



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA AEROESPACIAL

**ANÁLISIS AERODINÁMICO EXPERIMENTAL SOBRE
MODELO DE AUTOMÓVIL DE LA CATEGORÍA SÚPER
TC 2000**

A1033 - TRABAJO FINAL

AUTOR: SR. AGUSTÍN RISSO KALYNA

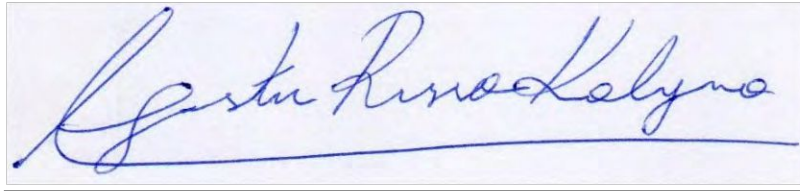
DIRECTOR: ING. PABLO MANTELLI

CO – DIRECTOR: DR. ING. JULIO MARAÑÓN DI LEO

LA PLATA, JULIO 2022

DECLARACIÓN

Yo, AGUSTÍN RISSO KALYNA declaro que el trabajo presentado es de mi autoría; que no está vinculado a una presentación previa para grado alguno o calificación profesional; y que he consultado exclusivamente a las referencias bibliográficas que se incluyen al final del documento.

A rectangular box containing a handwritten signature in blue ink. The signature is cursive and reads "Agustín Riso Kalyna".

Agustín Riso Kalyna

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo realizado lleva el nombre de “Análisis aerodinámico experimental sobre modelo de automóvil de la categoría Súper TC 2000”, el cual fue desarrollado por Agustín Riso Kalyna con aspiración al título de Ingeniero Aeroespacial, mediante la correspondiente dirección y supervisión de mi persona y el director a cargo, en las instalaciones del departamento de aeronáutica, perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata.

REGISTRO PERSONAL Y BIBLIOGRÁFICO

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDO/S Y NOMBRE:	RISSO KALYNA, AGUSTÍN
DIRECCIÓN:	CALLE 45 N°561, LA PLATA
EMAIL:	agustinrissokalyna@gmail.com
CELULAR:	+54 2227-458989

DATOS DEL TRABAJO	
TITULO:	“Análisis aerodinámico experimental sobre modelo de automóvil de la categoría Súper TC 2000”
AUTOR:	Risso Kalyna, Agustín
FECHA DE ENTREGA:	Julio 2022
DIRECTOR DEL TRABAJO:	Ing. Mantelli, Pablo
CARRERA:	Ingeniería Aeroespacial
RESUMEN:	Cuantificar y realizar comparativa entre cargas aerodinámicas de resistencia generadas sobre un vehículo a escala estándar y con la utilización de dispositivos aerodinámicos mediante ensayos en túnel de viento de sección cerrada en pos de la búsqueda de la configuración de menor resistencia.
PALABRAS CLAVES:	Mecánica de Fluidos – Experimental – Spoiler – Alerón – Aerodinámica – Resistencia – Sustentación negativa – Visualización – Anemometría.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi familia, por el apoyo incondicional y gran esfuerzo para que logre llevar a cabo mi carrera universitaria y pueda estar cada día más cerca de lograr mis sueños.

A la Facultad de Ingeniería, por formarme como profesional y brindarme todos los elementos necesarios para lograr graduarme.

Al Departamento de Aeronáutica, por darme la oportunidad de tener mi primera experiencia laboral y su cálido trato en el día a día.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVO	2
3.	ALCANCE	3
4.	DESARROLLO DEL PROYECTO	4
5.	LUGAR DE TRABAJO	6
5.1.	INSTRUMENTACIÓN	6
6.	PRINCIPIO DE LA AERODINÁMICA	7
6.1.	APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS TEÓRICOS	9
6.1.1.	FUERZAS ACTUANTES	9
6.2.	RESISTENCIA AERODINÁMICA	10
6.2.1.	RESISTENCIA PARÁSITA	10
6.2.2.	RESISTENCIA INDUCIDA	11
7.	AERODINÁMICA AUTOMOTRIZ	12
7.1.	ESFUERZOS VISCOSOS	12
7.2.	CONTRIBUCIONES A LA RESISTENCIA VEHICULAR	17
7.3.	COEFICIENTES AERODINÁMICOS	18
7.3.1.	ANÁLISIS DE COEFICIENTES AERODINÁMICOS	20
7.4.	NÚMERO DE REYNOLDS	22
8.	DISPOSITIVOS DE CONTROL DE FLUJO	23

8.1.	SPOILER	23
8.1.1.	SPOILERS TRASEROS	23
8.1.2.	SPOILERS DELANTEROS	24
8.2.	VARIACIONES EN LAS CAJAS DE AIRE	26
8.3.	DIVISOR DE FLUJO	26
8.4.	ALERÓN	28
8.4.1.	CARGA AERODINÁMICA Y CRITERIOS DE DISEÑO	30
8.4.2.	ALERONES DE UN SOLO ELEMENTO	31
8.4.3.	ALERONES DE DOS ELEMENTOS	31
8.4.4.	MÉTODO ANALÍTICO PARA EL POSICIONAMIENTO DE PERFILES	32
8.4.5.	DERIVAS LATERALES	36
8.5.	EFECTO SUELO	38
8.5.1.	FONDOS PLANOS	41
8.5.2.	EFECTO DE LA PROXIMIDAD AL SUELO	42
9.	TAMAÑO Y POSICIONAMIENTO DEL MODELO	44
9.1.	DIMENSIONES Y BLOQUEO	44
9.2.	SIMULACIÓN DEL SUELO MÓVIL	45
9.3.	MONTAJE	50
9.4.	EFECTO DE LAS RUEDAS FIJAS Y/O MÓVILES	51
10.	ENSAYOS REALIZADOS	52
10.1.	AJUSTE EXPERIMENTAL	54
11.	EQUIPAMIENTO	59
11.1.	MODELO	59
11.1.1.	DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD)	59
11.2.	MATERIALIZACIÓN DEL MODELO A ESCALA	63
11.2.1.	MASILLADO	63
11.3.	CINTA ERGONOMÉTRICA	66
11.4.	SUJECIÓN DE CELDAS DE CARGA	67
11.5.	TÚNEL DE VIENTO	67
11.5.1.	SECCIÓN DE PRUEBA	68
11.6.	VISUALIZACIÓN	68
12.	RESULTADOS	69

12.1.	CARGAS DE RESISTENCIA	69
12.1.1.	SUELO FIJO	69
12.1.2.	SUELO MÓVIL	72
12.1.3.	COMPARACIÓN ENTRE ENSAYOS CON SUELO FIJO Y MÓVIL	76
12.2.	ANEMOMETRÍA	81
13.	VISUALIZACIÓN POR HUMO	83
13.1.	CONFIGURACIÓN DE COMPETENCIA	83
13.2.	CONFIGURACIÓN DE SERIE	86
14.	CONCLUSIÓN	89
15.	BIBLIOGRAFÍA	91
16.	ANEXO	92
16.1.	MARCO TEÓRICO	92
16.1.1.	ECUACIÓN DE BERNOULLI	92
16.1.2.	EFEECTO VENTURI	93
16.1.3.	PRINCIPIO DE SUSTENTACIÓN Y RESISTENCIA	94
16.2.	REGLAMENTACIÓN DE LA CATEGORÍA SUPER TC 2000 DE LA REPÚBLICA ARGENTINA	95
16.3.	PERFILES AERODINÁMICOS – FIA FÓRMULA 3	100
16.4.	PLANOS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Posicionamiento del modelo - Vista lateral	4
Figura 2. Posicionamiento del modelo – Vista trasera	5
Figura 3. Teoría de la carga aerodinámica de Newton	7
Figura 4. Líneas de corriente sobre un perfil aerodinámico	9
Figura 5. Comparación entre flujo laminar y turbulento	12
Figura 6. Flujo adherido y separado	12
Figura 7. Etapas de la capa límite sobre superficie de un cuerpo	13
Figura 8. Transición de capa límite laminar a turbulenta	14
Figura 9. Coeficiente de presión sobre la envergadura del vehículo	16
Figura 10. Estela turbulenta	17
Figura 11. Trailing vortex	17
Figura 12. Similitud entre un automóvil y un perfil de aeronave	20
Figura 13. Comparación de patrones de flujo - Cuerpo romo y fuselado	20
Figura 14. Automóvil con spoiler en el tren trasero	23
Figura 15. Caja de aire en tren delantero de automóvil	25
Figura 16. Splitter	27
Figura 17. Perfil alar (superior) y alerón (inferior)	29
Figura 18. Diferenciales de fuerza en cada punto que derivan en una fuerza resultante aplicada en el centro de presiones del alerón	30
Figura 19. Alerón con ángulo de ataque demasiado alto, y flujo desprendido hacia el borde de fuga	30
Figura 20. Perfil superior	32
Figura 21. Perfil inferior	32
Figura 22. Distribución del coeficiente de presiones con ángulo de incidencia de 3°	34
Figura 23. Configuración de perfiles aerodinámicos	35
Figura 24. Alerón trasero	36
Figura 25. Simulación flujo sobre perfil superior – Vista frontal	36
Figura 26. Simulación de flujo sobre perfil superior	37
Figura 27. Flujo sobre alerón con endplates – Vista lateral	37
Figura 28. Flujo sobre alerón con endplates – Vista lateral / frontal	38
Figura 29. Flujo sobre alerón con endplates – Vista frontal	38
Figura 30. Engrosamiento de la capa límite	39

Figura 31. Efecto Venturi	40
Figura 32. Inclinación de todo el auto, haciendo uso del efecto Venturi	41
Figura 33. Coeficientes aerodinámicos de elipsoide	42
Figura 34. Coeficientes aerodinámicos de semi-elipsoide	43
Figura 35. Cuerpo aerodinámico inmerso en corriente libre	44
Figura 36. Flujo de corriente sobre cuerpo aerodinámico ubicado entre paredes	45
Figura 37. Capa límite de vehículo en carretera	46
Figura 38. Capa límite de modelo y piso de túnel de viento	46
Figura 39. Efecto en CD con el agregado de espuma en la zona inferior de las ruedas	47
Figura 40. Suelo alternativo elevado en la sección de prueba	48
Figura 41. Succión de capa límite anterior al modelo	48
Figura 42. Succión y soplado de capa límite mediante ranuras inferiores	49
Figura 43. Simulación del suelo móvil mediante cinta ergonómica	49
Figura 44. Montaje del modelo con sujeción mediante varilla roscada	50
Figura 45. Área transversal y perímetro de automóvil a escala real	52
Figura 46. Modelo de competición - Suelo fijo	53
Figura 47. Distancia entre trompa e inicio de cinta móvil	54
Figura 48. Modelo de serie - Suelo móvil	54
Figura 49. Celda de carga	55
Figura 50. Montaje de celda sobre bastidor	55
Figura 51. Posicionamiento de cinta y celdas de carga.	56
Figura 52. Pesos estandarizados	56
Figura 53. Manómetro digital con tubo Pitot	57
Figura 54. Sonda X	57
Figura 55. DANTEC Streamline 90N10 Frame - Computadora Sterling	58
Figura 56. Soporte de sensor de hilo caliente	58
Figura 57. Trompa delantera	59
Figura 58. Sección media - Vista lateral	60
Figura 59. Baúl trasero	60
Figura 60. Modelo con altura y diseño de calle, con agregado de pontones	61
Figura 61. Modelo de serie - Vista en perspectiva trasera – lateral	61
Figura 62. Modelo con alerón, aletas frontales laterales y splitter	61
Figura 63. Modelo con agregado de aletas frontales	62

Figura 64. Modelo a escala con sujeciones para ruedas	62
Figura 65. Vista trasera de modelo a escala	62
Figura 66. Vista frontal de modelo masillado - Escala al 8%	63
Figura 67. Modelo masillado - Vista trasera	63
Figura 68. Vista en perspectiva lateral - trasera	64
Figura 69. Aplicación de pintura – Vista lateral	64
Figura 70. Pintura – Vista en perspectiva delantera	65
Figura 71. Ruedas de ambos ejes	65
Figura 72. Alerón trasero	66
Figura 73. Acople de motor trifásico mediante correa dentada	66
Figura 74. Sujeción de las celdas de carga y el modelo	67
Figura 75. Túnel de viento disponible en las instalaciones de la UIDET LaCLyFA	68
Figura 76. Flujo separado sobre el capó	83
Figura 77. Punto de remanso	84
Figura 78. Flujo adherido / desprendido	84
Figura 79. Estela turbulenta con utilización de cinta móvil	86
Figura 80. Patrón de flujo sobre auto de serie	87
Figura 81. Vórtices sobre parabrisas trasero	87
Figura 82. Trayectoria del flujo en auto de serie	88
Figura 83. Flujo a través de tubería	92
Figura 84. Análisis de sustentación en un diferencial de perfil alar	95
Figura 85. Centros de cubo de rueda virtual	96
Figura 86. Trompa delantera del automóvil	97
Figura 87. Pontón lateral	97
Figura 88. Configuración del guardabarros delantero	98
Figura 89. Configuración del guardabarros trasero	99
Figura 90. Ubicación del alerón	100
Figura 91. Coordenadas de perfil superior - F3 FIA	100
Figura 92. Coordenadas de perfil inferior - F3 FIA	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de resistencia inducida.....	11
Tabla 2. Contribuyentes de la resistencia total	18
Tabla 3. Coeficientes aerodinámicos para cuerpos varios.....	21
Tabla 4. Coeficientes aerodinámicos de alerón de doble elemento.....	33
Tabla 5. Coeficientes aerodinámicos de alerón de doble elemento modificado	35
Tabla 6. Número de Re correspondiente a cada velocidad.....	53
Tabla 7. Tabla resumen - CD	79
Tabla 8. CD de referencia	80

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Resistencia vs. Velocidad - Suelo fijo - Auto de serie	69
Gráfica 2. CD vs. Re - Suelo fijo - Auto de serie	70
Gráfica 3. Resistencia vs. Velocidad - Suelo fijo - Auto de competencia	70
Gráfica 4. CD vs. Re - Suelo fijo - Auto de competencia	71
Gráfica 5. CD vs. Re - Altura máxima	71
Gráfica 6. CD vs. Re - Altura media	72
Gráfica 7. CD vs. Re - Altura mínima	72
Gráfica 8. Resistencia vs. Velocidad - Suelo móvil - Auto de serie	73
Gráfica 9. CD vs. Re - Suelo móvil - Auto de serie	73
Gráfica 10. Resistencia vs. Velocidad - Suelo móvil - Auto de competencia	74
Gráfica 11. CD vs. Re - Suelo móvil - Auto de competencia	74
Gráfica 12. CD vs. Re - Altura máxima	75
Gráfica 13. CD vs. Re - Altura media	75
Gráfica 14. CD vs. Re - Altura mínima	76
Gráfica 15. CD vs. Re - Auto de competencia - Altura máxima	76
Gráfica 16. CD vs. Re - Auto de competencia - Altura media	77
Gráfica 17. CD vs. Re - Auto de competencia - Altura mínima	77
Gráfica 18. CD vs. Re - Auto de serie - Altura máxima	78
Gráfica 19. CD vs. Re - Auto de serie - Altura media	78
Gráfica 20. CD vs. Re - Auto de serie - Altura mínima	79
Gráfica 21. Anemometría - Altura mínima - V: 5 m/s	81
Gráfica 22. Anemometría - Altura mínima - V: 9 m/s	81
Gráfica 23. Anemometría - Altura mínima - V: 13 m/s	82
Gráfica 24. Anemometría - Altura mínima - V: 16 m/s	82

ACRÓNIMOS

C_d : Coeficiente de resistencia 2D

C_l : Coeficiente de sustentación 2D

C_D : Coeficiente de resistencia 3D

C_L : Coeficiente de sustentación 3D

C_p : Coeficiente de presiones

ρ : Densidad del fluido

α : Ángulo de ataque de perfil aerodinámico u planta alar

μ : Viscosidad dinámica del fluido

Re: Número de Reynolds

c: Cuerda de perfil aerodinámico u planta alar

b: Envergadura de planta alar

ABS: Acrilonitrilo Butadieno Estireno

CG: Centro de gravedad

p: presión estática del fluido en el punto en el que el coeficiente de presión es evaluado

v: Velocidad del flujo

D_i : Resistencia inducida

S: Superficie alar

e: Factor de eficiencia de planta alar (Factor de Oswald)

p_∞ : Presión de referencia en la corriente de flujo sin perturbar

ρ_∞ : Densidad del aire, en este caso a nivel del mar y atmósfera estándar

V_∞ : Velocidad de referencia en la corriente de flujo sin perturbación

\vec{n} : Vector normal

τ : Tensiones de corte

p_{ext} : Presión en el extradós del perfil aerodinámico

p_{int} : Presión en el intradós del perfil aerodinámico

dL: Sustentación diferencial

dx: Diferencial de línea

$C_{p_{int}}$: Coeficiente de presiones en el intradós

$C_{p_{ext}}$: Coeficiente de presiones en el extradós

L: Fuerza de sustentación

D: Fuerza de resistencia

L*: Longitud de referencia

1. INTRODUCCIÓN

El automovilismo es uno de los espectáculos más populares a nivel mundial, sus distintas categorías en variados países han trascendido por una gran cantidad de años y, categorías de la Federación Internacional de Automovilismo (FIA), como lo son la Fórmula 1, WEC (World Endurance Championship) o WRC (World Rally Championship) forman parte de los deportes más seguidos a nivel mundial.

Así mismo, involucra a los mayores inversores y accionistas, envuelve a un gran número de empresas, fabricantes, deportistas, ingenieros y patrocinadores.

Se desarrollan las tecnologías más innovadoras que implican el aumento de eficiencia en cuanto a diferentes aspectos, ya sea en el ámbito de impulsores, aerodinámica, suspensión y neumáticos, con el objetivo de ganar el gran premio de cada fin de semana y obtener el título a final del campeonato.

Existen variadas categorías dentro del automovilismo, cuyo reglamento impone el máximo de reformas que se le pueden realizar al automóvil de calle o serie, tanto interiores como exteriores. Pero además existen casos particulares, como las categorías de fórmula, donde el automóvil no tiene ninguna semejanza a uno convencional, sino que está diseñado estrictamente para el rodaje sobre circuitos de carrera.

Por otra parte, en Argentina, la situación es peculiar, las categorías más reconocidas por el público están constituidas por automóviles de calle conducidos a diario; pero también aquellos autos que fueron utilizados a mediados de 1970. Estos representan sólidamente el automovilismo argentino. En aquel entonces cuatro compañías de autos (Chrysler, Chevrolet, Ford Motors Argentina e Industrias Kaiser Argentina (IKA)) decidieron montar sus fábricas en Argentina y crear automóviles nacionales con impronta norteamericana y europea, en el caso de IKA Torino. Además de fomentar la industria nacional, hicieron nacer el fanatismo por el automovilismo que perdura en el tiempo y es transmitido en familias de generación en generación.

En un circuito de carreras, se pueden apreciar modificaciones en la estructura, motor, aerodinámica y todo aquel elemento que pueda mejorar la maniobrabilidad y la velocidad del automóvil en búsqueda de un espectáculo más entretenido.

Sin embargo, las reformas no son libres, ya que para cada categoría existe un reglamento a respetar.

Particularmente, en este trabajo se estudiará una componente de la aerodinámica, la cual se define como *resistencia aerodinámica*.

2. OBJETIVO

Este trabajo tiene como finalidad el estudio experimental en túnel de viento de las cargas de resistencia de un modelo a escala del vehículo Toyota Corolla 2020 de la categoría argentina de automovilismo Súper TC 2000.

Se evaluará la influencia en la fuerza de resistencia de los dispositivos aerodinámicos que aumentan la fuerza de sustentación negativa y, por otra parte, se cuantificará la variación de la resistencia debido al cambio del campo de velocidades modificado debido a la utilización de una cinta móvil emuladora del movimiento del suelo.

3. ALCANCE

El trabajo se realizará sobre un modelo a 1:12.5 de escala correspondiente a un vehículo Toyota Corolla. Si bien los ensayos sobre el modelo serán a un Re muy por debajo del Re que experimenta el vehículo en la condición de operación sobre carretera, se obtiene un resultado cualitativo que se debe verificar en la escala real.

Puntualmente se estudiarán dos configuraciones para el automóvil. Una de estas será con el auto de serie y, la otra, con el agregado de dispositivos aerodinámicos a la configuración original.

Los ensayos a realizar serán con piso fijo y móvil, modificándose la distancia entre el plano de referencia (fondo plano de la sección media del vehículo) y el suelo, desde una altura mínima de 20 mm hasta la máxima de 40 mm para ambas configuraciones.

Finalmente, se realizará un estudio comparativo de los coeficientes adimensionales de resistencia (C_D) en función de las dos configuraciones de suelo y distintas alturas respecto del piso, de manera de cuantificar los efectos en la fuerza de resistencia de los distintos dispositivos aerodinámicos.

Todas las medidas del automóvil a escala real serán las correspondientes al reglamento vigente de la categoría.

4. DESARROLLO DEL PROYECTO

Con el fin de brindar las condiciones experimentales más cercanas a la condición de operación del vehículo, se utilizará una cinta ergométrica impulsada con un motor trifásico para simular el efecto del suelo sobre el modelo, buscando que la velocidad tangencial en la cinta, en la posición del automóvil, sea igual a la velocidad de la corriente de aire en el túnel de viento. La medición de la carga aerodinámica se realizará mediante un arreglo de celdas de carga fijas a un bastidor externo al túnel. En las superficies laterales del modelo se instalarán sujeciones para poder vincularlo a las celdas.

Se diseña el modelo de automóvil a estudiar en formato digital y se le da forma física en escala 1:12.5 a través de impresión 3D utilizando filamento ABS.

En primera instancia, se realizan ensayos sobre el modelo en túnel de viento inmerso en flujo turbulento sin piso móvil, para distintas alturas y variadas condiciones de números de Reynolds, donde el modelo se encuentra solidario a una varilla roscada de 8 mm de diámetro pasante por los laterales del vehículo en el punto donde ubica el centro de gravedad (CG). La varilla está sujeta a un bastidor fijo ubicado externamente a la sección de medición del túnel de viento, donde se encuentran posicionados los elementos de medición.



Figura 1. Posicionamiento del modelo - Vista lateral



Figura 2. Posicionamiento del modelo – Vista trasera

Posteriormente, se realizan ensayos con la cinta ergonómica, donde las ruedas fijas del automóvil están cercanas al elemento móvil, pero no mantienen contacto.

Establecida la altura mínima respecto del piso impuesta por la condición de ensayo, se definen las combinaciones de configuraciones a ensayar, las cuales se realizan tanto para suelo fijo como móvil.

- Automóvil con fondo de serie y altura variable (20, 30 y 40 mm respecto al piso en modelo escala);
- Automóvil con fondo plano, alerón trasero, aletas laterales, splitter y altura variable (20, 30 y 40 mm respecto al piso).

Posteriormente se realiza la caracterización del perfil de velocidades de la capa límite del túnel de viento con el piso fijo y móvil mediante anemometría de hilo caliente para la corroboración de resultados.

5. LUGAR DE TRABAJO

Las actividades relativas al plan de trabajo propuesto se realizaron en el Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental (UIDET LaCLyFA), que conforma el Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA) con dependencia directa de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

5.1. Instrumentación

- Túnel de viento de capa límite de circuito cerrado con sección de prueba de 7.5 m de largo y 1.4 m x 1 m de área transversal. Motor de 50 HP con control electrónico de velocidad. Velocidad máxima de 18 m/s en la sección de prueba.
- Equipo de adquisición de datos National Instruments SCXI-1000 de 8 canales, para la adquisición de cargas mediante celdas.
- Computadoras varias para sistemas de adquisición y procesamiento de datos.
- 2 celdas de carga BSL modelo MTS-1 con rango de trabajo desde 0 a 5 kg.
- Máquina generadora de humo.
- Tubos Pitot - Manómetro digital Testo.
- Impresoras 3D y demás accesorios para la fabricación de modelos (pegamentos, masilla automotriz y pinturas varias).
- Perfiles estructurales varios para la construcción del sistema de sujeción de celdas de carga y herramientas necesarias (amoladora, discos de corte, soldadora, electrodos revestidos, bulones).
- Cinta ergonómica extraída de cinta caminadora Randers.
- Motor trifásico con 2 HP de potencia.
- Sonda X de película de fibra de doble sensor DANTEC
- Chasis de adquisición de datos DANTEC Streamline 90N10 Frame
- Soporte de sensor de hilo caliente con motor de pasos que permite realizar mediciones variables en la altura.

6. PRINCIPIO DE LA AERODINÁMICA

En 1726 Isaac Newton llegó a diversas conclusiones cuando se dio cuenta de que el aire y el agua se movían como respuesta a leyes físicas similares, y que estas fuerzas dependían de la viscosidad y velocidad del fluido que rodeaba a un objeto, como así también de la forma y el tamaño del propio objeto.

Newton asumió que las fuerzas que actúan sobre un objeto están causadas por partículas de aire desviándose por el objeto.

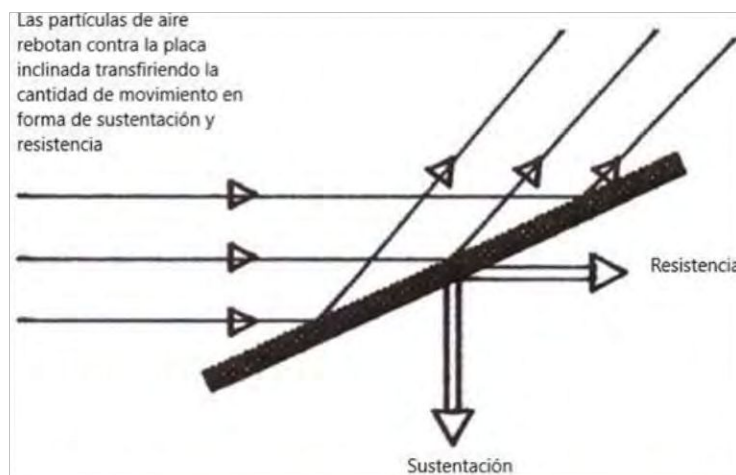


Figura 3. Teoría de la carga aerodinámica de Newton

De esta observación, Newton pudo identificar que sobre un objeto actuaba una fuerza aerodinámica neta. La sustentación se puede definir como la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección perpendicular a la dirección de la corriente incidente. En cambio, resistencia se le llama a la fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través del aire, teniendo la misma dirección de la velocidad relativa del cuerpo respecto del medio. La resistencia es siempre de sentido opuesto al de dicha velocidad, por lo que, es la fuerza que se opone al avance de un cuerpo a través del aire.

En este caso, la fuerza de sustentación y resistencia son el resultado de la transferencia de la cantidad de movimiento entre las partículas de aire y la placa con la que chocaban.

En el año 1907, Nikolái Joukowski dedicó atención al problema, logrando que las trazas del flujo fueran visualizados de manera correcta. Él se dio cuenta de que la influencia de la placa inclinada se extendía, por los efectos de la viscosidad, dentro del aire a una distancia considerable de la propia placa, lo que permitió elaborar teorías que

concordaban con los resultados observados. Hoy en día este es el sistema utilizado para el desarrollo aerodinámico del automovilismo de calle y competencia.

En el siglo XVIII, para encontrar las primeras explicaciones de la relación entre el flujo y la presión en un contexto general de la dinámica de fluidos, Daniel Bernoulli encontró una relación directa entre presión y velocidad en el año 1738.

La ecuación de Bernoulli para fluidos incompresibles se puede hallar ya sea integrando la segunda ley de Newton o aplicando la ley de conservación de energía entre dos secciones a lo largo de una línea de corriente despreciando los efectos de la viscosidad, compresibilidad y térmicos.

A partir del desarrollo realizado en el apartado 16.1.1. del Anexo, empleando la segunda ley de Newton se obtiene la siguiente expresión:

$$1) \quad p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constante}$$

Ecuación 1. Ecuación de Bernoulli

En dicha ecuación, p es la presión estática, ρ es la densidad del fluido y v , su velocidad.

Donde el flujo alcanza su mayor velocidad, la presión alcanza su mínimo (ref. Figura 4). Es decir, si la velocidad del flujo se incrementa, la presión estática local debe disminuir. Dicha ecuación tiene sólo validez a lo largo de una línea de corriente dada.

Este principio también es aplicable a la sección de un ala, en su configuración invertida destinada a producir carga aerodinámica. El aire que fluye bajo el alerón, donde se encuentra la máxima curvatura, tiene que viajar una distancia mayor para llegar desde el borde de ataque al borde de salida (al cual se le llama borde de fuga) al mismo tiempo que el aire que va por encima del ala. Por ende, el aire que toma el camino más largo se acelera y adquiere mayor velocidad causando una reducción en la presión, que en esta ocasión actúa en la parte inferior del ala creando carga aerodinámica mediante la succión del alerón hacia abajo.

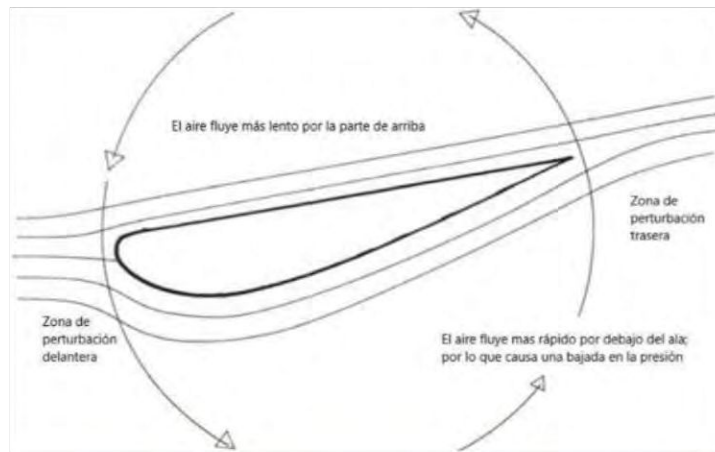


Figura 4. Líneas de corriente sobre un perfil aerodinámico

6.1. Aplicación de los métodos teóricos

6.1.1. Fuerzas actuantes

La fuerza neta aerodinámica es la fuerza neta resultante que el fluido ejerce sobre el alerón o cuerpo que se encuentra en movimiento sobre dicho fluido. Si se considera un ala, esta efectúa una fuerza sobre la masa de aire cuya cantidad de movimiento está variando, y por acción y reacción el aire efectuará sobre el ala una fuerza de igual dirección y módulo, pero con sentido opuesto y aplicada sobre algún punto del ala.

Dicha fuerza de reacción se denomina fuerza aerodinámica y su punto de aplicación es el centro de presiones de la distribución de presiones sobre el objeto.

Las fuerzas de sustentación y resistencia se combinan entre sí como vectores para dar la fuerza aerodinámica total resultante, y este es el principio básico de todas las presiones que actúan sobre un cuerpo tales como un ala.

Las fuerzas aerodinámicas dependen, en principio, de los siguientes parámetros:

- Velocidad de la corriente incidente;
- Densidad y su variación;
- Presión de estancamiento;
- Temperatura;
- Viscosidad dinámica;
- Geometría del objeto o perfil;
- Ángulo de ataque o incidencia;
- Número de Mach.

6.2. Resistencia aerodinámica

En un vehículo, la resistencia total es la suma de dos componentes:

- Resistencia parásita
- Resistencia inducida

6.2.1. Resistencia parásita

Se denomina así toda resistencia generada por elementos que no contribuyen a la sustentación. Está compuesta por:

1. Resistencia de perfil: A su vez se puede descomponer en otros dos elementos.

1.1. Resistencia de presión

Se debe a la forma de la estela. Es la resultante no nula de las fuerzas de presión en la dirección del movimiento, siendo consecuencia del desprendimiento de la corriente, la cual modifica el campo de presiones de manera que se genera una fuerza neta en la dirección de la corriente.

1.2. Resistencia de fricción

Es consecuencia de los esfuerzos viscosos entre el fluido y el cuerpo. Depende del coeficiente de viscosidad y del gradiente de velocidad en la pared del cuerpo. Esta resistencia es mayor en el caso de ser una capa límite turbulenta por tener un gradiente de velocidades mayor que para el caso de flujo laminar.

Esta resistencia es consecuencia de la presencia de la capa límite.

- La existencia de la capa límite es consecuencia de ser el coeficiente de viscosidad distinto de cero.
- Se puede decir que el origen de la resistencia de presión (al igual que la fricción) es viscoso, aunque el valor de la viscosidad no influya.

2. Resistencia de forma: Es la resistencia provocada por los componentes de un automóvil que no producen sustentación, por ejemplo, el cuerpo del vehículo, motores, sistema de refrigeración, entre otras.

3. Resistencia por interferencia: Cada elemento exterior de un auto en rodaje posee su capa límite, pero por su proximidad, estas pueden llegar a interferir entre sí, lo que conduce a la aparición de esta resistencia.

6.2.2. Resistencia inducida

Teniendo en consideración que los apéndices aerodinámicos tienen envergadura finita, debido a unos vórtices que aparecen en los extremos del alerón por la diferencia de presiones entre el extradós y el intradós, surge la llamada resistencia inducida. Esta resistencia es función de la sustentación, por ende, mayor sustentación implica mayor resistencia inducida.

$$C_{Di} = \frac{D_i}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} = \frac{C_L^2}{\pi e A}$$

Ecuación 2. Coeficiente de resistencia inducida

D_i	Resistencia inducida
ρ	Densidad del aire
V	Velocidad del flujo
S	Superficie del ala
C_L	Coeficiente de sustentación
e	Factor de eficiencia de la planta alar
A	Alargamiento del ala

Tabla 1. Parámetros de resistencia inducida

7. AERODINÁMICA AUTOMOTRIZ

7.1. Esfuerzos viscosos

El flujo puede ser laminar o turbulento. Si todas las partículas dentro de un flujo o vena de aire se mueven en la misma dirección que la velocidad del aire y las líneas de flujo, entonces el flujo se considera laminar. En cambio, si las partículas de aire viajan de forma errática, en caminos no paralelos a la velocidad media del aire, entonces el flujo es turbulento.

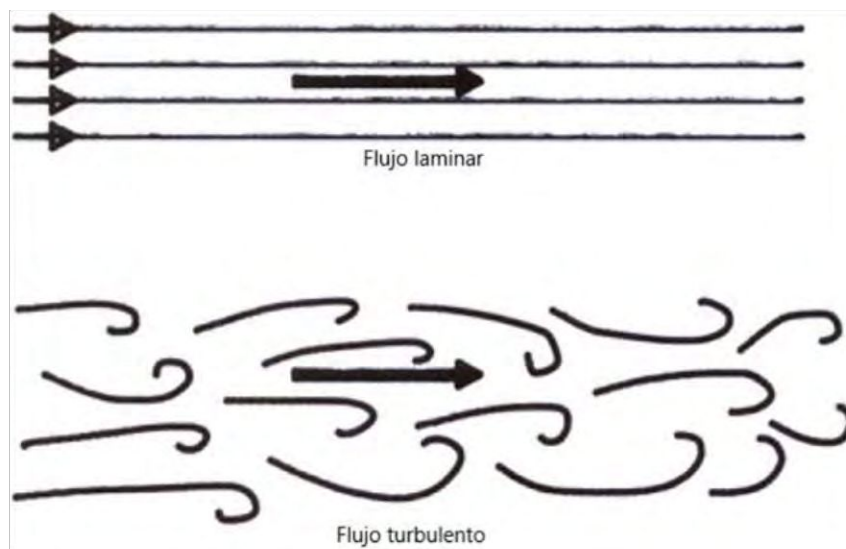


Figura 5. Comparación entre flujo laminar y turbulento

La corriente de aire que fluye alrededor de un cuerpo y puede seguir la forma de su contorno, se llama flujo adherido, mientras que, si se despegue de la silueta, será flujo separado (Ref. Figura 6).

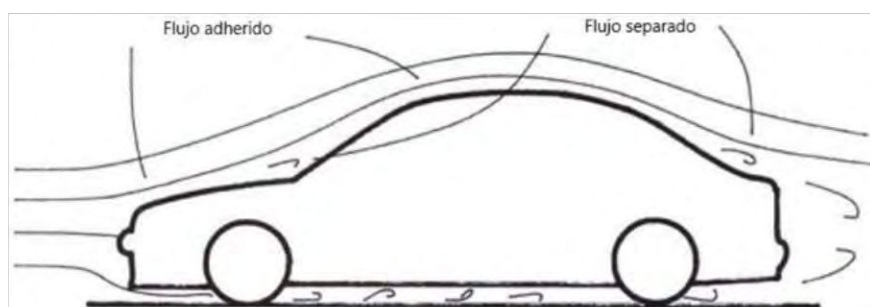


Figura 6. Flujo adherido y separado

El poder mantener un flujo adherido tiene una gran influencia en la resistencia y la carga aerodinámica. El aire es un fluido viscoso y como tal, cuando un cuerpo se mueve

a través de él, el aire en sus proximidades genera un rozamiento interno. La partícula de aire que está en contacto con la superficie está siendo frenada por el rozamiento, y la capa de aire adyacente a la superficie del cuerpo se pega a esa superficie. Las capas de aire más alejadas de la superficie también son frenadas por este rozamiento viscoso, pero según aumenta la distancia con respecto a la superficie, este efecto se vuelve menos intenso, de manera que a una cierta distancia el aire no se ve afectado. Esto se conoce como velocidad del aire del flujo principal o corriente libre.

Así, existe una capa de aire alrededor del cuerpo en la que existe un gradiente de velocidad, de cero en la superficie, hasta el flujo principal del borde exterior. Esta capa es conocida como la capa límite.

Si la diferencia de velocidad entre las subcapas de la capa límite son pequeñas, deslizarían las unas sobre las otras con poca interacción entre ellas, creando así una capa límite laminar.

En caso contrario, si algo interfiere a la capa límite, cómo puede ser una curvatura en la superficie del cuerpo, se puede dar la situación donde la capa es delgada y laminar en la parte delantera, pero aumenta su grosor y se vuelve turbulenta en la parte trasera del vehículo como resultado de las distorsiones causadas por el coche a pasar a través del aire.

Una capa límite laminar crea menos superficie de rozamiento que una turbulenta, y por eso la resistencia por fricción es menor mientras la capa límite se mantenga laminar.

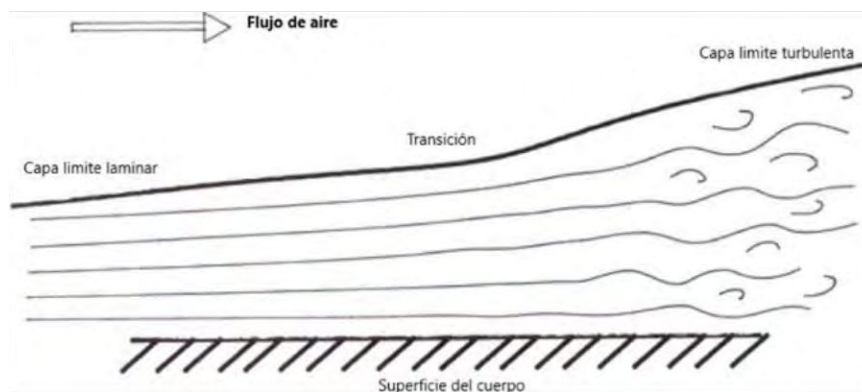


Figura 7. Etapas de la capa límite sobre superficie de un cuerpo

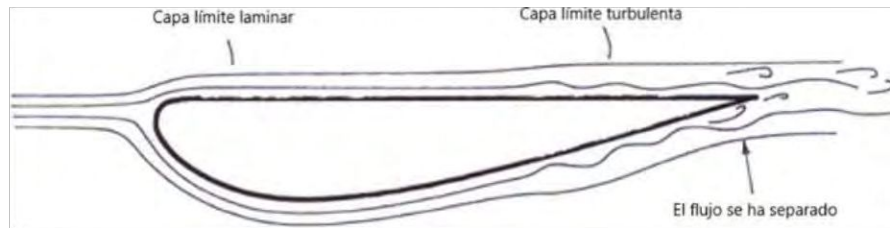


Figura 8. Transición de capa límite laminar a turbulenta

Una capa límite turbulenta puede retrasar la separación del flujo en algunas circunstancias, o incluso causar la unión de un flujo separado. Esto puede tener beneficios importantes debido a la creación de carga aerodinámica y la reducción de la resistencia, y por eso no sería correcto decir que la condición laminar es siempre la meta por alcanzar.

Mientras que una capa límite laminar es beneficiosa en algunas circunstancias, darle más energía a una capa límite de un alerón puede ser útil en ciertas ocasiones para evitar la separación.

La diferencia de presión puede expresarse matemáticamente como el coeficiente de presión multiplicado por la presión dinámica y el área, representado por la expresión:

$$2) \quad p - p_{\infty} = C_p * \frac{1}{2} \rho v^2 * S$$

Ecuación 3. Diferencial de presión

El coeficiente de presiones es uno de los coeficientes aerodinámicos empleados en fluidodinámica. Dicho coeficiente es un número adimensional que describe la presión relativa a través de un campo de flujo, cualquier punto inmerso en el flujo de un fluido tiene su propio y único coeficiente de presión.

La relación entre el coeficiente adimensional y los números dimensionales es la siguiente:

$$Cp(x) = \frac{p - p_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2} = 1 - \frac{V^2}{V_{\infty}^2}$$

Ecuación 4. Coeficiente de presión

Parámetros

- p es la presión estática del fluido en el punto en el que el coeficiente de presión es evaluado;
- p_{∞} es la presión de referencia en la corriente de flujo sin perturbar;
- ρ_{∞} es la densidad del aire, en este caso a nivel del mar y atmósfera estándar;
- V_{∞} es la velocidad de referencia en la corriente de flujo sin perturbación.

En términos generales, se pueden establecer los siguientes conceptos:

Para poder generar sustentación negativa, se debe tener mayor presión en el extradós que en el intradós.

- En el intradós se tiene $p < p_\infty$ (ya que $C_p < 0$);
- En el extradós se tiene $p > p_\infty$ (ya que $C_p > 0$).

Teniendo en cuenta la ecuación de Bernoulli ($p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante}$), el aire se acelera en el intradós y desacelera en el extradós.

En el intradós se aprecia una notable depresión en el borde de ataque, ya que, cuando la corriente de aire impacta al perfil, tiene que bordear al borde de ataque experimentando una notable aceleración. Dicho fenómeno contribuye eficazmente a la sustentación negativa.

Cerca del borde de ataque, sobre el extradós, se aprecia una zona donde la presión es máxima, la cual se denomina punto de remanso. En este lugar se tienen velocidades de flujo muy bajas.

En términos generales, la succión en el intradós contribuye más a la sustentación negativa que la sobrepresión en el extradós.

A partir del pico de succión, la corriente en el intradós se encuentra con un gradiente adverso de presiones (la presión aumenta aguas abajo), por lo tanto, la corriente se desacelera. Bajo ciertas condiciones este fenómeno puede dar lugar al desprendimiento de la corriente. Si esto sucede, se produce una gran variación de la distribución de presiones, experimentándose una notable reducción de la sustentación del perfil (entrada en pérdida) y aumento considerable de resistencia.

Distribución de presión de acuerdo con la geometría del automóvil

El hacer entrar en contacto el flujo de aire con el vehículo provoca que en el frente se tenga un punto de estancamiento ($C_p=1$) donde la forma de la superficie es cóncava.

Posteriormente, el flujo se acelera sobre el capó y el C_p se vuelve negativo. En la parte superior del parabrisas el flujo se desacelera de nuevo y la presión aumenta.

El flujo se re-acelera sobre la parte superior del auto, donde se observa la menor presión sobre el contorno superior.

A lo largo del techo del vehículo, el flujo se desacelera haciendo tender al C_p a valores más positivos. Al llegar al parabrisas trasero el flujo se separa teniéndose flujo reverso con aumento de presión (C_p) gradual.

El coeficiente de presiones en la zona del baúl del vehículo no es igual a 1, ya que se tiene flujo desprendido. En la parte inferior, la parte posterior no recupera el nivel de presión de estancamiento. Como resultado de la separación del flujo, la presión en el baúl es menor que en la trompa, cuyo efecto causa resistencia (de forma).

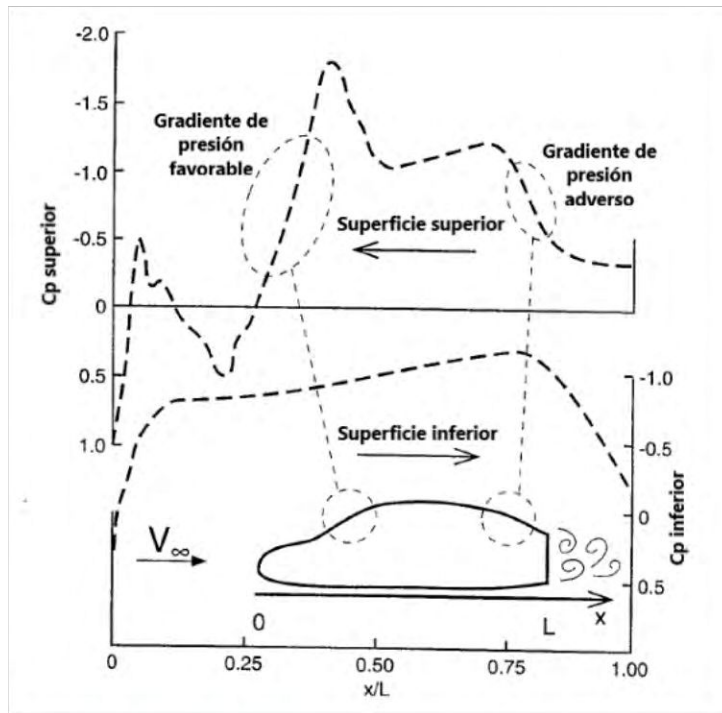


Figura 9. Coeficiente de presión sobre la envergadura del vehículo

Las áreas donde la presión decrece a lo largo de una línea de corriente, se dice que tienen un gradiente de presión favorable.

La distribución de presión cerca de la ventanilla trasera se llama gradiente de presión desfavorable o adverso, ya que la presión se incrementa a lo largo de la línea de corriente.

En un gradiente de presión favorable, el flujo se mantiene adherido por más tiempo. La capa límite en la corriente libre no perturbada permanece laminar por sobre la superficie del auto en mayor medida, lo que resulta en menor resistencia de forma y fricción.

Por otra parte, los gradientes de presión adversos inician la transición hacia capas límites turbulentas y las separaciones del flujo.

La perturbación local en el patrón de flujo atrás del vehículo causa una pérdida de momento (o drag de forma), el cual se extiende lejanamente atrás (10 o 20 vehículos de

longitud), con una carencia de velocidad. Si el flujo se separa atrás del cuerpo resultará en una estela, cuya energía para arrastrar dicha estela resulta en drag.

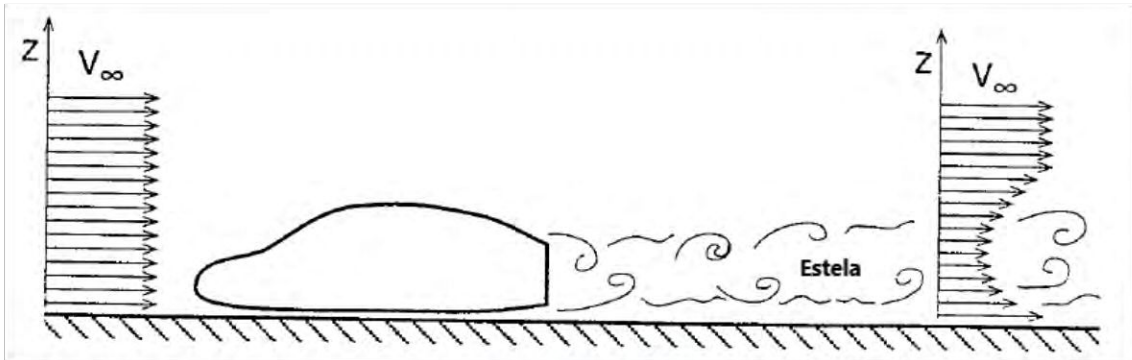


Figura 10. Estela turbulenta

En vehículos con apéndices aerodinámicos en la parte trasera, la estela (trailing vortex) consiste en dos vórtices concentrados contra rotativos. Usualmente estos vórtices son fuertes y estables, y perduran una larga distancia por detrás del dispositivo que los genera. Entre los dos vórtices se induce un upwash (flujo ascendente), mientras que afuera se produce un downwash (flujo descendente).



Figura 11. Trailing vortex

7.2. Contribuciones a la resistencia vehicular

En base a los componentes que integran la resistencia total, se puede mencionar la localización y porcentaje de los contribuyentes.

LOCALIZACIÓN	ΔCD
Fricción de piel	0.04 – 0.05
Resistencia por refrigeración	0 – 0.06
Flujo interno – Ventilación	0 – 0.05
Resistencia de forma (separaciones del flujo)	0 – 0.45
Resistencia inducida	0 – 0.6

Tabla 2. Contribuyentes de la resistencia total

Las separaciones del flujo, especialmente en la sección trasera del auto, aportan uno de los mayores porcentajes a la resistencia total.

El drag inducido es resultado de los esfuerzos para generar sustentación negativa que se debe en parte a los alerones, a la propia sustentación del auto y a la interacción entre los dispositivos y el cuerpo. Se deben tener en cuenta las fuerzas de interacción, ya que pueden ser similares a las generadas por el propio dispositivo aerodinámico.

7.3. Coeficientes aerodinámicos

Los coeficientes surgen debido a la necesidad de poder comparar resultados y facilitar el análisis y cálculos aerodinámicos. En vez de referir a fuerzas aerodinámicas se emplean coeficientes adimensionales que las representen.

Cualquier fuerza en mecánica de los fluidos puede expresarse como el producto de la presión dinámica, un área de referencia y coeficiente adimensional, cuyo valor se halla experimentalmente.

Para un perfil dado, los coeficientes correspondientes dependen de cuatro parámetros:

- Geometría del vehículo
- Ángulo de ataque
- Número de Reynolds
- Número de Mach

Para flujos incompresibles, el número de parámetros se reduce a tres: geometría del vehículo, ángulo de ataque y número de Reynolds.

El coeficiente de sustentación en dos dimensiones se puede hallar a partir de la diferencia entre los coeficientes de presiones en el extradós e intradós a lo largo de toda la cuerda del perfil alar.

Se realiza el desarrollo matemático en el apartado 16.1.3. del Anexo para obtener la siguiente expresión:

$$C_l = \int_{\text{Borde de fuga}}^{\text{Borde de ataque}} [C_{p_{\text{int}}}(x) - C_{p_{\text{ext}}}(x)] dx$$

Ecuación 5. Coeficiente de sustentación 2D en función del Cp

El C_l se utiliza para encontrar la fuerza de sustentación, pero como el análisis se realiza bidimensionalmente, el resultado se representa con unidades de sustentación por longitud.

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2 c} \text{ en unidades de } \left[\frac{\text{Fuerza}}{\text{metros}} \right]$$

Ecuación 6. Coeficiente de sustentación 2D

Donde c es la cuerda del perfil.

Se puede extrapolar el resultado para tres dimensiones tomando un área de referencia en lugar de una longitud. De esta manera se obtienen las fuerzas aerodinámicas en tres dimensiones.

$$L = C_L * \frac{1}{2} \rho v^2 * A$$

Ecuación 7. Fuerza de sustentación 3D

$$D = C_D * \frac{1}{2} \rho v^2 * A$$

Ecuación 8. Fuerza de resistencia 3D

Para el caso de análisis de plantas alares, dicha área es la proyectada en un plano con vista superior, la cual se obtiene del producto de la cuerda por la envergadura.

En cambio, en vehículos se utiliza frecuentemente el área frontal tanto para sustentación como para resistencia.

Los coeficientes de sustentación y resistencia al avance son medidas relativas de cuanta sustentación y resistencia puede generar un cuerpo.

La relación entre la sustentación aerodinámica con la resistencia al avance (L/D o C_L/C_D) es una medida de la eficiencia aerodinámica de un ala o un cuerpo aerodinámico.

Esta relación es útil para comparar automóviles de una misma categoría, pero no debería ser utilizada para comparar vehículos de diferentes características.

Las formas modernas de los automóviles de calle tienden a generar sustentación positiva. En el caso del Súper TC 2000, cuyos autos se basan en la modificación de autos de serie, la capacidad de disminuir la tendencia de sustentación positiva es una cuestión de considerable interés.

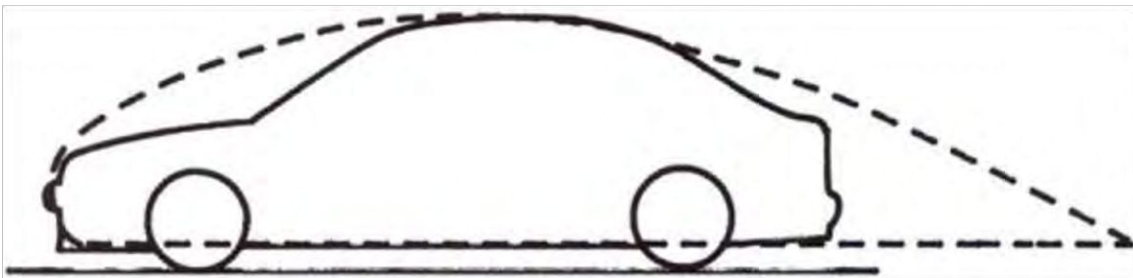


Figura 12. Similitud entre un automóvil y un perfil de aeronave

7.3.1. Análisis de coeficientes aerodinámicos

Partiendo del estudio básico de un cilindro circular (Ref. Tabla 3, Item 1) que se mueve sobre una corriente de aire, se puede ver que el área frontal y trasera generan un contacto abrupto con el flujo, dando lugar a su desprendimiento sobre y detrás del cuerpo, generando gran cantidad de resistencia.

Si se aerodinamiza el cilindro circular, especialmente en la parte delantera y trasera (Ref. Tabla 3, Item 2), las separaciones de flujo pueden ser eliminadas parcialmente.

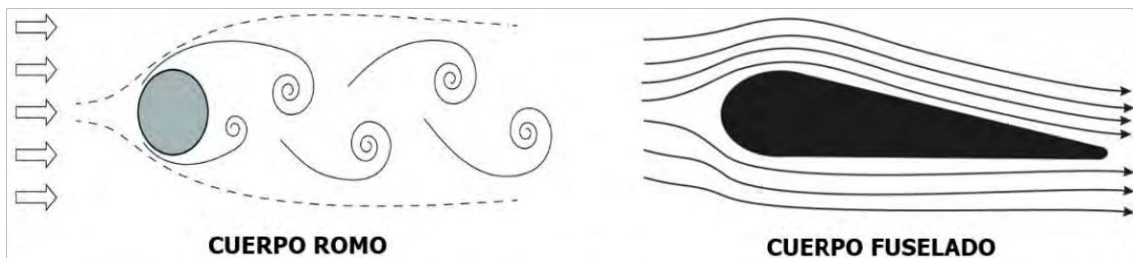


Figura 13. Comparación de patrones de flujo - Cuerpo romo y fuselado

En pos de desarrollar una forma aerodinámica para un vehículo (Ref. Tabla 3, Item 3), se da el bloqueo de gran cantidad del flujo cerca del suelo y se genera drag debido a las ruedas.

Por otro lado, se tiene mayor velocidad (menor presión) cerca del techo, lo que se traduce como sustentación positiva.

Un automóvil real (Ref. Tabla 3, Item 4) tiene más detalles, los cuales causan separaciones de flujo locales aumentando la resistencia. La región inferior está lejos de ser suave, ya que elementos como el motor, sistema de refrigeración y suspensión obstruyen el flujo provocando aún más sustentación y drag.

Para autos de competición (Ref. Tabla 3, Item 5), el incremento de resistencia se debe principalmente a la componente inducida, la cual es una penalización por la utilización de dispositivos alares aerodinámicos.

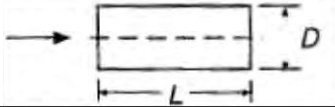




CUERPO			CL	CD
1	Cilindro circular		0	0.82
2	Cuerpo de revolución		0	0.04
3	Vehículo de mínima resistencia cerca del suelo		0.18	0.15
4	Automóvil genérico		0.32	0.43
5	Competición		-3	0.75

Tabla 3. Coeficientes aerodinámicos para cuerpos varios

Comentarios

- Para un cuerpo aerodinámico sin separación de flujo, la contribución de las fuerzas de presión en la dirección del movimiento puede ser cancelada; por lo tanto, la fricción de piel solo contribuye al drag;
- Vehículos más largos pueden tener menor coeficiente de resistencia;
- La proximidad al suelo puede crear sustentación (positiva cuando el flujo es limitado abajo del vehículo).

7.4. Número de Reynolds

El número de Reynolds es un número adimensional definido como:

$$Re = \frac{\rho * v * L^*}{\mu}$$

Ecuación 9. Número de Reynolds

Donde ρ es la densidad del aire, μ representa la viscosidad dinámica, v es la velocidad del aire y L^* es alguna longitud de referencia que debe ser especificada, esta longitud puede ser la longitud de un automóvil o la dimensión de la cuerda de un ala de una aeronave.

El número de Reynolds es un número empleado en la mecánica de los fluidos para caracterizar el comportamiento de un flujo. Dicho número resulta un modo conveniente de indicar la escala y la velocidad a la que se obtuvieron los datos, siempre y cuando se interpreten en su contexto, y se comparen con otros datos obtenidos con escalas y velocidades similares. Además, se puede utilizar si un flujo es laminar o turbulento. En general, el flujo se vuelve más turbulento con el aumento de la velocidad, es decir, con el aumento del número de Reynolds.

8. DISPOSITIVOS DE CONTROL DE FLUJO

8.1. Spoiler

Este dispositivo tiene la función de alterar el rápido flujo causante de la sustentación positiva. Y, además, tiene la capacidad de modificar cuantitativamente la sustentación, haciéndola tender hacia valores negativos.

Spoilers o faldones sencillos y cajas de aire en la parte delantera, y rebordes aerodinámicos o nolders en el eje trasero, son algunos de los primeros apéndices anti-sustentación.

8.1.1. Spoilers traseros

Pueden encontrarse este tipo de apéndices aerodinámicos de todas las formas y tamaños. El spoiler trasero es un elemento que se alarga desde la superficie del automóvil, sin dar lugar a espacios entre el propio spoiler y la carrocería del auto.

Los spoilers con espacio entre ellos y el baúl trasero son considerados alerones.

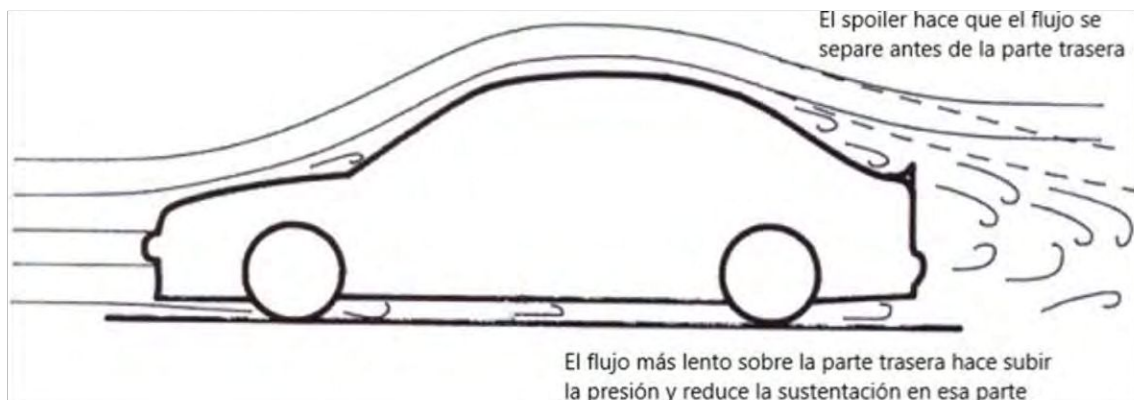


Figura 14. Automóvil con spoiler en el tren trasero

Al extenderse verticalmente por encima de la parte trasera de un automóvil, el spoiler hace que el flujo se separe y cree una burbuja de recirculación. Si el flujo ya se ha separado en la parte trasera del coche, entonces el spoiler trasero inducirá al flujo a separarse incluso antes.

El efecto es reducir de manera drástica la velocidad del flujo de aire sobre la superficie trasera provocando un aumento de presión sobre esta área. Por ende, esto reduce la sustentación positiva creada por el coche sin spoilers.

Añadir un spoiler a un auto no significa que aumente la resistencia del aire. Existen circunstancias en la que su uso en el eje trasero reduce la resistencia. Sin embargo, lo más conveniente sería usarlos solo para reducir la sustentación.

La altura del spoiler puede ser aumentada sin perjudicar la velocidad punta y en algunas circunstancias la velocidad aumenta, demostrando que la reducción de la resistencia también es una posibilidad. A su vez, a una determinada altura del spoiler, las velocidades comienzan a bajar como lo hacen los tiempos por vuelta, demostrando que a pesar de que la resistencia ha aumentado, se consigue un beneficio derivado de la mayor estabilidad y mejor agarre.

Existe una altura óptima para el spoiler trasero, sin embargo, es importante tener en cuenta que lo que funciona bien en un automóvil, puede ser perjudicial para otro.

8.1.2. Spoilers delanteros

Los spoilers delanteros también varían en la complejidad de sus diseños, desde los sencillos spoilers tipo faldón o mandíbula, que son poco más que un trozo de panel casi vertical situado en la parte delantera del coche, hasta las estilizadas cajas de aire integradas en el diseño de los coches de calle actuales y con dimensiones extendidas para los coches de competición.

En su definición más sencilla, una caja de aire se extiende hacia abajo desde el panel frontal inferior del coche con el fin de reducir el espacio entre el propio vehículo y el suelo, y esto reduce la cantidad de aire que pasa por debajo de él cuando está en movimiento. Parte del aire que pasa por debajo del automóvil se desvía en dos direcciones.

Existen dos ventajas que dependen del tipo y de la forma del automóvil. Si es un auto de calle que, debido a reglamento no ha podido ser alterado de manera sustancial respecto a cómo viene de serie, entonces el fondo de su chasis estará bastante lejos de ser plano. Así, está a la vista el cárter, la caja de cambios, los tubos de escape, las ruedas, las cavidades para las ruedas, el depósito de combustible, entre otros. Por lo tanto, el aire que pasa por debajo del automóvil con ese fondo no lo hará de forma suave, y es sencillo entender que la situación causa una gran cantidad de resistencia aerodinámica. Así que, si la masa de aire que fluye a través de esta zona se reduce, también la resistencia debería reducirse, y este es el caso. A pesar de que el área frontal de un automóvil puede verse

incrementada por la adición de esta clase spoilers, el coeficiente de penetración puede reducirse lo suficiente como para compensar este efecto.

Sin embargo, para un auto que ya cuenta con un fondo liso, quizá con el fin de reducir la resistencia, no se puede esperar que una caja de aire reduzca esa resistencia más aún, en realidad, debido al aumento del tamaño del área frontal puede que se produzca el efecto contrario.

El segundo beneficio es que la presión por debajo del automóvil queda reducida gracias a este tipo de spoiler, y como ya se ha mencionado una baja de presión en la zona inferior del automóvil genera una fuerza anti-sustentadora, es decir, se está generando carga aerodinámica.

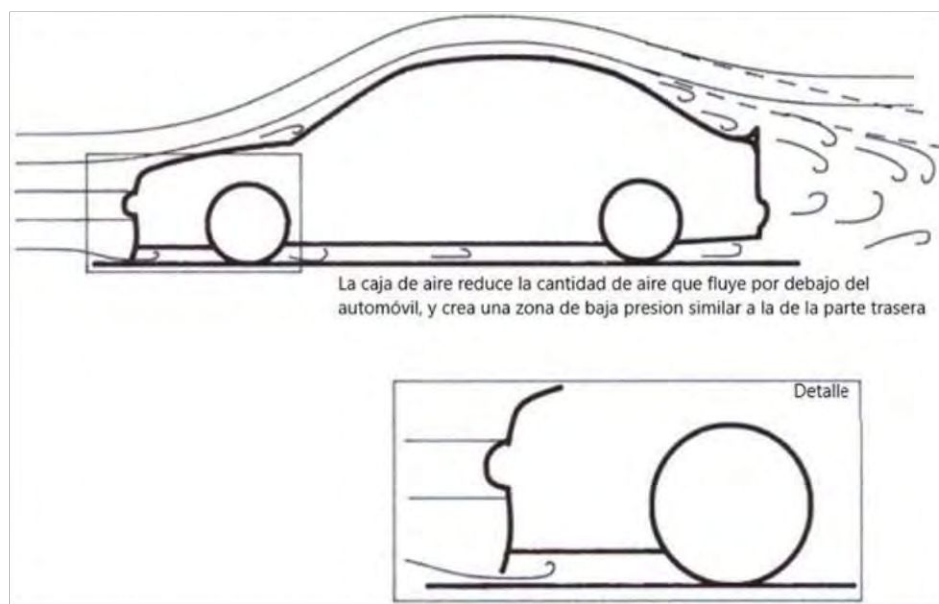


Figura 15. Caja de aire en tren delantero de automóvil

La efectividad de un spoiler delantero puede ser incrementada mediante el uso de faldas laterales, las cuales ayudan a sellar el fondo e impiden que el aire entre por los lados. Si la presión debajo del automóvil ha sido reducida, el aire que pasa por los lados intentará mezclarse en esta área de baja presión, y si se le permitiera hacer eso, la presión volvería a subir, lo que reduciría cualquier beneficio que se hubiera logrado. Está claro porque el efecto de un apéndice aerodinámico en la parte delantera de un automóvil puede verse afectado por la forma y el diseño de los componentes o de los paneles situados más atrás.

8.2. Variaciones en las cajas de aire

Las cajas de aire sencillas reducen la presión debajo del automóvil bloqueando la mayor parte del flujo de aire que entra en esa zona. Además de esto, lo que hace una caja de aire es acelerar el flujo que pasa por debajo del spoiler creando una zona de baja presión.

Ahora si el área de debajo y de detrás de la caja de aire es una cavidad vacía, esto no representa ningún beneficio. Para que este apéndice tenga utilidad, lo que se hace es inclinar la extensión hasta arriba un poco hacia atrás, para formar una especie de difusor, por ende, lo que se tiene ahora es un dispositivo que acelera el flujo de aire, y reduce la presión en el estrecho espacio entre la caja de aire y el suelo, así como una superficie en la que pueden actuar las bajas presiones. El resultado es que la carga aerodinámica actúa sobre la superficie horizontal o cerca de ella, superficie que, al encontrarse bien fijada al automóvil, empuja la parte delantera del auto hacia el suelo. Esta clase de apéndice no funcionaría si la caja de aire llegara justo hasta el suelo y bloqueara todo el flujo, de hecho, esta solución requiere probablemente algo más de espacio entre el automóvil y el suelo de lo que pueda necesitar una caja de aire sencilla.

8.3. Divisor de flujo

Una extensión más larga, que puede ser añadida a la caja de aire, es lo que se conoce como divisor de flujo o splitter. Se trata de una extensión horizontal o labio inferior de una caja de aire que se expande hacia adelante.

Es un apéndice aerodinámico extremadamente eficaz que puede crear carga aerodinámica sin prácticamente crear resistencia. Básicamente se introduce en una zona de alta presión y el aire se divide, pasando por encima y por debajo de ellos. Pero justo por delante del morro se encuentra lo que es conocida como la zona estancamiento, donde el aire choca con la parte delantera del automóvil. Parte de este aire es conducido por el sistema de refrigeración, por lo tanto, se tiene una gran cantidad de aire que puede ser aprovechada de manera sencilla. Lo que se hace es fijar una placa plana con el fin de que la alta presión incida sobre la placa y la empuje hacia abajo creando así carga aerodinámica.

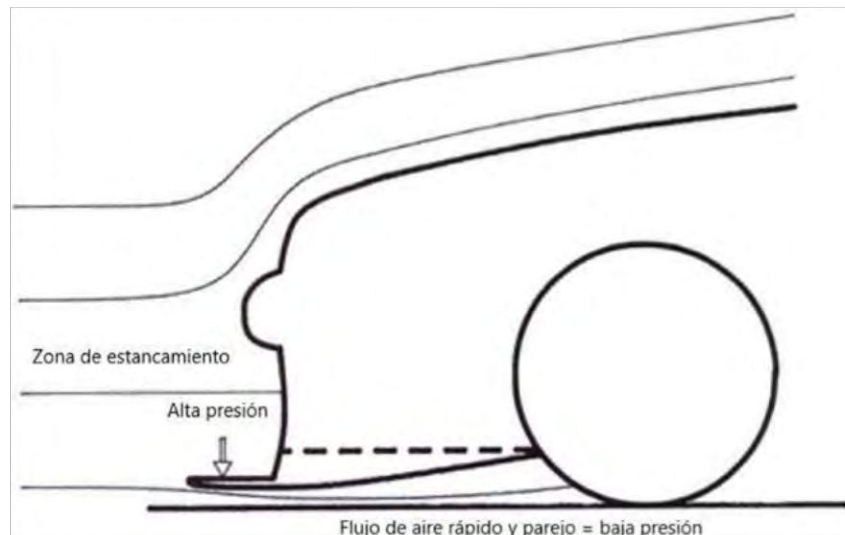


Figura 16. Splitter

Un divisor de flujo también tiende a colaborar con la función principal de la caja de aire, en lo que se refiere a restringir la cantidad de aire que entra en la parte de debajo del auto. Un divisor de flujo tiene el mismo efecto que una caja de aire más profunda, y como resultado de esto, aún más aire es redireccionado hacia los lados del coche. Por este motivo, este elemento es tan eficaz como apéndice inductor de carga aerodinámica. La cantidad de carga aerodinámica creada puede ser controlada mediante la longitud del divisor de flujo hasta cierto punto y, si el divisor es regulable, sirve para controlar el equilibrio delantero/trasero de carga. Por supuesto en todas las categorías el divisor no es regulable, en categorías importantes de Argentina como Turismo Carretera o Súper TC 2000, este apéndice es fijo.

Si se extiende más allá de la zona de estancamiento de alta presión, no se conseguirá ningún beneficio adicional. Además, se convertirá en una pieza muy vulnerable colgando delante del coche. Tampoco será de utilidad en un automóvil que cuente con un morro muy afilado y que produzca poca resistencia ya que la creación de una zona de estancamiento de alta presión tiene lugar debido a los morros bruscos de los automóviles.

Uno de los problemas cuando se monta un divisor de flujo es que puede ser muy sensible a los cambios en la altura del automóvil sobre el suelo. Los cambios en la altura del automóvil, causado por una combinación de cambios en la suspensión tales como el hundimiento del morro a la hora de frenar como resultado directo de la carga aerodinámica, alteran de manera regular el espacio entre el fondo del auto y el suelo.

Pero las cajas de aire y los divisores de flujo, de por sí ya se encuentran muy cerca del asfalto, y su efectividad como apéndice aerodinámico depende directamente de su distancia del suelo. Cuanto más cerca del pavimento estén, mayor será la cantidad de carga dinámica que generan, por tanto, es posible encontrarse en una situación en la que el automóvil produce enormes cantidades de carga aerodinámica de forma muy inconsistente debido a que la altura con respecto al suelo está variando constantemente.

Un modo de reducir este problema es endurecer las suspensiones del automóvil, lo que reduce la compresión de los amortiguadores cuando se aplican fuerzas tanto mecánicas como aerodinámicas. Sin embargo, esto puede tener desventajas tanto en confort de marcha como en la habilidad del automóvil de agarrarse al suelo y traccionar, condición que se puede notar especialmente en curvas lentas donde la aerodinámica no aporta demasiado. Por ende, las soluciones a encontrar serán aquellas que sean menos sensibles a los cambios en la altura del automóvil, y que por tanto permitan un movimiento de la suspensión acorde.

8.4. Alerón

Es un cuerpo con tal forma que el aire que fluye a través de este crea sustentación negativa o carga aerodinámica, sin causar resistencia excesiva. El perfil es la sección transversal que define la forma de un ala tridimensional y, debido a que las formas de los alerones pueden ser bastante complejas, es lógico decir que un alerón puede tener varias secciones a lo largo de él.

Geométricamente, el perfil alar se puede describir de la siguiente manera:

- Borde de ataque se le llama a la parte delantera de un ala y normalmente tiene una forma poco refinada con forma radial.
- El borde de fuga se encuentra justo en el otro extremo del alerón, y normalmente es una zona estrecha.
- La línea recta que une el borde de ataque y el borde de fuga es la línea de cuerda.
- La línea de curvatura media es la línea imaginaria que une los puntos que están a la mitad de distancia entre los puntos del borde superior (Extradós) y del inferior (Intradós) para cada coordenada “x”.
- La flecha o curvatura es una medida del apartamiento de la línea de curvatura media respecto de la cuerda. En el caso de perfiles simétricos estos tienen cero curvatura debido a que ambas líneas coinciden.

- El radio del borde de ataque es el radio de un círculo tangente al extradós y al intradós, cuyo centro se encuentra sobre la tangente a la línea de curvatura media en el origen. Este radio es importante a la hora de producir sustentación.
- El espesor máximo, cómo lo indica la palabra, es el máximo valor de espesor que puede tomar el perfil y se expresa como un porcentaje de la cuerda.
- Ángulo de ataque es el ángulo que forman la cuerda geométrica de un perfil alar con la dirección de la corriente de aire incidente.

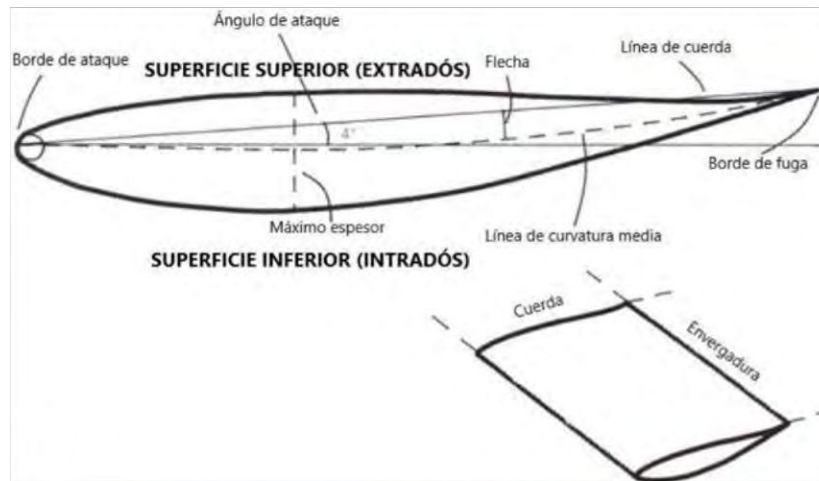


Figura 17. Perfil alar (superior) y alerón (inferior)

La sección de un alerón puede ser simétrica o asimétrica. Si se trata del segundo caso se dice que tiene curvatura, lo que significa que la superficie inferior está más curvada que la parte superior. Los alerones de autos de carreras actuales generalmente tienen curvatura.

El ancho de un ala es conocido como envergadura, y la relación de la envergadura con la cuerda es la relación de aspecto. Los aviones tienen relaciones de aspecto muy altas, mientras que los autos de carreras las tienen muy bajas.

El punto o línea teórico en el que actúan las fuerzas sobre un alerón, y en el cual no hay un momento incidente, se conoce como centro de presiones. La situación de este punto surge de la suma de la distribución de presiones sobre todo el alerón, tanto en el intradós como en el extradós. El objetivo de un alerón es reducir la presión bajo el lado de succión de la parte inferior, y aumentar la presión del aire en la parte superior o lado de presión. El resultado de esto es que se producen tanto carga aerodinámica como resistencia.

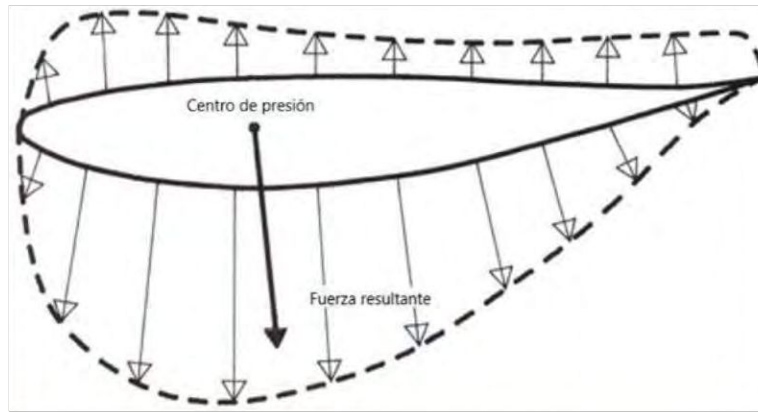


Figura 18. Diferenciales de fuerza en cada punto que derivan en una fuerza resultante aplicada en el centro de presiones del alerón

La carga aerodinámica generalmente aumenta con un ángulo de ataque más pronunciado. Sin embargo, existe un cierto ángulo, y todos los alerones tienen uno, en el cual el flujo de aire se desvía por el lado de succión del ala y, en lugar de seguir el contorno del perfil, se vuelve muy inestable y se separa de la superficie del alerón. Este efecto es acompañado por una pérdida repentina de carga aerodinámica y un aumento importante de la resistencia. Dada esta condición, se dice que el alerón está en pérdida.

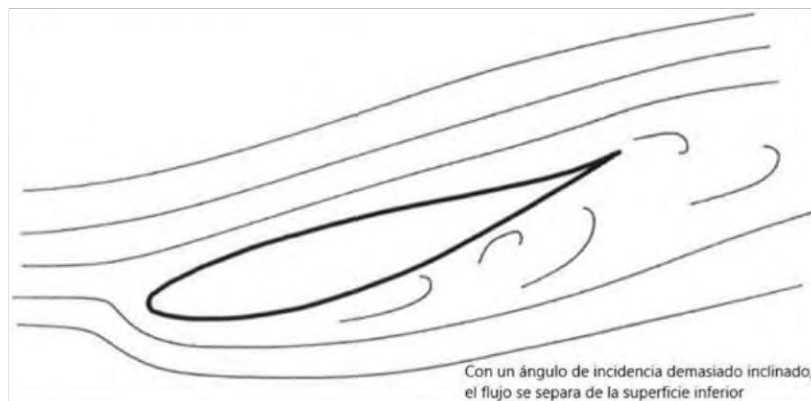


Figura 19. Alerón con ángulo de ataque demasiado alto, y flujo desprendido hacia el borde de fuga

8.4.1. Carga aerodinámica y criterios de diseño

Los alerones de los autos de competición pueden tener uno, dos o múltiples elementos, todo va a depender de la categoría en la que estén compitiendo, del circuito y la tolerancia del auto a la carga aerodinámica y la resistencia.

Algunos automóviles utilizan alerones con varios elementos debido a que su tolerancia a la resistencia es mayor, y la necesidad de generar grandes cantidades de carga aerodinámica es vital.

8.4.2. Alerones de un solo elemento

Los principios básicos para la creación de sustentación o carga aerodinámica comienzan con la hipótesis de que la carga aerodinámica se incrementa cuanto mayor es el ángulo de ataque, hasta el ángulo de pérdida. El ángulo de pérdida varía, dependiendo de la sección del ala y las condiciones del flujo. Un alerón curvado puede entrar en pérdida con un ángulo menor que un alerón simétrico.

Los alerones traseros tienen dos opciones para su montaje, dichas opciones, en determinadas ocasiones pueden combinarse; una de estas es el poste central y la restante es la montura con las derivas laterales o endplates, ambas alternativas son frecuentemente utilizadas. Con cualquiera de los métodos, es importante considerar el efecto que la estructura de sujeción puede tener en el flujo inferior del alerón.

Si la montura es del tipo poste central, entonces el poste o los dos perfiles aerodinamizados que se utilizan en algunas ocasiones, deben tener una forma tal que interfiera lo menos posible con el flujo de aire que pasa por el alerón.

En el caso de la montura por derivas laterales, debido a que el grosor de las derivas tiene influencia en su rigidez, es lógico pensar que probablemente abarcarán parte del área disponible y, además, afectarán al flujo de aire en los bordes externos del alerón. Una vez más, los bordes de ataque de estas derivas laterales de fijación deben tener la forma adecuada para perturbar lo menos posible el flujo que se acerca al ala.

8.4.3. Alerones de dos elementos

Esta configuración es la utilizada en la categoría del Súper TC 2000 debido a la necesidad que tienen los automóviles de generar carga en el tren trasero a costa de incrementar la resistencia, sin embargo, esto no es un problema debido a la alta potencia de los impulsores.

El personal calificado, integrantes de equipos oficiales, utilizan como referencia los perfiles aerodinámicos empleados en la Fórmula 3000 Internacional, la cual tuvo vigencia entre los años 1985 y 2004.

Debido a la escasa información sobre las regulaciones técnicas de la Fórmula, y de modo que los constructores de automóviles de la Fórmula 1 y 2 mantienen en confidencial toda información respecto a lo que a alerones traseros refiere.

En este trabajo, se toma como referencia la categoría Fórmula 3 de la FIA, ya que también se utilizan alerones de doble elemento. Se detallan las coordenadas X e Y de los perfiles aerodinámicos en la sección 16.3. del Anexo.

8.4.4. Método analítico para el posicionamiento de perfiles

Las longitudes de los perfiles aerodinámicos utilizados se establecen según el sistema métrico de medición, en unidades de milímetros.

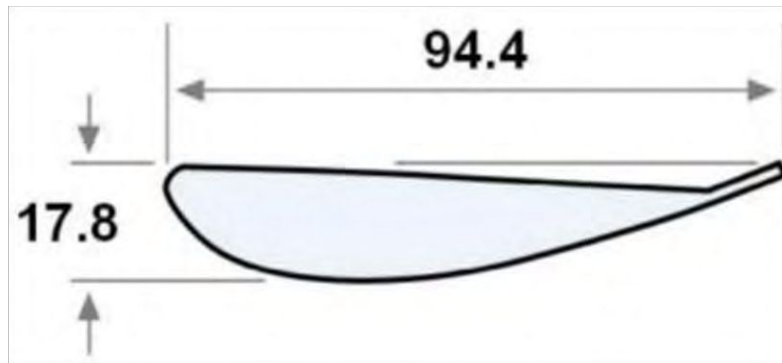


Figura 20. Perfil superior

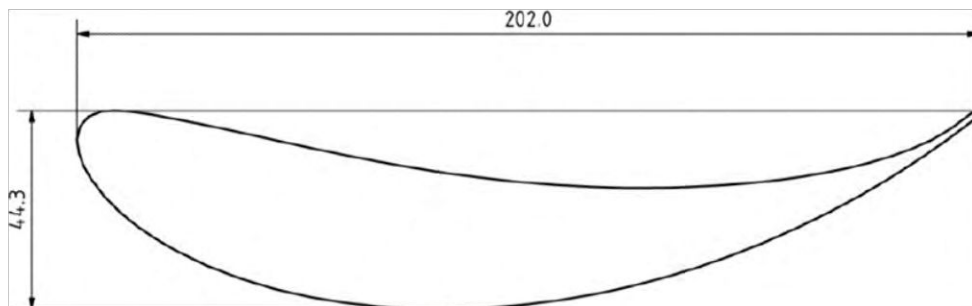


Figura 21. Perfil inferior

Para definir el ángulo de ataque de cada perfil aerodinámico se realiza un cálculo preliminar utilizando el criterio de red de vórtices (Vortex Lattice Theory o simplemente VLM). Este es un método numérico utilizado en dinámica de fluidos computacional, principalmente en las primeras etapas del diseño. VLM modela las superficies de sustentación como una hoja infinitamente delgada de vórtices discretos para calcular la sustentación y la resistencia inducida, despreciando la influencia del espesor del ala y la viscosidad del fluido.

Bajo las hipótesis de flujo estacionario, no viscoso, irrotacional e incompresible se puede calcular la sustentación y resistencia inducida del alerón en configuración de competencia.

Se debe tener en cuenta que la resistencia calculada no será la total, sino que es la componente de la resistencia que está vinculada con la sustentación. De este modo no se tienen en cuenta los efectos relacionados con la forma y fricción sobre la superficie.

Los datos obtenidos surgen de combinaciones entre alternativas de ángulo de ataque para el perfil superior e inferior en condiciones de presión y temperatura ambiente con una velocidad de la corriente libre de 18 m/s.

ALERÓN INFERIOR [°]	ALERÓN SUPERIOR [°]	C_L	C_D	C_L / C_D
-3	0	-1,791	0,090	19,84
-3	-1	-1,834	0,094	19,49
-3	-2	-1,877	0,098	19,15
-3	-3	-1,939	0,104	18,64
-2	0	-1,745	0,085	20,44
-2	-1	-1,787	0,089	20,08
-2	-2	-1,843	0,094	19,60
-2	-3	-1,871	0,096	19,49
-1	0	-1,697	0,0804	21,11
-1	-1	-1,746	0,084	20,78
-1	-2	-1,780	0,087	20,46
-1	-3	-1,821	0,0912	19,97
0	0	-1,648	0,075	21,97
0	-1	-1,821	0,0912	19,97
0	-2	-1,729	0,082	21,09
0	-3	-1,770	0,085	20,82

Tabla 4. Coeficientes aerodinámicos de alerón de doble elemento

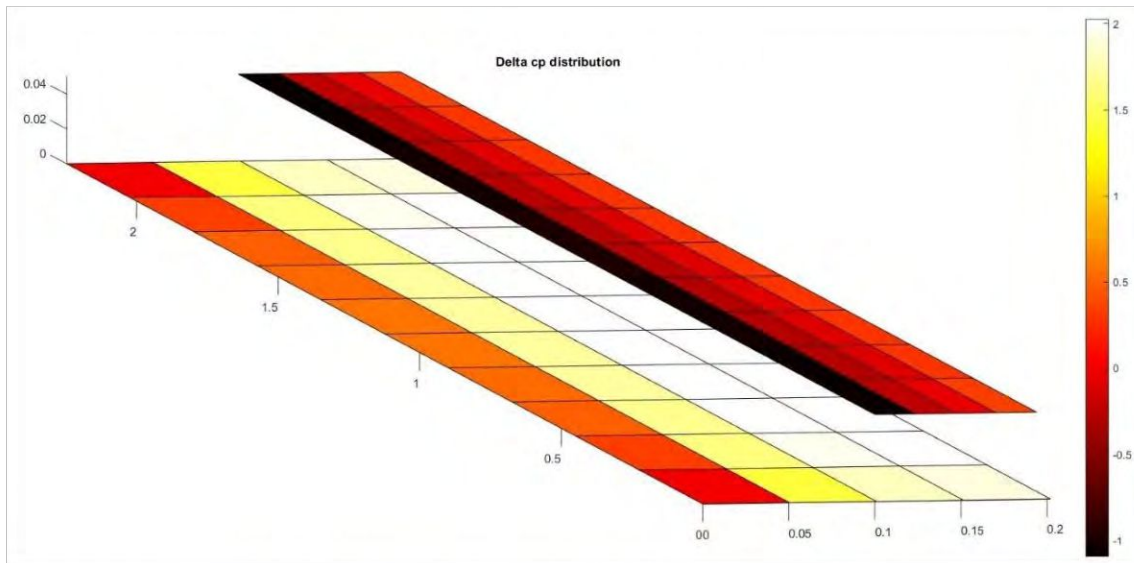


Figura 22. Distribución del coeficiente de presiones con ángulo de incidencia de 0°

La variación de los ángulos de ataque empleados se debe a la condición de la pista y su geometría, pudiendo ser necesaria alta carga aerodinámica en circuitos con gran cantidad de curvas y rectas reducidas.

El criterio de diseño en este trabajo se basa en la combinación que genera más carga aerodinámica y resistencia, cuyos ángulos de incidencia son de -3° .

Sin embargo, se debe tener en cuenta la capacidad de llevar a cabo la materialización del alerón, es decir, la capacidad de realizar la impresión 3D con espesores reducidos.

En base a este aspecto, se reemplaza al alerón de menor espesor por el de mayor cuerda.

Se realiza el mismo análisis anteriormente realizado, pero con la utilización de los mismos perfiles.

ALERÓN INFERIOR [°]	ALERON SUPERIOR [°]	CL	CD	CL/ CD
-3	0	-2,598	0,184	14,06
-3	-1	-2,702	0,198	13,63
-3	-2	-2,805	0,212	13,22
-3	-3	-2,907	0,226	12,87

-2	0	-2,570	0,179	14,28
-2	-1	-2,672	0,193	13,83
-2	-2	-2,774	0,206	13,41
-2	-3	-2,875	0,221	13,01
-1	0	-2,540	0,175	14,50
-1	-1	-2,641	0,188	14,05
-1	-2	-2,742	0,201	13,61
-1	-3	-2,842	0,215	13,20
0	0	-2,509	0,170	14,75
0	-1	-2,609	0,182	14,27
0	-2	-2,709	0,195	13,83
0	-3	-2,808	0,209	13,41

Tabla 5. Coeficientes aerodinámicos de alerón de doble elemento modificado

Posicionando ambos perfiles con ángulo de ataque nulo (0°), se tiene el valor más cercano en cuanto a sustentación y resistencia se refiere. El valor de carga aerodinámica aumenta un 29.4% y la resistencia lo hace en un porcentaje de 63.5 %, ambos en comparación con la configuración propuesta anteriormente.

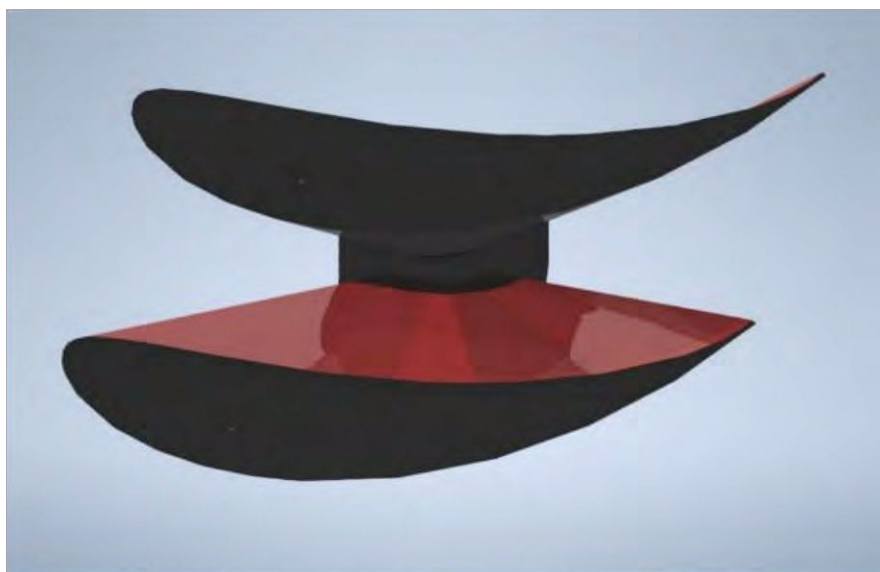


Figura 23. Configuración de perfiles aerodinámicos



Figura 24. Alerón trasero

8.4.5. Derivas laterales

Existe un apéndice, la mayoría de las veces presente, solidario a los alerones, que tiene un profundo efecto en las prestaciones. Estas son las denominadas derivas laterales o endplates.

Las derivas no están ahí solo para esconder la forma del perfil de un alerón para que no ser visualizado por la competencia o para poner el nombre del sponsor, en realidad, el propósito es incrementar la carga aerodinámica del alerón de forma considerable, quizás hasta un 30% por sobre el valor que se logra sin ellas. Sin derivas, la diferencia de presión de aire entre el intradós y el extradós de un alerón hace que el aire en la zona de alta presión intente escapar a la zona de baja presión, y se derrama por las alas con movimientos diagonales creando un patrón de vórtices que causa pérdida de carga aerodinámica.

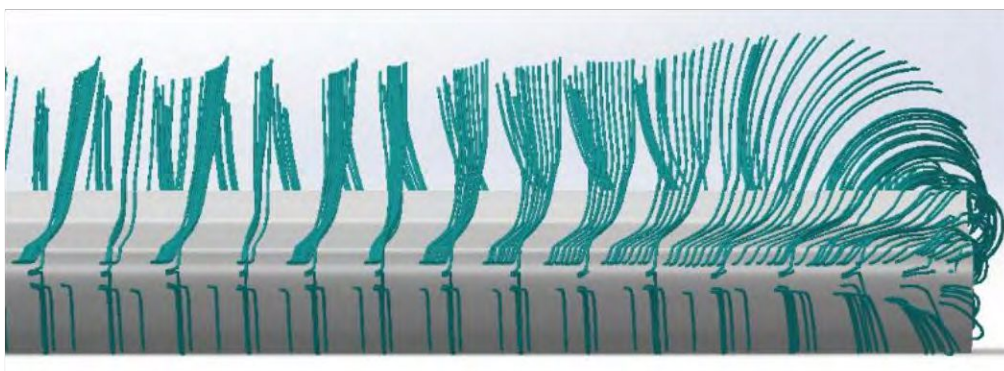


Figura 25. Simulación flujo sobre perfil superior – Vista frontal



Figura 26. Simulación de flujo sobre perfil superior

Al incorporar las derivas, se reduce o se evita que ocurra este movimiento de derrame o flujo turbulento sobre la superficie del ala, principalmente en los bordes, lo que ayuda a mantener la diferencia de presión por encima y por debajo.

Las derivas necesitan ser bastante grandes para ser efectivas. Normalmente se tiene mucho espacio para extender las derivas hacia el suelo, y en general las propias derivas constituyen la principal sujeción al coche, o por lo menos suelen servir como estabilizadores. Los alerones delanteros no suelen permitir grandes derivas debido a su proximidad al suelo.

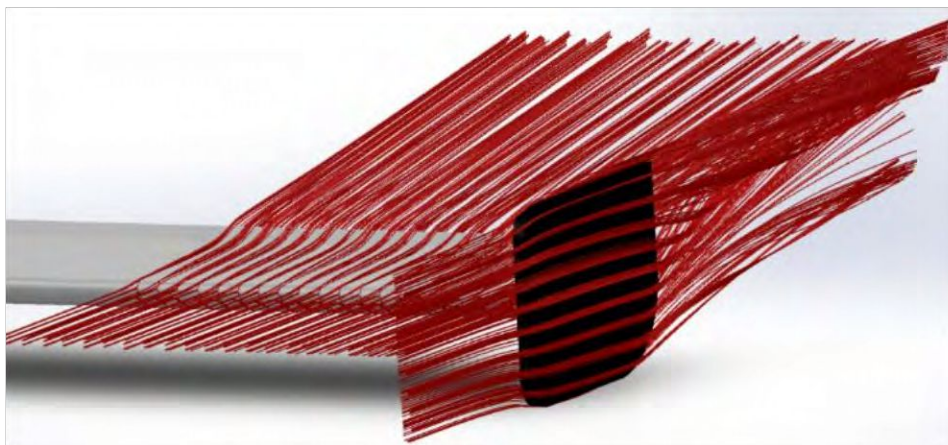


Figura 27. Flujo sobre alerón con endplates – Vista lateral

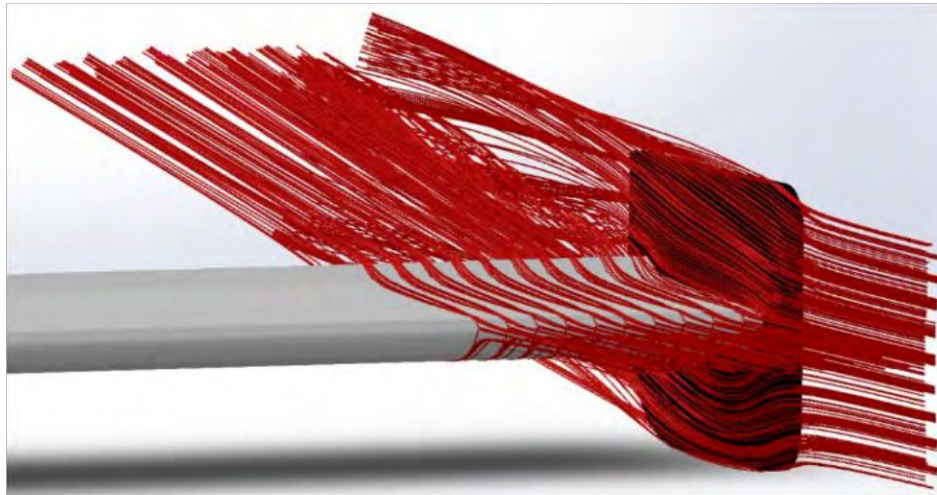


Figura 28. Flujo sobre alerón con endplates – Vista lateral / frontal



Figura 29. Flujo sobre alerón con endplates – Vista frontal

8.5. Efecto suelo

Se había mencionado que el flujo de aire que pasa por debajo de un automóvil se ve afectado por la proximidad del suelo, a pesar de esto, décadas atrás sólo se vieron las desventajas, y se intentó frenar el flujo de aire con el fin de reducir la resistencia. Sin embargo, la explotación del flujo de aire que pasa por el fondo para la creación de carga aerodinámica representó un salto enorme que permitió dar un paso hacia adelante en lo referente a las prestaciones de los autos de carreras.

El desarrollo de la capa límite bajo un automóvil influye directamente en la habilidad del flujo de aire de producir carga aerodinámica. Un auto normal de pasajeros tiene un fondo muy tosco, es decir, que el flujo posee muchas perturbaciones en su trayecto. Esta tosquedad contribuye al aumento la resistencia. Lo que ocurre es que esta clase de fondo crea una capa límite gruesa, la cual tiende a arrastrar el aire debajo del coche con ella. Por esto, la capa límite se extenderá hasta el suelo, y en la parte trasera del auto se juntará con la estela, que para ese momento ya ha bajado hasta el suelo.

El flujo a lo largo del fondo es lento y turbulento si no es bloqueado por completo por esta interferencia, y el efecto en la distribución de la presión es el de crear justo lo que no se desea: una zona de alta presión debajo del automóvil. En adición a la habitual generación de baja presión por encima de un auto, el aumento de la sustentación positiva no es un efecto positivo.

El objetivo por lograr es mejorar el flujo de aire debajo del automóvil, ya que cualquier dispositivo o labor que se realice para generar este efecto será beneficioso.

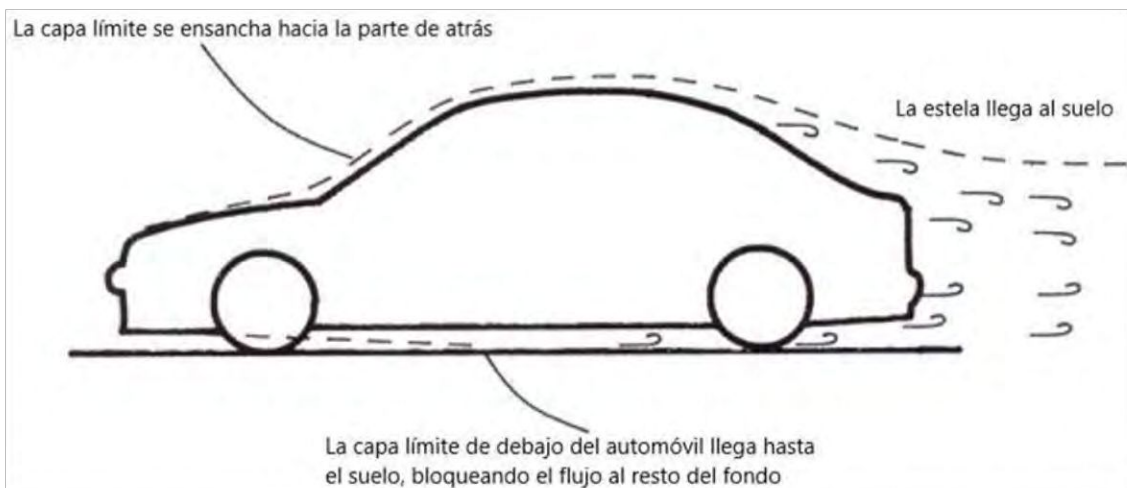


Figura 30. Engrosamiento de la capa límite

Existen principalmente tres factores por considerar:

1. La altura con respecto al suelo;
2. La tosquedad del fondo;
3. La forma de dicho fondo.

Reducir la altura libre que hay hasta el suelo con el fin de bajar el centro de gravedad para mejorar la maniobrabilidad, puede hacer que la sustentación positiva empeore si el fondo del auto es muy irregular.

Es bastante evidente que fijar un panel en el fondo hará que el aire se mueva con mayor velocidad, de igual forma la resistencia se verá reducida si los salientes y entrantes ya no perturban al flujo de aire. La forma del panel inferior también tiene una importante influencia en el flujo de aire del fondo del auto. Si la presión bajo el automóvil es positiva, caso que se puede dar incluso con un suave panel inferior, entonces, el flujo de aire puede mejorarse a través de la forma del fondo del automóvil.

Si se incorpora algo de curvatura lateral, incluyendo el redondeado de los bajos laterales, el aire con alta presión bajo el coche será desviado hacia los lados, lo que ayudará a que esta alta presión salga del fondo.

Sin embargo, sería mucho mejor crear una zona de baja presión por debajo del automóvil, donde el flujo tendería a emigrar de los lados del auto para entrar en la zona de baja presión bajo el chasis.

Con el fin de crear una zona de baja presión, es necesario comenzar a pensar en la forma del fondo.

La manera de generar esa región de baja presión que se busca es darle una ligera curvatura hacia arriba a la parte delantera del fondo y hacer lo mismo en la sección trasera. De esta manera se puede suavizar mucho el flujo, dándole más velocidad y generando una zona de baja presión.

En consecuencia, se forma una sección Venturi entre el auto y el asfalto, teniéndose la posibilidad de generar carga aerodinámica. Subir la sección trasera del fondo permite que la baja presión que existe en la estela del automóvil ejerza una influencia importante en el flujo del fondo, y ayuda también a mantener la baja presión debajo de la parte trasera del vehículo.

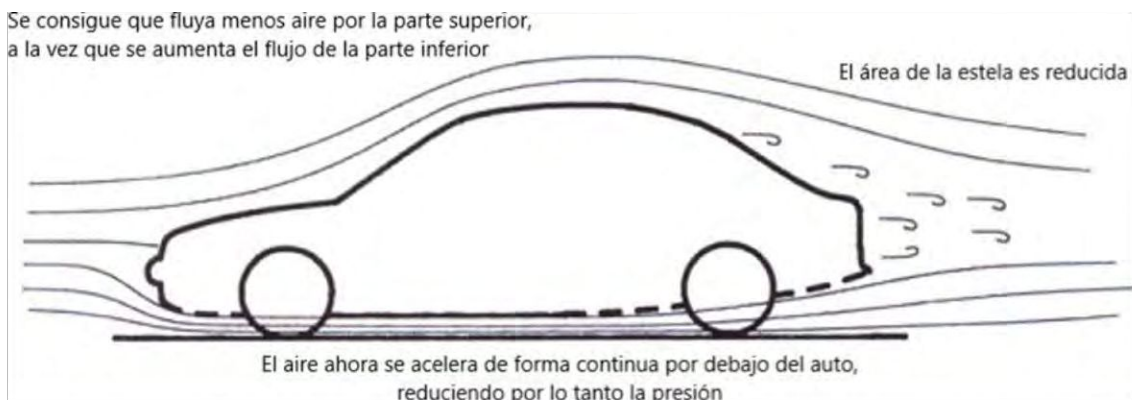


Figura 31. Efecto Venturi

La conclusión que se puede obtener es que es obligatorio montar un fondo plano si se quiere evitar la presión positiva en la zona inferior del automóvil y, además, que este panel tenga forma inclinada para permitir el paso suave y rápido del flujo de aire.

8.5.1. Fondos planos

La distancia al suelo resulta tan crítica cómo la forma de dicho fondo. Existe una forma sencilla pero muy importante de dar forma al fondo plano y se basa en situarlo con un ángulo de incidencia negativo respecto de la horizontal (inclinación). De esta manera la parte delantera del fondo debe ser más baja que la parte trasera y esto es muy evidente ya que si la parte delantera fuera más alta que la trasera, el aire se acumularía y crearía una sustentación positiva, la cual podría ser demasiado peligrosa. El hecho de que este ángulo de incidencia sea negativo es de fundamental importancia.

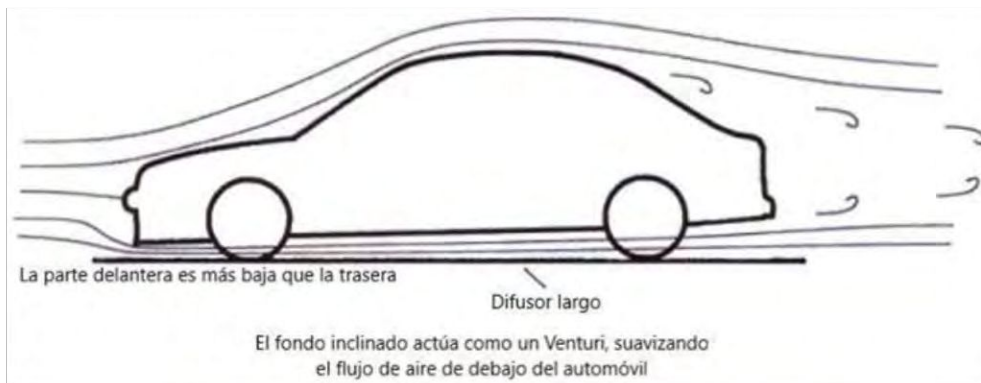


Figura 32. Inclinación de todo el auto, haciendo uso del efecto Venturi

En el peor de los casos, con un fondo inclinado se puede esperar una importante reducción en la sustentación positiva del automóvil, en general sólo es necesario un ángulo de 1° o 2° para crear una gran diferencia. De esta manera todo el fondo del automóvil se convierte en una sección Venturi, donde hay una vena estrecha bajo la parte delantera del automóvil a través del cual el aire es acelerado, creando una zona de baja presión mientras que el resto del fondo se convierte en un largo difusor. Si este es plano permite que el aire continúe fluyendo rápidamente, aunque perdiendo velocidad hacia la parte de atrás. En esta zona, la inclinación del fondo permite la interacción entre la estela y el flujo, lo que sirve de ayuda para garantizar que la presión continúe siendo relativamente baja en la parte trasera del auto.

La desviación y la altura de la parte delantera están estrechamente relacionadas, y habrá un ángulo en el cual la parte delantera del auto estará lo suficientemente baja para que la interferencia de la capa límite bloquee el flujo de aire, situación que se intenta evitar. Es por esta razón por la cual solo se necesita un pequeño ángulo de inclinación.

8.5.2. Efecto de la proximidad al suelo

Se comparan dos cuerpos, un elipsoide y semi-elipsoide con misma área frontal y volumen. En el caso del elipsoide simétrico, disminuyendo la distancia al suelo, se aumenta la velocidad del flujo abajo del vehículo, creando más sustentación negativa. Por otra parte, el drag también aumenta debido a la separación del flujo atrás del elipsoide.

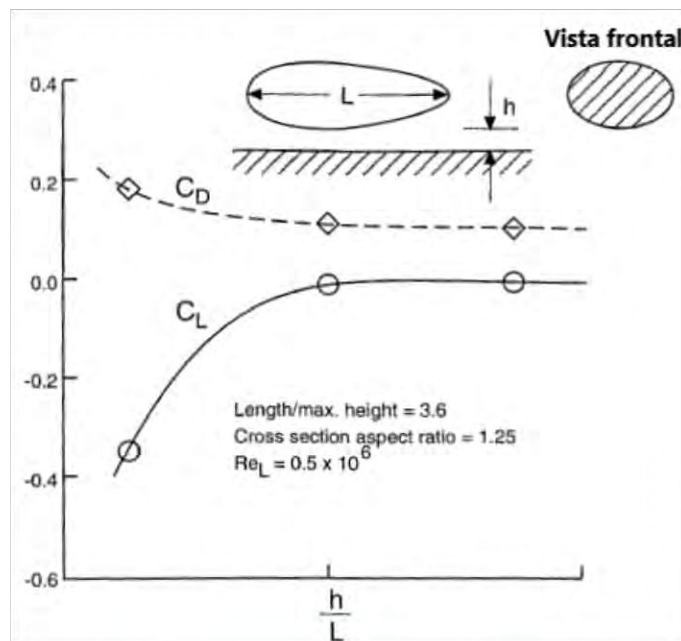


Figura 33. Coeficientes aerodinámicos de elipsoide

En el caso del semi-elipsoide, la reducción de la distancia al suelo tiende a bloquear el flujo abajo del auto, en consecuencia, no se tiene flujo acelerado bajo el vehículo, el cual genera succión. Por otra parte, la fuerza de resistencia sigue una tendencia similar al cuerpo simétrico, pero se tienen menores valores de drag.

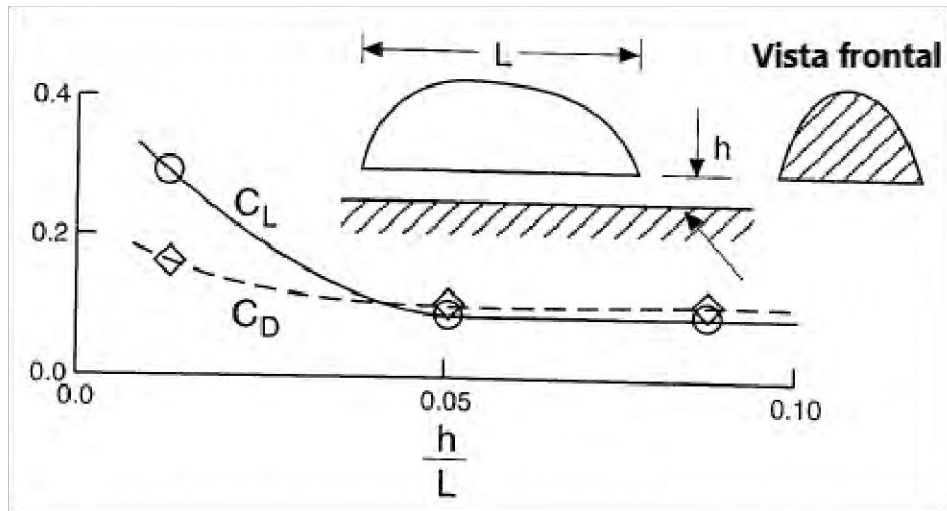


Figura 34. Coeficientes aerodinámicos de semi-elipsoide

9. TAMAÑO Y POSICIONAMIENTO DEL MODELO

El proceso de analizar un modelo particular de vehículo en el túnel de viento trae aparejado tres cuestiones principales:

1. Tamaño del modelo y el bloqueo que se genera en la sección de prueba;
2. Simulación del suelo móvil;
3. Montaje del modelo y sus ruedas móviles en la zona de testeo.

9.1. Dimensiones y bloqueo

La presencia de un cuerpo aerodinámico inmerso en un flujo de aire desvía la corriente del fluido. Dicha perturbación es local, es decir, lejos del cuerpo las líneas de corriente no se ven afectadas, encontrándose de forma recta y paralelas entre sí.

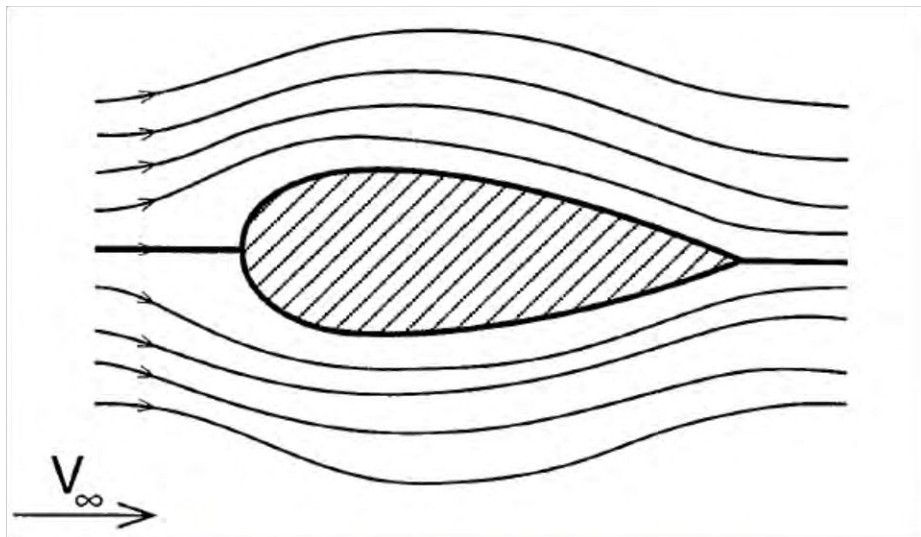


Figura 35. Cuerpo aerodinámico inmerso en corriente libre

Si este cuerpo se ubica dentro de dos paredes, el confinamiento fuerza la adaptación de las líneas de corriente a la forma de la pared.

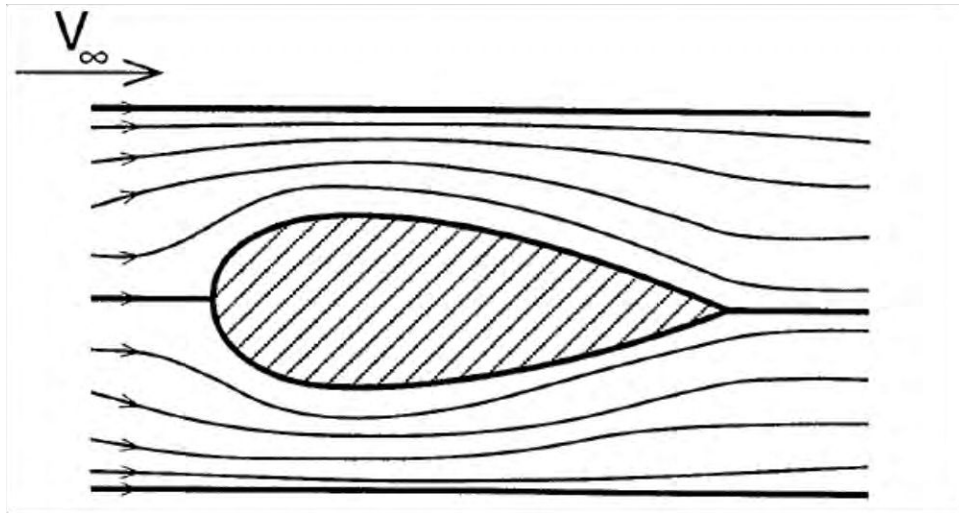


Figura 36. Flujo de corriente sobre cuerpo aerodinámico ubicado entre paredes

Por lo tanto, tener la pared demasiado cerca, hará que el flujo se mueva más rápido (mayor que la velocidad de la corriente libre fuera del túnel) en el espacio comprendido entre el modelo y las paredes, creando mayores lecturas de resistencia y sustentación.

Por lo tanto, una sección de prueba lo más grande posible es deseable para reducir los efectos de interferencia y obtener valores semejantes a los que se obtendrían en la carretera.

Para reducir los efectos de las paredes a una condición de viento dada, el modelo debe ser lo más pequeño posible, sin embargo, esta consideración es un limitante desde el punto de vista de los detalles.

Para evitar el bloqueo en la sección de prueba se recomienda que el área frontal del modelo no exceda el 7.5% de la sección del túnel donde este se ubica.

El área del modelo a escala es de 0.013 m^2 , mientras que la sección de prueba tiene una superficie de 1.4 m^2 . Es decir, el área del modelo es el 0.95 % de la sección transversal del túnel de viento, por ende, se está lo suficientemente lejos de la condición de bloqueo.

9.2. Simulación del suelo móvil

La necesidad de simular el movimiento del suelo en el túnel de viento complejiza considerablemente el ensayo. Hay una diferencia en la forma de las capas límites entre el auto que circula por la carretera y la condición en túnel de viento, ya que, en la primera

condición, dentro de la capa límite, la velocidad cerca de la superficie de un objeto estacionario se reduce a cero.

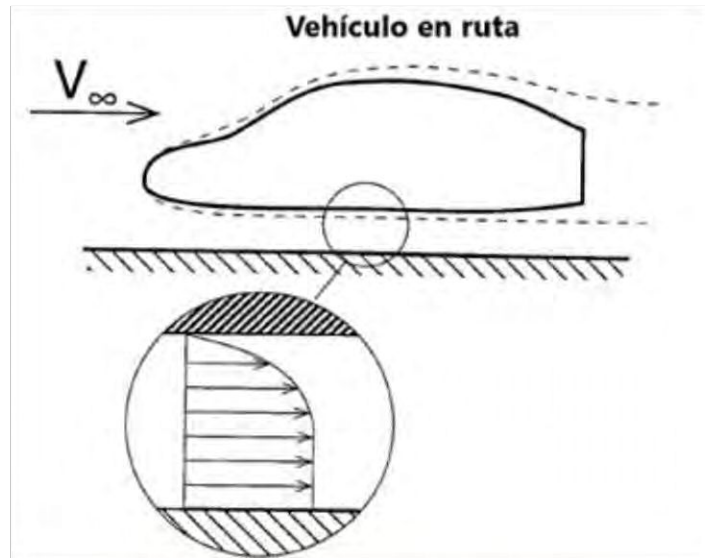


Figura 37. Capa límite de vehículo en carretera

El perfil de velocidades entre el auto y el suelo se ve afectado, particularmente en el piso del túnel de viento. En este lugar, el suelo del túnel es un objeto estacionario relativo al aire que, sin un modelo en la sección de prueba, posee su propia capa límite.

Cuando se coloca el modelo, el perfil de velocidades abajo del vehículo es el resultado de dos capas límites, una formada en el piso, y otra en la parte inferior del auto.

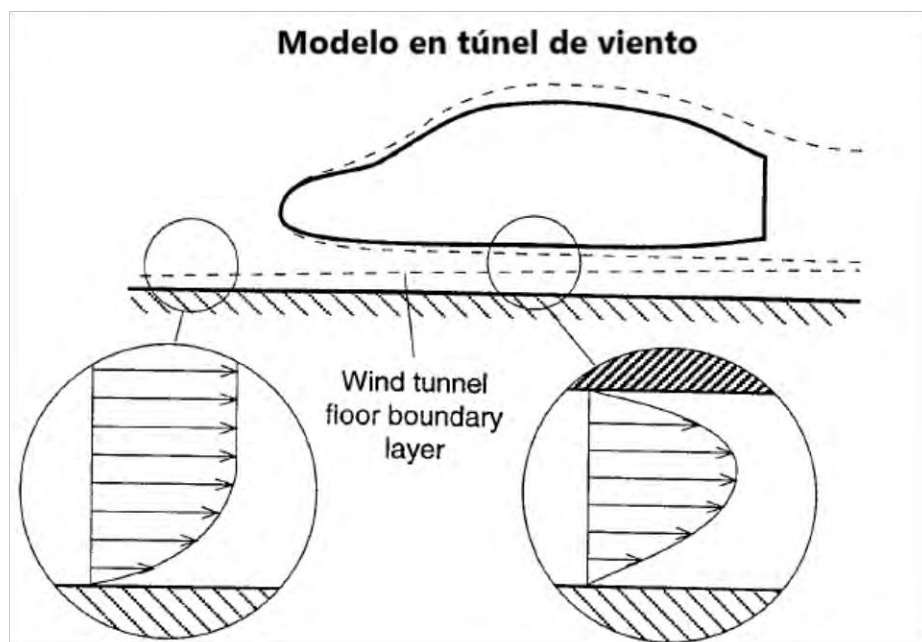


Figura 38. Capa límite de modelo y piso de túnel de viento

Una de las opciones es elevar el modelo sobre la capa límite con una leve inclinación, ya que la capa se incrementa a medida que se acerca al baúl.

El problema radica en el espacio que dejan las ruedas elevadas, el cual se debe rellenar con espuma blanda para evitar la succión resultante del flujo entre las ruedas y el piso.

Si el espacio entre las ruedas y el suelo no es sellado, el flujo pasante reduce la sustentación, mientras que el efecto en la resistencia es despreciable.

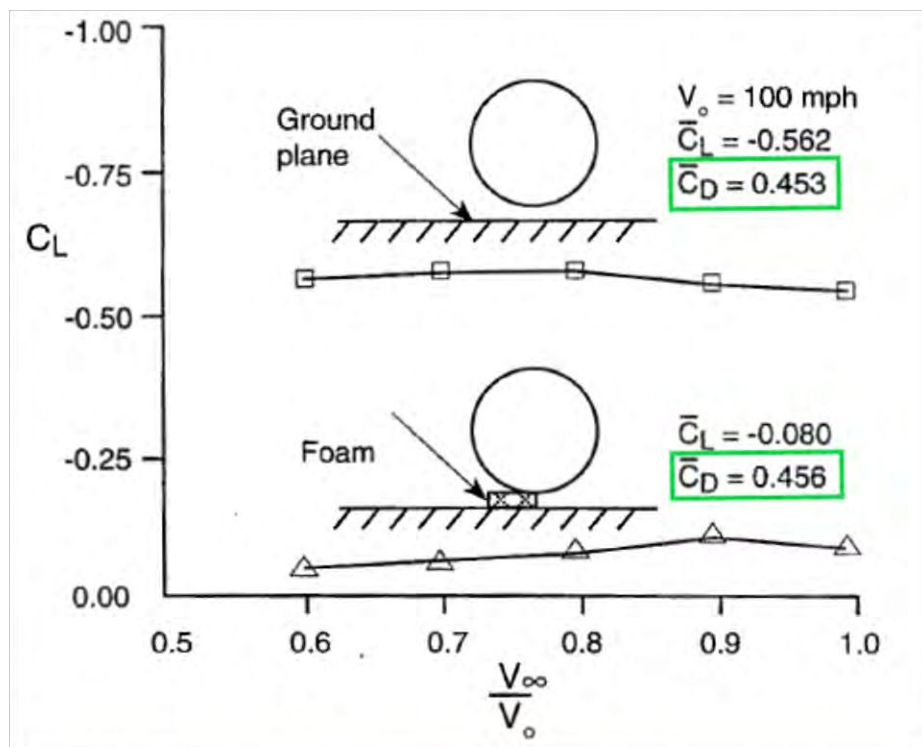


Figura 39. Efecto en C_D con el agregado de espuma en la zona inferior de las ruedas

Se pueden implementar diferentes mecanismos como solución a esta cuestión.

1. Una variación es introducir un piso plano elevado. La idea básica es que se evite la región con capa límite más gruesa en el piso del túnel de viento, en su lugar, el modelo se ubica en una capa límite (formada solo por el plano elevado) notoriamente más delgada.

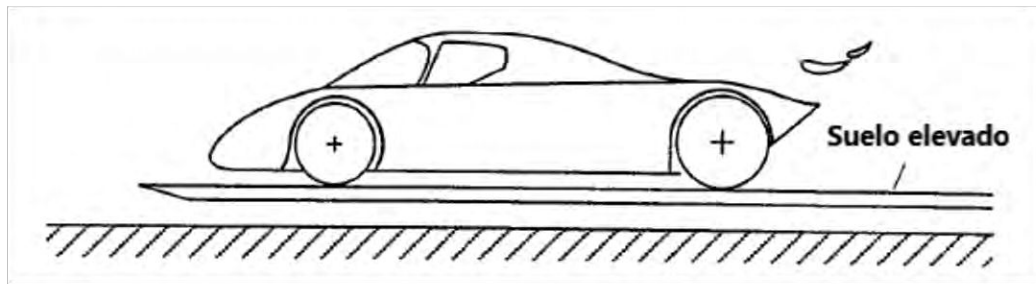


Figura 40. Suelo alternativo elevado en la sección de prueba

2. También se puede aplicar una ranura de succión anterior al modelo, la cual afecta a la capa límite formándose otra más delgada. Para ser efectiva, el espesor de la nueva capa límite no debería exceder el 10% del espacio libre entre el piso del túnel y la zona inferior del modelo.

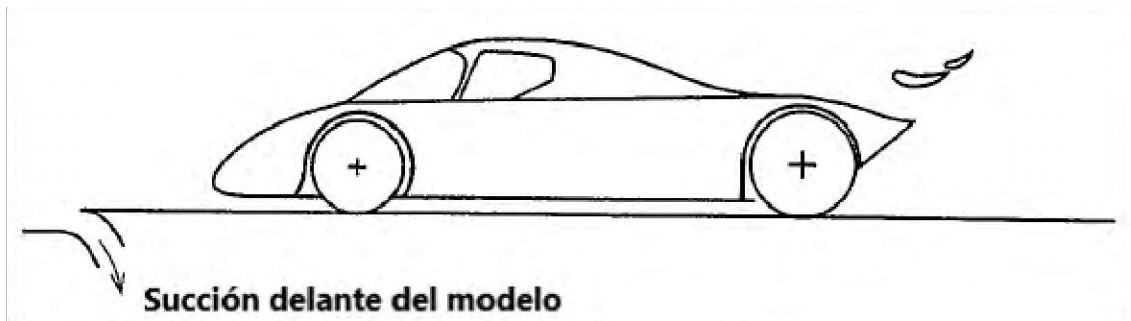


Figura 41. Succión de capa límite anterior al modelo

3. Una mejora del método previo es generar ranuras continuas por debajo del modelo, la cual es considerada una de las mejores soluciones. Sin embargo, se cree que debido a la interacción entre el modelo y el piso, la succión puede ser variable. Como se propone la succión, también se puede implementar el soplado, el cual no es práctico por una cuestión de costos y manteniéndose el problema de la variabilidad.

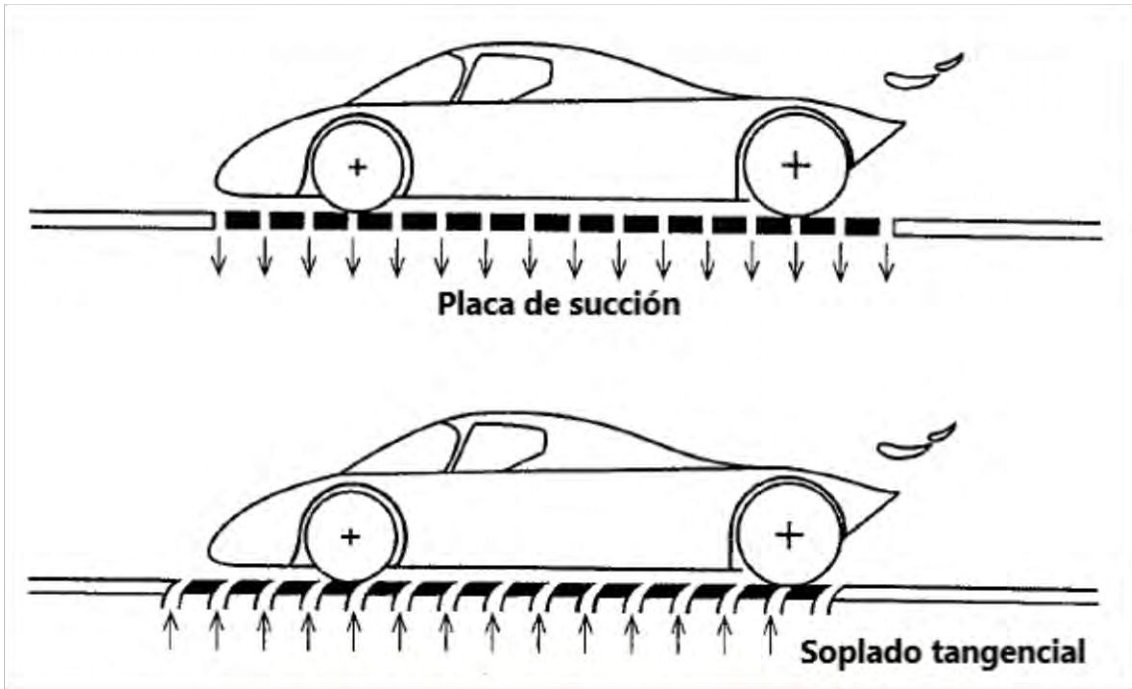


Figura 42. Succión y soplado de capa límite mediante ramuras inferiores

4. La última solución es la implementada en este trabajo final. Es la más popular en el ámbito del automovilismo y se basa en la simulación del movimiento del suelo mediante una cinta móvil.

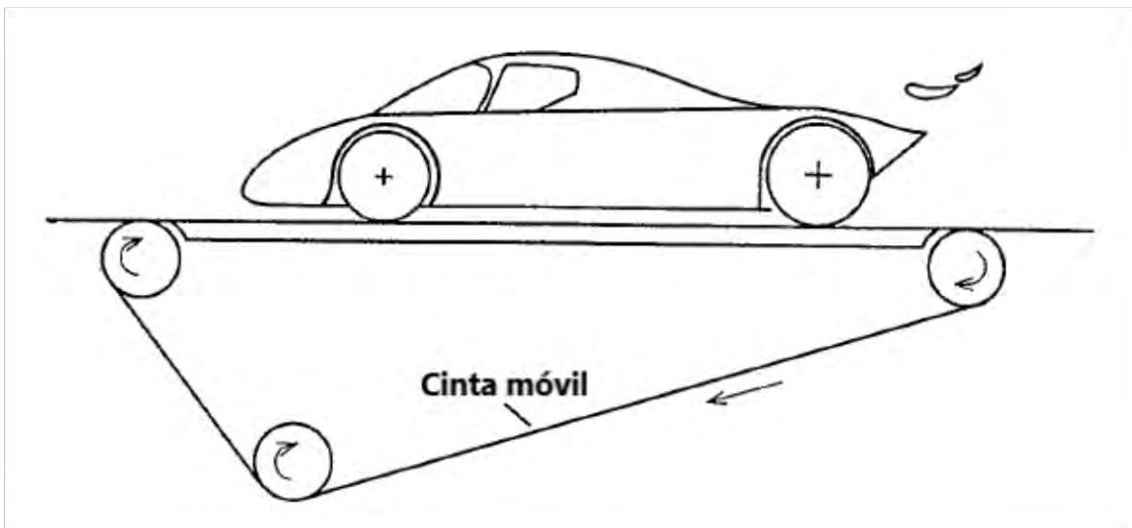


Figura 43. Simulación del suelo móvil mediante cinta ergonómica

Sin embargo, este método no está exento de inconvenientes.

El primer problema es que el modelo está sujeto por una barra pasante por algún punto del automóvil o solidaria a las ruedas. Por ende, el sistema de sujeción interfiere con el flujo que se dirige hacia la parte trasera del auto.

La segunda cuestión es cómo medir las cargas sobre las ruedas rotantes, las cuales están en contacto con la cinta móvil.

El tercer problema es que la alta succión de la zona inferior del modelo también puede succionar la cinta móvil.

9.3. Montaje

Se ubica el modelo a una distancia conocida respecto al suelo, sostenido por la barra que se conecta al sistema de medición, vinculado rígidamente a un bastidor ubicado externamente al túnel de viento.

La barra atraviesa el modelo en la ubicación del centro de masas lo suficientemente lejos del plano inferior del automóvil para generar la menor interferencia posible.

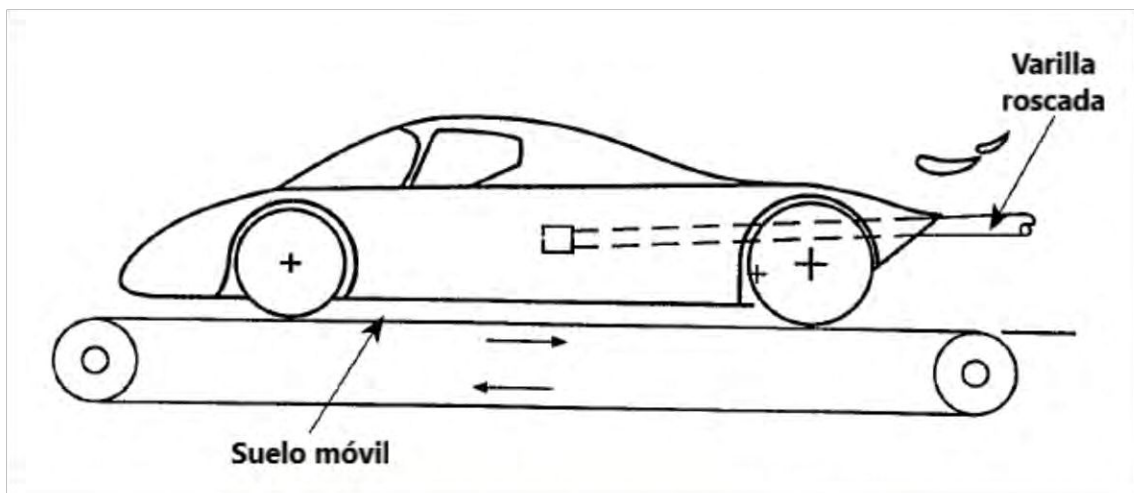


Figura 44. Montaje del modelo con sujeción mediante varilla roscada

El sistema de balanzas se aloja externamente al túnel con el propósito de obtener cargas propias del flujo de aire.

El uso de esta metodología en conjunto con la cinta móvil tiene la desventaja de que la balanza puede estar sujeta a vibraciones durante el ensayo.

9.4. Efecto de las ruedas fijas y/o móviles

Se define el ensayo del modelo con las ruedas en una posición fija, ya que, para la medición de resistencia, el efecto móvil no genera una gran variación. Sin embargo, en un hipotético análisis de sustentación, se deben tener en cuenta las consideraciones necesarias para no sobreestimar los coeficientes de sustentación obtenidos.

10. ENSAYOS REALIZADOS

La experimentación se puede dividir principalmente en dos grupos:

- Configuración sin efecto del movimiento del suelo:

Las condiciones por ensayar son con el agregado de pontones (elementos de protección frente a choques laterales) al automóvil de serie y la configuración de competición, donde se incluye el alerón trasero, aletas laterales delanteras y splitter.

En primera instancia, la distancia de los pontones respecto del suelo es de 20 milímetros, la cual es la condición más próxima respecto del piso que se puede alcanzar debido al método de medición.

La segunda y tercera configuración es con los mismos apéndices aerodinámicos (caso del auto de competencia) pero con una distancia entre suelo y pontones de 30 y 40 milímetros. Las mismas condiciones de altura se analizan para el automóvil estándar (sin dispositivos aerodinámicos).

Se evalúa la fuerza de resistencia para velocidades de 5, 9, 13 y 16 m/s para la configuración de serie y con la utilización de los dispositivos aerodinámicos, para variadas alturas respecto del suelo.

La carga de resistencia obtenida en el ensayo se evalúa en unidades de gramos.

Este valor se adimensionaliza con el área de referencia para obtener un valor de CD, este puede tomarse de manera cuantitativa para comparar con el valor que tendría el modelo a escala real.

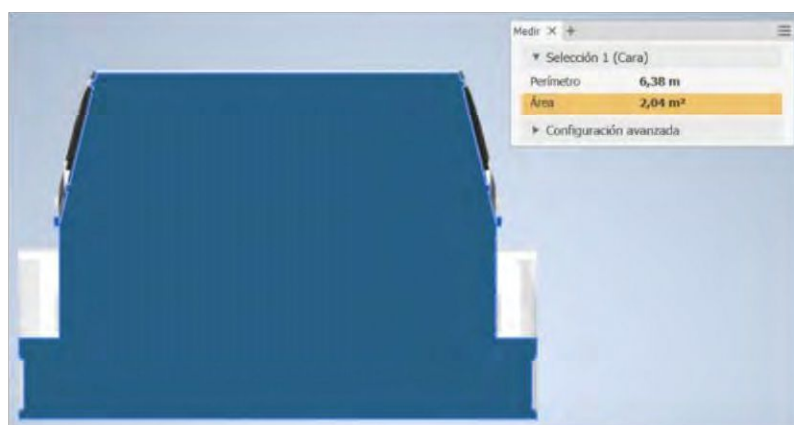


Figura 45. Área transversal y perímetro de automóvil a escala real

Al valor de área resultante se le suma la correspondiente a las porciones de rueda que sobresalen de la carrocería, cuya área es de 0.048 m^2 .

$$\text{Área total} = 2.088 \text{ m}^2$$

Se enumeran los números de Reynolds para cada velocidad, definiendo los valores de viscosidad dinámica ($0.0000181 \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}$), densidad ($1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) y longitud característica, tomando como referencia la distancia lateral del vehículo a escala (0.4 m).

Velocidad [km/h]	Velocidad [m/s]	Reynolds
18	5	1,4E+05
32,4	9	2,4E+05
46,8	13	3,5E+05
57,6	16	4,3E+05

Tabla 6. Número de Re correspondiente a cada velocidad

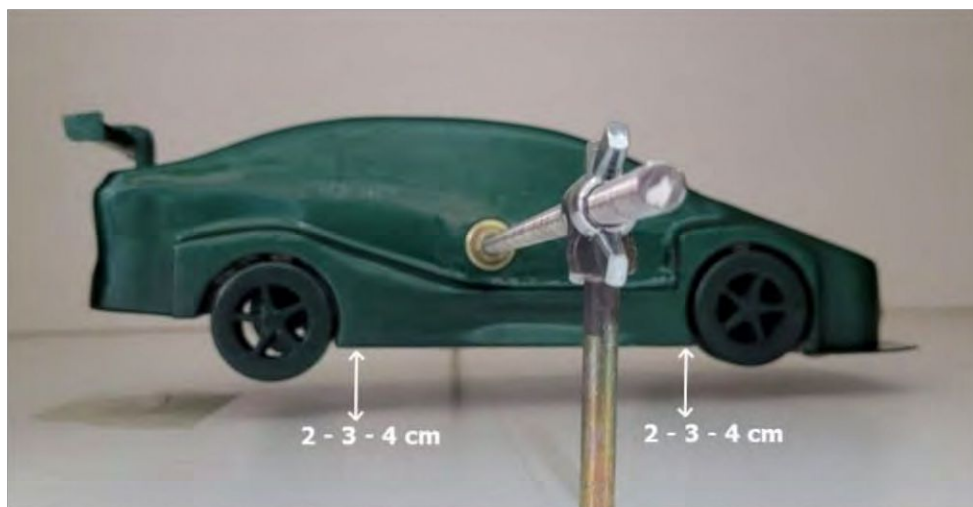


Figura 46. Modelo de competición - Suelo fijo

- Configuración con efecto del movimiento del suelo

Se efectúan las mismas condiciones de ensayo planteadas anteriormente, pero con la particularidad de que en esta oportunidad se simula el movimiento del suelo con una cinta ergonométrica móvil.

El modelo se ubica a una distancia de 20 cm desde la trompa hasta el borde de la cinta móvil con el objetivo de que la capa límite sea propiamente de la cinta móvil y no una transición entre la capa límite del túnel de viento y la cinta ergonométrica.

Posteriormente se analizan los resultados obtenidos para definir si la utilización de la cinta ergonómica influye en los resultados y concluir cuál de las configuraciones de altura presenta potencialmente mayores beneficios en cuanto a resistencia aerodinámica se refiere.



Figura 47. Distancia entre trompa e inicio de cinta móvil



Figura 48. Modelo de serie - Suelo móvil

10.1. Ajuste experimental

Cargas de resistencia

La evaluación de cargas se realiza mediante la adquisición de datos por medio de dos celdas de cargas solidarias al bastidor externo al túnel, por un lado, y a la varilla roscada que sujeta al modelo, por el otro.

Se ubican de manera paralela al flujo incidente de manera de cuantificar estrictamente las cargas de resistencia. Las celdas de carga se conectan al chasis National Instruments de ocho canales y la información se procesa en una computadora mediante el software LabVIEW.

La frecuencia de muestreo es de 1000 Hz y se define un tiempo de muestreo de 10 segundos para obtener un total de 10.000 muestras por intervalo de tiempo.



Figura 49. Celda de carga



Figura 50. Montaje de celda sobre bastidor



Figura 51. Posicionamiento de cinta y celdas de carga.

Se realiza el posicionamiento del modelo y calibración de las celdas con pesos estandarizadas de hasta 200 gramos para obtener las cargas sobre el vehículo.



Figura 52. Pesos estandarizados

El control de velocidades durante el ensayo se realiza mediante la lectura de un manómetro diferencial Testo 512 que traduce la información de presiones obtenida mediante un tubo Pitot.



Figura 53. Manómetro digital con tubo Pitot

Anemometría

Se determina el perfil de velocidades mediante la ubicación de la punta sensora del anemómetro en la ubicación del CG del modelo para alturas desde 1 a 15 cm con la utilización de un anemómetro de hilo caliente a temperatura constante.

La caracterización se realiza para las cuatro velocidades de ensayo (5, 9, 13 y 16 metros / segundos) y ambas configuraciones de piso (móvil y fijo).

Se utiliza el anemómetro de hilo caliente DANTEC SONDA X de doble canal, el cual se ubica sobre un soporte que permite la conexión hacia el chasis de adquisición de datos DANTEC 90N10 que deriva la información hacia una computadora que permite el procesamiento de la información del ensayo.

La frecuencia de adquisición de datos es de 2000 Hz con intervalos de muestreo de 10 segundos.



Figura 54. Sonda X



Figura 55. DANTEC Streamline 90N10 Frame - Computadora Sterling



Figura 56. Soporte de sensor de hilo caliente

11. EQUIPAMIENTO

11.1. Modelo

El modelado del automóvil se realiza mediante el software Autodesk Inventor 2021 teniendo en cuenta las dimensiones del auto de calle y aquellas longitudes de los elementos propios del auto de competencia, los cuales deben respetar la normativa vigente de la categoría, la cual se adjunta en la sección 16.2 del Anexo.

Especificaciones de Toyota Corolla 2020

- Largo: 4540 mm;
- Ancho sin espejos: 1900 mm;
- Alto: 1310 mm;
- Distancia entre ejes: 2600 mm;

11.1.1. Diseño asistido por computadora (CAD)

El diseño parte desde una fotografía del plano lateral del vehículo en escala real y se continua con las vistas frontales y traseras a partir de la medición de cada elemento de forma manual siguiendo los lineamientos del modelo de serie del Toyota Corolla modelo 2019.

Se finaliza la etapa de diseño con el agregado de los pontones laterales y guardabarros según el reglamento estipulado para el año 2020.

Se divide al modelo en tres partes principales, más el agregado de ruedas y alerón para su posterior impresión.



Figura 57. Trompa delantera

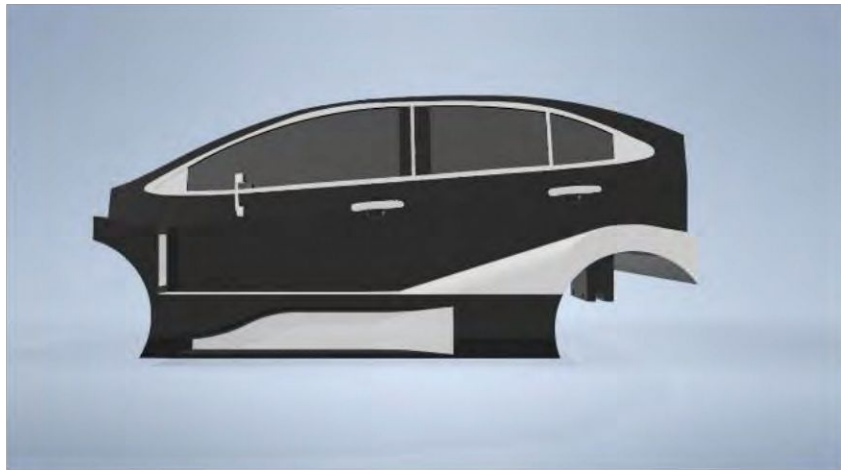


Figura 58. Sección media - Vista lateral



Figura 59. Baúl trasero

11.1.1.1. Ensamble de modelo

Se enseñan vistas del modelo ensamblado en diferentes configuraciones y elementos auxiliares.



Figura 60. Modelo con altura y diseño de calle, con agregado de pontones



Figura 61. Modelo de serie - Vista en perspectiva trasera – lateral



Figura 62. Modelo con alerón, aletas frontales laterales y splitter



Figura 63. Modelo con agregado de aletas frontales



Figura 64. Modelo a escala con sujeciones para ruedas



Figura 65. Vista trasera de modelo a escala

11.2. Materialización del modelo a escala

11.2.1. Masillado

Posteriormente, el diseño se imprime en escala 1:12.5 en resina plástica y se le realiza un tratamiento de masillado para eliminar irregularidades.

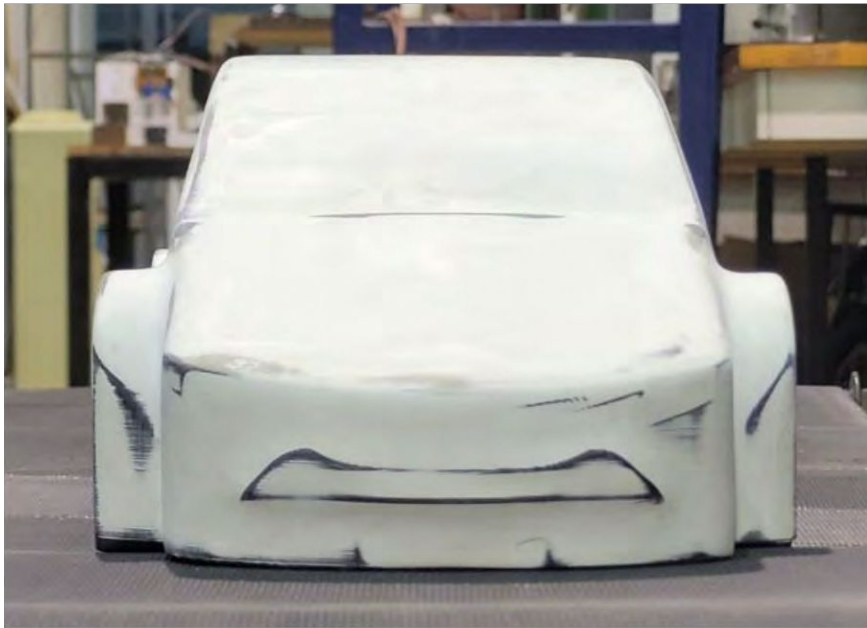


Figura 66. Vista frontal de modelo masillado - Escala al 8%



Figura 67. Modelo masillado - Vista trasera



Figura 68. Vista en perspectiva lateral - trasera

Finalmente, se le aplica pintura en aerosol y posterior barnizado con el fin de que la superficie externa sea semejante al auto real.

Es necesario un color de pintura oscuro, de modo que permita la visualización del flujo en el ensayo mediante la inyección de humo.



Figura 69. Aplicación de pintura – Vista lateral



Figura 70. Pintura – Vista en perspectiva delantera

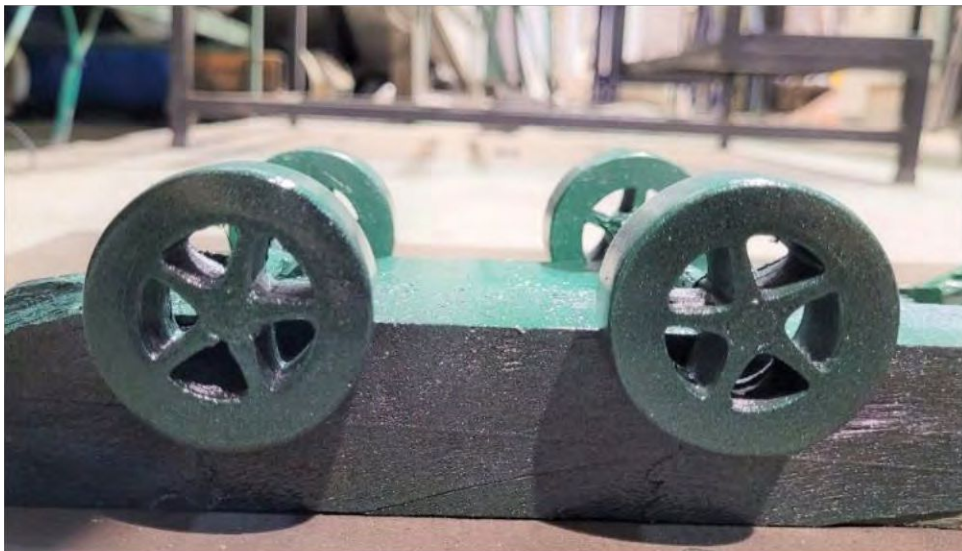


Figura 71. Ruedas de ambos ejes

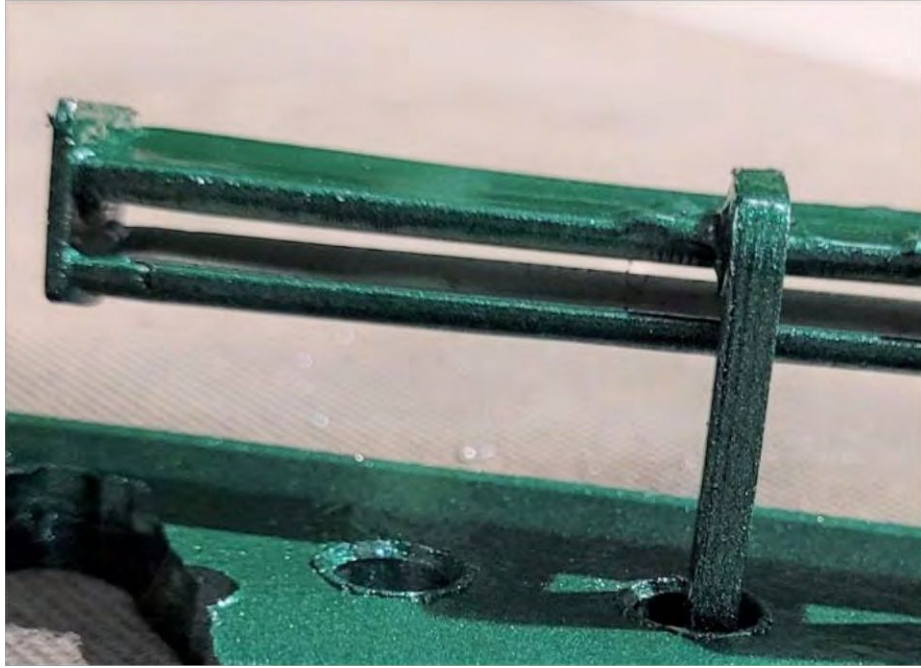


Figura 72. Alerón trasero

11.3. Cinta ergonómica

El dispositivo consiste en una estructura donde se ubica la cinta ergonómica, la cual mediante el impulso de un motor de corriente alterna se desplaza con cierta velocidad tangencial.



Figura 73. Acople de motor trifásico mediante correa dentada

11.4. Sujeción de celdas de carga

Para la respectiva ubicación de las celdas de carga se construye un bastidor, el cual estará en una posición fija en el suelo, de modo que permita la sujeción del modelo por medio de un conjunto de varillas.

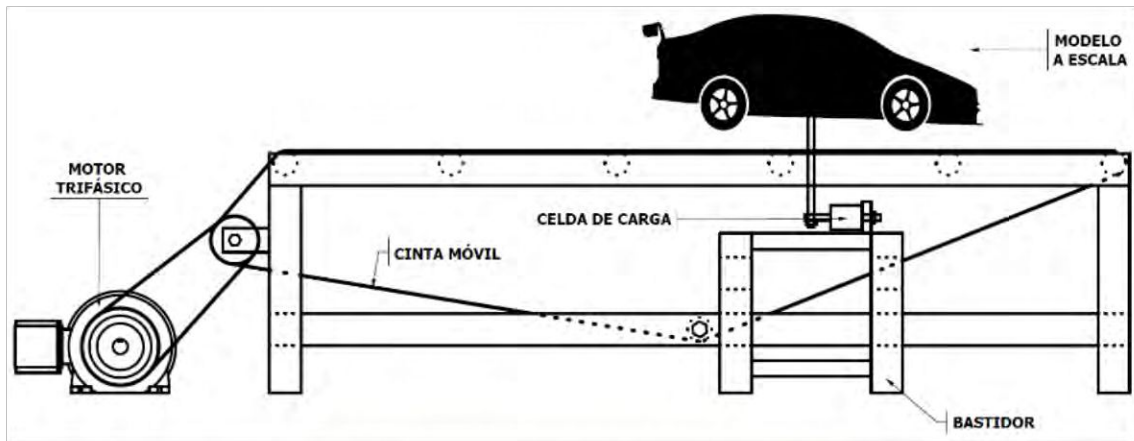


Figura 74. Sujeción de las celdas de carga y el modelo

11.5. Túnel de viento

Se define como un largo túnel sobre el cual el aire se desplaza debido al movimiento de uno o más ventiladores. Tiene la ventaja de que las herramientas de instrumentación, adquisición de datos y modelo se alojan en un lugar estacionario mientras que el aire se mueve relativo a los mismos sobre un ambiente controlado.

Previo a la sección de prueba se coloca una rejilla construida con pequeños paneles honey-comb o simplemente un mallado, con el objetivo de controlar el nivel de turbulencia.

Los túneles de sección cerrada, en comparación con los de sección abierta, no malgastan el momento del aire eyectado por el fan, y esto se debe a la recirculación del flujo. Por ende, el ventilador trabaja solo para vencer la resistencia de fricción en las paredes del túnel y el modelo.



Figura 75. Túnel de viento disponible en las instalaciones de la UIDET LaCLyFA

11.5.1. Sección de prueba

Para el montaje de la cinta ergonómica es necesario reacondicionar la sección de prueba del túnel de viento.

De esta manera se materializa una estructura con dimensiones idénticas a la utilizada, con la diferencia de que tendrá una perforación en la parte inferior con el área de la cinta móvil para su posterior instalación.

11.6. Visualización

El método consiste en la visualización del campo de flujo alrededor del vehículo con la utilización de humo comercial.

El propósito de este ensayo es la identificación de las secciones del automóvil donde la corriente de aire libre sigue el contorno (capa límite adherida), y donde el flujo se desprende (capa límite desprendida).

Equipamiento:

- Humo líquido comercial USA Liquids;
- Máquina de humo;
- Compresor de aire Dogo. 3 HP de potencia;
- Puntero laser Libercam RPUNT-01

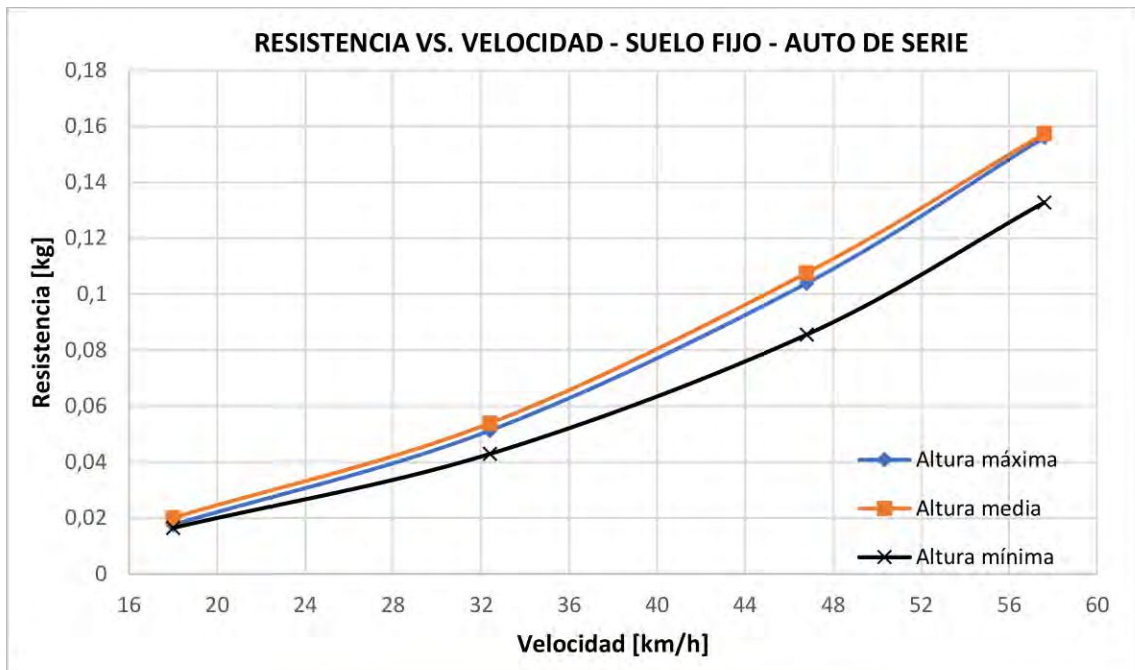
12. RESULTADOS

12.1. Cargas de resistencia

12.1.1. Suelo fijo

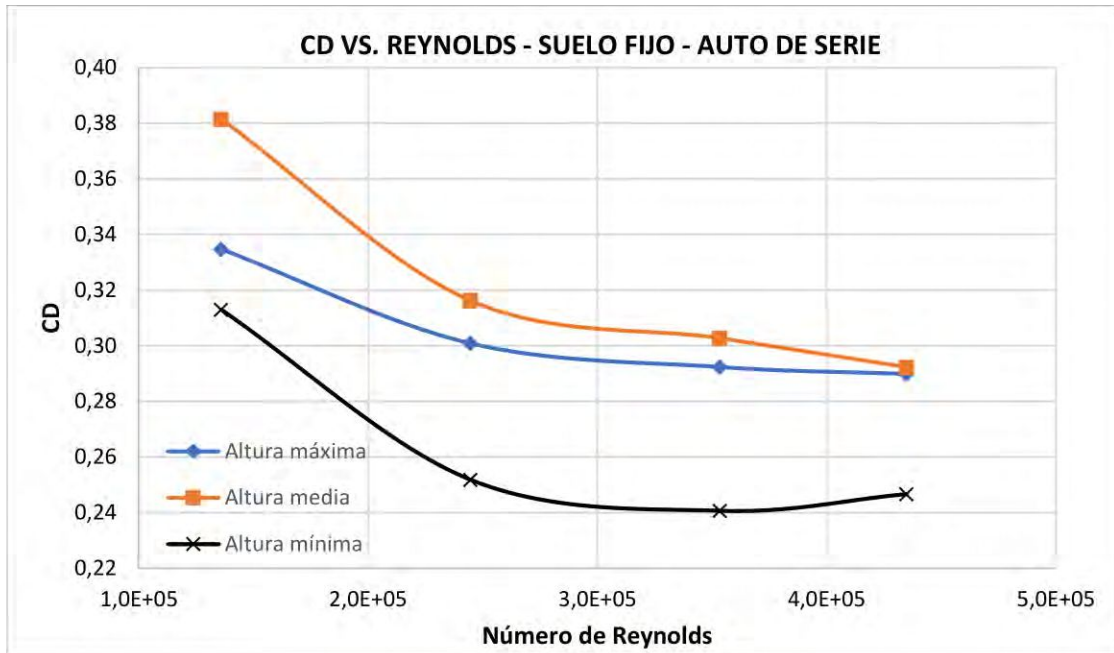
12.1.1.1. Automóvil de serie

La información producto del ensayo se resume en las gráficas sucesivas.



Gráfica 1. Resistencia vs. Velocidad - Suelo fijo - Auto de serie

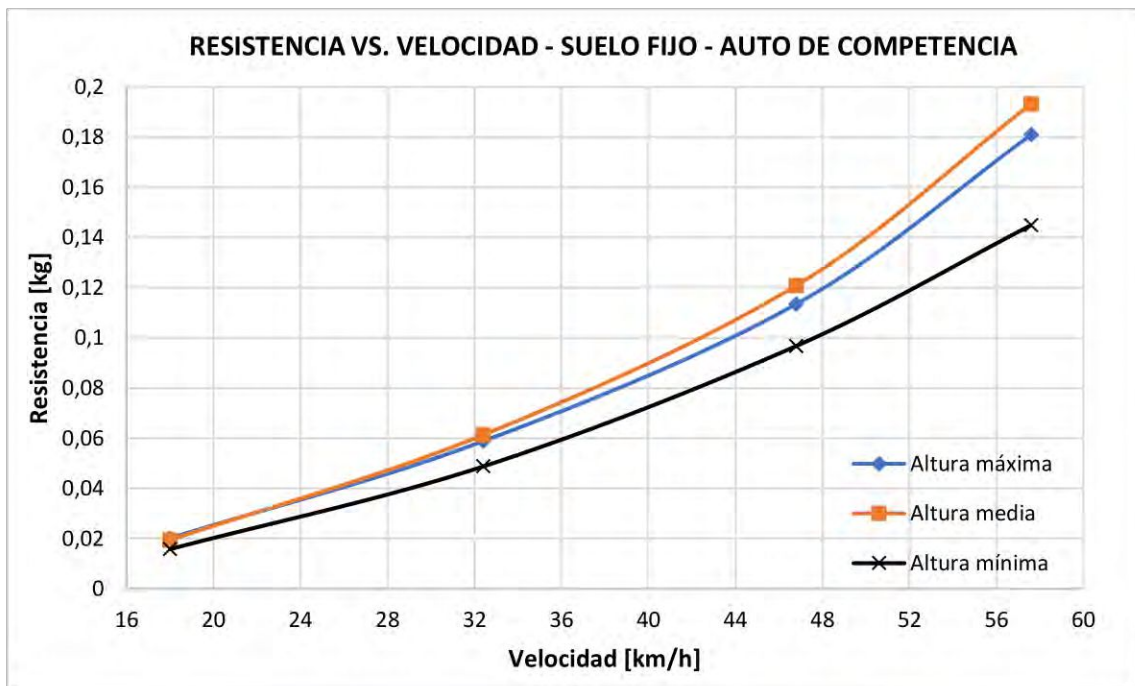
Se realiza la comparativa entre los valores de C_D obtenidos para cada altura, en función del número de Reynolds.



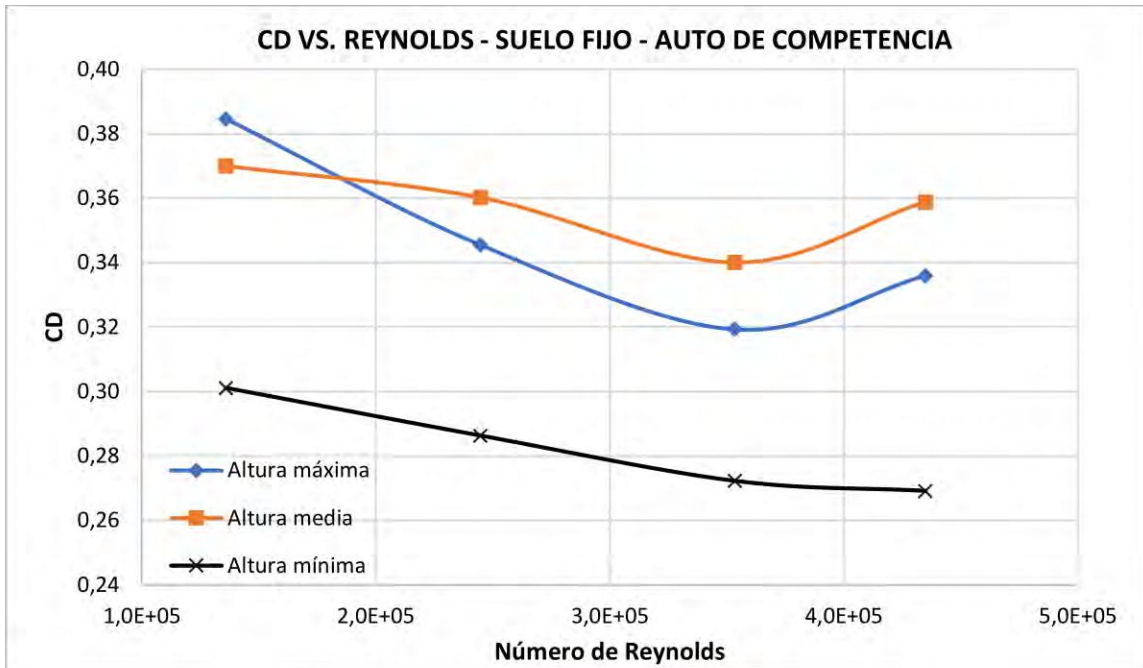
Gráfica 2. C_D vs. Re - Suelo fijo - Auto de serie

12.1.1.2. Automóvil de competencia

Se realiza el segundo ensayo, con la misma configuración de suelo, pero con la utilización de todos los dispositivos aerodinámicos.

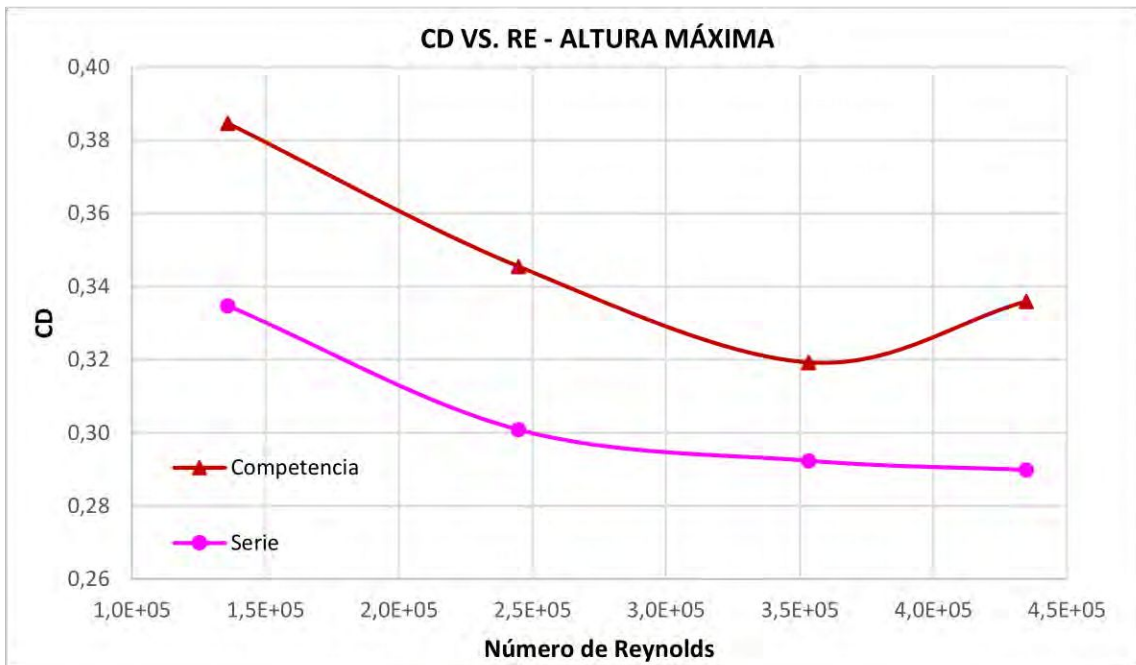


Gráfica 3. Resistencia vs. Velocidad - Suelo fijo - Auto de competencia

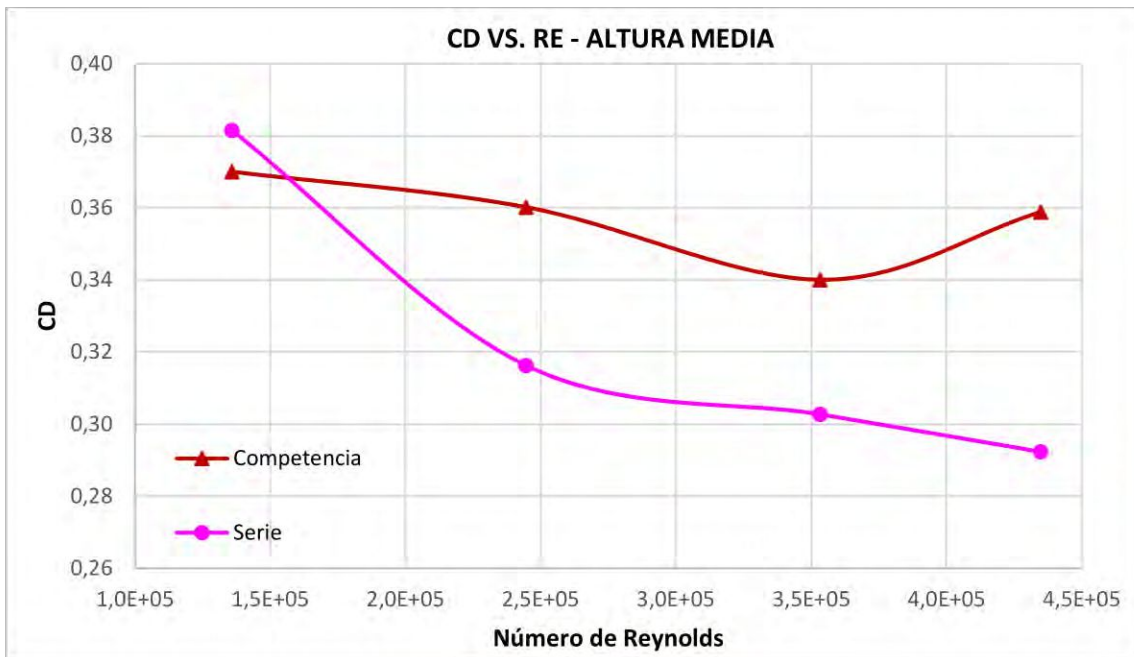


Gráfica 4. C_D vs. Re - Suelo fijo - Auto de competencia

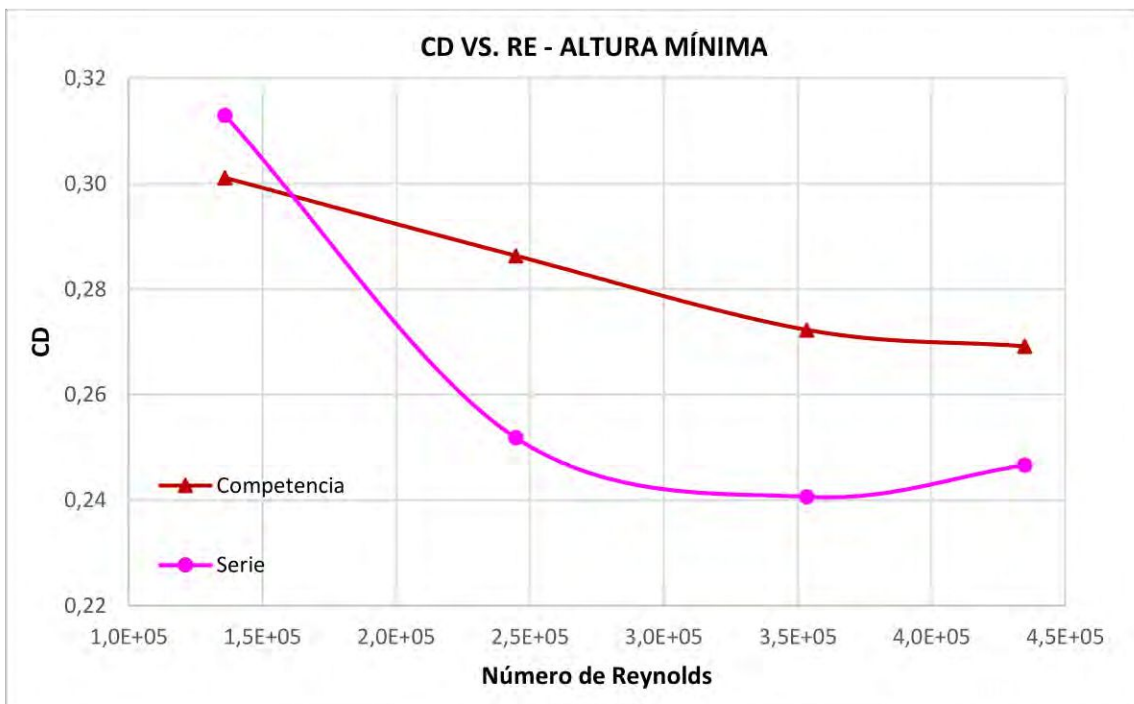
Se realiza la comparativa entre ambas configuraciones aerodinámicas para cada altura respecto del suelo.



Gráfica 5. C_D vs. Re - Altura máxima



Gráfica 6. C_D vs. Re - Altura media



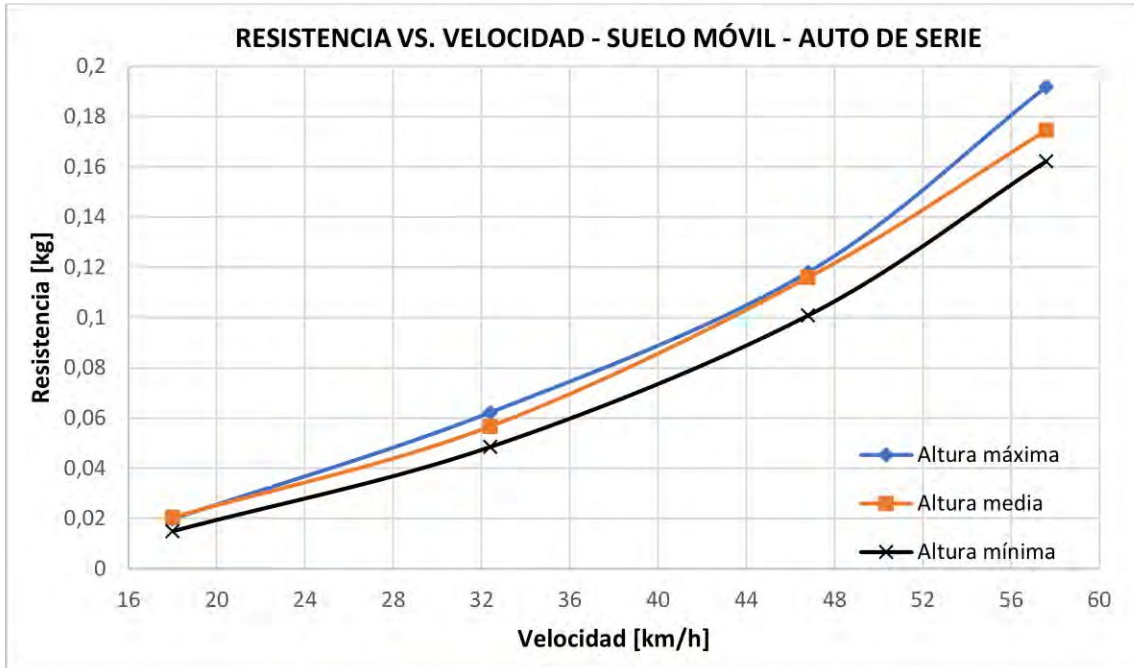
Gráfica 7. C_D vs. Re - Altura mínima

12.1.2. Suelo móvil

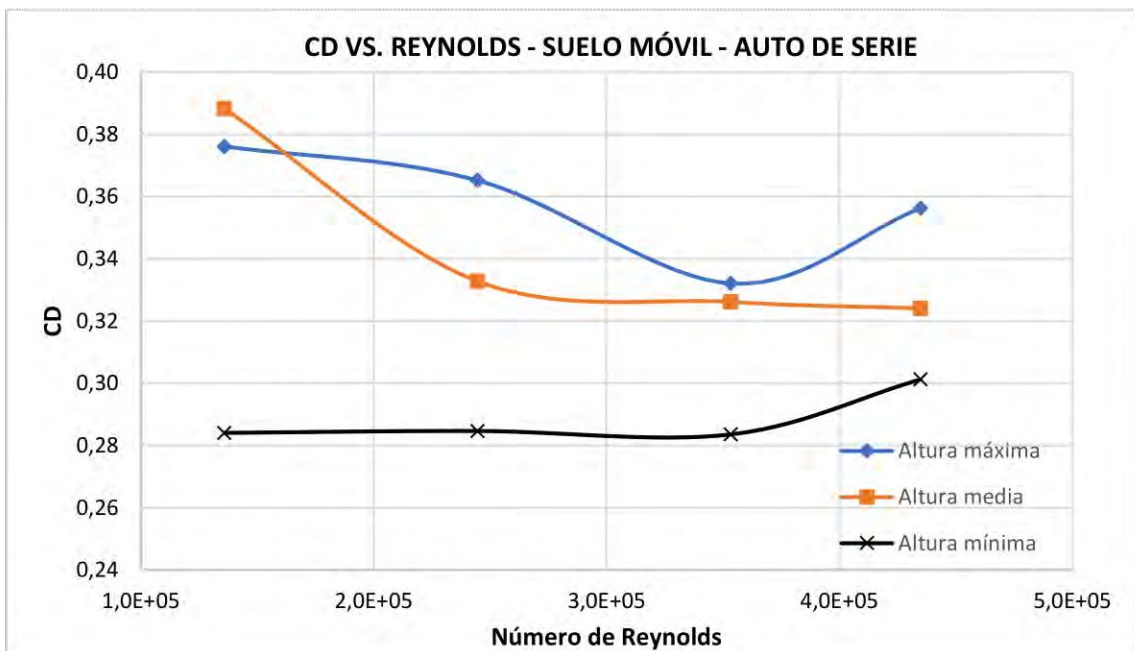
Se realiza nuevamente la experimentación para ambas configuraciones aerodinámicas y alturas respecto al suelo, pero este ya no es fijo, sino que se utiliza la cinta ergonómica móvil.

12.1.2.1. Automóvil de serie

Se evidencian datos de fuerza y coeficiente de resistencia en función de la velocidad.



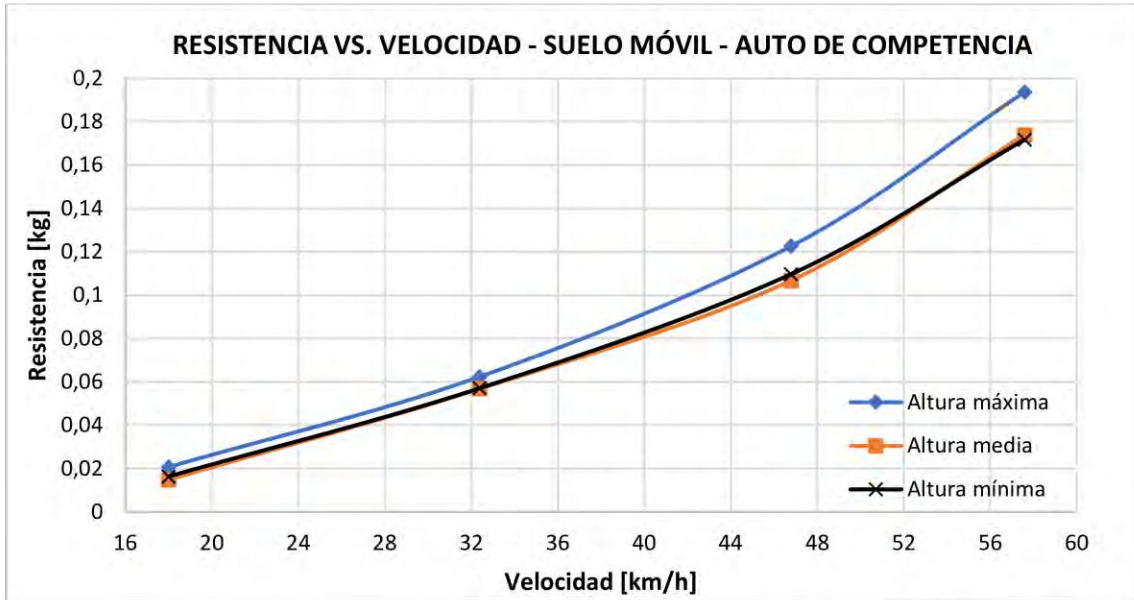
Gráfica 8. Resistencia vs. Velocidad - Suelo móvil - Auto de serie



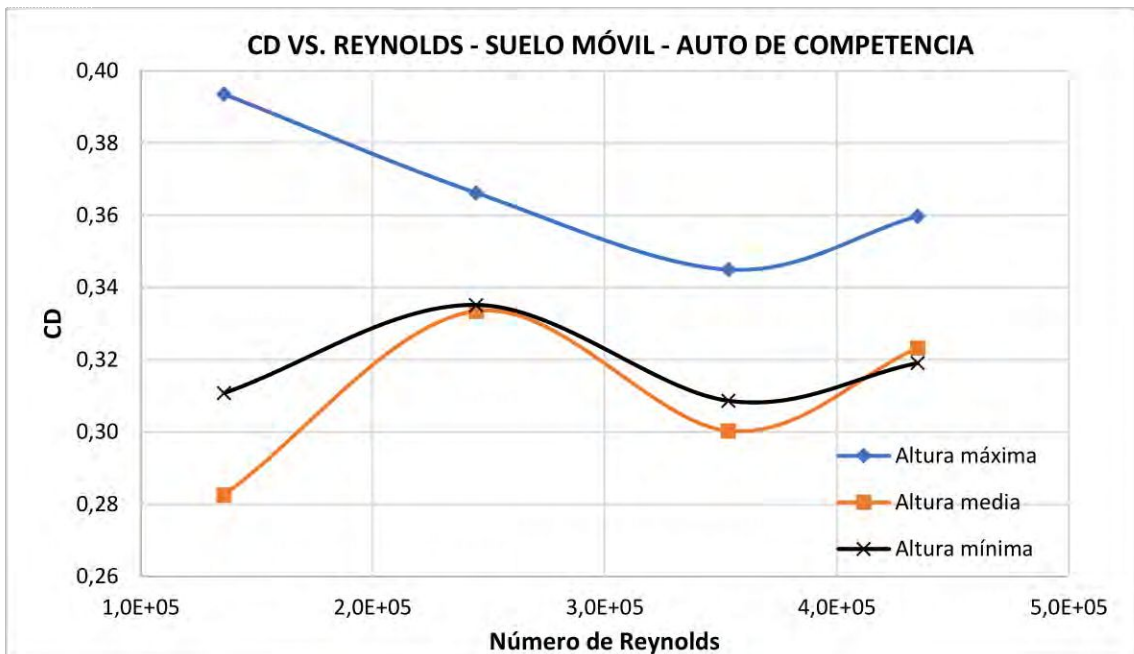
Gráfica 9. C_D vs. Re - Suelo móvil - Auto de serie

12.1.2.2. Automóvil de competencia

Se realiza el mismo procedimiento y se exponen datos de fuerza y C_D en función de la velocidad.

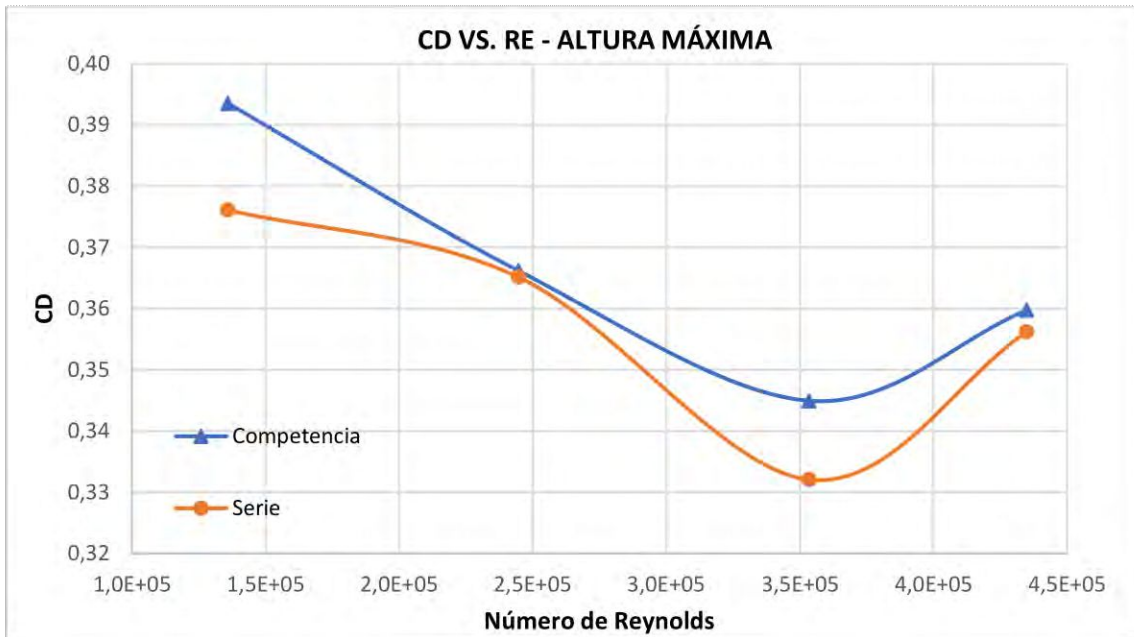


Gráfica 10. Resistencia vs. Velocidad - Suelo móvil - Auto de competencia

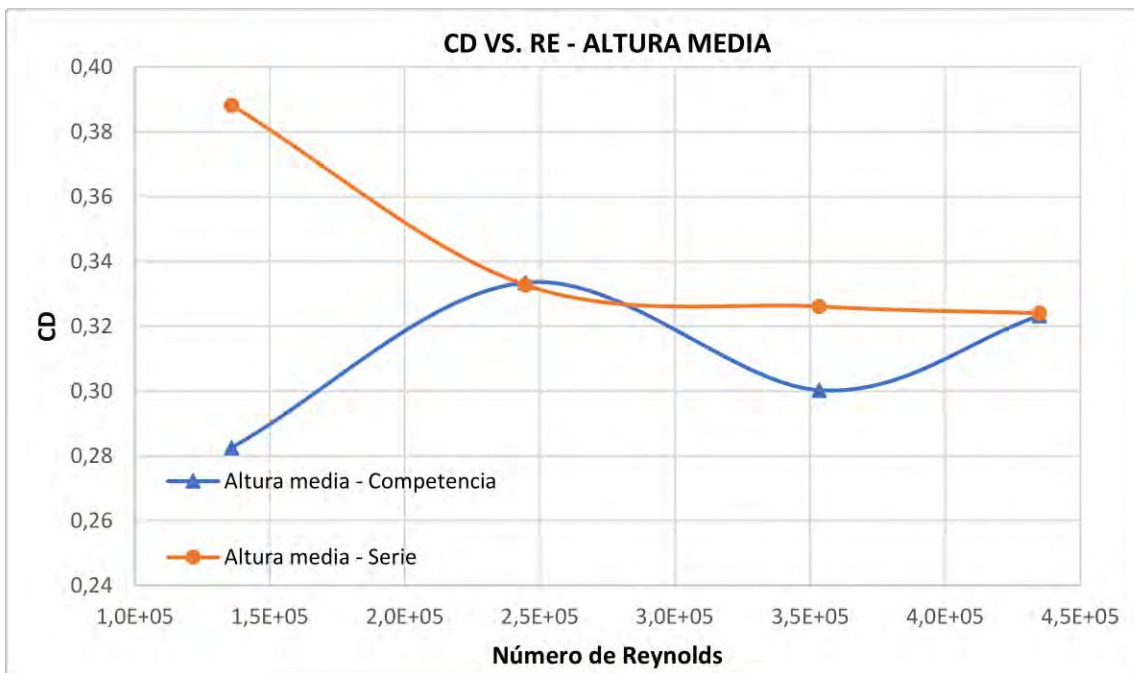


Gráfica 11. C_D vs. Re - Suelo móvil - Auto de competencia

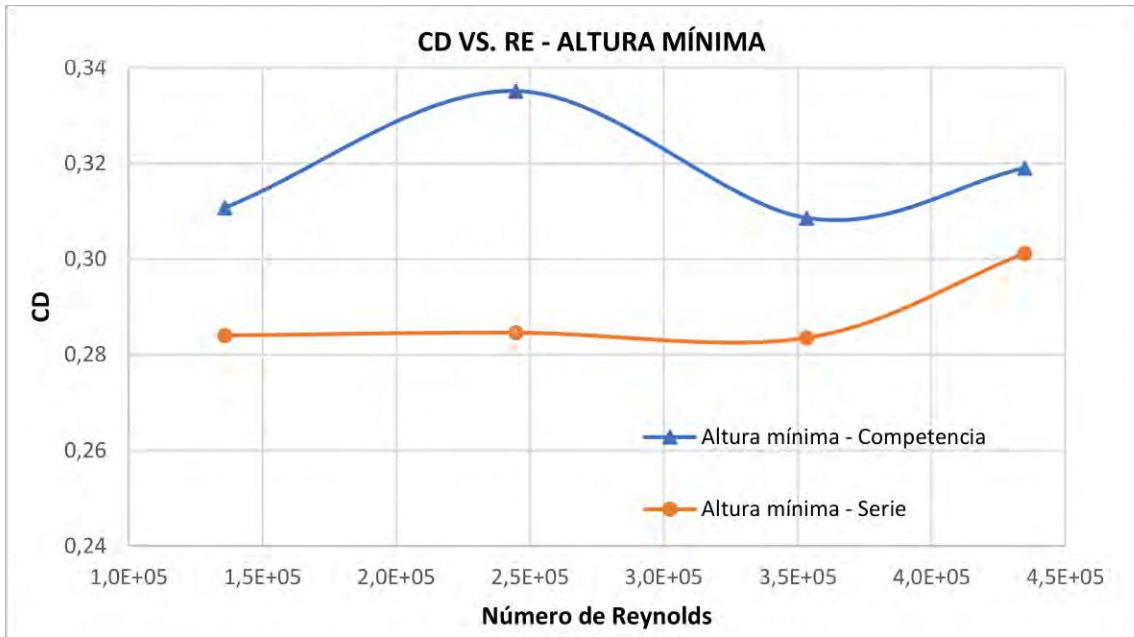
Se realizan comparativas entre configuraciones de serie y competencia.



Gráfica 12. C_D vs. Re - Altura máxima



Gráfica 13. C_D vs. Re - Altura media

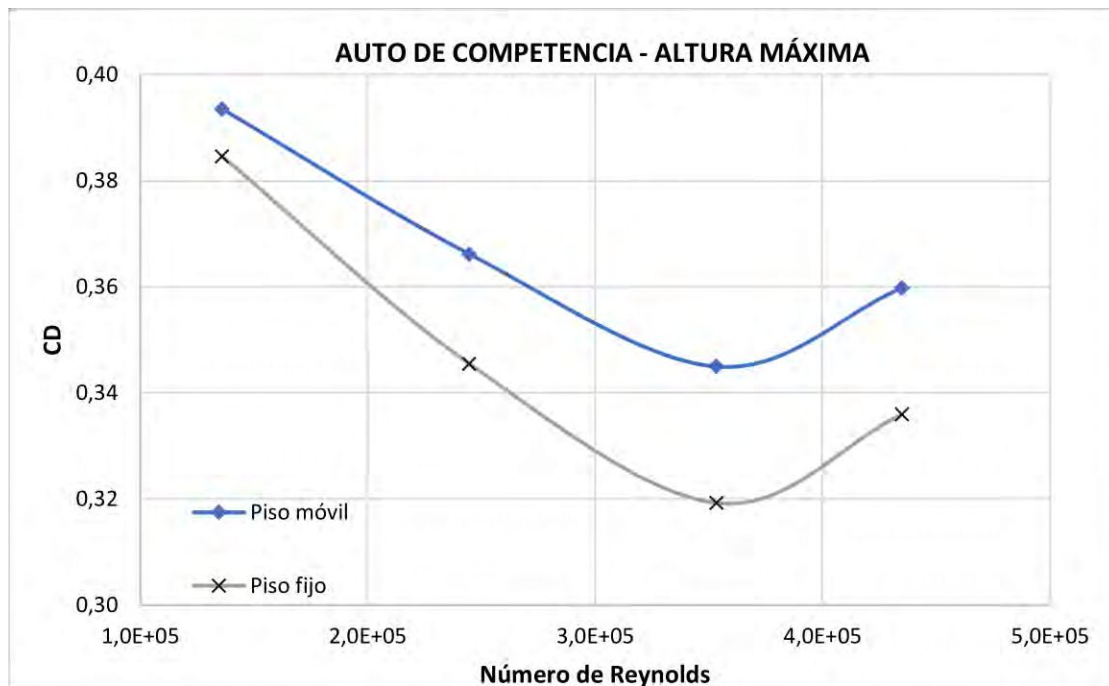


Gráfica 14. C_D vs. Re - Altura mínima

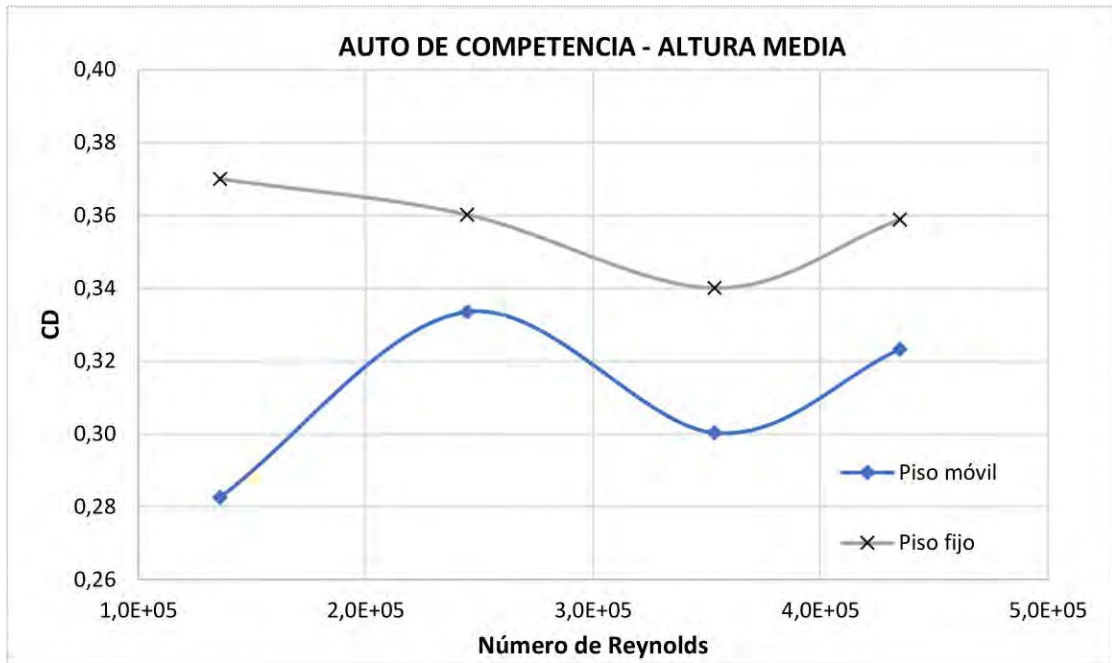
12.1.3. Comparación entre ensayos con suelo fijo y móvil

Se concluye el análisis experimental con la comparativa de C_D entre configuración de suelo fijo y móvil con / sin la utilización de dispositivos aerodinámicos.

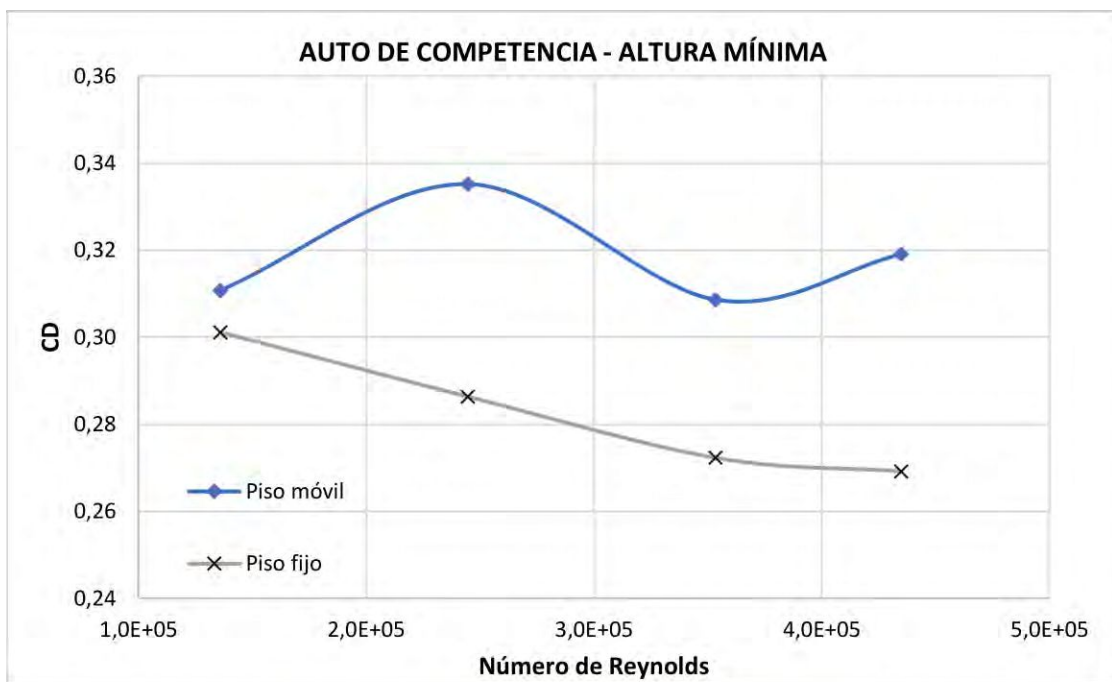
Automóvil de competencia



Gráfica 15. C_D vs. Re - Auto de competencia - Altura máxima

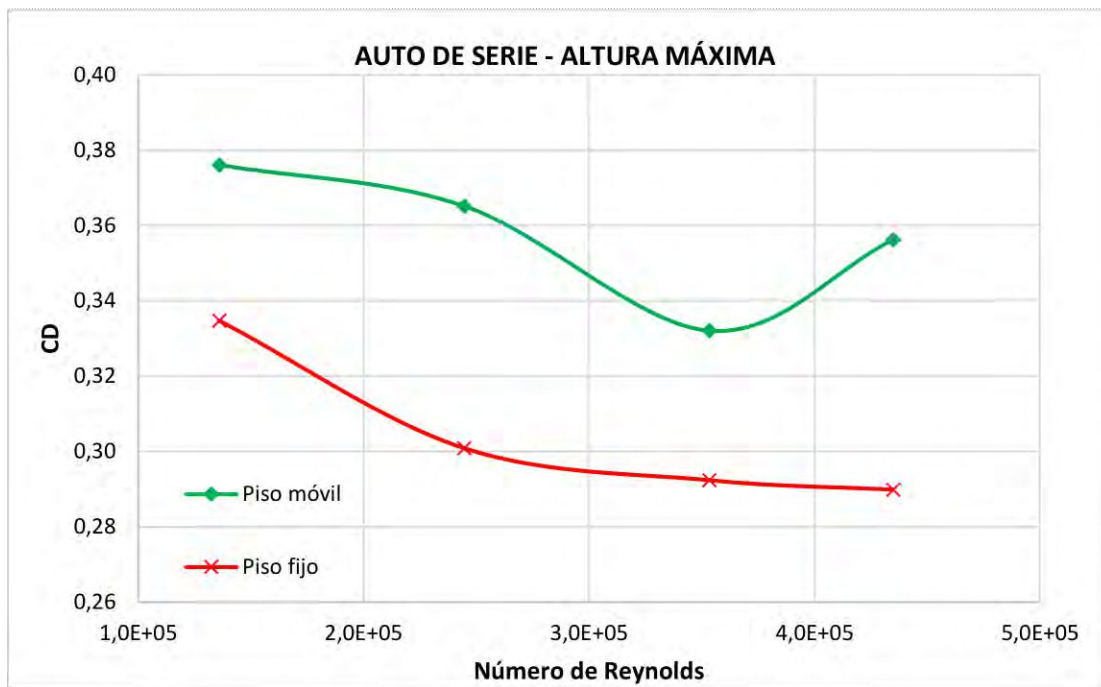


Gráfica 16. C_D vs. Re - Auto de competencia - Altura media

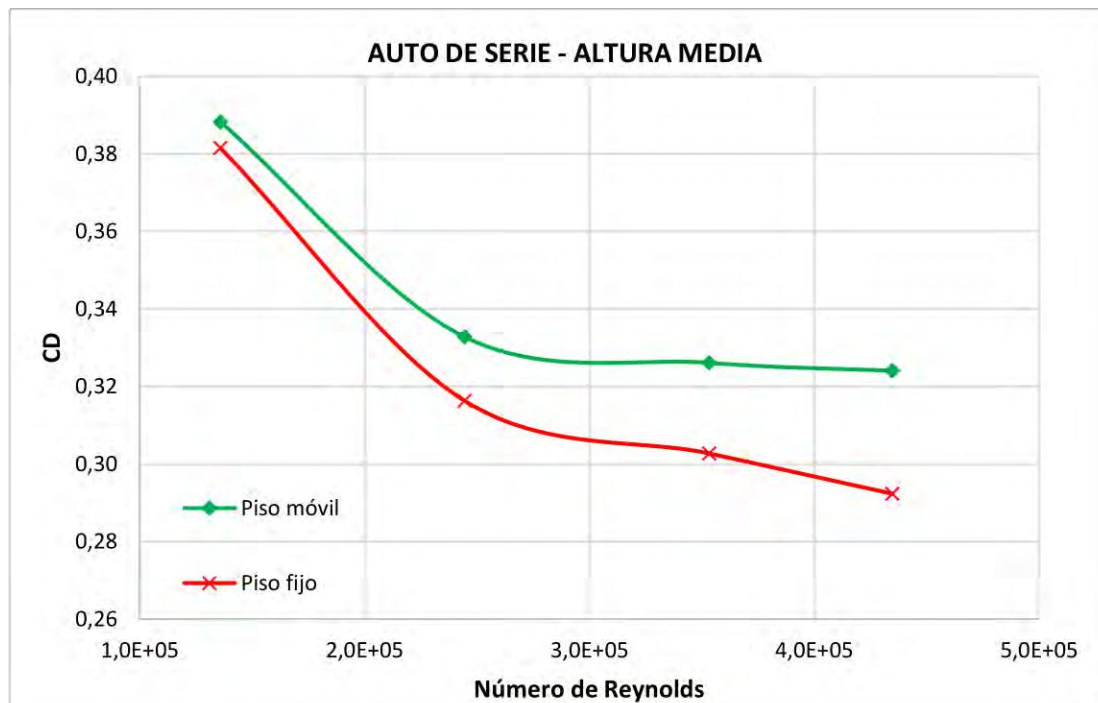


Gráfica 17. C_D vs. Re - Auto de competencia - Altura mínima

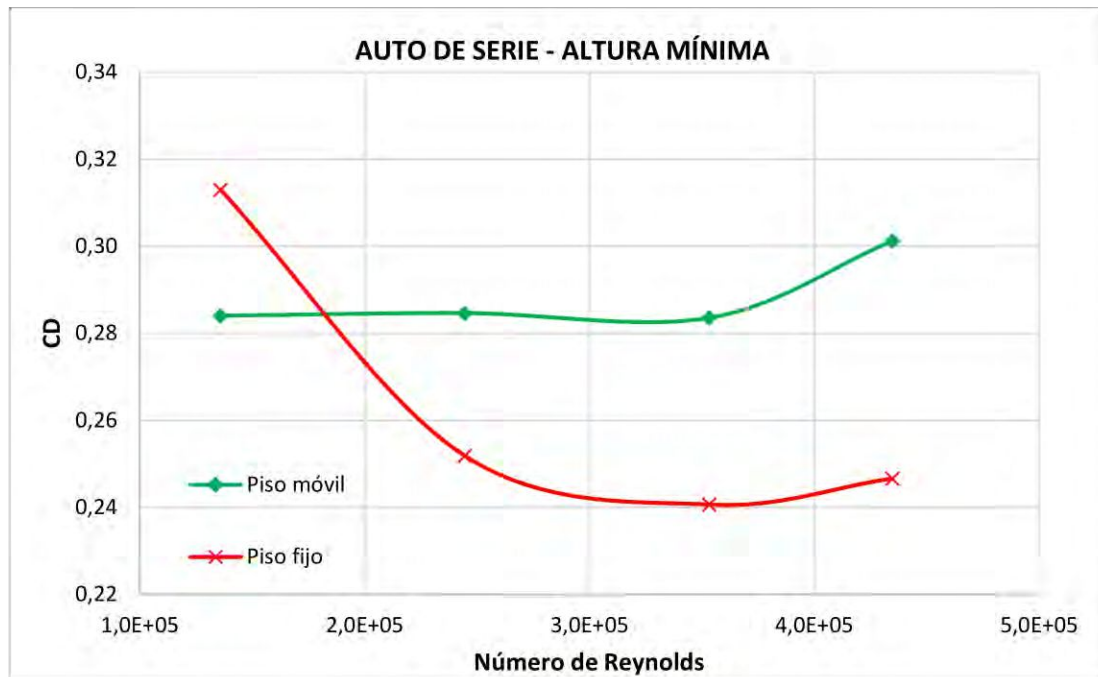
Automóvil de serie



Gráfica 18. C_D vs. Re - Auto de serie - Altura máxima



Gráfica 19. C_D vs. Re - Auto de serie - Altura media



Gráfica 20. C_D vs. Re - Auto de serie - Altura mínima

Se expone la tabla de resultados resumen de C_D en condición de velocidad máxima (16 m/s) para todas las condiciones de ensayo.

	C_D			
	PISO FIJO		PISO MÓVIL	
ALTURA	SERIE	COMPETENCIA	SERIE	COMPETENCIA
Máxima	0,29	0,34	0,36	0,36
Media	0,29	0,36	0,32	0,32
Mínima	0,25	0,27	0,30	0,32

Tabla 7. Tabla resumen - C_D

Valores de referencia

Se extraen datos bibliográficos de coeficientes de resistencia para modelos de serie similares al Toyota Corolla.

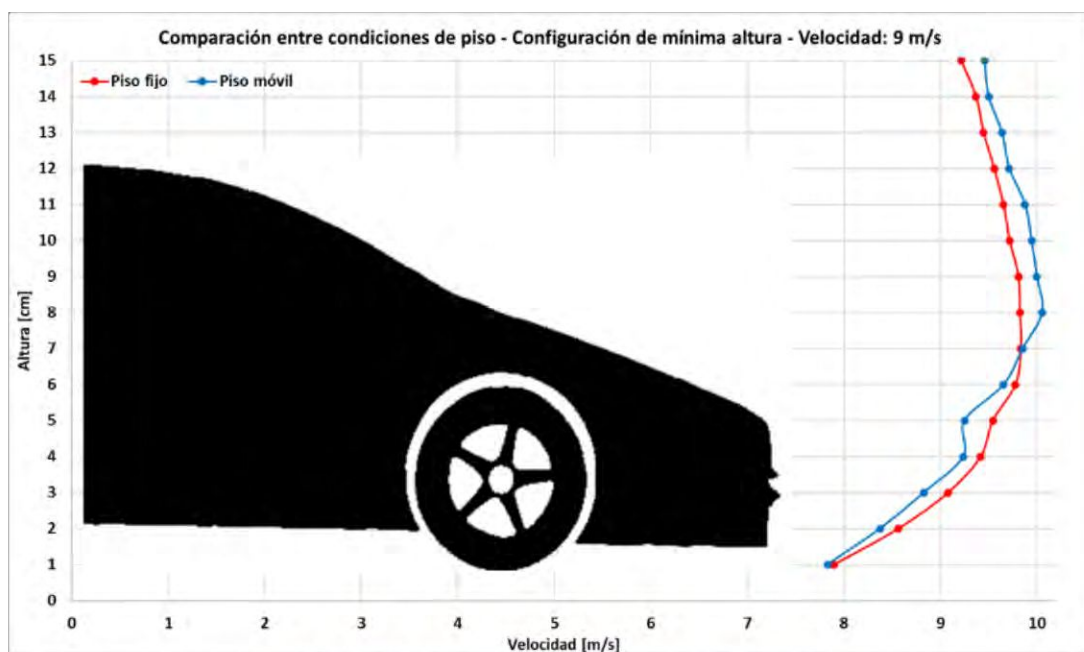
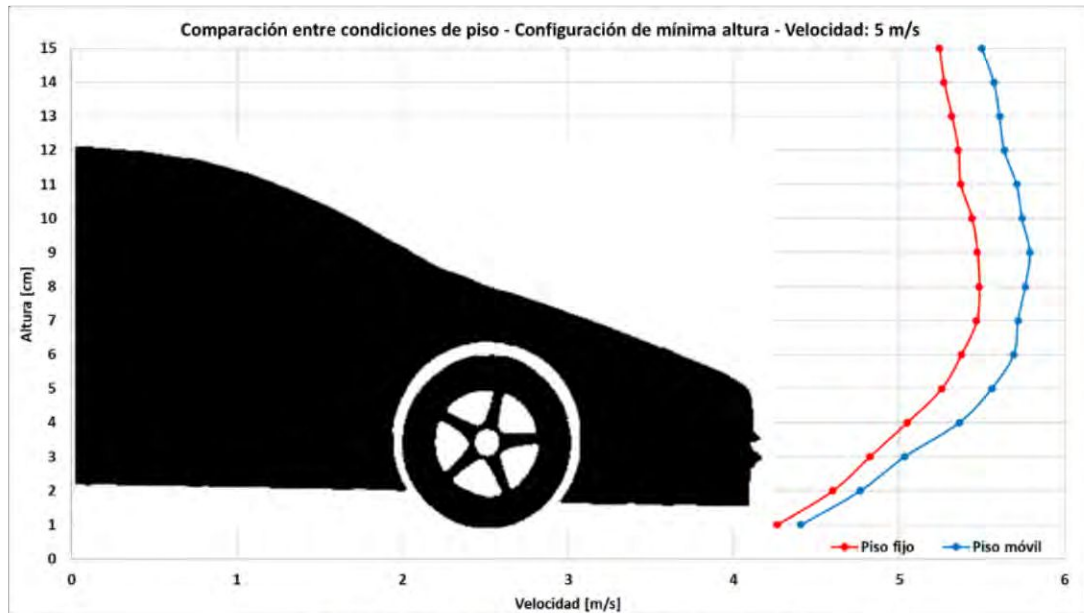
MODELO	C_D
Opel Rekord 1973	0.47
Peugeot 305 GL 1980	0.44

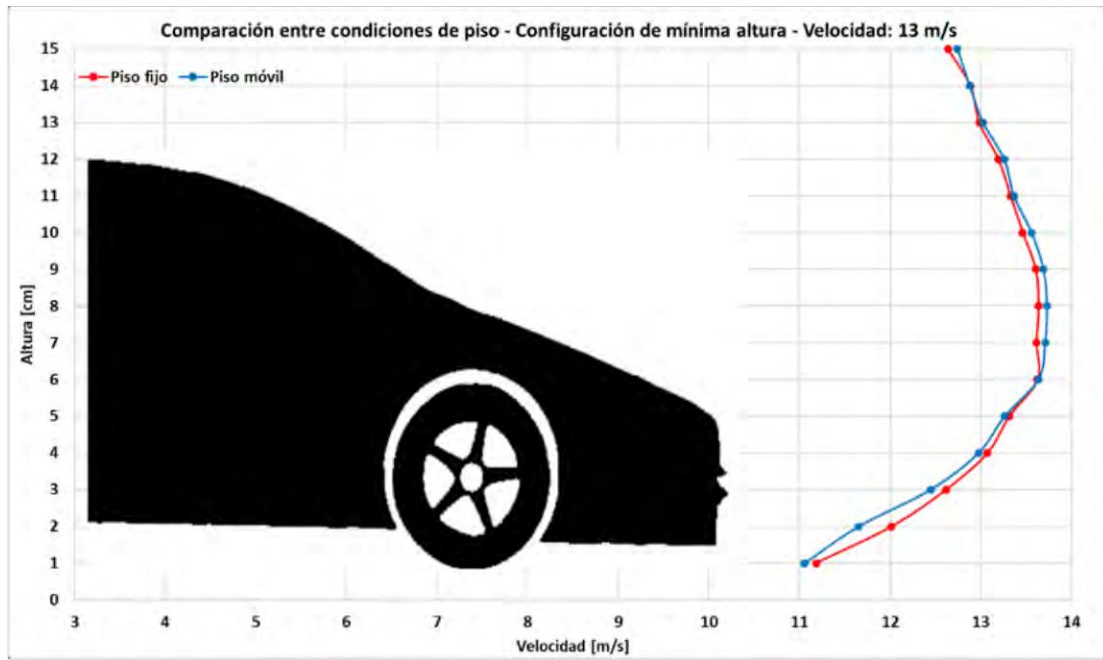
Subaru XT 1986	0.31
VW Passat CL	0.37
Toyota Camry GLi	0.39
Mitsubishi Lancer 1500 GLX	0.41

Tabla 8. C_D de referencia

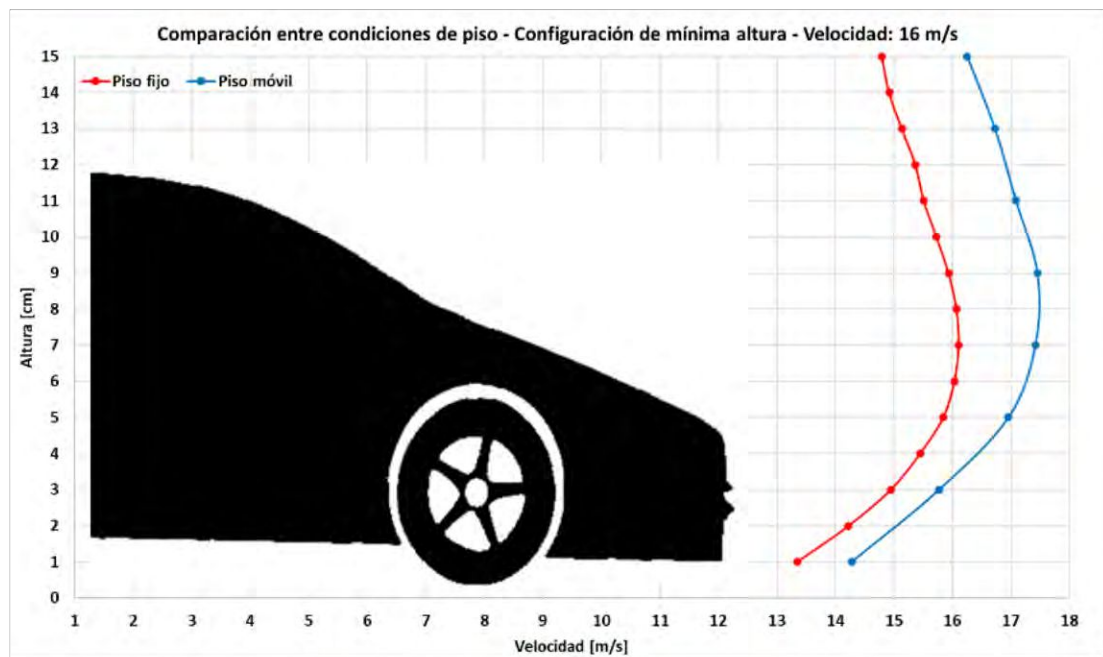
12.2. Anemometría

Se detalla la comparativa de los perfiles de velocidades para cada condición de piso y velocidades de ensayo con el modelo ubicado a 2 centímetros respecto del suelo desde el plano de referencia. Para las demás alturas el perfil de velocidades se mantiene.





Gráfica 23. Anemometría - Altura mínima - V: 13 m/s



Gráfica 24. Anemometría - Altura mínima - V: 16 m/s

13. VISUALIZACIÓN POR HUMO

13.1. Configuración de competencia

El primer ensayo consiste en la visualización de las trazas de humo con velocidad de 4 m/s sobre el modelo con la utilización de todos los dispositivos aerodinámicos.

La corriente de flujo que se mueve sobre el contorno superior del modelo se adhiere y sigue la silueta de la trompa del auto cuando entran en contacto luego de pasar sobre el punto de remanso.

Previo al parabrisas delantero se detecta una mínima recirculación (ref. Figura 76) y luego el flujo sigue la curvatura del techo hasta poco antes del comienzo del parabrisas trasero. A partir de esta zona el flujo no puede seguir el contorno y empieza el desprendimiento de la capa límite. El flujo se vuelve turbulento siguiendo un patrón de vórtices aleatorio hacia la parte posterior al alerón.

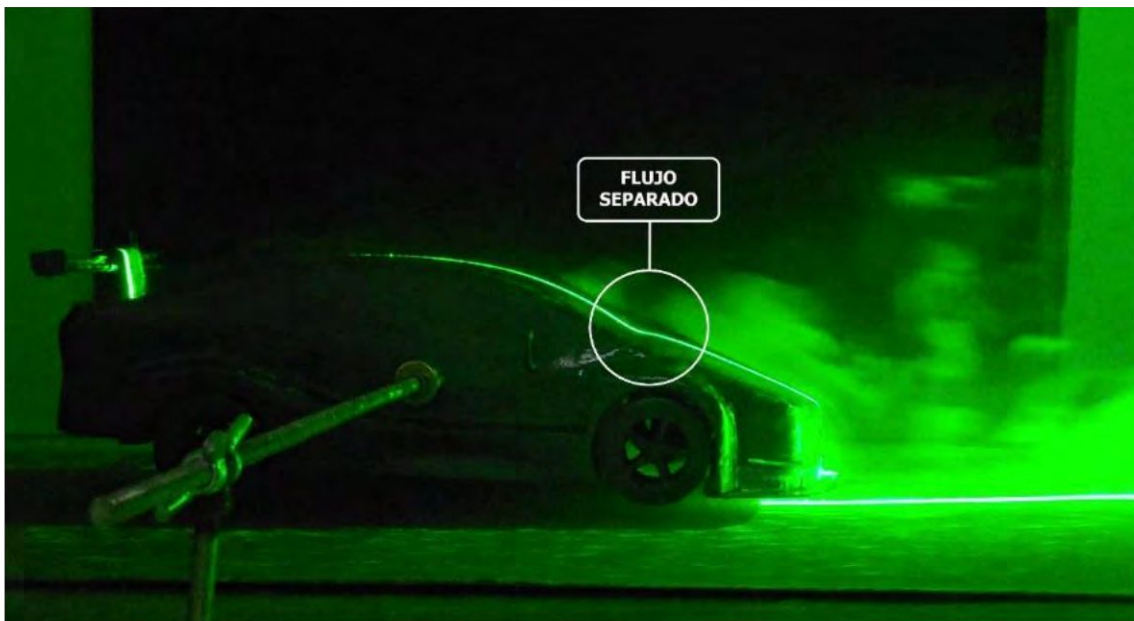


Figura 76. Flujo separado sobre el capó

Cuando el flujo incidente se encuentra con la trompa del vehículo, la corriente de aire diverge en dos direcciones, una de ellas es la parte superior del automóvil y la otra, el fondo inferior.

Aunque mediante fotografía se dificulta la visualización, en la grabación de video se puede distinguir fácilmente el punto de remanso. Se localiza en la siguiente figura derivado del análisis de la película.



Figura 77. Punto de remanso

En base a los lineamientos teóricos expuestos en la Sección 7.1, se pueden distinguir las zonas del vehículo donde el flujo se encuentra adherido o desprendido.

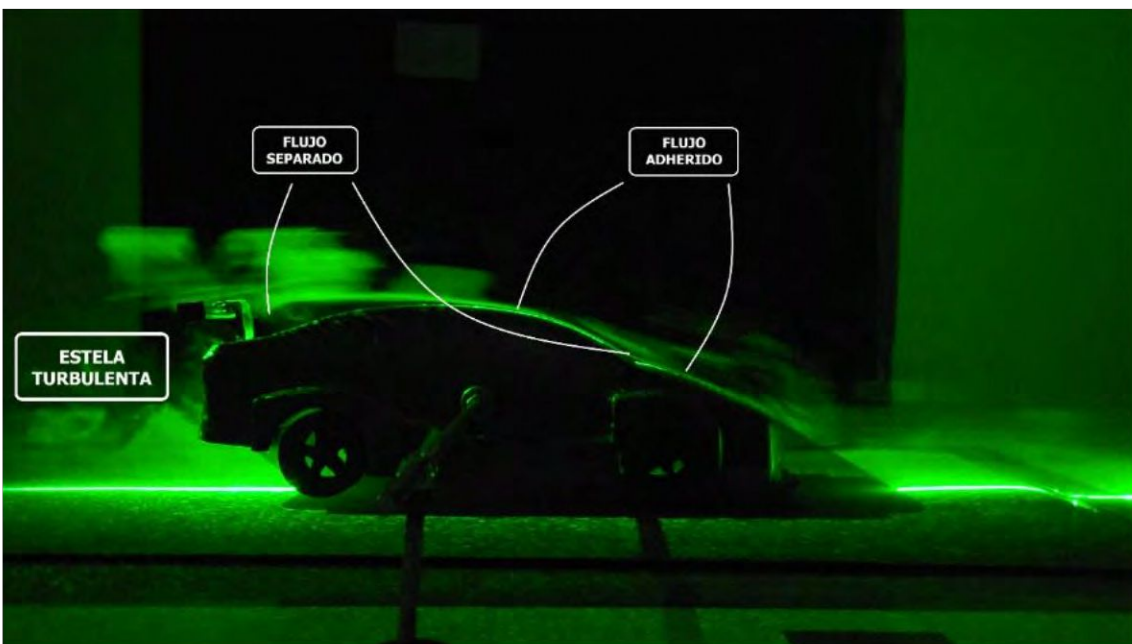
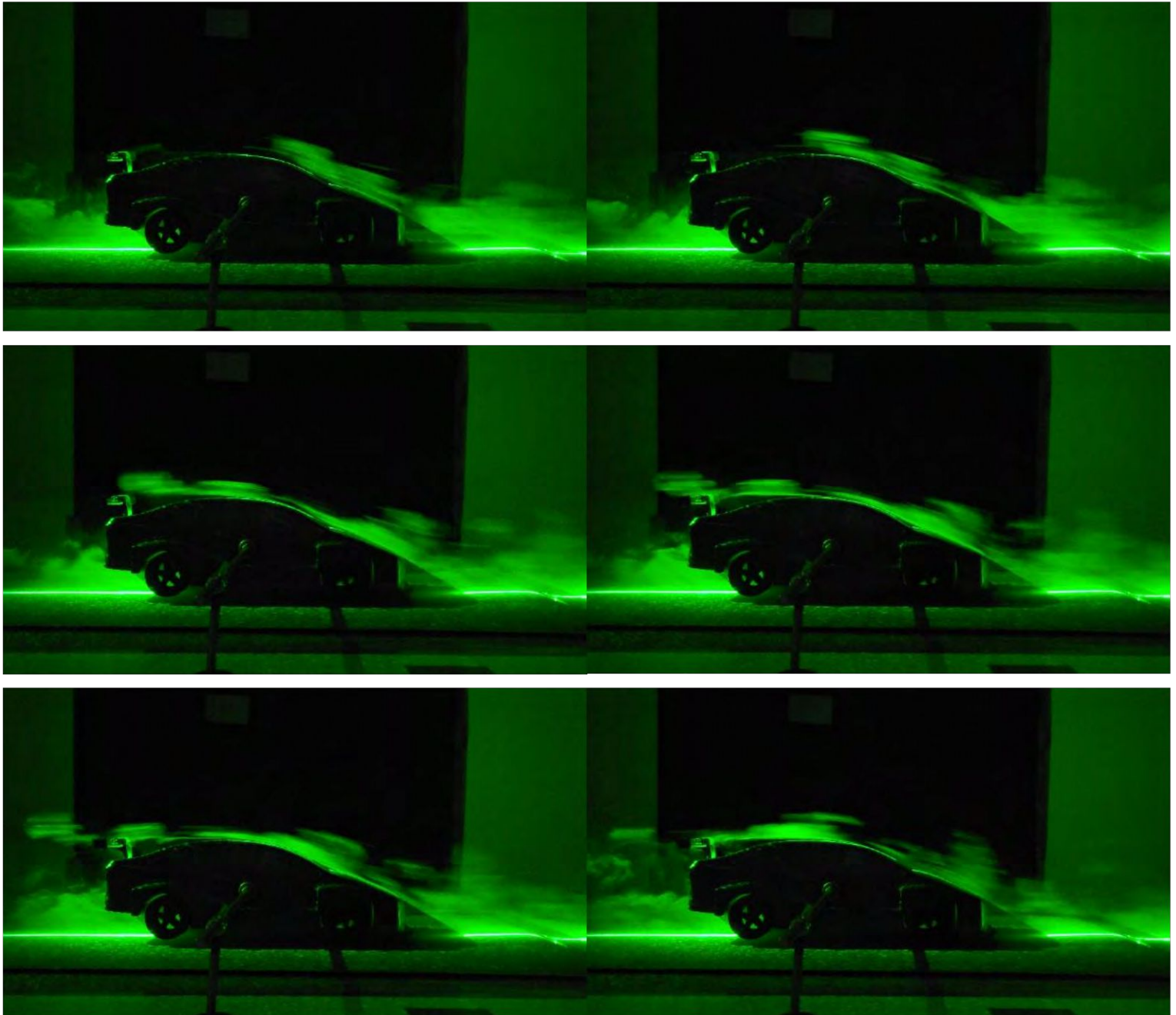


Figura 78. Flujo adherido / desprendido

Se enseña la secuencia fotográfica del ensayo realizado.





Al utilizar la cinta móvil a la misma velocidad que la corriente libre, se observan cambios en la estela turbulenta posterior al modelo. En este caso particular de ensayo, la corriente de aire inducida por el movimiento del suelo modifica la estela provocando que los vórtices de mayor magnitud se ubiquen aún más por detrás del modelo, y no sobre el baúl trasero como ocurría en el ensayo con suelo fijo.



Figura 79. Estela turbulenta con utilización de cinta móvil

13.2. Configuración de serie

El segundo ensayo se efectúa con las mismas condiciones de velocidad de la corriente libre, pero en este caso sin el uso de los dispositivos aerodinámicos.

En primera instancia, con el uso de la grabación de video, no se observa variación en la localización del punto de remanso en comparación con el auto de competencia.

Se identifican las zonas donde se tiene flujo adherido y separado.



Figura 80. Patrón de flujo sobre auto de serie

En la parte delantera, la capa límite sobre el capó conserva un patrón idéntico al automóvil de competición. Se halla la misma separación de flujo sobre el comienzo del parabrisas delantero.

La capa límite se desprende más atrás sobre el techo del modelo en comparación con el automóvil modificado. Se forman en conjunto de vórtices sobre el parabrisas trasero, provocando que el flujo no se desplace sobre la silueta del modelo, sino sobre el contorno los vórtices.

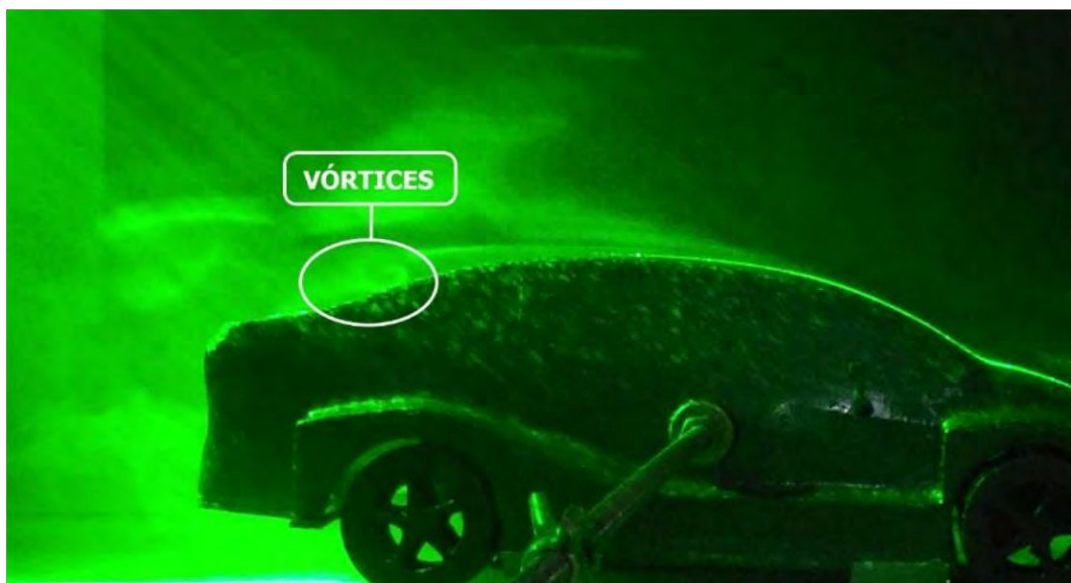


Figura 81. Vórtices sobre parabrisas trasero



Figura 82. Trayectoria del flujo en auto de serie

En cuanto a la estela turbulenta sobre el tren trasero, se visualizan vórtices de menor tamaño en la parte superior del baúl.

14. CONCLUSIÓN

Cargas de resistencia

- Suelo fijo

Tanto para la configuración de vehículo de serie y como de competencia, la tendencia del C_D es disminuir su valor a medida que se incrementa el número de Re .

El C_D obtenido con la implementación de los dispositivos aerodinámicos es más grande, para todos los casos, que el de la configuración de serie. Con esto se concluye que los dispositivos, diseñados para incrementar la sustentación negativa, incrementan el coeficiente de resistencia.

Con respecto a la variación de la altura, el comportamiento de ambas configuraciones es similar. En la posición más cercana al suelo se registran los mínimos valores de C_D , en cambio, en la posición más alta se observan valores mayores a los obtenidos en la posición más baja, y, finalmente, en la posición media los máximos valores de C_D . En esta última posición se hubiera esperado obtener valores de C_D que estén entre los obtenidos en la posición más baja y la más alta, sin embargo, se registraron los valores más grandes. Este comportamiento se debe a que en esa posición el impacto del efecto suelo es mayor que en las demás configuraciones. En la posición media se da una interacción entre capas límites, haciendo que el flujo tenga mayor velocidad, cuyo resultado se observa a través del máximo C_D entre las tres alturas posibles. Para la comprobación de esta tendencia se deberían realizar nuevamente los ensayos en la respectiva posición.

- Suelo móvil

En cuanto a la dependencia del C_D en función del Re el comportamiento difiere con el caso del suelo fijo, la tendencia es la de estabilizarse a un valor a medida que aumenta el Re .

La resistencia del modelo de competición sigue siendo mayor, para la mayoría de los casos, que el del modelo de serie.

Al incrementar la distancia con el piso, en el modelo de serie, la resistencia se incrementa. En este caso la posición media no registra el máximo valor de C_D . Para el modelo de competición, en las posiciones más baja y media, se tienen valores similares de C_D . Al pasar a la posición más alta se registran los máximos valores. En ambos

modelos se observa que el movimiento del piso disminuye el efecto suelo que se observa con el piso fijo en la posición media.

- Comparación entre piso fijo y móvil

Se evidencia que el coeficiente de resistencia es mayor con la utilización de la cinta ergonómica para ambas configuraciones aerodinámicas y para todo el rango de velocidades.

Anemometría

En función de los datos obtenidos mediante anemometría, se evidencia el impacto de la cinta móvil sobre el perfil de velocidades que incide sobre el modelo. La tendencia es desplazar el perfil, incrementando todos los valores de velocidad, con respecto a los medidos con el piso fijo. No se observan cambios en la pendiente o forma del perfil.

Trabajos a futuro

En concepto de proyectos a futuro se propone:

- La verificación de la variación del C_D con respecto a la altura al piso;
- Implementar una sujeción del modelo alternativa, de modo que se disminuya la perturbación hacia el eje trasero;
- Modificar el método de evaluación de cargas, de tal forma que se puedan incluir las fuerzas de sustentación;
- Incluir el efecto de las ruedas para verificar el efecto de la sustentación en cada configuración aerodinámica y de altura respecto al piso.

15. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aerodinámica del automóvil de competición, Simon McBeath.
- [2] Race Car Aerodynamics – Designing for Speed, Joseph Katz.
- [3] Problems of Ground Simulation in Automotive Aerodynamics, SAE Paper No. 68-0121, Detroit 1968.
- [4] Fundamentals of Aerodynamics, J. D. Anderson, Editorial Mc Graw-Hill.
- [5] Fluid Dynamic Drag, S. F Hoerner, Hoerner Fluid Dynamics.
- [6] Mecánica de los fluidos Quinta edición, Frank M. White, Editorial McGraw-Hill.
- [7] Apuntes de cátedra Aeronaves y vehículos espaciales, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.
- [8] Apuntes de cátedra Aerodinámica General I, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
- [9] Reglamento técnico Super TC 2000 – Campeonato Codasur 2020.

16. ANEXO

16.1. Marco teórico

16.1.1. Ecuación de Bernoulli

Se puede demostrar el origen de la ecuación antes mencionada en un tramo de una tubería, ignorando el efecto de la gravedad, ya que los puntos a tener en cuenta se encuentran sobre la misma línea de corriente, a la misma distancia respecto del eje “z” y orientando el eje “x” horizontal hacia el interior de la tubería.

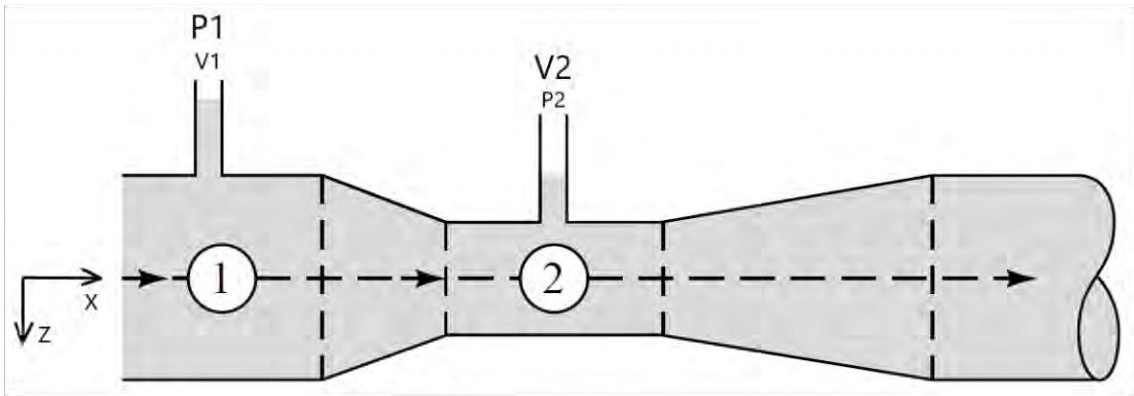


Figura 83. Flujo a través de tubería

Se define una fracción de fluido que se mueve a través de la tubería con un área de sección transversal “A”, la longitud de la fracción es dx , y el volumen de dicha fracción es $A dx$. Si la densidad es ρ , la masa de la fracción (m) se define como $m = \rho A dx$. El cambio en la presión sobre la distancia dx es dp y la velocidad del flujo $v = \frac{dx}{dt}$.

Aplicando la segunda ley de Newton (*Fuerza = masa * aceleración*) en su forma más simplificada, se puede observar que la fuerza efectiva en la fracción de fluido es $-A dp$. Si la presión disminuye a lo largo de la longitud de la tubería, dp es negativa, pero la fuerza que resulta en el flujo es positiva a lo largo del eje “x”.

$$m \frac{dv}{dt} = F$$
$$\rho A dx \frac{dv}{dt} = -A dp$$
$$\rho \frac{dv}{dt} = -A \frac{dp}{dx}$$

En flujo constante, el campo de velocidad es constante con respecto al tiempo, es decir $v = v(x) = v(x(t))$, por lo que la velocidad no es una función del tiempo. Únicamente, cuando la fracción de fluido se mueve a través de “x”, el área de la sección transversal cambia. Por lo tanto, la velocidad depende del tiempo solo a través de la posición de la sección transversal $x(t)$.

Aplicando propiedades matemáticas de la derivación:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} v$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \left(\frac{v^2}{2} \right)$$

Con densidad constante, la ecuación de movimiento se puede escribir como:

$$\frac{d}{dx} \left(\rho \frac{v^2}{2} + p \right) = 0$$

Integrando respecto a x :

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \text{constante}$$

Reagrupando términos se llega a:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constante}$$

Donde p es la presión estática y $\frac{1}{2} \rho v^2$ es la presión dinámica, siendo ésta formada por la densidad del fluido (ρ), en este caso el fluido es aire, y también, por la velocidad del flujo (v).

16.1.2. Efecto Venturi

El efecto Venturi se puede explicar teniendo en cuentas los conceptos del principio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa. Si el caudal de un fluido es constante pero la sección disminuye, necesariamente la velocidad aumenta tras atravesar esta sección. Por el teorema de la conservación de la energía mecánica, si la energía cinética aumenta, la energía determinada por el valor de la presión disminuye forzosamente.

El efecto Venturi, según la ecuación de Bernoulli, para dos puntos se define como:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Ecuación 10. Efecto Venturi

16.1.3. Principio de sustentación y resistencia

Como se ha mencionado, las fuerzas aerodinámicas provienen de esfuerzos de presión y fricción.

Para convertir una presión a una fuerza es necesario multiplicarlo por el área sobre la que la presión está actuando, debido a que:

$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área}}$$

Vectorialmente se puede expresar la fuerza aerodinámica como:

$$\vec{F} = - \int p \vec{n} dA + \int \vec{n} \tau dA$$

Donde el primer término representa los esfuerzos de presión, mientras que el segundo término representa los esfuerzos viscosos, ambos en términos de superficie.

En la sustentación, los esfuerzos de fricción son despreciables, sin embargo, en la resistencia, ambos esfuerzos en la dirección de la corriente son importantes.

Por lo tanto, las fuerzas de sustentación y resistencia se pueden expresar vectorialmente.

$$\vec{F}_D = - \int p \vec{n} dA + \int \vec{n} \tau dA$$

Ecuación 11. Fuerza de resistencia

$$\vec{F}_L = - \int p \vec{n} dA$$

Ecuación 12. Fuerza de sustentación

Los subíndices corresponden a Lift (Sustentación) y Drag (Resistencia) respectivamente.

La sustentación, estrictamente dependiente de los esfuerzos de presión, se calcula evaluando la fuerza resultante generada mediante las distribuciones de presiones en el extradós y en el intradós del perfil, despreciando el efecto de los esfuerzos viscosos.

La sustentación diferencial en un elemento del perfil viene dada por:

$$dL = (p_{int} ds_i) \cos(\theta_i) - (p_{ext} ds_e) \cos(\theta_e)$$

$$dL = (p_{int} - p_{ext}) dx$$

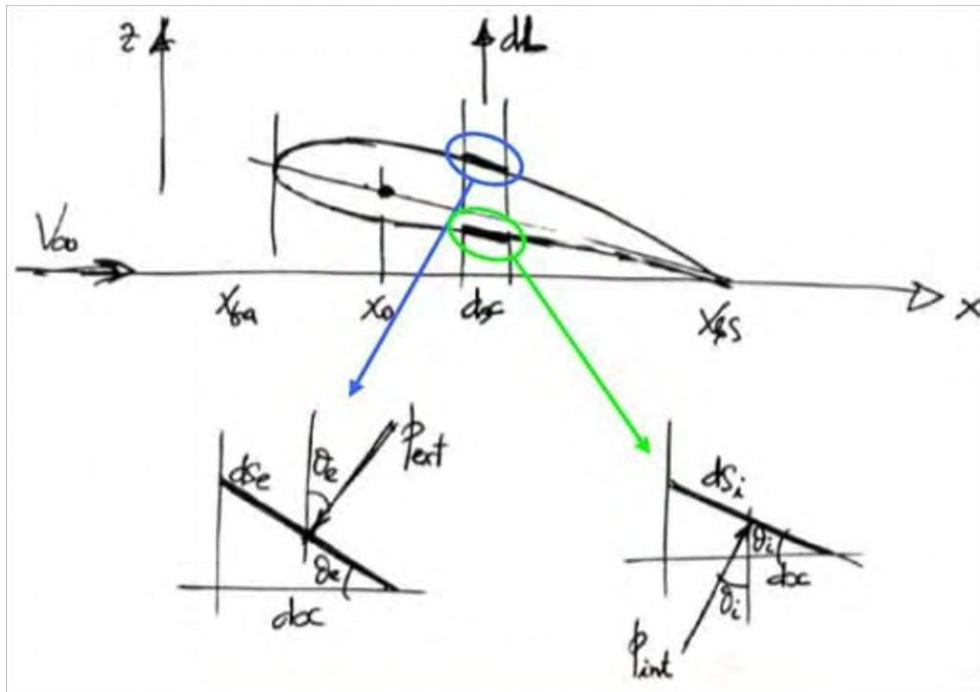


Figura 84. Análisis de sustentación en un diferencial de perfil alar

La sustentación total es la integral de dL entre las abscisas correspondientes a los bordes de ataque y de salida.

$$L = \int_{\text{Borde fuga}}^{\text{Borde ataque}} dL = \int_{Bf}^{Ba} [p_{int}(x) - p_{ext}(x)] dx$$

Ecuación 13. Sustentación en función de la presión

16.2. Reglamentación de la categoría Super TC 2000 de la República Argentina

De la regulación técnica vigente en el año 2020, se tendrán en consideración los siguientes aspectos:

Distancia entre ejes: Debe ser 2610 mm +/- 60 mm;

Ningún elemento del auto a excepción de sus ruedas debe situarse a menos de 60 mm de altura respecto al piso.

Centros de cubo de rueda virtual

Se definen los centros de cubo de rueda virtual como centros de posicionamiento de ruedas fijas con respecto al filo inferior delantero del patín.

Centro de cubo de rueda virtual delantero: Eje transversal al auto ubicado 237 mm por encima del plano inferior del patín y 492 mm por delante de su borde delantero;

Centro de cubo de rueda virtual trasero: Eje transversal al auto ubicado 174 mm por encima del plano inferior del patín y 2118 mm por detrás de su borde delantero.



Figura 85. Centros de cubo de rueda virtual

Splitter

Debe ser vinculado a la estructura del auto de manera rígida, sin poseer grados de libertad con respecto al resto de la carrocería. El plano de simetría del splitter debe coincidir con el plano de simetría del auto.

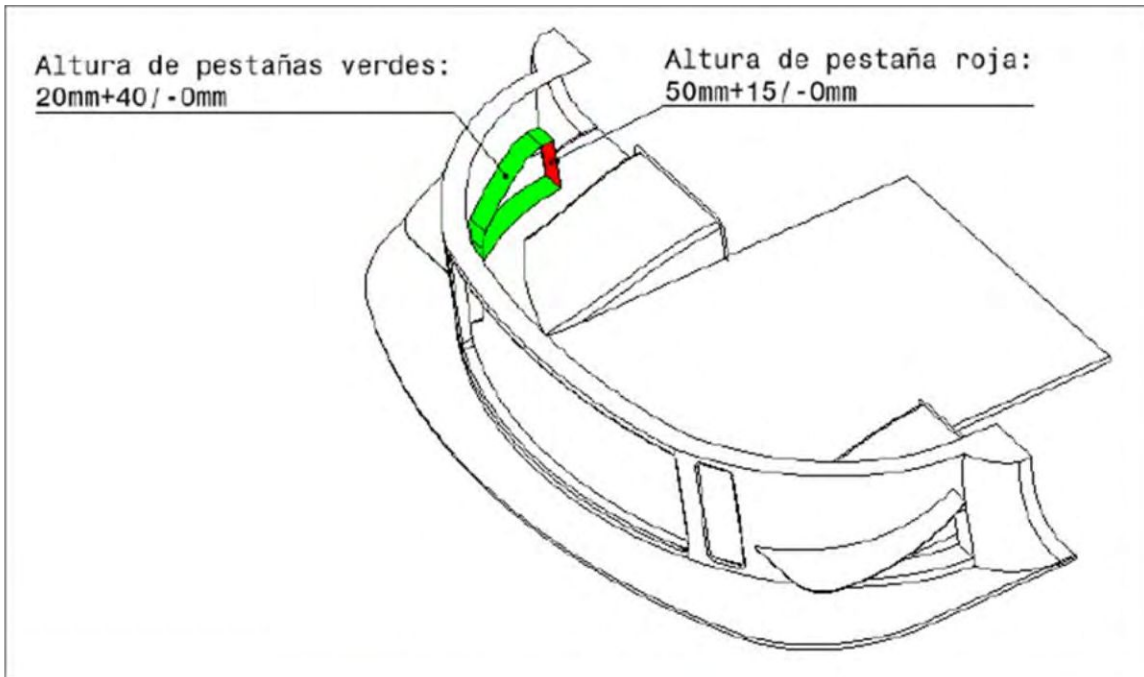


Figura 86. Trompa delantera del automóvil

Pontón

Las caras laterales del pontón deben ser paralelas al plano de simetría del auto y deben darle un ancho de 1900mm +/- 10mm en toda su extensión;

El plano inferior del pontón debe coincidir con el plano inferior del patín, con una tolerancia de +/- 3mm;

En sentido longitudinal, el filo superior delantero debe coincidir con un círculo de radio 365mm +/- 5mm concéntrico con el centro del cubo de rueda virtual delantero.

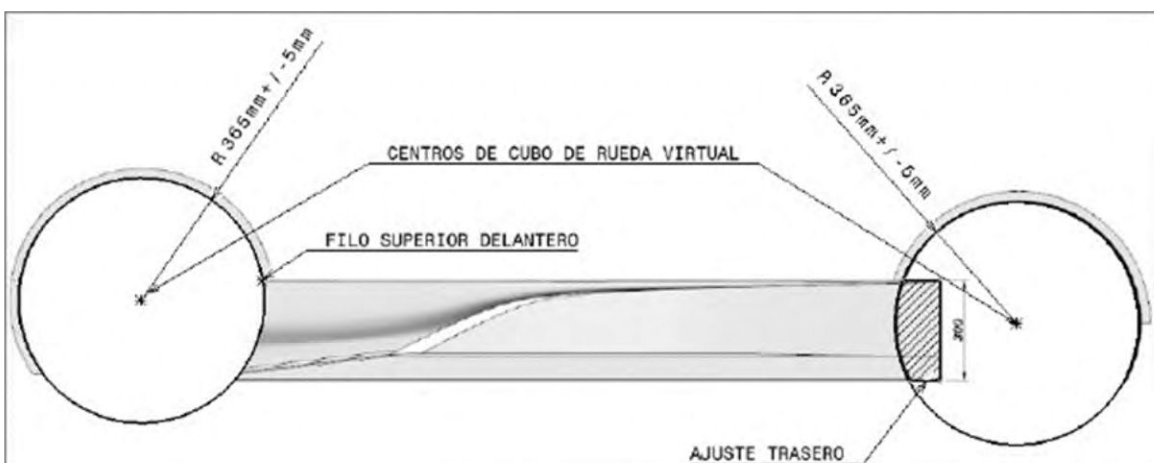


Figura 87. Pontón lateral

Extensión del guardabarros y paragolpes delantero

El límite superior es un arco de radio máximo de 475mm centrado longitudinalmente respecto del centro de cubo de rueda virtual delantero y tangente a un plano paralelo al plano del patín ubicado 681mm sobre éste;

En la parte central, el límite inferior es un arco de radio 395mm +/- 5mm que debe ser concéntrico con el centro de cubo de rueda virtual delantero con una tolerancia de 15 mm (con el guardabarros montado en el auto, la distancia entre el centro de este arco y el cubo de rueda virtual delantero puede ser de hasta 15 mm);

En su parte inferior trasera coincide con la cara superior del pontón. Su límite trasero es un plano perpendicular al plano del patín y perpendicular al plano de simetría del auto ubicado a 395mm detrás del centro del cubo de rueda virtual delantero.

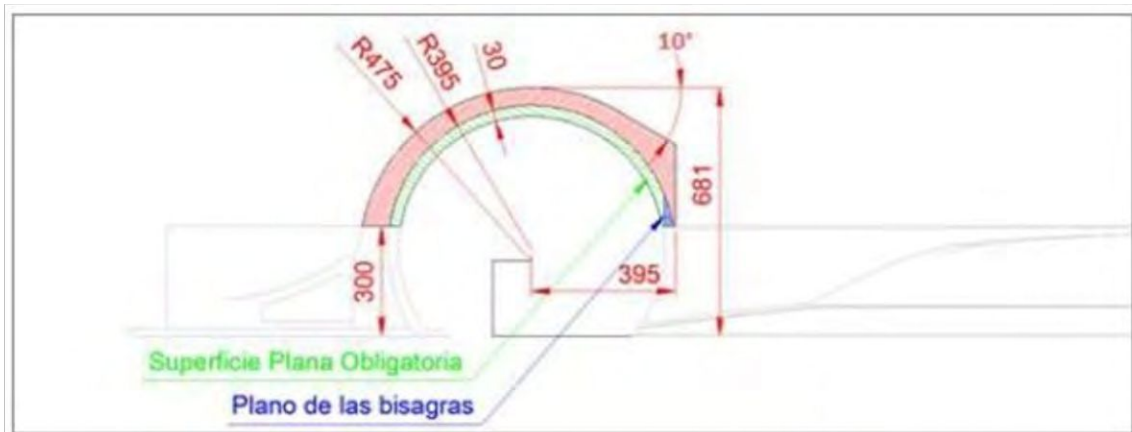


Figura 88. Configuración del guardabarros delantero

Extensión del guardabarros y paragolpes trasero

En su parte inferior delantera, el límite es la cara superior del pontón;

En su parte inferior central, el límite es un arco de radio 395mm;

En su parte inferior trasera, el límite es un plano paralelo al plano del patín ubicado a 190mm +/- 10mm sobre éste. Su límite trasero es un plano vertical, perpendicular al plano de simetría ubicado 500mm +/- 15mm detrás del centro del cubo de rueda real trasero.

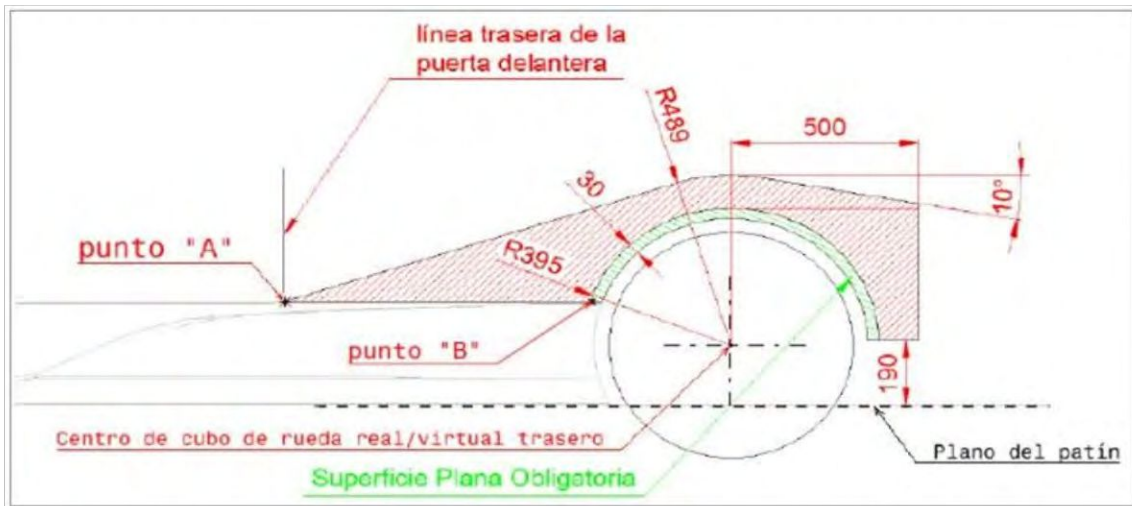


Figura 89. Configuración del guardabarros trasero

Alerón

Debe estar compuesto por uno o más perfiles, en los que la cuerda de al menos uno de ellos no debe ser inferior a 100mm;

Los perfiles deben ubicarse dentro de un rectángulo de 200mm de base por 150mm de altura;

Deben utilizarse placas laterales (derivadas laterales o endplates) rectangulares de 200mm de base por 150mm de altura y espesor máximo de 6mm, que cubran por completo los perfiles en una vista lateral del auto;

El ancho total del alerón (incluidas placas laterales) debe ser 1240mm + 5mm/ -30mm;

Los soportes deben ser placas planas y paralelas y de espesor máximo de 10mm.

A. Posicionamiento del alerón

Debe posicionarse tomando como referencia su borde de fuga y el filo inferior delantero del patín, según la siguiente definición:

3380mm +0/-20mm por detrás del filo inferior delantero del patín medidos en dirección paralela a este;

1180mm +0/-80mm por encima del plano inferior del patín, medidos en dirección perpendicular a este.

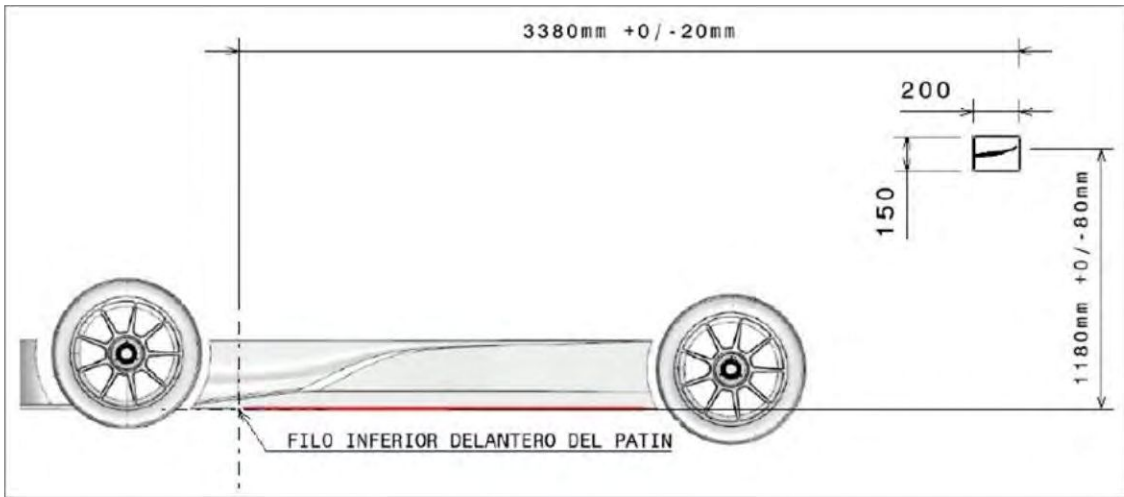


Figura 90. Ubicación del alerón

16.3. Perfiles aerodinámicos – FIA Fórmula 3

Se extrae información de los perfiles utilizados en el alerón trasero del Artículo 275 de las regulaciones técnicas aplicadas a la Fórmula 3.

Perfil superior

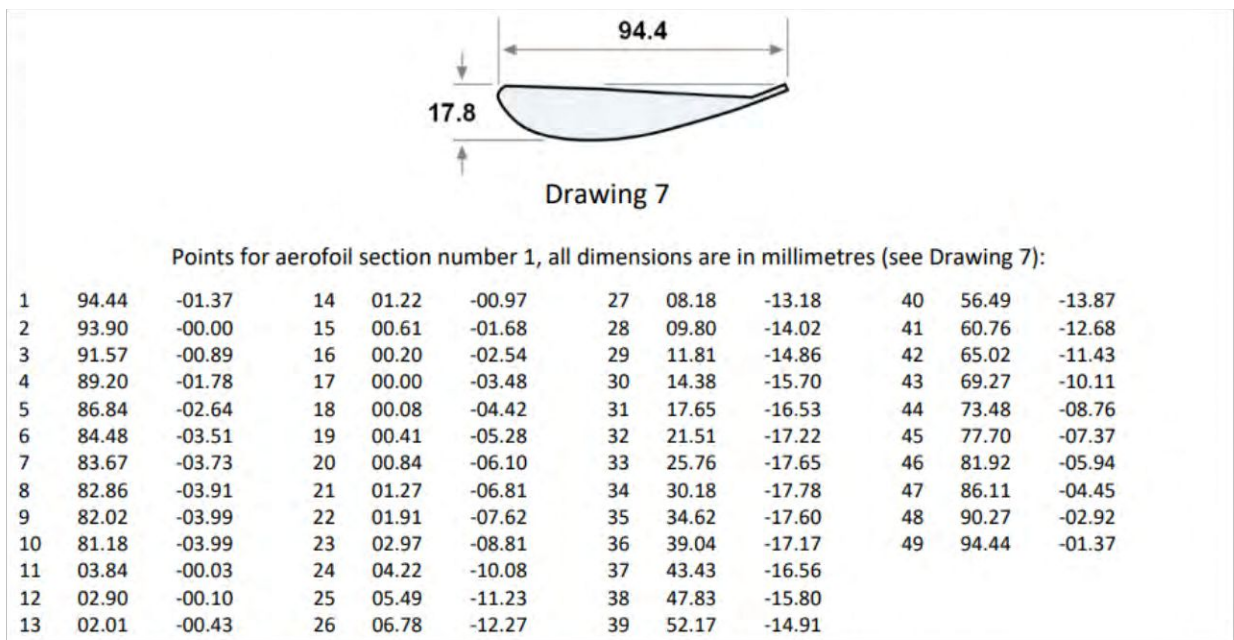


Figura 91. Coordenadas de perfil superior - F3 FIA

Perfil inferior

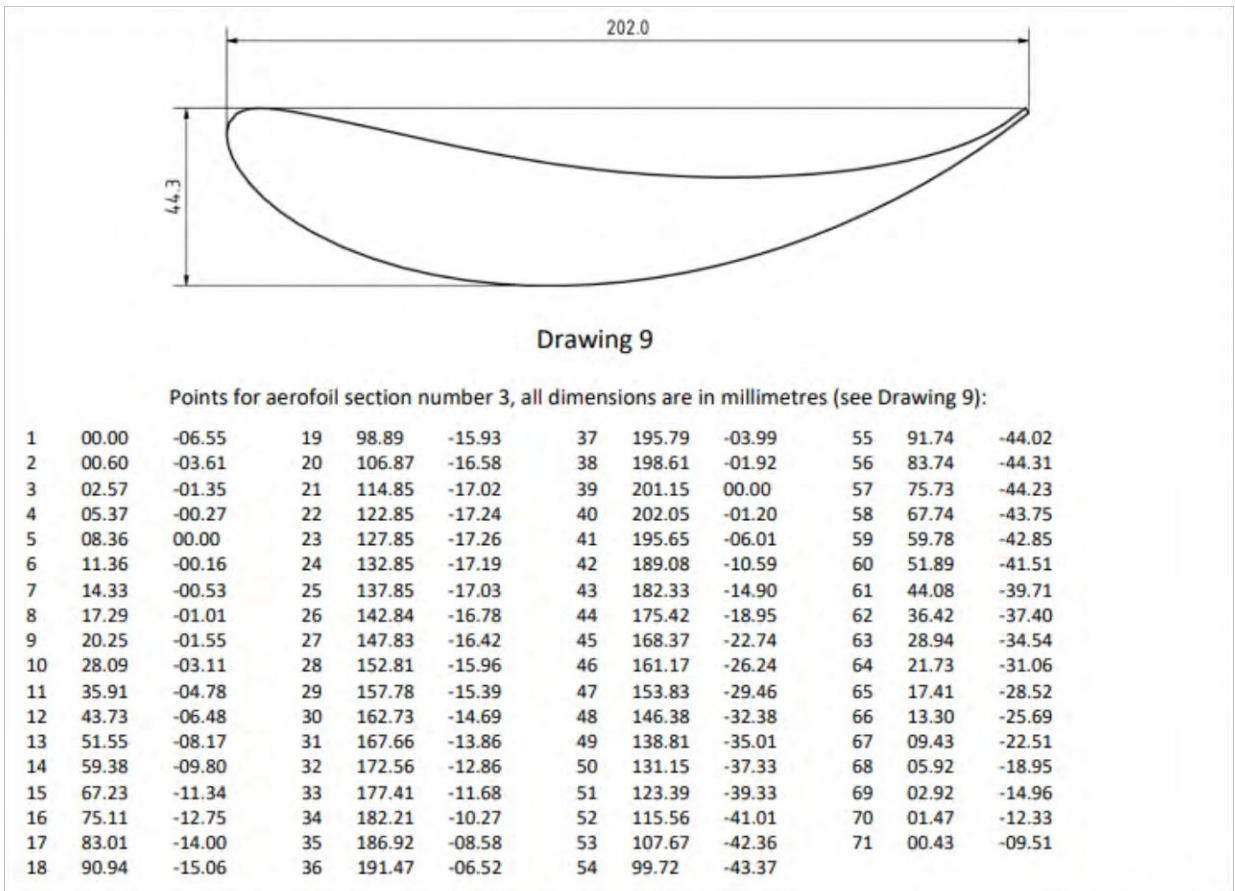
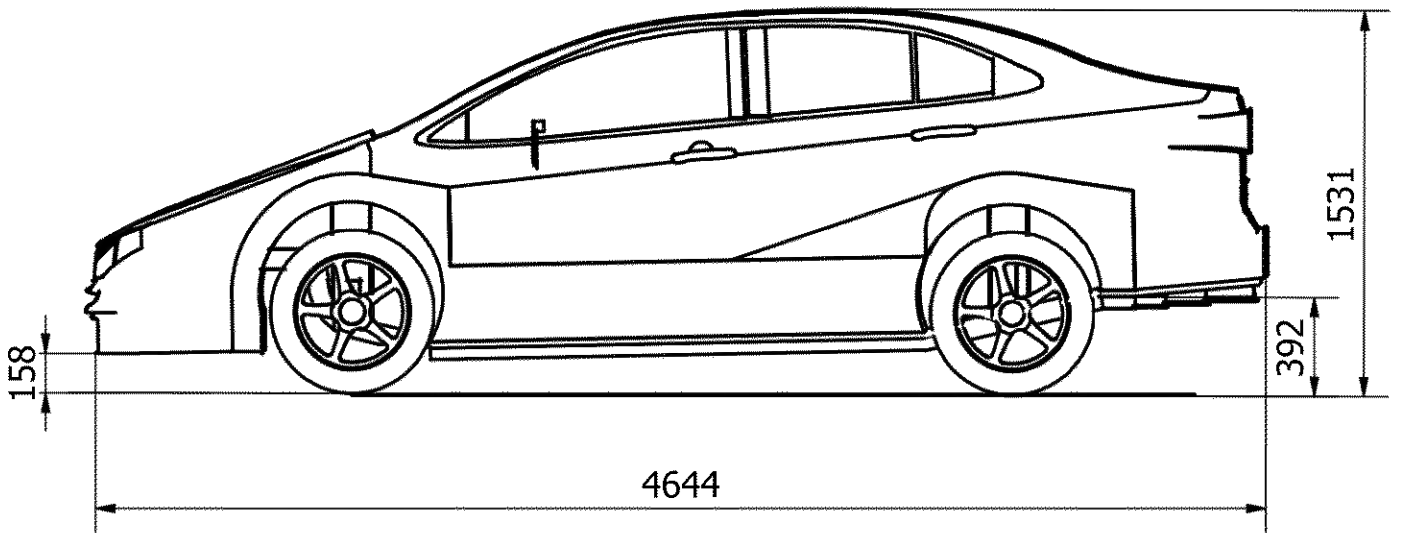
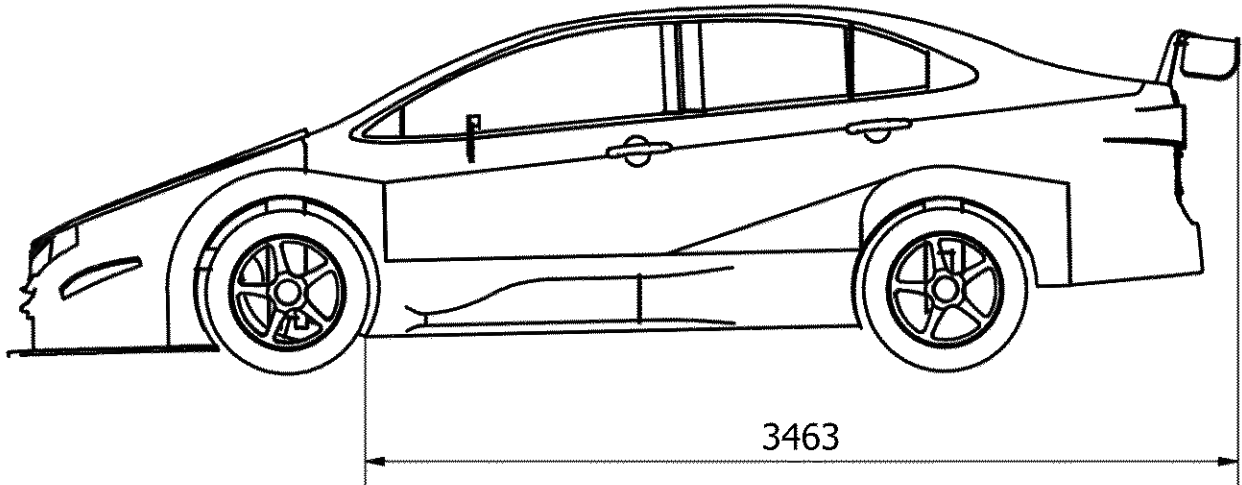
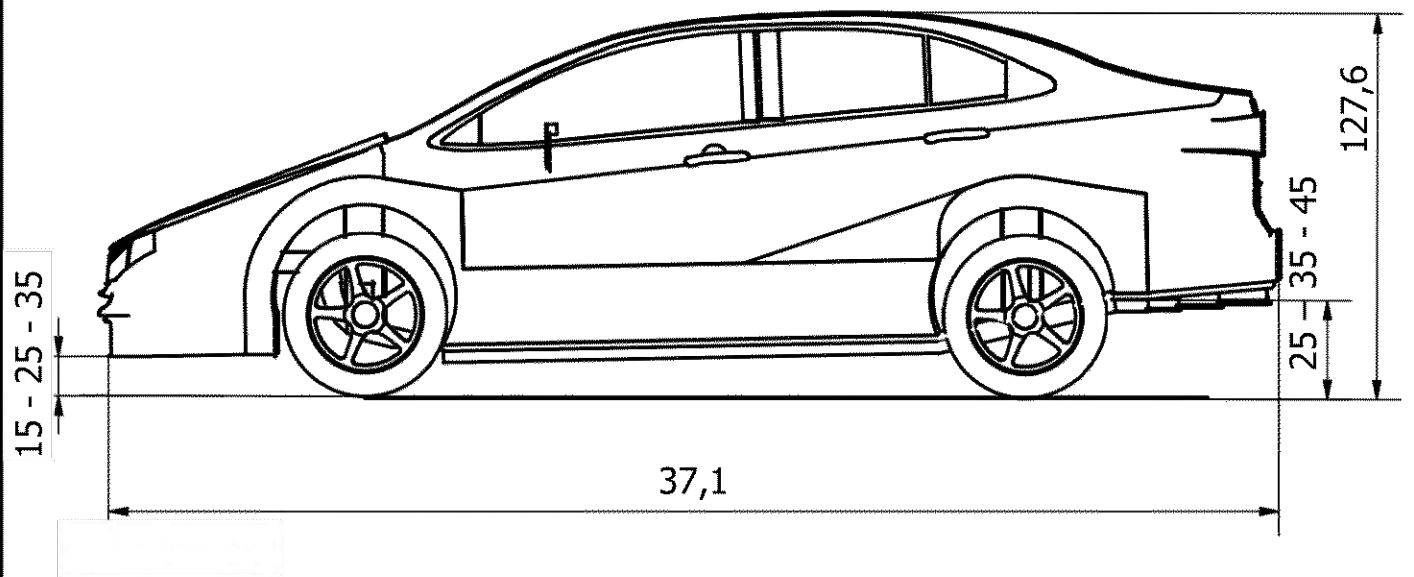
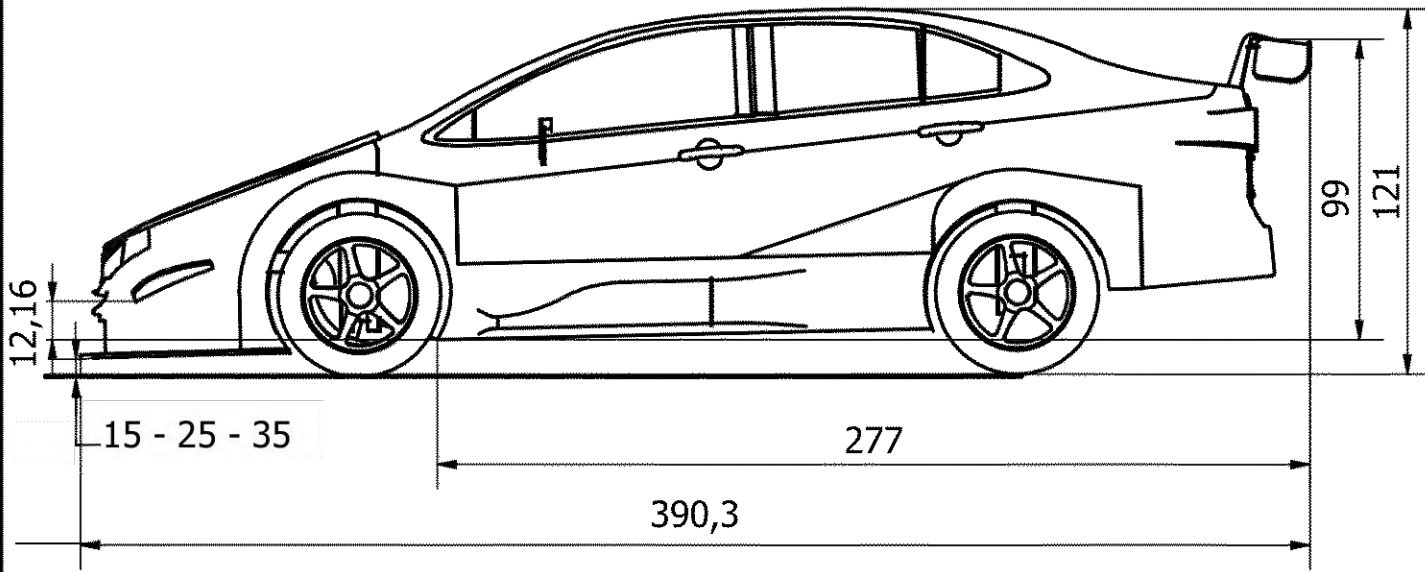


Figura 92. Coordenadas de perfil inferior - F3 FLA

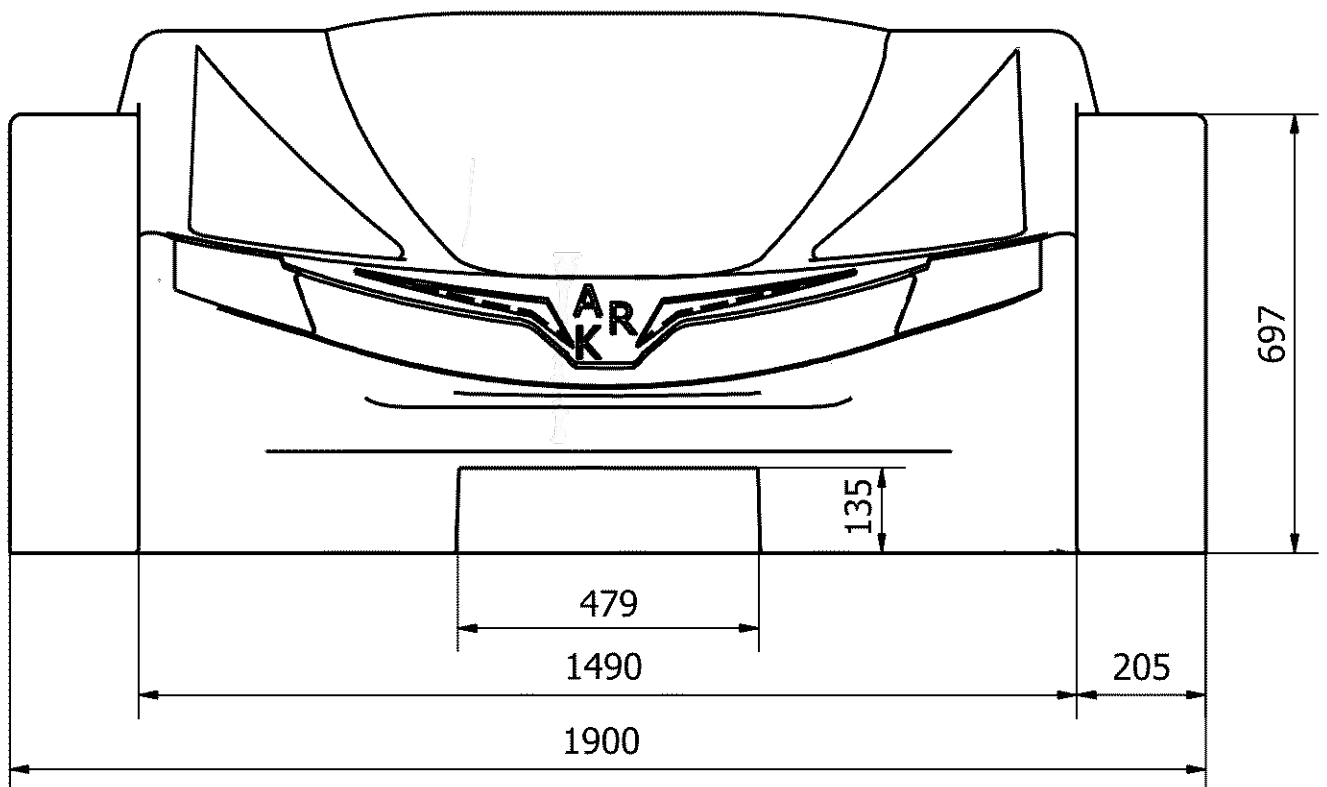
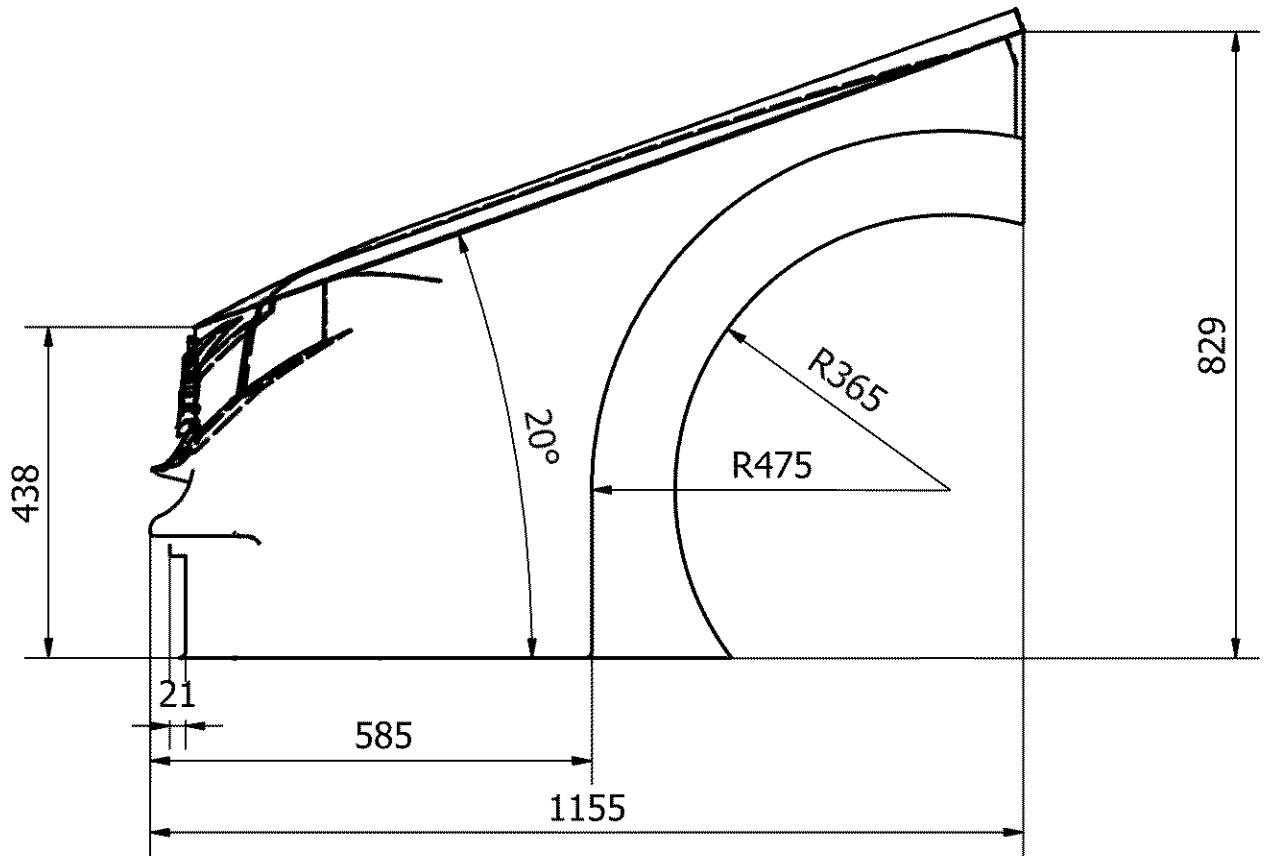
16.4. Planos



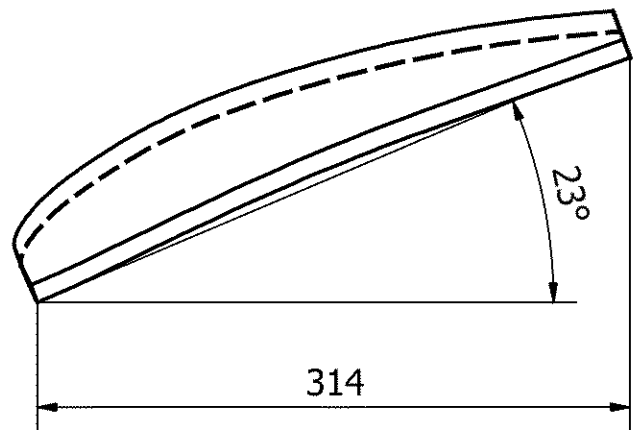
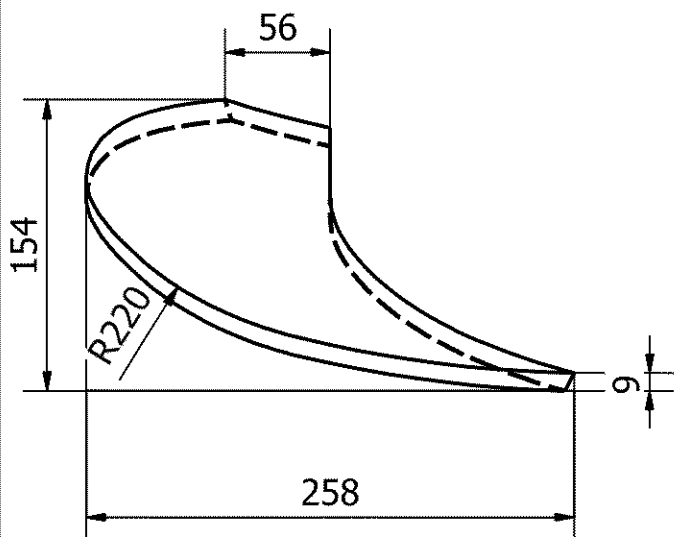
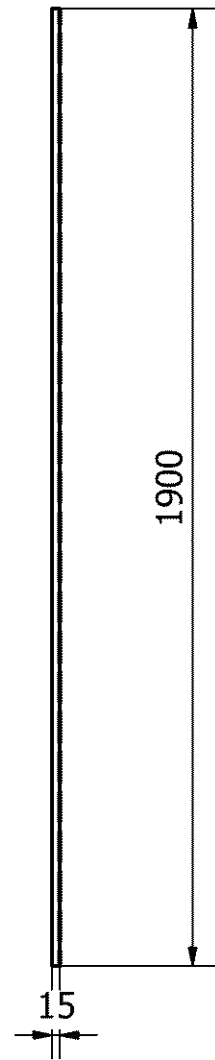
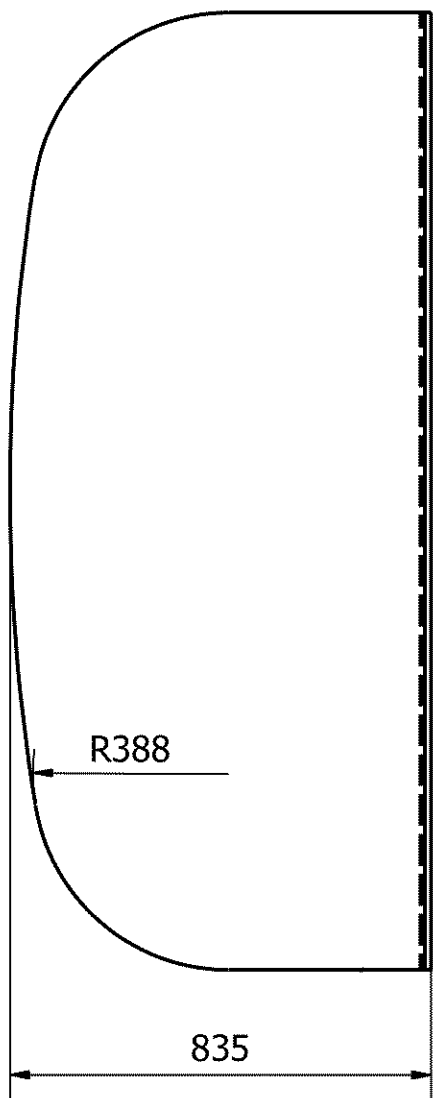
Autor: Risso Kalyna, Agustín	Director: Ing. Mantelli, Pablo	Escala: 1:1
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA	FACULTAD DE INGENIERÍA	
	Comparación Súper TC 2000 y auto de calle	Hoja: 102 / 113



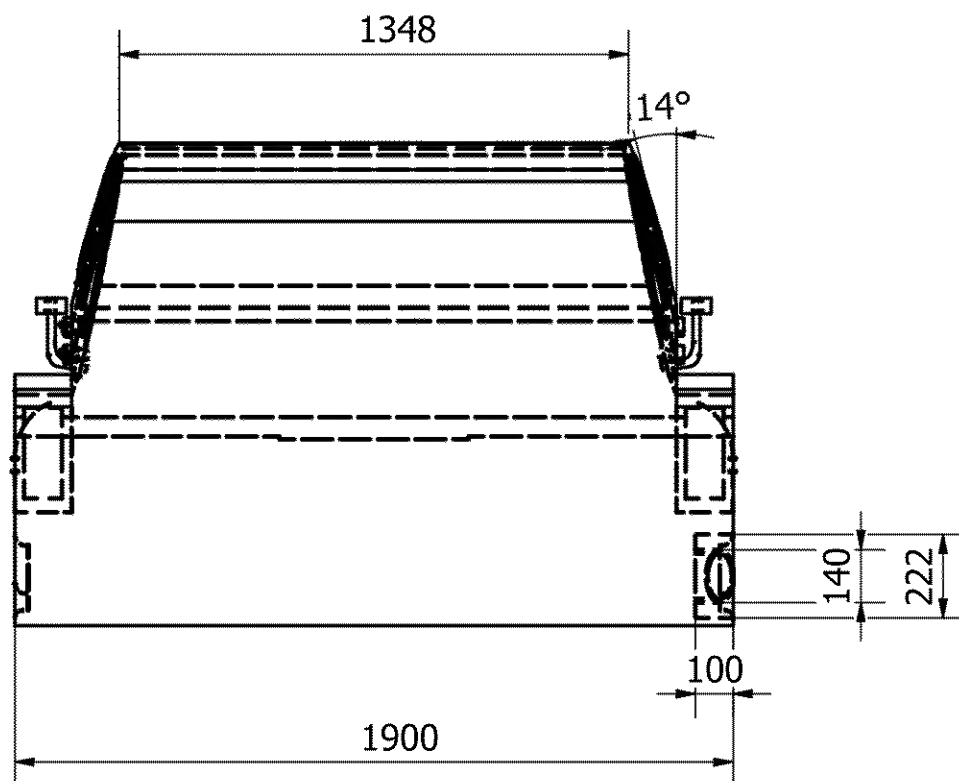
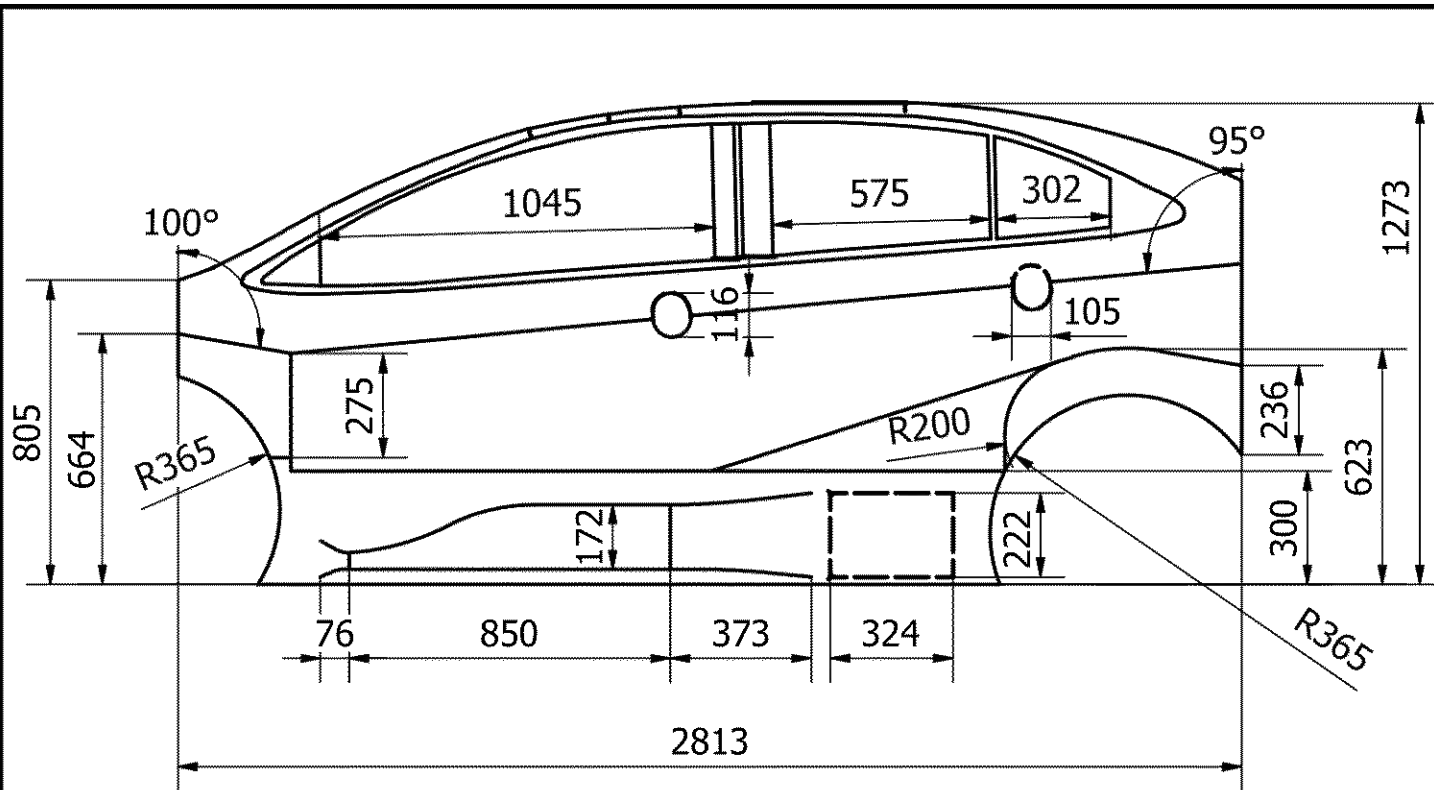
Autor: Risso Kalyna, Agustín	Director: Ing. Mantelli, Pablo	Escala: 1:12,5
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA	FACULTAD DE INGENIERÍA	
	Ensayo - Súper TC 2000 y auto de calle	Hoja: 103 / 113



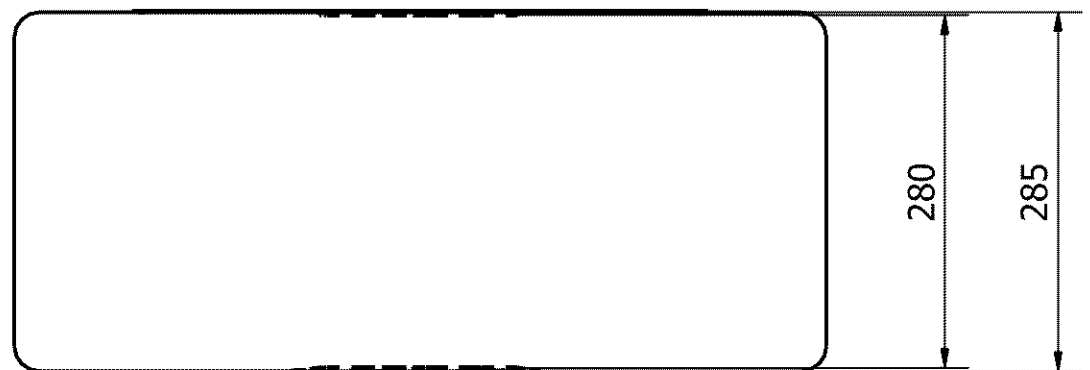
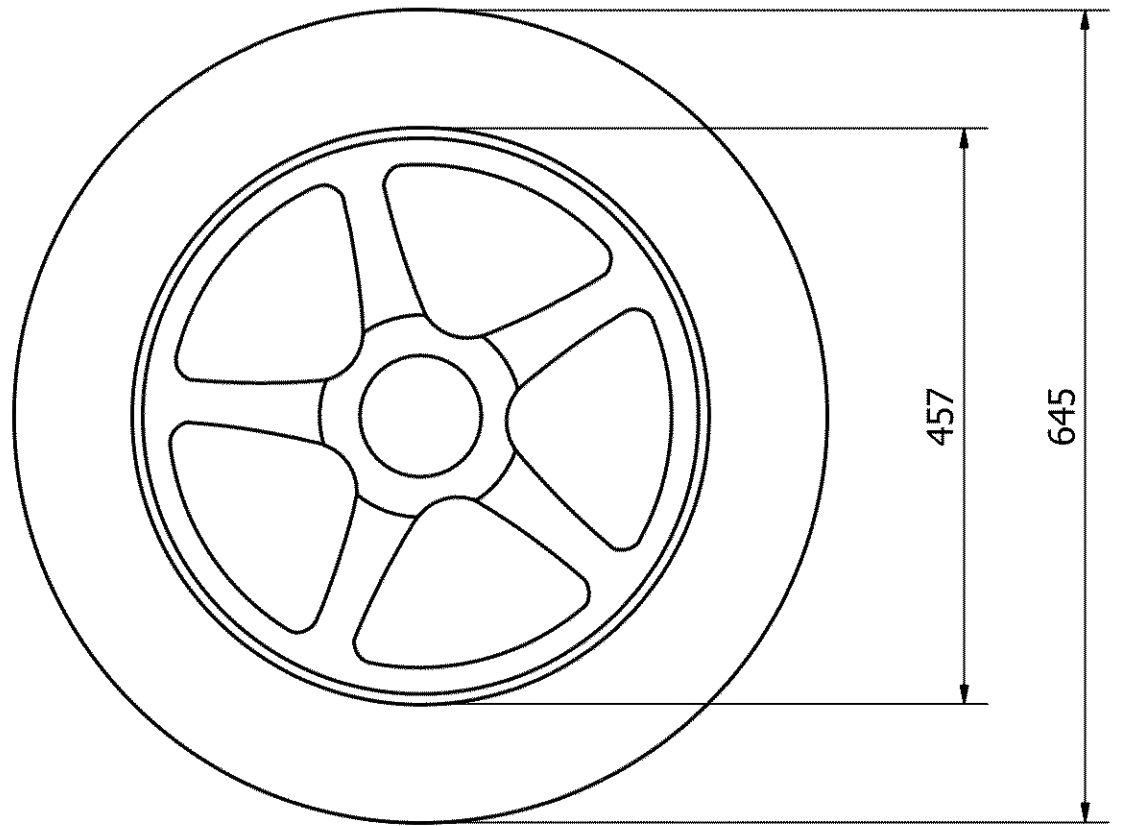
Autor: Risso Kalyna, Agustín		Director: Ing. Mantelli, Pablo		Escala: 1:1	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA			FACULTAD DE INGENIERÍA		
			Trompa		Hoja: 104 / 113



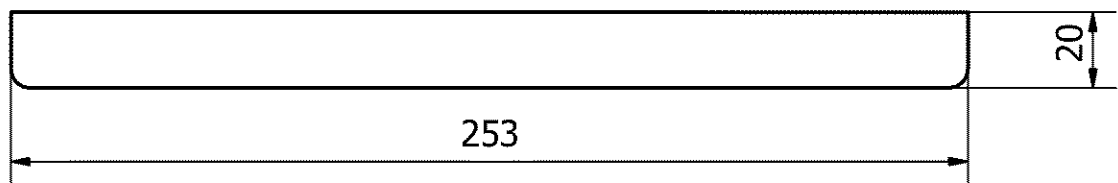
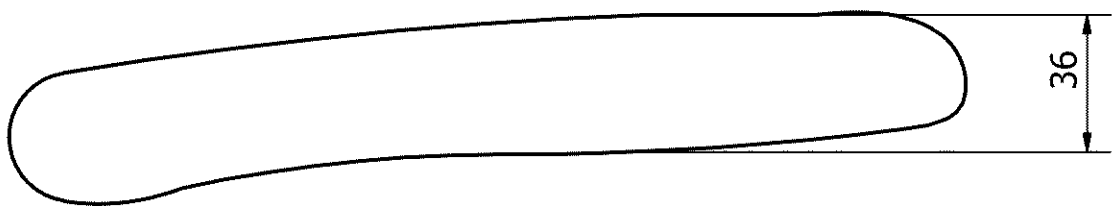
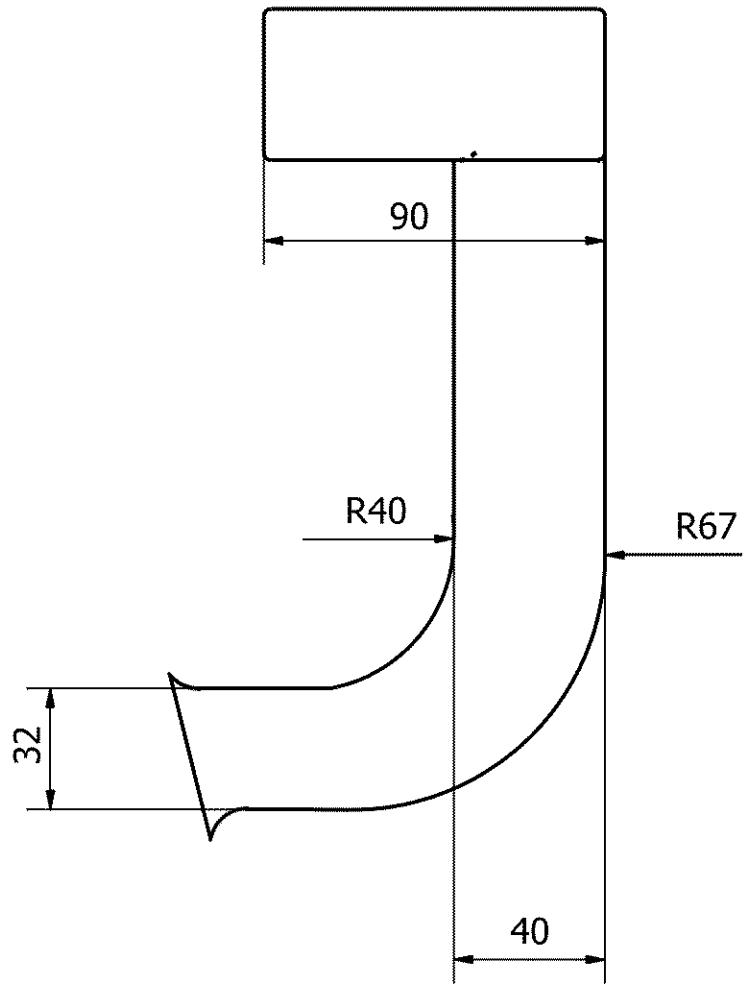
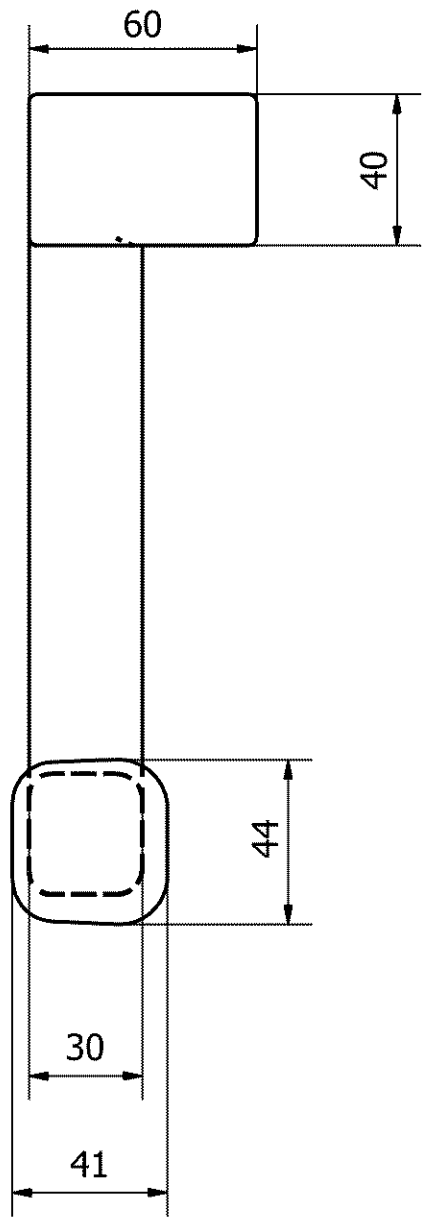
Autor: Risso Kalyna, Agustín		Director: Ing. Mantelli, Pablo		Escala: 1:1	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA			FACULTAD DE INGENIERÍA		
Splitter - Aleta frontal				Hoja: 105 / 113	



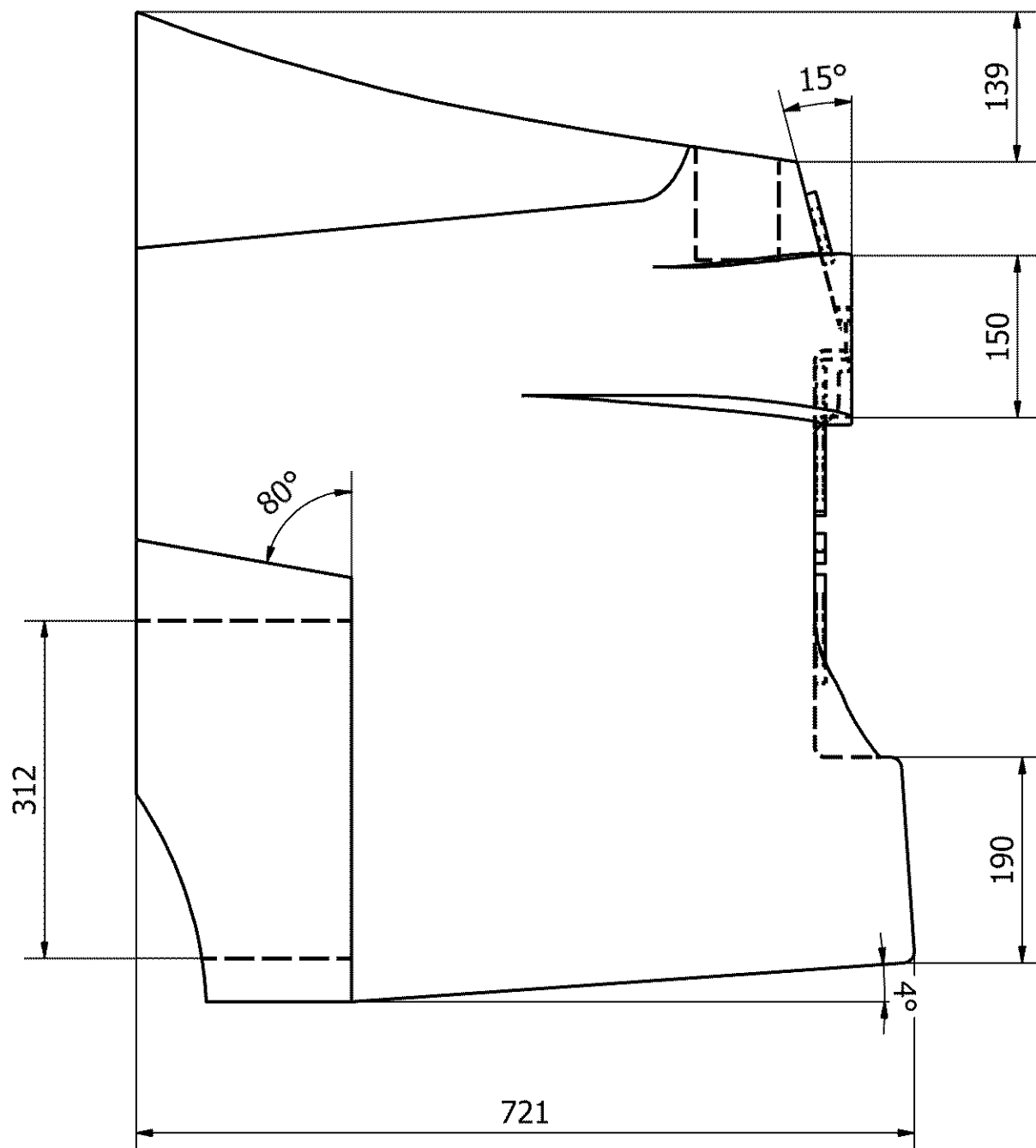
Autor: Riso Kalyna, Agustín	Director: Ing. Mantelli, Pablo	Escala: 1:1
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA	FACULTAD DE INGENIERÍA	
	Parte central - Vista perfil y trasera	Hoja: 106 / 113



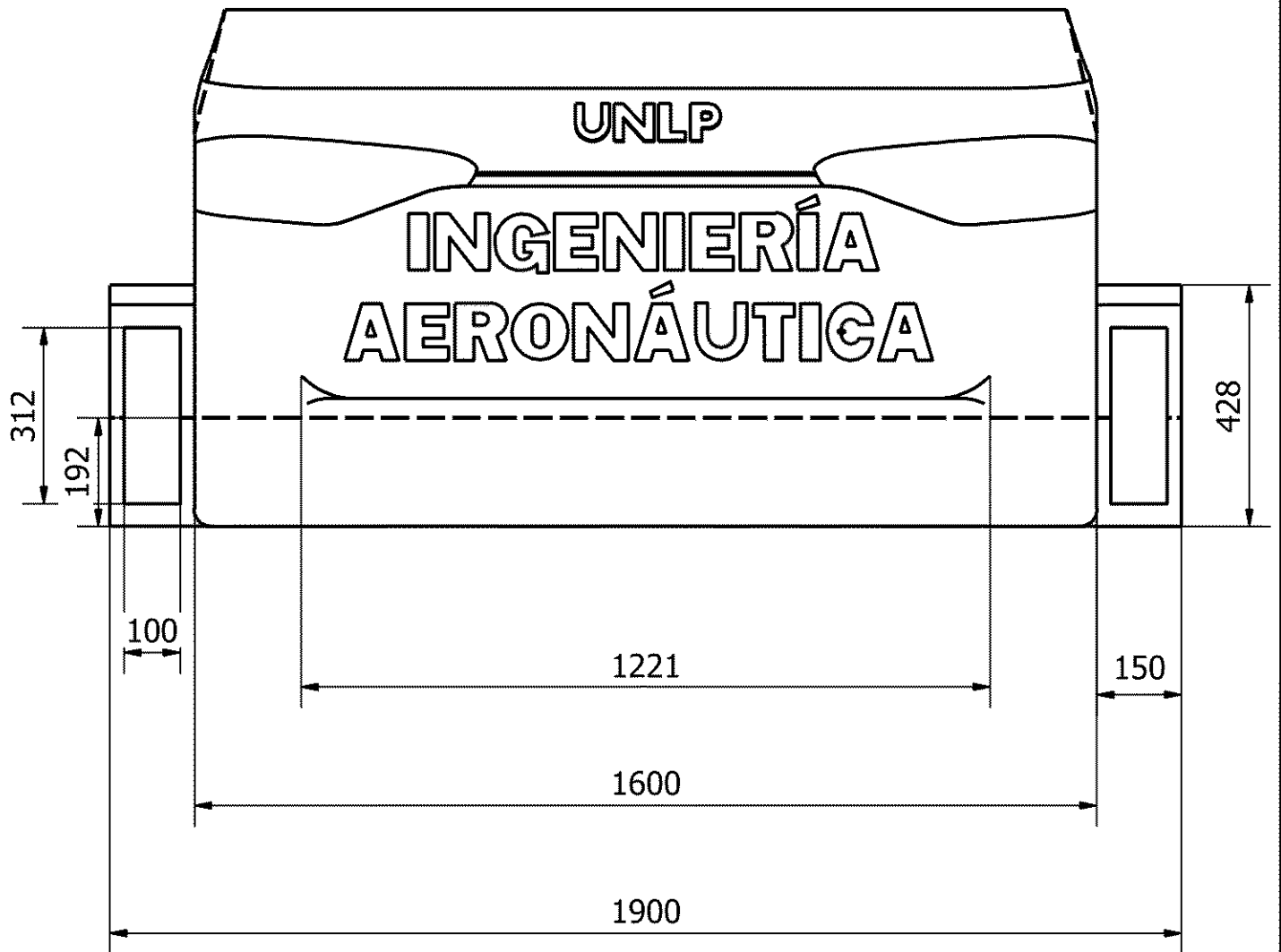
Autor: Riso Kalyna, Agustín	Director: Ing. Mantelli, Pablo	Escala: 1:1
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA	FACULTAD DE INGENIERÍA	
	Neumático	Hoja: 107 / 113



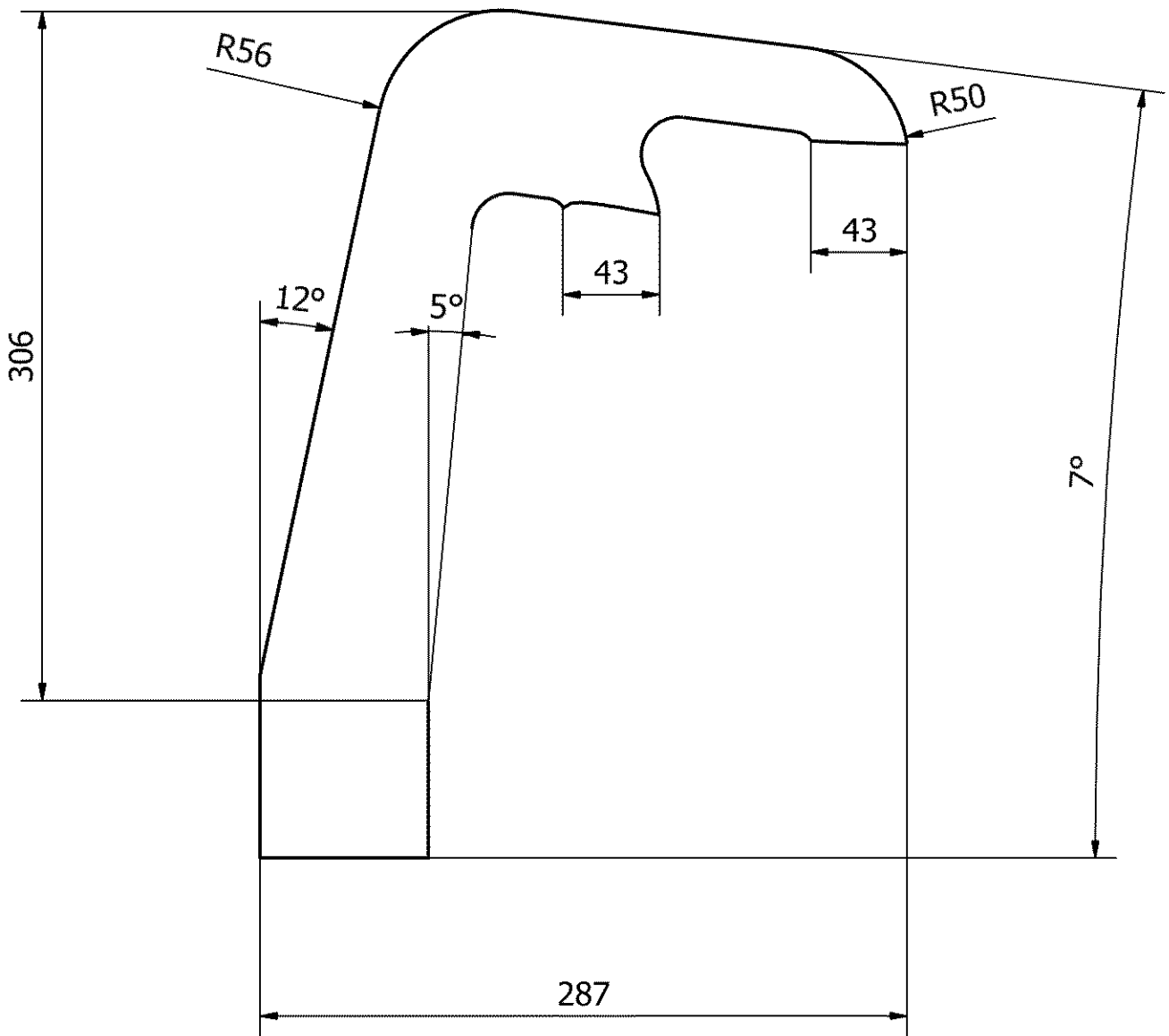
Autor: Riso Kalyna, Agustín	Director: Ing. Mantelli, Pablo	Escala: 1:1
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA	FACULTAD DE INGENIERÍA	
	Espejo retrovisor - Manija de puerta	Hoja: 108 / 113



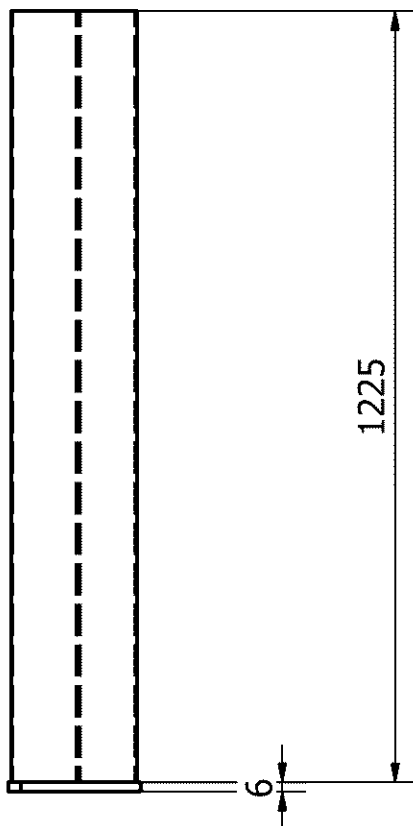
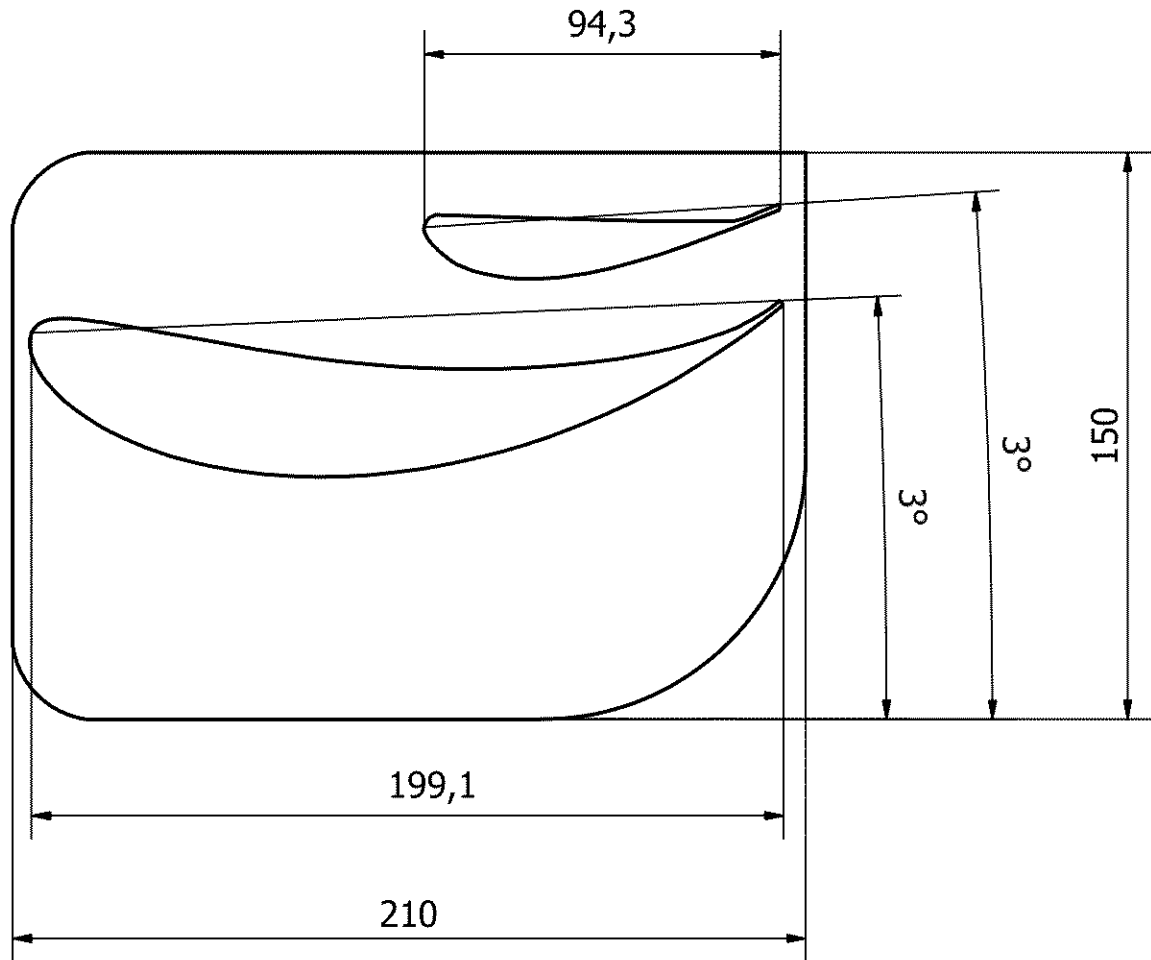
Autor: Riso Kalyna, Agustín	Director: Ing. Mantelli, Pablo	Escala: 1:1
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA	FACULTAD DE INGENIERÍA	
	Baúl - Vista perfil	Hoja: 109 / 113



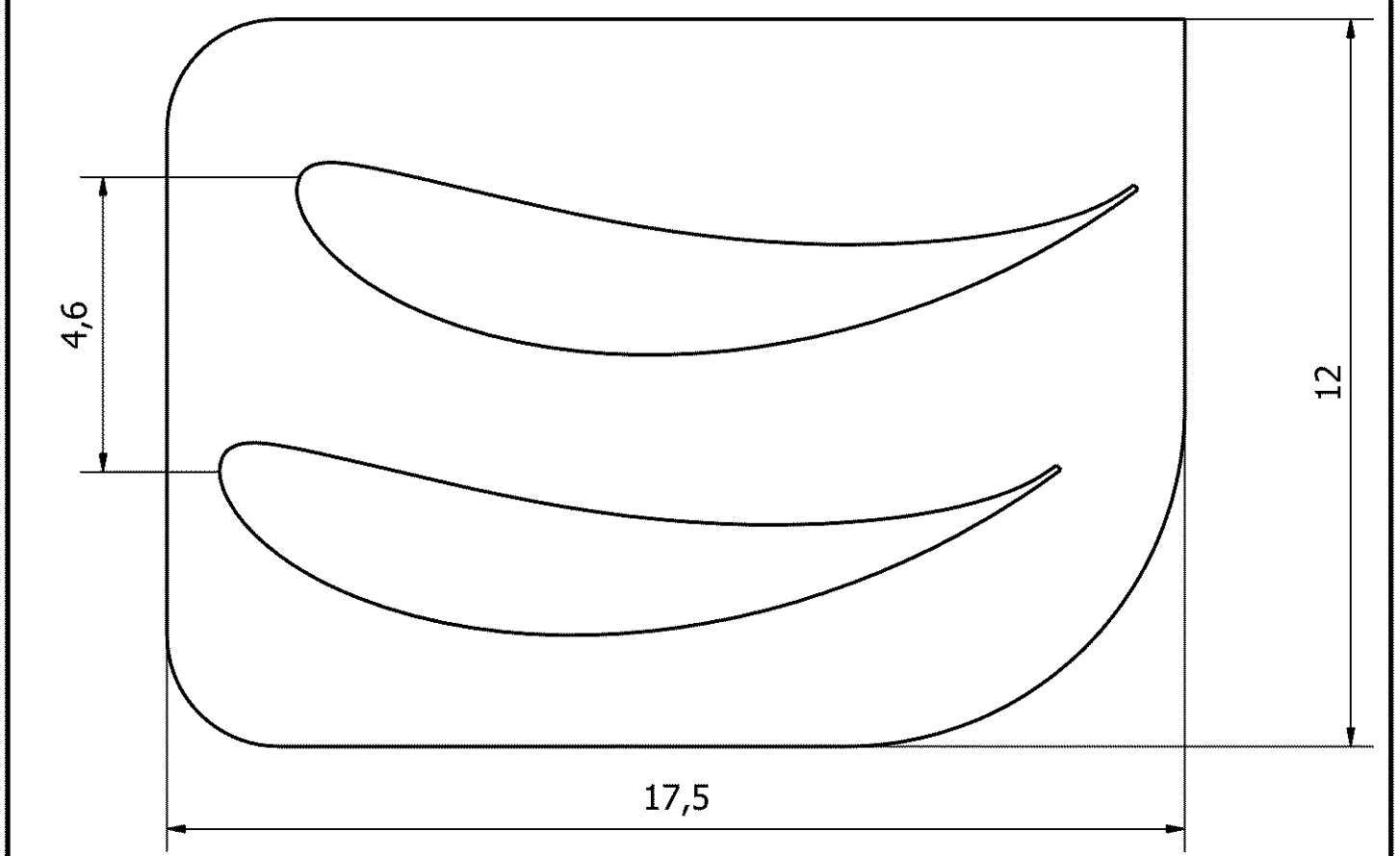
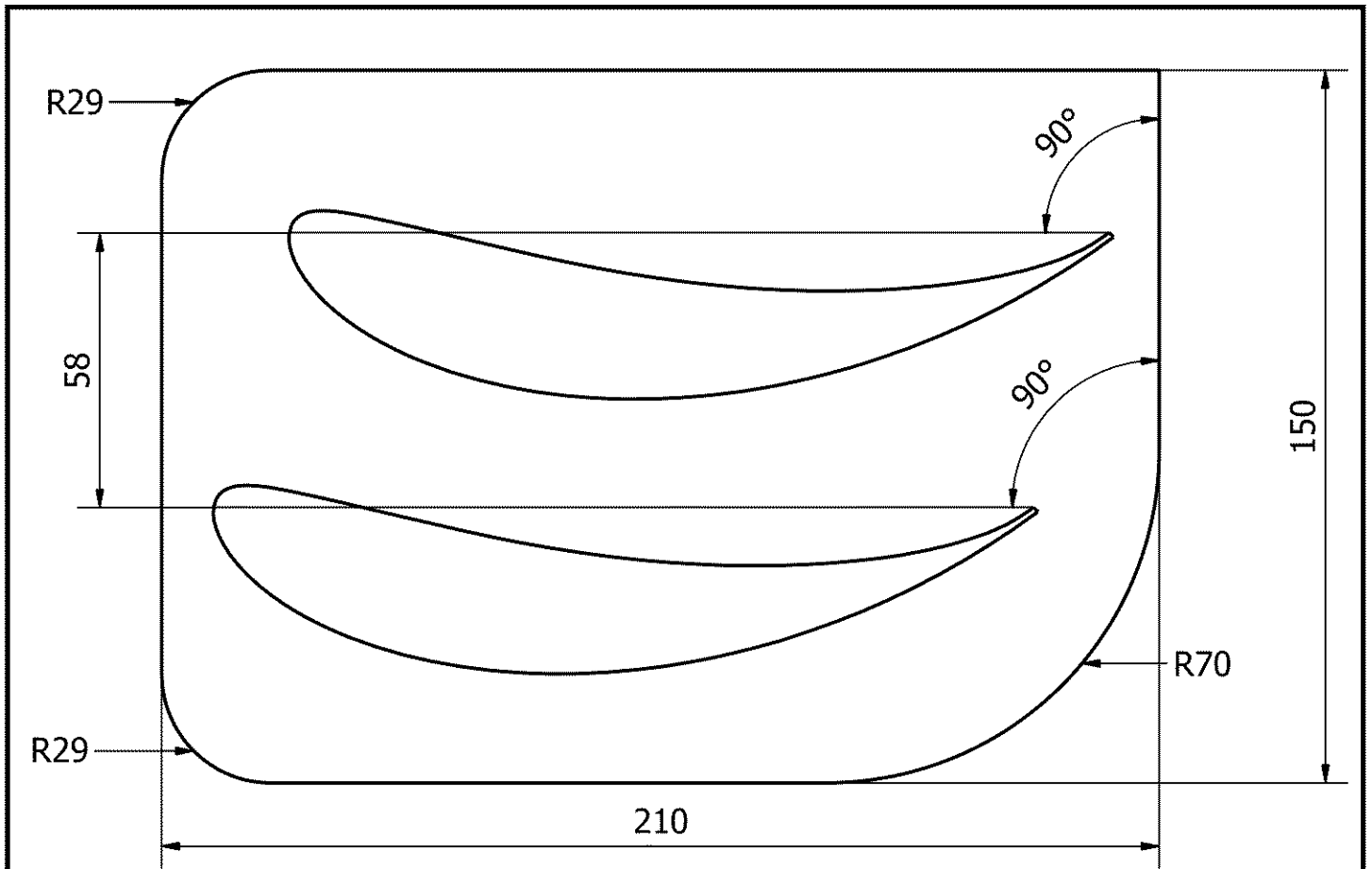
Autor: Risso Kalyna, Agustín	Director: Ing. Mantelli, Pablo	Escala: 1:1
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA	FACULTAD DE INGENIERÍA	
	Baúl - Vista frontal	Hoja: 110 / 113



Autor: Risso Kalyna, Agustín	Director: Ing. Mantelli, Pablo	Escala: 1:1
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA	FACULTAD DE INGENIERÍA	
	Soporte alerón trasero	Hoja: 111 / 113



Autor: Riso Kalyna, Agustín	Director: Ing. Mantelli, Pablo	Escala: 1:1
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA	FACULTAD DE INGENIERÍA	
	Alerón trasero	Hoja: 112 / 113



Autor: Risso Kalyna, Agustín	Director: Ing. Mantelli, Pablo	Escala: 1:1 - 1:12.5
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA	FACULTAD DE INGENIERÍA	
	Alerón trasero modificado	Hoja: 113 / 113