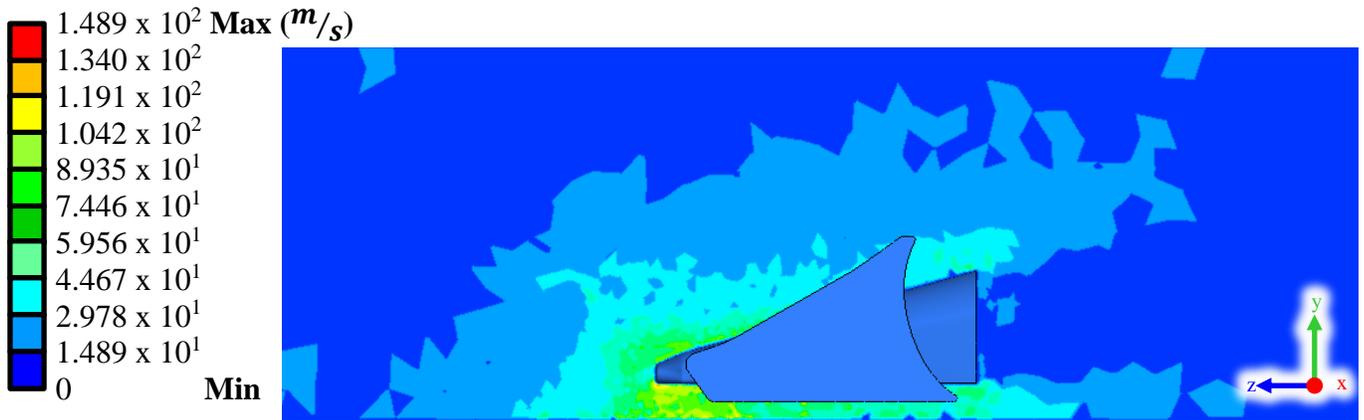


Figura III.11.- Velocidad del viento sobre alerón del *McLaren MP4/4* en plano medio del alerón

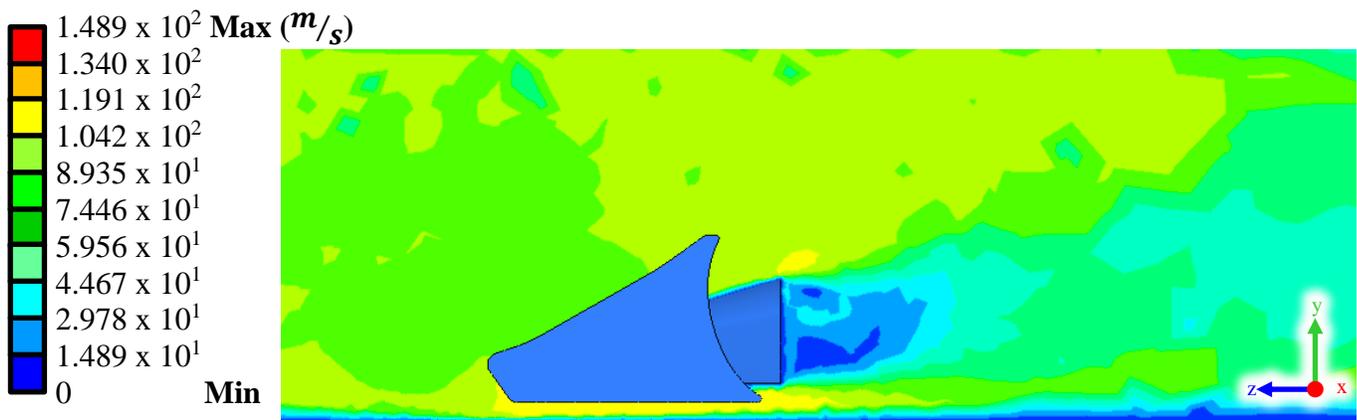


Figura III.12.- Velocidad del viento sobre alerón del *McLaren MP4/4* a 100 mm del plano medio del alerón

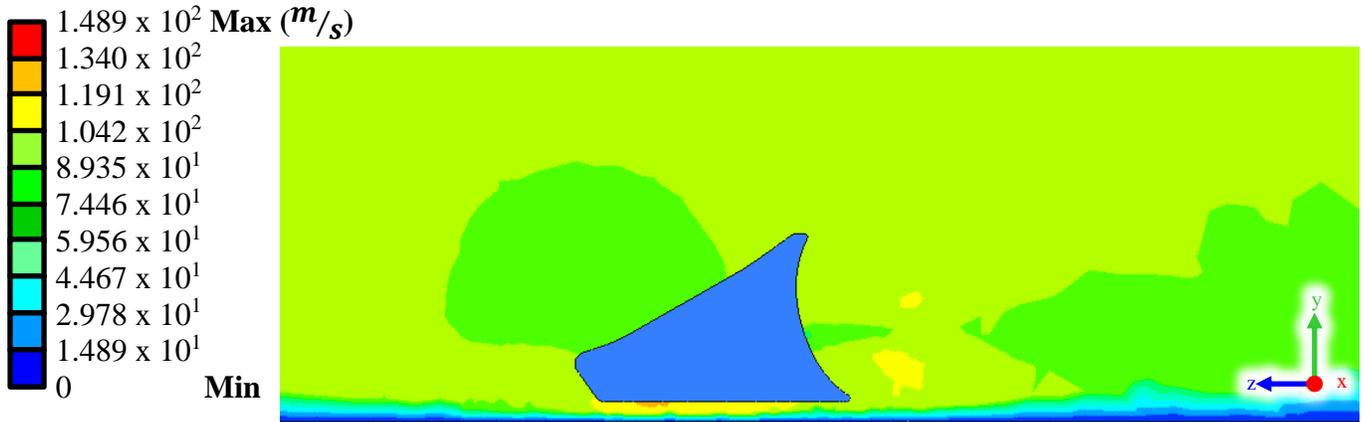


Figura III.13.- Velocidad del viento sobre alerón del *McLaren MP4/4* a 250 mm del plano medio del alerón

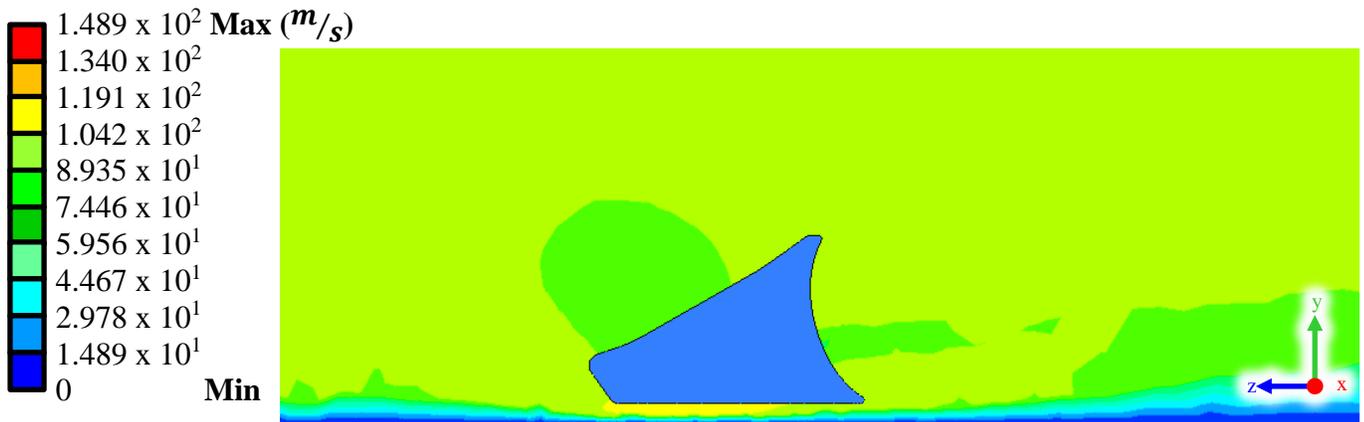


Figura III.14.- Velocidad del viento sobre alerón del *McLaren MP4/4* a 500 mm del plano medio del alerón

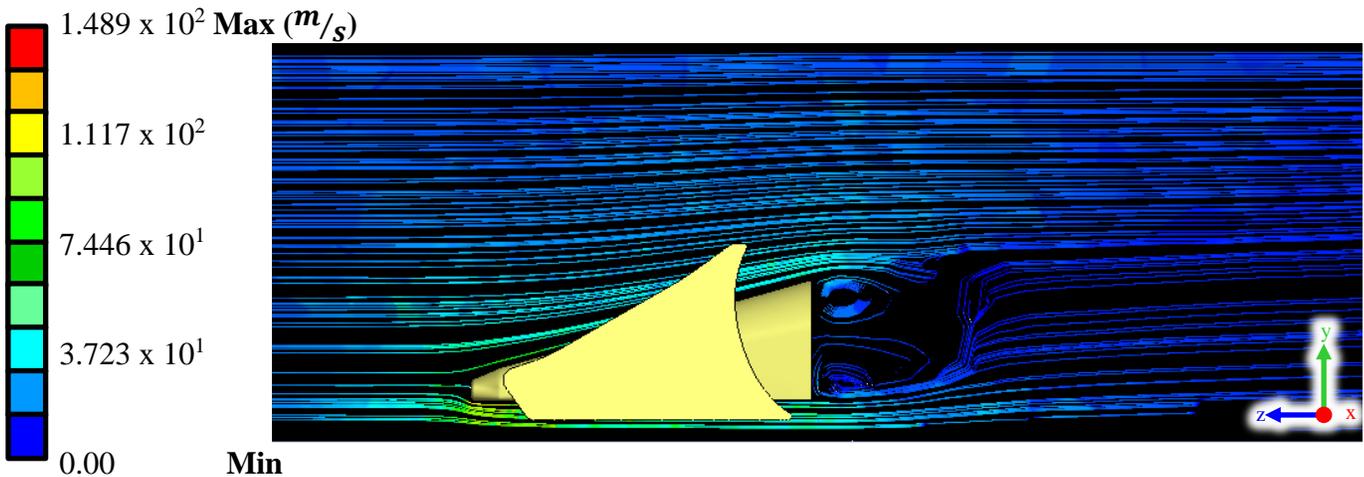


Figura III.15.- Vista lateral del flujo de vórtice alrededor del alerón del *McLaren MP4/4*

El módulo de resultados ofrece el cálculo total de fuerzas que actúan sobre el alerón del *McLaren MP4/4*. Por lo que es posible conocer la magnitud de las fuerzas, tanto de *Downforce* como de arrastre, las cuales servirán para poder realizar una comparación entre los diferentes cuerpos de estudio.

Tabla III.2.- Fuerzas sobre el alerón del *McLaren MP4/4*

Fuerza	Magnitud
<i>Downforce</i>	1440.15 N
Arrastre	231.547 N

III.3.- *Williams FW31*

Como segundo antecedente para formar el marco comparativo, se decidió utilizar el alerón del vehículo *FW31* utilizado por el equipo *Williams* en la temporada del 2009 de la Fórmula Uno [III.9]. Las dimensiones generales se presentan en el Anexo 2.

Tabla III.3.- Características generales del *Williams WF31* [III.9]

Especificaciones	
Año de Construcción	2009
Chasis	Monocasco de fibra de Carbón
Motor	Toyota RVX-09 2.4L-V8
Velocidad Máxima	+330 km/h
Peso	605 kg
Dimensiones	Distancia entre ejes; 3100 mm Ancho; 1800 mm
Resultados en la Temporada	7 ^a posición en el campeonato de constructores.

III.3.1.- Modelado del alerón en programa *CAD*

Con los datos que se conocen se puede hacer un modelo del alerón frontal utilizando el programa de diseño *CAD SolidWorks®*, obteniendo como resultado el siguiente modelo. (Figura III.16). Este alerón cuenta con algunas peculiaridades, como lo son el uso de un perfil de control central establecido por la *FIA* y que era obligatorio para todos los equipos. Su construcción se basa en el uso de dos *flaps* principales que proporcionan la mayor parte de la carga aerodinámica. Así como, un *endplate* en el extremo exterior de estos *flaps* que era curvo, para evitar los vórtices de aire. Asimismo, para potenciar el efecto aerodinámico del alerón contaba con un tercer *flap* más pequeño montado directamente sobre el *endplate*. Todo el dispositivo se encuentra unido a la nariz del vehículo por medio de dos pilones que conectan la parte inferior de la nariz con el perfil de control.

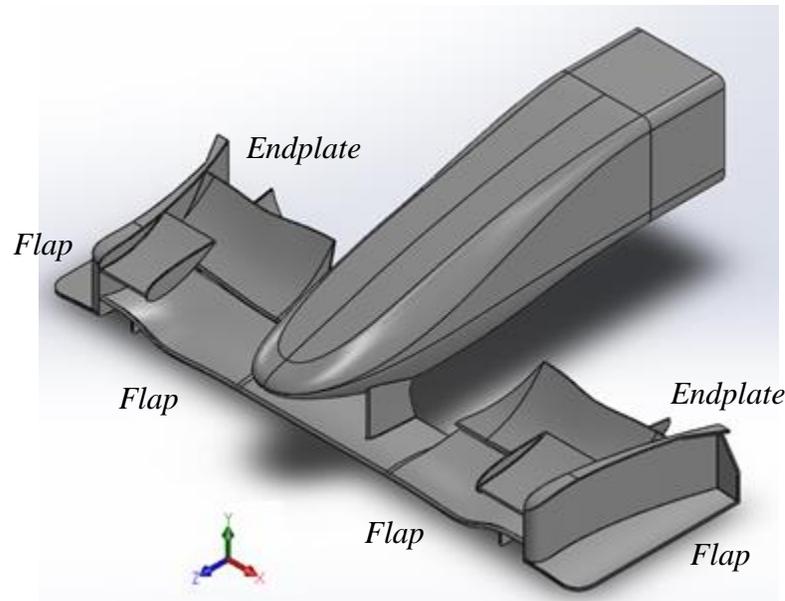


Figura III.16.- Modelo de alerón frontal de *Williams FW31*

III.3.2.- Análisis numérico aerodinámico [III.4 y III.5]

Al igual que en antecedente anterior, se realizó una simulación de dinámica de fluidos sobre el alerón utilizando la herramienta *Fluent* del programa computacional *ANSYS® Workbench*. Para esto se utilizó el modelo sólido del alerón sin ningún componente estructural interno.

III.3.3.- Módulo de geometría

Para poder mantener la uniformidad en los estudios realizados se decidió utilizar el mismo tamaño para el volumen de control en todos los estudios realizados en este trabajo. Después de tener el modelo en el programa de diseño *CAD* se exportó al módulo de geometría de la herramienta *Fluent* y del mismo modo que en el estudio anterior sólo se ingresó la mitad del alerón con la finalidad de evitar consumir todo el recurso computacional (Figura III.17).

III.3.4.- Método de discretizado

En este módulo se llevó a cabo en el discretizado del cuerpo del caso de estudio con parámetros de discretizado fino, controlado y con elementos de alto orden, para poder obtener resultados precisos. El resultado del proceso de discretizado se puede apreciar de la siguiente manera (Figura III.18) [III.6].

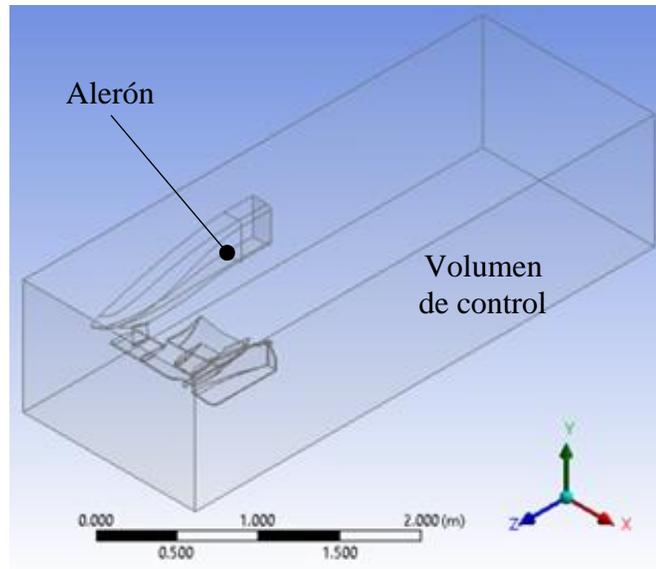


Figura III.17.- Volumen de control *Williams FW31*

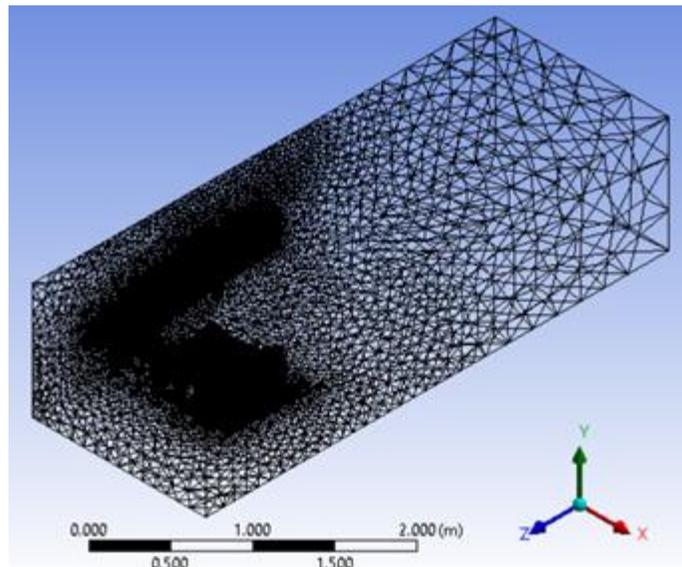


Figura III.18.- Discretizado del alerón de *Williams FW31*

III.3.5.- Aplicación de las condiciones de frontera [III.7 y III.8]

Al igual que en el caso anterior, dentro del módulo *setup* se definieron los factores bajo los que estará sujeta la simulación. Para la velocidad de flujo del viento como ya se mencionó anteriormente se utilizó una velocidad 325 km/h y una presión estática a la salida igual a cero. Posterior a definir las condiciones de frontera el volumen de control se puede visualizar de la siguiente manera (Figura III.19).

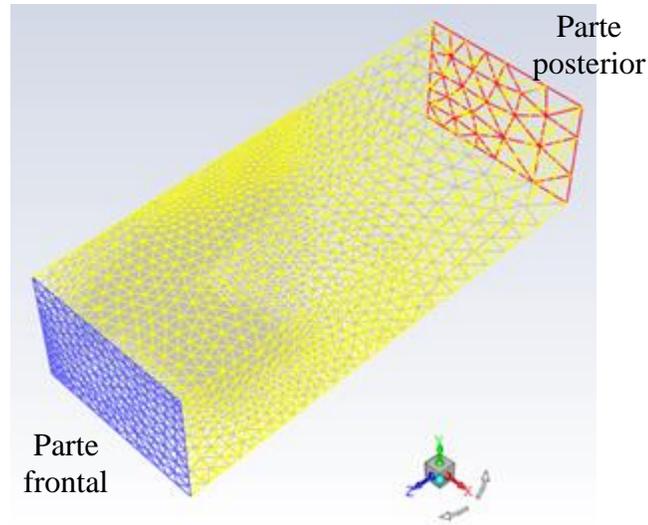


Figura III.19.- Condiciones de frontera *Williams FW31*

III.3.6.- Solución numérica

Al igual que el resto de los análisis la cantidad de iteraciones para llegar a la solución en este módulo se estableció en 100. Este proceso es llevado a cabo por el programa computacional.

III.3.7.- Resultados de la evaluación numérica

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de manera gráfica.

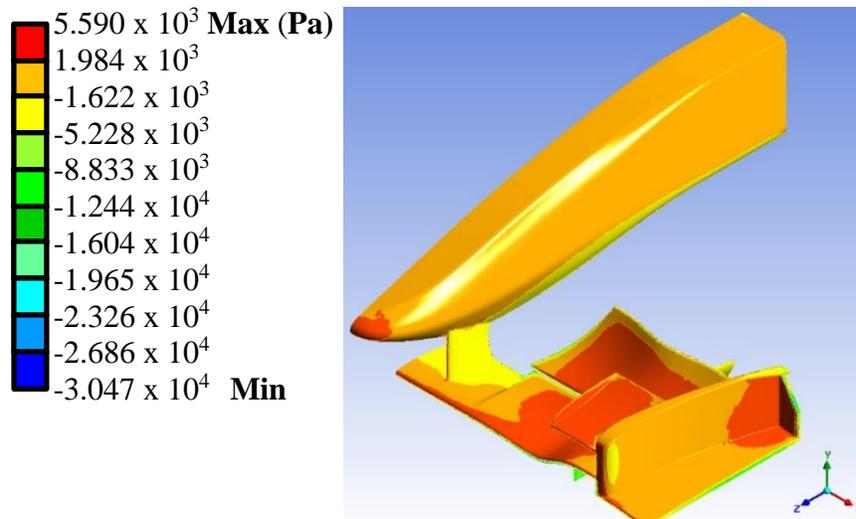


Figura III.20.- Vista general de la presión sobre el alerón del *Williams FW31*

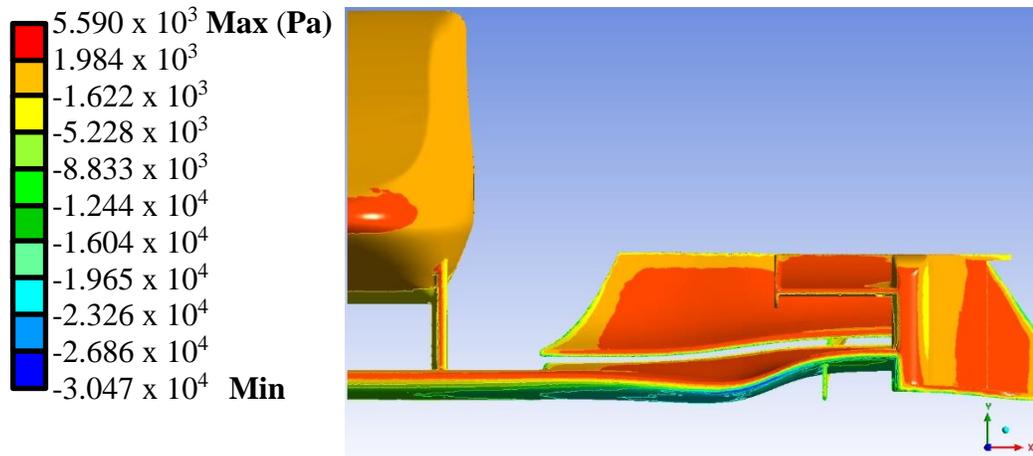


Figura III.21.- Vista frontal de la presión sobre el alerón del *Williams FW31*

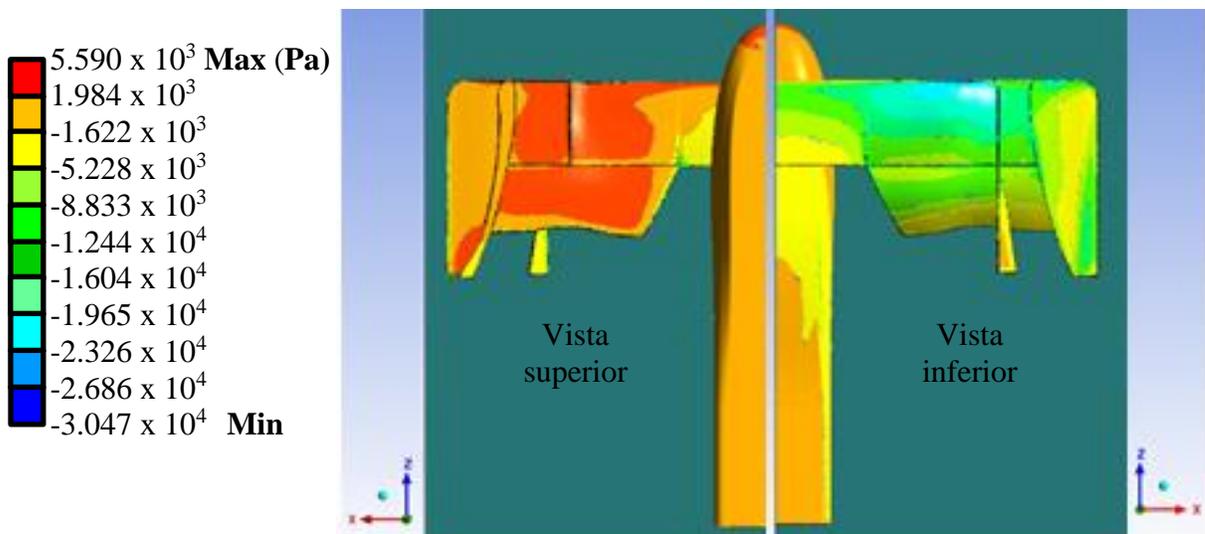


Figura III.22.- Vista superior e inferior de la presión sobre el alerón del *Williams FW31*

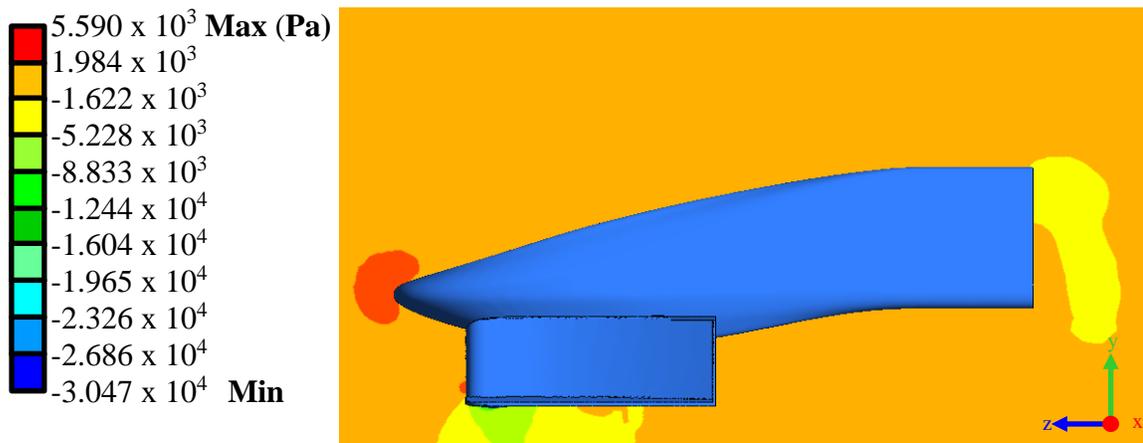


Figura III.23.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón del *Williams FW31* sobre el plano medio

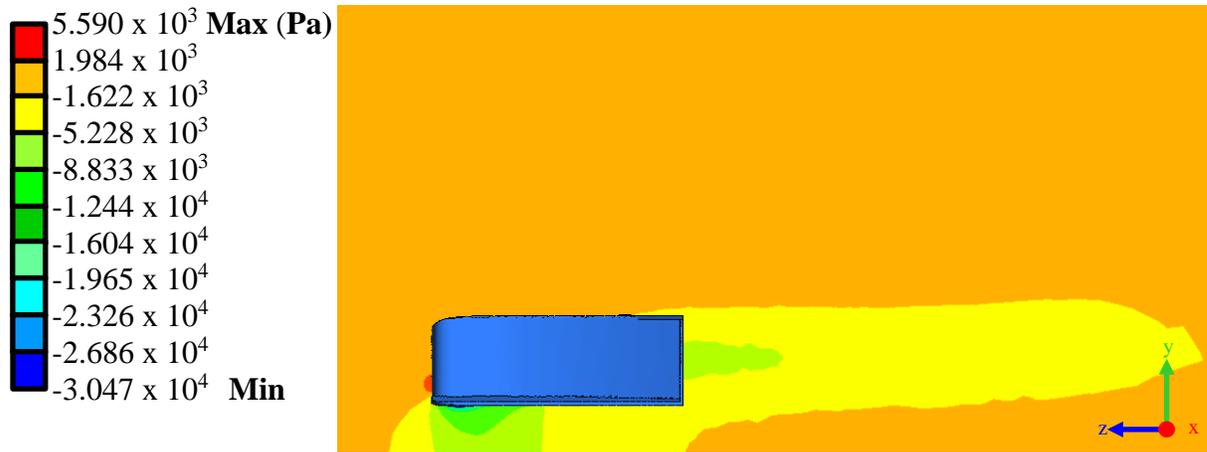


Figura III.24.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón del *Williams FW31* a 250 mm del plano medio

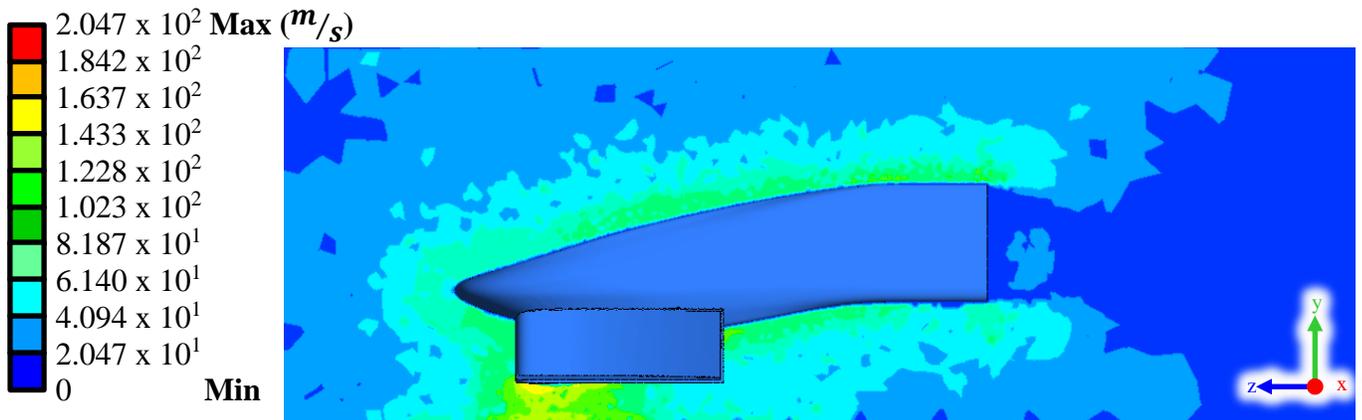


Figura III.25.- Velocidad del viento sobre alerón del *Williams FW31* en plano medio del alerón

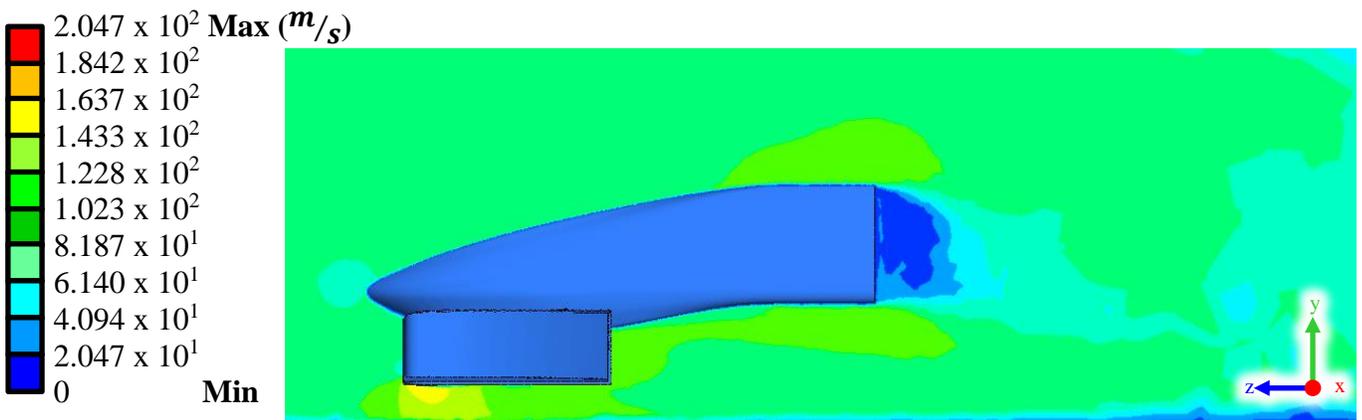


Figura III.26.- Velocidad del viento sobre alerón del *Williams FW31* a 100 mm del plano medio del alerón

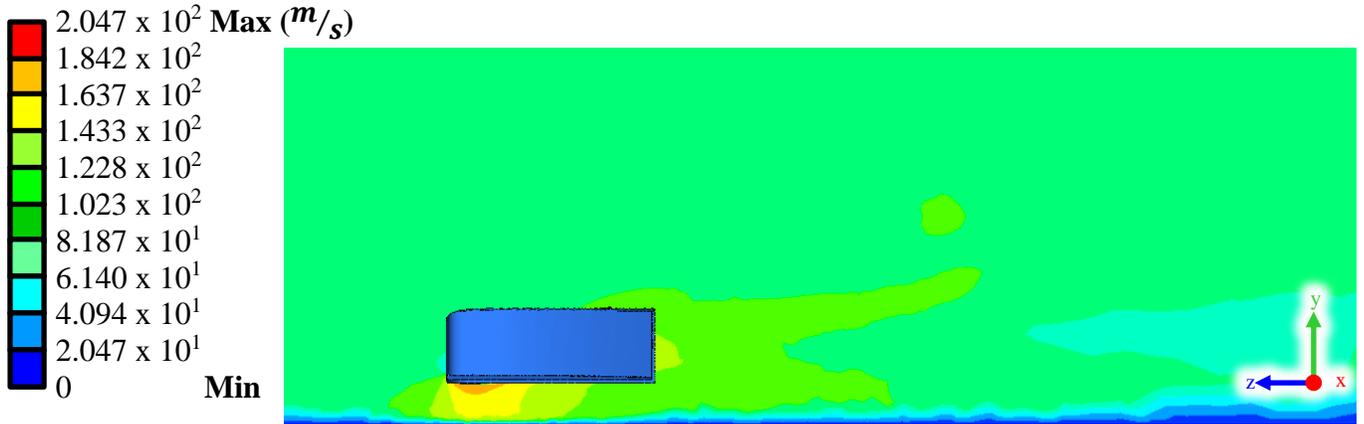


Figura III.27.- Velocidad del viento sobre alerón del *Williams FW31* a 250 mm del plano medio del alerón

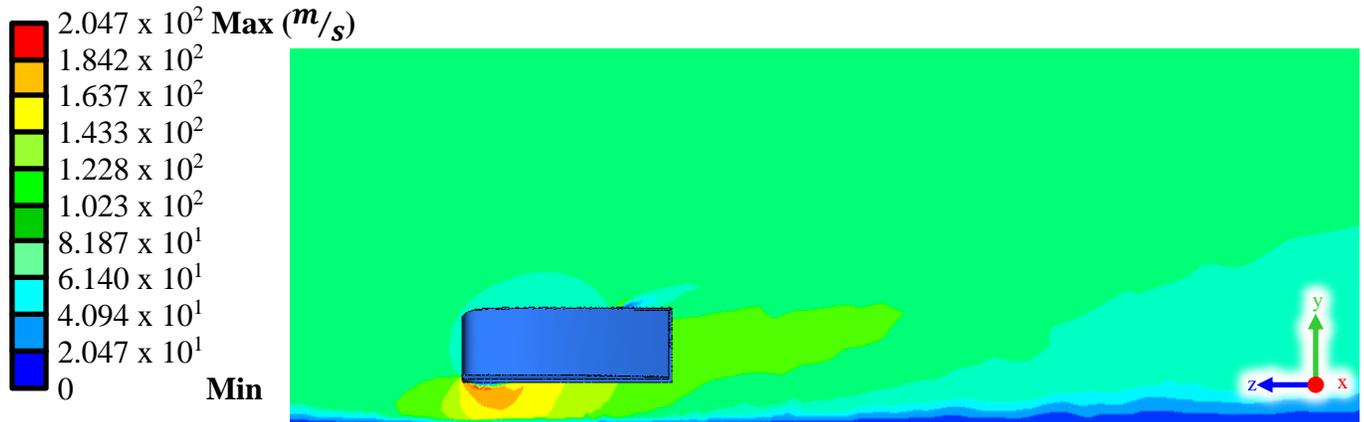


Figura III.28.- Velocidad del viento sobre alerón del *Williams FW31* a 500 mm del plano medio del alerón

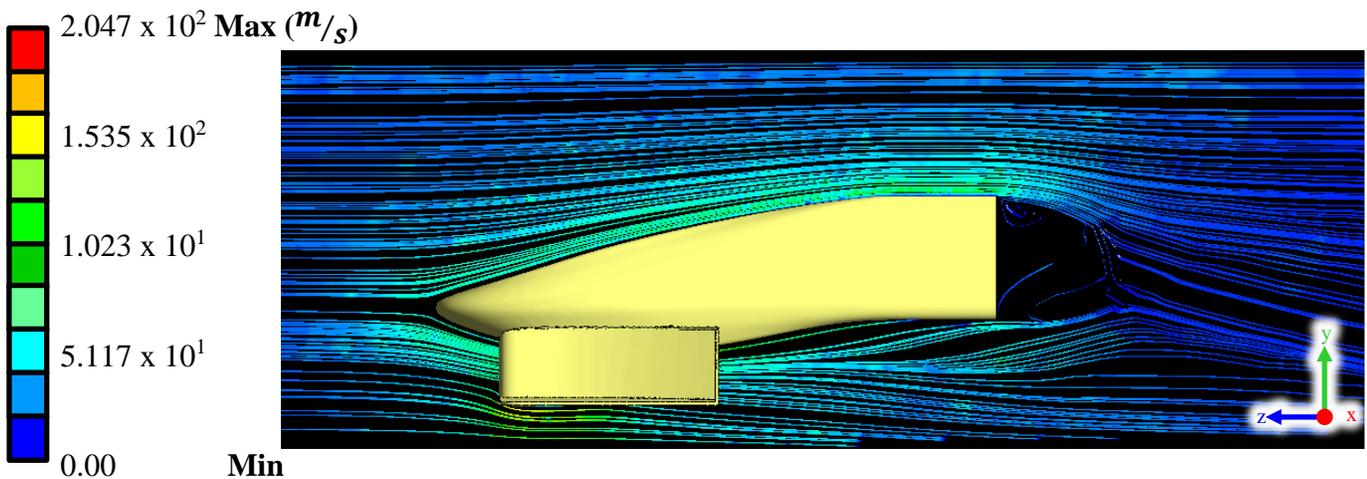


Figura III.29.- Vista lateral del flujo de vórtice alrededor del alerón del *Williams FW31*

El módulo de resultados ofrece el cálculo total de fuerzas que actúan sobre el alerón del *William FW31*. Por lo que es posible conocer la magnitud de las fuerzas, tanto de *Downforce* como de arrastre, las cuales servirán para poder realizar una comparación entre los diferentes cuerpos de estudio.

Tabla III.4.- Fuerzas sobre el alerón del *Williams FW31*

Fuerza	Magnitud
<i>Downforce</i>	4031.38 N
Arrastre	940.323 N

III.4.- Mercedes-AMG W12

Como último antecedente para formar el marco comparativo, se decidió utilizar el alerón del vehículo *W12* usado por el equipo *Mercedes-AMG* en la temporada del 2021 de la Fórmula Uno.

Tabla III.5.- Características generales del *Mercedes-AMG W12* [III.10]

Especificaciones	
Año de Construcción	2021
Chasis	Monocasco de fibra de Carbón
Motor	Mercedes-AMG M12 E performance 1.6L-V6
Velocidad máxima	+330 km/h
Peso	752 kg
Dimensiones	Largo; +5000 mm Ancho; 2000 mm Alto; 950 mm
Resultados en la temporada	9 de 22 carreras ganadas; Ganador de campeonato de constructores

III.4.1.- Modelado del alerón en programa CAD

Con los datos que se conocen se puede hacer un modelo del alerón frontal utilizando el programa de diseño CAD *SolidWorks*[®], obteniendo como resultado el siguiente modelo (Figura III.30). El diseño de este alerón cuenta con características similares al utilizado como antecedente previo. Algunas de esta es el uso de un perfil de control designado por la *FIA*, el cual conecta la parte inferior de la nariz del vehículo con el resto del alerón (Anexo 3). Este dispositivo está constituido de un *flap* principal unido al perfil de control. Además de cuatro *flaps* secundarios de menor tamaño que proporcionan la mayor parte de la carga aerodinámica. Así como, de un *endplate* que ayuda a disminuir los vórtices y sobre el cual se encuentran montados los *flaps* secundarios.

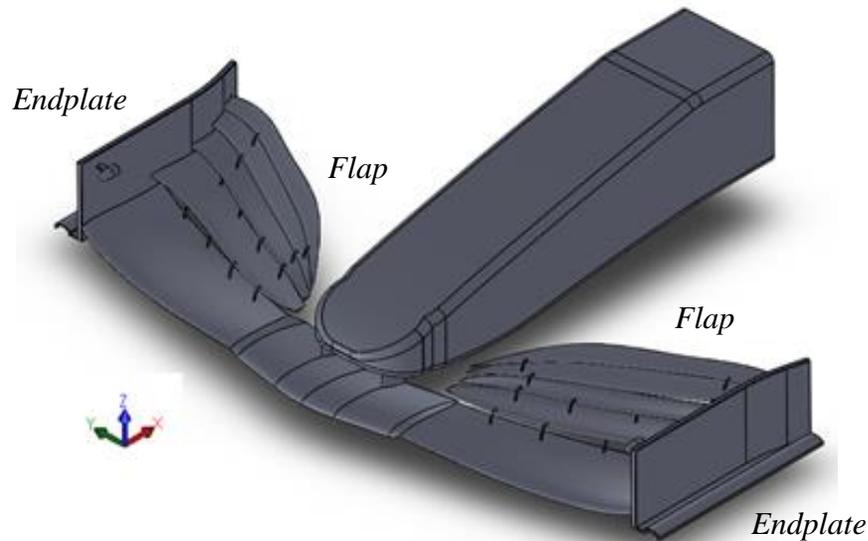


Figura III.30.- Modelo de alerón frontal del *Mercedes-AMG W12*

III.4.2.- Análisis numérico aerodinámico [III.4 y III.5]

Al igual que en antecedente anterior, se realizó una simulación de dinámica de fluidos sobre el alerón utilizando la herramienta *Fluent* del programa computacional *ANSYS® Workbench*. Para esto se utilizó el modelo sólido del alerón sin ningún componente estructural interno.

III.4.3.- Módulo de geometría

Para poder mantener la uniformidad en los estudios realizados se decidió usar el mismo tamaño para el volumen de control en todos los estudios realizados en este trabajo. Después de tener el modelo en el programa de diseño *CAD* se exportó al módulo de geometría de la herramienta *Fluent* y del mismo modo que en el estudio anterior solo se ingresó la mitad del alerón con la finalidad de evitar consumir todo el recurso computacional. (Figura III.31)

III.4.4.- Método de discretizado

En este paso y módulo del programa computacional se llevó a cabo el discretizado del modelo que se va a analizar, lo cual se realiza con parámetros de discretizado fino, controlado y con elementos de alto orden. Lo cual se lleva a cabo, para poder obtener resultados mucho más cercanos a la realidad. El resultado del proceso de discretizado se puede apreciar de la siguiente manera (Figura III.32) [III.6].

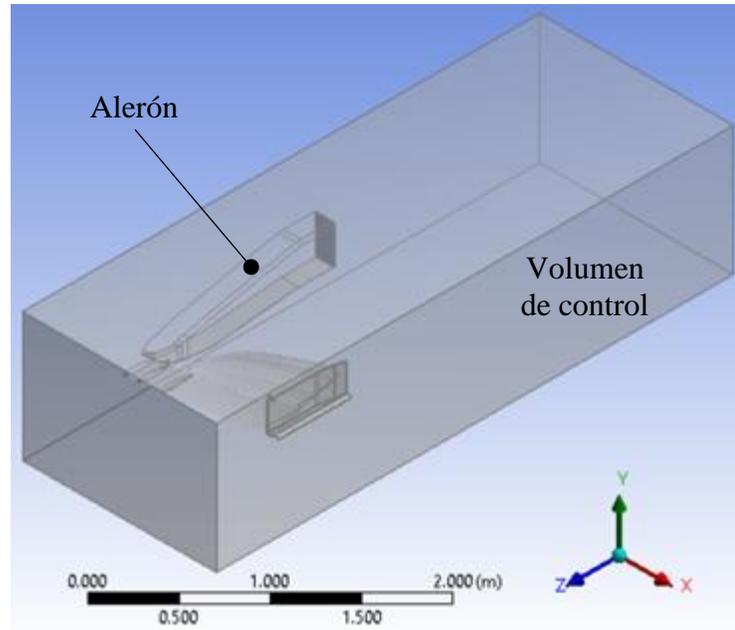


Figura III.31.- Volumen de control *Mercedes-AMG W12*

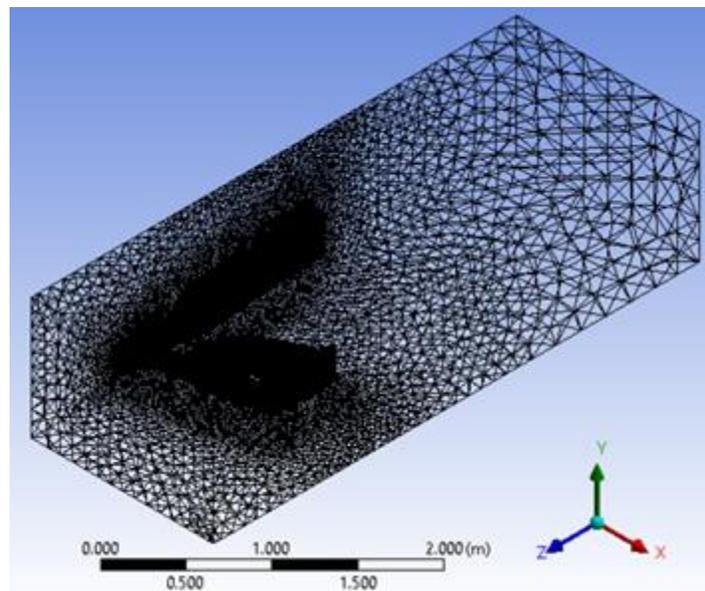


Figura III.32.- Discretizado del alerón de *Mercedes-AMG W12*

III.4.5.- Aplicación de las condiciones de frontera [III.7 y III.8]

Como en los casos anteriores y aplicando el módulo *setup*, se definieron los factores bajo los que estará sujeta la simulación. Para la velocidad de flujo del viento, como ya se mencionó anteriormente, se utilizó una velocidad 325 km/h y una presión estática a la salida igual a cero. Posterior a definir las condiciones de frontera el volumen de control se puede visualizar de la siguiente manera (Figura III.33).

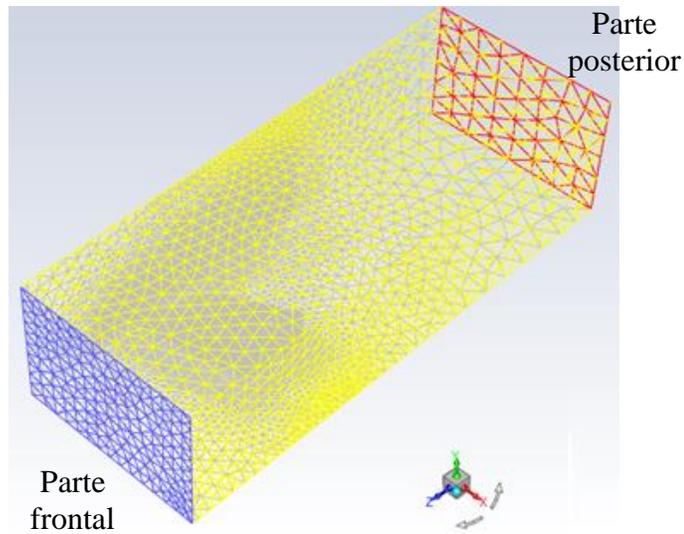


Figura III.33.- Condiciones de frontera *Mercedes-AMG W12*

III.4.6.- Solución numérica

Al igual que el resto de los análisis la cantidad de iteraciones para llegar a la solución en este módulo se estableció en 100. Este proceso es llevado a cabo por el programa computacional.

III.4.7.- Resultados de la evaluación numérica

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de manera gráfica.

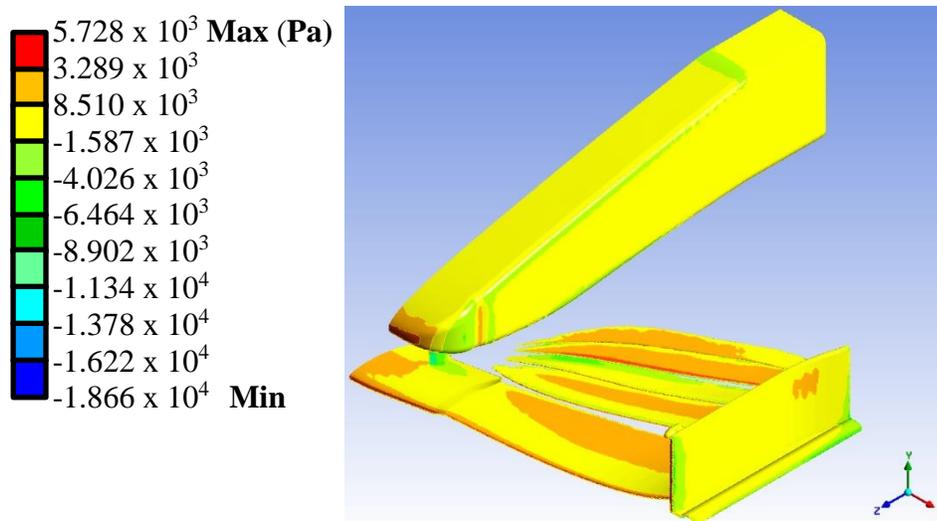


Figura III.34.- Vista general de la presión sobre el alerón del *Mercedes-AMG W12*

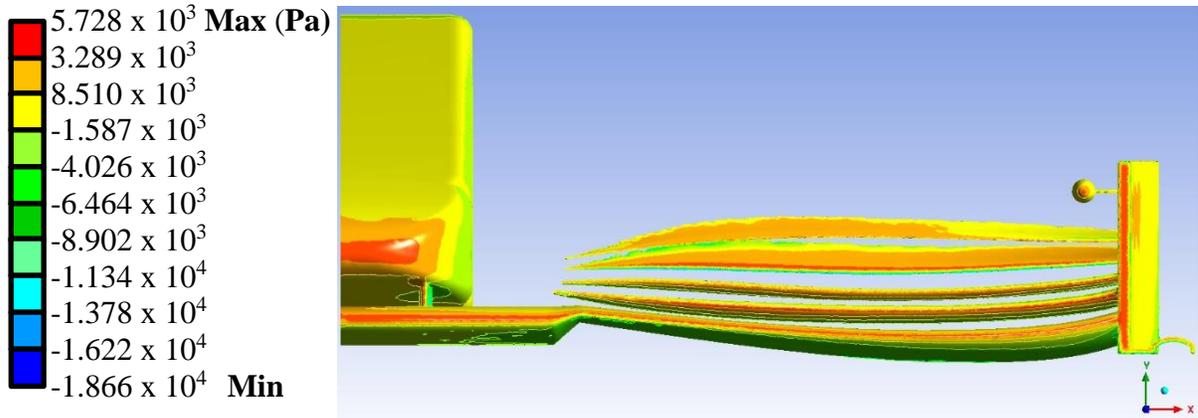


Figura III.35.- Vista frontal de la presión sobre el alerón del *Mercedes-AMG W12*

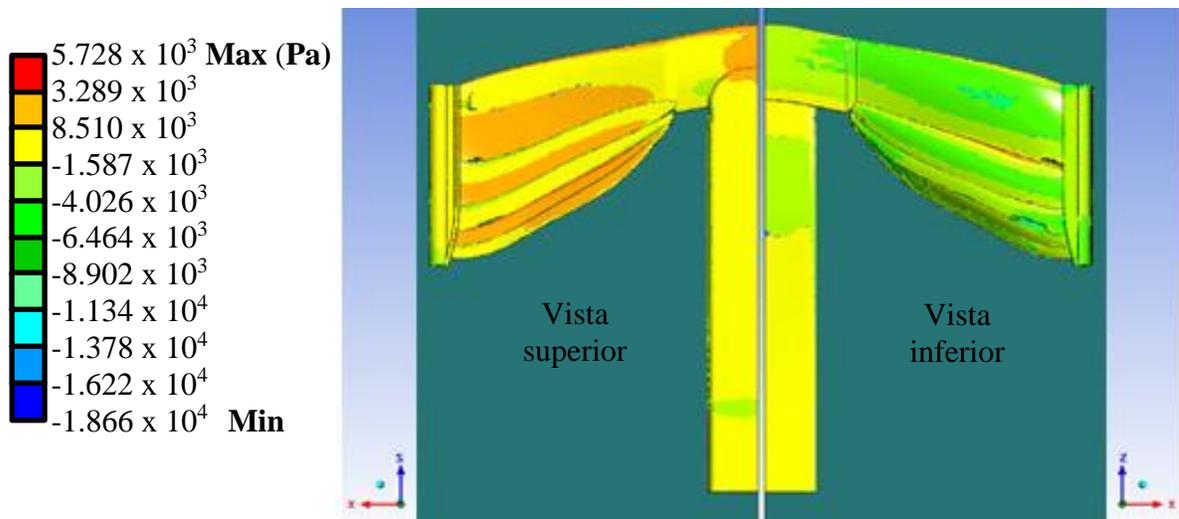


Figura III.36.- Vista superior e inferior de la presión sobre el alerón del *Mercedes-AMG W12*

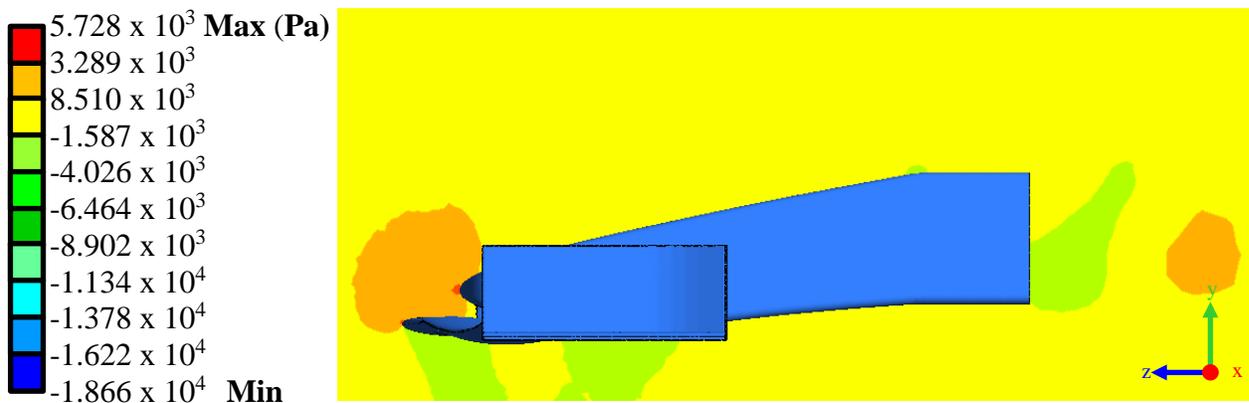


Figura III.37.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón del *Mercedes-AMG W12* sobre el plano medio

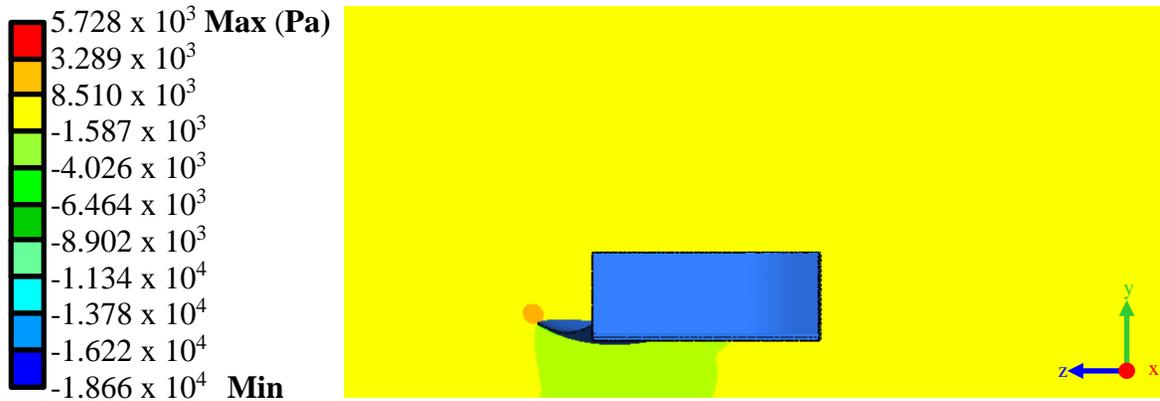


Figura III.38.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón del *Mercedes-AMG W12* a 250 mm del plano medio

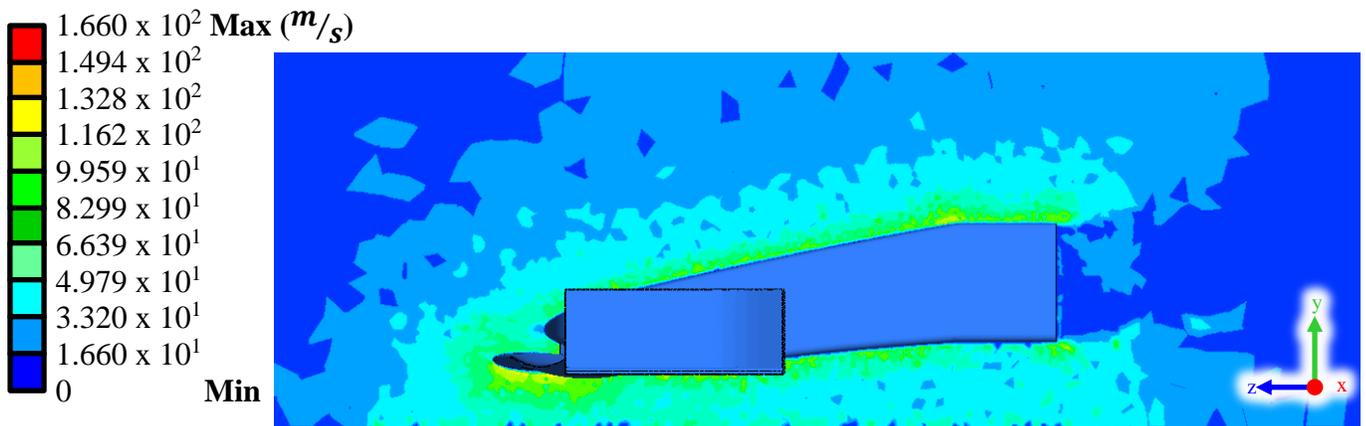


Figura III.39.- Velocidad del viento alerón del *Mercedes-AMG W12* en plano medio del alerón

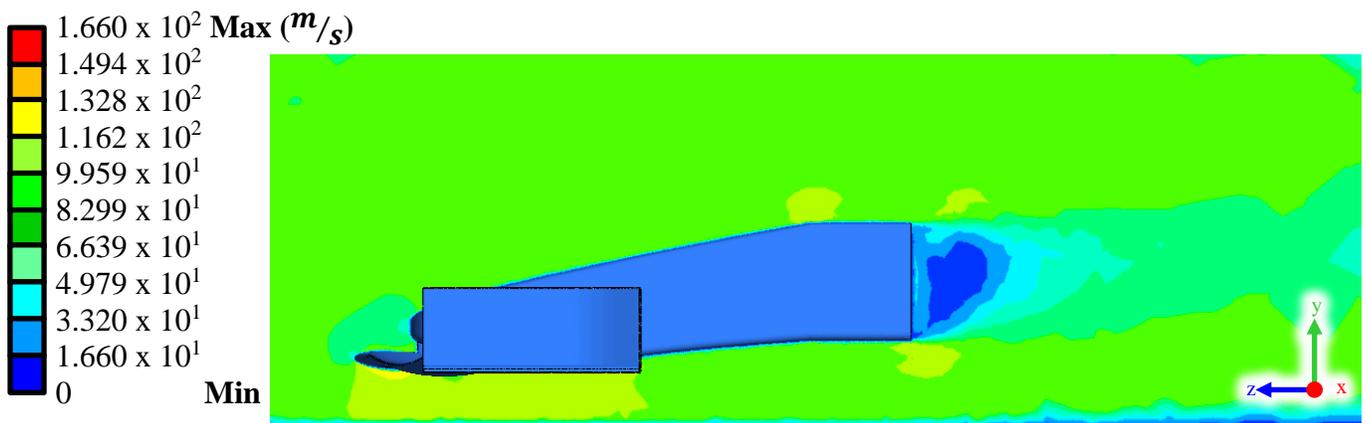


Figura III.40.- Velocidad del viento sobre alerón del *Mercedes-AMG W12* a 100 mm del plano medio del alerón

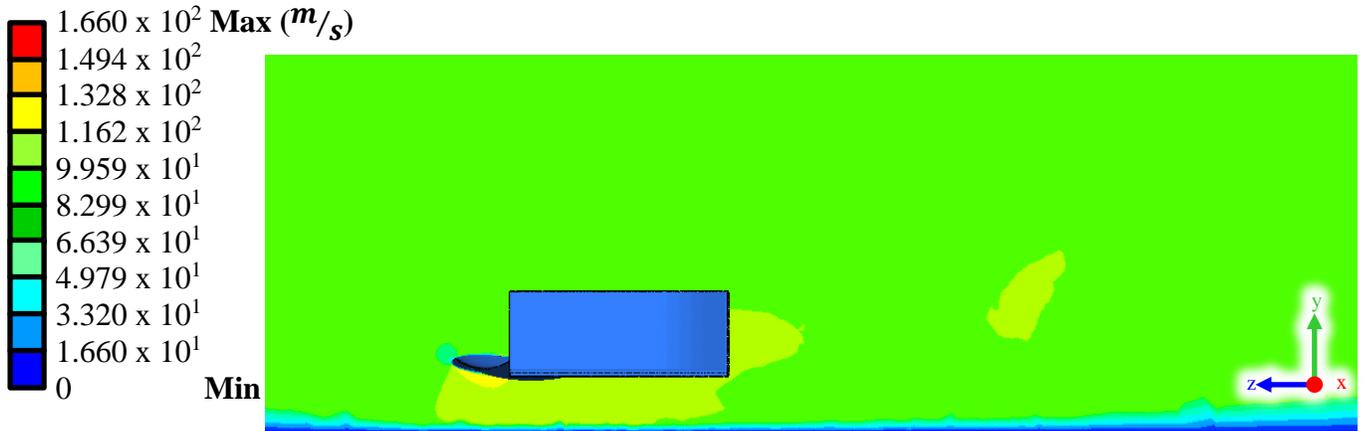


Figura III.41.- Velocidad del viento sobre alerón del *Mercedes-AMG W12* a 250 mm del plano medio del alerón

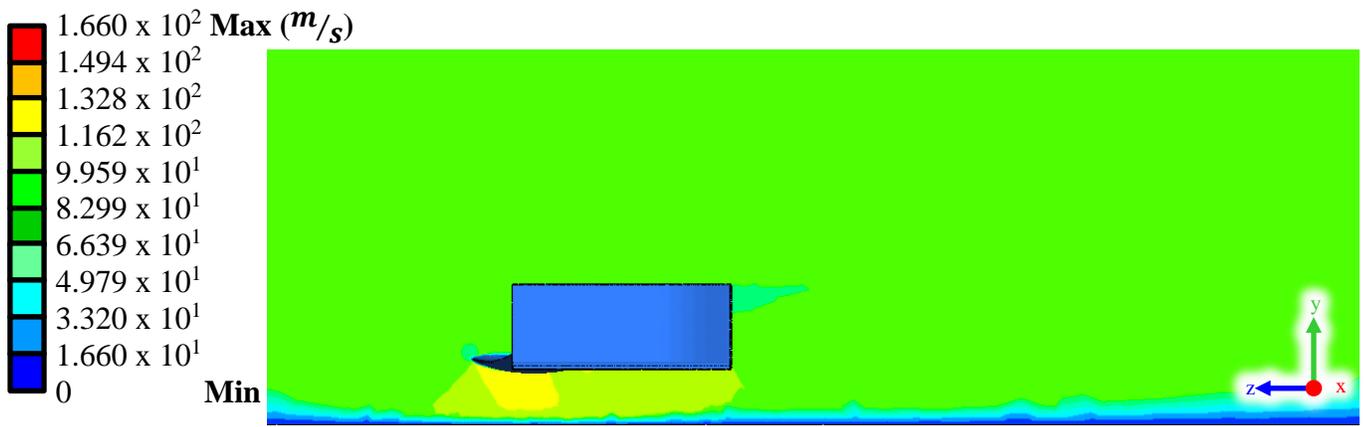


Figura III.42.- Velocidad del viento sobre alerón del *Mercedes-AMG W12* a 500 mm del plano medio del alerón

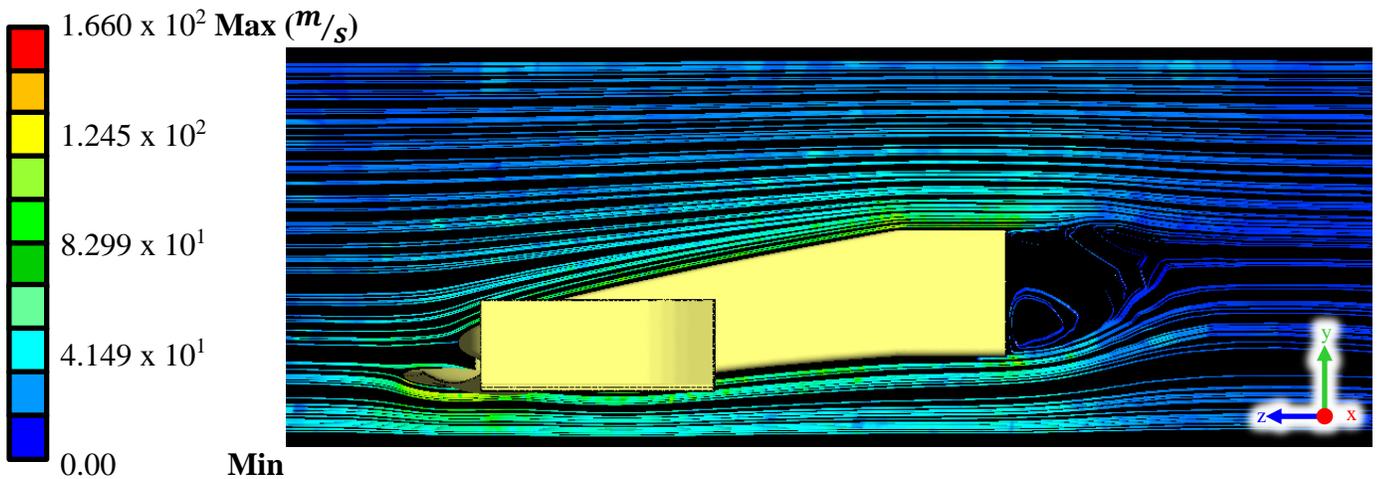


Figura III.43.- Vista lateral del flujo de vórtice alrededor del alerón del *Mercedes-AMG W12*

Los resultados que ofrece el módulo de resultados acerca de las fuerzas sobre el alerón se muestran a continuación.

Tabla III.6.- Fuerzas sobre el alerón del *Mercedes-AMG W12*

Fuerza	Magnitud
<i>Downforce</i>	2016.57 N
Arrastre	318.594 N

III.5.- Interpretación de resultados

A continuación, se presenta una tabla con el resumen de los resultados obtenidos.

Tabla III.7.- Resumen de resultados para los tres casos de estudio

Alerón					
<i>McLaren MP4/4</i>		<i>Williams FW31</i>		<i>Mercedes-AMG W12</i>	
Presiones del aire sobre y alrededor del alerón (Pa)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
5.539×10^3	-1.753×10^4	5.590×10^3	-3.047×10^4	5.728×10^3	-1.866×10^4
Velocidades del aire alrededor del alerón (m/s)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
1.489×10^2	0	2.047×10^2	0	1.660×10^2	0
Fuerza de <i>Downforce</i> máxima (N)					
1440.15		4031.38		2016.57	
Fuerza de Arrastre máxima (N)					
231.547		940.323		318.594	
Relación Arrastre-Downforce (%)					
16.077		23.325		15.798	

Los análisis presentados en este capítulo dejan ver la constante evolución en la eficiencia del diseño de los alerones frontales en los vehículos usados en la Fórmula Uno. Con los resultados de las fuerzas que actúan sobre los alerones y que son presentados en las Tablas III.2, III.4 y III.6, se puede hacer una sencilla comparativa y apreciar como a pesar de que el alerón del *Williams FW31* tiene una mayor fuerza de sustentación en comparación con los alerones del *McLaren MP4/4* y el *Mercedes-AMG W12*. De igual manera la fuerza de arrastre que genera es mucho mayor haciéndolo menos eficiente a los otros dos alerones (Figura III.44).

En las imágenes de los resultados de las fuerzas y las velocidades que actúan sobre el aire alrededor de los alerones, se puede apreciar cómo tanto la velocidad, como la presión en la parte inferior del alerón juega un papel importante en el funcionamiento de estos. Esta zona de baja presión por debajo del alerón en conjunto con la zona de alta presión ejercida en la parte superior, da como resultado una fuerza que le proporción al vehículo mayor tracción a la pista. Los resultados conseguidos en este capítulo servirán de referencia para poder proponer un nuevo diseño más eficiente que se ajuste a los requerimientos en la reglamentación de la temporada 2022 de la Fórmula Uno.

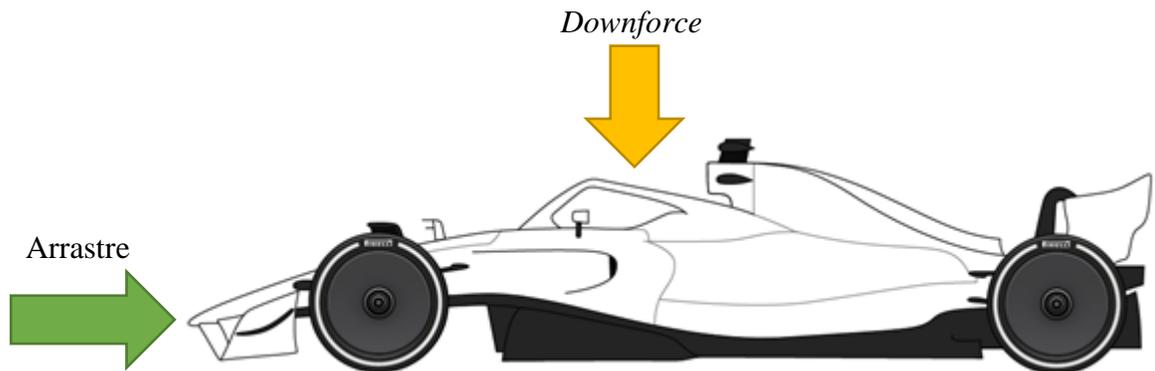


Figura III.44.- Fuerzas del viento que actúan sobre el vehículo

III.6.- Sumario

Los estudios aerodinámicos realizados a los antecedentes en el presente capítulo son de utilidad para comprender el avance en el desarrollo tecnológico de los alerones, así mismo deja claro la evolución de la eficiencia en los apéndices aerodinámicos tales como los alerones delanteros en los vehículos de competición.

III.7.- Referencias

- 1.- Chaur-Bernal, J., Optimización aplicada al diseño mecánico, *Revista Tecnura*, Vol. 2, No. 4, pp 14-19, 1999.
- 2.- International Journal of the FIA, The old one-two, *Auto Magazine*, No. 9, pp 74-75, 2014.
- 3.- Rendle, S., *McLaren MP4/4 1988; Owner's Workshop Manual*, Ed. Haynes, 2018.
- 4.- Sharma, R. B. y Bansal, R., CFD simulation for flow over passenger car using tail plates for aerodynamic drag reduction, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 7, No. 5, pp 28-35, 2013.

-
- 5.- Ryszard-Piechna, J., Kurec, K., Broniszewski, K., Remer, M., Piechna, A., Kamieniecki, K. y Bibik, P., Influence of the car movable aerodynamic elements on fast road car cornering, *Energies*, Vol. 15, No. 689, pp 2-28, 2022.
 - 6.- Pina-Macedo, A., *Modelización de Problemas de Interacción Fluido-Estructura con Elementos Finitos de Orden Elevado*, Tesis de Licenciatura, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, pp 1-34, 2015.
 - 7.- Castro, X. y Rana, Z. A., Aerodynamic and structural design of a 2022 Formula One front wing assembly, *Fluids*, Vol. 5, pp 237-259, 2020.
 - 8.- Basso, M., Cravero, C. y Marsano D., aerodynamic effect of the gurney flap on the front wing of a F1 car and flow interactions with car components, *Energies*, Vol. 14, No. 2059, pp 1-15, 2021.
 - 9.- Williams FW31 Specifications, *F1 Technical Database*, 2022.
 - 10.- F1 W12 E Performance, *Mercedes-AMG Oficial WebSite*, 2022.

Capítulo IV

IV.1.- Introducción

En este capítulo se presenta el desarrollo de tres propuestas de alerón, tanto su diseño como los análisis numéricos a los que estuvieron sujetos. Con lo cual, se puede culminar con la elección de la mejor propuesta. Posteriormente, se realizará su impresión en una máquina de 3D a escala, para realizar su análisis en un túnel de viento. Para poder evitar confusiones entre las tres propuestas, a cada una se le asignó un número de serie a discreción del autor de esta obra.

IV.2.- Diseño general

Para la fase de diseño de todas las propuestas presentadas en este capítulo, se partió de la revisión de la reglamentación proporcionada por la *FIA* para los vehículos que participan en el Campeonato de Constructores de *la Fórmula Uno* de 2022 [IV.1].

Tabla IV.1.- Reglamentación técnica de la *Fórmula Uno* 2022

Parámetro	Artículo y/o Anexo
Nariz	Art. 3.6.1, Anexo 9, Anexo 11
Perfiles del alerón	Art. 3.9.1, Anexo 24, Anexo 26
<i>Endplate</i>	Art. 3.9.2, Art. 3.9.5, Anexo 23
<i>Diveplane</i>	Art. 3.9.4, Anexo 22, Anexo 25
Ensamblado	Art. 3.9.6, Art 3.9.9, Art 3.11.4, Anexo 21
Front <i>Wing Tip</i>	Art. 3.9.3
Sistemas de coordenadas y referencias	Art. 2.10, Art. 2.11
Materiales	Art. 15.3

Posterior a la interpretación de la reglamentación, se procedió a la construcción de los volúmenes de referencia proporcionados en el reglamento dentro del programa de diseño *CAD SolidWorks®*. Esto con la finalidad de permanecer dentro de la legalidad de la competencia, ya que ninguna parte de los alerones que sean usados en competencia deben tener superficies o partes fuera de estos volúmenes de referencia. A continuación, se muestran los volúmenes de referencia utilizados para el diseño del alerón frontal y la nariz del vehículo (Figura IV.1). Con los volúmenes de control construidos, se definieron los planos clave en la geometría de referencia que servirán de guía para el correcto dimensionamiento de las partes del alerón (Figura IV.2). Estos planos son usados como guía para la proyección de las posiciones de los perfiles a lo largo de los *flaps*. Estas proyecciones de referencia se encuentran paralelos al sistema de coordenadas YZ y sus ubicaciones en el eje X (Tabla IV.2). Los tres diseños desarrollados, como propuestas, fueron elaborados utilizando estos cinco planos como referencia para su correcto dimensionamiento.

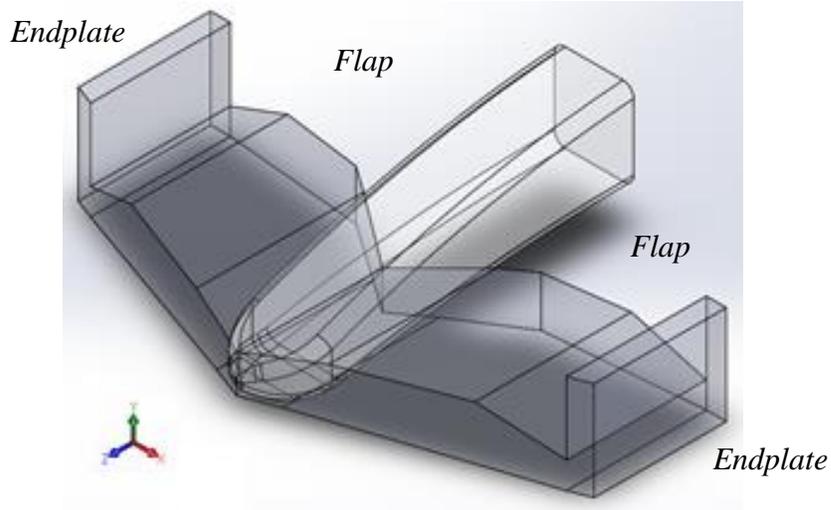


Figura IV.1.- Volúmenes de referencia

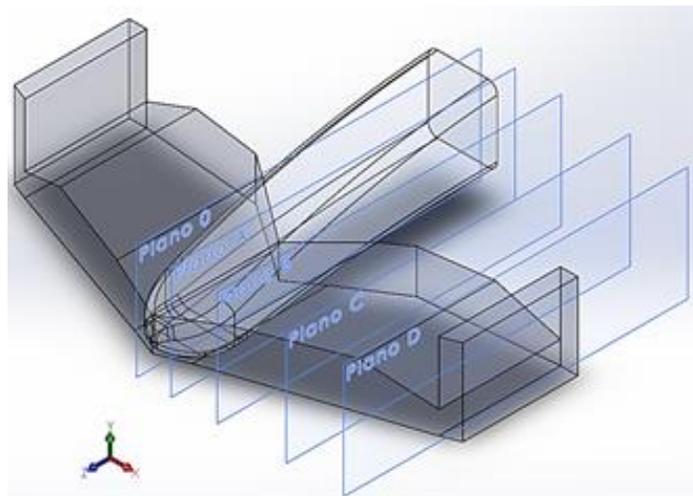


Figura IV.2.- Planos de referencia para construcción

Tabla IV.2.- Posiciones de los planos de referencia

Nombre	Posición en eje X
Plano 0	0 mm
Plano A	150 mm
Plano B	350 mm
Plano C	650 mm
Plano D	900 mm

IV.3.- Propuesta 1; MICC-75

Se presenta la primera propuesta como un punto de partida y tener los aspectos principales del estudio que se va a desarrollar. Así como, tomando en consideración los análisis de capítulo anterior.

IV.3.1.- Implementación del modelo

Para el diseño de la primera propuesta (Figura IV.3) se decidió partir del uso de un perfil *GOE-195*. Para obtener las coordenadas de este perfil, se utilizó la herramienta digital *Airfoil Tools* [IV.2]. Las coordenadas que definen la geometría de este perfil se encuentran en el Anexo 4 (Figura IV.4).

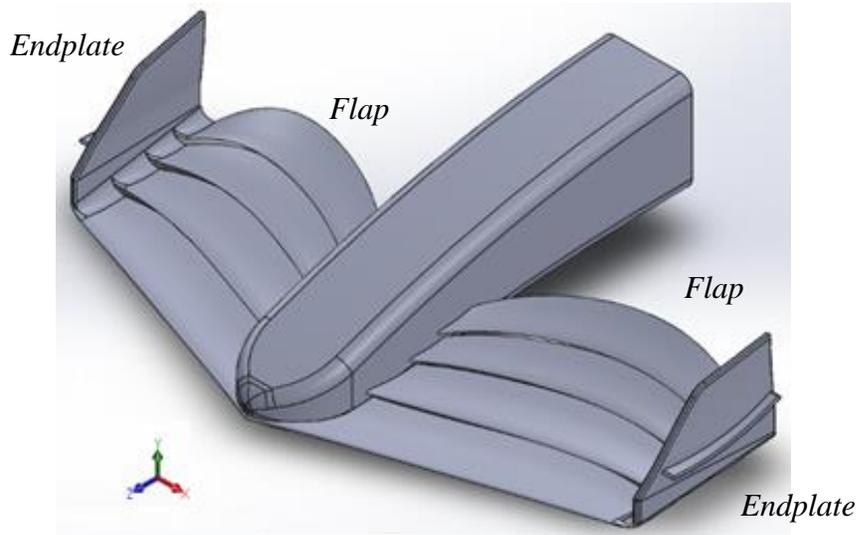


Figura IV.3.- Alerón *MICC-75*

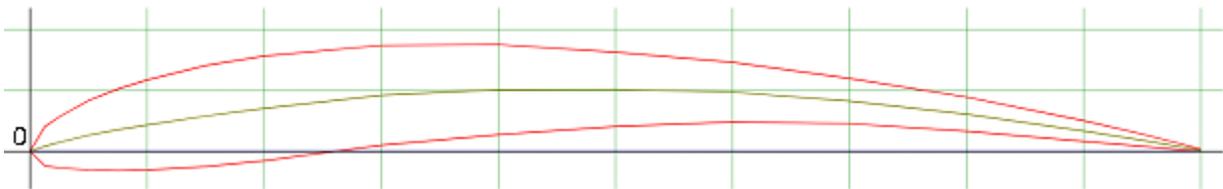


Figura IV.4.- Perfil *GOE-195*

Posterior a la elección del perfil base para el diseño del alerón se procedió al dimensionamiento de los *flaps* que conforman el cuerpo del alerón utilizando los planos ya antes mencionados. Las proyecciones de los perfiles sobre estos planos se muestran en el Anexo 4. Debido a que el ángulo de ataque al que se encuentre el perfil influye en la carga aerodinámica que este genera, se decidió utilizar diferentes ángulos de ataque basándose en las restricciones que permite el reglamento. Asimismo, como lo permite la geometría del volumen de referencia (Tabla IV.3). Los cuatro *flaps* que forman parte del alerón se unen en el extremo exterior para formar el *endplate*, este posee una forma parecida a lo que se conoce en aeronáutica a un *Winglet* tipo *Blended* [IV.3]. Las dimensiones del *endplate* diseñado para este alerón se especifican en el Anexo 4. A continuación, se muestra la propuesta ya totalmente terminada (Figura IV.5).

Tabla IV.3.- Ángulos de ataque máximos para los perfiles en el *MICC-75*

Elemento	Angulo de ataque
<i>Flap 1</i>	0°
<i>Flap 2</i>	5°
<i>Flap 3</i>	15°
<i>Flap 4</i>	22.5°

**Figura IV.5.-** Diseño conceptual del *MICC-75*

IV.3.2.- Análisis numérico aerodinámico [III.4 y III.5]

Para evaluación de esta propuesta se realizó una simulación de dinámica de fluidos sobre el alerón. Se utilizó el modelo sólido del alerón sin ningún componente estructural interno. Para realizar la simulación se utilizó la herramienta *Fluent* del programa computacional *ANSYS® Workbench*.

IV.3.2.1.- Módulo de geometría

Haciendo uso del módulo de geometría se exportó el modelo realizado en el programa de diseño *CAD*; de manera seguida se definieron las dimensiones del volumen de control, el cual manteniendo la uniformidad en los estudios de esta tesis es de las mismas dimensiones que los usados para el análisis de los antecedentes (Figura IV.6).

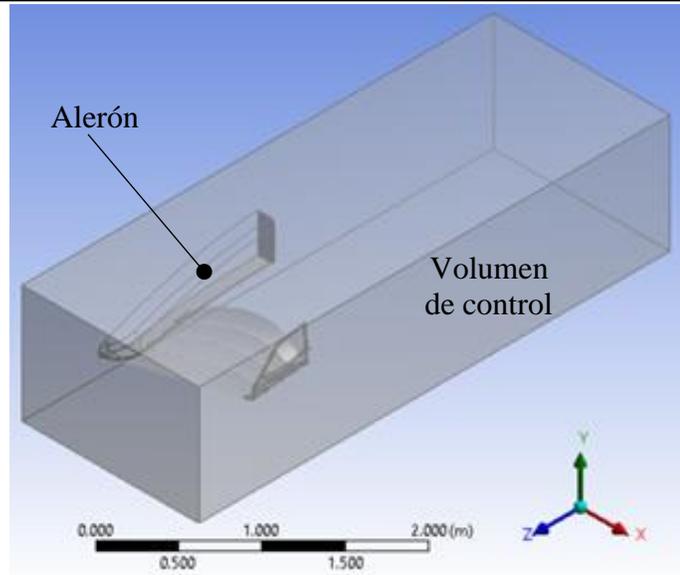


Figura IV.6.- Volumen de control

IV.3.2.2.- Método de discretizado

Se llevó a cabo el discretizado del modelo con parámetros de discretizado fino, controlado y con elementos de alto orden para poder obtener resultados más cercanos a la realidad. El resultado del proceso de discretizado se puede apreciar de la siguiente manera (Figura IV.7) [IV.6].

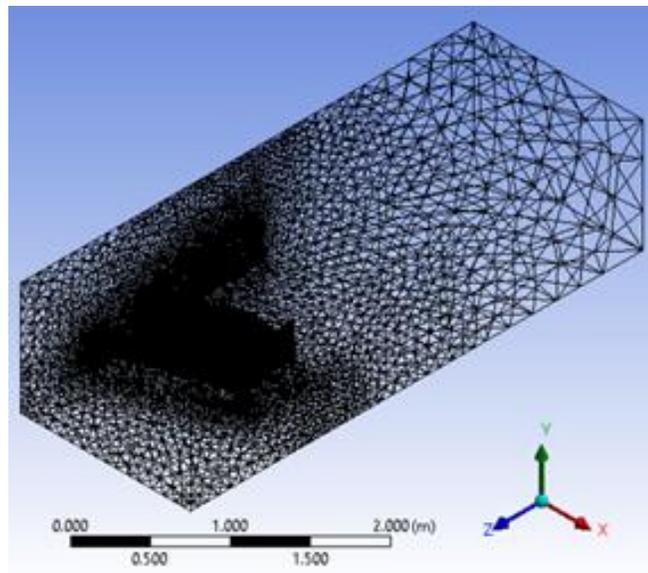


Figura IV.7.- Discretizado del alerón *MICC-75*

IV.3.2.3.- Aplicación de las condiciones de frontera [IV.7 y IV.8]

Dentro del módulo *setup* se definen los factores bajo los que estará sujeta la simulación. Para la velocidad de flujo del viento de igual manera que el resto de estudios realizados en esta tesis. Se utilizó una velocidad 325 km/h y una presión estática a la salida igual a cero. Posterior a definir las condiciones de frontera el volumen de control se puede visualizar de la siguiente manera (Figura IV.8).

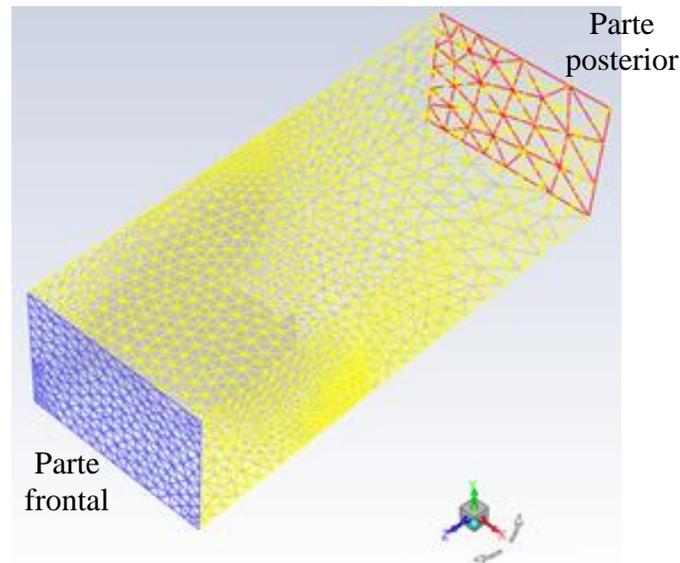


Figura IV.8.- Condiciones de frontera *MICC-75*

IV.3.2.4.- Solución numérica

Al igual que el resto de los análisis la cantidad de iteraciones para llegar a la solución en este módulo se estableció en 100. Este proceso es llevado a cabo por el programa computacional.

IV.3.2.5.- Resultados de la evaluación numérica aerodinámica

En esta sección se puede visualizar los resultados del estudio de manera gráfica. Estos resultados se presentan a continuación.

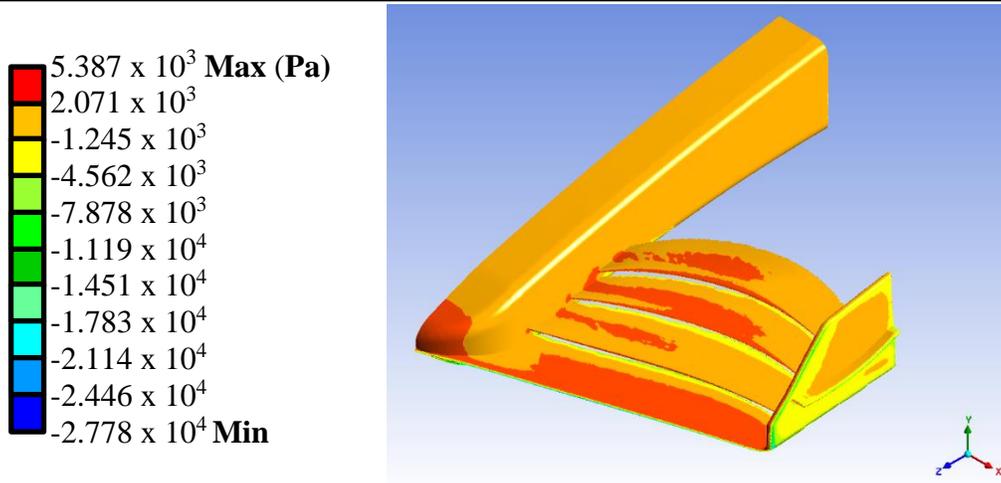


Figura IV.9.- Vista general de la presión sobre el alerón *MICC-75*

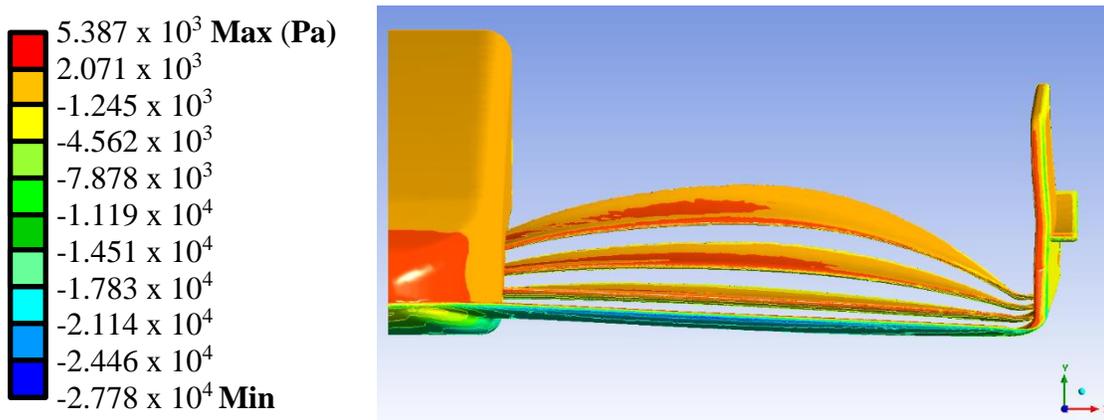


Figura IV.10.- Vista frontal de la presión sobre el alerón *MICC-75*

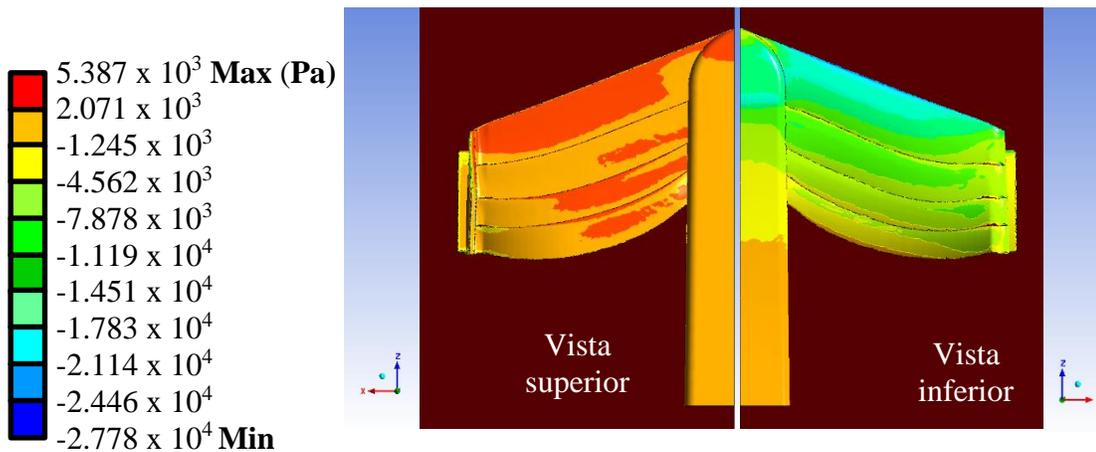


Figura IV.11.- Vista superior e inferior de la presión sobre el alerón *MICC-75*

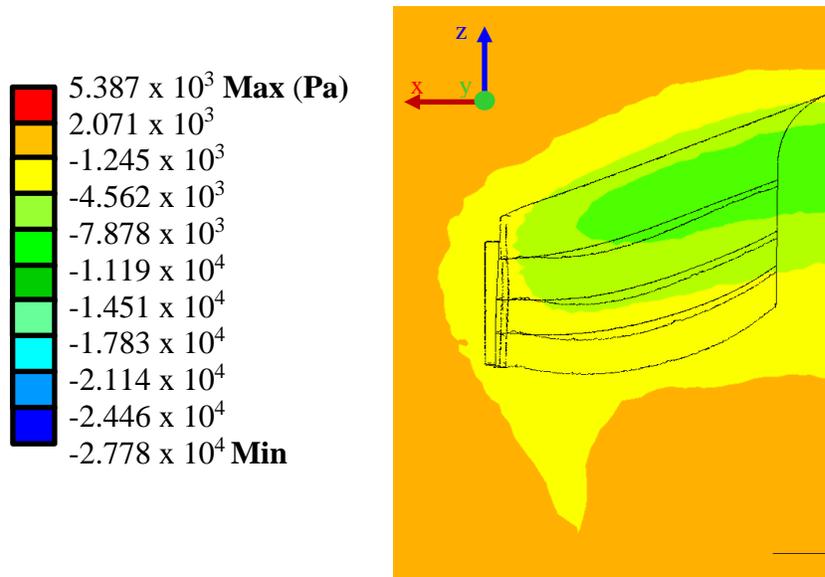


Figura IV.12.- Vista superior de la presión ejercida sobre el suelo del alerón *MICC-75*

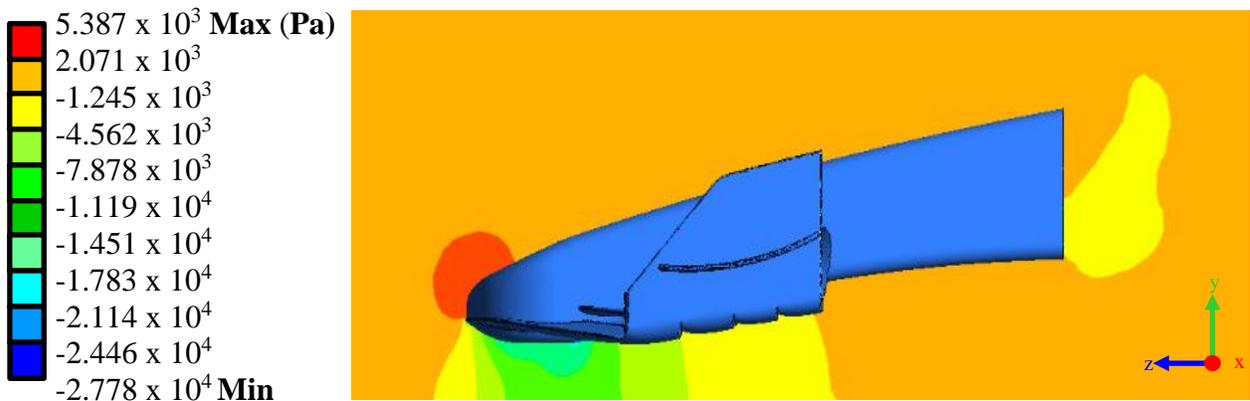


Figura IV.13.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *MICC-75* sobre el plano medio

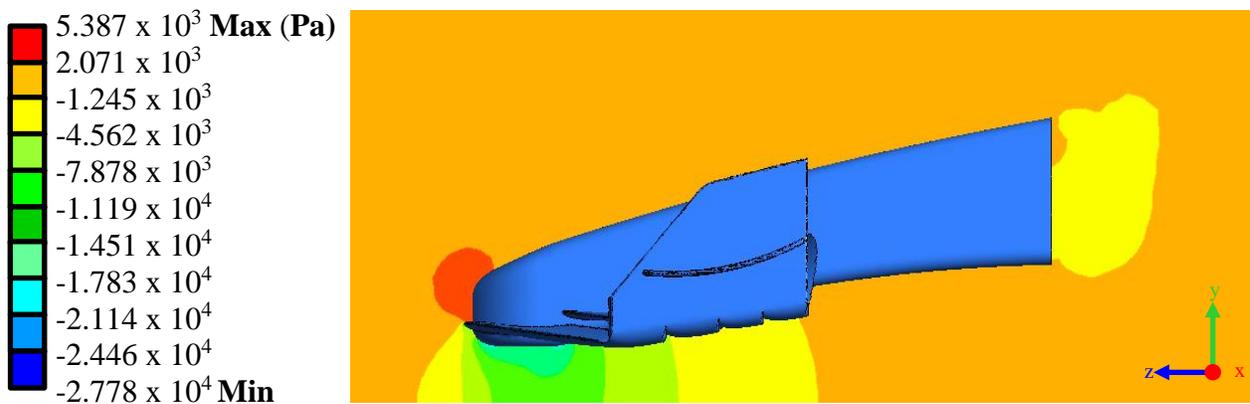


Figura IV.14.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *MICC-75* a 100 mm del plano medio

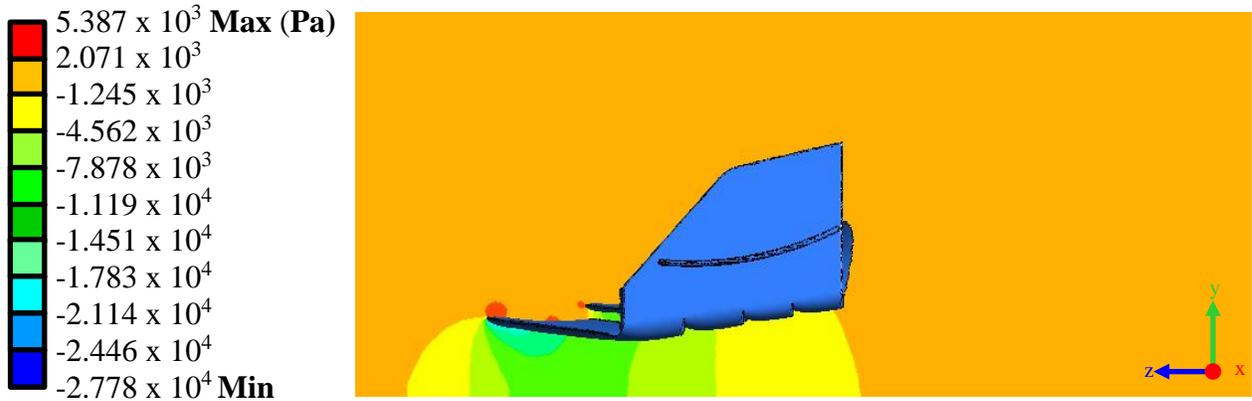


Figura IV.15.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *MICC-75* a 250 mm del plano medio

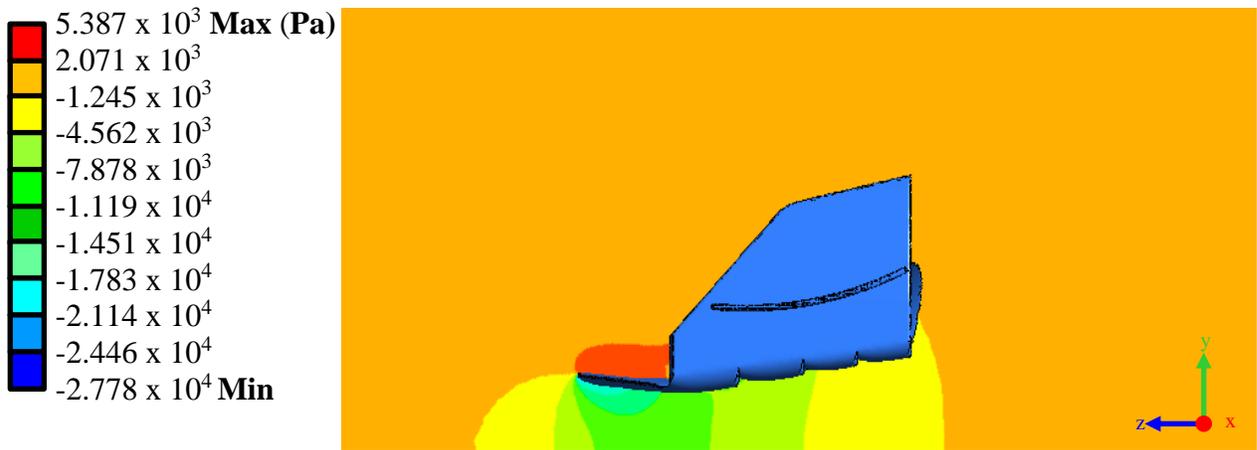


Figura IV.16.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *MICC-75* a 500 mm del plano medio

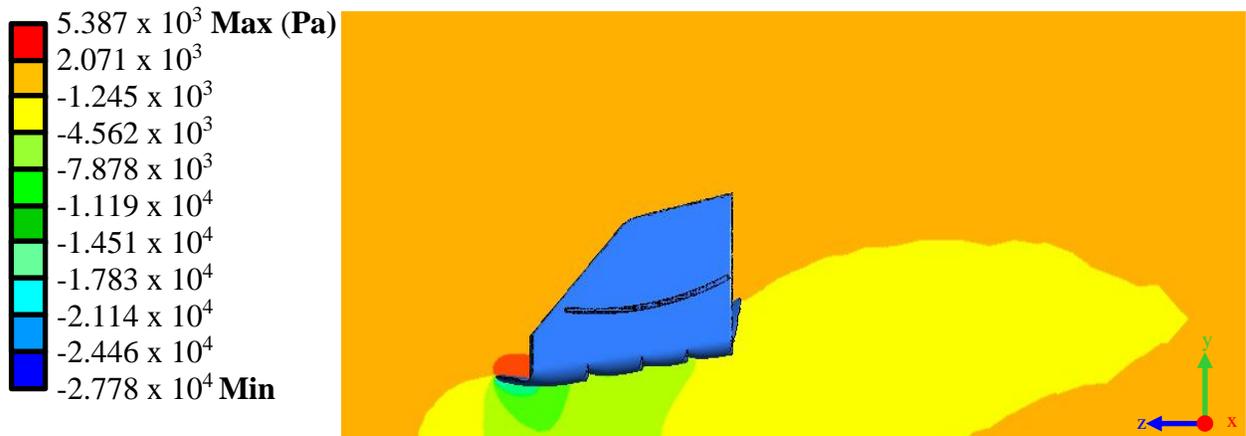


Figura IV.17.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *MICC-75* a 750 mm del plano medio

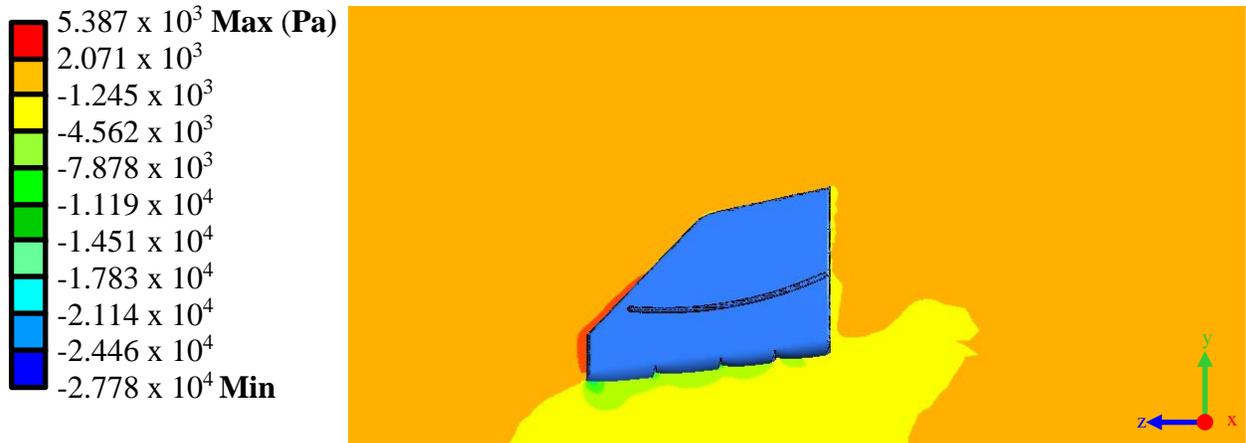


Figura IV.18.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *MICC-75* a 950 mm del plano medio

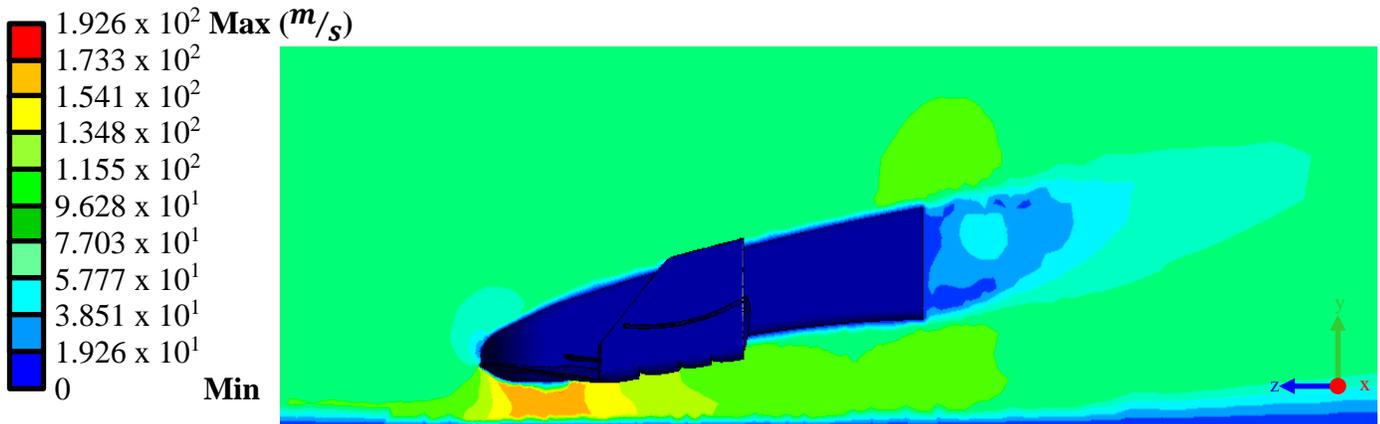


Figura IV.19.- Velocidad del viento sobre alerón *MICC-75* en plano medio del alerón

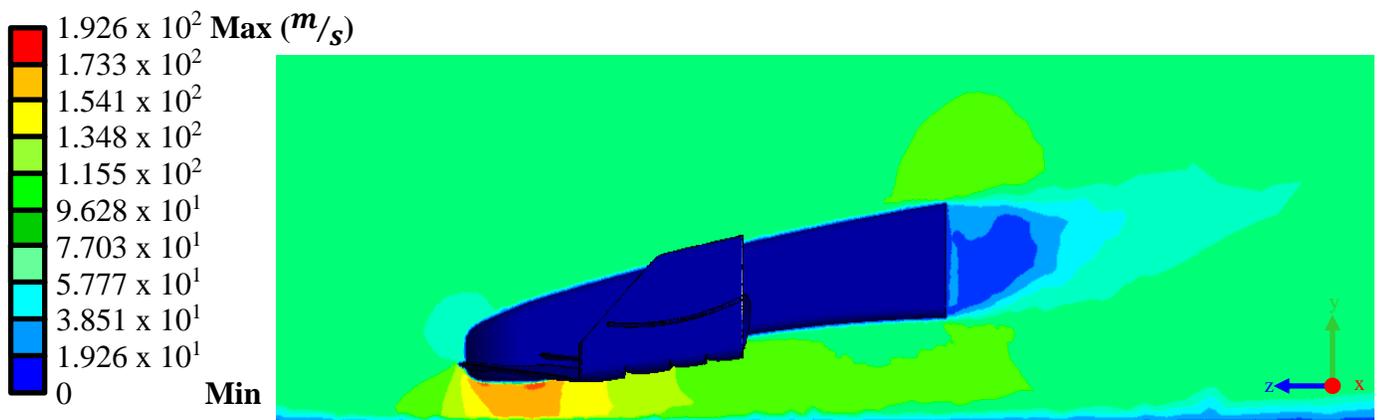


Figura IV.20.- Velocidad del viento sobre alerón *MICC-75* a 100 mm del plano medio del alerón



Figura IV.21.- Velocidad del viento sobre alerón *MICC-75* a 250 mm del plano medio del alerón

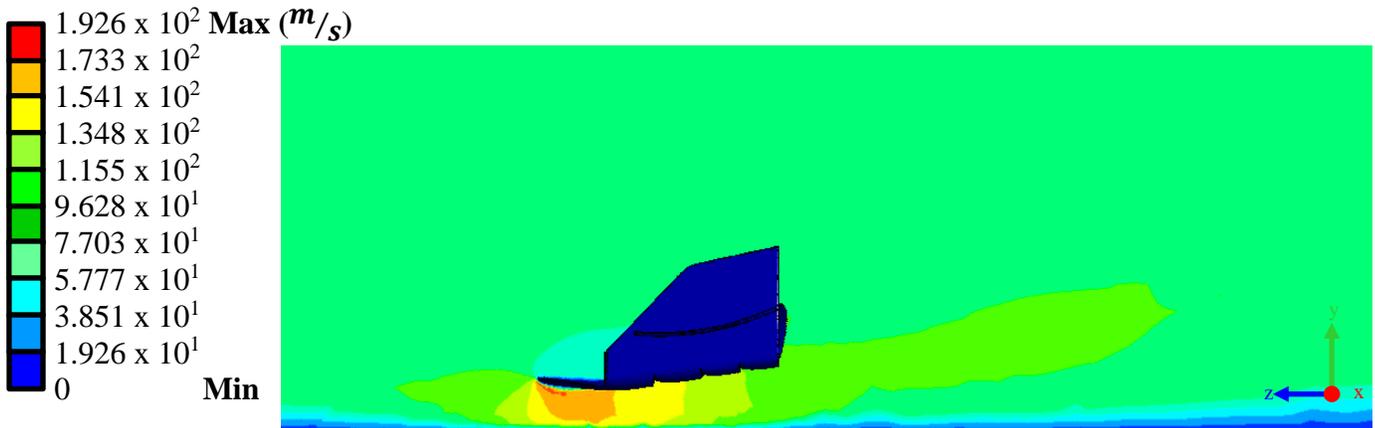


Figura IV.22.- Velocidad del viento sobre alerón *MICC-75* a 500 mm del plano medio del alerón

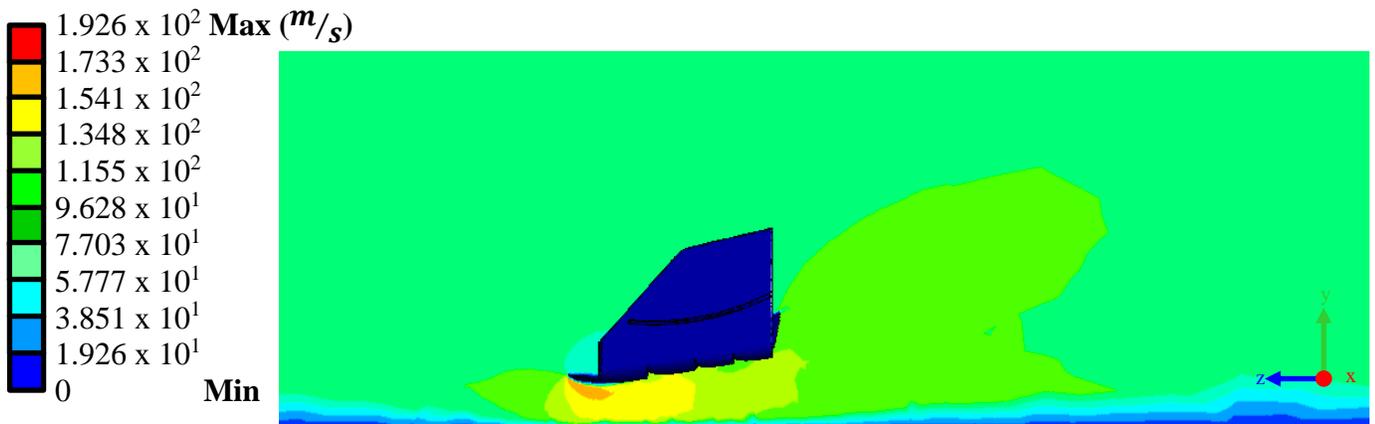


Figura IV.23.- Velocidad del viento sobre alerón *MICC-75* a 750 mm del plano medio del alerón

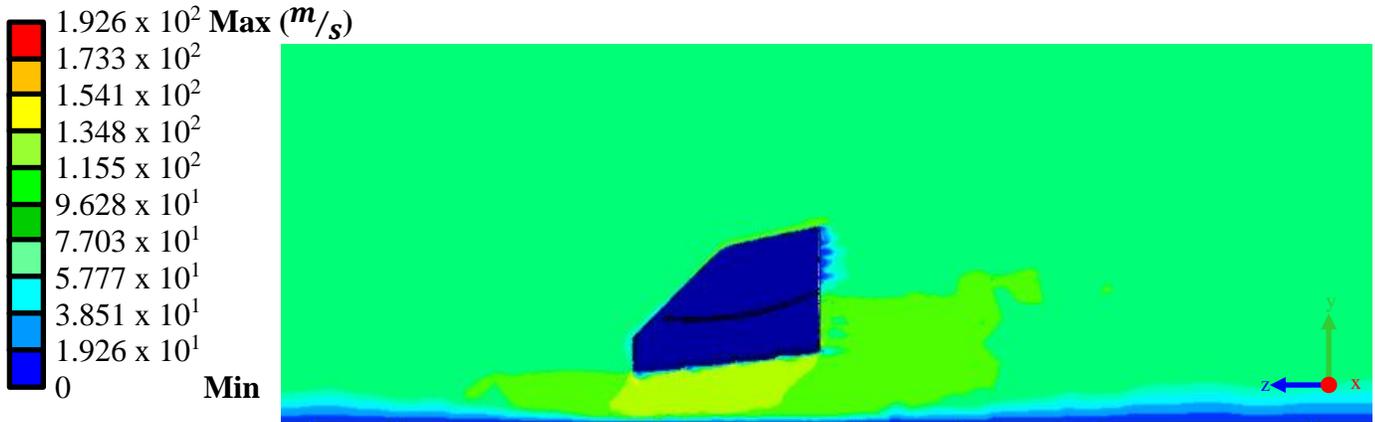


Figura IV.24.- Velocidad del viento sobre alerón *MICC-75* a 950 mm del plano medio del alerón

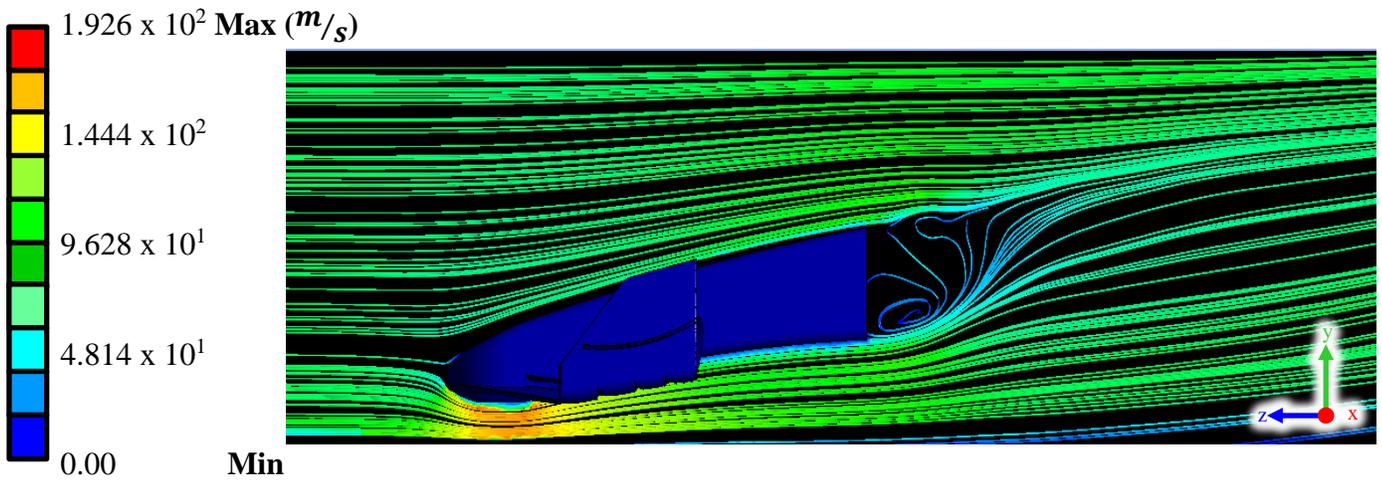


Figura IV.25.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *MICC-75* sobre plano medio

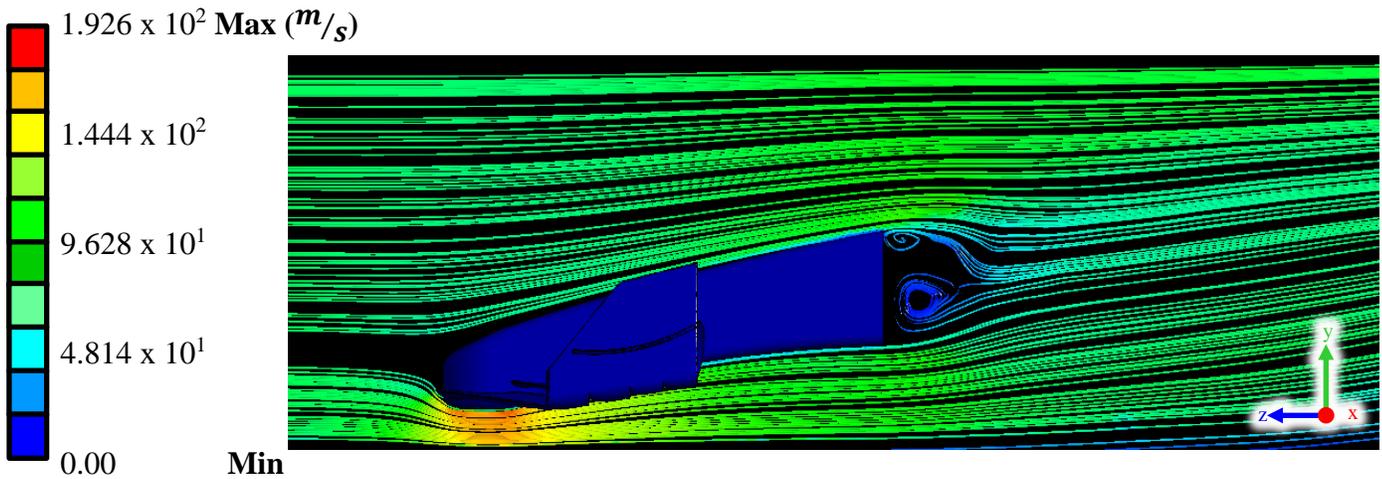


Figura IV.26.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *MICC-75* a 100 mm sobre plano medio

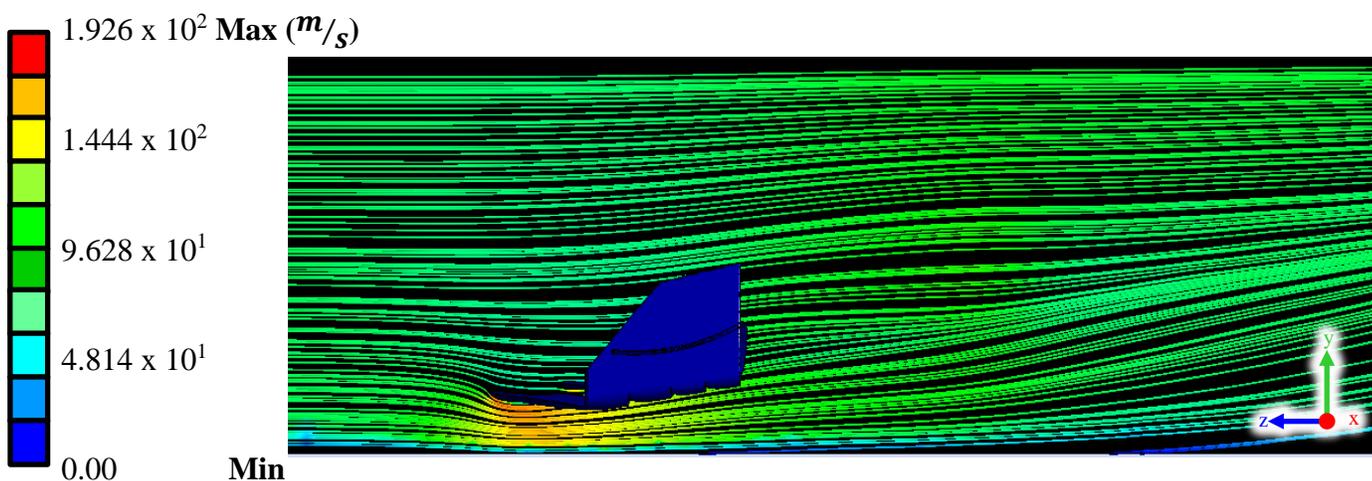


Figura IV.27.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *MICC-75* a 250 mm sobre plano medio

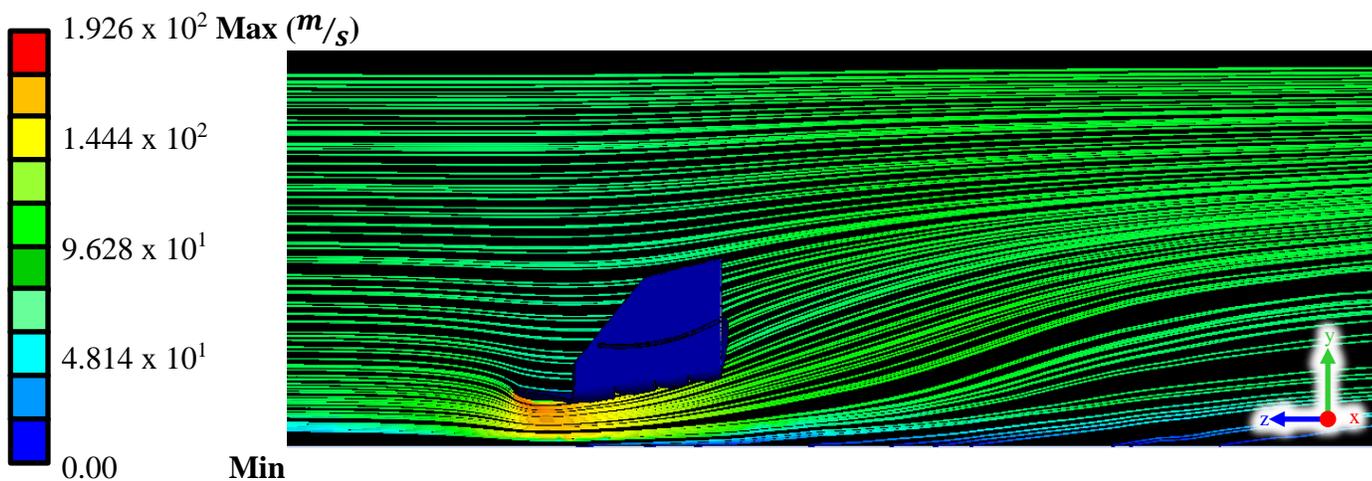


Figura IV.28.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *MICC-75* a 500 mm sobre plano medio

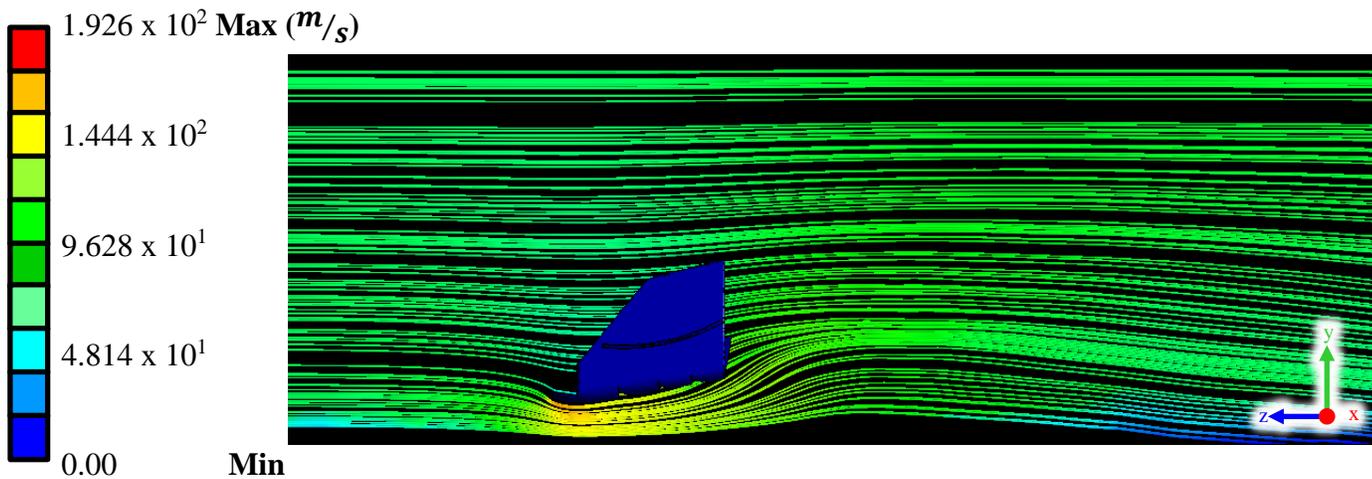


Figura IV.29.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *MICC-75* a 750 mm sobre plano medio

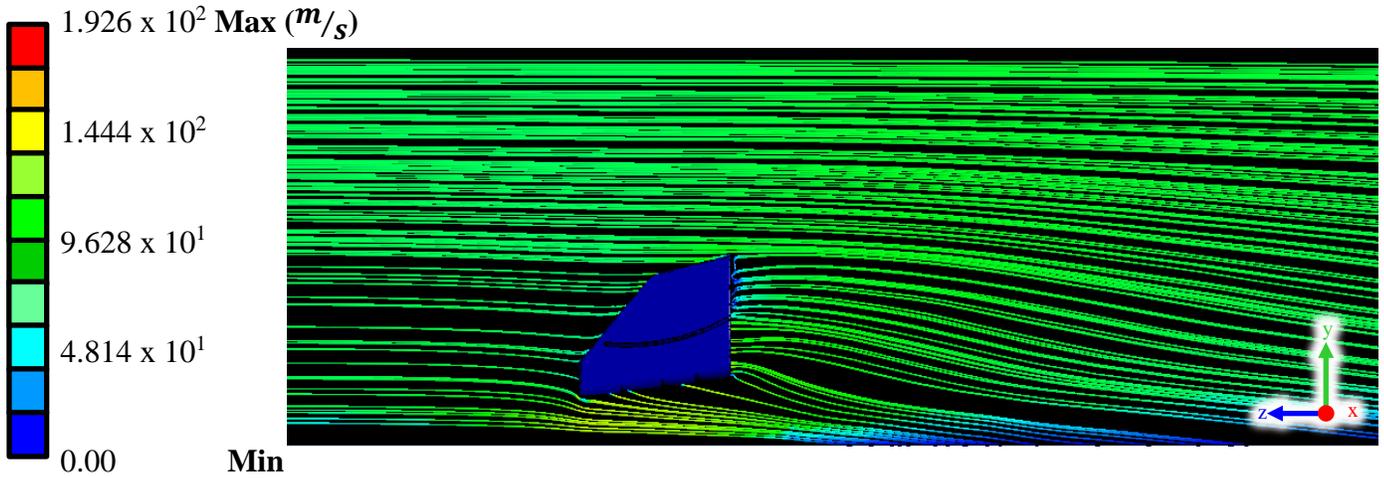


Figura IV.30.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *MICC-75* a 950 mm sobre plano medio

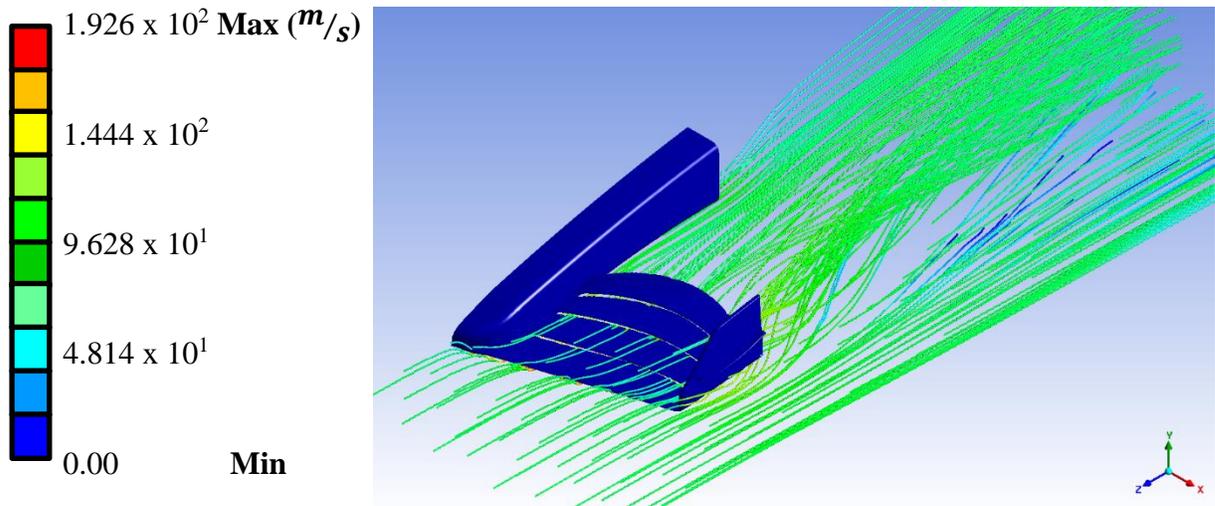


Figura IV.31.- Flujo de vórtice alrededor del alerón *MICC-75*

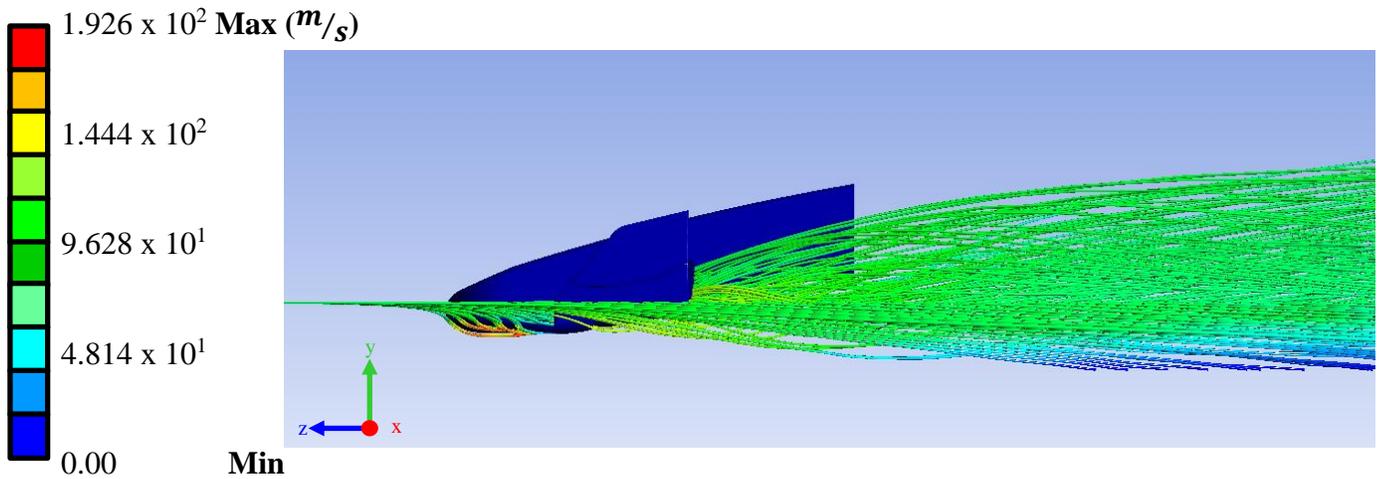


Figura IV.32.- Vista lateral del flujo de vórtice alrededor del alerón *MICC-75*

El módulo de resultados ofrece el cálculo total de fuerzas que actúan sobre el alerón, con esto se puede conocer la magnitud de las fuerzas tanto *Downforce* como de arrastre, las cuales servirán para poder realizar una comparación entre los diferentes cuerpos de estudio.

Tabla IV.4.- Fuerzas sobre el alerón *MICC-75*

Fuerza	Magnitud
<i>Downforce</i>	5773.54 N
Arrastre	495.789 N

IV.3.3.- Acoplamiento multi-físico

Utilizando el módulo *System Coupling* del software *ANSYS® Workbench* se conecta el *setup* de *fluent* y el *setup* de *Static structural* para transferir los datos de las cargas que generan las presiones del aire sobre el alerón *MICC-75* para así poder desarrollar un análisis estructural y obtener los resultados correspondientes (Figura IV.33).

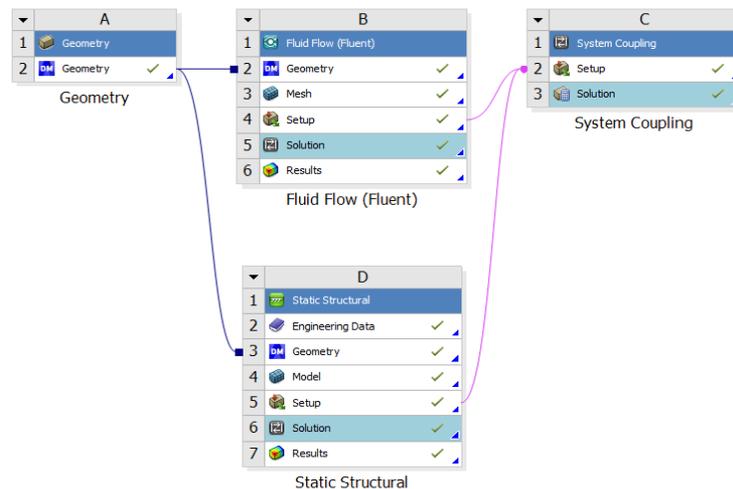


Figura IV.33.- Acoplamiento multi-físico para el *MICC-75*

IV.3.4.- Análisis numérico estático estructural [IV.9]

Para evaluación de esta propuesta se realizó igualmente una simulación estática estructural sobre el alerón. Para realizar la simulación se utilizó la herramienta *Static Structural* del programa computacional *ANSYS® Workbench*.

IV.3.4.1.- Módulo de geometría

Al igual que en módulo de geometría para el análisis aerodinámico; en este módulo sirve para exportar la geometría del alerón desde el programa de diseño CAD (Figura IV.34), y definir las

superficies de contacto con el aire en las que entran en juego las cargas generadas por efecto de las presiones exteriores sobre el alerón. Debido a que la construcción del alerón se lleva a cabo moldeando la fibra de carbono hasta alcanzar la forma necesaria, este no cuenta con componentes internos como largueros o costillas a diferencia de las alas convencionales de aeronaves.

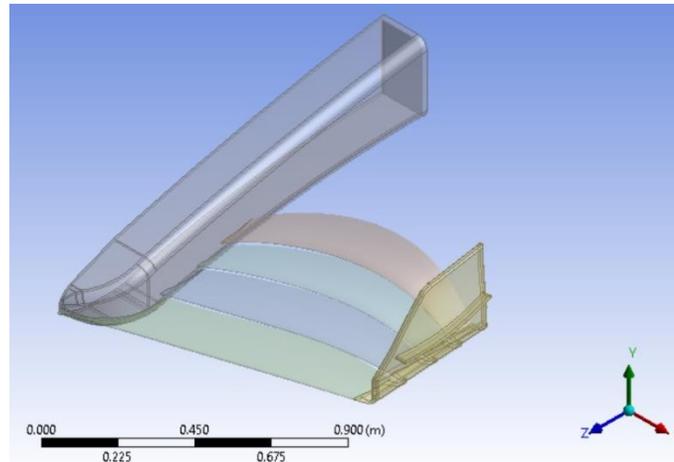


Figura IV.34.- Geometría del *MICC-75* en *Static Structural*

IV.3.4.2.- Método de discretizado

El modelo del alerón *MICC-75* se discretizó con parámetros de discretizado fino, controlado y con elementos de alto orden para poder obtener resultados más cercanos a la realidad. El resultado del proceso de discretizado se puede apreciar de la siguiente manera (Figura IV.35) [IV.6].

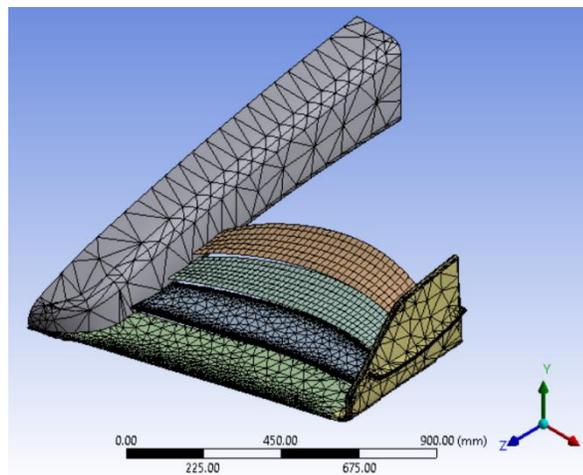


Figura IV.35.- Discretizado del alerón *MICC-75*

IV.3.4.3.- Aplicación de las condiciones de frontera [IV.7 y IV.9]

Para la aplicación de las condiciones de frontera es necesario definir el material del que está constituido el alerón; se seleccionó el tejido de Fibra de carbono Hexcel HM63 de 12 000 filamentos, las propiedades físicas de este material se especifican en la Tabla IV.5; mismo material fue empleado en las demás propuestas presentadas en este trabajo.

Tabla IV.5.- Especificaciones de la fibra de carbono

Hexcel HM63 (12K)			
Densidad (g/cm ³)	1.83	Diámetro del Filamento (micras)	4.9
Limite Elástico (MPa)	4826	Conductividad térmica (W/m·°K)	55
Limite a la Fractura (GPa)	435	Contenido de Carbón	99%
Relación de <i>Poisson</i>	0.2		

Después de definir el material del que está constituido el alerón es necesario colocar las restricciones de movimiento, para este caso en particular se colocó un apoyo fijo en el extremo de la nariz que se encuentran unida al resto del monoplaza. Posterior a definir las condiciones de frontera el alerón se puede visualizar de la siguiente manera (Figura IV.36).

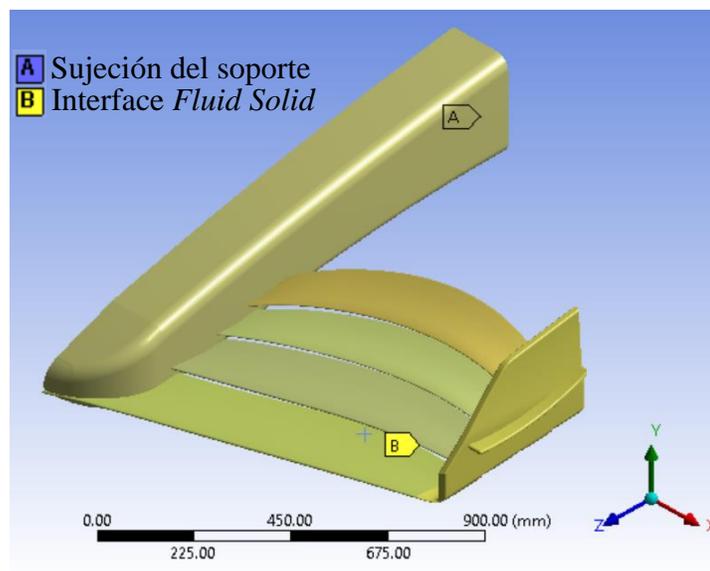


Figura IV.36.- Condiciones de frontera del *MICC-75*

IV.3.4.4.- Resultados de la evaluación numérica estática estructural

En esta sección se puede visualizar los resultados del estudio de manera gráfica, los cuales incluyen resultados de desplazamientos (generales y nominales), deformaciones unitarias y esfuerzos (falla (Von Mises y cortantes), nominales y principales (máximos y mínimos)).

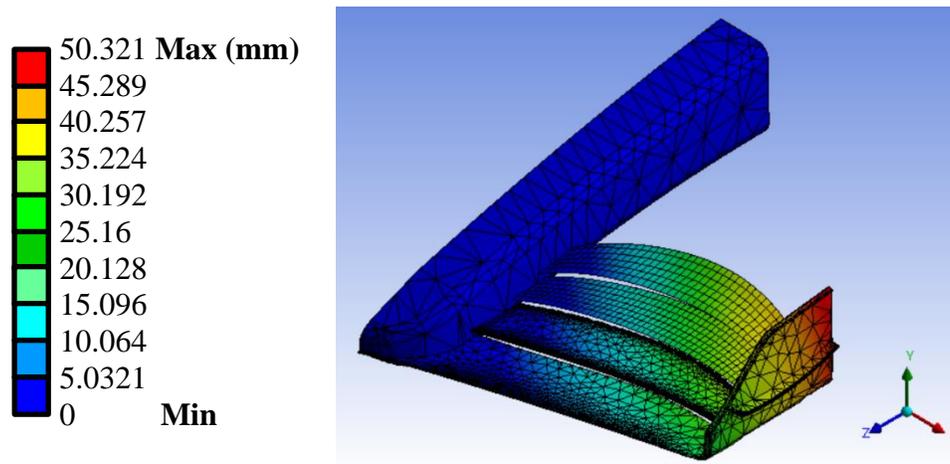


Figura IV.37.- Desplazamientos totales en el *MICC-75* (Vista isométrica)

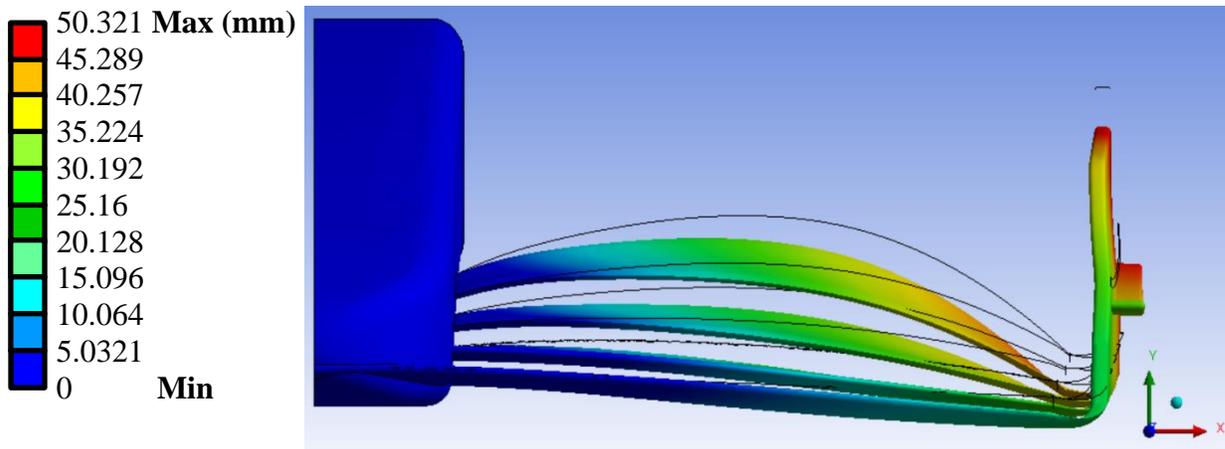


Figura IV.38.- Desplazamientos totales en el *MICC-75* desde la vista frontal (la silueta en negro es la figura del alerón antes de deformarse)

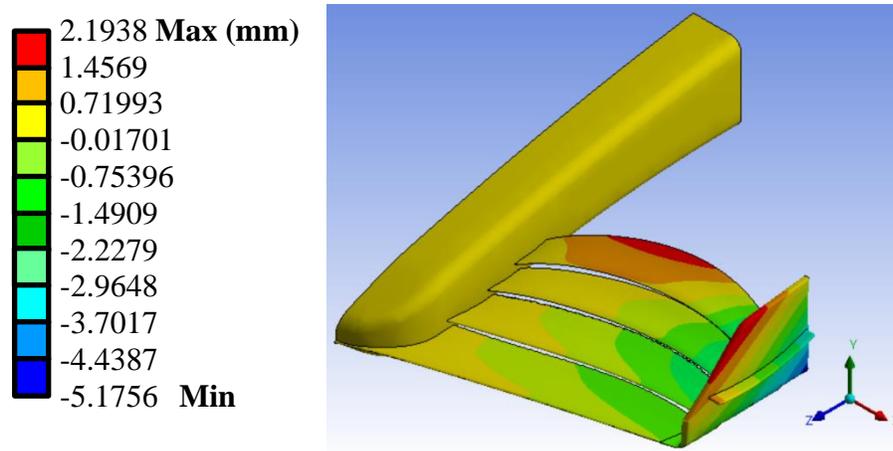


Figura IV.39.- Desplazamientos nominales del eje X en el *MICC-75* (Vista isométrica)

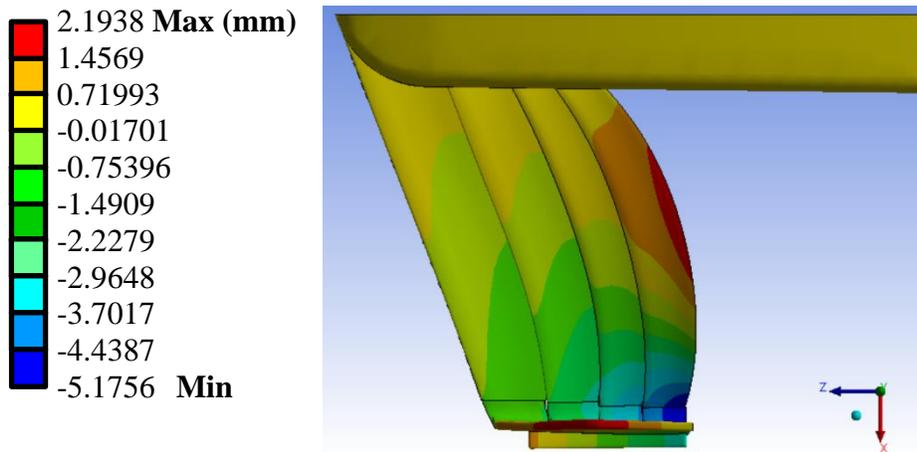


Figura IV.40.- Desplazamientos nominales del eje X en el *MICC-75* (Vista superior)

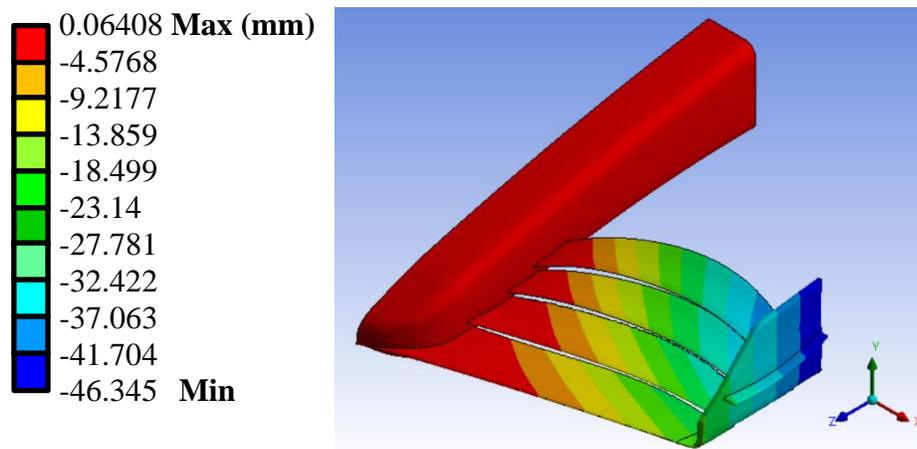


Figura IV.41.- Desplazamientos nominales del eje Y en el *MICC-75* (Vista isométrica)

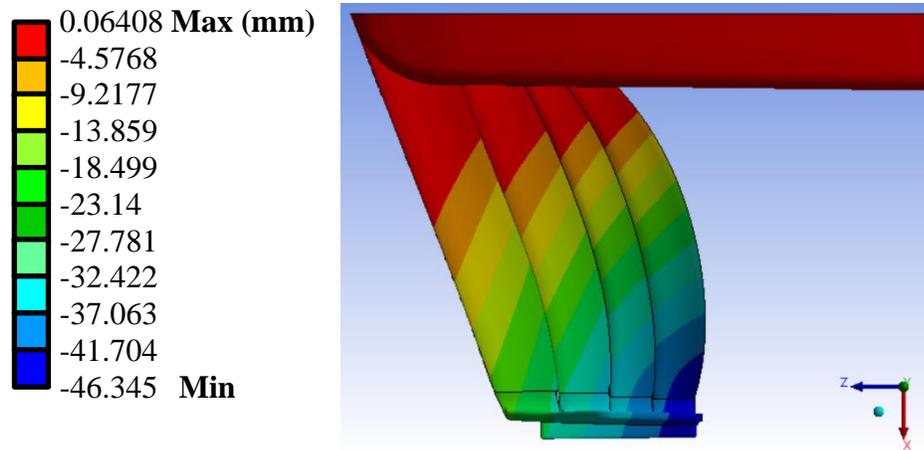


Figura IV.42.- Desplazamientos nominales del eje Y en el MICC-75 (Vista superior)

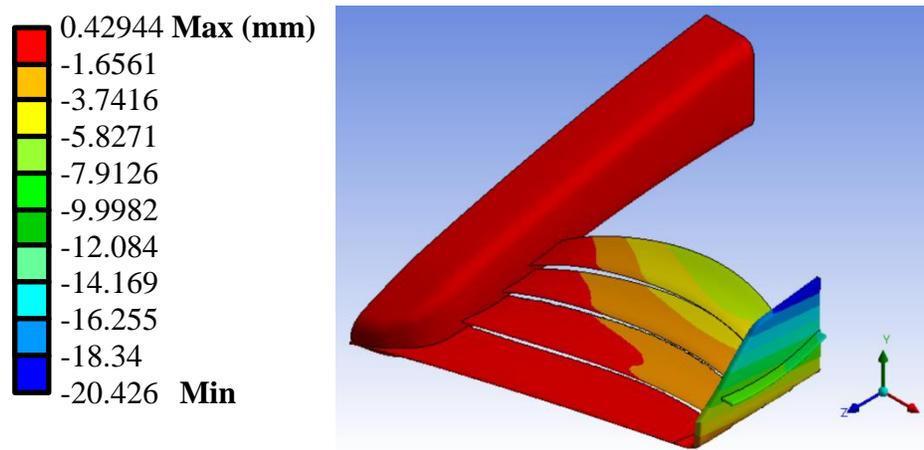


Figura IV.43.- Desplazamientos nominales del eje Z en el MICC-75 (Vista isométrica)

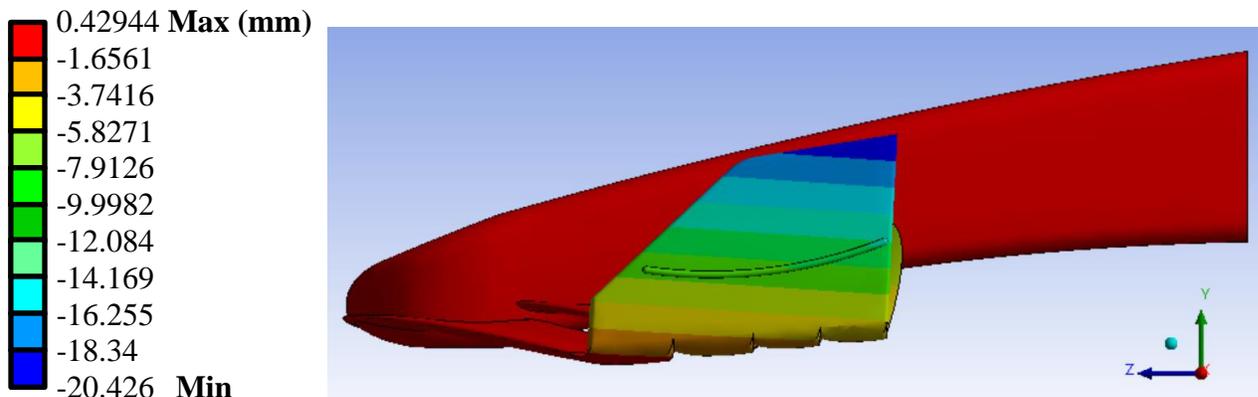


Figura IV.44.- Desplazamientos nominales del eje Z en el MICC-75 (Vista lateral)

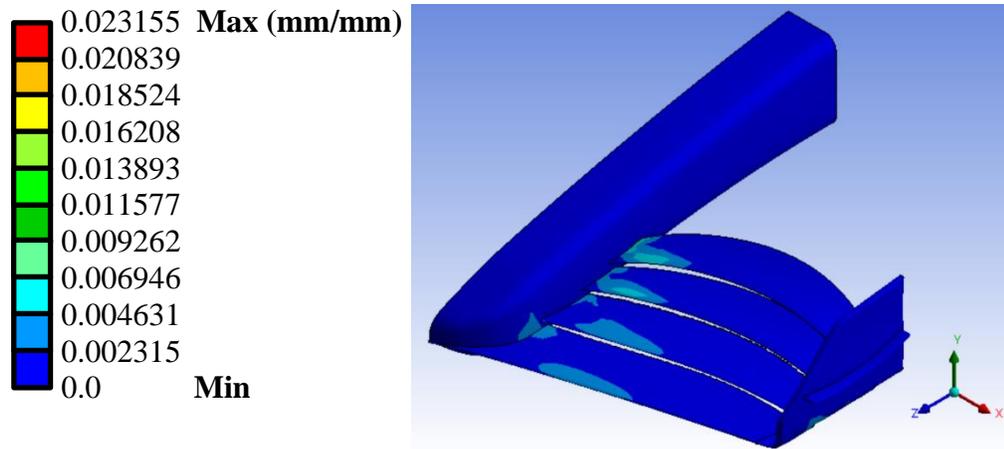


Figura IV.45.- Deformaciones unitarias totales en el *MICC-75* (Vista isométrica)

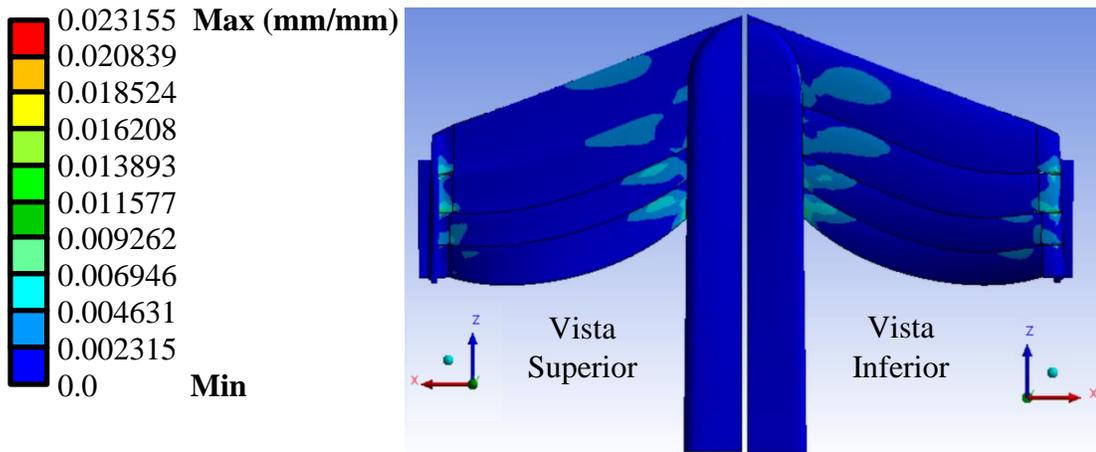


Figura IV.46.- Deformaciones unitarias totales en el *MICC-75* (Vista superior e inferior)

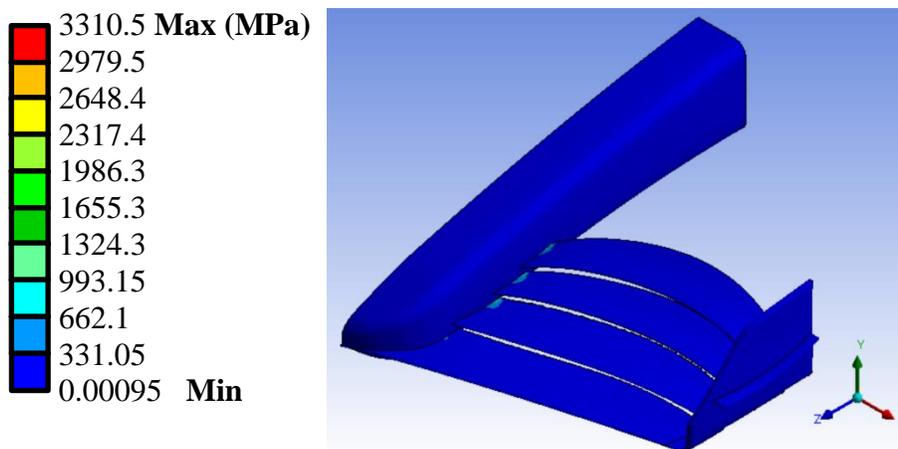


Figura IV.47.- Esfuerzos equivalentes *Von Mises* en el *MICC-75* (Vista isométrica)

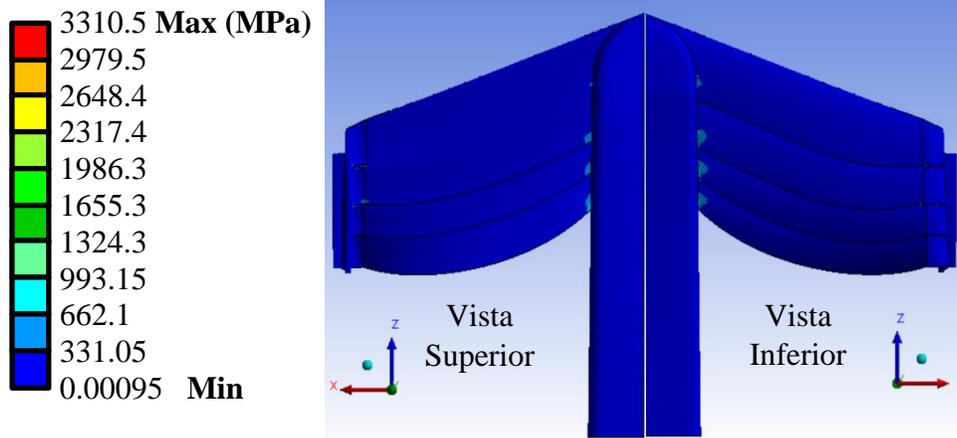


Figura IV.48.- Esfuerzos equivalentes *Von Mises* en el MICC-75 (Vista superior e inferior)

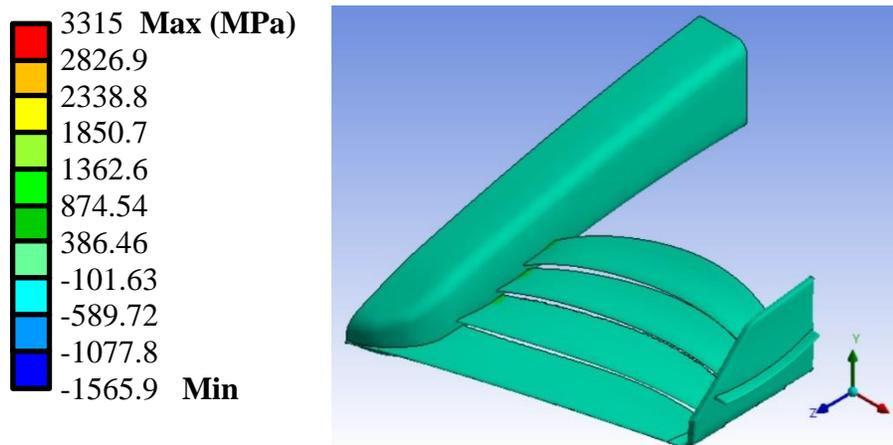


Figura IV.49.- Esfuerzos nominales en el eje X en el MICC-75 (Vista isométrica)

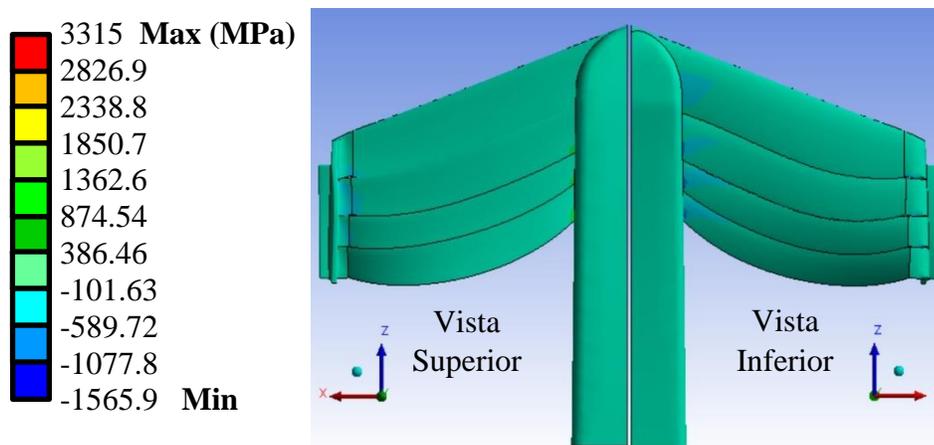


Figura IV.50.- Esfuerzos nominales en el eje X en el MICC-75 (Vista superior e inferior)

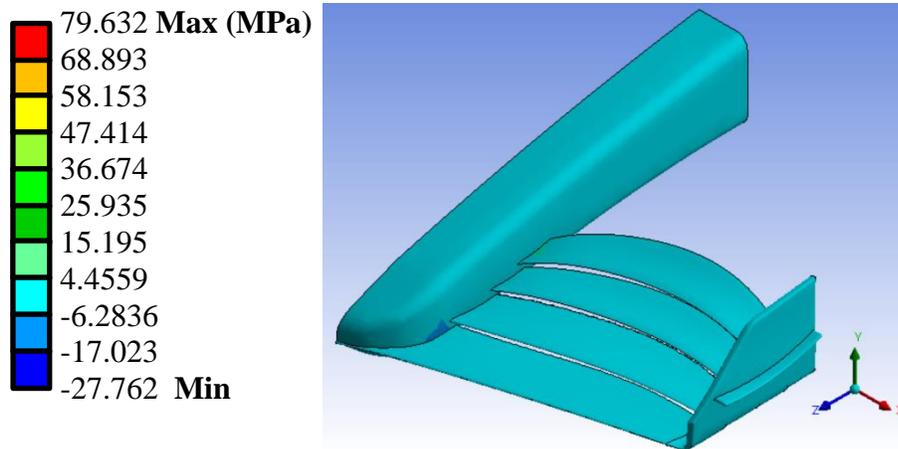


Figura IV.51.- Esfuerzos nominales en el eje Y en el *MICC-75* (Vista isométrica)

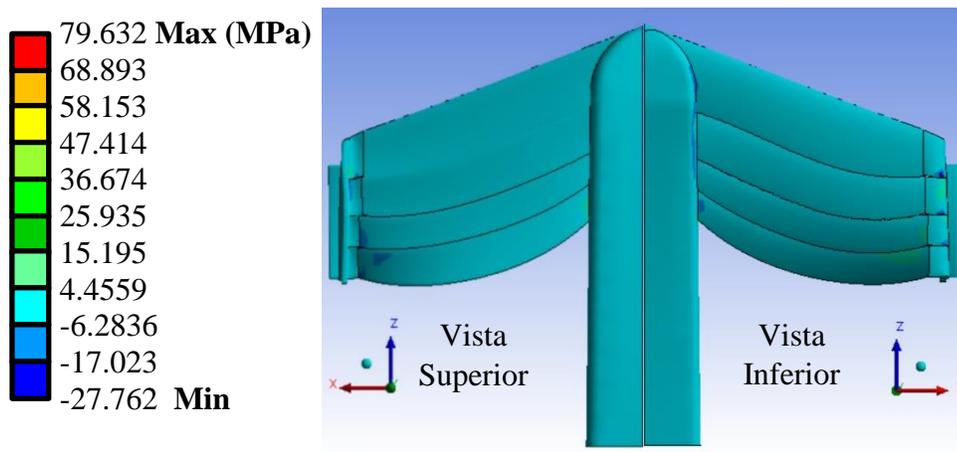


Figura IV.52.- Esfuerzos nominales en el eje Y en el *MICC-75* (Vista superior e inferior)

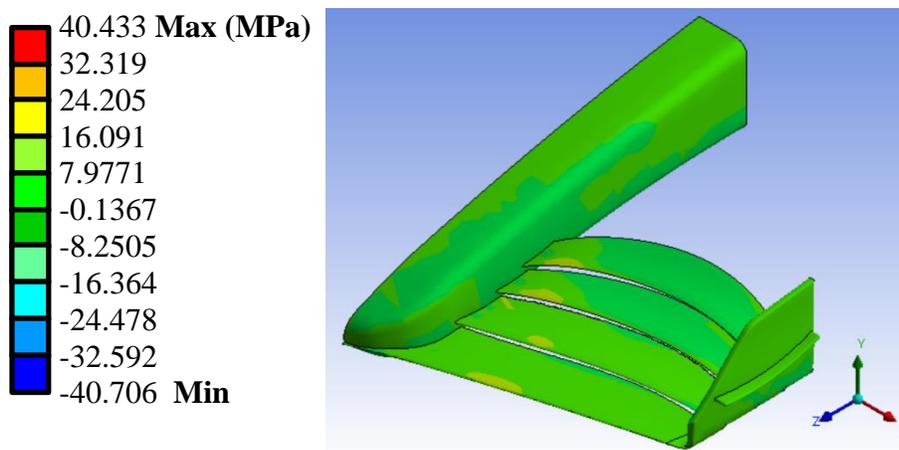


Figura IV.53.- Esfuerzos nominales en el eje Z en el *MICC-75* (Vista isométrica)

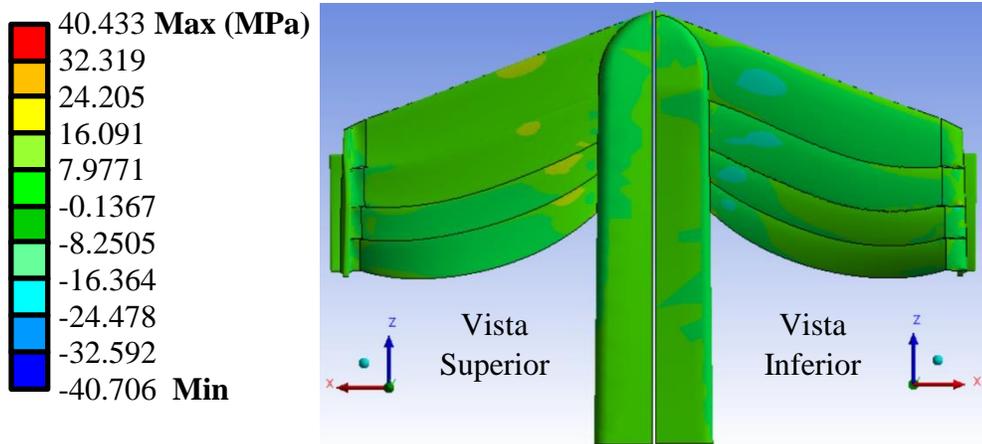


Figura IV.54.- Esfuerzos nominales en el eje Z en el MICC-75 (Vista superior e inferior)

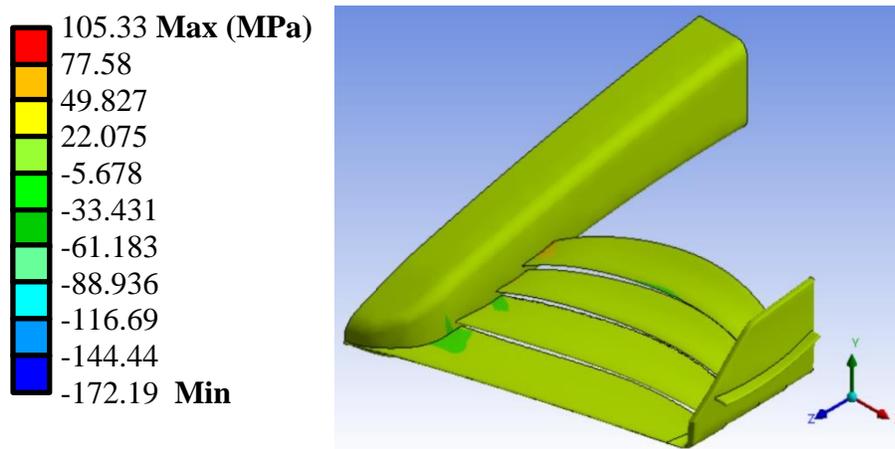


Figura IV.55.- Esfuerzos cortantes en el plano XY en el MICC-75 (Vista isométrica)

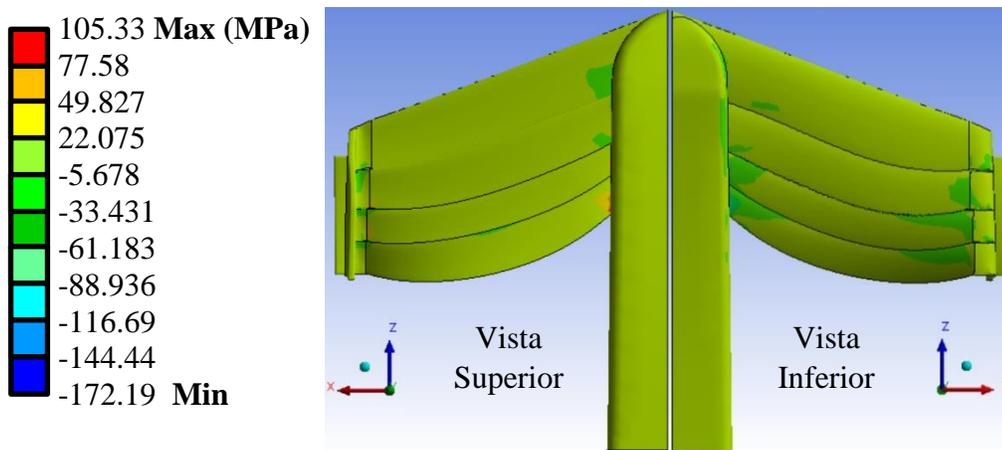


Figura IV.56.- Esfuerzos cortantes en el plano XY en el MICC-75 (Vista superior e inferior)

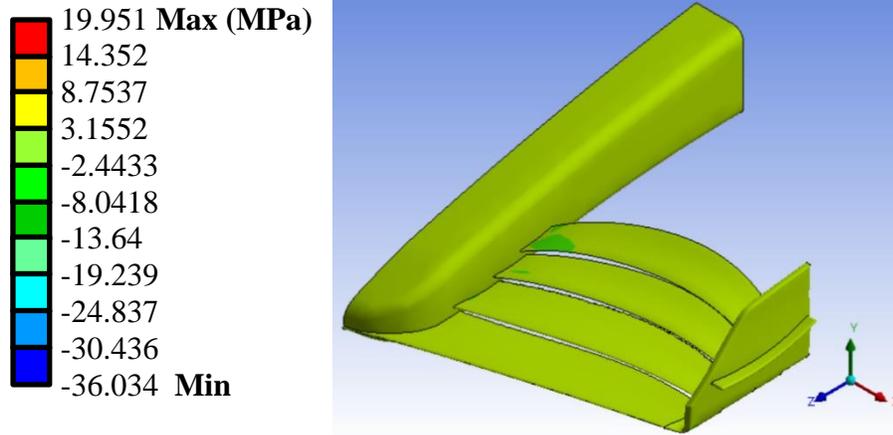


Figura IV.57.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en el *MICC-75* (Vista isométrica)

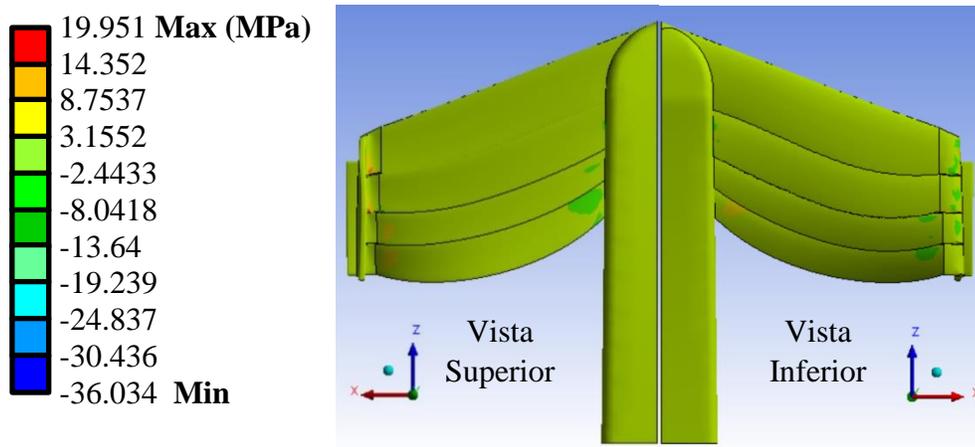


Figura IV.58.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en el *MICC-75* (Vista superior e inferior)

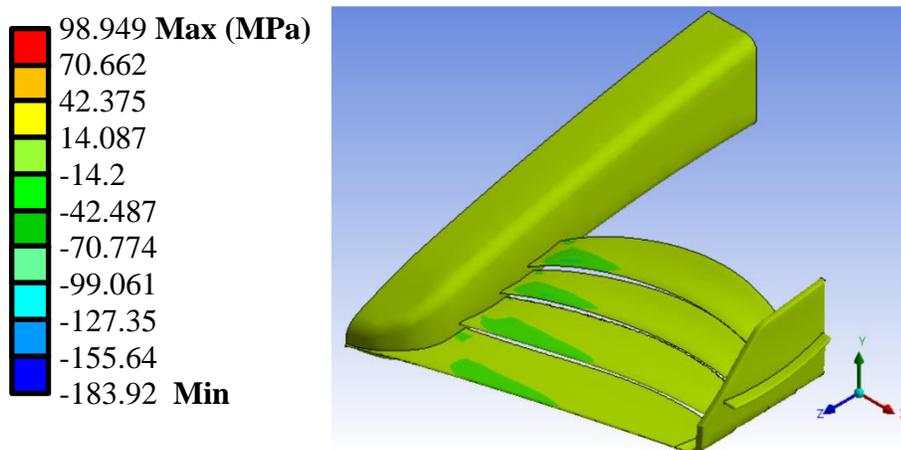


Figura IV.59.- Esfuerzos cortantes en el plano XZ en el *MICC-75* (Vista isométrica)

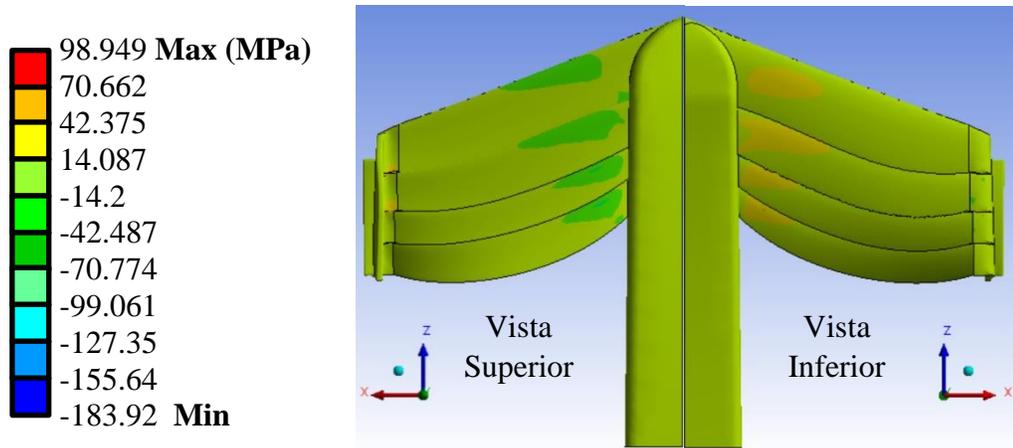


Figura IV.60.- Esfuerzos cortantes en el plano XZ en el MICC-75 (Vista superior e inferior)

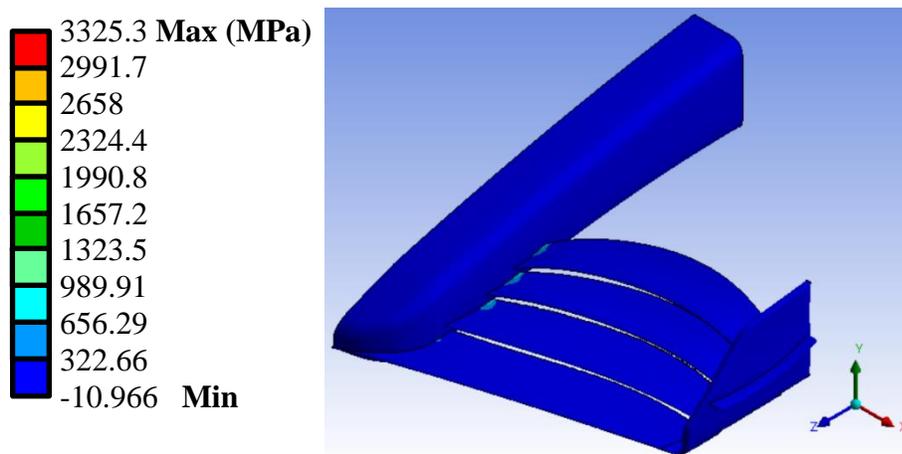


Figura IV.61.- Esfuerzos principales máximos en el MICC-75 (Vista isométrica)

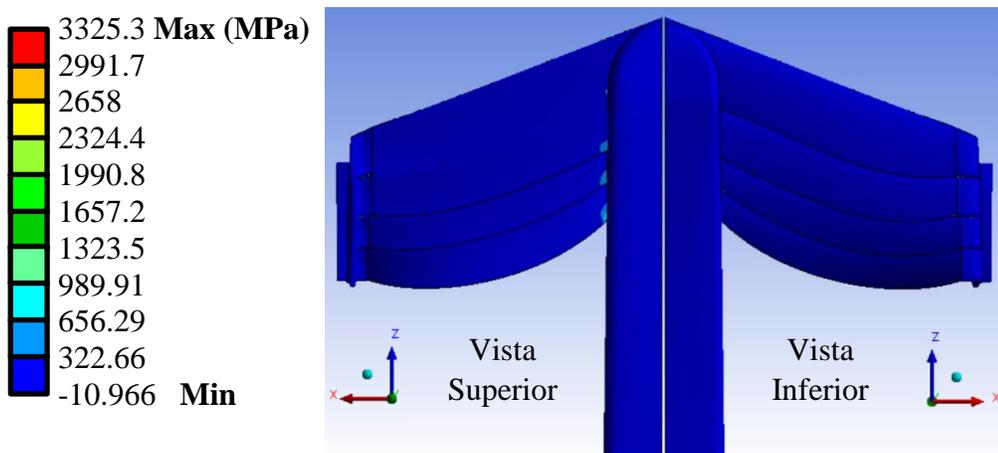


Figura IV.62.- Esfuerzos principales máximos en el MICC-75 (Vista superior e inferior)

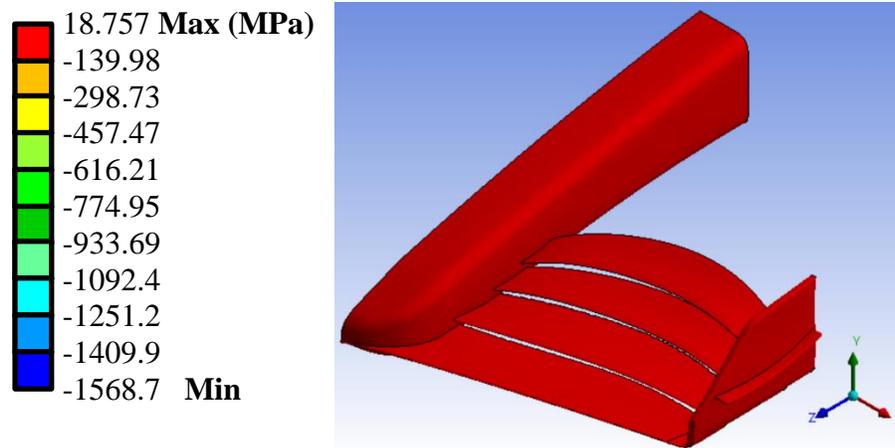


Figura IV.63.- Esfuerzos principales mínimos en el MICC-75 (Vista isométrica)

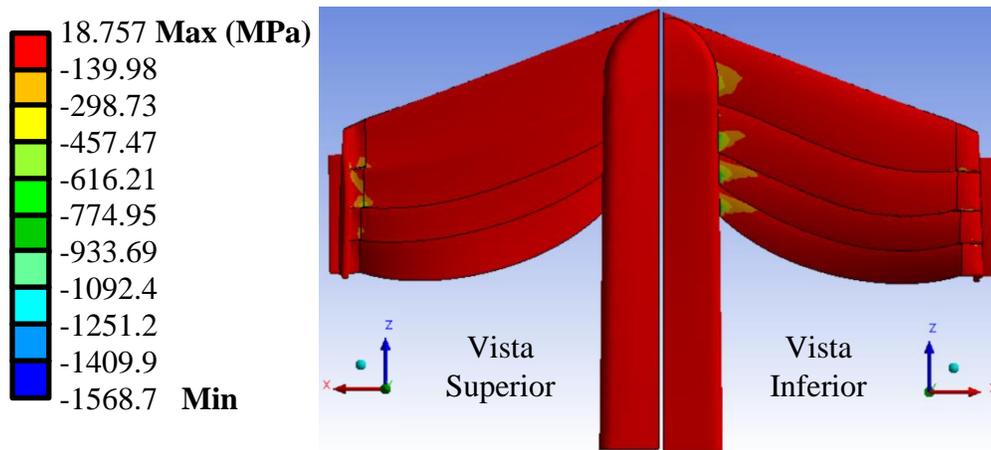


Figura IV.64.- Esfuerzos principales mínimos en el MICC-75 (Vista superior e inferior)

Tabla IV.6.- Resultados del análisis estático estructural

Resultados del MICC-75		
Desplazamiento total máximo	50.321 mm	
Desplazamientos nominales		
Eje:	Máximo	Mínimo
X	2.1938 mm	-5.1756 mm
Y	0.06408 mm	-46.345 mm

Z	0.4294 mm	-20.426 mm
Deformaciones unitarias totales	0.023155 mm/mm	
Esfuerzos equivalentes de Von-Mises	Max - 3310.5 MPa	
Esfuerzos nominales		
Eje:	Máximo	Mínimo
X	3315 MPa	-1565.9 MPa
Y	79.632 MPa	-27.762 MPa
Z	40.433 MPa	-40.706 MPa
Esfuerzos cortantes		
Plano:	Máximo	Mínimo
XY	105.33 MPa	-172.19 MPa
YZ	19.951 MPa	-36.034 MPa
XZ	98.949 MPa	-183.92 MPa
Esfuerzos principales máximos	Máximo	Mínimo
	3325.3 MPa	-10.966 MPa
Esfuerzos principales mínimos	Máximo	Mínimo
	18.757 MPa	-1568.7 MPa

IV.4.- Propuesta 2; CLV-54

Con los resultados obtenidos del capítulo anterior y los resultados de la propuesta anterior se presenta esta segunda propuesta.

IV.4.1.- Implementación del modelo

Para el diseño de la segunda propuesta (Figura IV.65) se decidió partir del uso de un perfil *ISA-960*; para obtener las coordenadas de este perfil se utilizó la herramienta digital *Airfoil Tools* [IV.2]. Las coordenadas que definen la geometría de este perfil se encuentran en el Anexo 5 (Figura IV.66).

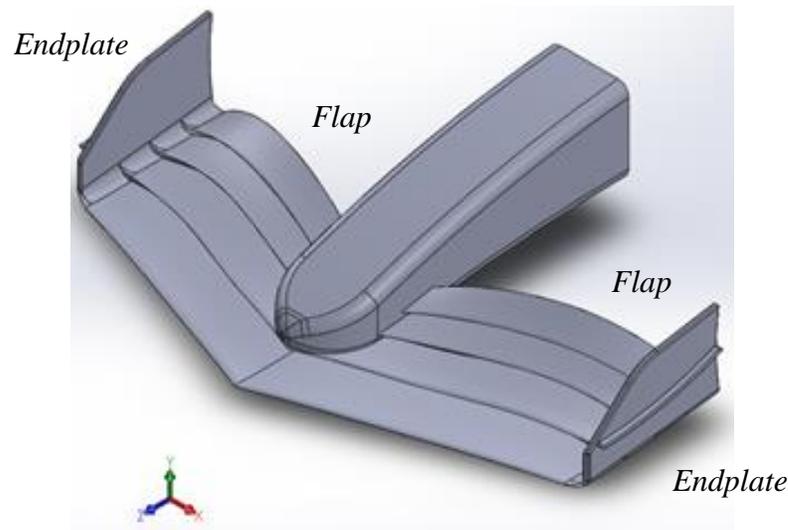


Figura IV.65.- Alerón CLV-54

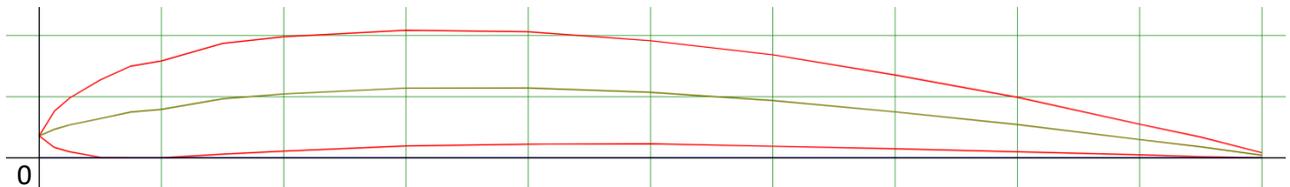


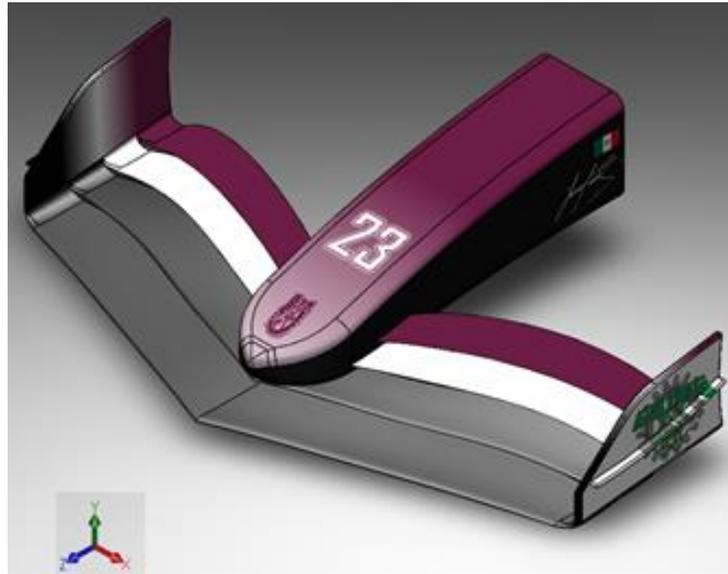
Figura IV.66.- Perfil ISA-960

Posterior a la elección del perfil base para el diseño del alerón se procedió al dimensionamiento de los *flaps* que conforman el cuerpo del alerón utilizando los planos de referencia. Las proyecciones de los perfiles sobre estos planos se muestran en el Anexo 5. Debido a que el ángulo de ataque al que se encuentre el perfil influye en la carga aerodinámica que este genera, se decidió utilizar diferentes ángulos de ataque basándose en las restricciones que permite el reglamento. Asimismo, como lo permite la geometría del volumen de referencia (Tabla IV.7).

Tabla IV.7.- Ángulos de ataque máximos para los perfiles en el *CLV-54*

Elemento	Angulo de Ataque
<i>Flap 1</i>	0°
<i>Flap 2</i>	7°
<i>Flap 3</i>	17°
<i>Flap 4</i>	25°

Al igual que el resto de las propuestas, los cuatro *flaps* que forman parte del alerón se unen en el extremo exterior para formar el *endplate*. Las dimensiones del *endplate* diseñado para este alerón se especifican en el Anexo 5. Posterior al modelado del alerón completo a continuación se muestra una imagen conceptual de la propuesta ya totalmente terminada (Figura IV.67).

**Figura IV.67.-** Diseño conceptual de *CLV-54*

IV.4.2.- Análisis numérico aerodinámico [III.4 y III.5]

Para el estudio del comportamiento aerodinámico de este alerón se realizó una simulación de dinámica de fluidos. Para esto se empleó el modelo sólido del alerón sin ningún componente estructural interno. Para realizar la simulación se hizo uso de la herramienta *Fluent* del programa computacional *ANSYS® Workbench*.

IV.4.2.1.- Módulo de geometría

Haciendo uso del módulo de geometría se exportó el modelo realizado en el programa de diseño *CAD*. Así como, se definieron las dimensiones del volumen de control, manteniendo la uniformidad en los estudios con las mismas dimensiones que el resto de los estudios (Figura IV.68).

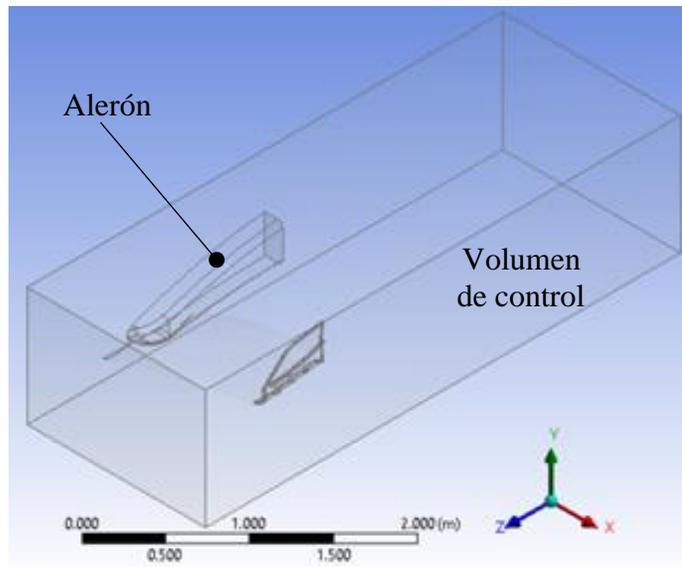


Figura IV.68.- Volumen de control

IV.4.2.2.- Método de discretizado

En esta sección se llevó a cabo el discretizado del sistema de estudio con parámetros de discretizado fino, controlado y con elementos de alto orden para poder obtener resultados precisos. El resultado del proceso de discretizado se puede apreciar de la siguiente manera (Figura IV.69).

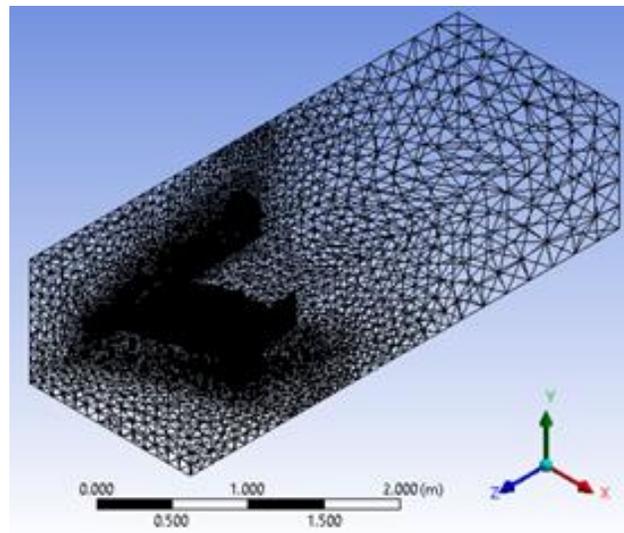


Figura IV.69.- Discretizado del alerón *CLV-54*

IV.4.2.3.- Aplicación de las condiciones de frontera [IV.7 y IV.8]

Dentro del módulo *setup* se definieron los factores bajo los que estará sujeta la simulación. Para la velocidad de flujo del viento de igual manera que el resto de estudios realizados en esta tesis, se

utilizó una velocidad 325 km/h y una presión estática a la salida igual a cero. Posterior a definir las condiciones de frontera el volumen de control se puede visualizar de la siguiente manera (Figura IV.70).

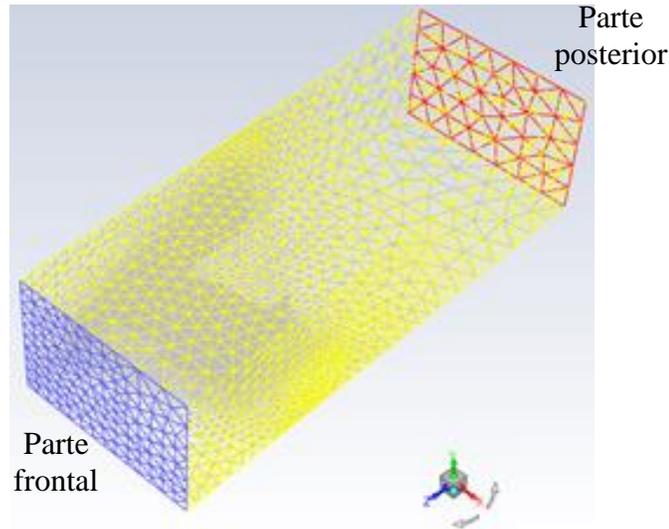


Figura IV.70.- Condiciones de frontera para el CLV-54

IV.4.2.4.- Solución numérica

Al igual que el resto de los análisis la cantidad de iteraciones para llegar a la solución en este módulo se estableció en 100. Este proceso es llevado a cabo por el programa computacional.

IV.4.2.5.- Resultados de la evaluación numérica

En esta sección se puede visualizar los resultados del estudio de manera gráfica. Estos resultados se presentan a continuación.

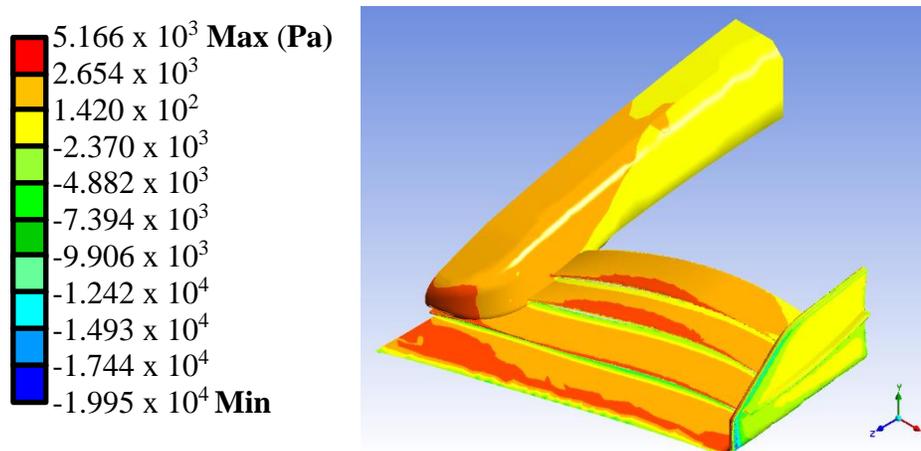


Figura IV.71.- Vista general de la presión sobre el alerón CLV-54

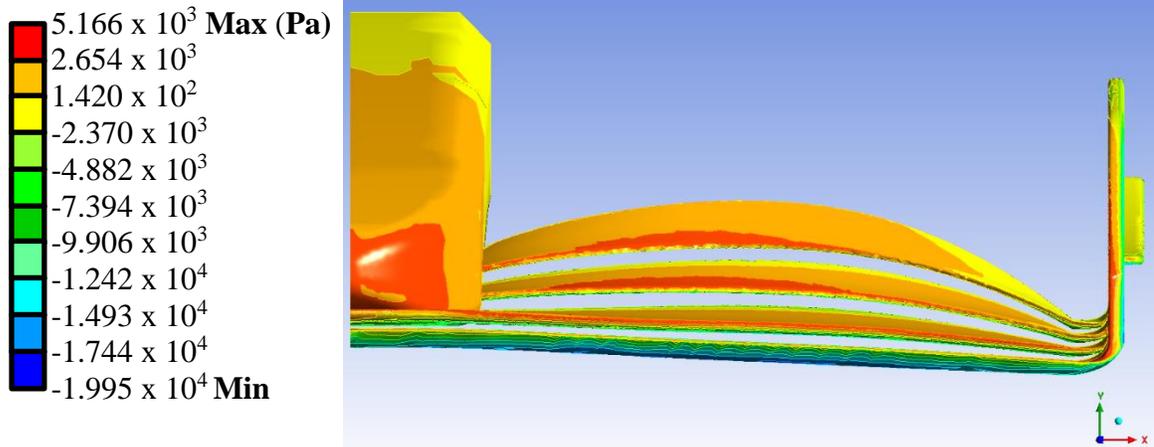


Figura IV.72.- Vista frontal de la presión sobre el alerón CLV-54

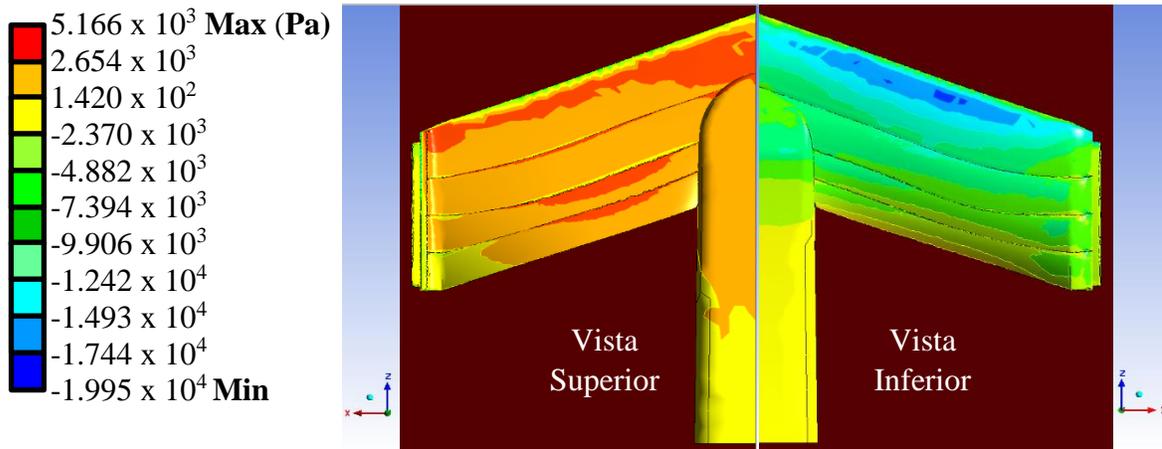


Figura IV.73.- Vista superior e inferior de la presión sobre el alerón CLV-54

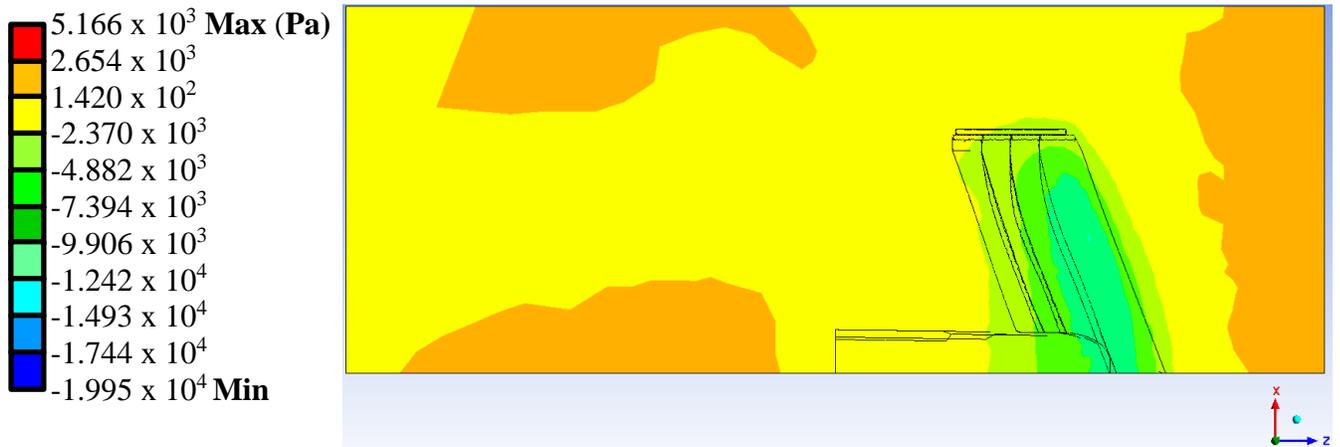


Figura IV.74.- Vista superior de la presión ejercida sobre el suelo del alerón CLV-54

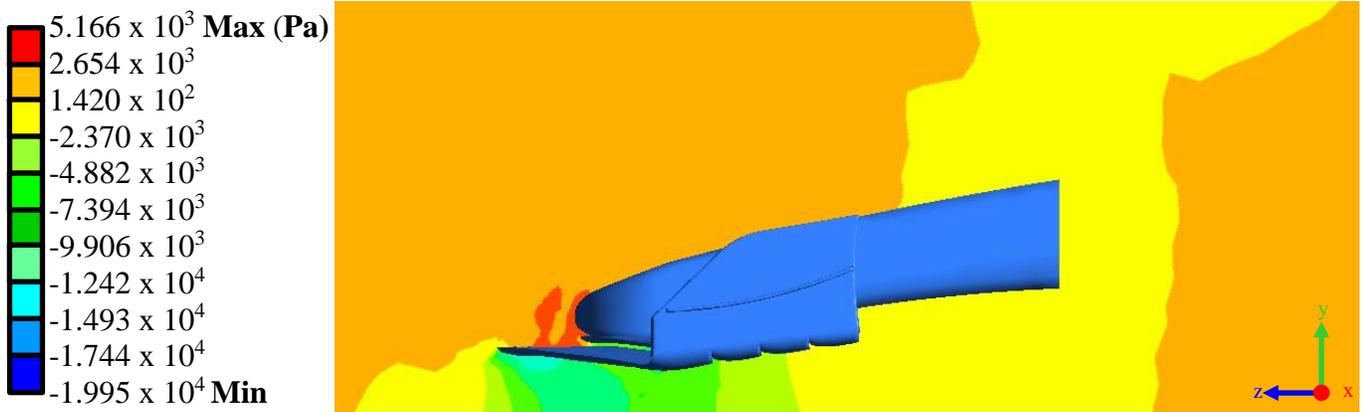


Figura IV.75.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *CLV-54* sobre el plano medio

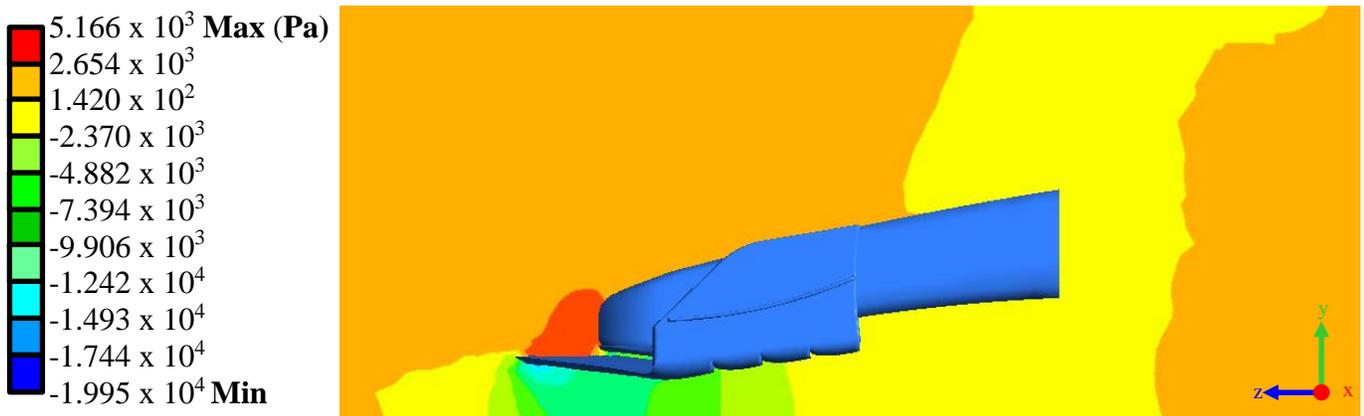


Figura IV.76.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *CLV-54* a 100 mm del plano medio

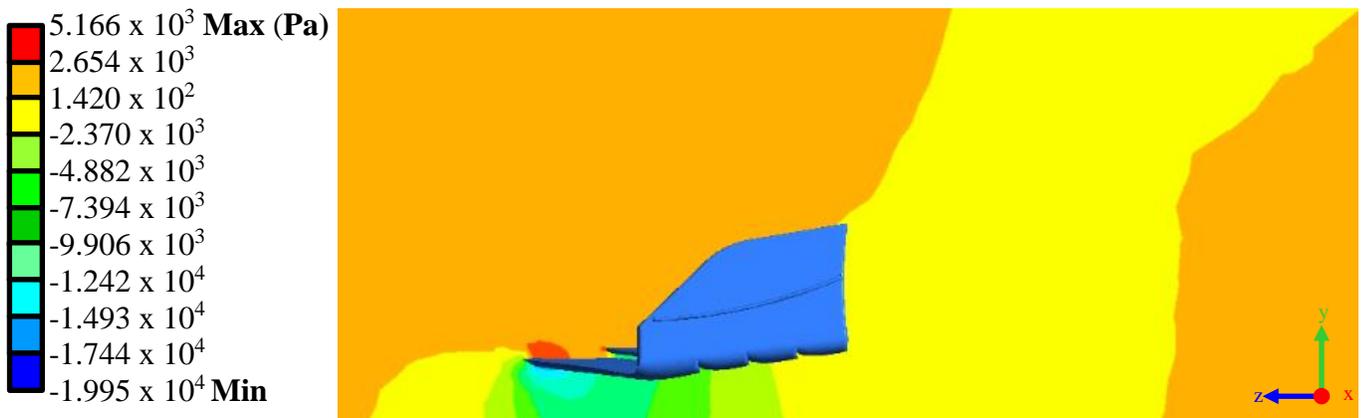


Figura IV.77.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *CLV-54* a 250 mm del plano medio

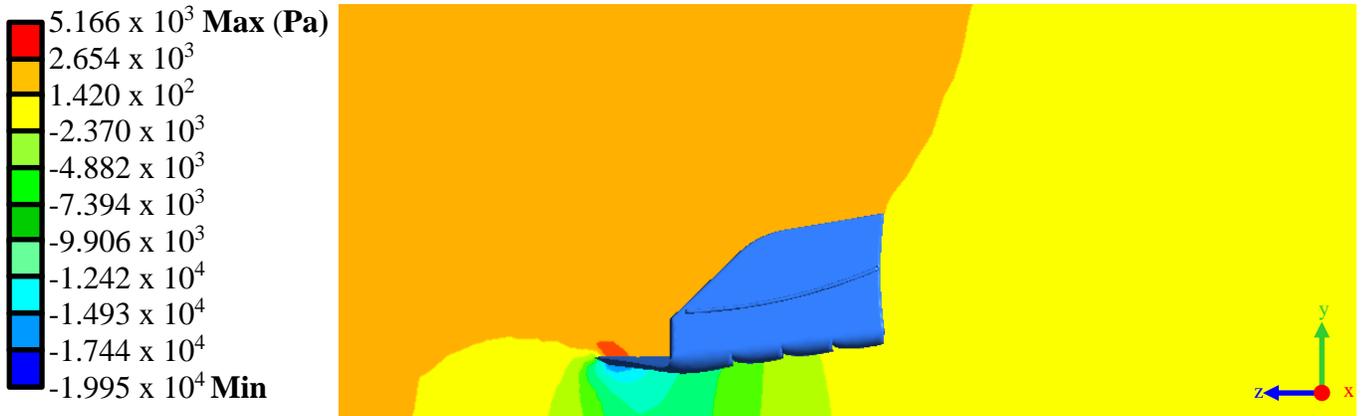


Figura IV.78.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *CLV-54* a 500 mm del plano medio

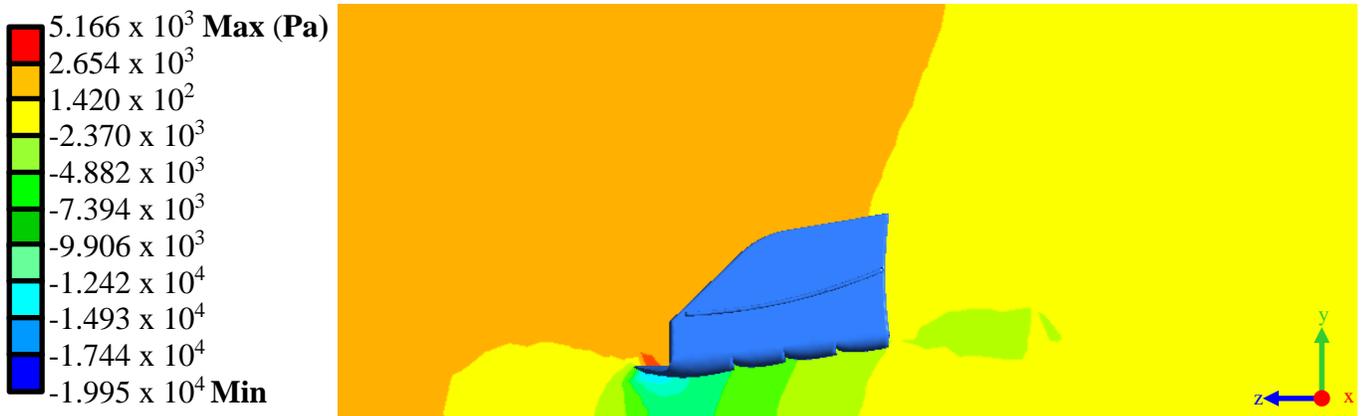


Figura IV.79.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *CLV-54* a 750 mm del plano medio

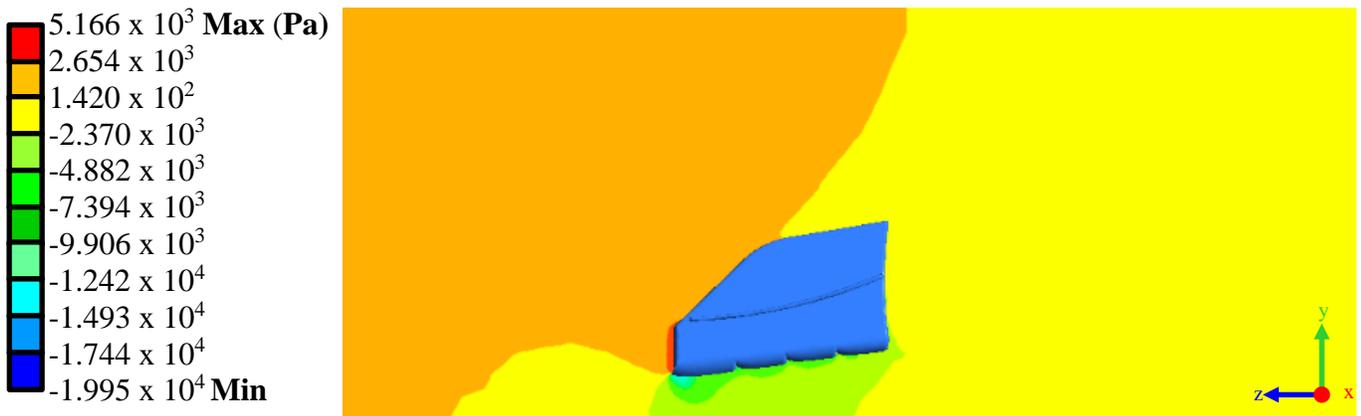


Figura IV.80.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *CLV-54* a 950 mm del plano medio

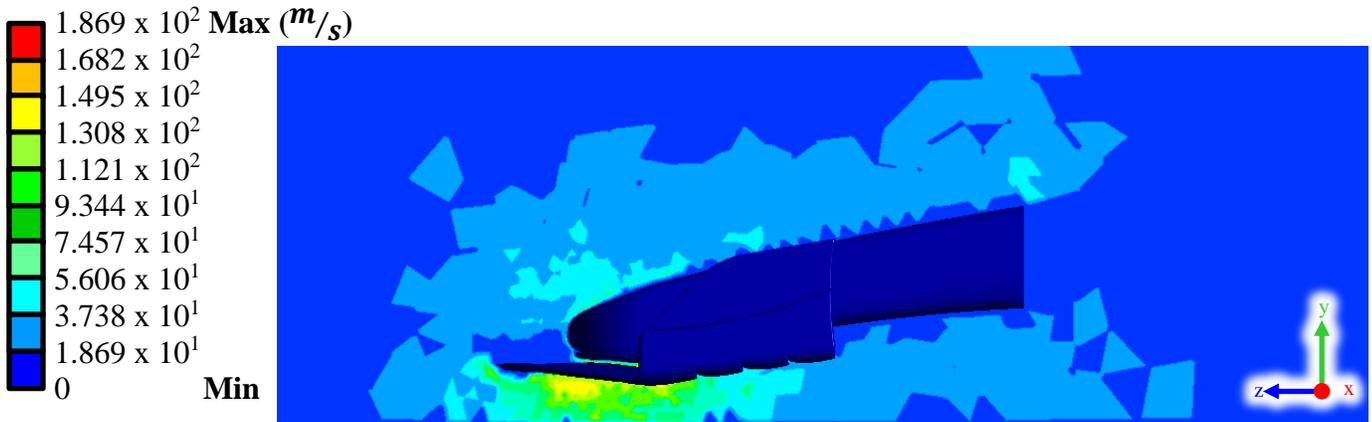


Figura IV.81.- Velocidad del viento sobre alerón CLV-54 en plano medio del alerón

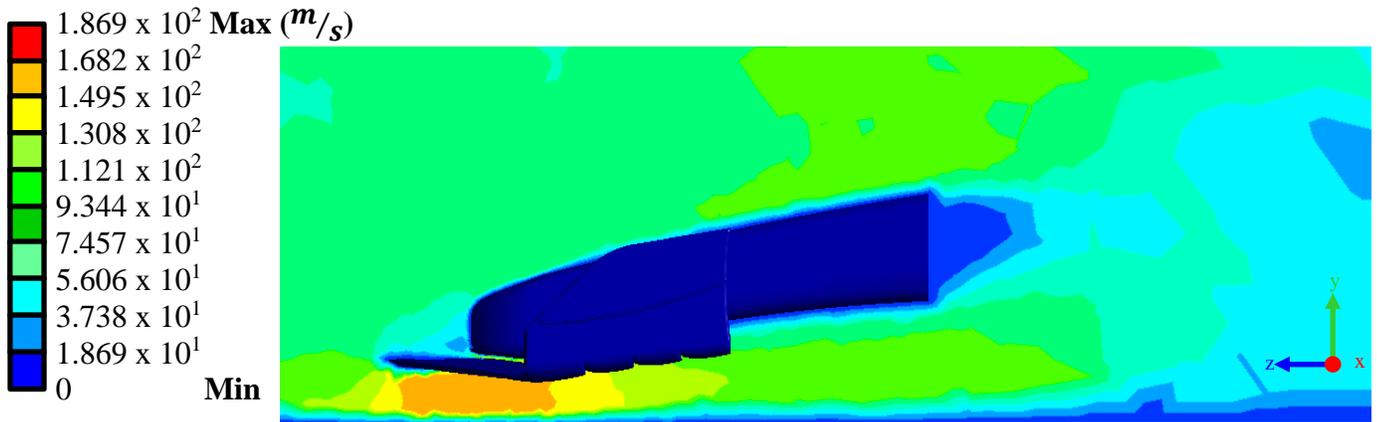


Figura IV.82.- Velocidad del viento sobre alerón CLV-54 a 100 mm del plano medio del alerón

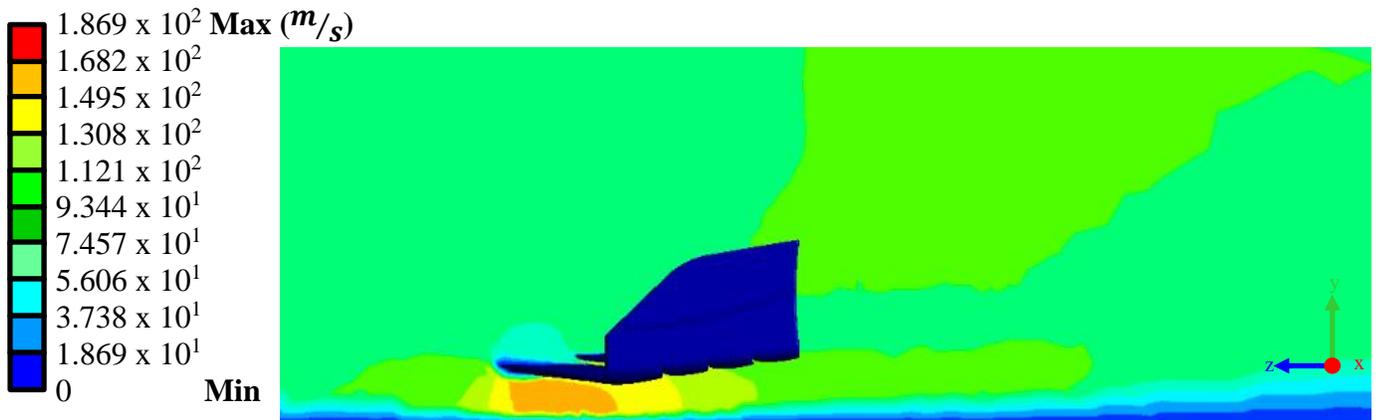


Figura IV.83.- Velocidad del viento sobre alerón CLV-54 a 250 mm del plano medio del alerón

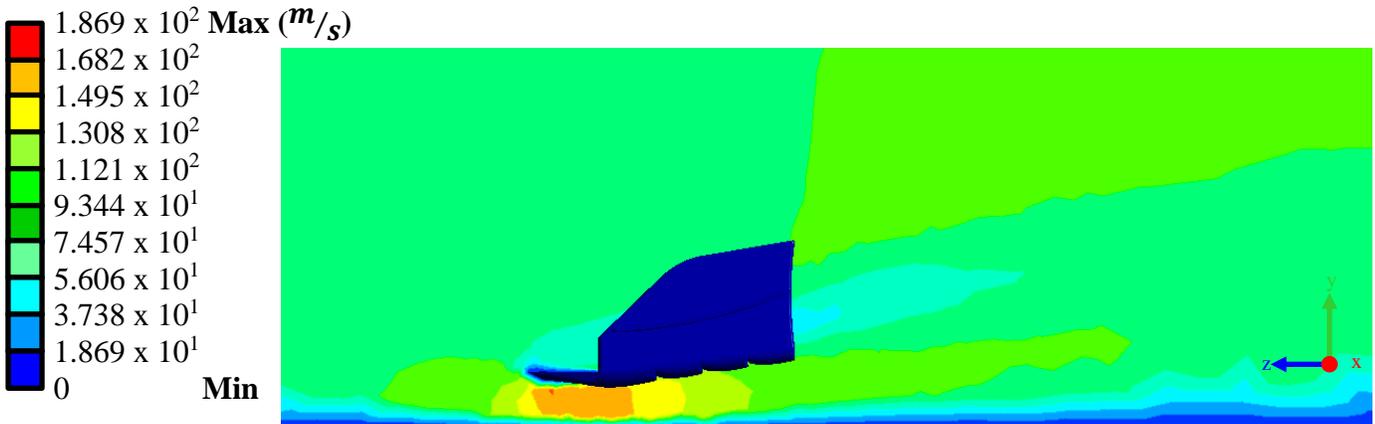


Figura IV.84.- Velocidad del viento sobre alerón *CLV-54* a 500 mm del plano medio del alerón

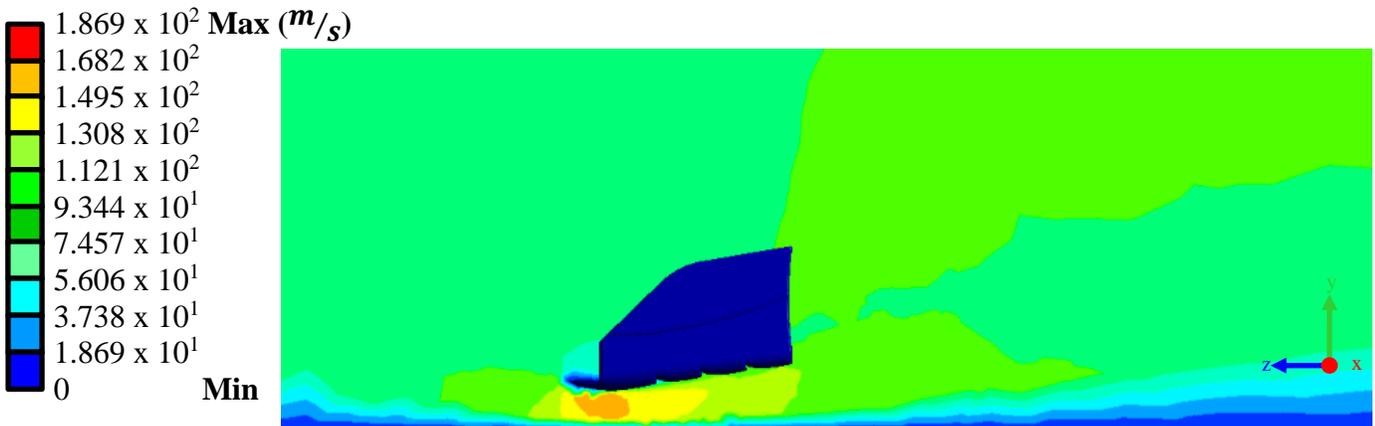


Figura IV.85.- Velocidad del viento sobre alerón *CLV-54* a 750 mm del plano medio del alerón

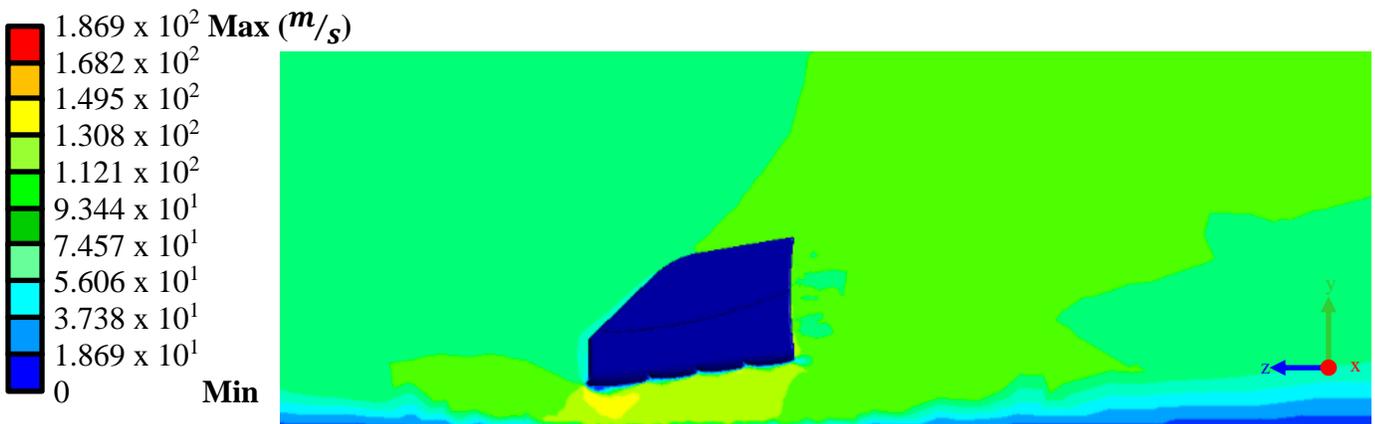


Figura IV.86.- Velocidad del viento sobre alerón *CLV-54* a 950 mm del plano medio del alerón

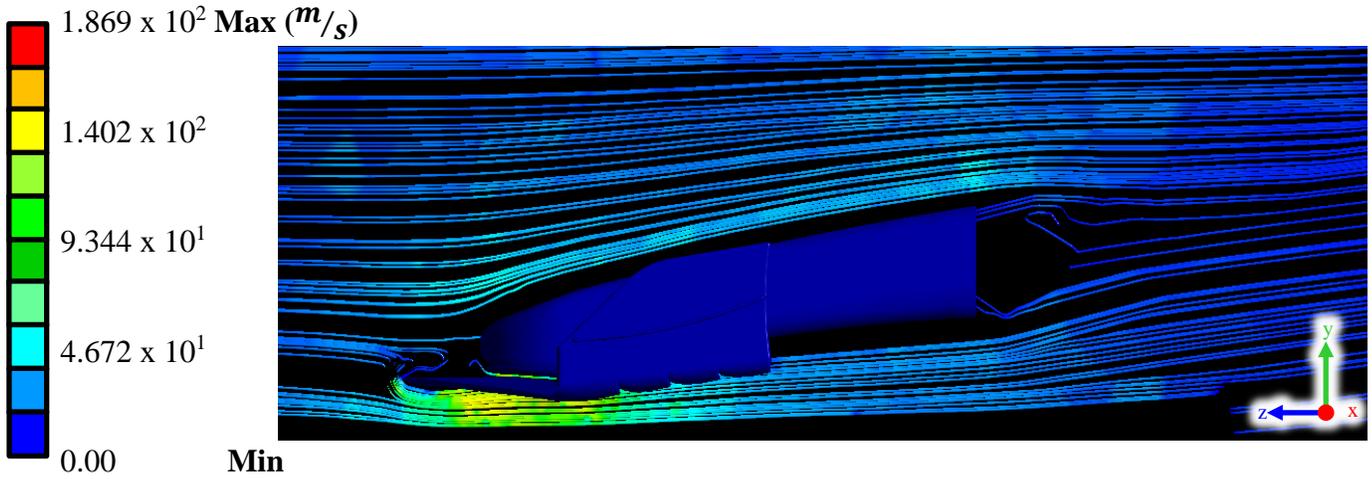


Figura IV.87.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón CLV-54 sobre plano medio

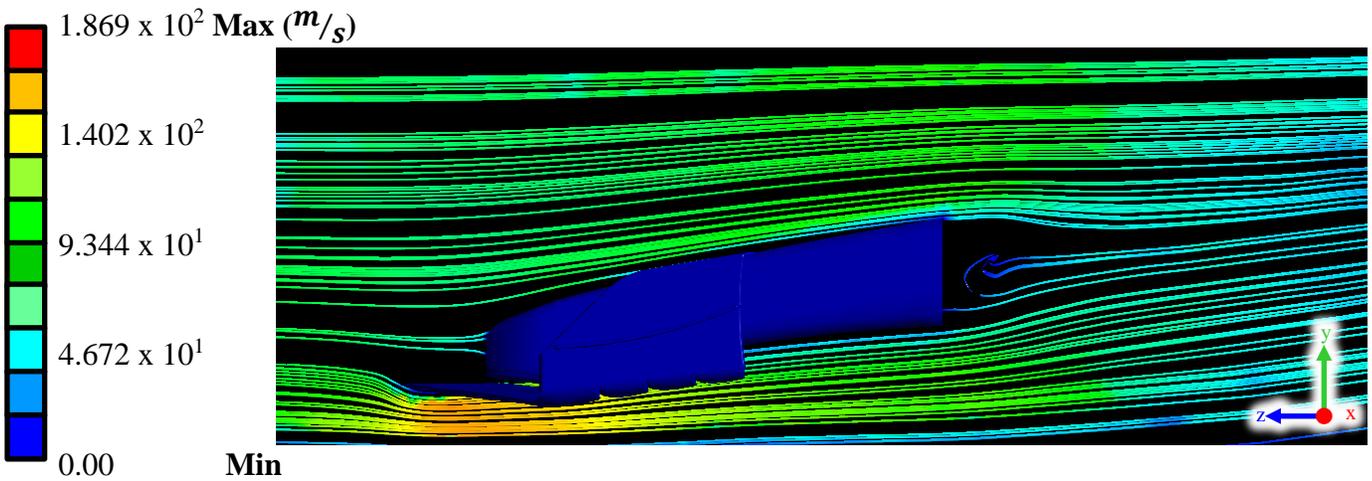


Figura IV.88.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón CLV-54 a 100 mm sobre plano medio

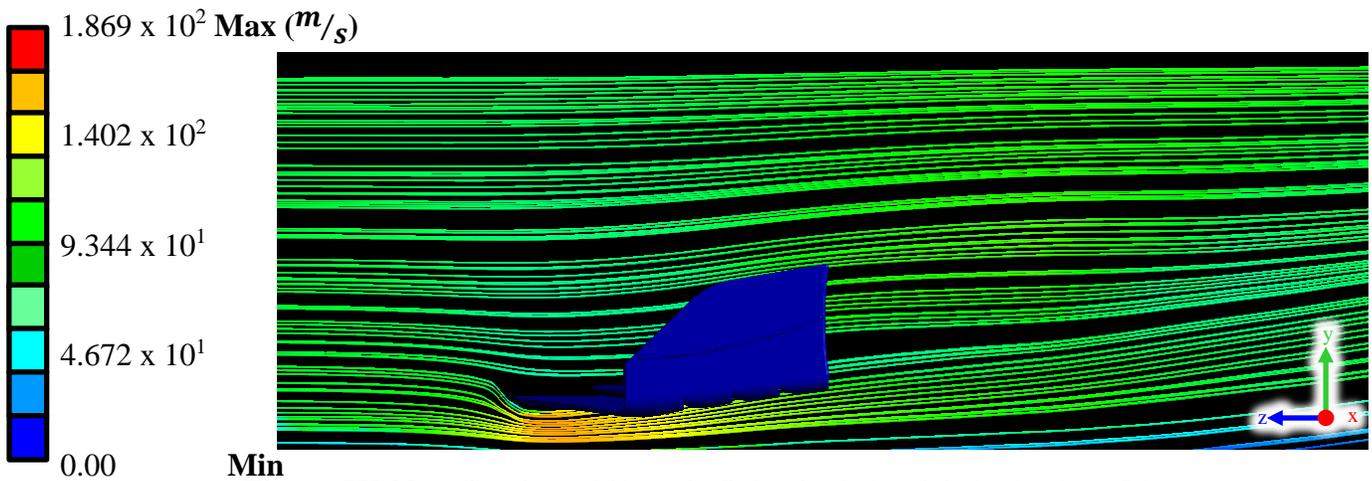


Figura IV.89.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón CLV-54 a 250 mm sobre plano medio

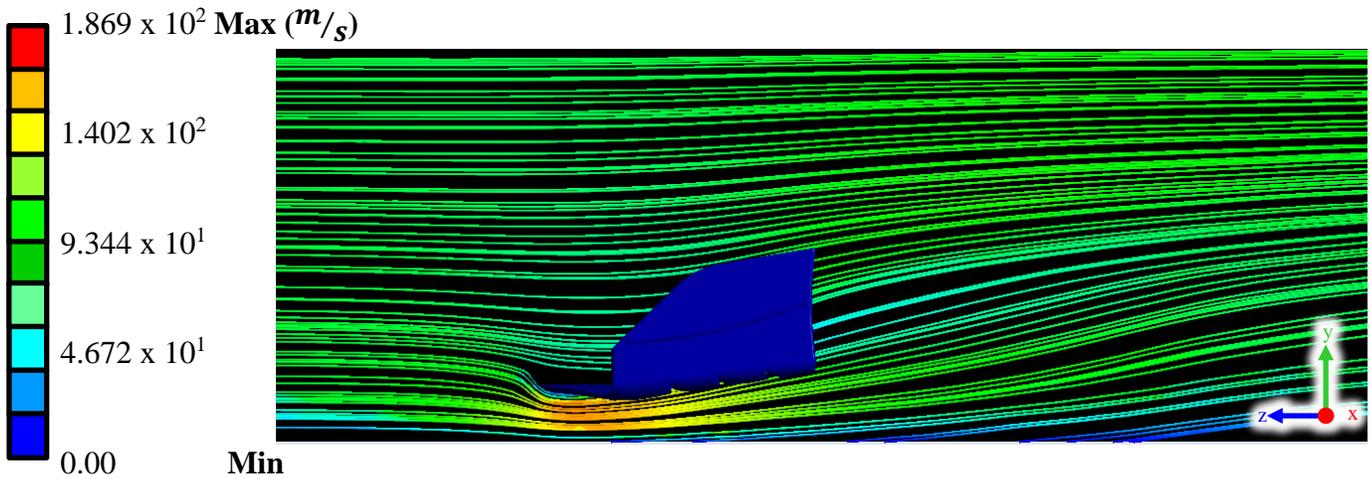


Figura IV.90.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *CLV-54* a 500 mm sobre plano medio

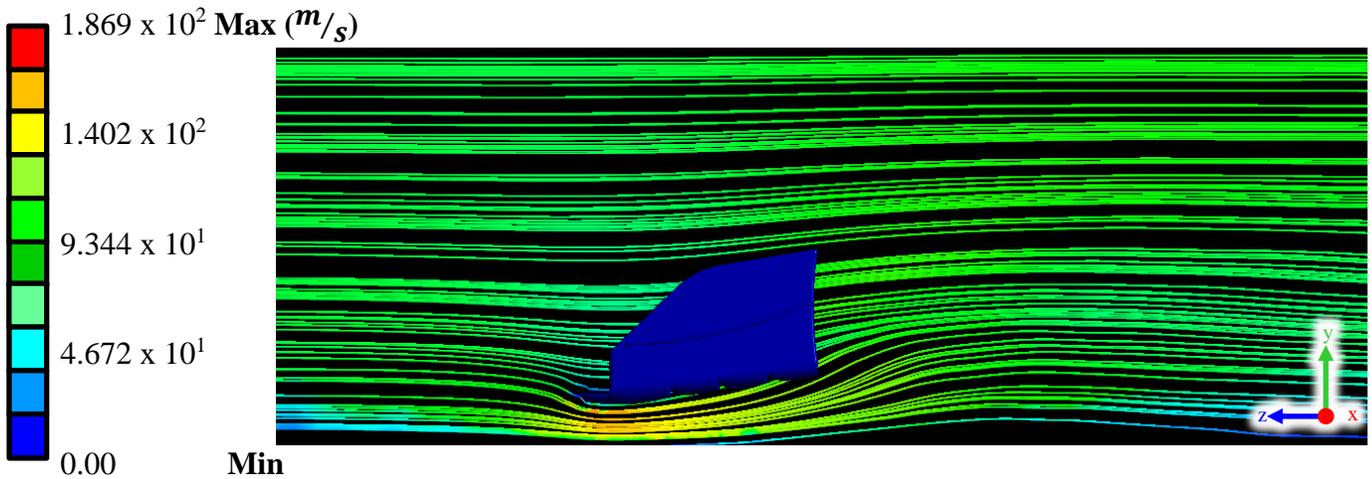


Figura IV.91.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *CLV-54* a 750 mm sobre plano medio

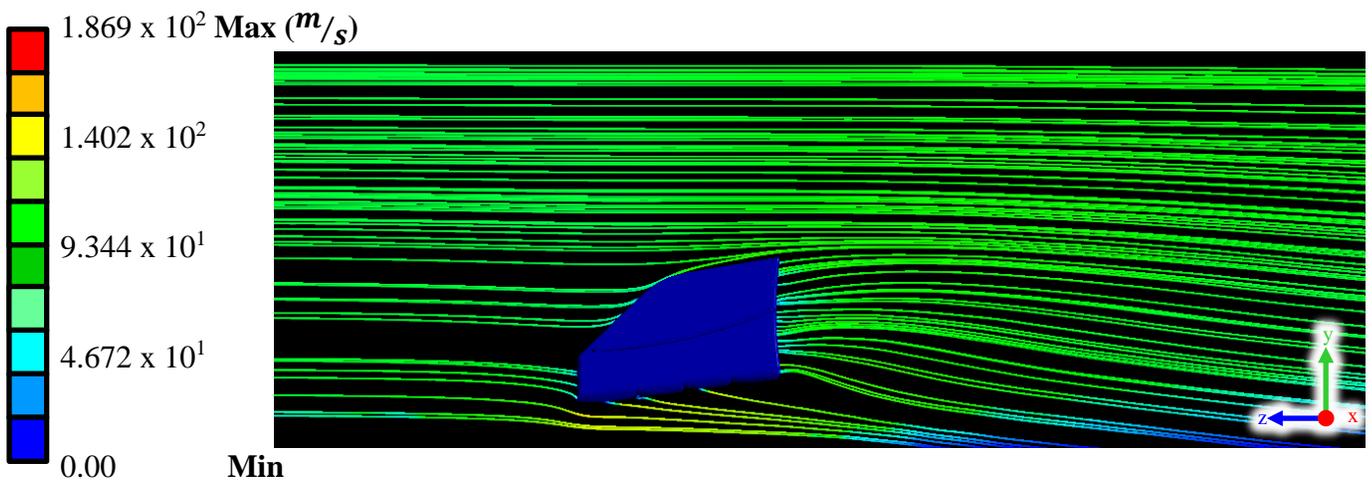


Figura IV.92.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *CLV-54* a 950 mm sobre plano medio

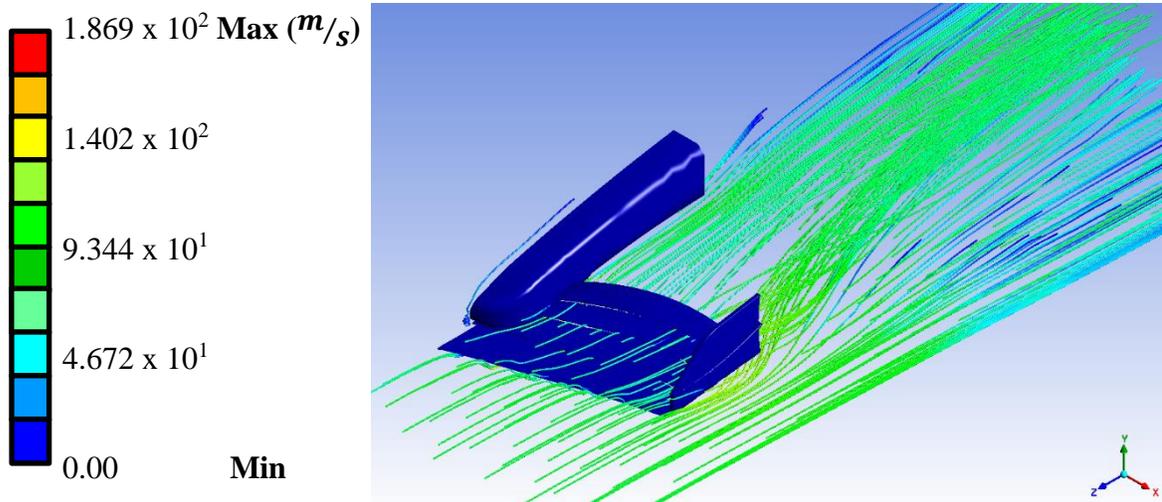


Figura IV.93.- Flujo de vórtice alrededor del alerón *CLV-54*

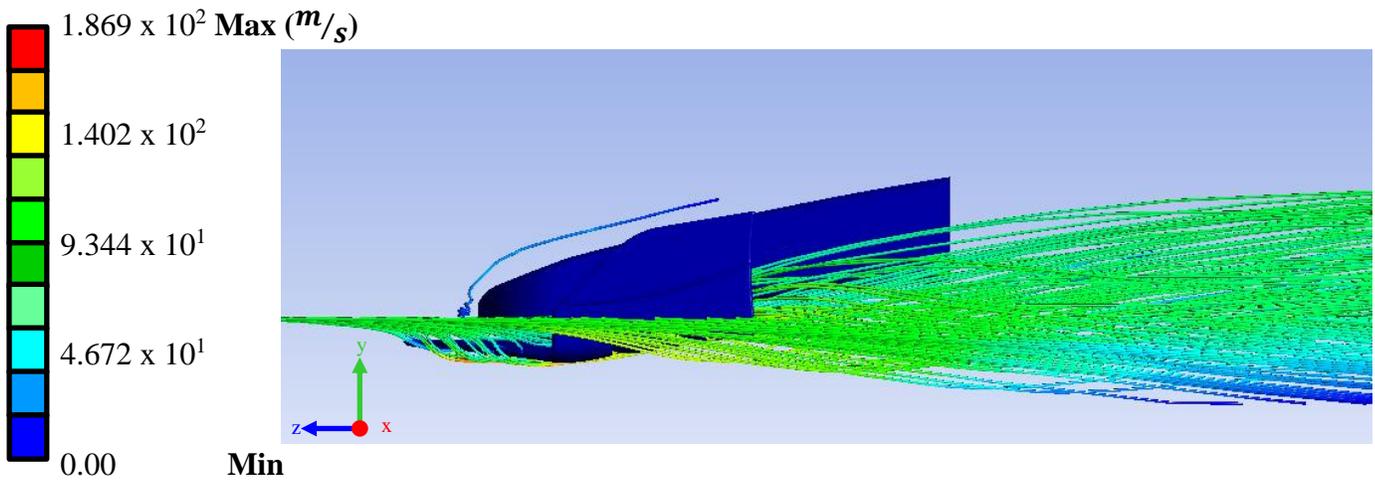


Figura IV.94.- Vista lateral del flujo de vórtice alrededor del alerón *CLV-54*

El módulo de resultados también nos ofrece el cálculo total de fuerzas que actúan sobre el alerón *CLV-54*, con esto se puede conocer la magnitud de las fuerzas tanto *Downforce* como de arrastre. Las cuales servirán para poder realizar una comparación entre los diferentes cuerpos de estudio.

Tabla IV.8.- Fuerzas sobre el alerón *CLV-54*

Fuerza	Magnitud
<i>Downforce</i>	5807.87 N
Arrastre	685.785 N

IV.4.3.- Acoplamiento multi-físico

Utilizando el módulo *System Coupling* del software *ANSYS® Workbench* se conecta el *setup* de *fluent* y el *setup* de *Static structural* para transferir los datos de las cargas que generan las presiones del aire sobre el alerón *CLV-54* para así poder desarrollar un análisis estructural y obtener los resultados correspondientes (Figura IV.95).

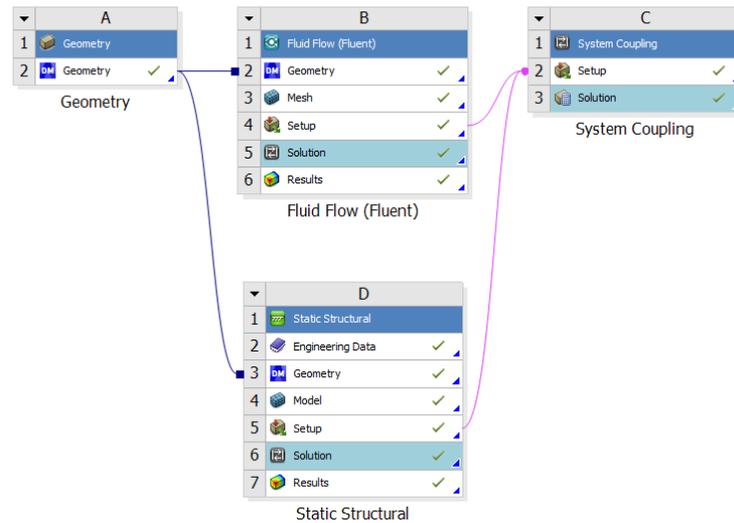


Figura IV.95.- Acoplamiento multi-físico para el *CLV-54*

IV.4.4.- Análisis numérico estático estructural [IV.9]

Para evaluación de esta propuesta se realizó igualmente una simulación estática estructural sobre el alerón. Para realizar la simulación se utilizó la herramienta *Static Structural* del programa computacional *ANSYS® Workbench*.

IV.4.4.1.- Módulo de geometría

Al igual que en la propuesta anterior, este módulo sirve para exportar la geometría necesaria para llevar a cabo el análisis estático estructural. La geometría exportada desde el software de diseño CAD hacia la herramienta *Static Structural* se puede visualizar a continuación (Figura IV.96).

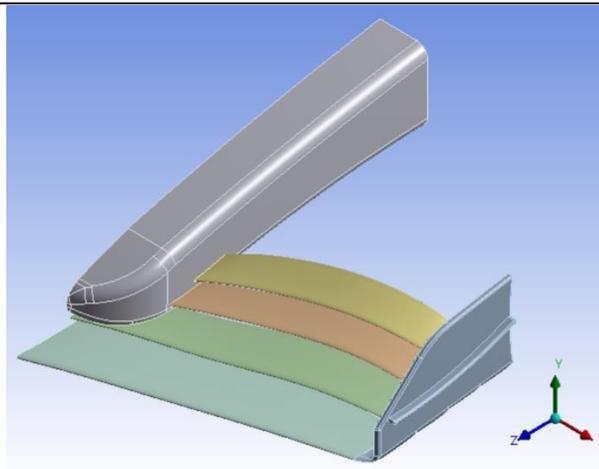


Figura IV.96.- Geometría del *CLV-54* en *Static Structural*

IV.4.4.2.- Método de discretizado

El modelo del alerón *CLV-54* se discretizo con parámetros de discretizado fino, controlado y con elementos de alto orden para poder obtener resultados más cercanos a la realidad. El resultado del proceso de discretizado se puede apreciar de la siguiente manera (Figura IV.97) [IV.6].

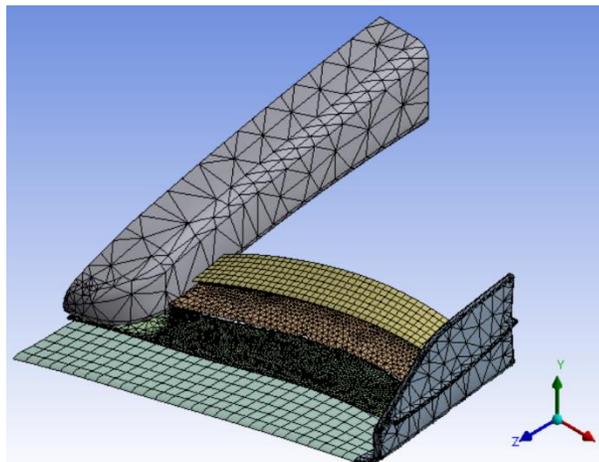


Figura IV.97.- Discretizado del alerón *CLV-54*

IV.4.4.3.- Aplicación de las condiciones de frontera [IV.7 y IV.9]

Al igual que la propuesta anterior se seleccionó como material la fibra de carbono *Hexcel HM63* de 12 000 filamentos, las propiedades físicas de este material se especifican en la Tabla IV.5.

Posterior a definir el material del que está constituido el alerón es necesario colocar las restricciones de movimiento, para este caso en particular se colocó un apoyo fijo en el extremo de la nariz que

se encuentran unida al resto del monoplaza. Posterior a definir las condiciones de frontera el alerón se puede visualizar de la siguiente manera (Figura IV.98).

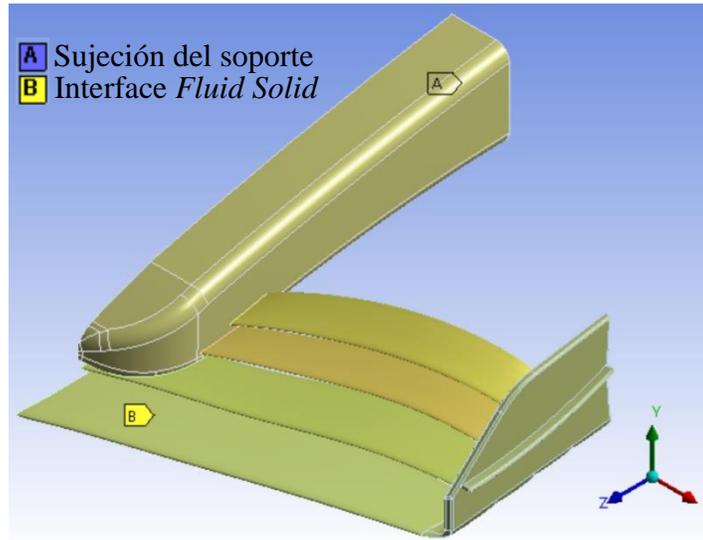


Figura IV.98.- Condiciones de frontera del CLV-54

IV.4.4.4.- Resultados de la evaluación numérica estática estructural

En esta sección se puede visualizar los resultados del estudio de manera gráfica, los cuales incluyen resultados de desplazamientos (generales y nominales), deformaciones unitarias y esfuerzos (falla (Von Mises y cortantes), nominales y principales (máximos y mínimos)).

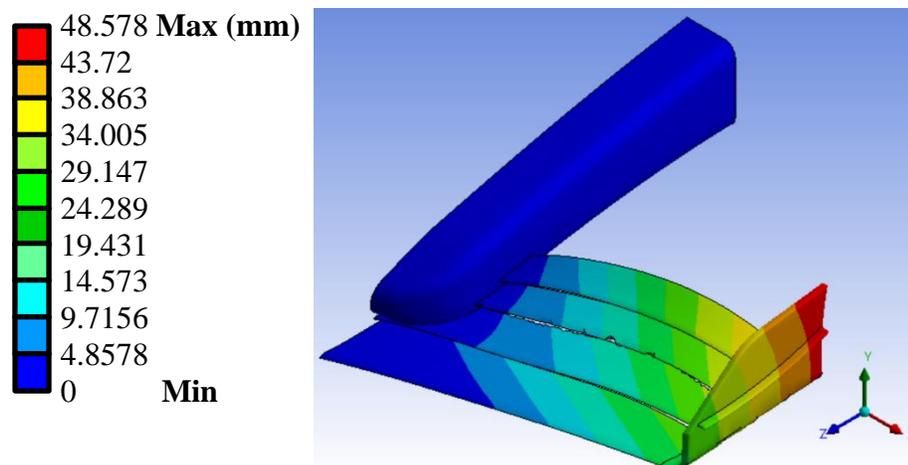


Figura IV.99.- Desplazamientos totales en el CLV-54 (Vista isométrica)

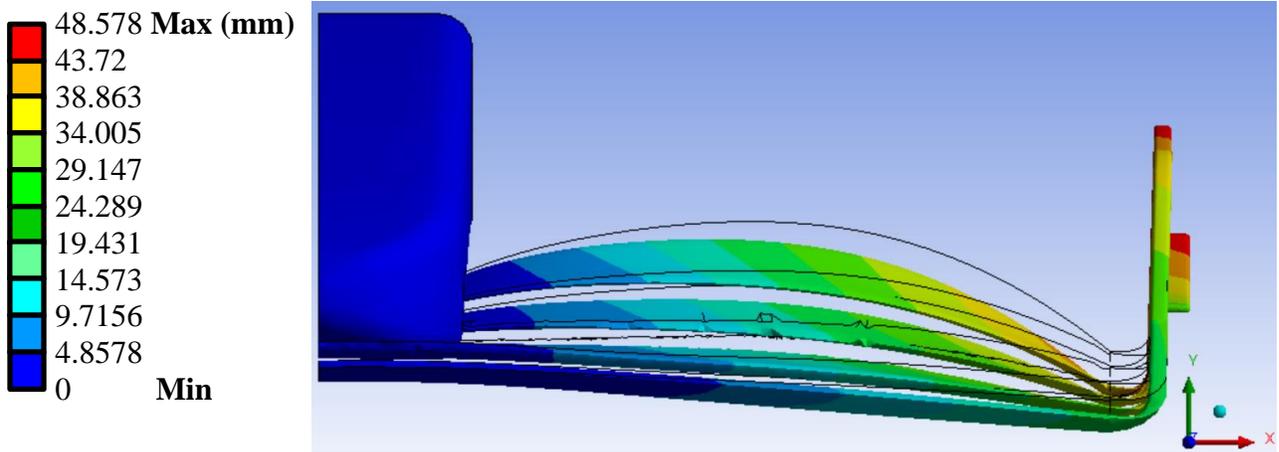


Figura IV.100.- Desplazamientos totales en el *CLV-54* desde la vista frontal (la silueta en negro es la figura del alerón antes de deformarse)

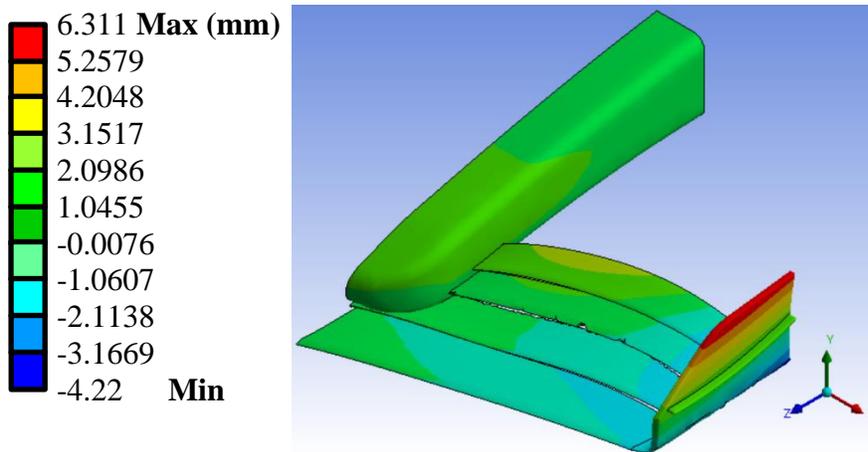


Figura IV.101.- Desplazamientos nominales del eje X en el *CLV-54* (Vista isométrica)

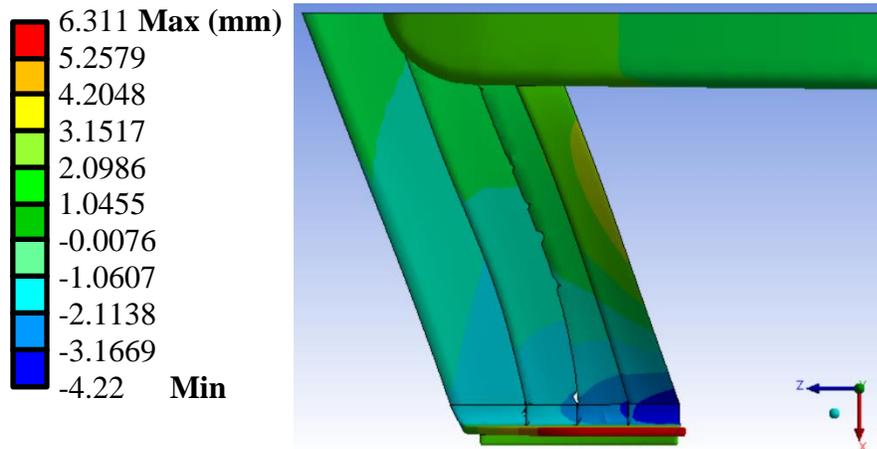


Figura IV.102.- Desplazamientos nominales del eje X en el *CLV-54* (Vista superior)

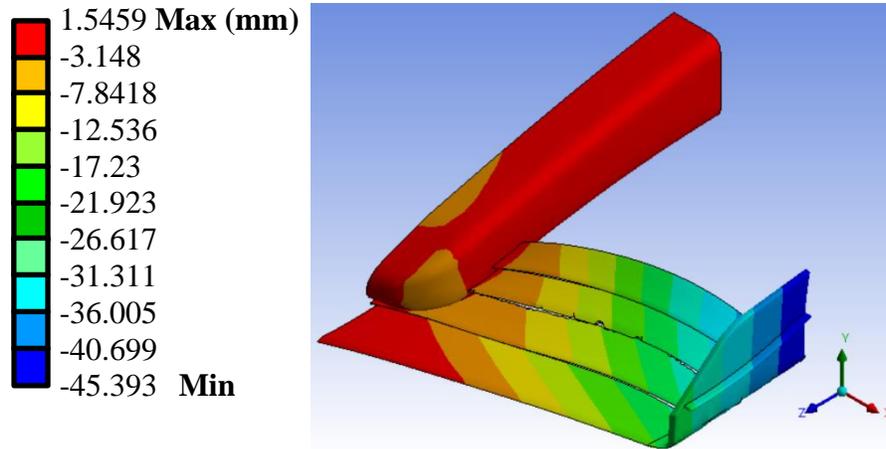


Figura IV.103.- Desplazamientos nominales del eje Y en el *CLV-54* (Vista isométrica)

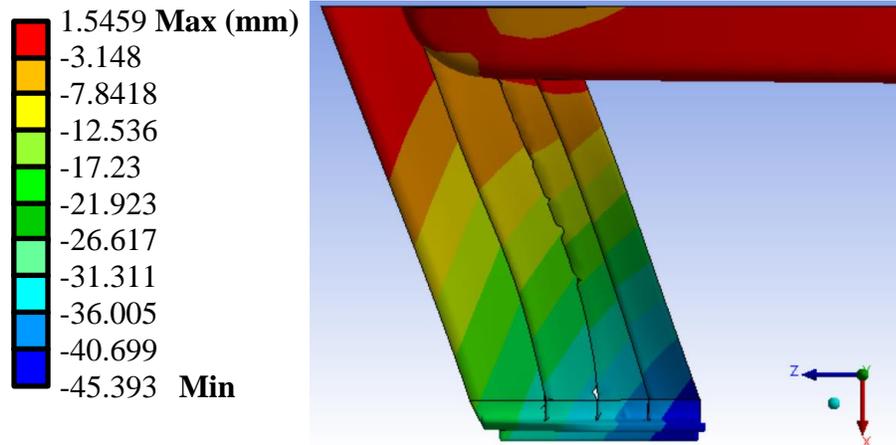


Figura IV.104.- Desplazamientos nominales del eje Y en el *CLV-54* (Vista superior)

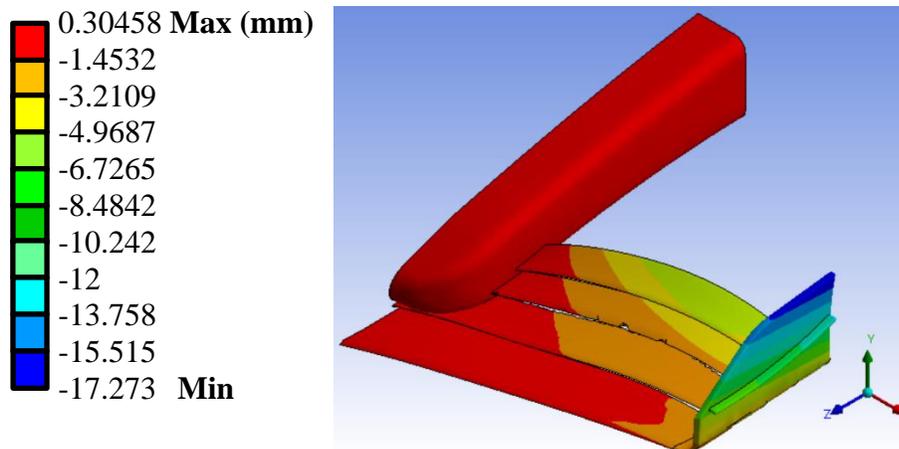


Figura IV.105.- Desplazamientos nominales del eje Z en el *CLV-54* (Vista isométrica)

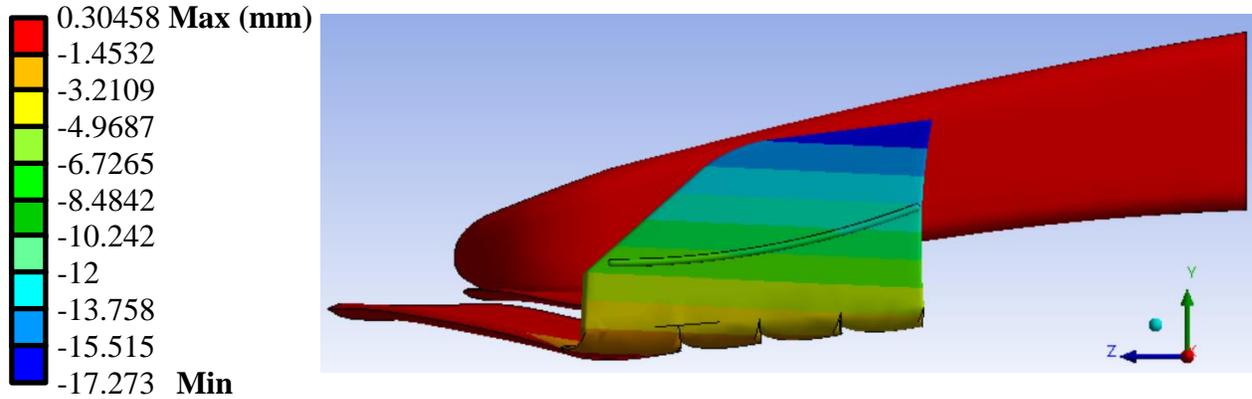


Figura IV.106.- Desplazamientos nominales del eje Z en el CLV-54 (Vista lateral)

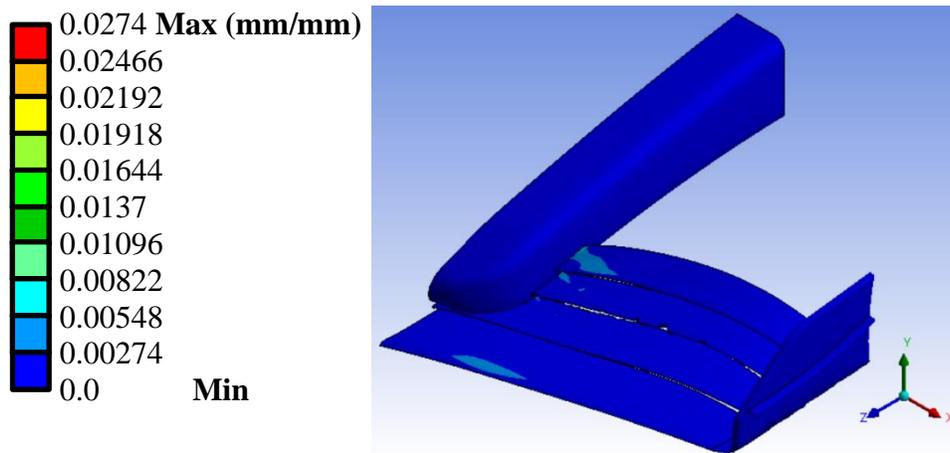


Figura IV.107.- Deformaciones unitarias totales en el CLV-54 (Vista isométrica)

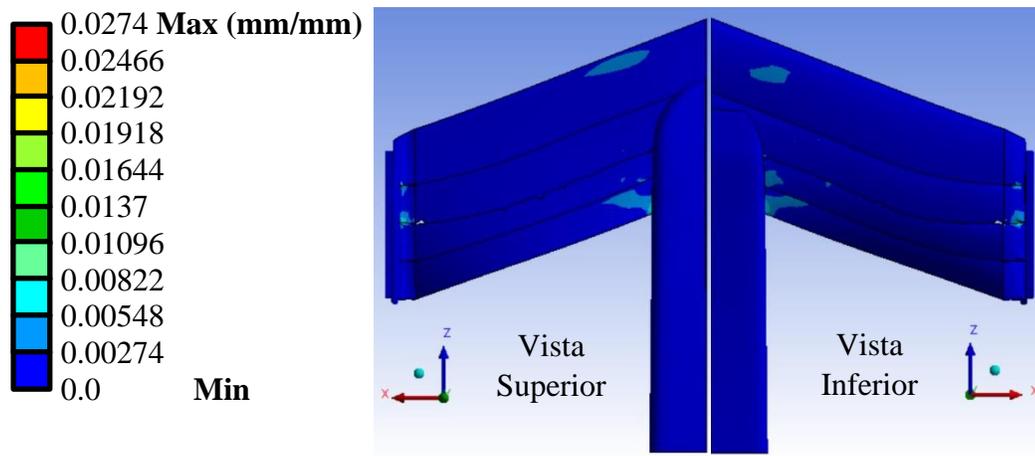


Figura IV.108.- Deformaciones unitarias totales en el CLV-54 (Vista superior e inferior)

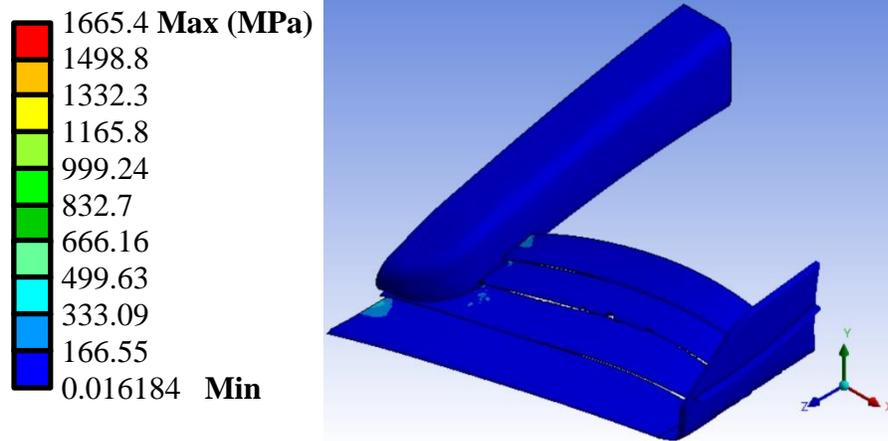


Figura IV.109.- Esfuerzos equivalentes *Von Mises* en el CLV-54 (Vista isométrica)

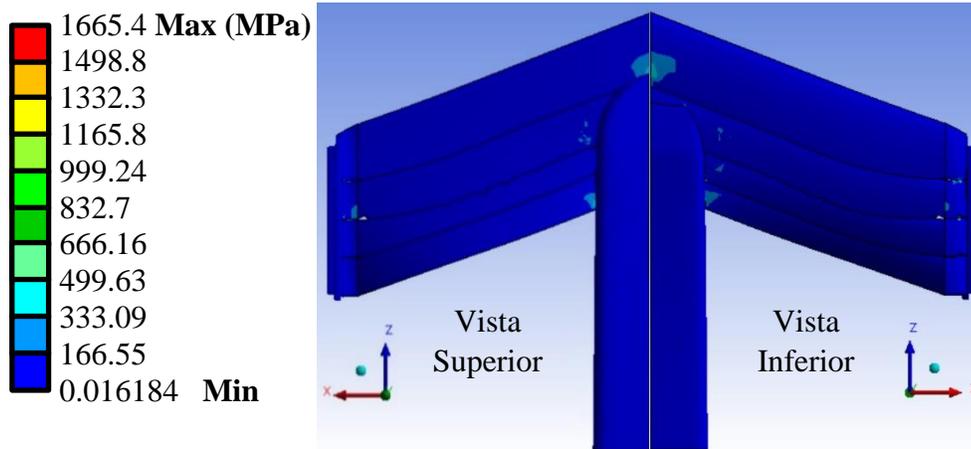


Figura IV.110.- Esfuerzos equivalentes *Von Mises* en el CLV-54 (Vista superior e inferior)

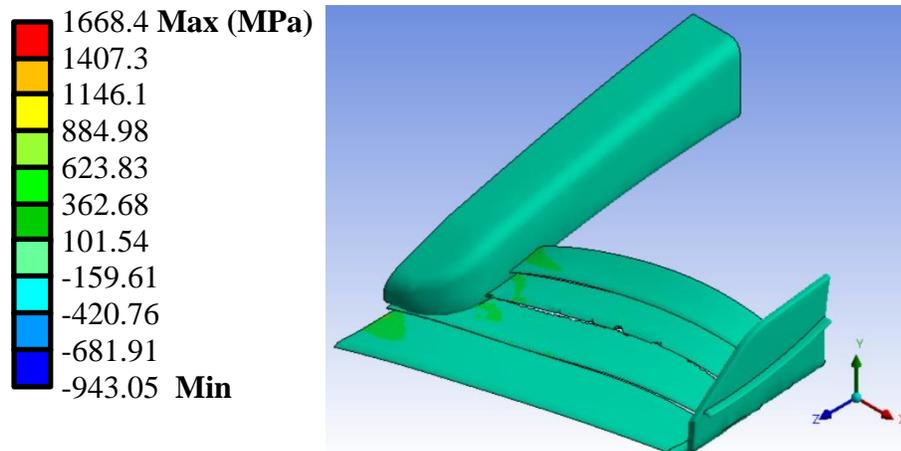


Figura IV.111.- Esfuerzos nominales en el eje X en el CLV-54 (Vista isométrica)

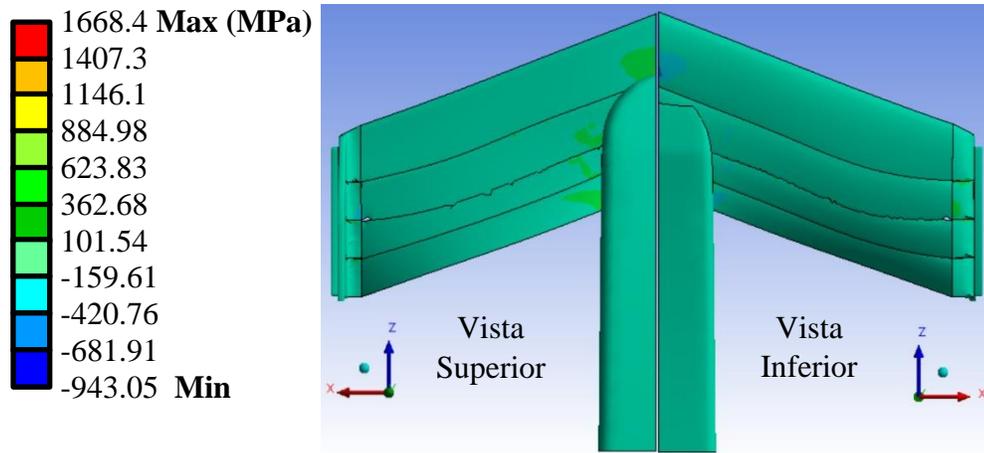


Figura IV.112.- Esfuerzos nominales en el eje X en el CLV-54 (Vista superior e inferior)

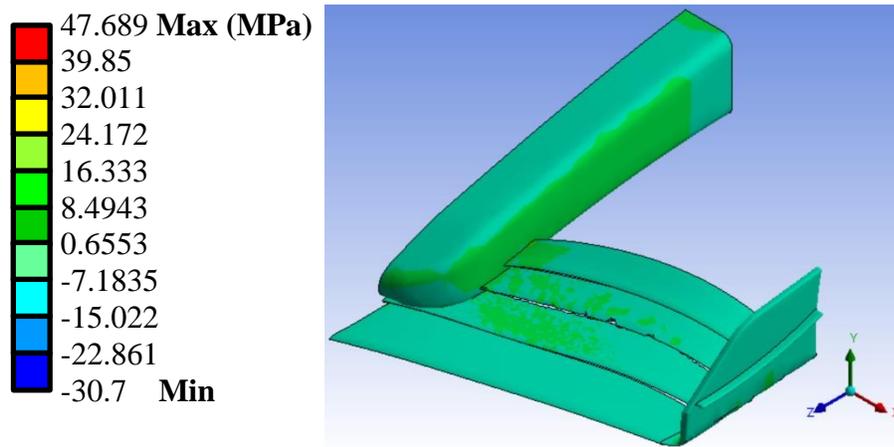


Figura IV.113.- Esfuerzos nominales en el eje Y en el CLV-54 (Vista isométrica)

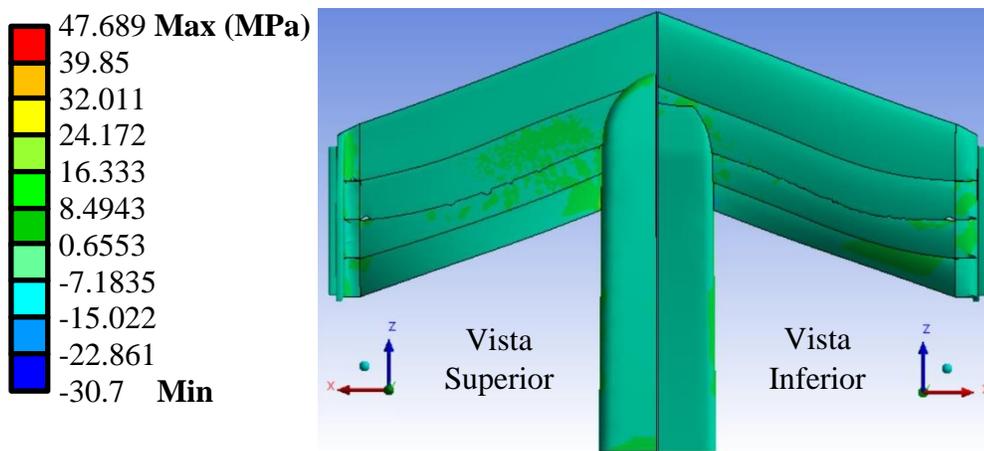


Figura IV.114.- Esfuerzos nominales en el eje Y en el CLV-54 (Vista superior e inferior)

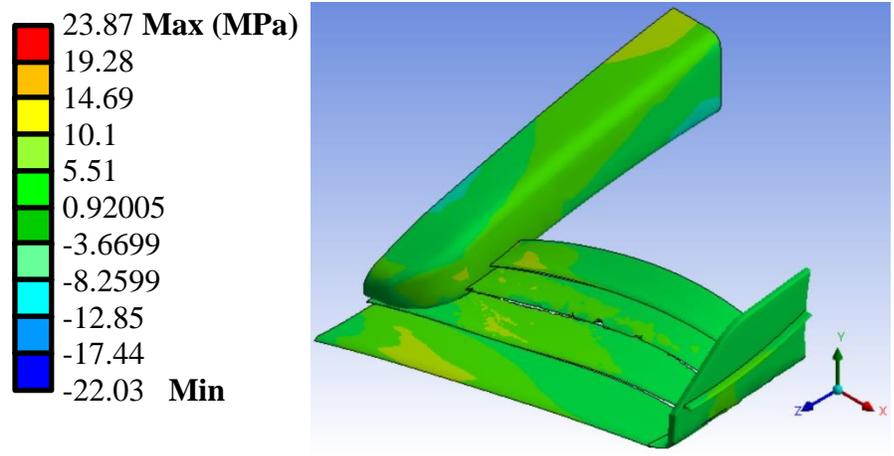


Figura IV.115.- Esfuerzos nominales en el eje Z en el CLV-54 (Vista isométrica)

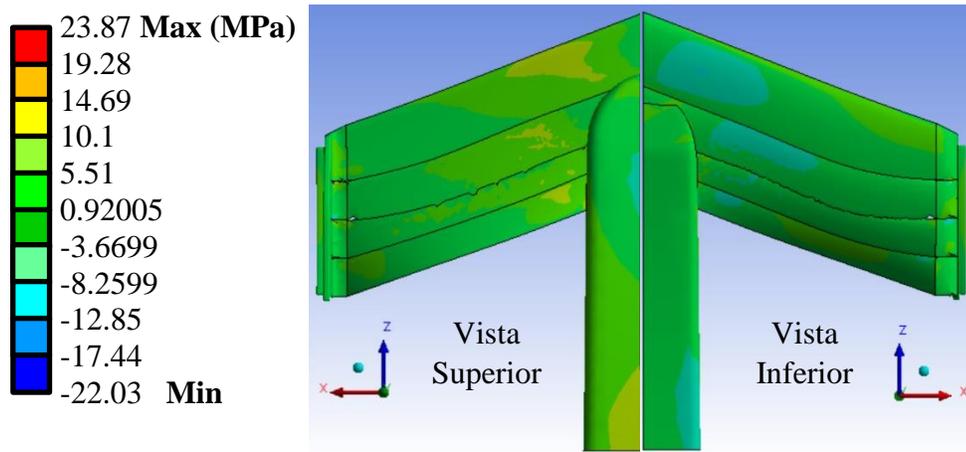


Figura IV.116.- Esfuerzos nominales en el eje Z en el CLV-54 (Vista superior e inferior)

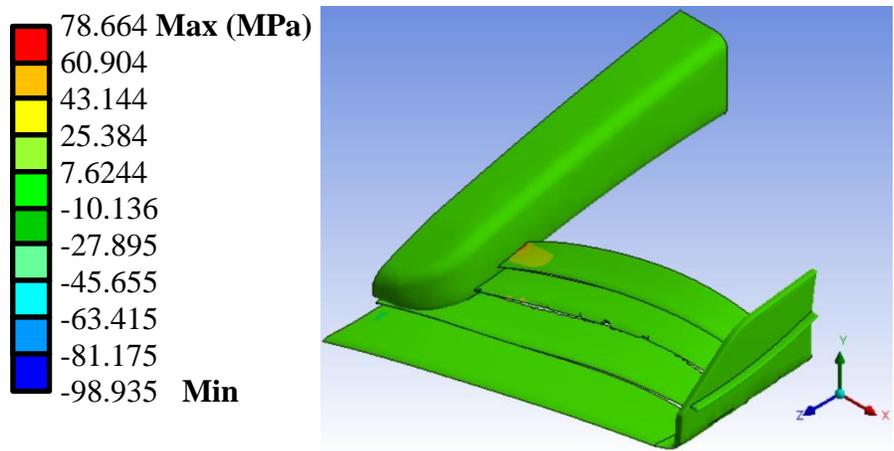


Figura IV.117.- Esfuerzos cortantes en el plano XY en el CLV-54 (Vista isométrica)

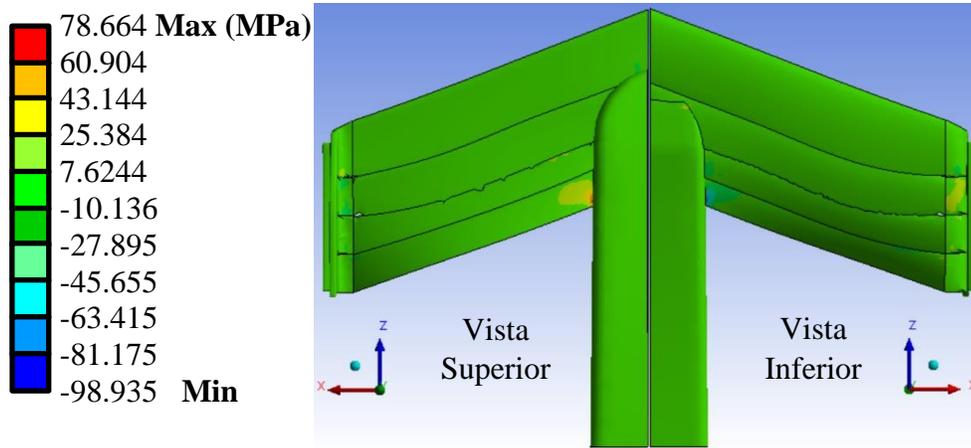


Figura IV.118.- Esfuerzos cortantes en el plano XY en el CLV-54 (Vista superior e inferior)

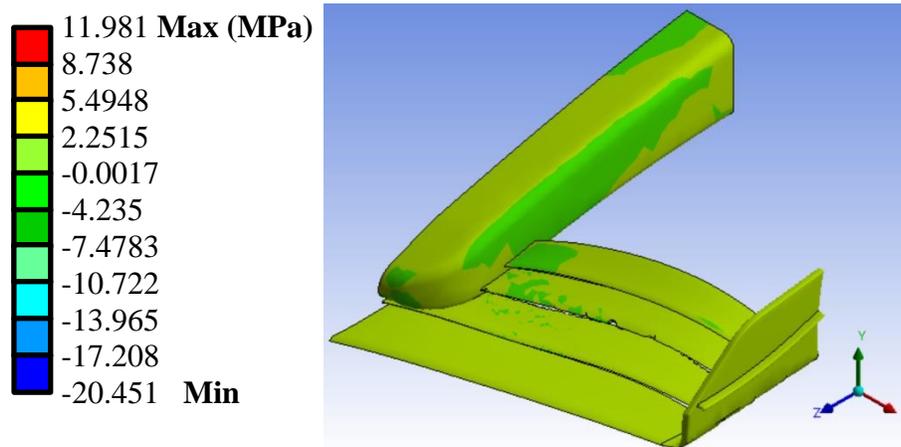


Figura IV.119.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en el CLV-54 (Vista isométrica)

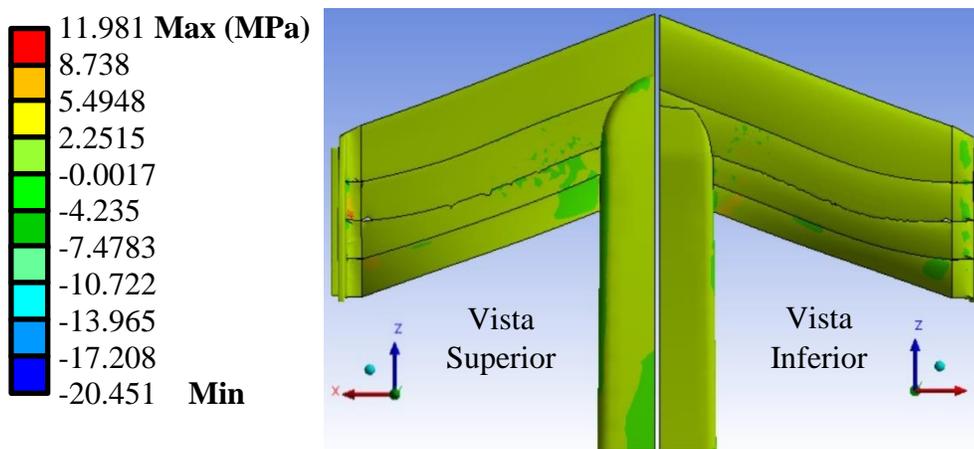


Figura IV.120.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en el CLV-54 (Vista superior e inferior)

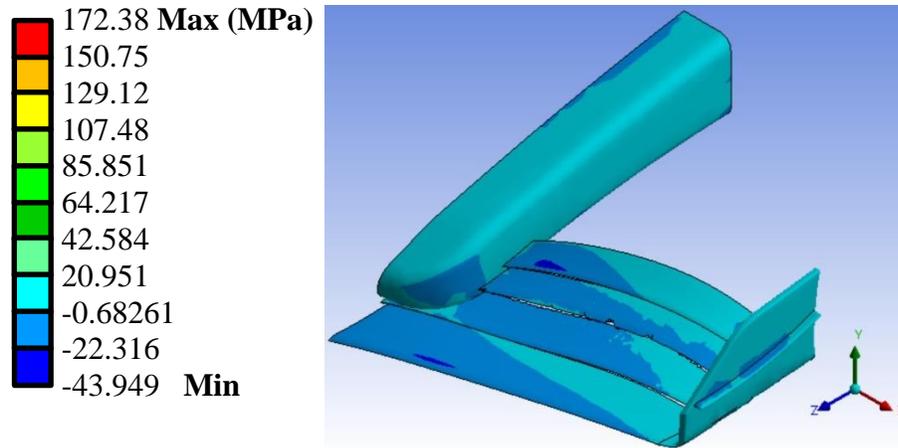


Figura IV.121.- Esfuerzos cortantes en el plano XZ en el CLV-54 (Vista isométrica)

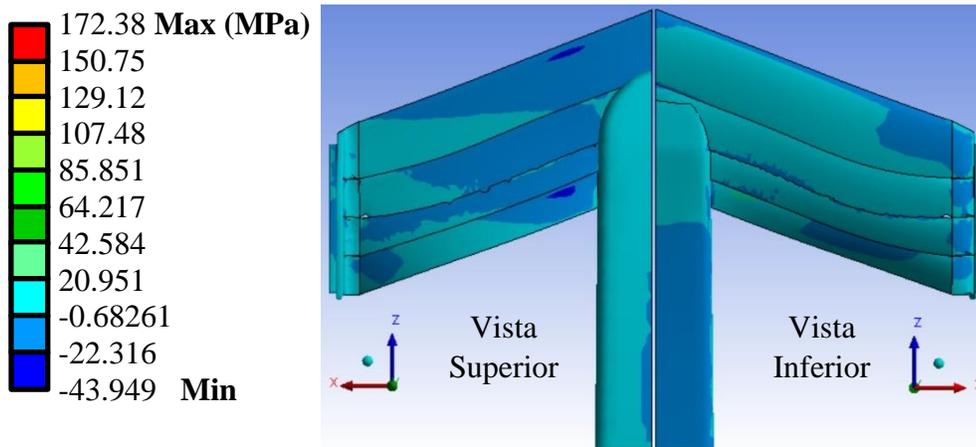


Figura IV.122.- Esfuerzos cortantes en el plano XZ en el CLV-54 (Vista superior e inferior)

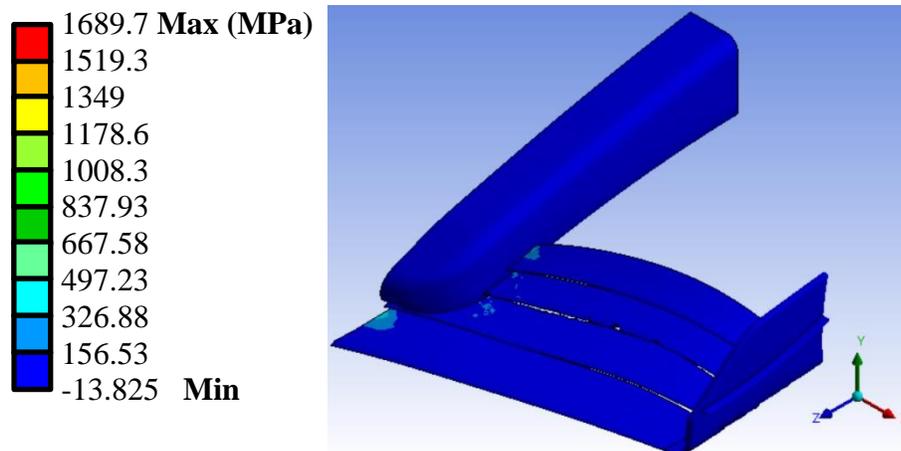


Figura IV.123.- Esfuerzos principales máximos en el CLV-54 (Vista isométrica)

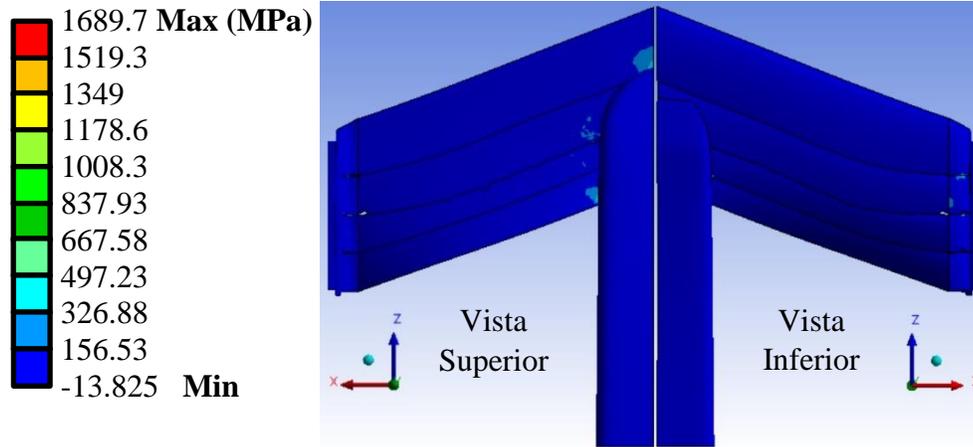


Figura IV.124.- Esfuerzos principales máximos en el CLV-54 (Vista superior e inferior)

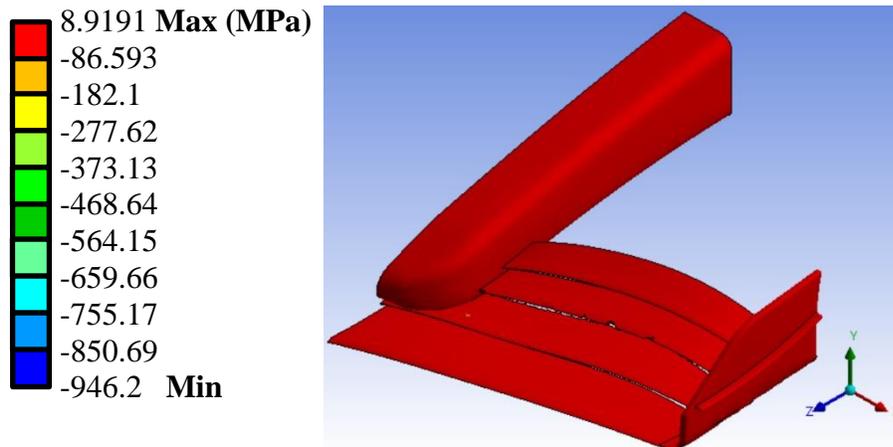


Figura IV.125.- Esfuerzos principales mínimos en el CLV-54 (Vista isométrica)

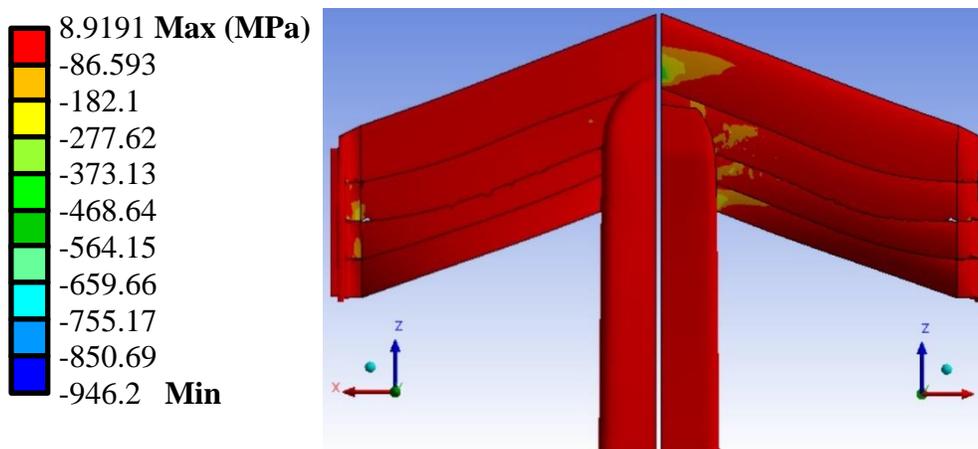


Figura IV.126.- Esfuerzos principales mínimos en el CLV-54 (Vista superior e inferior)

Tabla IV.9.- Resultados del análisis estático estructural

Resultados del CLV-54		
Desplazamiento total máximo	48.578 mm	
Desplazamientos nominales		
Eje:	Máximo	Mínimo
X	6.311 mm	-4.22 mm
Y	1.5459 mm	-45.393 mm
Z	0.30458 mm	-17.273 mm
Deformaciones unitarias totales	0.0274 mm/mm	
Esfuerzos equivalentes de Von-Mises	Max – 1665.4 MPa	
Esfuerzos nominales		
Eje:	Máximo	Mínimo
X	1668.4 MPa	-943.05 MPa
Y	47.689 MPa	-30.7 MPa
Z	23.87 MPa	-22.03 MPa
Esfuerzos cortantes		
Plano:	Máximo	Mínimo
XY	78.664 MPa	-98.935 MPa
YZ	11.981 MPa	-20.451 MPa
XZ	172.38 MPa	-43.949 MPa
Esfuerzos principales máximos	Máximo	Mínimo
	1689.7 MPa	-13.825 MPa
	Máximo	Mínimo

Esfuerzos principales mínimos	8.9191 MPa	-946.2 MPa
-------------------------------	------------	------------

IV.5.- Propuesta 3; JJRC-10

Se presenta la última propuesta de esta evaluación. Se tomaron como referencia las dos propuestas llevadas a cabo en este capítulo. Así como, los aspectos principales de los estudios desarrollados en el capítulo anterior.

IV.5.1.- Implementación del modelo

Para el diseño de la tercera propuesta (Figura IV.63) se decidió partir del uso de un perfil *S4320*. Para obtener las coordenadas de este perfil se utilizó la herramienta digital *Airfoil Tools* [IV.2]. Las coordenadas que definen la geometría de este perfil se encuentran en el Anexo 6 (Figura IV.64).

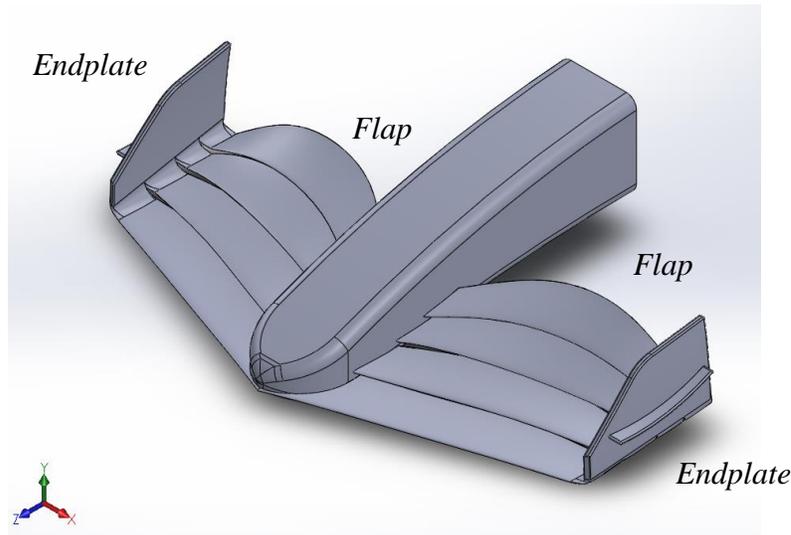


Figura IV.127.- Alerón JJRC-10

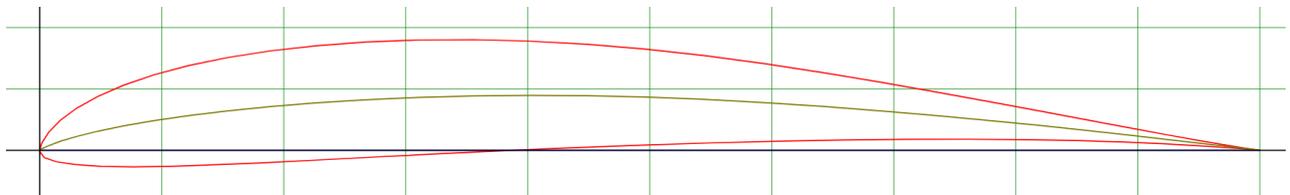


Figura IV.128.- Perfil S4320

IV.5.2.- Análisis numérico aerodinámico [III.4 y III.5]

Posterior a la elección del perfil base para el diseño del alerón se procedió al dimensionamiento de los *flaps* que conforman el cuerpo del alerón utilizando los planos de referencia. Las proyecciones

de los perfiles sobre estos planos se muestran en el Anexo 6. Debido a que el ángulo de ataque al que se encuentre el perfil influye en la carga aerodinámica que este genera, se decidió utilizar diferentes ángulos de ataque basándose en las restricciones que permite el reglamento (Tabla IV.10).

Tabla IV.10.- Ángulos de ataque máximos para los perfiles en el *JJRC-10*

Elemento	Angulo de ataque
<i>Flap 1</i>	0°
<i>Flap 2</i>	5°
<i>Flap 3</i>	17°
<i>Flap 4</i>	25.5°

Para el estudio del comportamiento aerodinámico de este alerón se realizó una simulación de dinámica de fluidos. Para esto se empleó el modelo sólido del alerón sin ningún componente estructural interno. Para realizar la simulación se hizo uso de la herramienta *Fluent* del programa computacional *ANSYS® Workbench*.

IV.5.2.1- Módulo de geometría

Al igual que el resto de las propuestas, los cuatro *flaps* que forman parte del alerón se unen en el extremo exterior para formar el *Endplate*. Las dimensiones del *Endplate* diseñado para este alerón se especifican en el Anexo 6. Posterior al modelado del alerón completo a continuación se muestra una imagen conceptual de la propuesta ya totalmente terminada (Figura IV.65).



Figura IV.129.- Diseño conceptual del *JJRC-10*

Haciendo uso del módulo de geometría se exportó el modelo realizado en el programa de diseño *CAD*; de manera seguida se definieron las dimensiones del volumen de control, el cual manteniendo la uniformidad en los estudios de esta tesis es de las mismas dimensiones que el resto de los estudios (Figura IV.66).

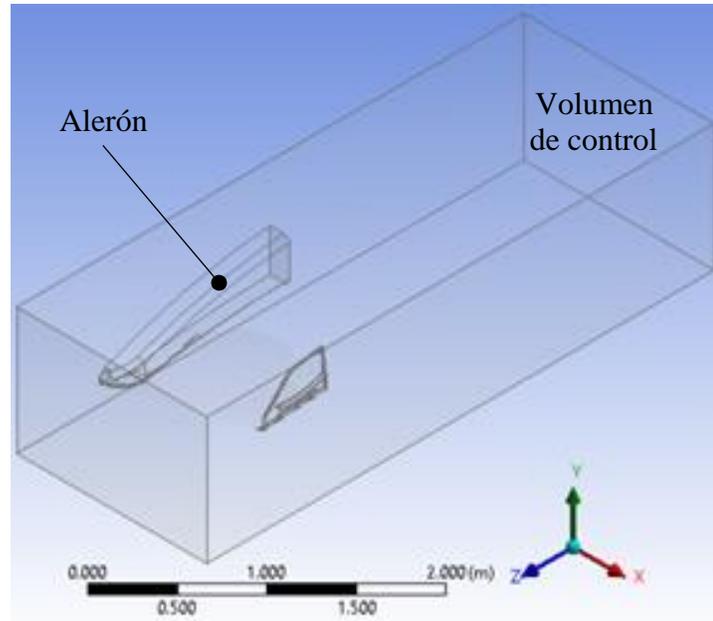


Figura IV.130.- Volumen de control

IV.5.2.2.- Método de discretizado

Se llevó a cabo el discretizado del cuerpo de estudio con parámetros de discretizado fino, controlado y con elementos de alto orden (Figura IV.67).

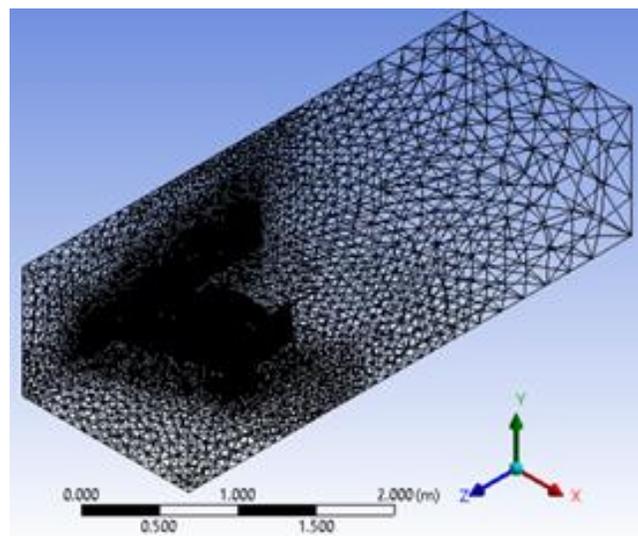


Figura IV.131.- Discretizado del alerón *JJRC-10*

IV.5.2.3.- Aplicación de las condiciones de frontera [IV.7 y IV.8]

En el módulo *setup* se definió el flujo del viento (velocidad 325 km/h) y una presión estática a la salida igual a cero. Se definen las condiciones de frontera el volumen de control (Figura IV.68).

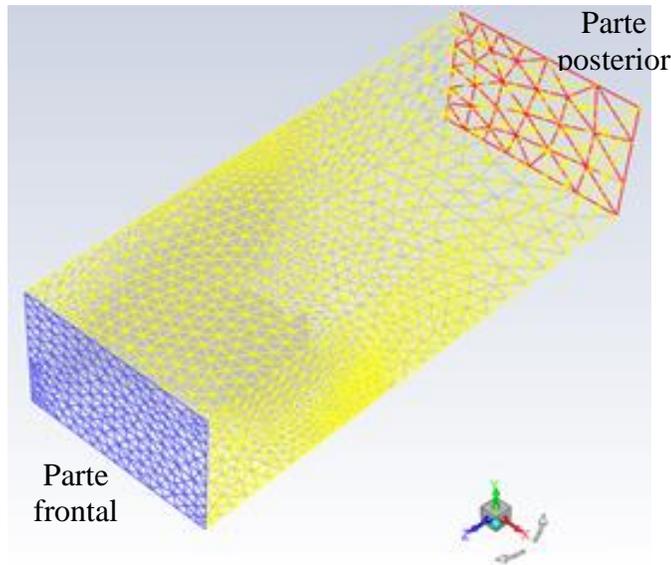


Figura IV.132.- Condiciones de frontera *JJRC-10*

IV.5.2.4.- Solución numérica

Al igual que el resto de los análisis la cantidad de iteraciones para llegar a la solución en este módulo se estableció en 100. Este proceso es llevado a cabo por el programa computacional.

IV.5.2.5.- Resultados de la evaluación numérica

En este módulo se puede visualizar los resultados del estudio de manera gráfica.

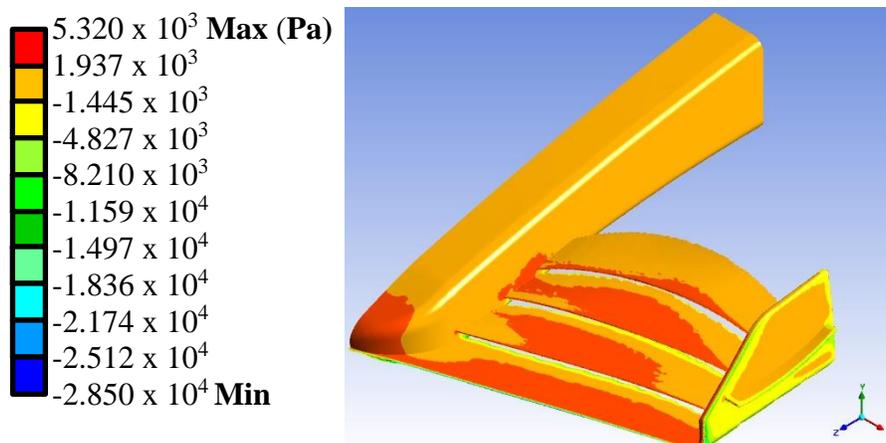


Figura IV.133.- Vista general de la presión sobre el alerón *JJRC-10*

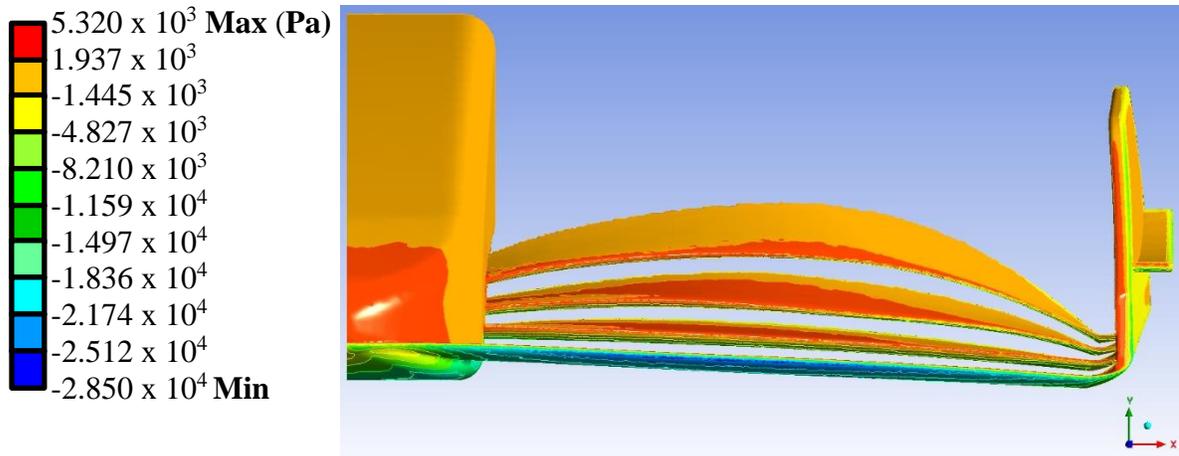


Figura IV.134.- Vista frontal de la presión sobre el alerón JJRC-10

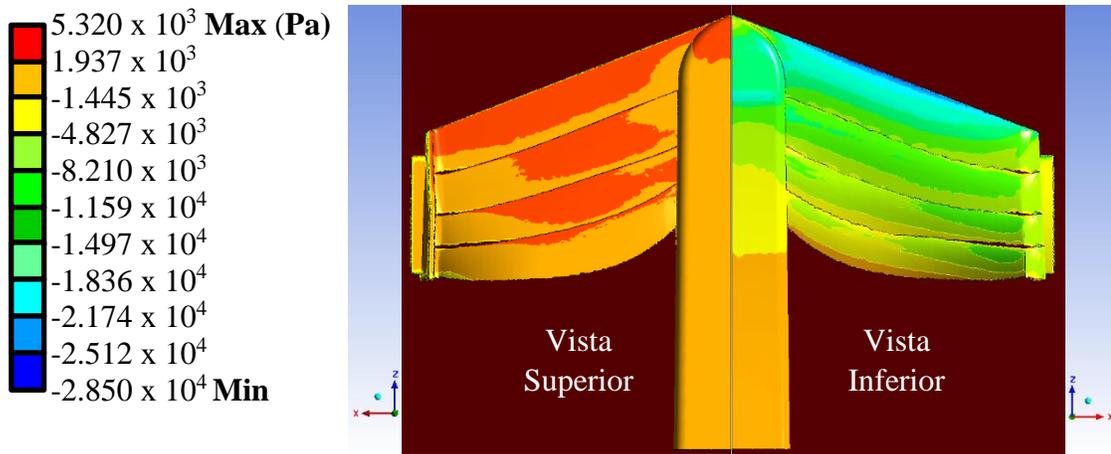


Figura IV.135.- Vista superior e inferior de la presión sobre el alerón JJRC-10

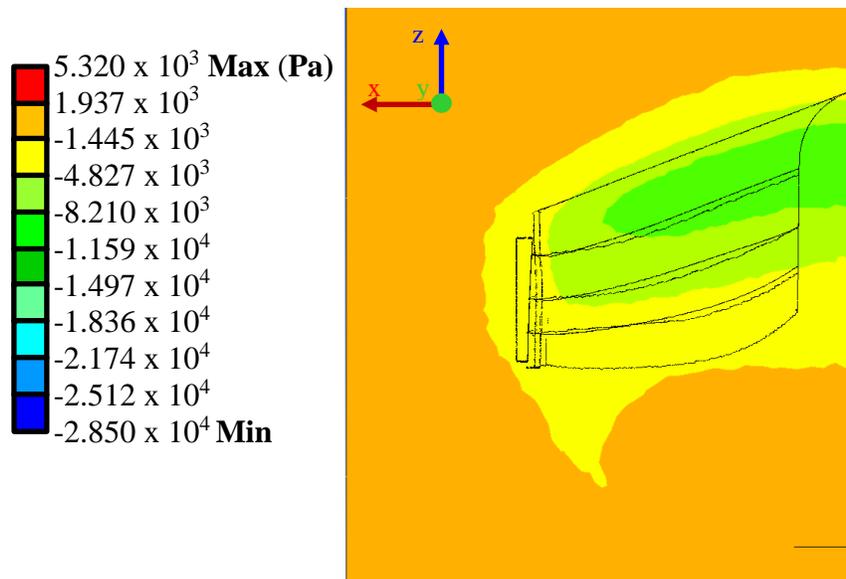


Figura IV.136.- Vista superior de la presión ejercida sobre el suelo del alerón JJRC-10

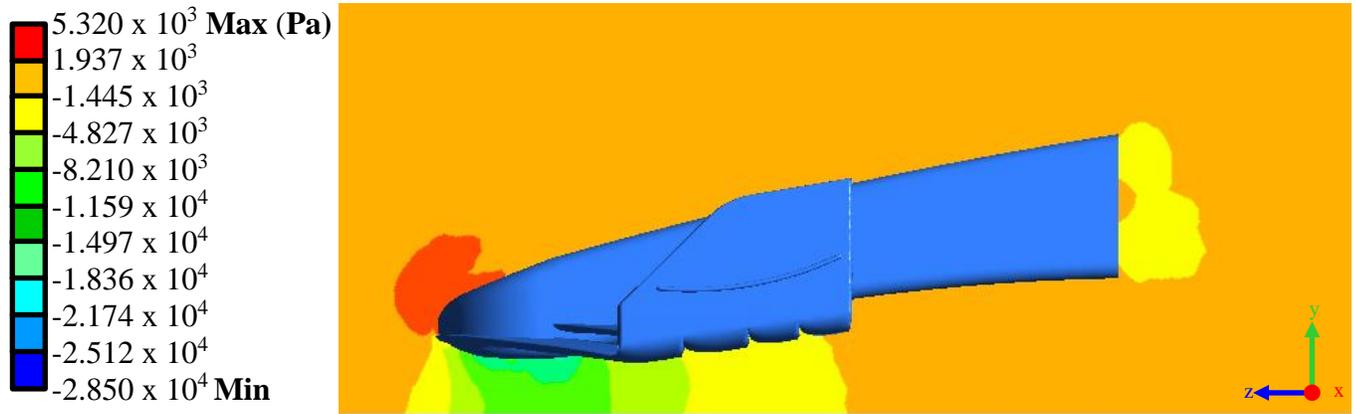


Figura IV.137.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *JJRC-10* sobre el plano medio

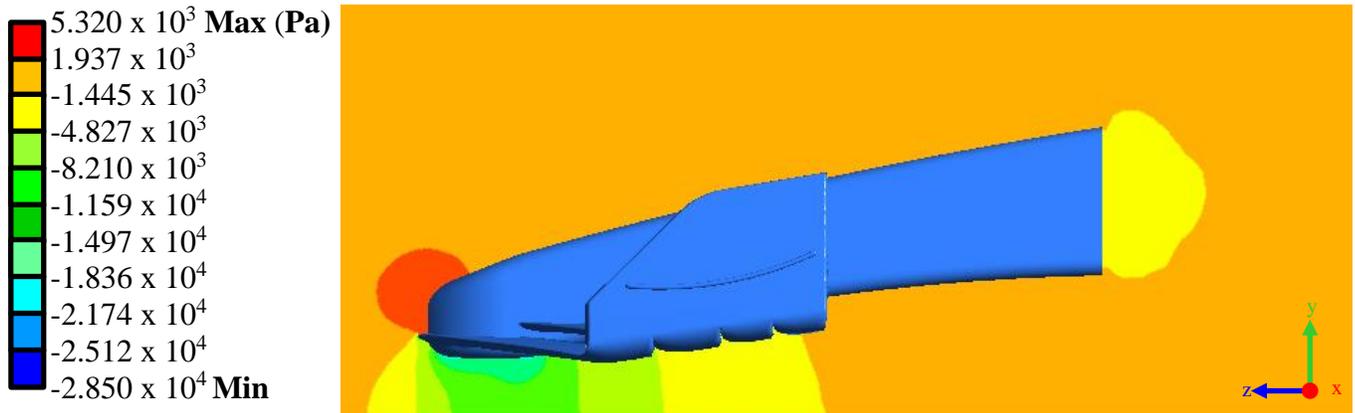


Figura IV.138.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *JJRC-10* a 100 mm del plano medio

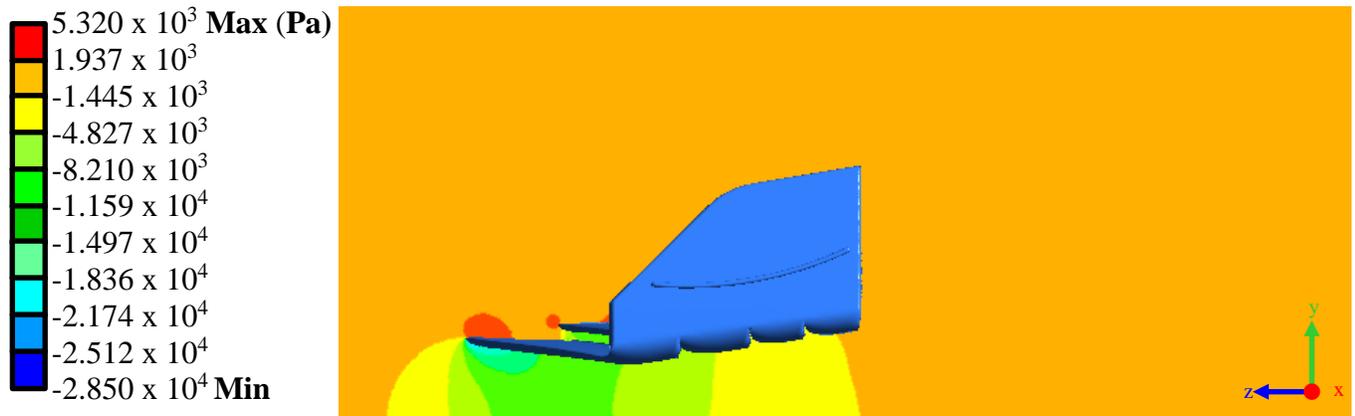


Figura IV.139.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *JJRC-10* a 250 mm del plano medio

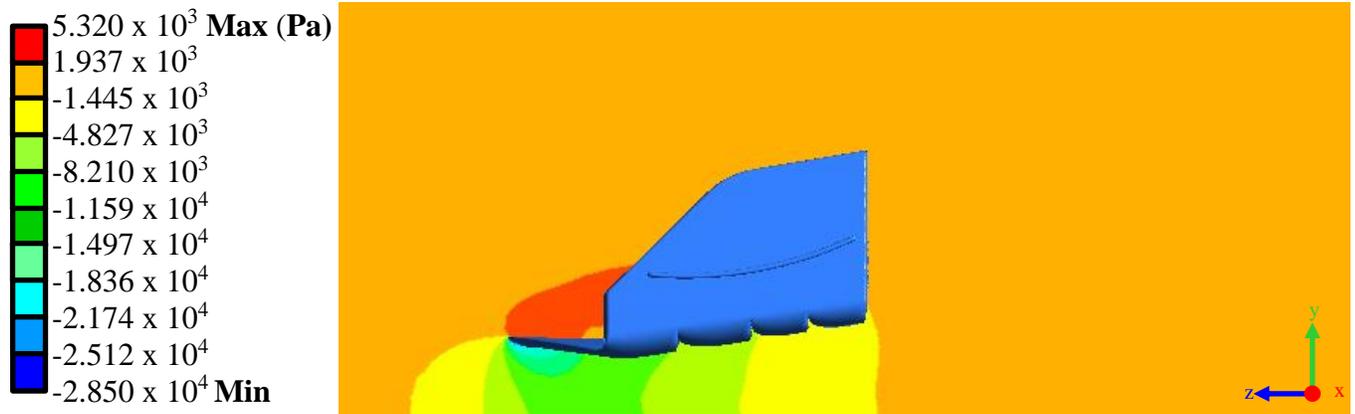


Figura IV.140.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *JJRC-10* a 500 mm del plano medio

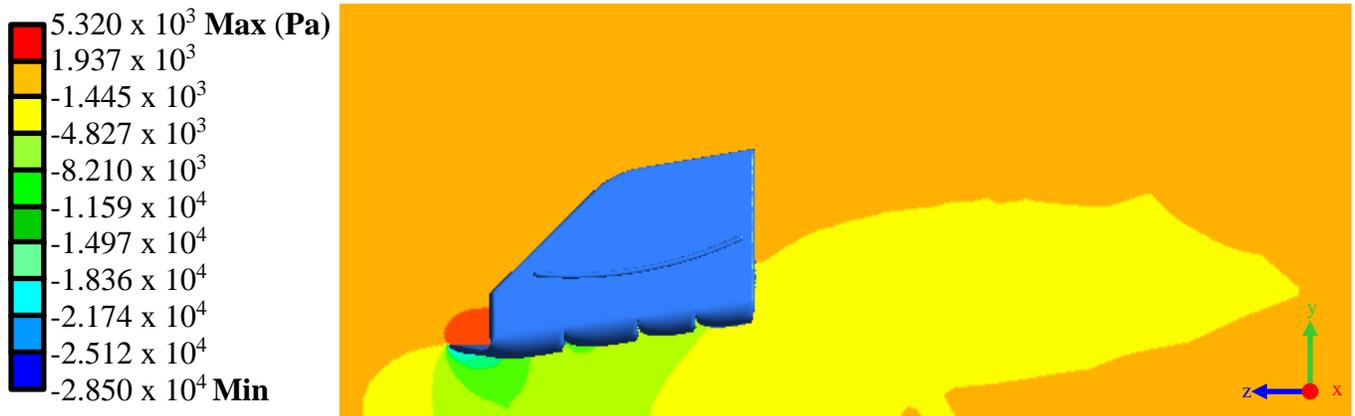


Figura IV.141.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *JJRC-10* a 750 mm del plano medio

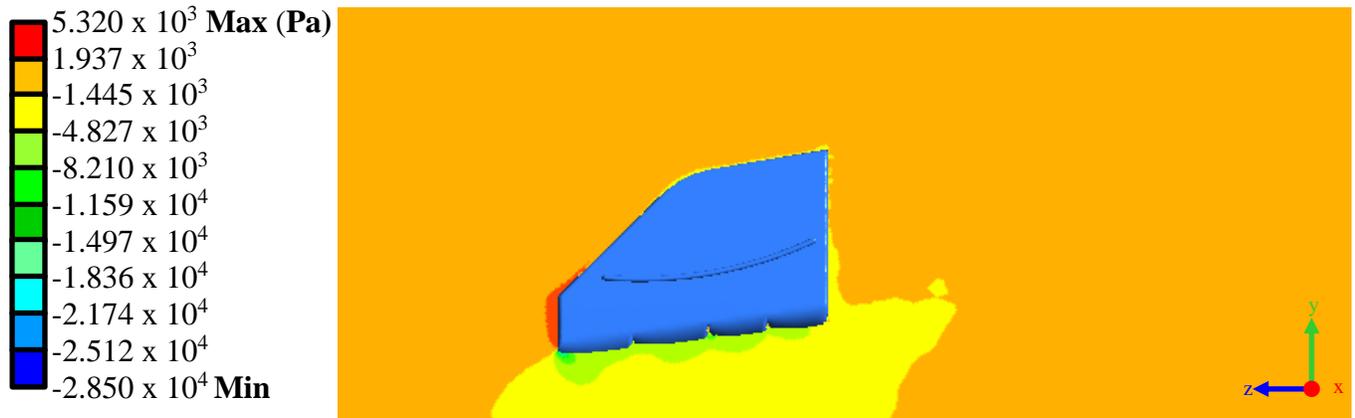


Figura IV.142.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del alerón *JJRC-10* a 950 mm del plano medio

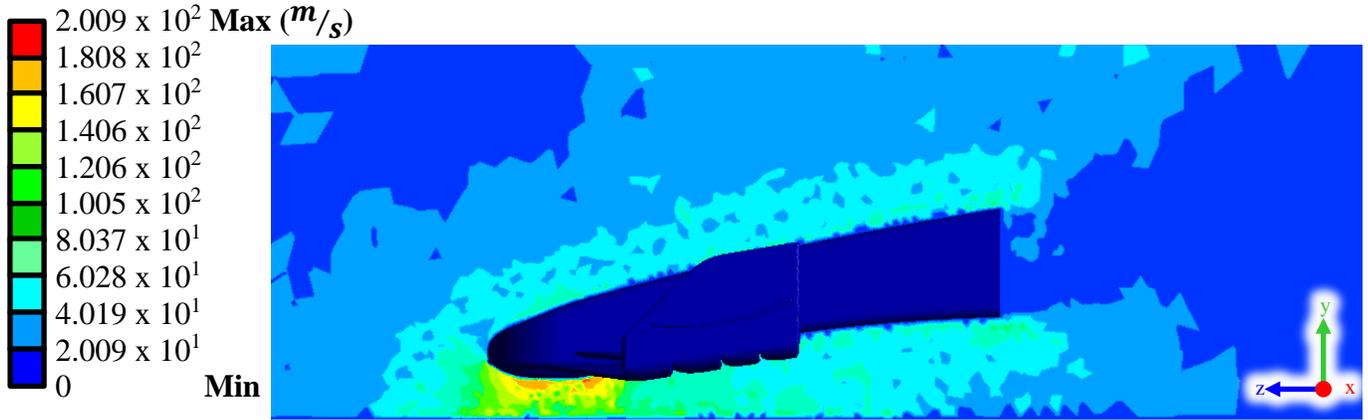


Figura IV.143.- Velocidad del viento sobre alerón JJRC-10 en plano medio del alerón

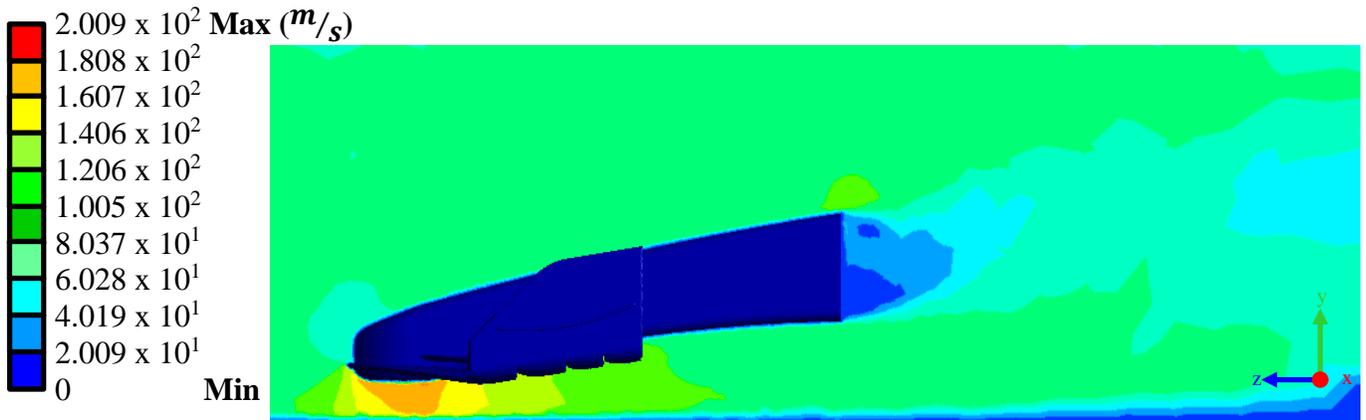


Figura IV.144.- Velocidad del viento sobre alerón JJRC-10 a 100 mm del plano medio del alerón

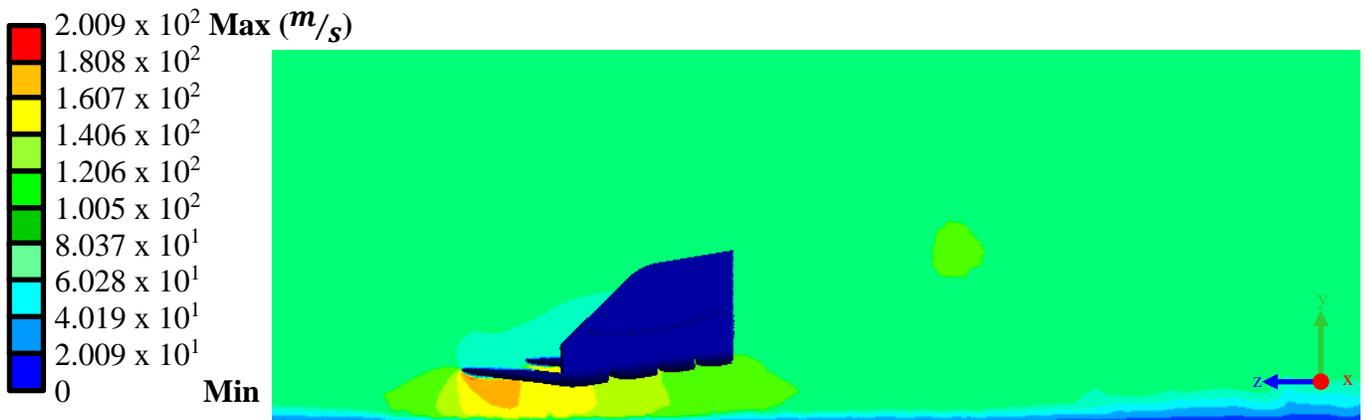


Figura IV.145.- Velocidad del viento sobre alerón JJRC-10 a 250 mm del plano medio del alerón

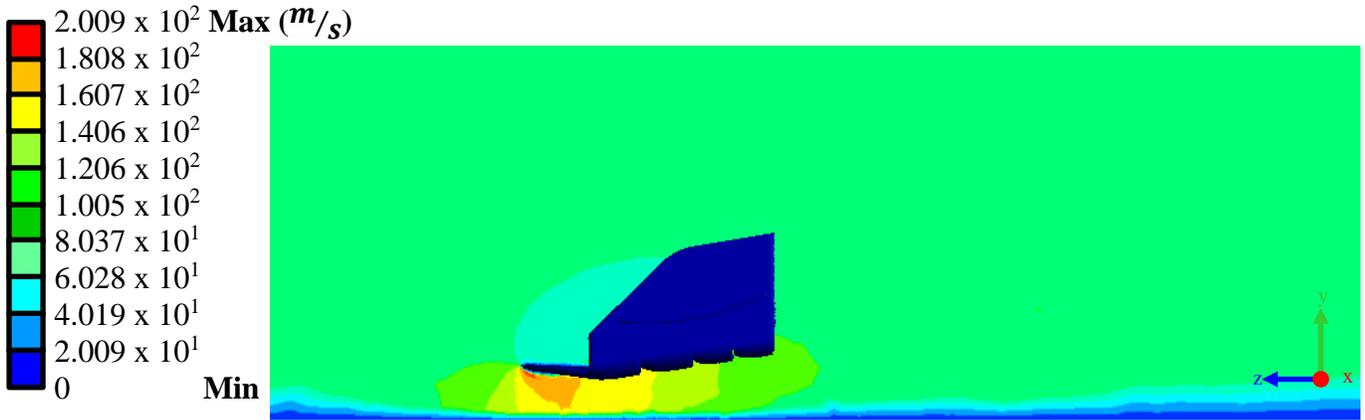


Figura IV.146.- Velocidad del viento sobre alerón *JJRC-10* a 500 mm del plano medio del alerón

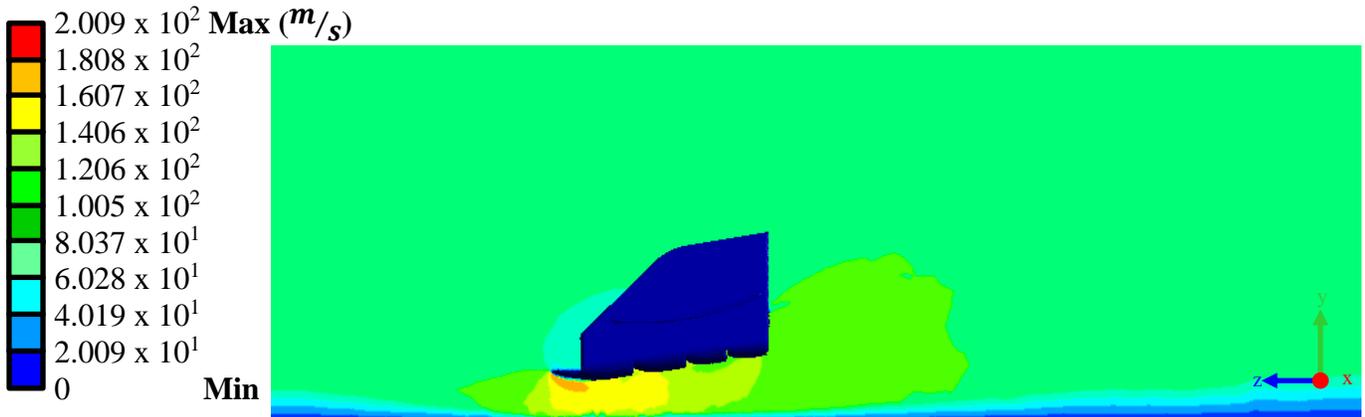


Figura IV.147.- Velocidad del viento sobre alerón *JJRC-10* a 750 mm del plano medio del alerón

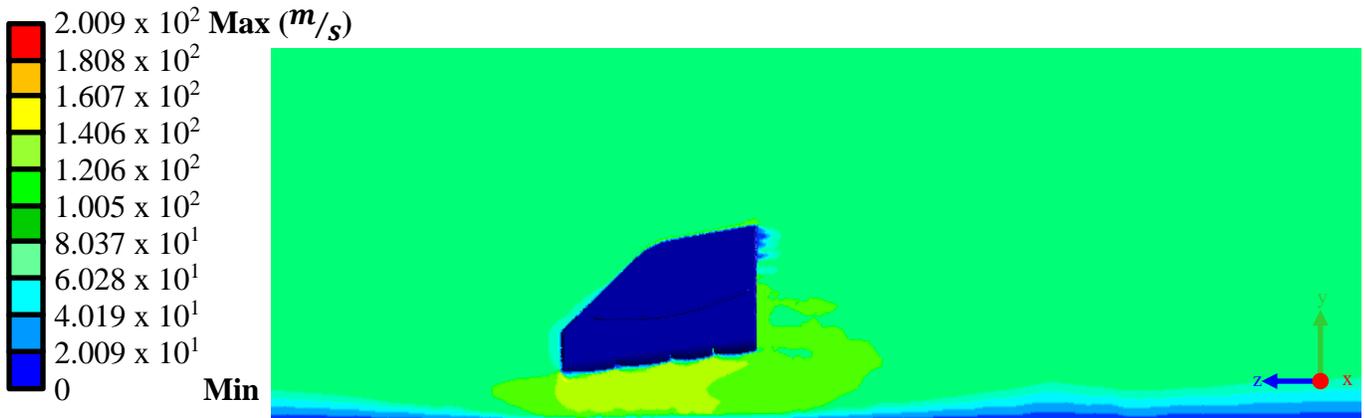


Figura IV.148.- Velocidad del viento sobre alerón *JJRC-10* a 950 mm del plano medio del alerón

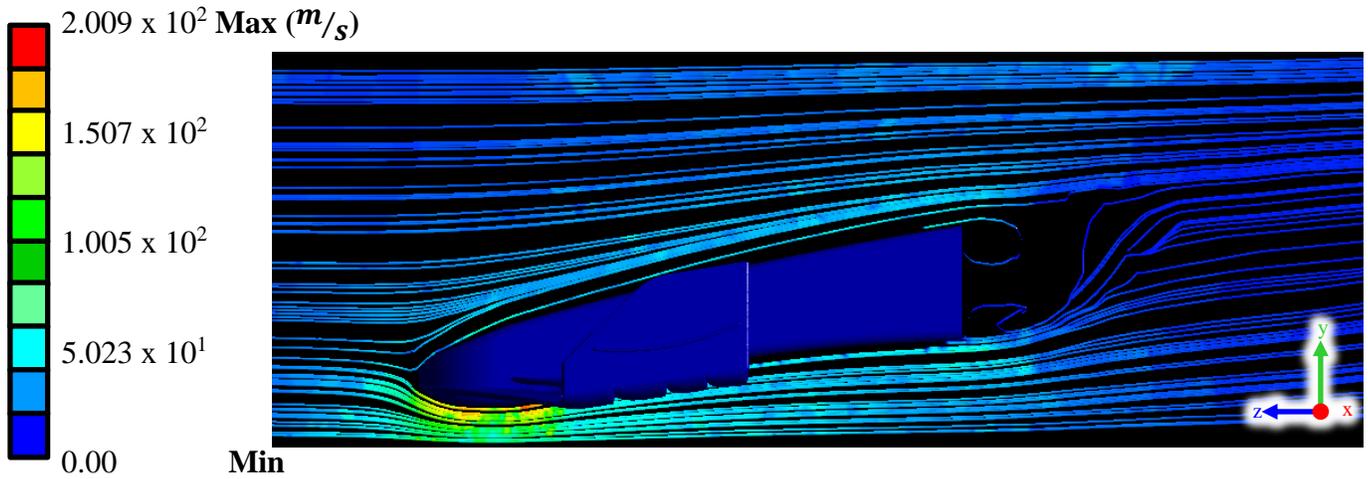


Figura IV.149.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *JJRC-10* sobre plano medio

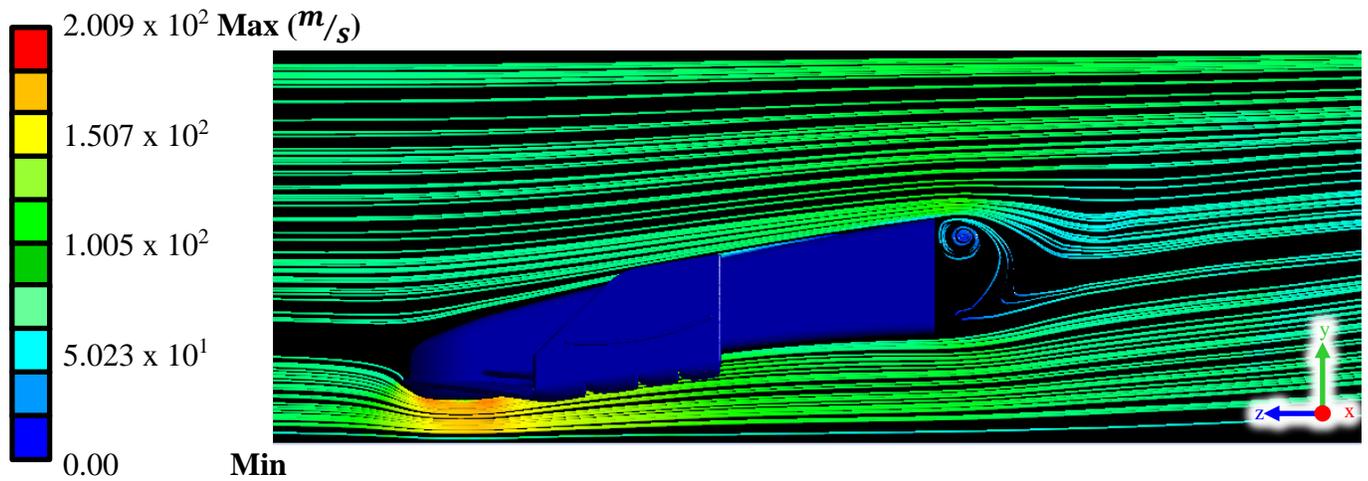


Figura IV.150.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *JJRC-10* a 100 mm sobre plano medio

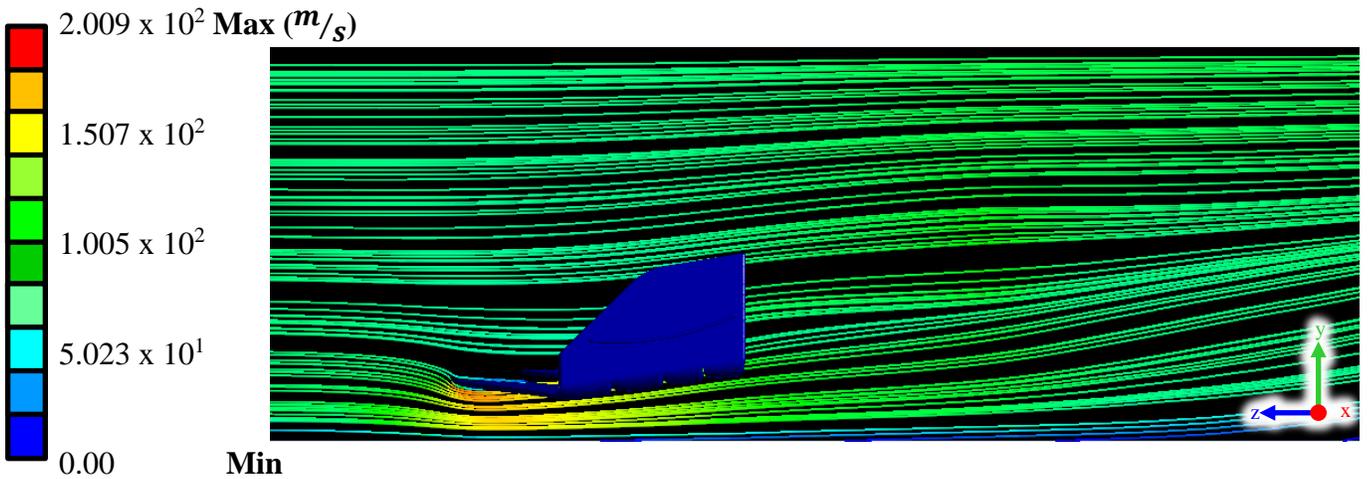


Figura IV.151.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *JJRC-10* a 250 mm sobre plano medio

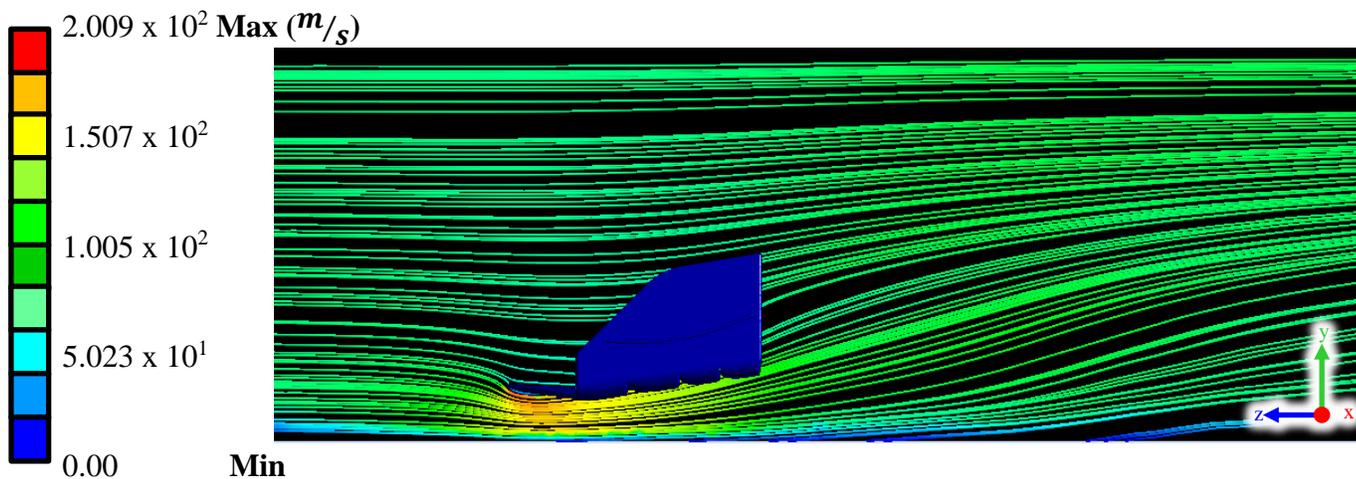


Figura IV.152.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *JJRC-10* a 500 mm sobre plano medio

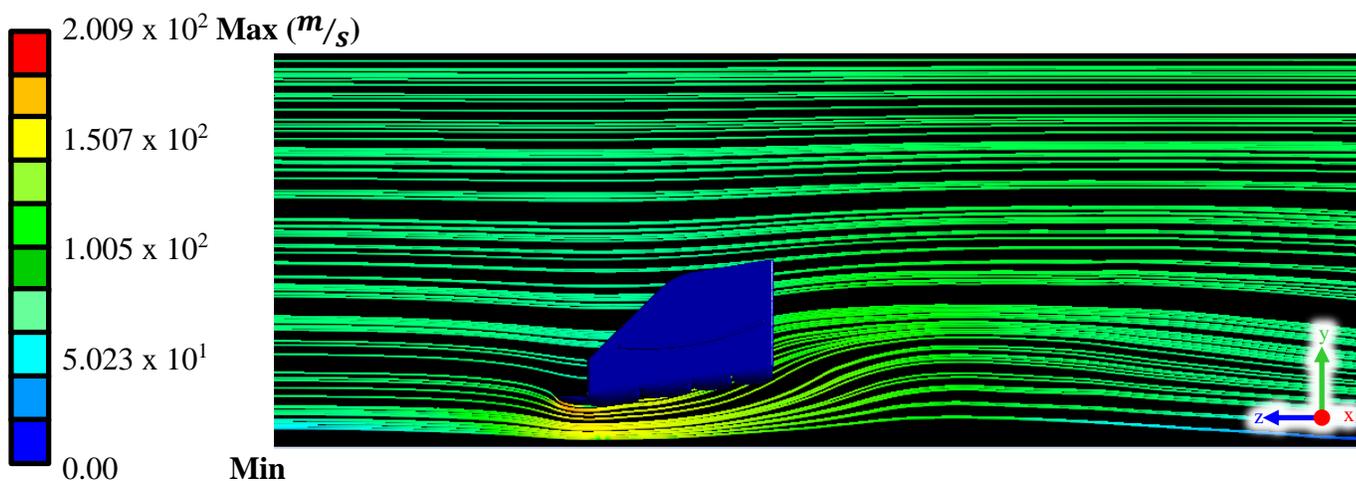


Figura IV.153.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *JJRC-10* a 750 mm sobre plano medio

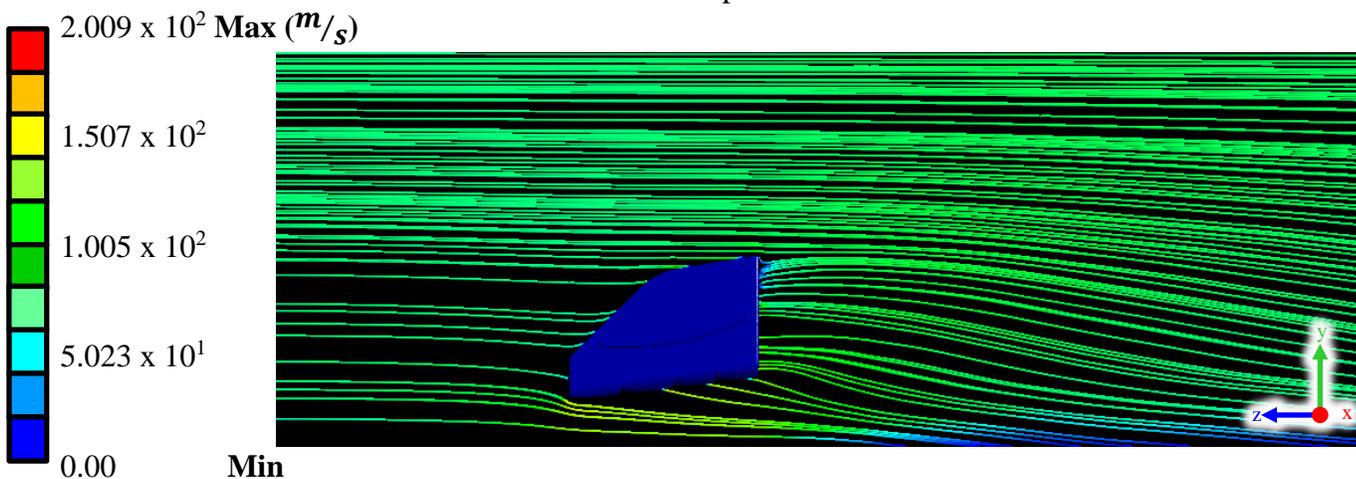


Figura IV.154.- Vista lateral línea de flujo alrededor del alerón *JJRC-10* a 950 mm sobre plano medio

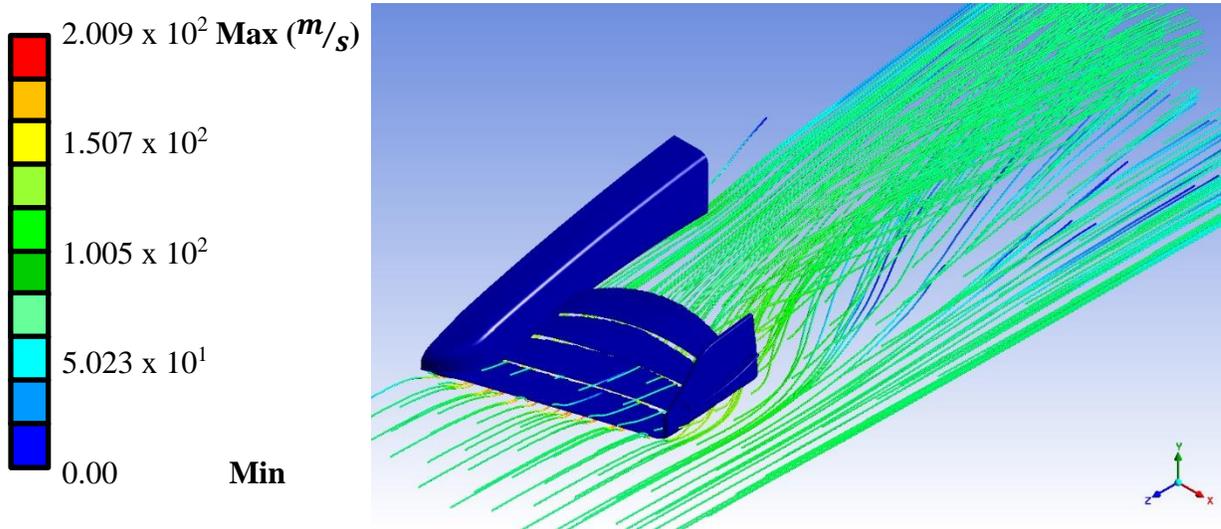


Figura IV.155.- Flujo de vórtice alrededor del alerón *JJRC-10*

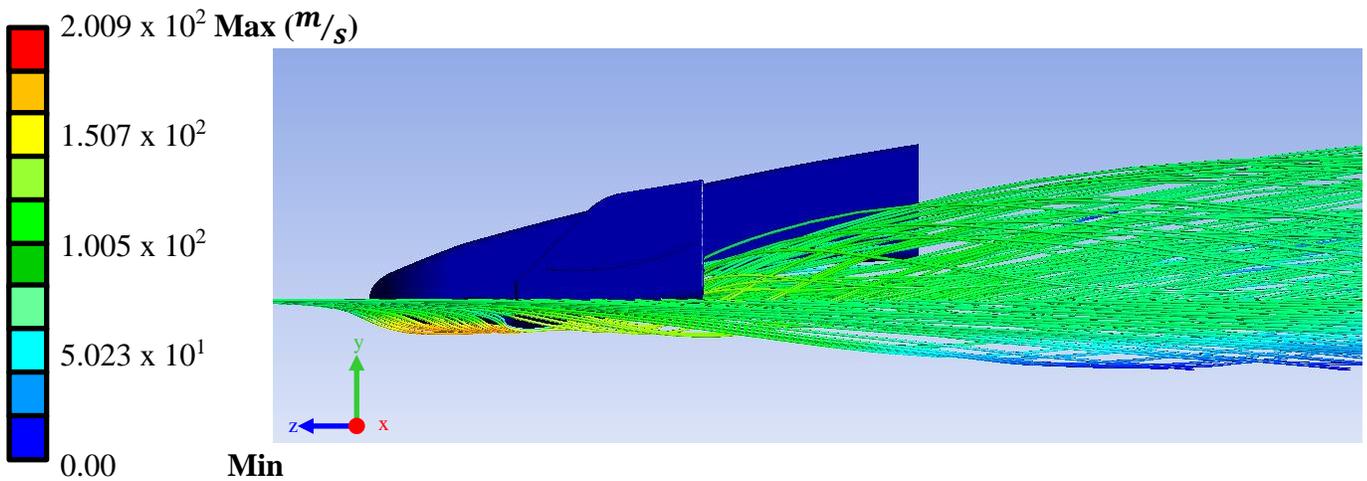


Figura IV.156.- Vista lateral del flujo de vórtice alrededor del alerón *JJRC-10*

El módulo de resultados también nos ofrece el cálculo total de fuerzas que actúan sobre el alerón *JJRC-10*, con esto se puede conocer la magnitud de las fuerzas tanto *Downforce* como de arrastre. Las cuales servirán para poder realizar una comparación entre los diferentes cuerpos de estudio.

Tabla IV.11.- Fuerzas sobre el alerón *JJRC-10*

Fuerza	Magnitud
<i>Downforce</i>	5996.91 N
Arrastre	551.571 N

IV.5.3.- Acoplamiento multi-físico

Utilizando el módulo *System Coupling* del software *ANSYS® Workbench* se conecta el *setup* de *fluent* y el *setup* de *Static structural* para transferir los datos de las cargas que generan las presiones del aire sobre el alerón *JJRC-10* para así poder desarrollar un análisis estructural y obtener los resultados correspondientes (Figura IV.157).

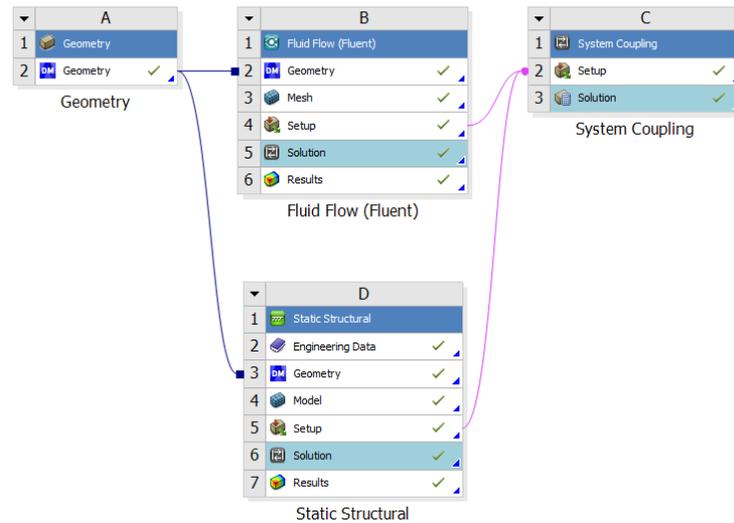


Figura IV.157.- Acoplamiento multi-físico para el *JJRC-10*

IV.5.4.- Análisis numérico estático estructural [IV.9]

Para evaluación de esta propuesta se realizó igualmente una simulación estática estructural sobre el alerón. Para realizar la simulación se utilizó la herramienta *Static Structural* del programa computacional *ANSYS® Workbench*.

IV.5.4.1.- Módulo de geometría

Al igual que en la propuesta anterior, este módulo sirve para exportar la geometría necesaria para llevar a cabo el análisis estático estructural. La geometría exportada desde el software de diseño CAD hacia la herramienta *Static Structural* se puede visualizar a continuación (Figura IV.158).

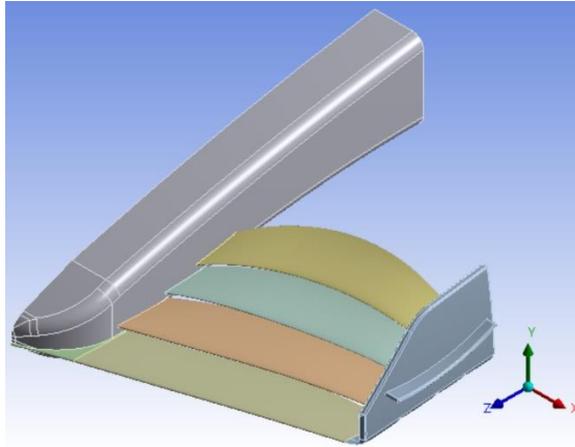


Figura IV.158.- Geometría del JJRC-10 en *Static Structural*

IV.5.4.2.- Método de discretizado

El modelo del alerón JJRC-10 se discretizo con parámetros de discretizado fino, controlado y con elementos de alto orden para poder obtener resultados más cercanos a la realidad. El resultado del proceso de discretizado se puede apreciar de la siguiente manera (Figura IV.159) [IV.6].

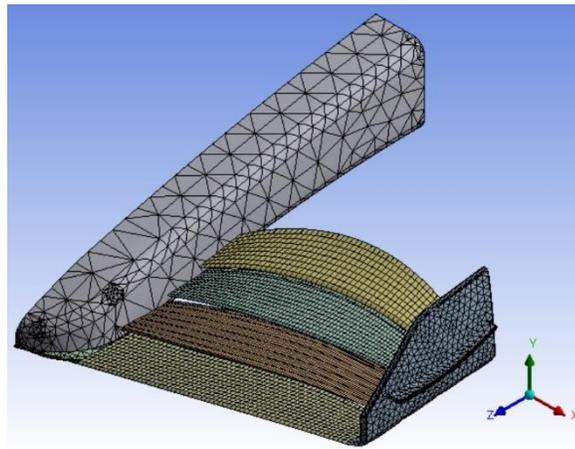


Figura IV.159.- Discretizado del alerón JJRC-10

IV.5.4.3.- Aplicación de las condiciones de frontera [IV.7 y IV.9]

Al igual que la propuesta anterior se seleccionó como material la fibra de carbono *Hexcel HM63* de 12 000 filamentos, las propiedades físicas de este material se especifican en la Tabla IV.5.

Posterior a definir el material del que está constituido el alerón es necesario colocar las restricciones de movimiento, para este caso en particular se colocó un apoyo fijo en el extremo de la nariz que

se encuentran unida al resto del monoplaza. Posterior a definir las condiciones de frontera el alerón se puede visualizar de la siguiente manera (Figura IV.160).

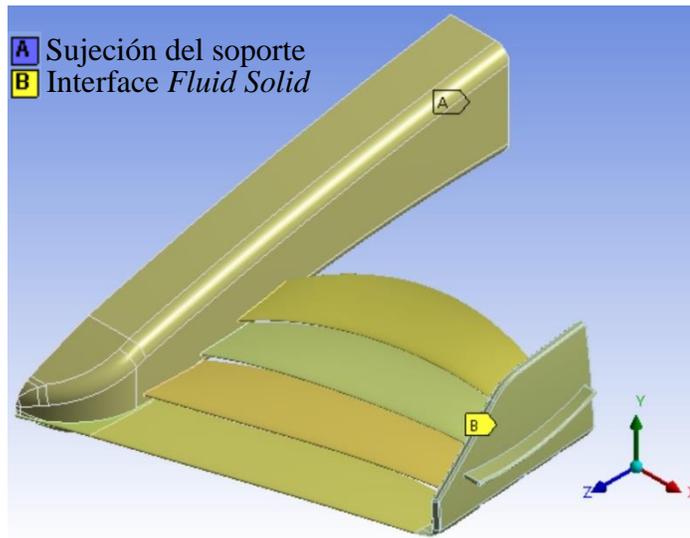


Figura IV.160.- Condiciones de frontera del *JJRC-10*

IV.5.4.4.- Resultados de la evaluación numérica estática estructural

En esta sección se puede visualizar los resultados del estudio de manera gráfica, los cuales incluyen resultados de desplazamientos (generales y nominales), deformaciones unitarias y esfuerzos (falla (Von Mises y cortantes), nominales y principales (máximos y mínimos)).

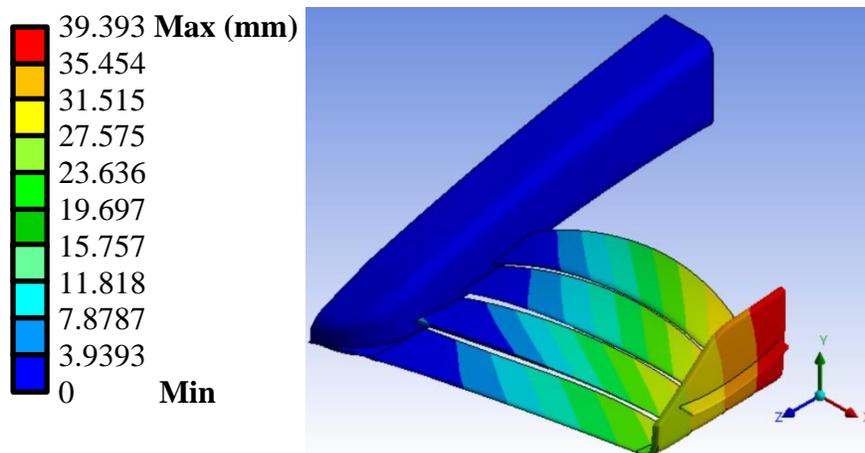


Figura IV.161.- Desplazamientos totales en el *JJRC-10* (Vista isométrica)

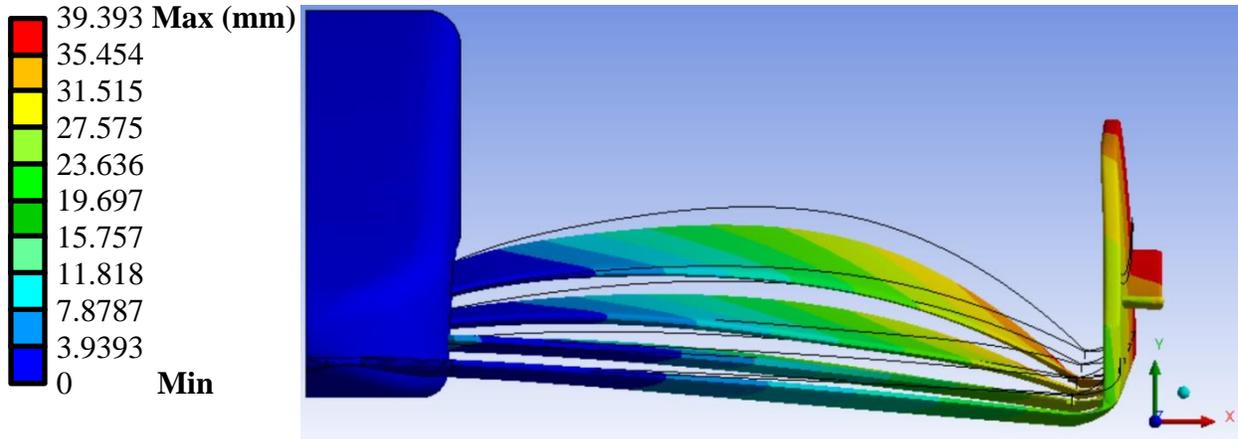


Figura IV.162.- Desplazamientos totales en el JJRC-10 desde la vista frontal (la silueta en negro es la figura del alerón antes de deformarse)

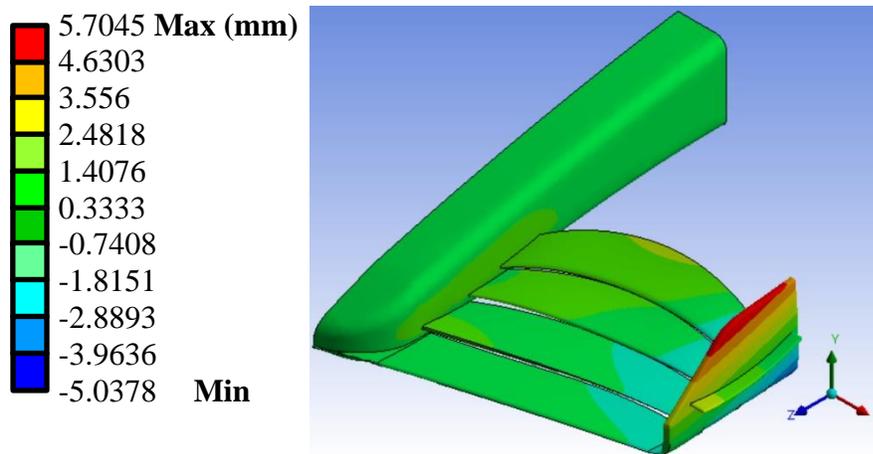


Figura IV.163.- Desplazamientos nominales del eje X en el JJRC-10 (Vista isométrica)

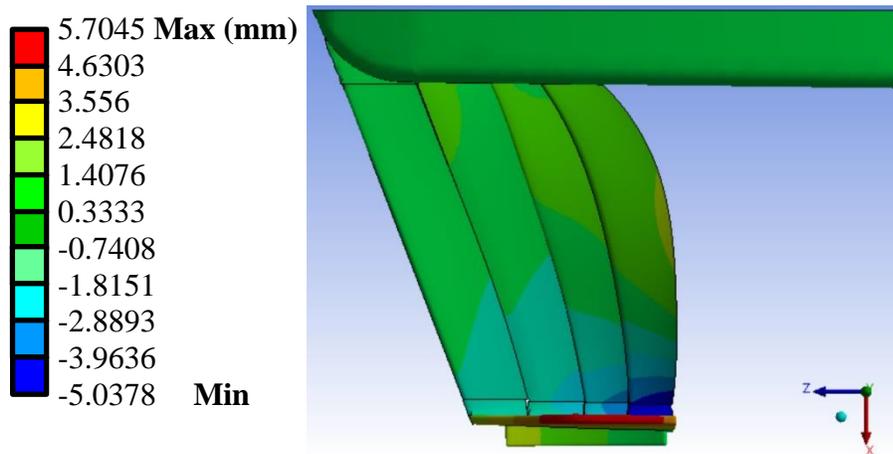


Figura IV.164.- Desplazamientos nominales del eje X en el JJRC-10 (Vista superior)

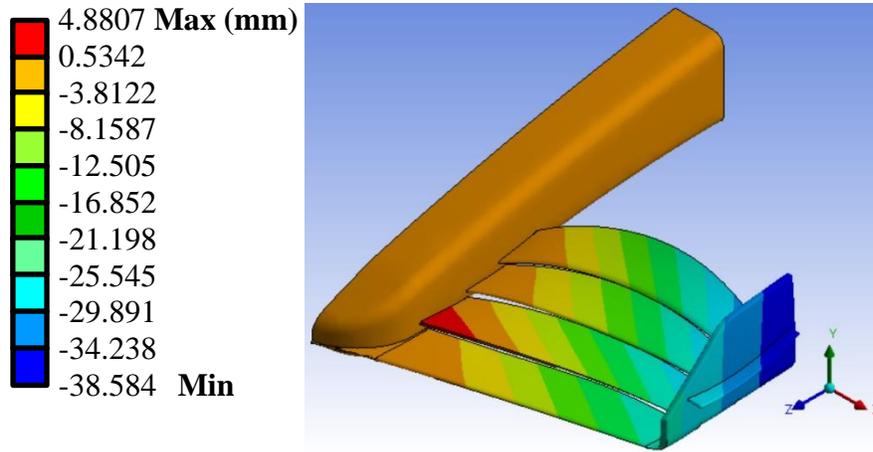


Figura IV.165.- Desplazamientos nominales del eje Y en el JJRC-10 (Vista isométrica)

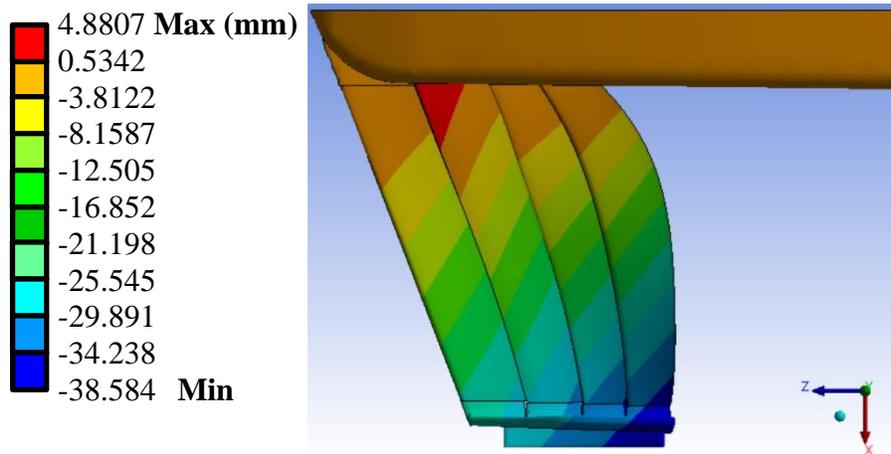


Figura IV.166.- Desplazamientos nominales del eje Y en el JJRC-10 (Vista superior)

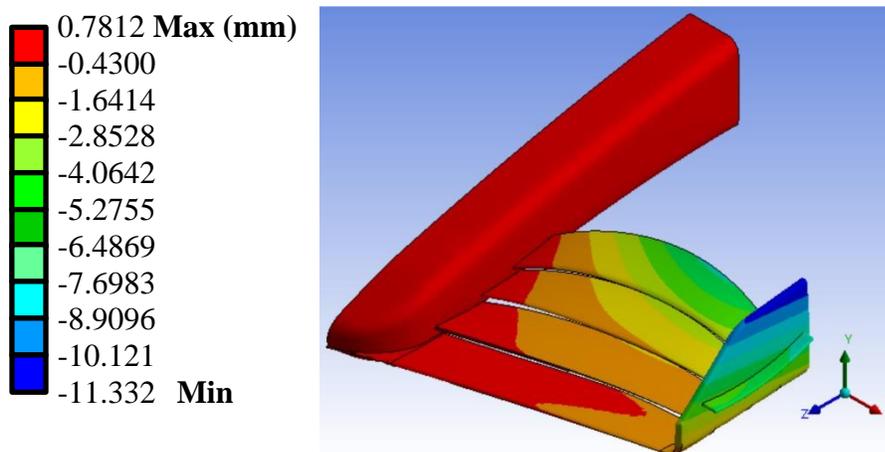


Figura IV.167.- Desplazamientos nominales del eje Z en el JJRC-10 (Vista isométrica)

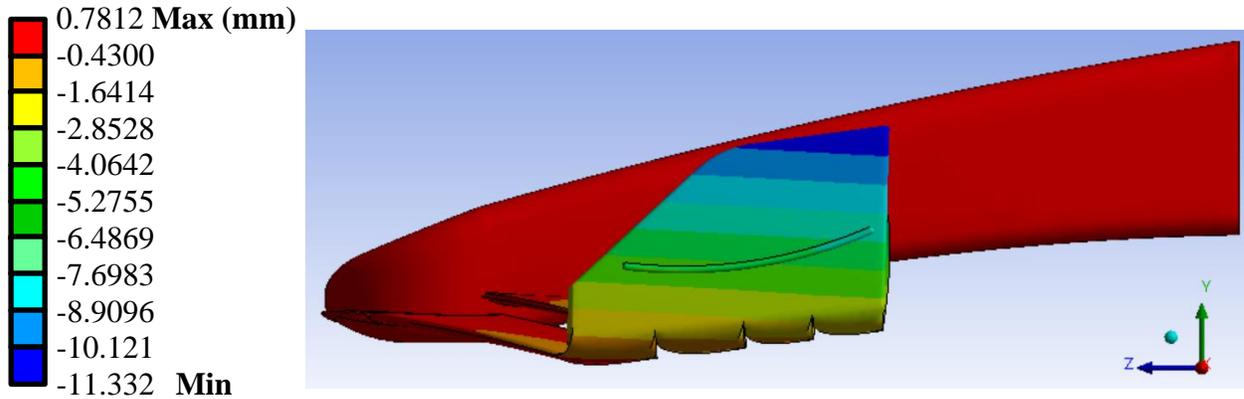


Figura IV.168.- Desplazamientos nominales del eje Z en el JJRC-10 (Vista lateral)

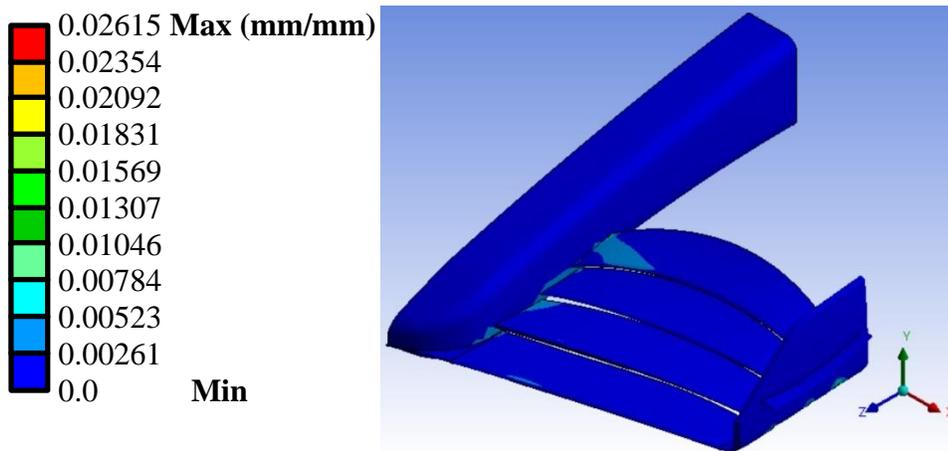


Figura IV.169.- Deformaciones unitarias totales en el JJRC-10 (Vista isométrica)

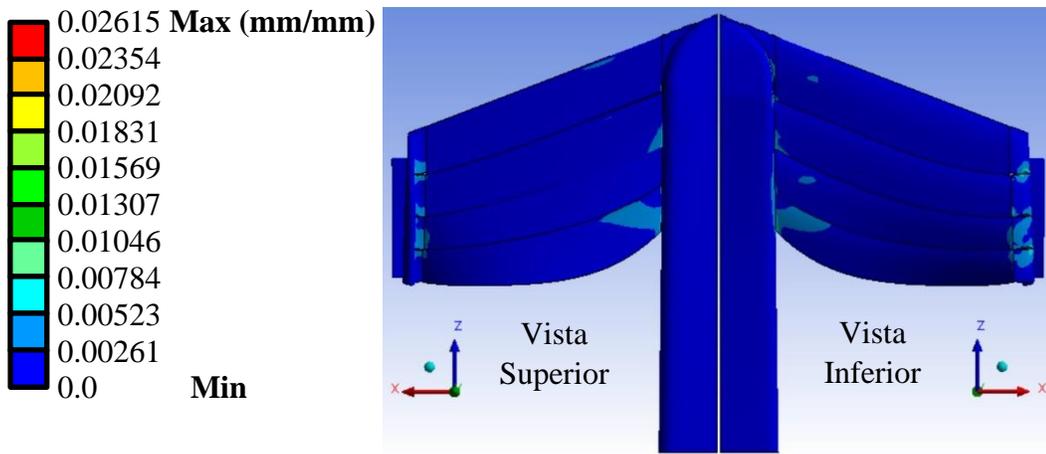


Figura IV.170.- Deformaciones unitarias totales en el JJRC-10 (Vista superior e inferior)

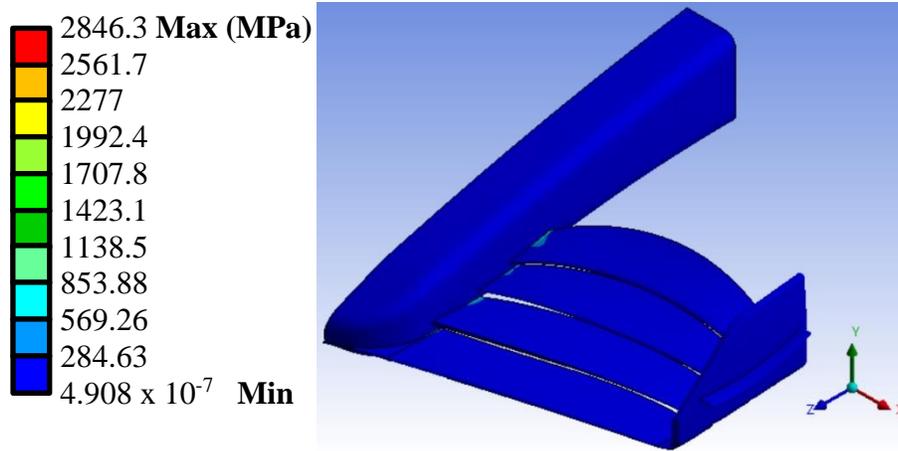


Figura IV.171.- Esfuerzos equivalentes *Von Mises* en el JJRC-10 (Vista isométrica)

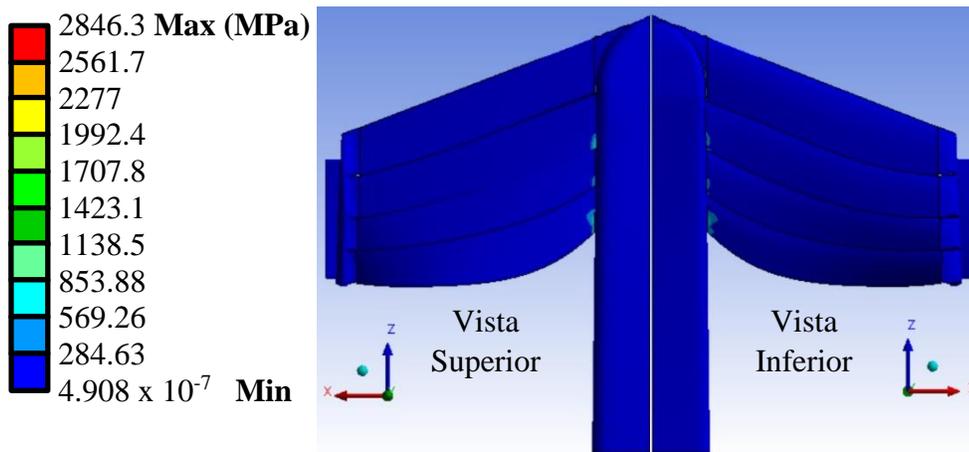


Figura IV.172.- Esfuerzos equivalentes *Von Mises* en el JJRC-10 (Vista superior e inferior)

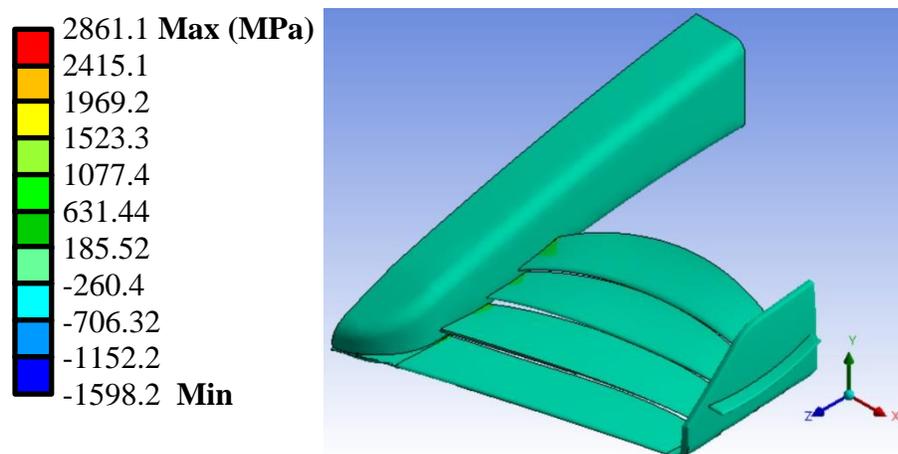


Figura IV.173.- Esfuerzos nominales en el eje X en el JJRC-10 (Vista isométrica)

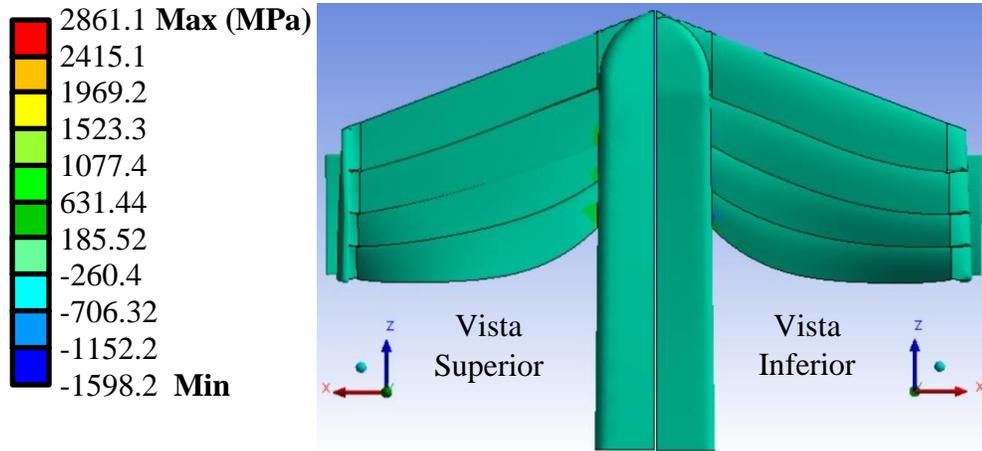


Figura IV.174.- Esfuerzos nominales en el eje X en el JJRC-10 (Vista superior e inferior)

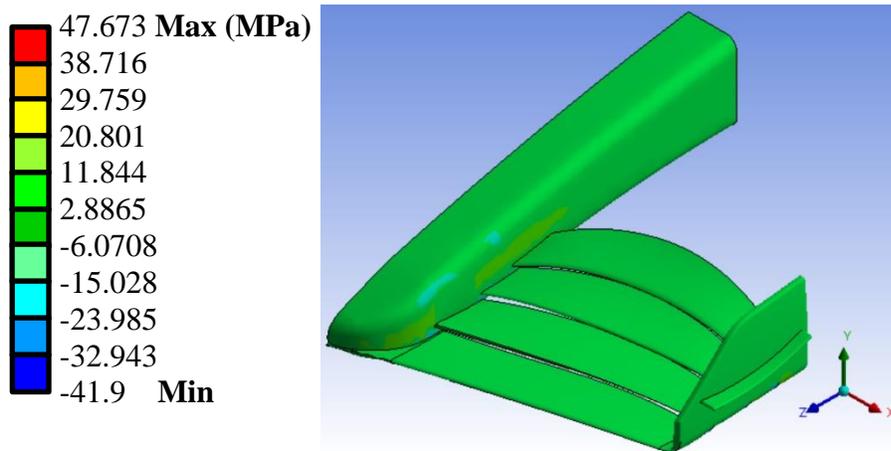


Figura IV.175.- Esfuerzos nominales en el eje Y en el JJRC-10 (Vista isométrica)

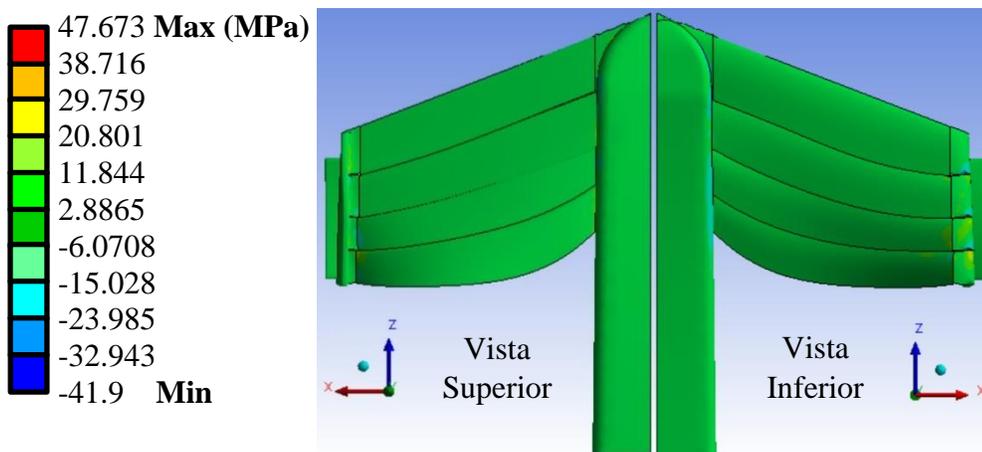


Figura IV.176.- Esfuerzos nominales en el eje Y en el JJRC-10 (Vista superior e inferior)

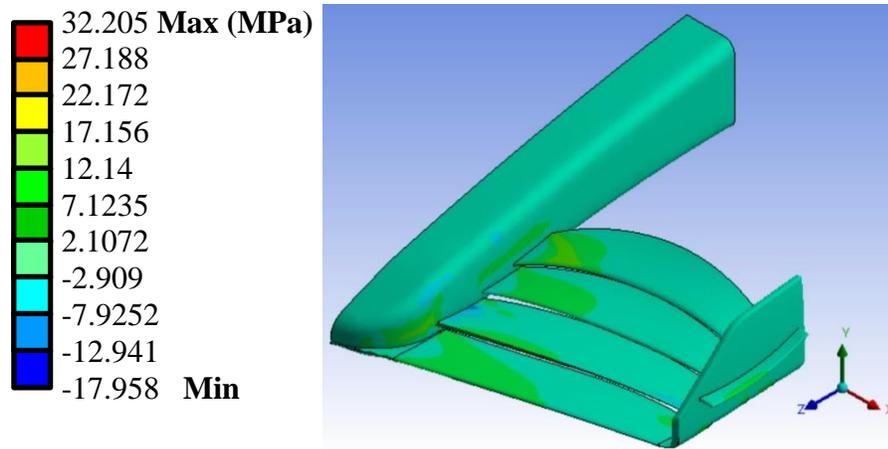


Figura IV.177.- Esfuerzos nominales en el eje Z en el JJRC-10 (Vista isométrica)

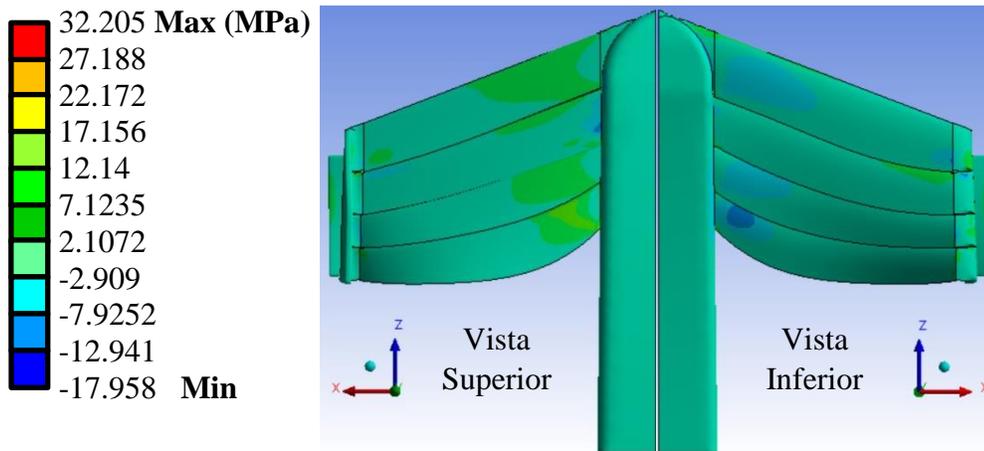


Figura IV.178.- Esfuerzos nominales en el eje Z en el JJRC-10 (Vista superior e inferior)

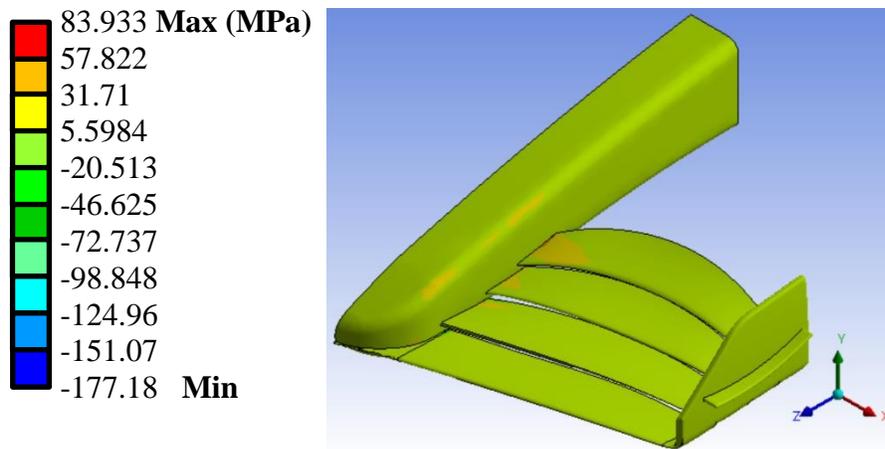


Figura IV.179.- Esfuerzos cortantes en el plano XY en el JJRC-10 (Vista isométrica)

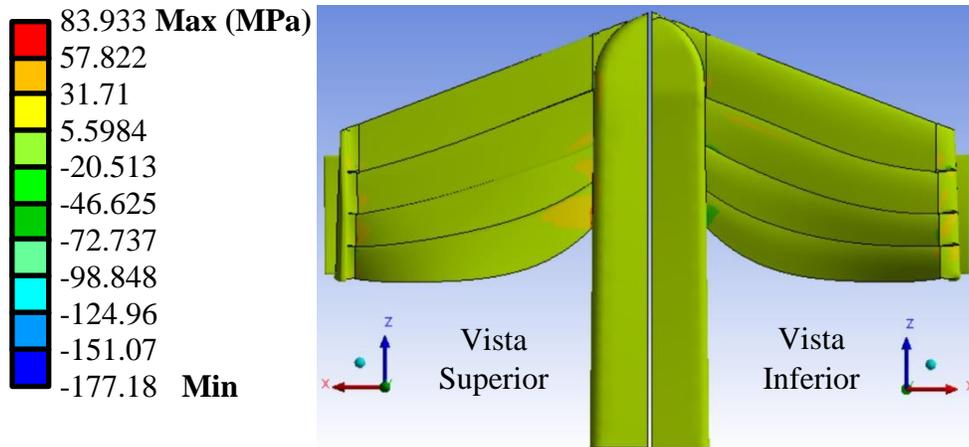


Figura IV.180.- Esfuerzos cortantes en el plano XY en el JJRC-10 (Vista superior e inferior)

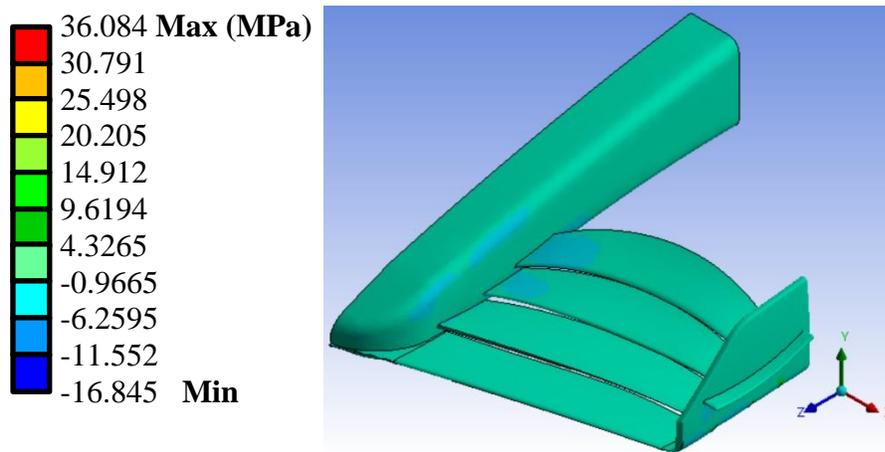


Figura IV.181.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en el JJRC-10 (Vista isométrica)

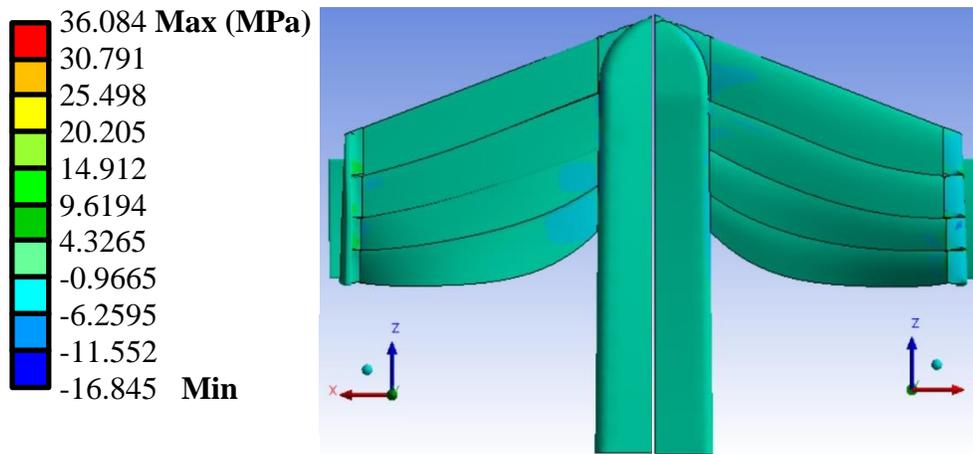


Figura IV.182.- Esfuerzos cortantes en el plano YZ en el JJRC-10 (Vista superior e inferior)

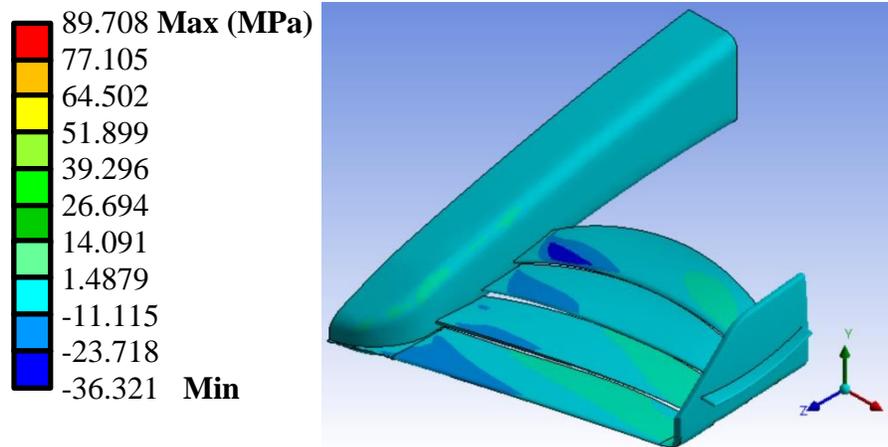


Figura IV.183.- Esfuerzos cortantes en el plano XZ en el JJRC-10 (Vista isométrica)

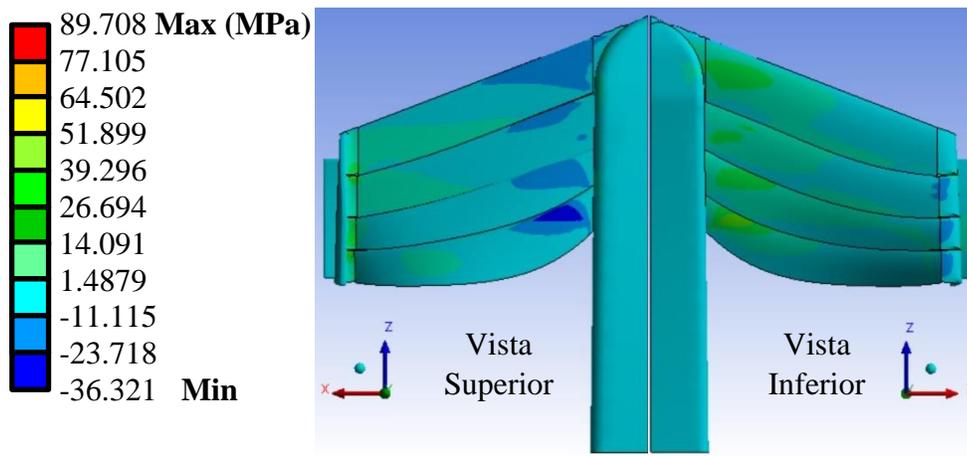


Figura IV.184.- Esfuerzos cortantes en el plano XZ en el JJRC-10 (Vista superior e inferior)

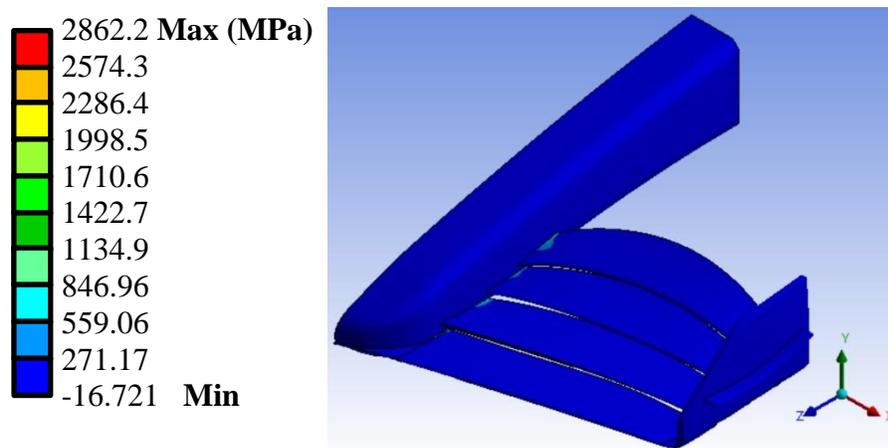


Figura IV.185.- Esfuerzos principales máximos en el JJRC-10 (Vista isométrica)

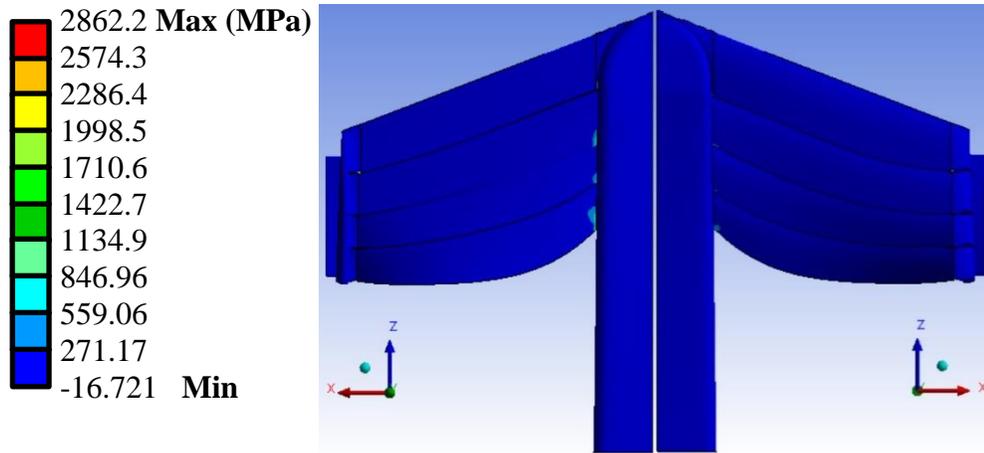


Figura IV.186.- Esfuerzos principales máximos en el JJRC-10 (Vista superior e inferior)

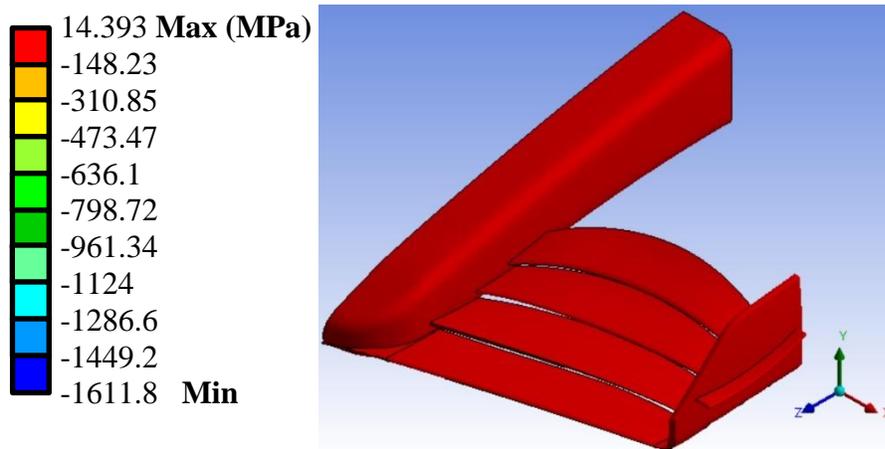


Figura IV.187.- Esfuerzos principales mínimos en el JJRC-10 (Vista isométrica)

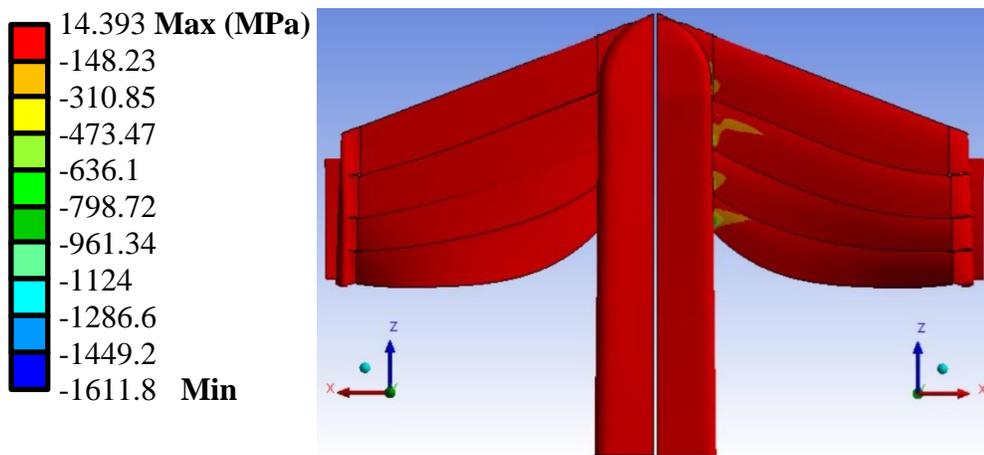


Figura IV.188.- Esfuerzos principales mínimos en el JJRC-10 (Vista superior e inferior)

Tabla IV.12.- Resultados del análisis estático estructural

Resultados del JJRC-10		
Desplazamiento total máximo	39.393 mm	
Desplazamientos nominales		
Eje:	Máximo	Mínimo
X	5.7045 mm	-5.0378 mm
Y	4.8807 mm	-38.584 mm
Z	0.7812 mm	-11.332 mm
Deformaciones unitarias totales	0.02615 mm/mm	
Esfuerzos equivalentes de Von-Mises	Max – 2846.3 MPa	
Esfuerzos nominales		
Eje:	Máximo	Mínimo
X	2861.1 MPa	-1598.2 MPa
Y	47.673 MPa	-41.9 MPa
Z	32.205 MPa	-17.958 MPa
Esfuerzos cortantes		
Plano:	Máximo	Mínimo
XY	83.933 MPa	-177.18 MPa
YZ	36.084 MPa	-16.845 MPa
XZ	89.708 MPa	-36.321 MPa
Esfuerzos principales máximos	Máximo	Mínimo
	2862.2 MPa	-16.721 MPa
	Máximo	Mínimo

Esfuerzos principales mínimos	14.393 MPa	-1611.8 MPa
-------------------------------	------------	-------------

IV.6.- Comparación de resultados

A continuación, se presenta una comparación de los resultados obtenidos para los estudios aerodinámicos de cada alerón propuesto.

Tabla IV.13.- Resumen de resultados aerodinámicos para las tres propuestas evaluadas

Alerón					
<i>MICC-75</i>		<i>CLV-54</i>		<i>JJRC-10</i>	
Presiones del aire sobre y alrededor del alerón (Pa)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
5.387 x 10 ³	-2.778 x 10 ⁴	5.166 x 10 ³	-1.995 x 10 ⁴	5.320 x 10 ³	-2.850 x 10 ⁴
Velocidades del aire alrededor del alerón (m/s)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
1.926 x 10 ²	0	1.869 x 10 ²	0	2.009 x 10 ²	0
Fuerza de Downforce máxima (N)					
5773.54		5807.87		5996.91	
Fuerza de Arrastre máxima (N)					
495.789		685.785		551.571	
Relación Arrastre-Downforce (%)					
8.587		11.807		9.197	

Al igual que con los resultados de los estudios aerodinámicos también se realizó una comparativa de los resultados de los estudios estáticos estructurales que se presenta a continuación.

Tabla IV.14.- Resumen de resultados estructurales para las tres propuestas evaluadas

Alerón					
<i>MICC-75</i>		<i>CLV-54</i>		<i>JJRC-10</i>	
Desplazamiento total máximo (mm)					
50.321 mm		48.578		39.393	
Desplazamientos nominales en el eje X (mm)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
2.1938	-5.1756	6.311	-4.22	5.7045	-5.0378

Desplazamientos nominales en el eje Y					
(mm)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
0.06408	-46.345	1.5459	-45.393	4.8807	-38.584
Desplazamientos nominales en el eje Z					
(mm)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
0.4294	-20.426	0.30458	-17.273	0.7812	-11.332
Deformaciones unitarias totales					
(mm/mm)					
0.023155		0.0274		0.02615	
Esfuerzos equivalentes Máximos de Von-Mises					
(MPa)					
3310.5		1665.4		2846.3	
Esfuerzos nominales en eje X					
(MPa)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
3315	-1565.9	1668.4	-943.05	2861.1	-1598.2
Esfuerzos nominales en eje Y					
(MPa)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
79.632	-27.762	47.689	-30.7	47.673	-41.9
Esfuerzos nominales en eje Z					
(MPa)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
40.433	-40.706	23.87	-22.03	32.205	-17.958
Esfuerzos cortantes en el plano XY					
(MPa)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
105.33	-172.19	78.664	-98.935	83.933	-177.18
Esfuerzos cortantes en el plano YZ					
(MPa)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
19.951	-36.034	11.981	-20.451	36.084	-16.845
Esfuerzos cortantes en el plano XZ					
(MPa)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
98.949	-183.92	172.38	-43.949	89.708	-36.321
Esfuerzos principales máximos					
(MPa)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
3325.3	-10.966	1689.7	-13.825	2862.2	-16.721
Esfuerzos principales mínimos					
(MPa)					
Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
18.757	-1568.7	8.9191	-946.2	14.393	-1611.8

Posterior a la obtención de los resultados y su evaluación sobre el comportamiento aerodinámico, se puede observar que la propuesta 1 (*MICC-75*), presenta un desempeño mucho mayor en comparación a las otras dos propuestas. Se llegó a esta conclusión debido a que los resultados de las fuerzas que se ejercen sobre el alerón indican que la fuerza de arrastre es apenas de 8.587% del total de la fuerza de sustentación, haciéndolo menos resistente al paso a través del aire y proporcionando suficiente *Downforce* como para mantener el vehículo pegado al suelo. De los resultados estáticos estructurales se puede observar que las tres propuestas presentan esfuerzos que se encuentran dentro de la zona elástica del material, haciéndolos resistentes a las exigencias que se presentan a lo largo de una carrera en la Fórmula 1; es por esto que el criterio principal para definir cuál es la mejor propuesta recae en la eficiencia aerodinámica, siendo así el alerón *MICC-75* gana en esta categoría, se realizará un prototipo de dicho alerón el cual se someterá a un análisis aerodinámico en un túnel de viento el cual será presentado en el Capítulo V.

IV.7.- Sumario

En el presente capítulo se exponen las propuestas desarrolladas por el autor de esta obra, así como los estudios que fueron realizados para corroborar la eficiencia de los tres alerones y una comparación entre estos para así poder seleccionar el que posee las mejores características para el estudio experimental que se presentara el capítulo siguiente.

IV.8.- Referencias

- 1.- Fédération Internationale de l'Automobile, *2022 Formula One Technical Regulations*, Ed. Fédération Internationale de l'Automobile, No. 10, 2022.
- 2.- Airfoil tools, *Airfoil Database Generator*, Ed. Airfoil Tools, 2022.
- 3.- Freitag, W. y Terry-Schulze, E., *Blended Winglets Improve Performance*, Ed. Boeing AeroMagazine, No. 3, pp 8-12, 2009.
- 4.- Sharma, R. B. y Bansal, R., CFD simulation for flow over passenger car using tail plates for aerodynamic drag reduction, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 7, No. 5, pp 28-35, 2013.
- 5.- Ryszard-Piechna, J., Kurec, K., Broniszewski, K., Remer, M., Piechna, A., Kamieniecki, K. y Bibik, P., Influence of the car movable aerodynamic elements on fast road car cornering, *Energies*, Vol. 15, No. 689, pp 2-28, 2022.

-
- 6.- Pina-Macedo, A., *Modelización de Problemas de Interacción Fluido-Estructura con Elementos Finitos de Orden Elevado*, Tesis de Licenciatura, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, pp 1-34, 2015.
 - 7.- Castro, X. y Rana, Z. A., Aerodynamic and structural design of a 2022 Formula One front wing assembly, *Fluids*, Vol. 5, pp 237-259, 2020.
 - 8.- Basso, M., Cravero, C. y Marsano D., Aerodynamic effect of the gurney flap on the front wing of a F1 car and flow interactions with car components, *Energies*, Vol. 14, No. 2059, pp 1-15, 2021.
 - 9.- Srividhya, S, Nehru, K. y Subramanian M., Fluid-Structure Interaction Study on an Aircraft wing model using ANSYS Coupling system, *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 10, No. 9, pp 21-32, 2020.

Capítulo V

V.1.- Introducción

En este capítulo se detalla el proceso que fue tomado para llevar a cabo el estudio experimental aerodinámico en el túnel de viento para el prototipo de alerón *MICC-75* con el objetivo de conocer las fuerzas aerodinámicas resultantes que lo afectan, partiendo desde la impresión en 3D del modelo hasta llegar a la obtención de resultados y su comparación con los resultados conseguidos por medio de la simulación computacional.

V.2.- Características del túnel de viento

Previo a llevar a cabo la impresión 3D del modelo es necesario conocer las dimensiones del túnel de viento donde se llevará a cabo la prueba, esto con el fin de poder dimensionar y acondicionar el alerón y de este modo obtener resultados válidos. A continuación, se muestran las dimensiones de la sección de prueba del túnel de viento de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Ticomán, donde se llevaron a cabo las pruebas aerodinámicas (Figura V.1).

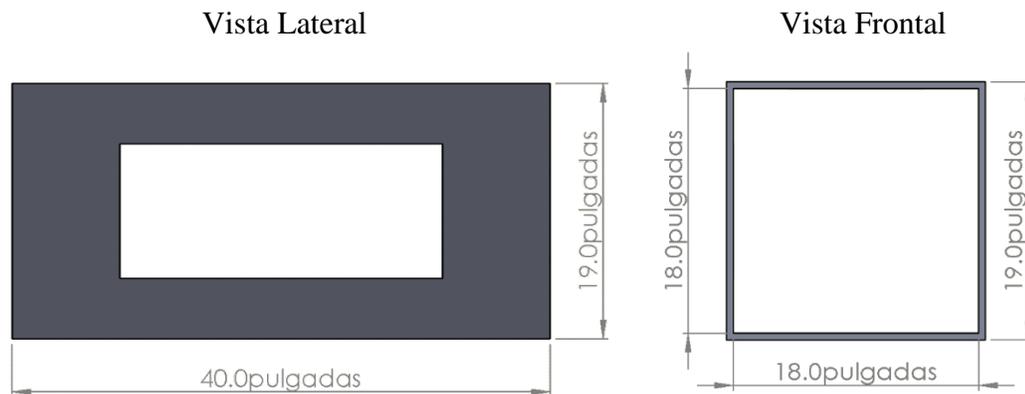


Figura V.1.- Vista lateral y frontal de la cámara de pruebas del túnel de viento

La sección de pruebas es un recinto de sección transversal cuadrada de 18 pulgadas por lado y de 40 pulgadas de largo construido en madera de grosor de media pulgada; este espacio cuenta con 3 ventanas en el centro de las paredes laterales y superior que permiten observar el interior del recinto, en el momento de realizar pruebas estas ventanas se cubren con tapas de acrílico que tienen un marco de madera capaz de sellar el interior del recinto (Figura V.2).

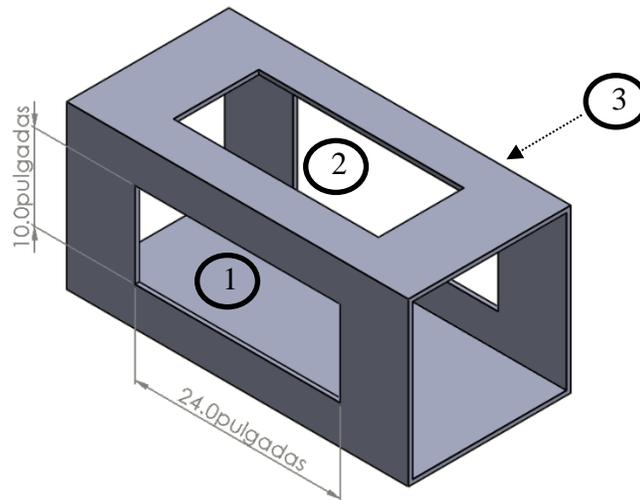


Figura V.2.- Vista isométrica de la cámara de pruebas del túnel de viento

Esta cámara está conectada en un extremo al cono concentrador cuya función contiene el ventilador que genera el flujo de aire, así como también el de acelerar el flujo y dirigirlo hacia el recinto de pruebas; mientras que el otro extremo se encuentra abierto hacia el ambiente (Figura V.3).

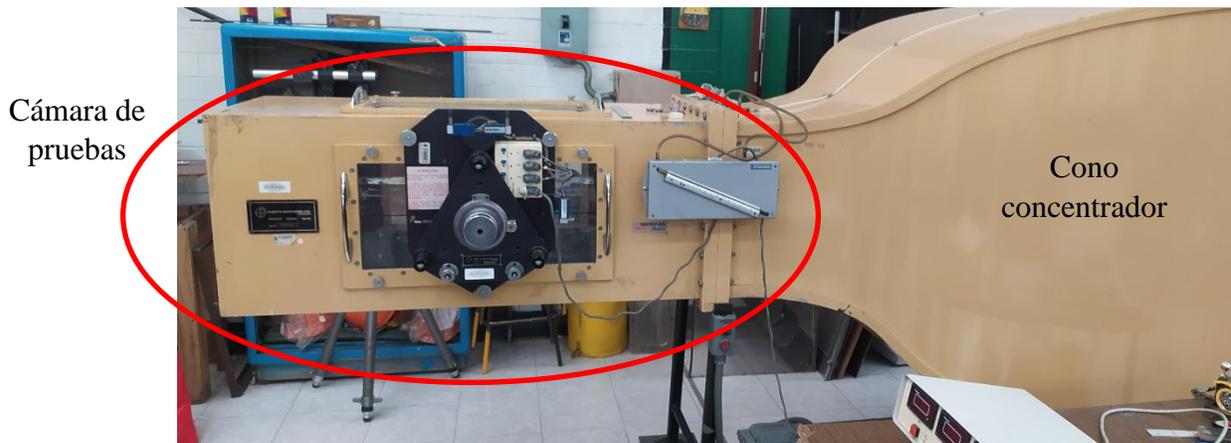


Figura V.3.- Fotografía del túnel de viento

V.3.- Dimensionado e impresión del alerón *MICC-75* para pruebas

Ya que la sección de pruebas del túnel cuenta con un espacio limitado para realizar los estudios aerodinámicos es necesario hacer un correcto dimensionamiento de la escala en la que deberá ser impreso el *MICC-75*, tomando en cuenta diversos factores como el área transversal de la sección de pruebas, la resolución de la impresora y la resistencia del material de impresión se decidió usar un modelo únicamente de la mitad del alerón de la misma manera en la que se realizaron las

simulaciones aerodinámicas, esto ya que la resolución mínima alcanzada por la impresora 3D es de 0.3 mm de espesor haciendo imposible poder imprimir en su totalidad los *flaps* del alerón los cuales presentan zonas de espesor realmente delgadas, así mismo el hecho de que solo la mitad del alerón sea la utilizada para hacer pruebas hace que el espesor de los *flaps* aumente al doble dando mayor integridad estructural al modelo durante las pruebas. Una vez decidido que solo se empleara la mitad del *MICC-75* es necesario definir la longitud de la envergadura de este, sin embargo, debido a que solo se usara la mitad del alerón se debe sellar una sección del túnel con una pared que evitara interferencias en la parte del modelo donde se encuentra el eje de simetría. Dicha pared se ubicará a 4 pulgadas del extremo derecho de la cámara de pruebas como se muestra a continuación (Figura V.4); ya que la mitad del alerón empleada es la mitad izquierda igual que las simulaciones computacionales.

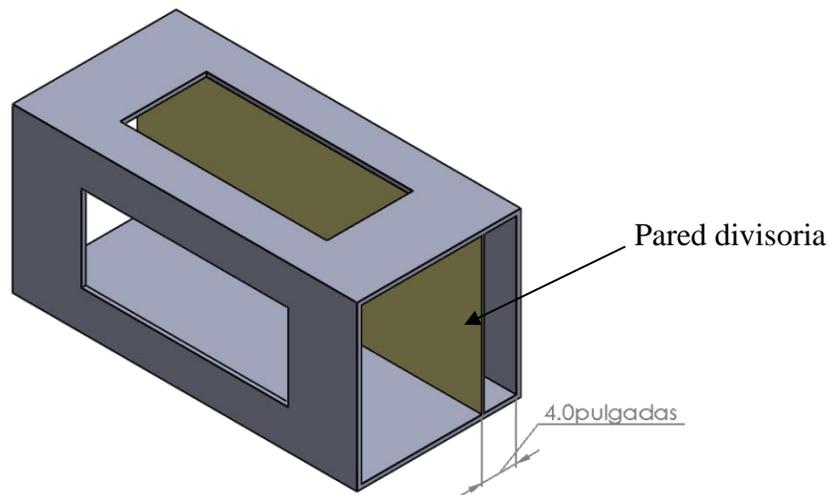


Figura V.4.- Vista isométrica del túnel con la pared divisoria

La división de la cámara de pruebas hace que solo 14 pulgadas de ancho sean efectivas para llevar a cabo los análisis aerodinámicos; ahora bien, debido a que no es posible que la longitud de la envergadura mida estas 14 pulgadas ya que los resultados no serían correctos, se decidió que la envergadura del modelo sea de 80% la longitud efectiva de la sección de pruebas, redondeando a números enteros se obtuvo una envergadura de 28 centímetros. Ya con las dimensiones definidas para el modelo lo único necesario previo a la impresión es necesario agregar una base para poder sujetar el alerón y llevar a cabo la medición de las fuerzas que actúan sobre este (Figura V.5); esto se lleva a cabo usando una varilla de control de 12 mm de diámetro.

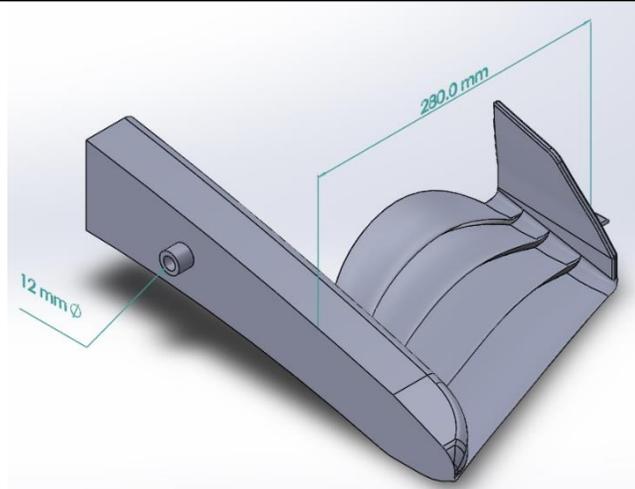


Figura V.5.- Vista isométrica del modelo listo para impresión

El modelo del *MICC-75* fue impreso utilizando filamento de *PETG*, el proceso de impresión tardó aproximadamente 36 horas para completarse y dio como resultado una pieza prolija ideal para las pruebas de túnel de viento (Figura V.6).



Figura V.6.- Prototipo a escala del *MICC-75*

V.4.- Puesta a punto y ejecución de la prueba

Después de tener el modelo correctamente manufacturado y la cámara de pruebas bien delimitada, es necesario preparar la sujeción y el dispositivo de medición el cual nos dará los resultados de las fuerzas que actúan sobre el alerón. La sujeción del modelo se lleva a cabo usando una varilla de acero con un diámetro de 12 mm y una longitud de 30 cm (Figura V.7); el diámetro para esta varilla de sujeción es dictada por la máquina que se encarga de realizar las mediciones de las fuerzas.



Figura V.7.- Varilla de sujeción

Para evitar efectos de fuerzas del aire sobre la varilla en la zona descartada de la cámara de pruebas fue necesario proveer la varilla de un escudo; este escudo está formado por un tubo de acero de 1 pulgada de diámetro y 4 pulgadas de largo (Figura V.8), y se ubica en la zona comprendida entre la pared divisoria y la pared derecha del recinto de pruebas.



Figura V.8.- Escudo para la varilla

A continuación, se muestra la cámara ya con todos los elementos acoplados para realizar la prueba; sin embargo, no se puede apreciar la varilla ya que esta se encuentra cubierta por el escudo (Figura V.9).

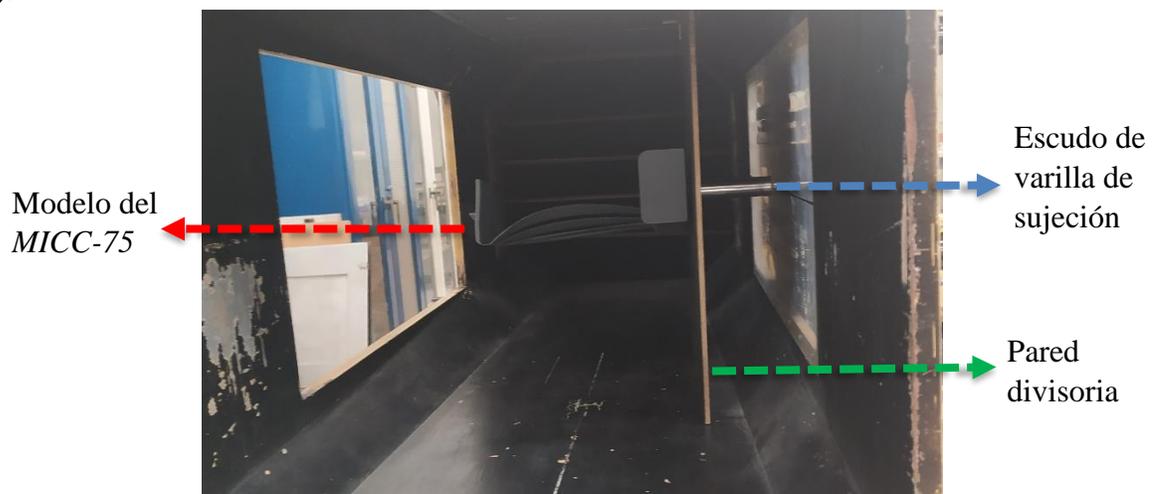


Figura V.9.- MICC-75 montado en la cámara de pruebas

Ya con los elementos montados en el recinto de pruebas se procede a preparar el dispositivo de medición; este es básicamente un soporte mecánico ajustable, el cual se encarga de mantener la varilla y el modelo en la posición deseada por el usuario del túnel (Figura V.10), para llevar a cabo las mediciones de las fuerzas el soporte cuenta con sensores los cuales se conectan a un dinamómetro digital el cual se encarga de interpretar las señales de los sensores y traducirlas a fuerzas que sean posibles de leer por parte del usuario (Figura V.11).

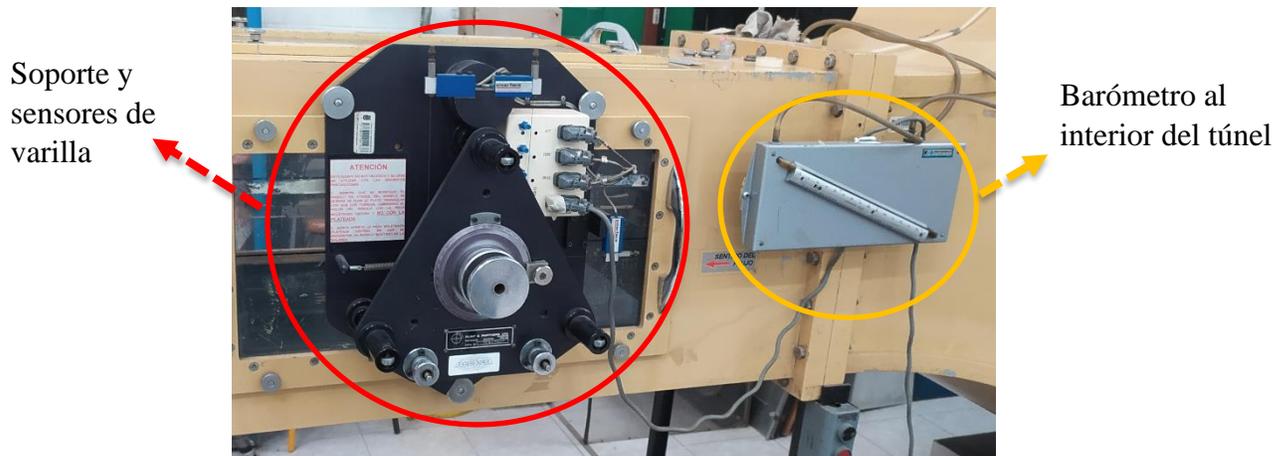


Figura V.10.- Dispositivos de medición del túnel de viento



Figura V.11.- Dinamómetro digital

Para poder medir las fuerzas sobre el alerón tenemos al dinamómetro, pero para poder obtener una medición de la velocidad del aire que circula dentro del túnel se tiene un barómetro que mide la presión dinámica dentro del recinto de pruebas (Figura V.10), a partir de la medición de esta presión y con las condiciones ambientales durante el desarrollo de la prueba es posible conocer la velocidad a la que fluye el aire.

Para poder iniciar la prueba es necesario colocar el modelo en la posición correcta y fijarlo usando el soporte (Figura V.12), posterior a esto se debe calibrar el dinamómetro a cero como se vio anteriormente, esto debido a que en un principio este marcará las fuerzas ejercidas por el peso del modelo y de la varilla.



Figura V.12.- Modelo en posición para prueba

Ya con el modelo listo dentro de la cámara de pruebas y con el dinamómetro puesto a punto se puede proceder al inicio de las pruebas. Lo primero es abrir la compuerta de flujo de aire la cual permite el paso de aire al interior del recinto, esto se hace por medio de una manivela que se encuentra a la entrada del cono concentrador; por medio de experiencia empírica por parte del personal encargado del túnel de viento de la ESIME Ticomán se sabe que aproximadamente 10 vueltas a la manivela aumentan en 15 km/h la velocidad del flujo de aire.

Teniendo en cuenta esto se decidió iniciar las pruebas con 30 vueltas de apertura la compuerta de entrada y aumentando 10 en cada ocasión; no obstante, para poder tener el valor más exacto de la velocidad del aire se hará el cálculo partiendo de la medición de la presión dentro del recinto de pruebas. Las condiciones ambientales antes y después de la prueba se presentan a continuación.

Tabla V.1.- Condiciones ambientales

Condiciones	Iniciales	Finales	Promedio
Temperatura (°C)	27	26	26.5
Presión (mmHg)	760	766	763

Humedad (% r.H.)	63	64	63.5
---------------------	----	----	------

Para realizar los cálculos de la velocidad del flujo de aire dentro de la cámara de pruebas será usado el promedio de las condiciones medidas al inicio y al final del desarrollo del estudio.

Partiendo de la fórmula para el cálculo de la presión dinámica [V.1]:

$$q = \frac{1}{2} \rho_z \cdot v^2 \quad \text{V.1}$$

Donde:

q : Presión dinámica (N/m^2)

ρ_z : Densidad del fluido (aire seco + vapor de agua) (kg/m^3)

v : Velocidad del fluido (m/s)

Ya que se busca la velocidad, despejando la Ecuación V.1:

$$\therefore v = \sqrt{\frac{2q}{\rho_z}} \quad \text{V.2}$$

Se tiene la incógnita de la densidad del fluido, la cual es posible calcular utilizando la Ecuación V.3) [V.1]:

$$\rho_z = \frac{P_b - 0.3779 \cdot P_v}{g \cdot R \cdot T} \quad \text{V.3}$$

Donde:

P_b : Presión barométrica (N/m^2)

P_v : Presión de vapor de agua (N/m^2)

g : Aceleración de la gravedad ($9.81 m/s^2$)

R : Constante del aire ($29.256 m/K$)

T : Temperatura del ambiente (K)

Esta nueva ecuación deja la nueva incógnita de la presión del vapor de agua, el cual está presente en el aire del medio ambiente. Para calcular la presión de vapor de aire es necesario calcular la

presión de vapor saturante y multiplicarla por el porcentaje de humedad presente en el ambiente [V.1]:

$$P_v = r \cdot H \cdot P_s \quad \text{V.4}$$

Donde:

P_v : Presión de vapor de agua (N/m^2)

$r \cdot H$: Humedad del medio ambiente (*adimensional*)

P_s : Presión de vapor saturante (N/m^2)

Para calcular la presión de vapor saturante se tiene la Ecuación de *Clausius-Clapeyron* V.5 para condiciones atmosféricas típicas [V.1]:

$$P_s = 6.112 e^{\left(\frac{17.67 \cdot T}{T+243.5}\right)} \quad \text{V.5}$$

Donde:

P_s : Presión de vapor saturante (*mbar*)

T : Temperatura del ambiente ($^{\circ}C$)

Aplicando el valor promedio de la temperatura ambiental durante la prueba a la Ecuación V.5 se tiene:

$$P_s = 6.112 e^{\left(\frac{17.67 \cdot (26.5)}{(26.5)+243.5}\right)}$$

$$P_s = 6.112 e^{1.73427}$$

$$\underline{P_s = 34.623 \text{ mbar}}$$

Ahora se puede calcular el valor de la presión de vapor de agua utilizando la Ecuación V.4, pero para ello es necesario convertir las unidades de la presión de vapor saturante de mbar a N/m^2 :

$$P_s = 34.623 \text{ mbar} = 3462.3 \text{ N/m}^2$$

Sustituyendo en la Ecuación V.4:

$$P_v = (0.635) \cdot (3462.3 \text{ N/m}^2)$$

$$\underline{P_v = 2\,198.5605 \text{ N/m}^2}$$

Ya se puede encontrar el valor de la densidad del flujo de aire utilizando la Ecuación V.3, ahora que se tienen los valores de la presión de vapor de agua y la presión barométrica, a la cual se deben cambiar las unidades de mmHg a N/m^2 al igual que con la temperatura ambiente la cual debe ajustarse de °C a Kelvin:

$$P_b = 763 \text{ mmHg} = 101\,725 \text{ N/m}^2$$

$$T = 26.5 \text{ }^\circ\text{C} = 299.65 \text{ K}$$

Sustituyendo en Ecuación V.3:

$$\rho_z = \frac{(101\,725 \text{ N/m}^2) - 0.3779 \cdot (2\,198.5605 \text{ N/m}^2)}{(9.81 \text{ m/s}^2) \cdot (29.256 \text{ m/K}) \cdot (299.65 \text{ K})}$$

$$\underline{\rho_z = 1.173 \text{ kg/m}^3}$$

Este resultado representa el valor de la densidad del aire durante los ensayos experimentales debido a que se usaron los valores promedio de las condiciones ambientales durante toda la prueba; sabiendo que este valor es el mismo para todos los ensayos ahora es posible aplicar la Ecuación V.2 para poder encontrar el valor de la velocidad del flujo de aire cambiando los valores de la presión dinámica medida dentro del recinto de pruebas en cada ensayo.

Más adelante se muestran los resultados de las mediciones de fuerzas y presión dinámica que fueron cuantificados.

Tabla V.2.- Resultados medidos durante la prueba

Ensayo	Downforce (N)	Arrastre (N)	Presión dinámica	
			Medida (mmH ₂ O)	Equivalencia (N/m ²)
1°	5.6	0.5	10	98.0665

2°	9.9	1.2	17.5	171.6163
3°	15.1	1.7	26	254.9729

Se podrán dar como validos los resultados de los ensayos experimentales si estos coinciden con los resultados obtenidos por medio de las simulaciones computacionales replicando las variables presentes en cada ensayo.

V.5.- Comprobación del ensayo 1

Este primer ensayo se realizó con una apertura de la compuerta de entrada de aire de 30 vueltas, para corroborar la velocidad exacta a continuación se presenta el desarrollo del cálculo de esta velocidad. Conociendo la densidad del aire y la presión dinámica para este ensayo es posible conocer la velocidad del flujo de aire usando la Ecuación V.2:

$$v = \sqrt{\frac{2q}{\rho_z}} \quad \text{V.2}$$

$$v = \sqrt{\frac{2(98.0665 \text{ N/m}^2)}{1.173 \text{ kg/m}^3}}$$

$$\underline{v = 12.9308 \text{ m/s} = 46.55 \text{ km/h}}$$

Ya se conoce la velocidad exacta a la que fue realizado el primer ensayo y las fuerzas que actúan sobre el *MICC-75*, bajo estas condiciones de tamaño y velocidad es posible replicar el ensayo usando el software *ANSYS® Workbench* y hacer una comparativa de los resultados obtenidos en ambos medios [V.2 y V.3], si estos coinciden se puede determinar que los resultados obtenidos en el Capítulo IV son válidos. Para la comprobación computacional se modificó la escala del modelo CAD para tener 28 cm de envergadura igual que el modelo empleado en la prueba experimental; de igual manera se modificó las dimensiones del volumen de control usado en la simulación, haciendo que estas sean las mismas que las dimensiones de la región efectiva de pruebas usada en el túnel de viento (Figura V.13).

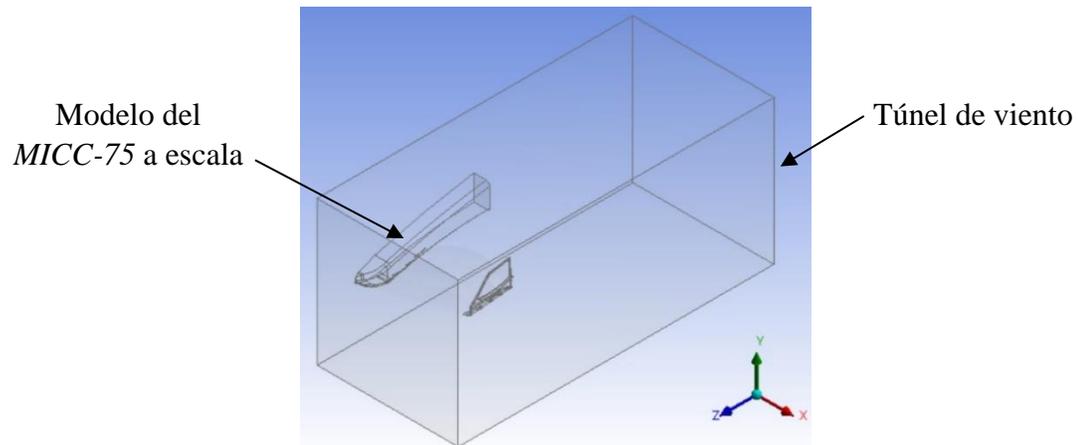


Figura V.13.- Volumen de control de simulación de ensayo

Igualmente, como las anteriores simulaciones aerodinámicas es necesario realizar el discretizado del volumen de control; esto se llevó a cabo utilizando parámetros de discretizado fino, controlado y con elementos de alto orden (para poder obtener resultados precisos) [V.4]. El resultado del proceso de discretizado se puede apreciar de la siguiente manera (Figura V.14).

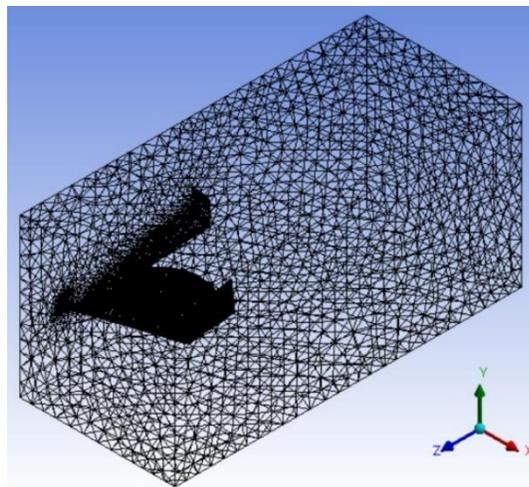


Figura V.14.- Discretizado del MICC-75 a escala

Las condiciones de frontera para esta comprobación fueron las mismas que las usadas durante el ensayo, la velocidad del aire a la entrada del túnel fue de 46.55 km/h, a la salida se definió una presión estática de igual a cero para replicar el estado del túnel de viento con la salida hacia el

medio ambiente. Las paredes del túnel de viento igualmente fueron delimitadas dentro de las condiciones de frontera para tener una simulación más precisa (Figura V.15) [V.5 y V.6].

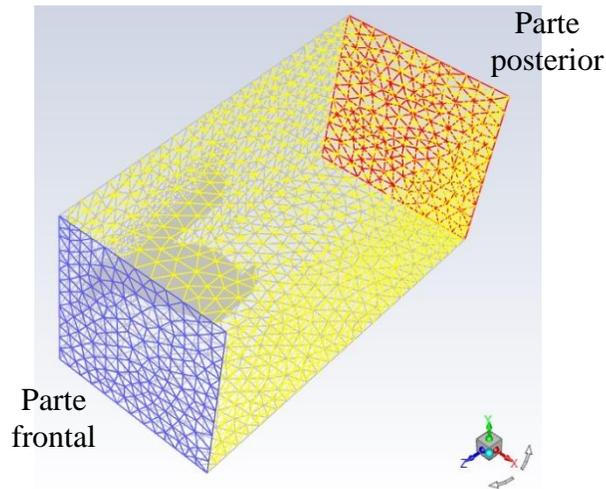


Figura V.15.- Condiciones de frontera para el ensayo 1

Para realizar la solución numérica se definió una cantidad de 100 iteraciones al igual que el resto de las simulaciones realizadas en esta tesis.

Enseguida se muestran algunos de los resultados gráficos que se obtuvieron.

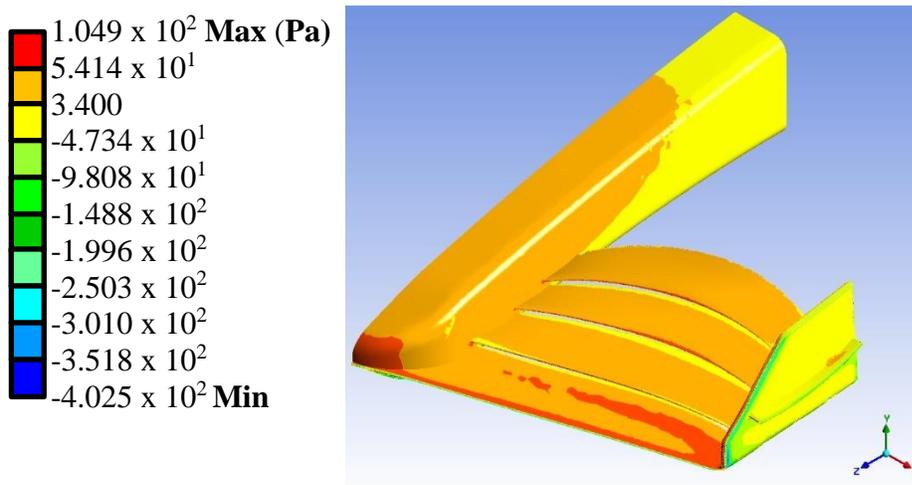


Figura V.16.- Vista general de la presión sobre el MICC-75 durante el ensayo 1

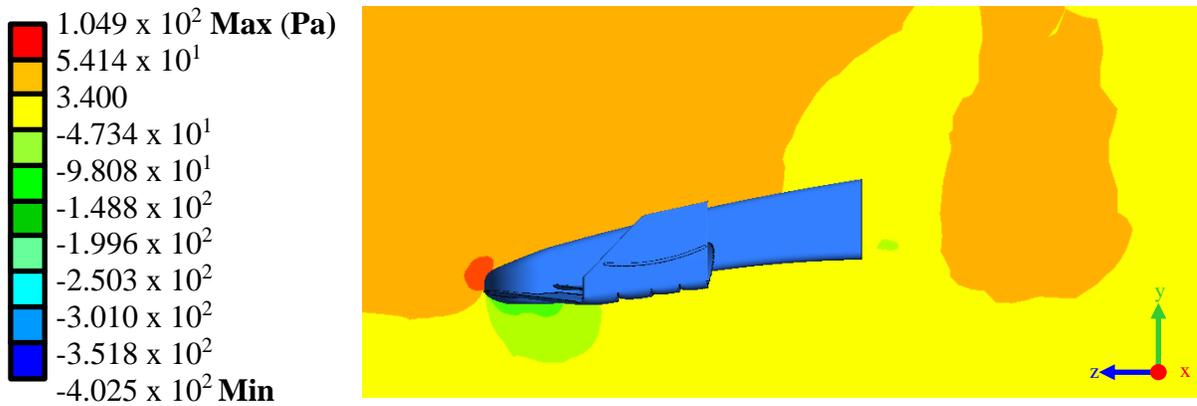


Figura V.17.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del MICC-75 sobre el plano medio durante el ensayo 1

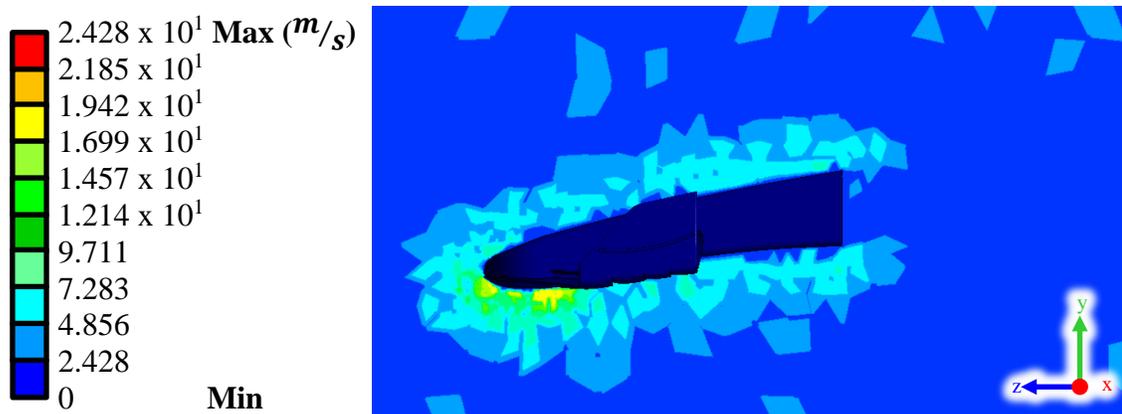


Figura V.18.- Velocidad del viento sobre el MICC-75 en el plano medio durante el ensayo 1

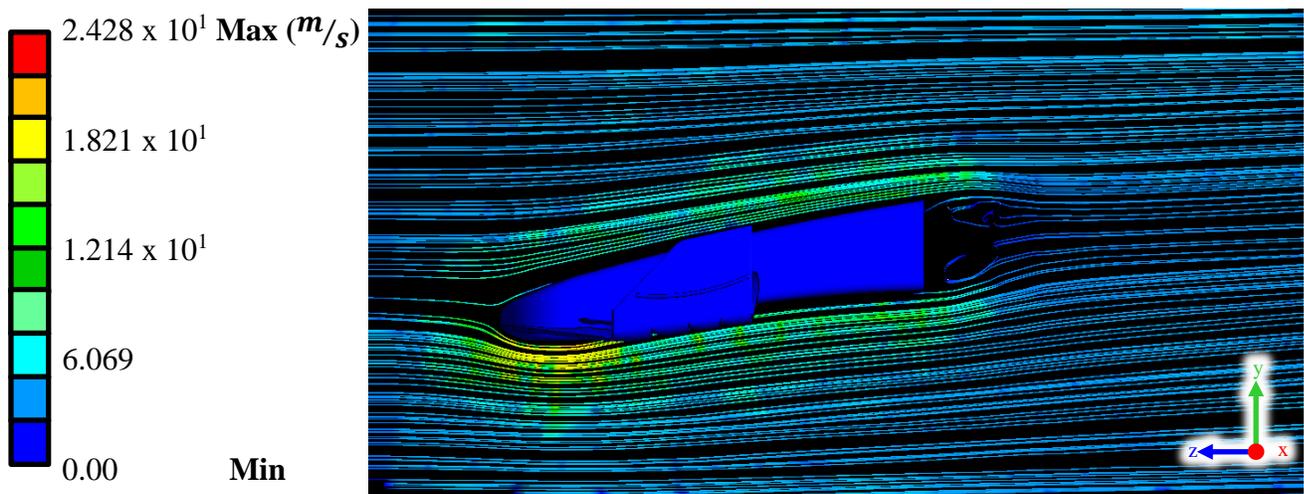


Figura V.19.- Vista lateral línea de flujo alrededor del MICC-75 sobre plano medio durante el ensayo 1

Con el módulo de resultados se puede conocer la magnitud de las fuerzas tanto *Downforce* como de arrastre, estas se presentan enseguida.

Tabla V.3.- Fuerzas sobre el *MICC-75* en simulación de ensayo 1

Fuerza	Magnitud
<i>Downforce</i>	5.6576 N
Arrastre	0.7403 N

V.6.- Comprobación del ensayo 2

El segundo ensayo se realizó con una apertura de la compuerta de entrada de aire de 40 vueltas, para corroborar la velocidad exacta a continuación se presenta el desarrollo del cálculo de esta velocidad. Conociendo la densidad del aire y la presión dinámica para este ensayo es posible conocer la velocidad del flujo de aire usando la Ecuación V.2:

$$v = \sqrt{\frac{2q}{\rho_z}} \quad \text{V.2}$$

$$v = \sqrt{\frac{2(171.6163 \text{ N/m}^2)}{1.173 \text{ kg/m}^3}}$$

$$\underline{v = 17.1058 \text{ m/s} = 61.58 \text{ km/h}}$$

Conociendo la velocidad exacta a la que fue realizado el segundo ensayo es posible replicar el ensayo usando el software *ANSYS® Workbench* [V.2 y V.3]. Con las dimensiones modificadas para replicar los ensayos que se hicieron en el túnel de viento se ajustaron las condiciones de frontera para esta comprobación fueron las mismas que las usadas durante el ensayo, la velocidad del aire a la entrada del túnel fue de 61.58 km/h, a la salida se definió una presión estática de igual a cero [V.5 y V.6].

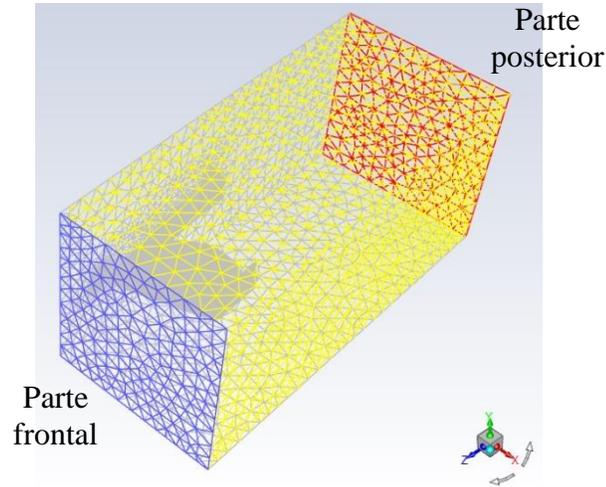


Figura V.20.- Condiciones de frontera para el ensayo 2

Para realizar la solución numérica se definió una cantidad de 100 iteraciones. Enseguida se muestran algunos de los resultados gráficos que se obtuvieron.

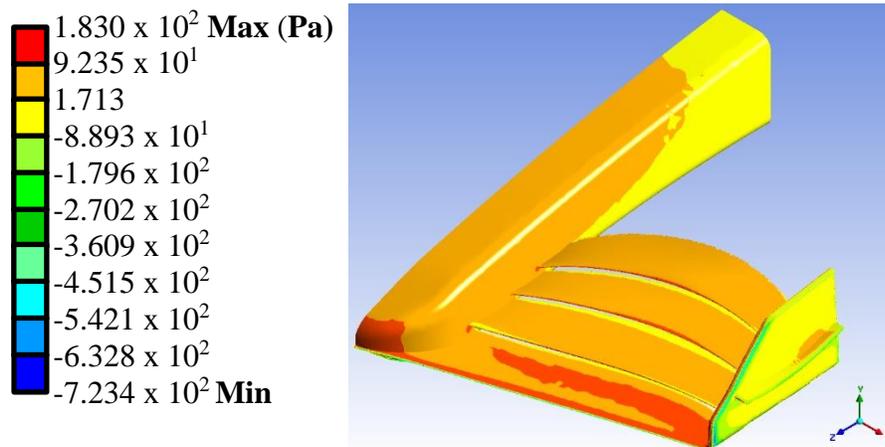


Figura V.21.- Vista general de la presión sobre el *MICC-75* durante el ensayo 2

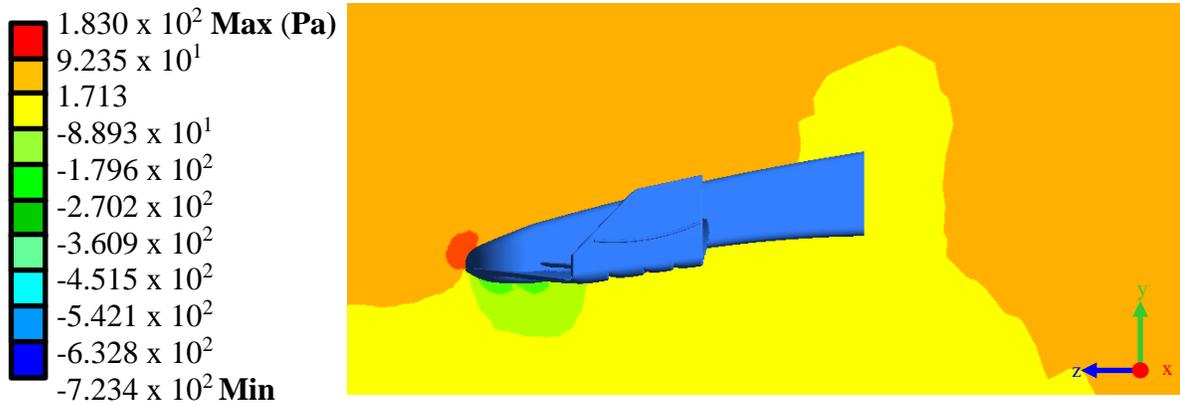


Figura V.22.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del MICC-75 sobre el plano medio durante el ensayo 2

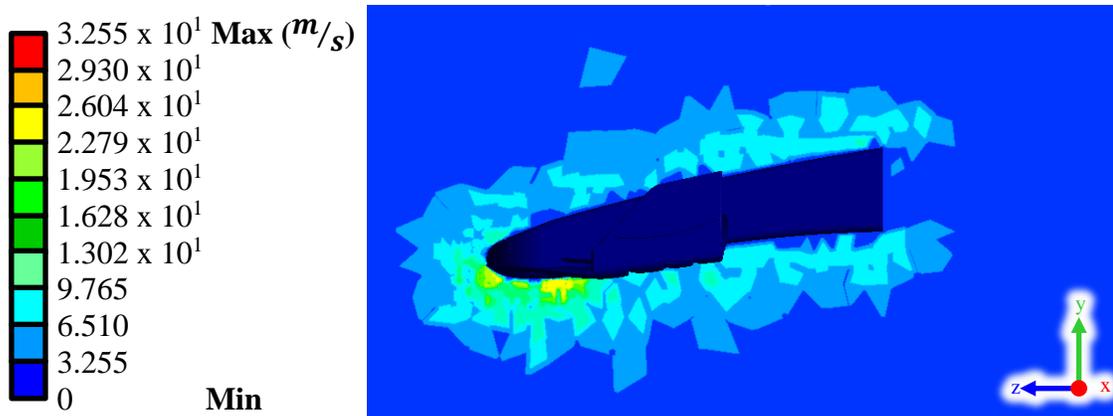


Figura V.23.- Velocidad del viento sobre el MICC-75 en el plano medio durante el ensayo 2

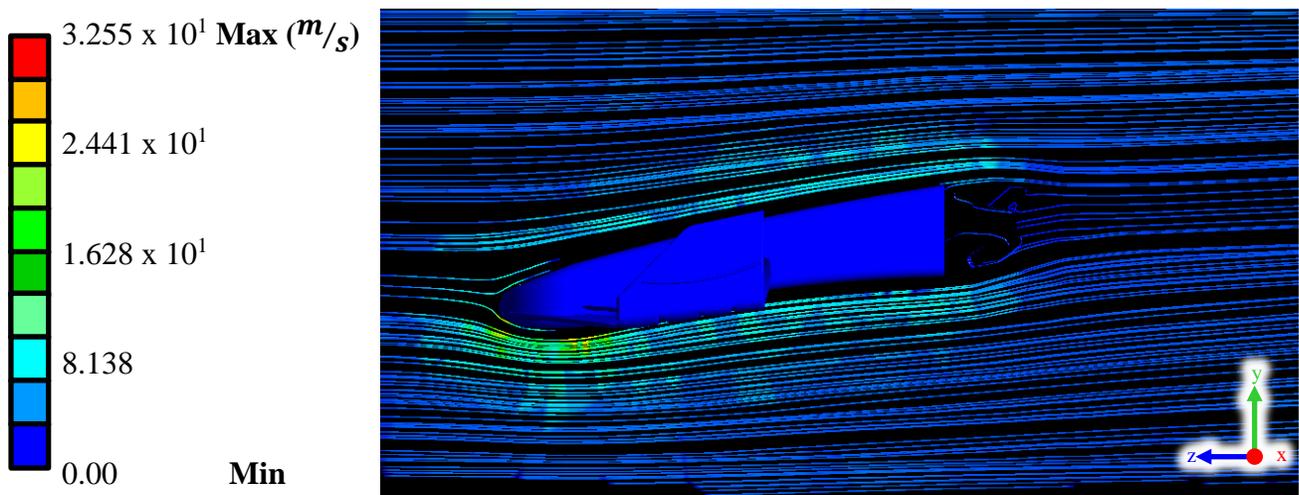


Figura V.24.- Vista lateral línea de flujo alrededor del MICC-75 sobre plano medio durante el ensayo 2

Con el módulo de resultados se puede conocer la magnitud de las fuerzas tanto *Downforce* como de arrastre, estas se presentan enseguida.

Tabla V.4.- Fuerzas sobre el *MICC-75* en simulación de ensayo 2

Fuerza	Magnitud
<i>Downforce</i>	9.9529 N
Arrastre	1.2803 N

V.7.- Comprobación del ensayo 3

El tercer ensayo se realizó con una apertura de la compuerta de entrada de aire de 50 vueltas, para corroborar la velocidad exacta a continuación se presenta el desarrollo del cálculo de esta velocidad. Conociendo la densidad del aire y la presión dinámica para este ensayo es posible conocer la velocidad del flujo de aire usando la Ecuación V.2:

$$v = \sqrt{\frac{2q}{\rho_z}} \quad \text{V.2}$$

$$v = \sqrt{\frac{2(254.9729 \text{ N/m}^2)}{1.173 \text{ kg/m}^3}}$$

$$\underline{v = 20.8503 \text{ m/s} = 75.06 \text{ km/h}}$$

Conociendo la velocidad exacta a la que fue realizado el segundo ensayo es posible replicar el ensayo usando el software *ANSYS® Workbench* [V.2 y V.3]. Con las dimensiones modificadas para replicar los ensayos que se hicieron en el túnel de viento se ajustaron las condiciones de frontera para esta comprobación fueron las mismas que las usadas durante el ensayo, la velocidad del aire a la entrada del túnel fue de 75.06 km/h, a la salida se definió una presión estática de igual a cero [V.5 y V.6].

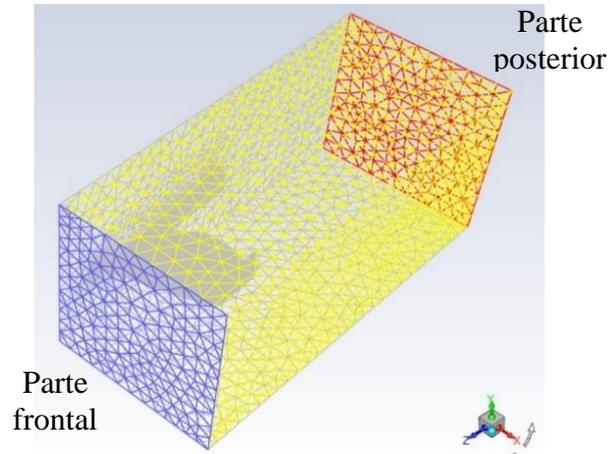


Figura V.25.- Condiciones de frontera para el ensayo 3

Para realizar la solución numérica se definió una cantidad de 100 iteraciones. Enseguida se muestran algunos de los resultados gráficos que se obtuvieron.

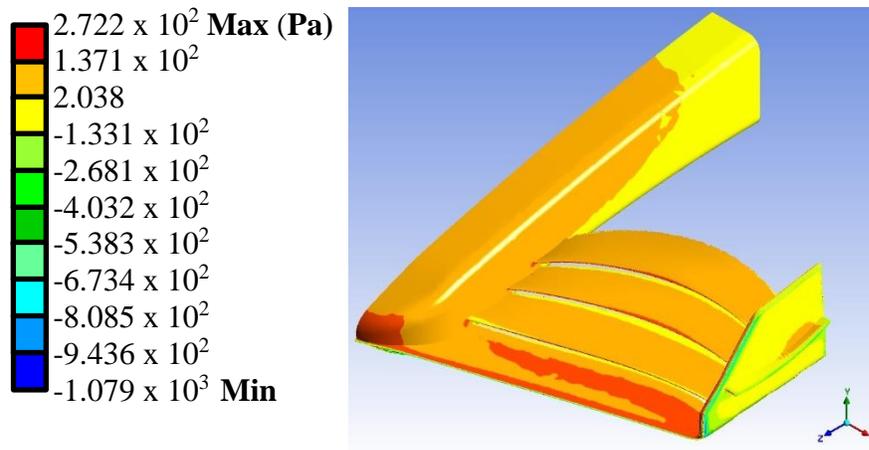


Figura V.26.- Vista general de la presión sobre el *MICC-75* durante el ensayo 3

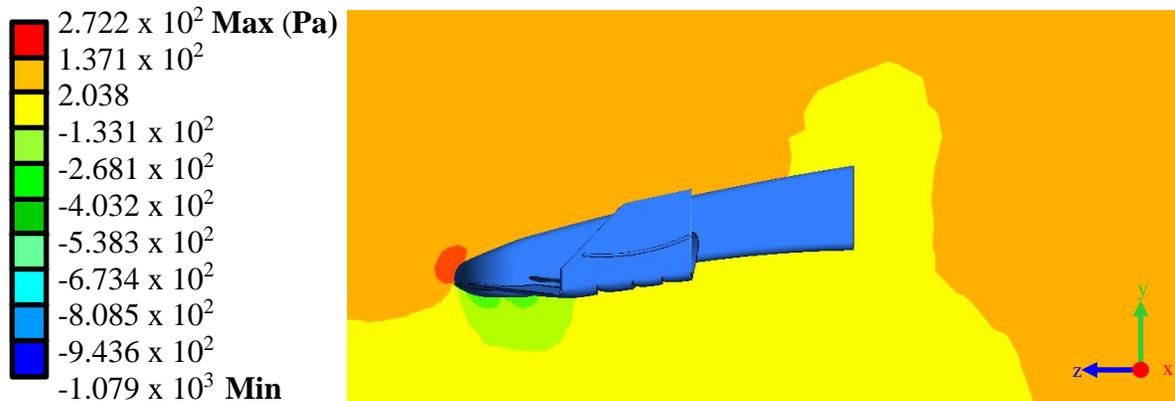


Figura V.27.- Presiones ejercidas sobre el aire alrededor del *MICC-75* sobre el plano medio durante el ensayo 3

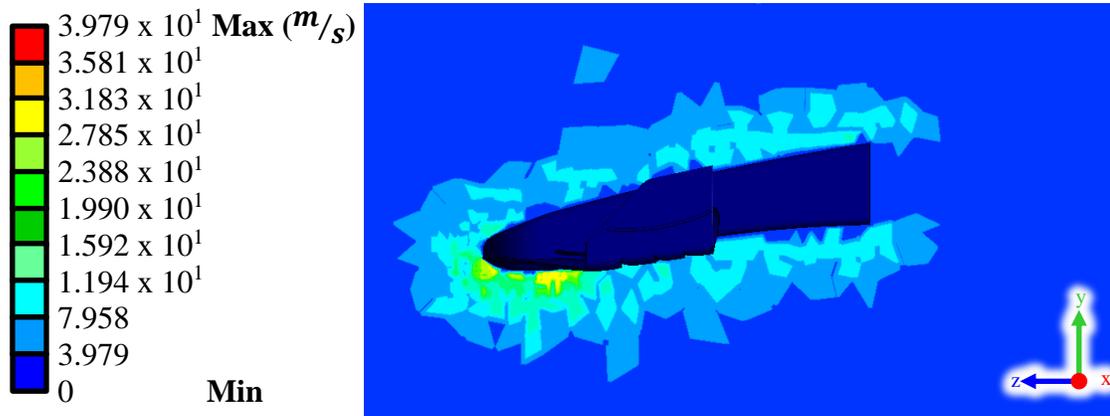


Figura V.28.- Velocidad del viento sobre el MICC-75 en el plano medio durante el ensayo 3

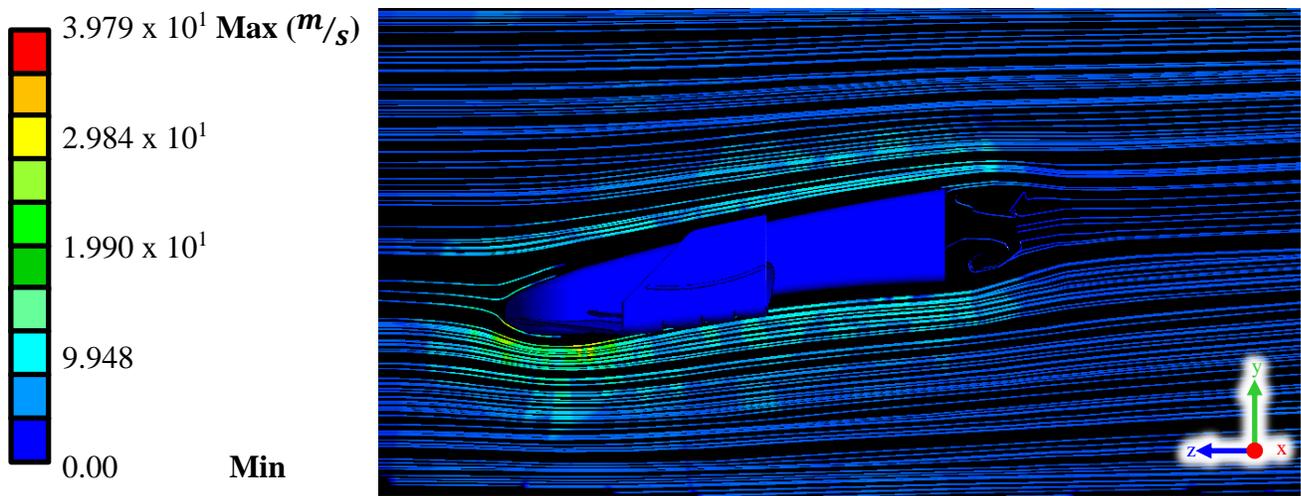


Figura V.29.- Vista lateral línea de flujo alrededor del MICC-75 sobre plano medio durante el ensayo 3

Con el módulo de resultados se puede conocer la magnitud de las fuerzas tanto *Downforce* como de arrastre, estas se presentan enseguida.

Tabla V.5.- Fuerzas sobre el MICC-75 en simulación de ensayo 3

Fuerza	Magnitud
<i>Downforce</i>	14.811 N
Arrastre	1.8848 N

A continuación, se expone una comparativa de los resultados de los ensayos realizados en el túnel de viento contra los resultados de las simulaciones computacionales de estos mismos ensayos.

Tabla V.6.- Comparativa de fuerzas sobre el *MICC-75*

Fuerzas sobre el <i>MICC-75</i>			
Ensayo 1			
(Velocidad = 46.55 km/h)			
<i>Downforce</i>		Arrastre	
Real	Simulación	Real	Simulación
5.6	5.6576	0.6	0.7403
Ensayo 2			
(Velocidad = 61.58 km/h)			
<i>Downforce</i>		Arrastre	
Real	Simulación	Real	Simulación
9.9	9.9529	1.2	1.2803
Ensayo 3			
(Velocidad = 75.06 km/h)			
<i>Downforce</i>		Arrastre	
Real	Simulación	Real	Simulación
15.1	14.911	1.7	1.8848

Como es posible ver en la tabla anterior los resultados obtenidos por medio de los ensayos realizados en el túnel de viento ratifican los datos obtenidos por medio de las simulaciones; después de cotejar los datos de ambos ámbitos se puede concluir que todas las simulaciones realizadas por medio del software *ANSYS® Workbench* son totalmente válidos, esto se traduce en que todos los resultados presentes en el capítulo 4 del presente trabajo respecto al comportamiento del *MICC-75* y las otras dos propuestas a la máxima velocidad de 325 km/h son correctos.

V.8.- Sumario

Los estudios aerodinámicos realizados a los antecedentes en el presente capítulo son de utilidad para comprender el avance en el desarrollo tecnológico de los alerones, así mismo deja claro la evolución de la eficiencia en los apéndices aerodinámicos tales como los alerones delanteros en los vehículos de competición.

V.9.- Referencias

- 1.- Tejada-Martínez, A., Méndez-Pérez, I. R., Catalina-Rodríguez, N. y Tejada-Zacarías, E., *La Humedad en la Atmosfera: Bases Físicas, Instrumentos y Aplicaciones*, Universidad de Colima, pp 93-104, 2018.

-
- 2.- Sharma, R. B. y Bansal, R., CFD simulation for flow over passenger car using tail plates for aerodynamic drag reduction, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 7, No. 5, pp 28-35, 2013.
 - 3.- Ryszard-Piechna, J., Kurec, K., Broniszewski, K., Remer, M., Piechna, A., Kamieniecki, K. y Bibik, P., Influence of the car movable aerodynamic elements on fast road car cornering, *Energies*, Vol. 15, No. 689, pp 2-28, 2022.
 - 4.- Pina-Macedo, A., *Modelización de Problemas de Interacción Fluido-Estructura con Elementos Finitos de Orden Elevado*, Tesis de Licenciatura, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, pp 1-34, 2015.
 - 5.- Castro, X. y Rana, Z. A., Aerodynamic and structural design of a 2022 Formula One front wing assembly, *Fluids*, Vol. 5, pp 237-259, 2020.
 - 6.- Basso, M., Cravero, C. y Marsano D., Aerodynamic effect of the gurney flap on the front wing of a F1 car and flow interactions with car components, *Energies*, Vol. 14, No. 2059, pp 1-15, 2021.

Conclusiones

Conclusiones

La síntesis histórica expuesta en el Capítulo I deja ver la importancia de los medios de transporte desde los primeros pasos de la humanidad hasta la aparición del motor de combustión interna, el cual trajo consigo la posibilidad de dominar el aire, la tierra y el mar que dio paso a la creación de nuevas y diversas maquinas en las que el hombre se podía trasladar; uno de estos nuevos inventos fue el automóvil que se ha convertido en un instrumento en la vida cotidiana de las personas en la actualidad.

Como en muchos ámbitos en los que se desarrolla el ser humano la competencia se encuentra arraigada en el ámbito de la producción automotriz, es así como surgen las competencias automovilísticas; esta necesidad por demostrar quién es el mejor hace que dichas competencias sean el lugar perfecto para poner en práctica la ingeniería a altos niveles, así como el escenario de pruebas para avances tecnológicos en donde la *Fórmula Uno* figura como la máxima categoría.

En el Capítulo II se expone la serie de conocimientos teóricos necesarios para entender los principios que hacen posible el funcionamiento de los vehículos que se mueven a través del aire; y aunque los automóviles son vehículos terrestres su interacción con el aire hace absolutamente necesario dotarlo de eficiencia aerodinámica si se desea ser competitivo.

Para poder tener un panorama previo del comportamiento de los alerones frontales en vehículos de *Fórmula Uno* es que en el Capítulo III se realiza el estudio por medio de simulaciones de tres modelos de alerones previamente diseñados en diferentes periodos usando el *software ANSYS® Workbench*, siendo estos los de los vehículos *McLaren MP4/4*, *Williams FW31* y *Mercedes-AMG W12* los cuales muestran el progreso del manejo de las fuerzas aerodinámicas. Las simulaciones fueron realizadas utilizando una velocidad de 325 km/h ya que es una velocidad que los tres vehículos podían alcanzar. Con los resultados de las fuerzas resultantes es posible apreciar como el *FW31* es el modelo que presenta mayor cantidad de *Downforce*, lo que podría suponer que este es el alerón mejor de los tres; sin embargo, la fuerza de arrastre igual entra en juego debido a que esta fuerza actúa en contra de la velocidad que puede alcanzar el vehículo, por lo cual un solo parámetro para definir la eficiencia aerodinámica no será suficiente. Si se toman en cuenta ambas variables y se calcula la relación entre ellas, se tendrá que el *Williams* no es la mejor opción sino el *W12* con un 15.798% de arrastre en relación a la *Downforce*, seguido por el *MP4/4* con un 16.077% y de ultimo el *FW31* con un 23.325%. Estos datos exhiben como se experimentó en el

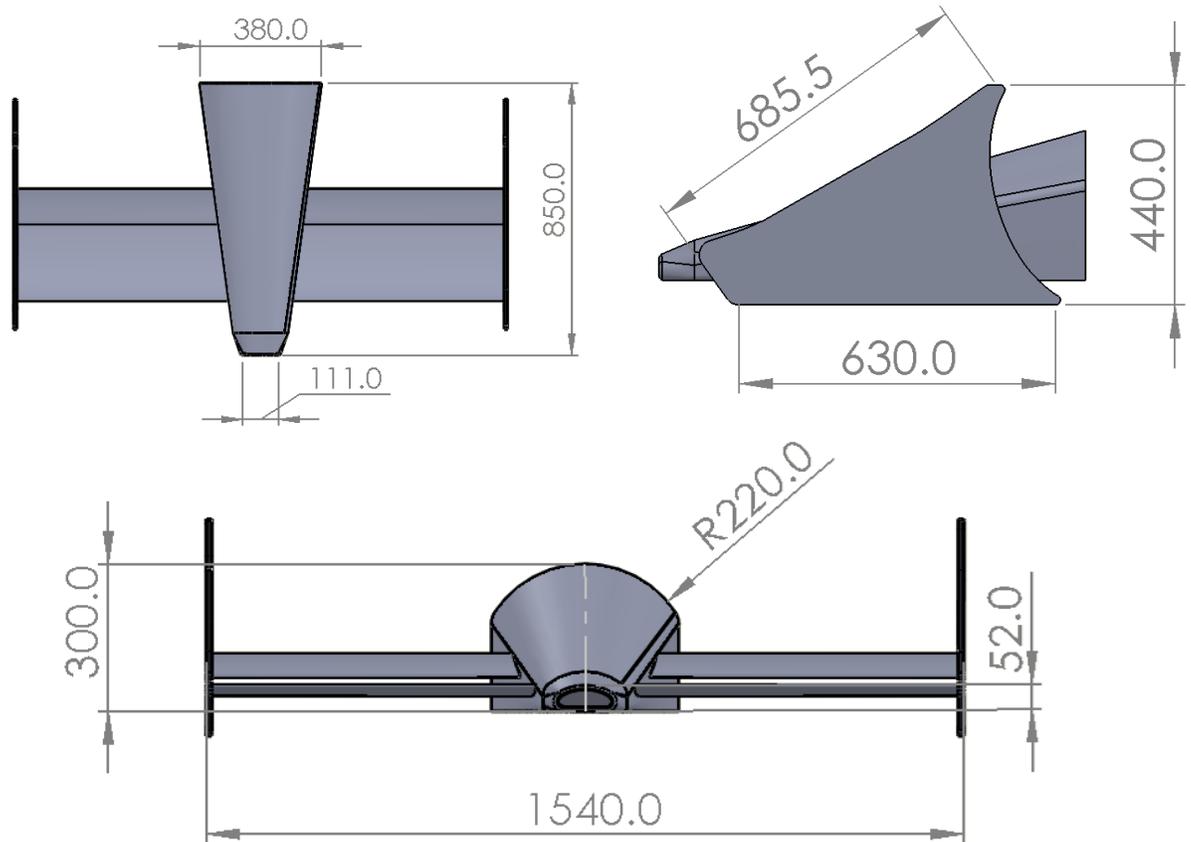
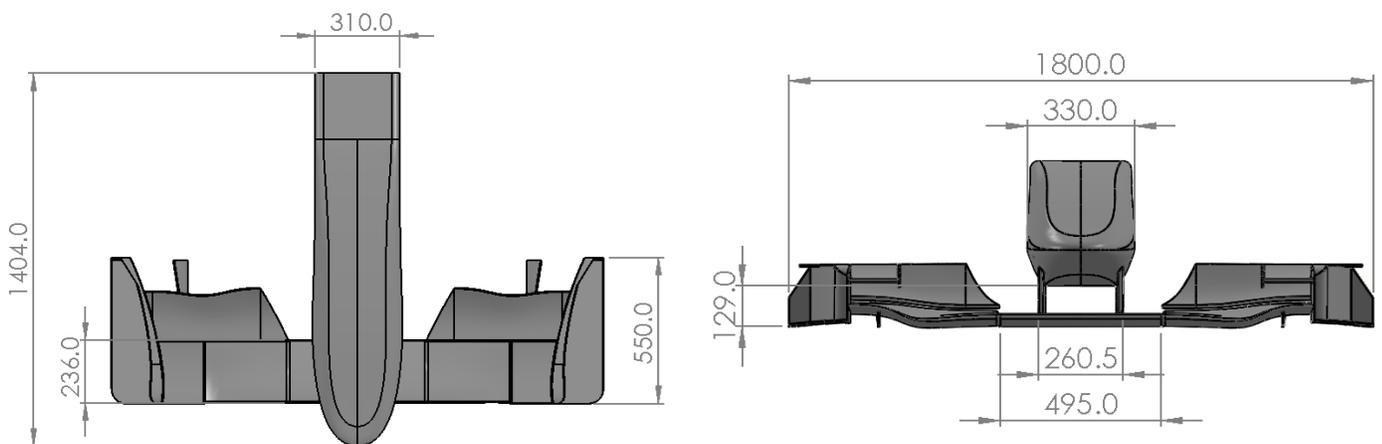
diseño de alerones intentado dotar de mayor *Downforce* a los monoplazas dejando de lado el arrastre producido, esta preferencia se dejó de lado con el tiempo ya que no es del todo correcta, debido a que la eficiencia se logra mediante una relación donde la fuerza de arrastre sea lo menor posible al *Downforce* a pesar de que esta no posea niveles extraordinarios.

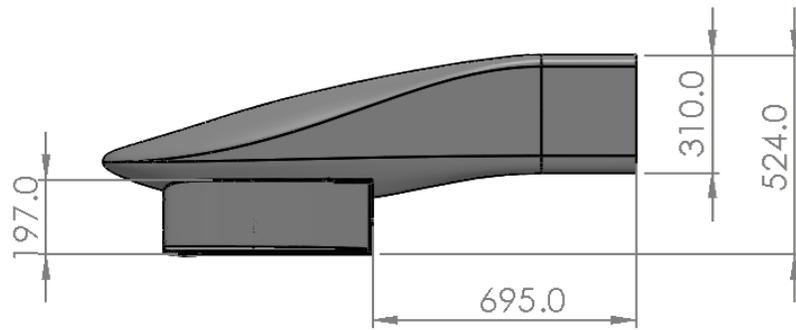
Durante el Capítulo IV se presentaron tres propuestas diseñadas por el autor de este trabajo que se ajustan en su totalidad al reglamento técnico de la *Fórmula Uno* para el campeonato del 2022, en este capítulo se presentan las características de dichos diseños para posteriormente realizar el estudio de su comportamiento tanto aerodinámico como estructural, haciendo uso de la herramienta computacional *ANSYS® Workbench* bajo las mismas condiciones de velocidad que las simulaciones en el capítulo anterior. Los resultados obtenidos de los análisis numéricos concuerdan con la teoría sobre aerodinámica desarrollada en el Capítulo II, en las figuras presentadas se pueden apreciar las zonas de baja presión por debajo de los *flaps* del alerón y las zonas de baja presión por encima, que dan como resultado la aparición del *Downforce*; en las tres propuestas se obtuvieron resultados similares que responden de manera acertada a la aplicación de la teoría.

Realizando una comparativa entre las tres propuestas diseñadas y el alerón del *Mercedes-AMG W12* (el cual es una versión existente previa al cambio de reglamentación) se puede ver como la *Downforce* se ve incrementada de 2016.57 N a un valor de 5773.54 N en el *MICC-75*, 5807.87 N en el *CLV-54* y 5996.91 N en el *JJRC-10*. Pese a que claramente con la simple comparativa de esta variable supone una clara mejoría por parte de cualquiera de las propuestas, el criterio para comprobar que la eficiencia de los nuevos diseños es superior será la relación existente en la fuerza de *Downforce* y arrastre; en este aspecto los resultados obtenidos por parte de las propuestas son de 8.587% en el *MICC-75*, 11.807% en el *CLV-54* y 9.197% en el *JJRC-10*, con lo que queda claro que los tres modelos desarrollados en este trabajo son más eficientes que los alerones utilizados previo al cambio de las regulaciones técnicas. Ahora bien, dentro de los diseños presentados todos tienen un comportamiento estructural que los hacen resistentes a los esfuerzos que las presiones producidas por el flujo de aire ejercen sobre ellos; esto los hace aptos para poder soportar las condiciones de la competencia, es por ello que para seleccionar a la mejor de las tres propuestas este factor no hace diferencia alguna. El criterio vuelve a recaer en la eficiencia aerodinámica, en el cual el alerón *MICC-75* presenta la ventaja siendo así que este alerón se seleccionó para ser llevado a etapa de prototipo para pruebas experimentales en túnel de viento.

En el Capítulo V se llevó a cabo el estudio experimental con un prototipo a escala del alerón *MICC-75* en un túnel de viento para corroborar el comportamiento del alerón en condiciones reales; durante este estudio se realizaron tres pruebas con diferentes velocidades del flujo de aire. El primero de estos ensayos se realizó a una velocidad de 46.55 km/h, el segundo a 61.58 km/h y finalmente el último a 75.06 km/h; en todos los ensayos se realizaron mediciones de la fuerza de arrastre y Downforce. Posterior a la ejecución del estudio experimental se corrió una nueva serie de análisis numéricos en el software *ANSYS® Workbench* recreando las condiciones a las que se realizaron los ensayos en túnel de viento (con un modelo a la misma escala que el prototipo y recreando la cámara de pruebas del túnel de viento); esto con la finalidad de que ambos resultados se comprobaran mutuamente. Los resultados obtenidos de estas simulaciones coinciden con las mediciones tomadas durante la prueba experimental con lo que es posible concluir que estas simulaciones son totalmente válidas y a su vez los resultados obtenidos en el Capítulo IV que describen el comportamiento de las tres propuestas a una velocidad de 325 km/h se pueden tomar como verdaderos, dejando claro que el alerón *MICC-75* es una propuesta viable para ser utilizada en competencias.

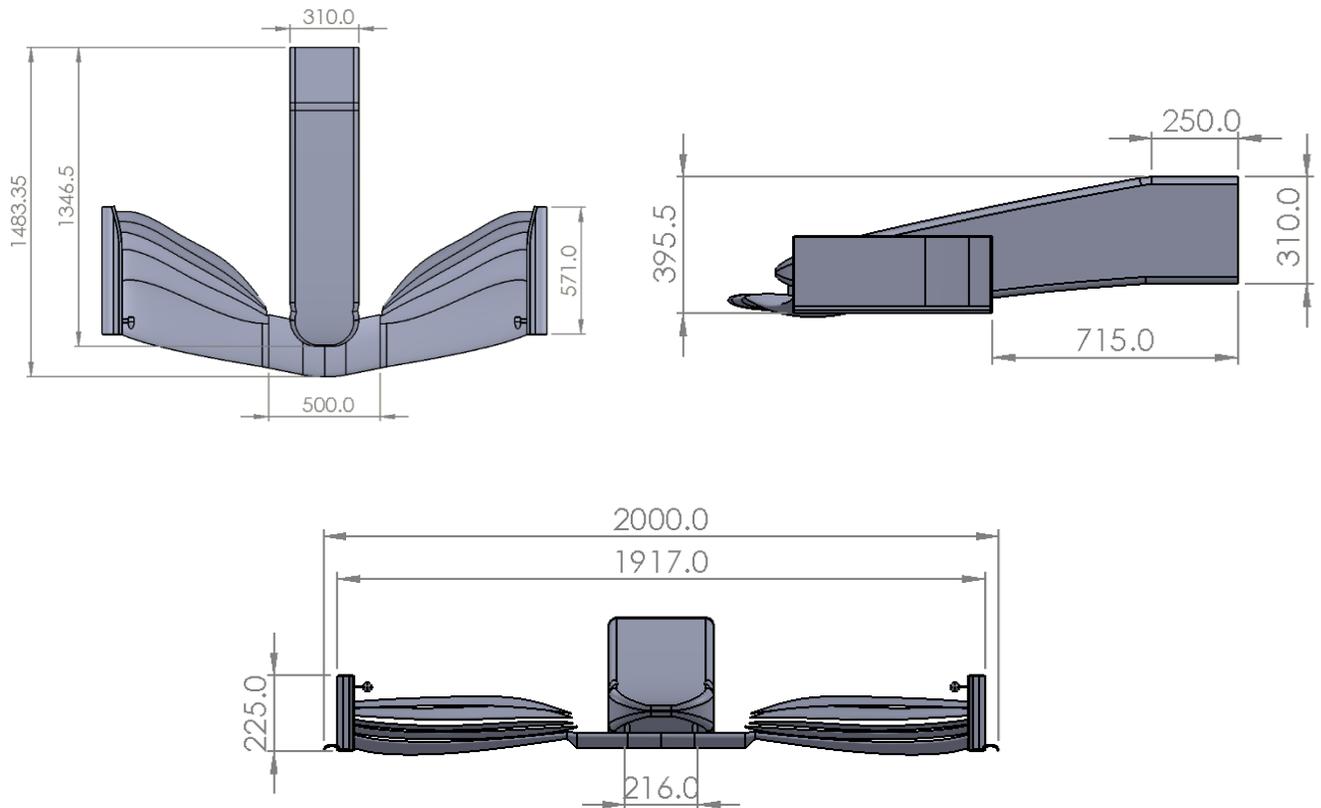
Anexos

Anexo 1**Dimensiones del McLaren MP4/4****Anexo 2****Dimensiones del Williams FW31**



Anexo 3

Dimensiones del Mercedes-AMG W12

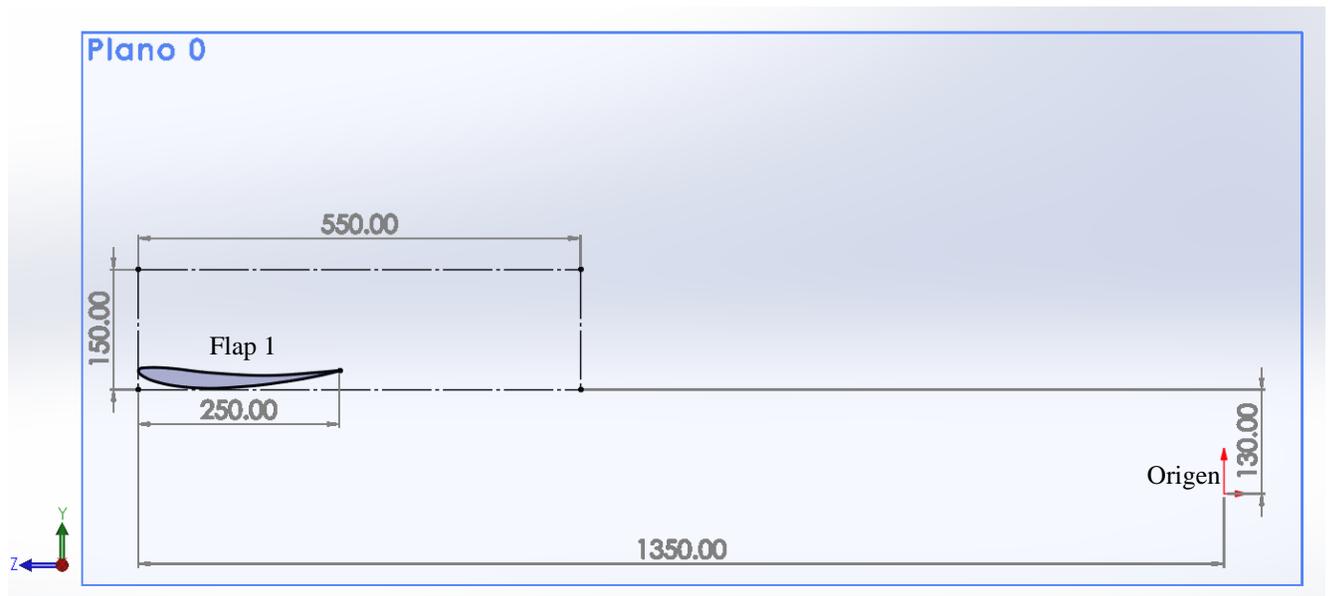


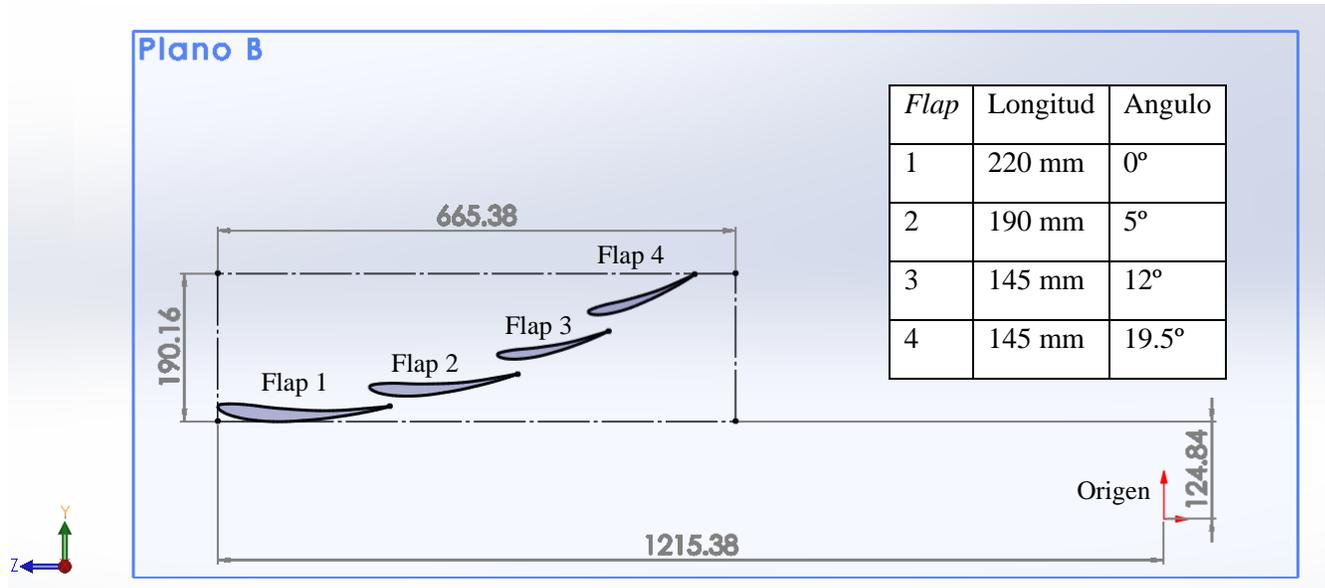
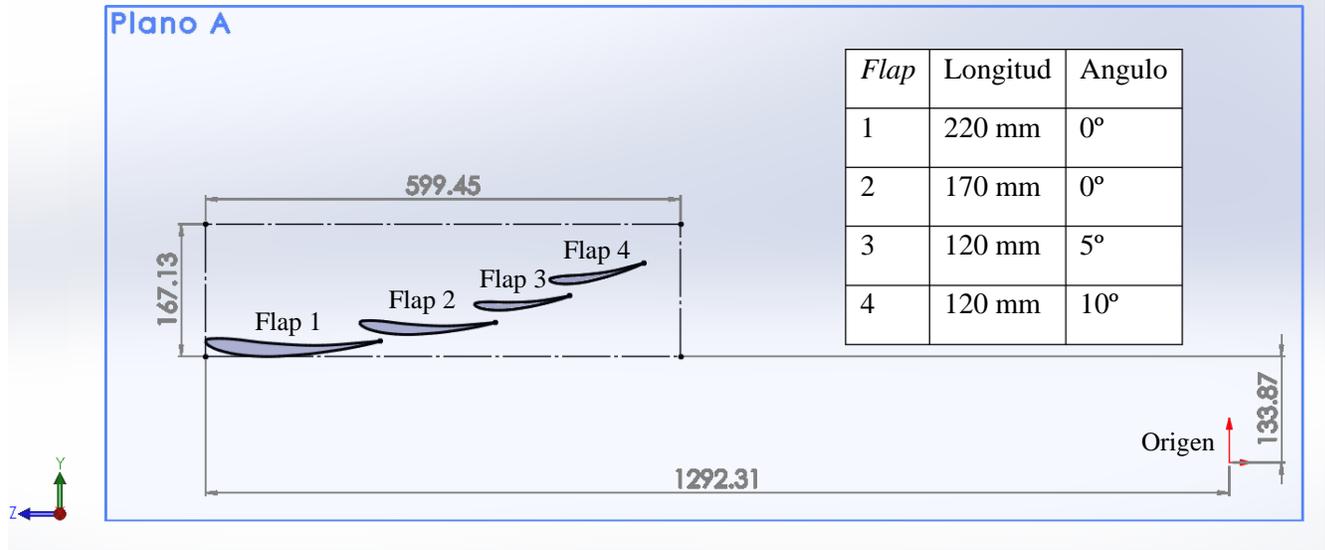
Anexo 4

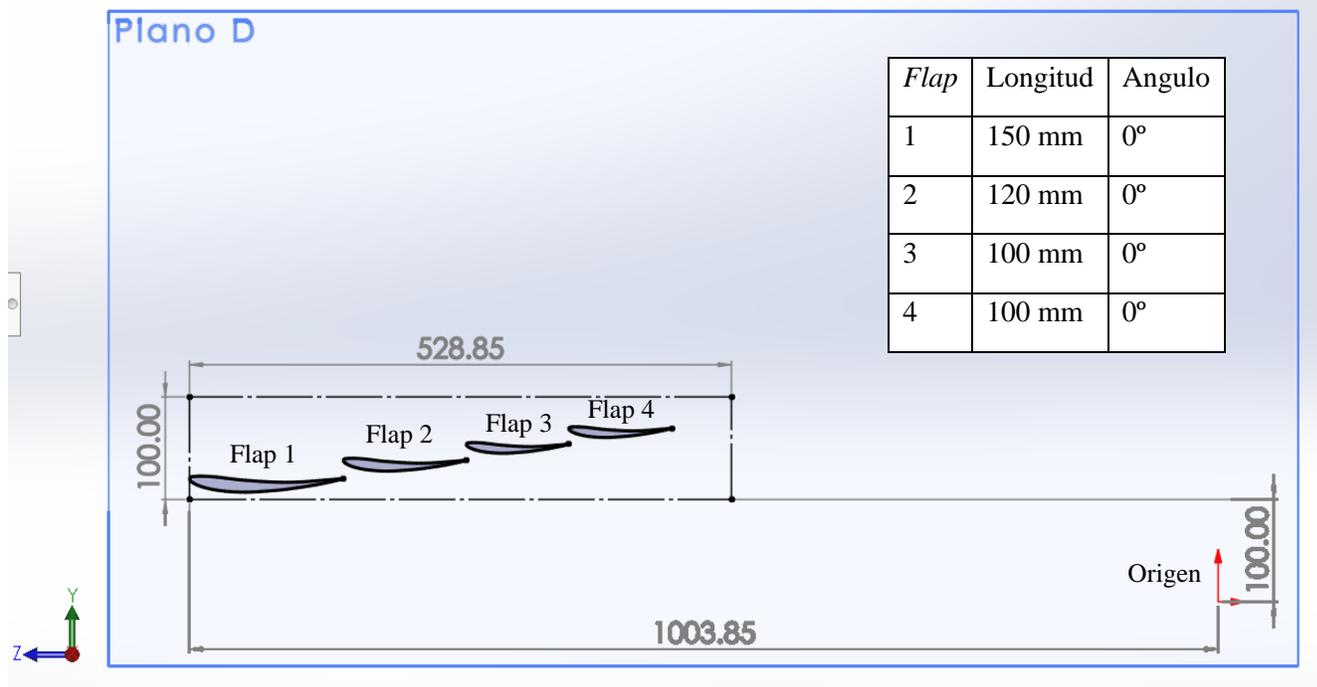
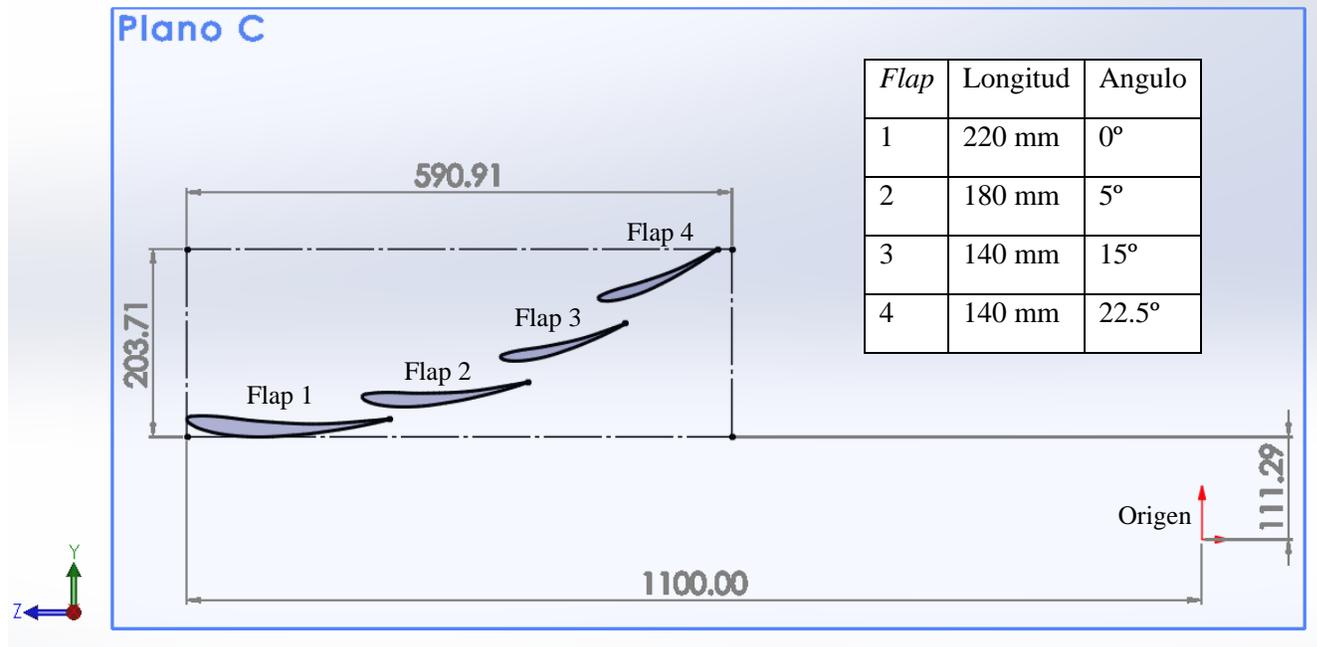
Coordenadas del perfil *GOE-195*

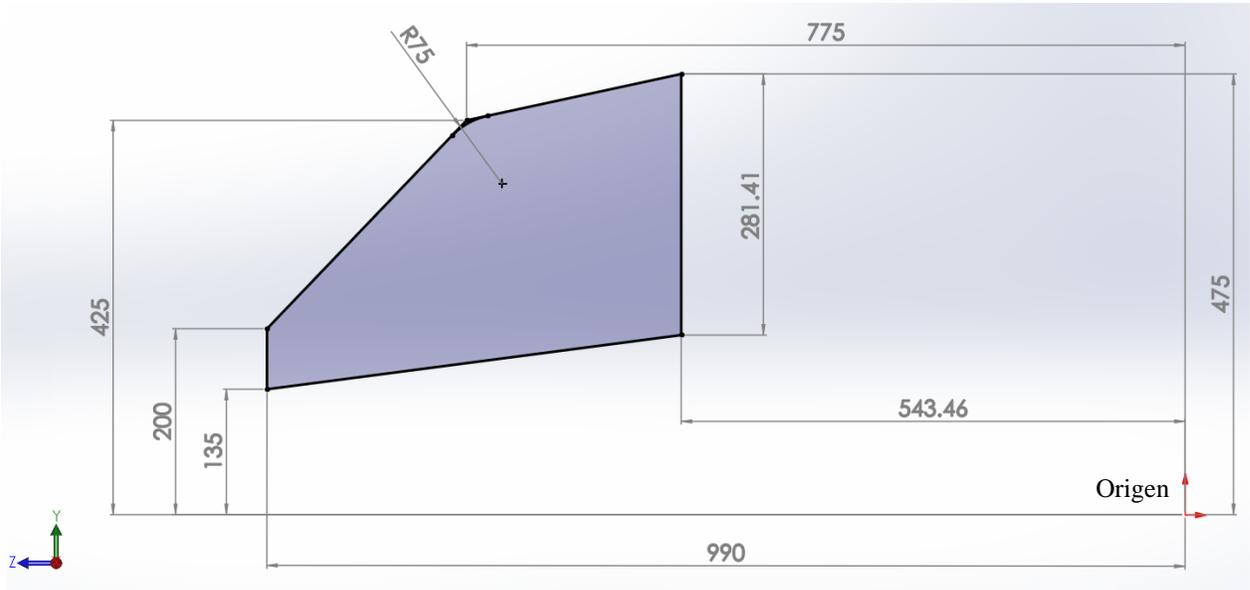
GOE 195 AIRFOIL

1.000000	0.002000		
0.950000	0.014150	0.012500	-0.011790
0.900000	0.025300	0.025000	-0.013570
0.800000	0.044600	0.050000	-0.015150
0.700000	0.059900	0.075000	-0.015720
0.600000	0.073200	0.100000	-0.015300
0.500000	0.081500	0.150000	-0.012450
0.400000	0.087800	0.200000	-0.007600
0.300000	0.087100	0.300000	0.005100
0.200000	0.078400	0.400000	0.013800
0.150000	0.070550	0.500000	0.020500
0.100000	0.058700	0.600000	0.024200
0.075000	0.051280	0.700000	0.022900
0.050000	0.041850	0.800000	0.016600
0.025000	0.028420	0.900000	0.008300
0.012500	0.020210	0.950000	0.004150
0.000000	0.000000	1.000000	0.000000

Proyecciones de los *flaps* del *MICC-75*





Dimensiones del *Endplate* del MICC-75

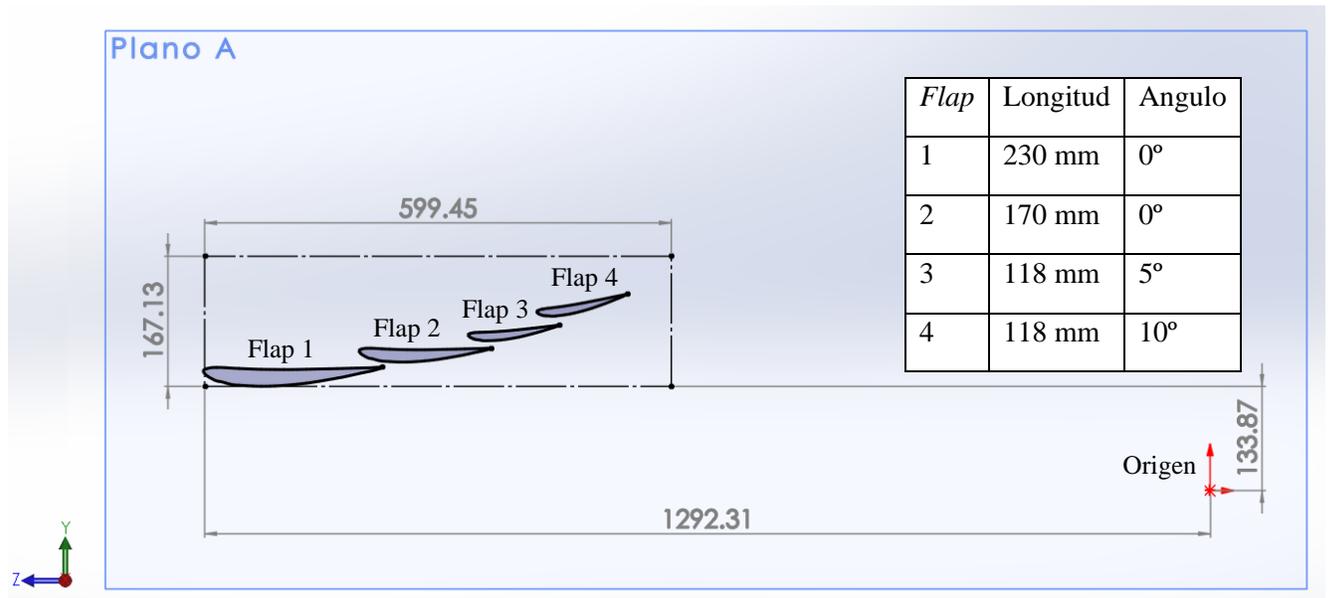
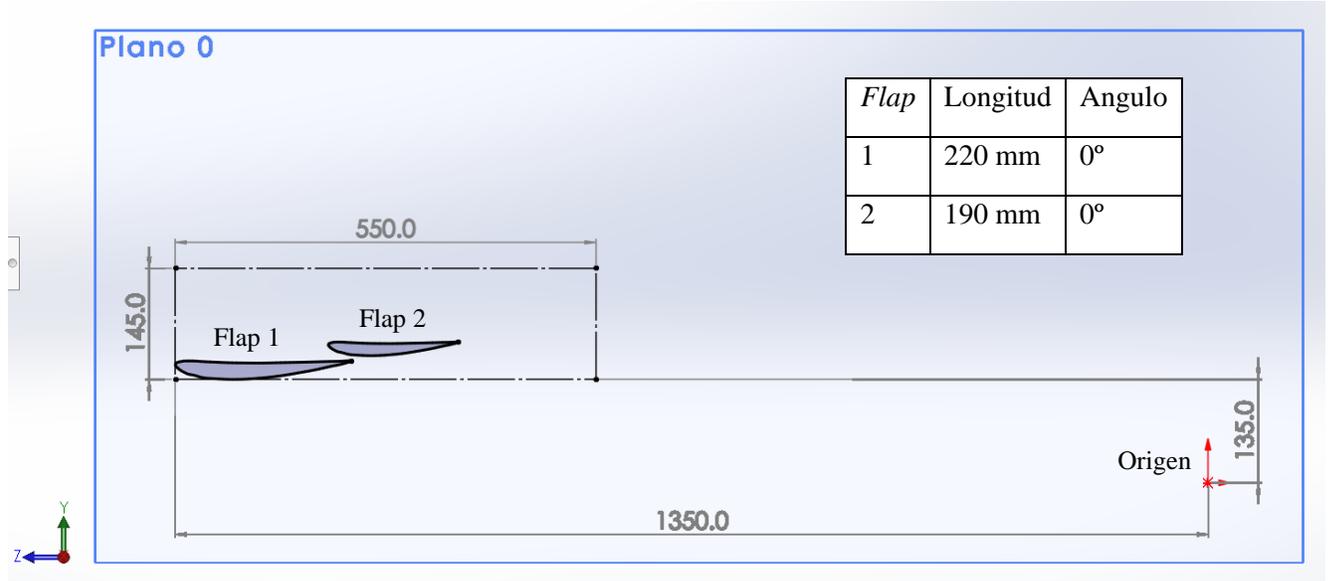
Anexo 5

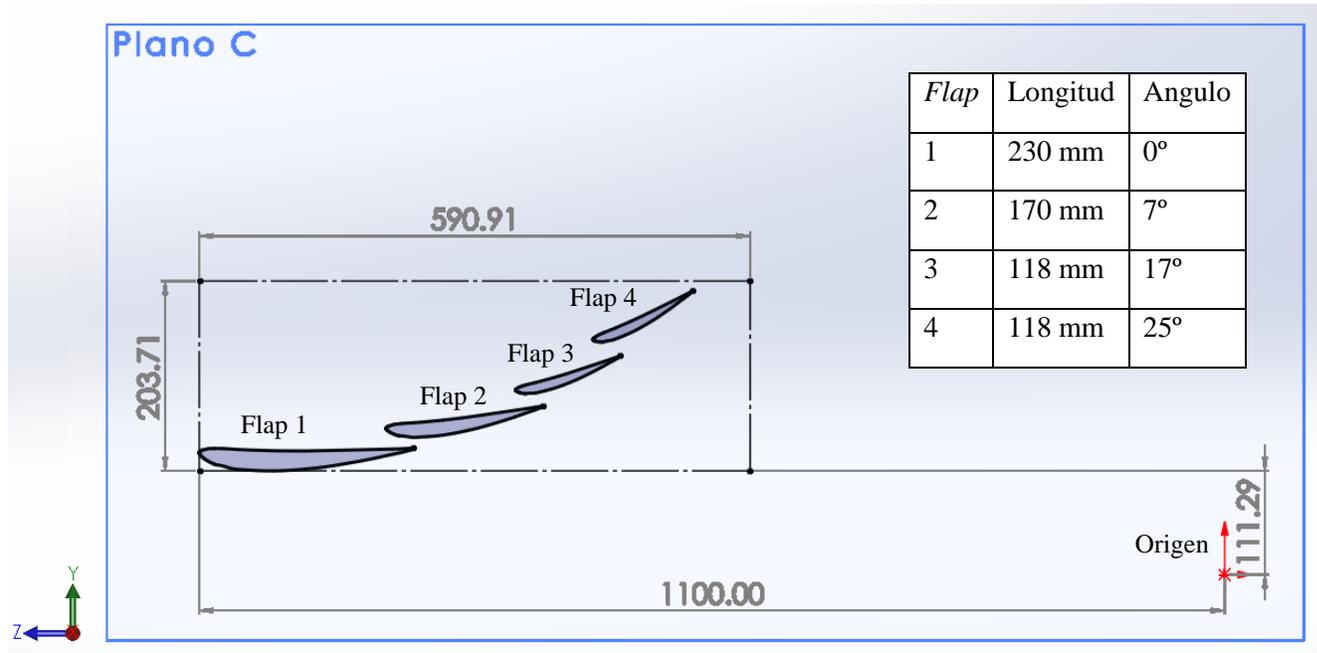
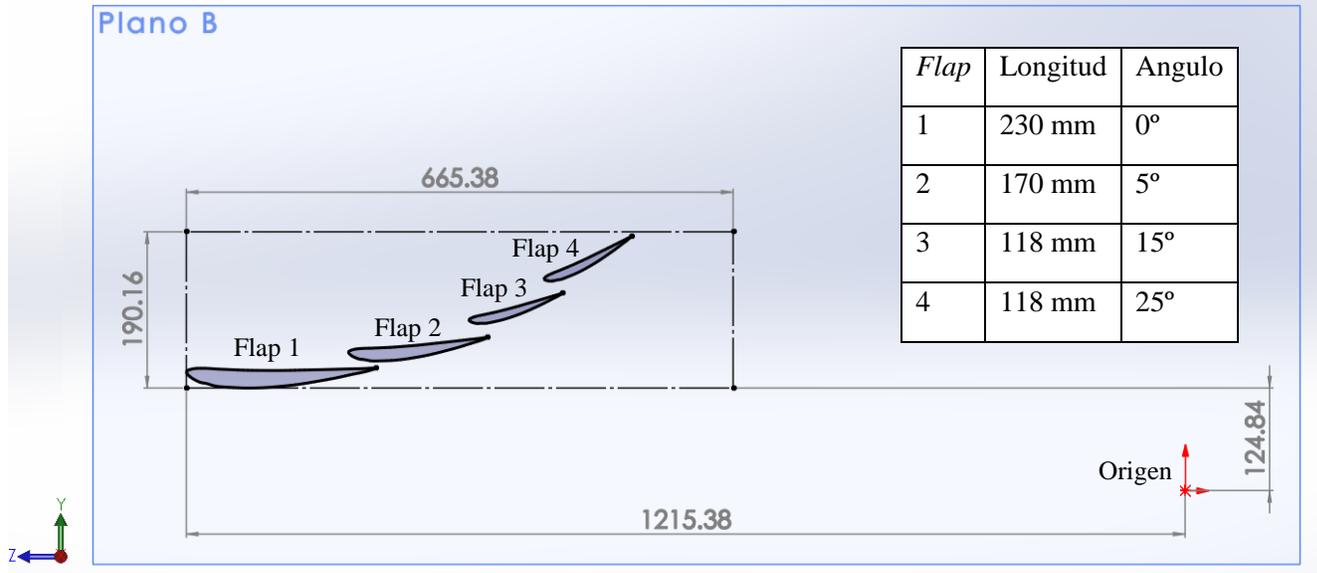
Coordenadas del perfil *ISA-960*

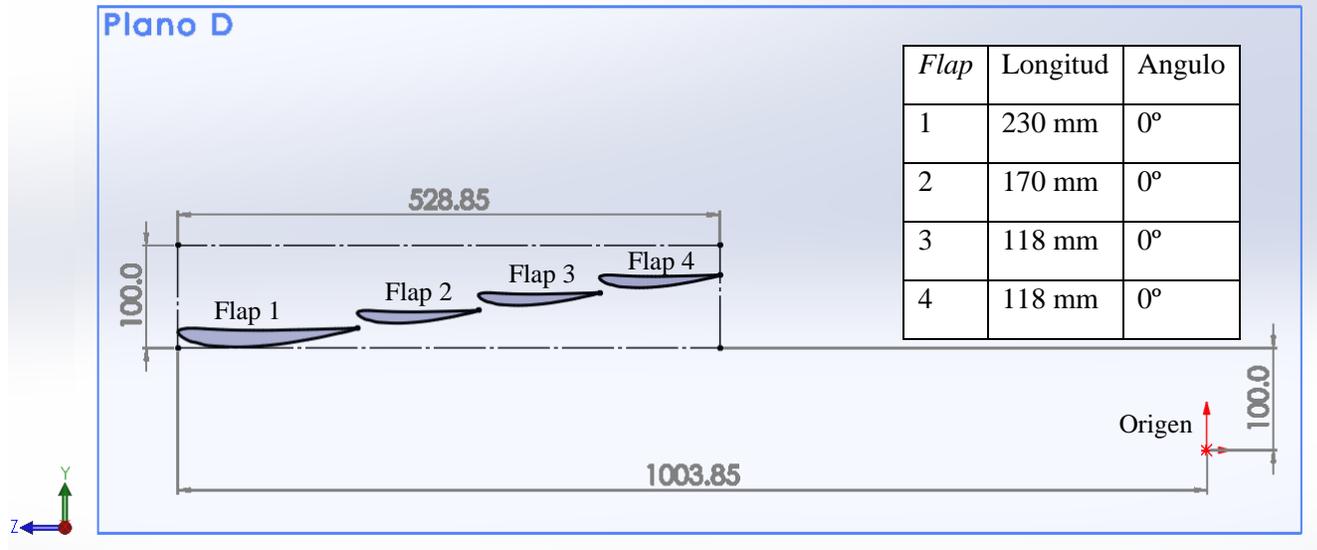
I. S. A. 960

1.000000	0.004200		
0.950000	0.017000	0.012500	0.008500
0.900000	0.027500	0.025000	0.005000
0.800000	0.049500	0.050000	0.000500
0.700000	0.067700	0.075000	0.000000
0.600000	0.084200	0.100000	0.000000
0.500000	0.095700	0.150000	0.003000
0.400000	0.103000	0.200000	0.005500
0.300000	0.104300	0.300000	0.009700
0.200000	0.099000	0.400000	0.011200
0.150000	0.093500	0.500000	0.011500
0.100000	0.079200	0.600000	0.009500
0.075000	0.075000	0.700000	0.007500
0.050000	0.063700	0.800000	0.005000
0.025000	0.049000	0.900000	0.002500
0.012500	0.038300	0.950000	0.001000
0.000000	0.018000	1.000000	0.000000

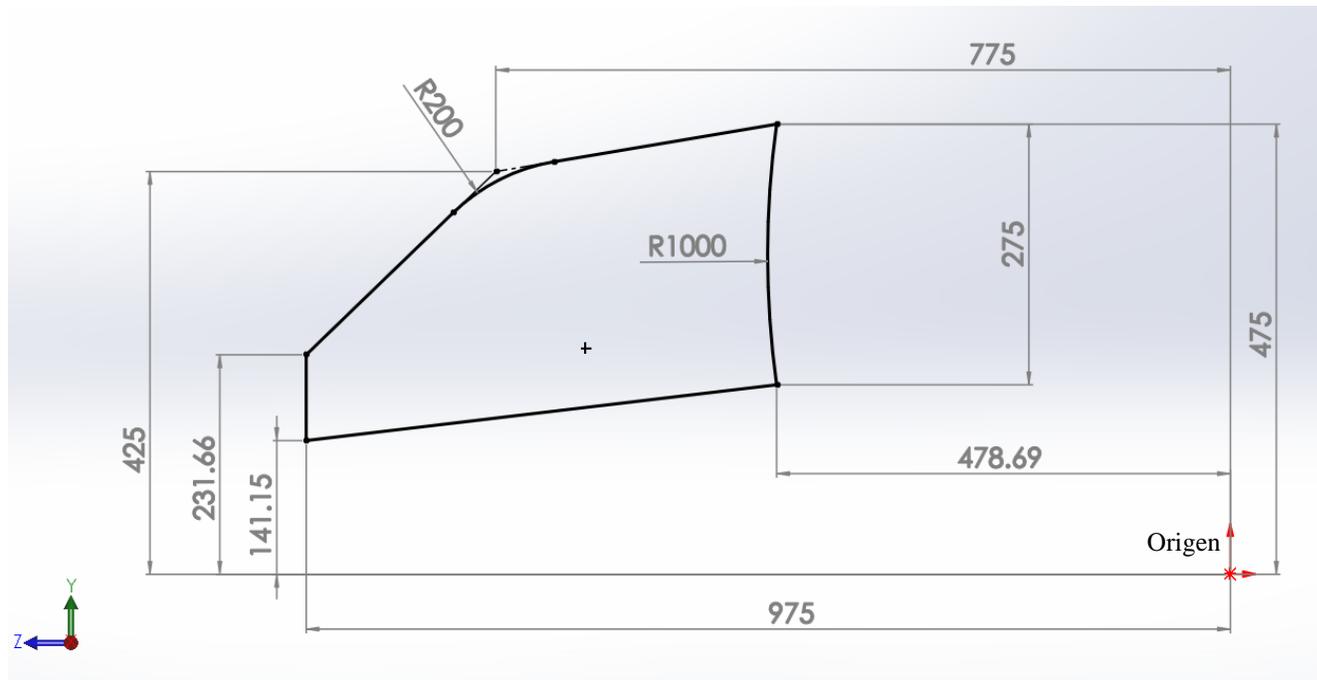
Proyecciones de los flaps del CLV-54







Dimensiones del *Endplate* del CLV-54

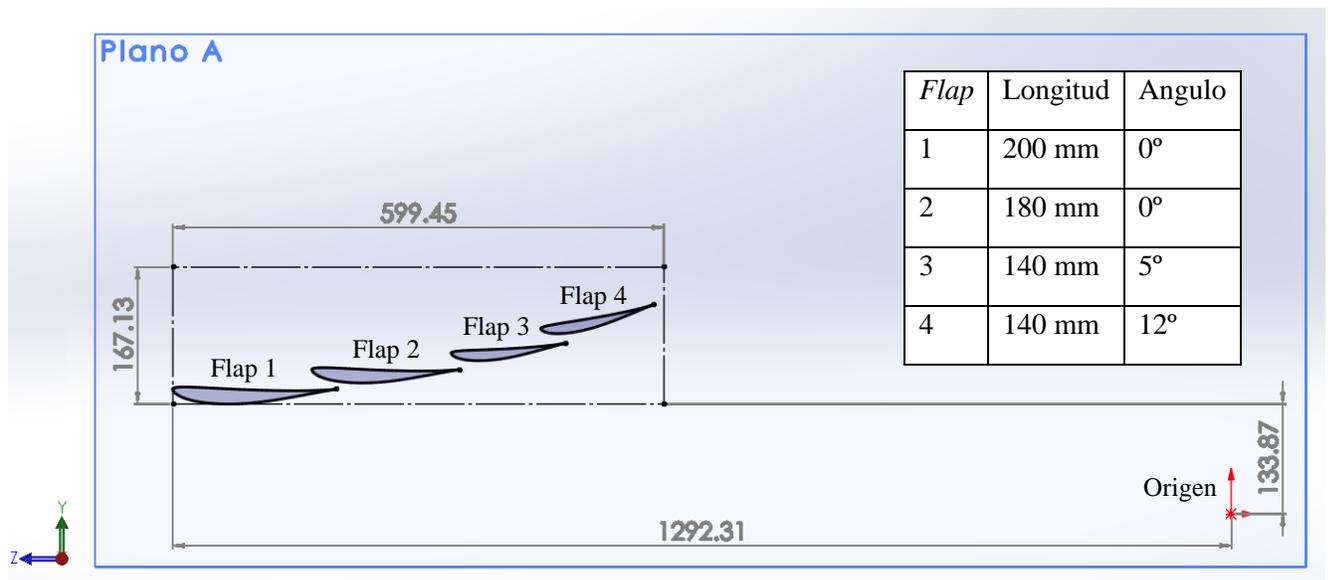
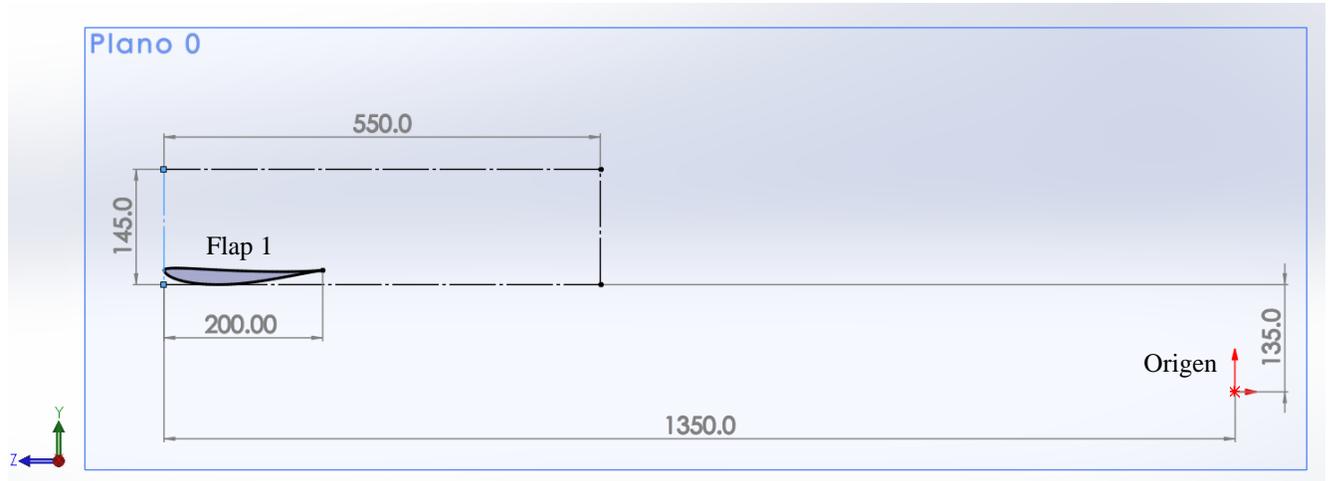


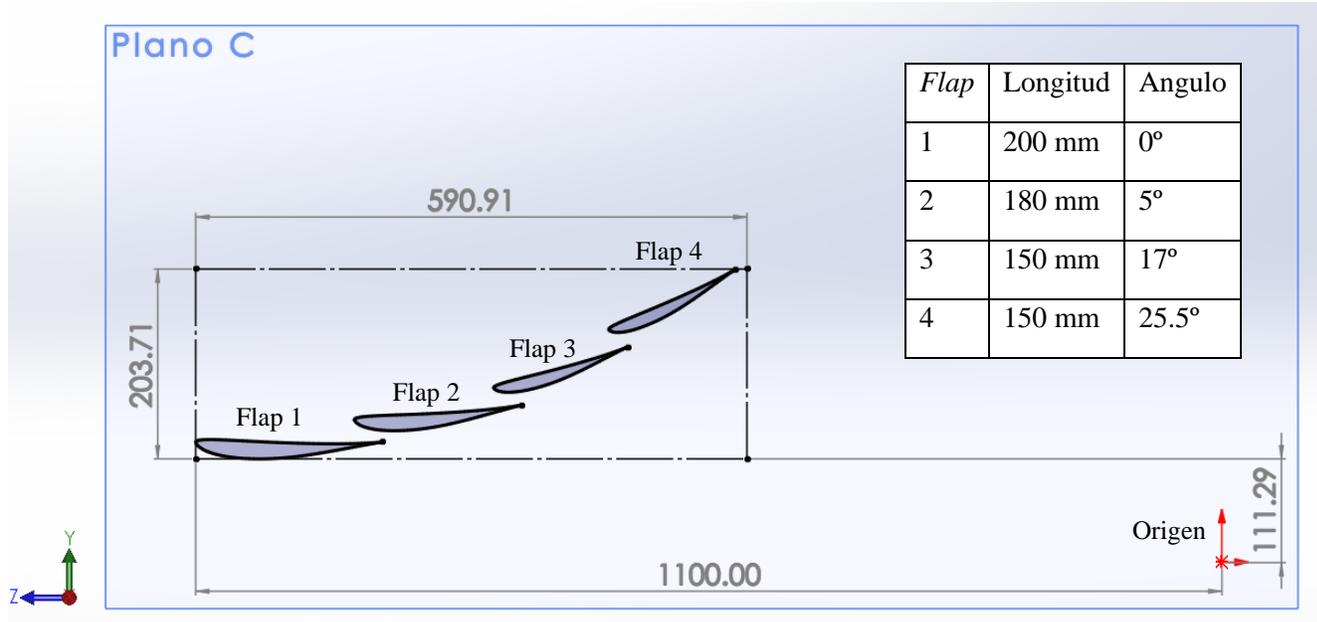
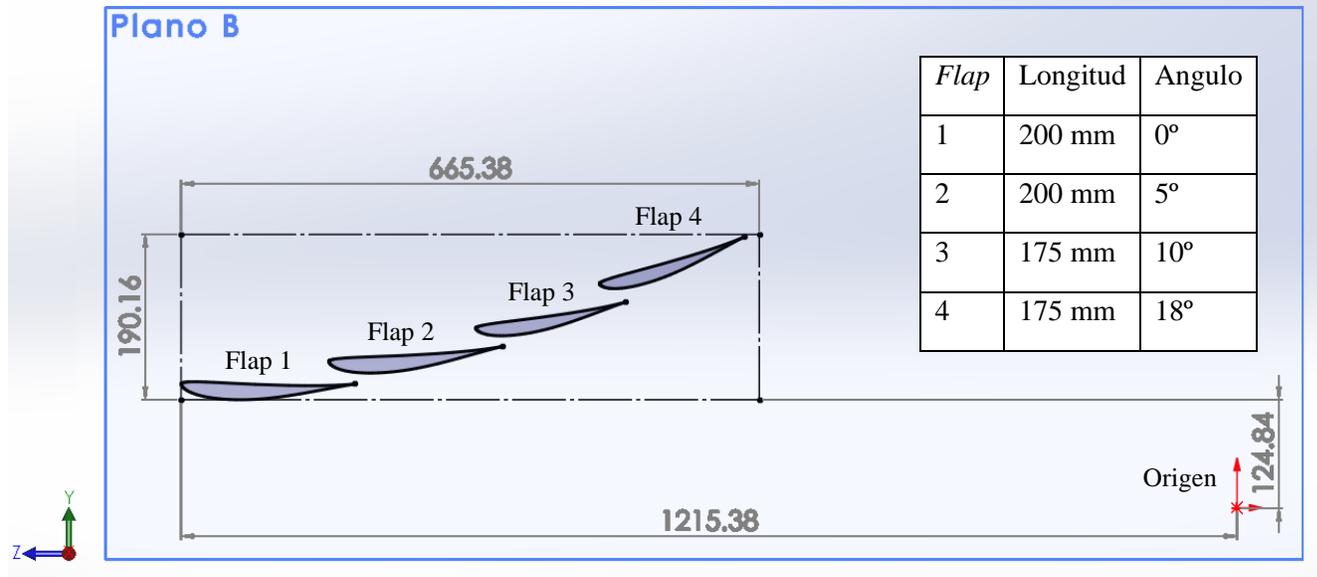
Anexo 6**Coordenadas del perfil S4320**

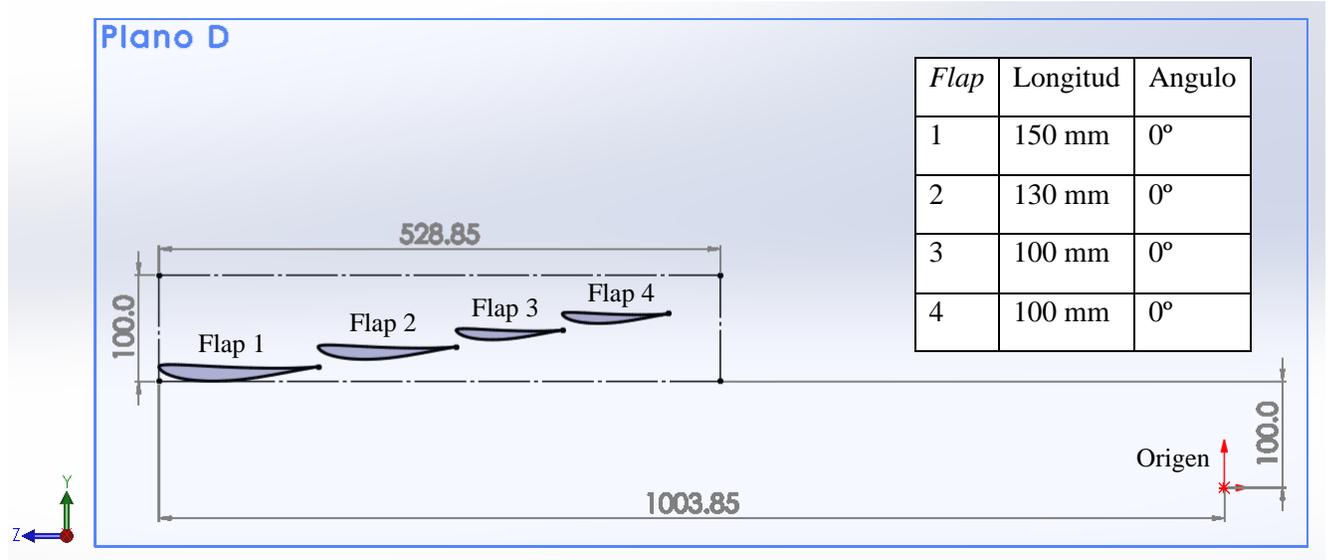
S4320

1.000000	0.000000	0.000090	-0.001160
0.996820	0.000440	0.003800	-0.006010
0.987390	0.001820	0.013720	-0.009310
0.972020	0.004260	0.029260	-0.011680
0.951080	0.007800	0.050230	-0.013050
0.925000	0.012420	0.076480	-0.013480
0.894260	0.018040	0.107800	-0.013040
0.859370	0.024540	0.143900	-0.011850
0.820880	0.031750	0.184450	-0.010090
0.779330	0.039460	0.229000	-0.007880
0.735290	0.047460	0.277070	-0.005400
0.689310	0.055500	0.328070	-0.002830
0.641980	0.063330	0.381370	-0.000310
0.593840	0.070630	0.436290	0.002060
0.545360	0.077090	0.492130	0.004170
0.496980	0.082420	0.548180	0.005960
0.448980	0.086420	0.603740	0.007380
0.401690	0.089020	0.658110	0.008380
0.355490	0.090180	0.710570	0.008940
0.310750	0.089910	0.760470	0.009050
0.267830	0.088260	0.807160	0.008710
0.227120	0.085300	0.850000	0.007910
0.189030	0.081080	0.888330	0.006710
0.153870	0.075630	0.921610	0.005260
0.121920	0.069060	0.949390	0.003730
0.093420	0.061470	0.971330	0.002290
0.068550	0.053000	0.987190	0.001100
0.047450	0.043850	0.996780	0.000290
0.030220	0.034250	1.000000	0.000000
0.016900	0.024450		
0.007440	0.014830		
0.001790	0.005980		
0.000000	0.000000		

Proyecciones de los flaps del JJRC-10







Dimensiones del Endplate del JJRC-10

