

PROYECTO FIN DE CARRERA



DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE UN VEHÍCULO EN MOVIMIENTO

TUTOR: Dr. Vicente Díaz López

COTUTOR: D^a Susana Sanz Sánchez

AUTOR: Cristina M^a Blanco Santos

TITULACIÓN: Ing. Técnica Industrial Electrónica



A mis padres y mi hermana

Agradecimientos

Recuerdo hoy un día de septiembre hace ya algunos años, soleado y cálido. Recuerdo también un abarrotado y caótico edificio nuevo aún para mi, sobrio, serio, de larguísimos e idénticos pasillos. Recuerdo el ruido, el bullicio, las risas y el nerviosismo. Me recuerdo a mi misma al comienzo de esta historia. Una niña perdida en medio del gentío con un recorrido aun incierto por delante, llena de dudas, de miedos, de incertidumbres pero también de ilusión y de ganas por sacar adelante un sueño. Su sueño.

Ahora me parece increíble estar poniendo punto y final a este proyecto.

Gracias a vosotros, papá y mamá. Gracias por creer siempre en mi, por vuestros valores, por la educación que me habéis brindado y por vuestra infinita paciencia. Vuestro apoyo incondicional me ha empujado siempre a seguir avanzando cada día y por eso os dedico de todo corazón este trabajo.

Gracias a mi abuela, por su infinita dulzura, templanza y fortaleza ante la vida. Aun me queda mucho por aprender de ti. Y por supuesto a mi niña, a mi hermana Marta que inunda de risas y alegría cada instante que paso con ella. Siempre me ayudas muchísimo más de lo que crees. Gracias por ser como eres, única.

Agradecer también a mi tutor, Vicente Díaz, la oportunidad de llevar a cabo este proyecto a su lado y todas las experiencias y enseñanzas que me llevo de mi paso por LABITV. Gracias por dedicarme tu tiempo y por tu paciencia. He crecido gracias a esta experiencia. Gracias también a Susana, por su infinito apoyo, por su ayuda y su cariño, estando siempre presente durante todo mi paso por el laboratorio. Ha sido un placer trabajar contigo y me has enseñado mucho.

Agradecer también de forma muy especial la ayuda y disposición durante todos estos meses de los profesores del departamento, en especial de Daniel y Antonio. Vuestro apoyo y entusiasmo me han marcado el camino en muchos sentidos, haciendo que me lleve conmigo un entrañable recuerdo de vosotros. Me alegra haberos podido conocer como algo más que profesores.

Imposible no acordarme al escribir estas líneas de todos mis amigos, los de siempre y los que me han acompañado durante los estudios, entre los que he comprendido que lo imposible

puede volverse posible. Lamento de verdad no poder nombraros a todos, pero merecéis una mención en estas páginas.

Gracias en especial a Tamara, por el día a día, por haber vivido y sentido conmigo todo lo bueno y lo malo que se recoge a lo largo de este camino. Sé la suerte que tengo de contar contigo y espero que nos queden por vivir juntas infinidad de momentos. Gracias por ser así.

Gracias con todo mi cariño a Rubén, porque me hace especial ilusión que hayas vivido el principio y el final de mi carrera. No sé si podré agradecer lo suficiente tu apoyo sin límites, tu infinito ánimo y tu constante fe en mí. Gracias por ayudarme a seguir. Gracias por seguir ahí.

Por último, no puedo evitar nombraros a vosotros, mis compañeros de LABITV, con los que tanto he vivido y compartido. Gracias a la energía rebosante de Javi, la compostura inquebrantable de Santi y la increíble tenacidad y fuerza de Carlos. Me habéis enseñado mucho más de lo que imagináis. Gracias igualmente a Alberto y sus irrepetibles momentos, a Luis por ser simplemente auténtico, y a Jorge porque siempre has estado en cualquier momento. Mil gracias a la ternura de Sergio, al humor revitalizante de David y a la sabiduría infinita de Tomás. Y todo mi cariño a Virginia, porque tu amistad es uno de los mejores regalos que me ha dado el laboratorio. De todos he aprendido, todos formáis parte de mi historia y a todos os debo algo.

Y a ti, que ahora lees estas palabras y que en algún instante has compartido mi ilusión, de todo corazón, GRACIAS.

Cristina M^a Blanco Santos

Madrid, 10 de marzo de 2011

Índice

1. Introducción	13
1.1. Planteamiento y resumen	13
1.2. Historia de la aerodinámica	14
1.3. Introducción a la aerodinámica	18
2. Antecedentes y objetivos	20
3. Metodología	22
3.1. Descripción del vehículo	24
3.2. Descripción del anemómetro	25
3.3. Realización de los ensayos	26
3.3.1. Descripción general del proceso	26
3.3.2. Sistema de sujeción del equipo de medición	27
3.3.3. Esquema de medición	29
3.3.4. Configuración del equipo	32
3.3.5. Metodología de los ensayos	35
3.4. Adquisición de datos	36
3.5. Control del software de comunicación	38
3.5.1. Transferencia de datos desde el Kestrel 4500 al PC	38
3.6. Herramientas complementarias al estudio	42
3.6.1. Túnel de viento	42
3.6.2. Dinámica de fluidos computacional (CFD)	45
3.6.2.1. Introducción	45
3.6.2.2. Utilidad	46
3.6.2.3. Ventajas e inconvenientes de los CFD	47
3.6.2.4. Resumen del método	49
3.6.2.5. Discretización de las ecuaciones del flujo	49
3.6.2.6. Método de los volúmenes finitos	50
3.6.2.7. Resolución de las ecuaciones discretizadas	51
3.6.2.8. Dependencia del tiempo y no linealidad	52
3.6.2.9. Condiciones de contorno	53

3.6.2.10. Metodología	53
4. Desarrollo	56
4.1. Análisis aerodinámico de un vehículo	56
4.1.1. Tipos de flujo	57
4.1.2. Propiedades de los fluidos incompresibles	58
Teorema de Bernouilli	59
4.1.3. Flujo exterior	64
Teoría de la Capa Límite.....	64
4.1.3.1. Resistencia aerodinámica	67
4.1.3.2. Resistencia debida al rozamiento.....	68
4.1.3.3. Resistencia debida a la presión	71
4.1.4. Flujo interior	79
4.1.5. Fuerzas y momentos aerodinámicos.....	80
4.1.5.1. Fuerzas aerodinámicas	82
• <i>Fuerza de arrastre</i>	82
Coeficiente de arrastre, C_D ó C_x ^{[1] [3]}	83
• <i>Fuerza lateral</i>	89
• <i>Fuerza de sustentación</i>	91
Configuración básica del vehículo	92
Deflectores con “efecto de ala”	92
Efecto suelo.....	92
4.1.5.2. Momentos aerodinámicos	94
4.1.5.2.1. Momento de balanceo	94
4.1.5.2.2. Momento de cabeceo	95
4.1.5.2.3. Momento de guiñada.....	95
4.2. Problemas aerodinámicos especiales	96
4.2.1. Ruido.....	96
4.2.2. Efecto aeroelástico	97
4.2.3. Transporte de partículas	97
4.3. Objetivos de los estudios aerodinámicos en vehículos.....	98

5.	Análisis de resultados	100
5.1.	Análisis de la dinámica longitudinal del vehículo.....	100
5.2.	Ensayos.....	102
5.2.1.	Tratamiento del registro de datos.....	103
5.2.2.	Consideración del aire como fluido incompresible	105
5.2.2.1.	Análisis del número de Mach	105
5.2.2.2.	Cálculo de la densidad del aire a lo largo de los ensayos.....	107
5.3.	Resultados de los ensayos.....	111
5.3.1.	Grupo de ensayos en el morro del vehículo: P1, P2, P3.....	111
5.3.2.	Grupo de ensayos en el capó delantero del vehículo: P4, P5, P6	113
5.3.3.	Grupo de ensayos en la luna delantera del vehículo: P7, P8, P9	115
5.3.4.	Grupo de ensayos en el inicio del techo: P10, P11, P12.....	117
5.3.5.	Grupo de ensayos la zona trasera del techo: P13, P14, P15	118
5.3.6.	Grupo de ensayos la zona trasera del techo: P16, P17, P18	120
5.4.	Perfil de velocidades del Peugeot 407 SW	123
5.4.1.	Análisis del perfil de velocidades.....	126
5.4.2.	Conclusiones al análisis	128
5.5.	Análisis cualitativo del flujo.....	133
5.5.1.	Condiciones generales del flujo.....	134
5.6.	Conclusiones finales al análisis.....	135
	Delantera y parabrisas	135
	Estela.....	138
5.7.	Estudio de la capa límite laminar y turbulenta	140
5.7.1.	Análisis de las turbulencias.....	142
5.7.2.	Análisis del número de Reynolds.....	143
5.8.	Análisis de la dinámica transversal.....	147
5.8.1.	La acción exterior: el viento	147
5.8.1.1.	Comportamiento en marcha con viento lateral.....	148
5.8.1.2.	Sobrevirado y subvirado.....	153
5.8.2.	Descripción de estudios de la fuerza lateral.....	154
5.8.3.	Primeros ensayos en túnel de viento	155
5.8.4.	Efectos de la corriente de aire sobre el vehículo	162
5.8.4.1.	Análisis de la reacción neumático – carretera	163

5.8.4.2. Métodos para la estimación del coeficiente C_y	165
Fórmula Bowman.....	166
Método de la “tabla de evaluación”	166
Artículo SAE.....	167
5.8.4.3. Resultados basados en el artículo precedente	169
6. Presupuesto.....	174
6.1. Consideraciones previas.....	174
6.1.1. Material	174
6.1.2. Costes de material	175
6.1.3. Descripción general del análisis	175
6.1.4. Elaboración de presupuesto.....	176
7. Síntesis de conclusiones finales.....	177
8. Desarrollos futuros	178
ANEXO I	180
ANEXO II	200
Bibliografía	206

Índice de figuras

<i>Figura 1. 1 Modelo de Chrysler “DeSoto”.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 1. 2 Carrocería en forma de gota.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 1. 3 Modelo de Chrysler “Imperial Airflow”.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 1. 4 Modelo Lincoln Zaphyr.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 1. 5 Modelo TuckerTorpede 5.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 1. 6 Peugeot 402, 1935.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 1. 7 Chrysler air flow, 1936.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 1. 8 Chevrolet Corvette, 1957.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 1. 9 Fiat 500, 1957.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3.1 Variación de la viscosidad en función de la temperatura.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3. 2 Dimensiones del Peugeot 407 SW.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3. 3 Kestrel modelo 4500 Pocket Weather Tracke.r</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3. 4 Soporte empleado para el anemómetro.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3. 5 Sistema de sujeción del equipo.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3. 6 Esquema de posiciones de ensayo.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3. 7 Obtención de las coordenadas para la calibración del anemómetro.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3. 8 Lugar geográfico de configuración del equipo.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3. 9 Conversión de unidades.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.10 Cálculo de la declinación.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3. 11 Interfaz de acople del Kestrel 4500 con conexión USB.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3. 12 Pantalla de inicio del software de control.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3. 13 Avance de transferencia de datos.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3. 14 Transferencia de datos completada.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3. 15 Tabla de datos almacenados en el programa.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3. 16 Parámetros de interés.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3. 17 Almacenamiento de datos</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3. 18 Turbina.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3. 19 Aspas de la turbina</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3. 20 Interior de la cámara de ensayos.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3. 21 Mercedes E Coupé con coeficiente aerodinámico 0,24.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3. 22 Audi A6.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3. 23 Chervrolet Volt.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3. 24 Ejemplo de volumen finito o celda.....</i>	<i>50</i>

Figura 4. 1 Flujo alrededor de un vehículo automóvil. (Hucho 1986)	57
Figura 4. 2 Flujo laminar alrededor de un vehículo automóvil.	58
Figura 4. 3 Flujo turbulento alrededor de un vehículo automóvil.	58
Figura 4. 4 Flujo de aire alrededor de un vehículo automóvil.	64
Figura 4. 5 Concepto de capa límite.	65
Figura 4. 6 Esquema bidimensional flujo exterior.	65
Figura 4. 7 Parte frontal del vehículo en la que $V = 0$ y $P = P_{total}$	66
Figura 4. 8 Líneas de corriente y distribución de un fluido en torno a un cilindro de longitud infinita.....	67
Figura 4. 9 Elementos salientes responsables de la resistencia de densidad.	68
Figura 4. 10 Tensión tangencial debida al rozamiento.	69
Figura 4. 11 Fuerza de rozamiento. (cdp: centro de presiones).	69
Figura 4. 12 Perfil de velocidad en una placa plana, con un gradiente de presiones adverso.....	71
Figura 4. 13 Distribución del gradiente de presiones con que se encuentra el flujo de aire.....	72
Figura 4. 14 Distribución de presiones relativas alrededor del vehículo.	73
Figura 4. 15 Sentido de giro eficiente de las turbulencias.	74
Figura 4. 16 Aplicación de la fuerza neta de presión.	74
Figura 4. 17 Superficie frontal del vehículo.	76
Figura 4. 18 Sistema de refrigeración del motor.	79
Figura 4.19 Fuerza de arrastre y de sustentación.	81
Figura 4. 20 Fuerzas y momentos aerodinámicos que actúan sobre el vehículo.	82
Figura 4. 21 Vista en planta del flujo alrededor de un vehículo de motor (furgoneta de reparto).	86
Figura 4. 22 Coefficiente de arrastre y requerimiento de potencia asociada para diferentes morfologías de vehículos.	86
Figura 4. 23 Reducción de C_x o C_D en función del número y tipo de aristas redondeadas	87
Figura 4. 24 Reducción de C_x o C_D en función de las dimensiones del maletero del vehículo.....	87
Figura 4. 25 Influencia de la inclinación trasera del vehículo sobre la fuerza de arrastre.....	88
Figura 4. 26 C_s en función del ángulo de incidencia del viento para diferentes tipos de vehículos.	90
Figura 4. 27 Influencia del viento lateral en la resistencia al avance.	91
Figura 4. 28 Accidente producido por las consecuencias negativas del efecto suelo.	93
Figura 4. 29 Momento de balanceo.....	94
Figura 4. 30 Variación de CM _y en función del ángulo de cabeceo de la estructura del vehículo.	95
Figura 4. 31 Influencia de la forma trasera del vehículo en el momento de guiñada.....	96
Figura 4. 32 Distribución de fuerzas en un automóvil.	98
Figura 4. 33 Fuerzas resultantes sobre un automóvil.	99
Figura 5. 1 Esquema de la capa límite laminar y turbulenta.	101
Figura 5. 2 Mapa de uno de los tramos de ensayo en la A-4.	103

<i>Figura 5. 3 Esquema de las posiciones de ensayo.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 5. 4 Diagrama de presiones relativas alrededor de una carrocería familiar.</i>	<i>121</i>
<i>Figura 5. 5 Desprendimiento de la capa límite turbulenta.</i>	<i>122</i>
<i>Figura 5. 6 Perfil de velocidades alrededor del vehículo.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 5. 7 Distribución de presiones relativas alrededor de un vehículo.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 5. 8.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 5. 9 Perfil de velocidad del flujo de aire circundante al vehículo.</i>	<i>129</i>
<i>Figura 5. 10 Zona de bajas presiones correspondiente con un aumento de velocidad en la delantera del vehículo.</i>	<i>130</i>
<i>Figura 5. 11 Zona de altas presiones correspondiente con una disminución de velocidad del flujo en la zona del parabrisas.</i>	<i>131</i>
<i>Figura 5. 12 Zona de bajas presiones correspondiente con un aumento en la velocidad del flujo a lo largo del techo del vehículo.</i>	<i>131</i>
<i>Figura 5. 13 Flujo de aire en función de la velocidad y la presión.</i>	<i>134</i>
<i>Figura 5. 14 Flujo de aire en función de líneas de corriente.</i>	<i>135</i>
<i>Figura 5. 15 Estancamiento del flujo en morro y parabrisas.</i>	<i>136</i>
<i>Figura 5. 16 Bajas presiones en morro y parabrisas.</i>	<i>137</i>
<i>Figura 5. 17 Distribución de presiones en la superficie del modelo (Pa).....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 5. 18 Estela turbulenta indicada a través de vectores de velocidad.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 5. 19 Distribución de presiones totales (Pa).</i>	<i>139</i>
<i>Figura 5. 20 Intensidad de la estela turbulenta (%).</i>	<i>140</i>
<i>Figura 5. 21 Esquematización del comportamiento de la capa límite.....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 5. 22 Vórtices generados en el seno de un flujo laminar debido a una perturbación.</i>	<i>141</i>
<i>Figura 5. 23 Imagen superior: desprendimiento de la capa límite laminar sin hoyos en la superficie. ...</i>	<i>142</i>
<i>Figura 5. 24 Visualización del flujo sobre diferentes carrocerías.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 5. 25 Simulación del flujo alrededor del vehículo.</i>	<i>146</i>
<i>Figura 5. 26 Ángulo nulo de la dirección del movimiento con respecto al plano ecuatorial del vehículo.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 5. 27 Situación del centro de presión.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 5. 28 Coeficientes de la fuerza lateral del viento y del momento de desviación de la dirección para vehículos de tipo familiar y aerodinámicos.</i>	<i>150</i>
<i>Figura 5. 29 Sección transversal recta.....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 5.30 Fuerza directora lateral en función del ángulo de marcha oblicua.</i>	<i>152</i>
<i>Figura 5. 31 Desviación del vehículo hacia fuera y hacia dentro según el ataque del viento lateral.</i>	<i>154</i>
<i>Figura 5. 32 Esquema de uno de los primeros túneles de viento.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 5. 33 Detalles de la sujeción del modelo a la pista de rodadura.</i>	<i>156</i>
<i>Figura 5. 34 Detalle del pase del modelo a través del túnel.</i>	<i>157</i>
<i>Figura 5. 35 Variación de la fuerza sobre el vehículo en función del tiempo.....</i>	<i>158</i>

<i>Figura 5.36 Esquema de la trayectoria lateral de un vehículo.....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 5. 37 Fuerzas aerodinámicas aplicadas en el centro de presión (C.P.)</i>	<i>161</i>
<i>Figura 5. 38 Componentes de la fuerza aerodinámica.</i>	<i>162</i>
<i>Figura 5.39 Coeficiente de fuerza lateral C_y en función del ángulo de incidencia θ.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 5.40 elación del coeficiente lateral y ángulo de incidencia, para tres relaciones diferentes entre anchura y altura.</i>	<i>165</i>
<i>Figura 5. 41 Sistema de referencia para los ensayos.....</i>	<i>167</i>
<i>Figura 5. 42 Coeficiente de fuerza lateral en función del ángulo de incidencia del viento.</i>	<i>170</i>
<i>Figura 5.43 Dependencia lineal del coeficiente de fuerza lateral en cuerpos rectangulares para diferentes ratios de longitud, λ.....</i>	<i>171</i>
<i>Figura 5. 44 Efecto de la anchura del cuerpo sobre el coeficiente de fuerza lateral.</i>	<i>171</i>
<i>Figura 5. 45 Fuerza lateral referida al área lateral en función de la altura λ y anchura, θ.</i>	<i>172</i>

1. Introducción

1.1. Planteamiento y resumen

La aerodinámica es la parte de la mecánica que se encarga de estudiar el movimiento relativo entre un sólido y el fluido gaseoso que lo rodea, generalmente el aire, determinando las presiones y fuerzas que se van a generar. El diseño de cualquier vehículo e infraestructura requiere un análisis fluidomecánico, especialmente desde mediados del siglo pasado, se ha convertido en punto clave durante el proceso de diseño. La creación de medios de transporte cada vez más veloces que deben moverse de la manera más eficiente posible en el seno de un fluido ha impulsado la necesidad del estudio de las propiedades fundamentales de estos movimientos y del impacto que los elementos tienen en estos vehículos.

Ahora bien, no resulta sencillo poder realizar este tipo de estudios. Por un lado, desde el punto de vista analítico, la complejidad de las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento de los fluidos hace inviable su resolución completa alrededor de cuerpos complejos, siendo necesario despreciar muchos fenómenos normalmente viscosos y turbulentos, obteniendo como consecuencia, aproximaciones sesgadas a la realidad. De igual manera, las necesidades de potencias de cálculo para poder resolver un problema completo con todos sus elementos hace imposible su empleo a gran escala, por lo que su uso queda reducido a la comparación de resultados para distinguir entre soluciones mejores y peores. Debido a dichas debilidades, los métodos de resolución numérica no están aun en posición de poder desplazar a los ensayos aerodinámicos sobre el terreno.

A partir de aquí se abren dos modos de operación:

- evaluaciones a posteriori sobre el terreno
- experimentación en laboratorio.

En lo que a tecnología automovilística respecta, la ventaja del túnel aerodinámico es que no será necesario disponer de un modelo terminado, propulsado, equipado y listo para rodar de manera autónoma, ya que el túnel proporciona la posibilidad de ensayar sobre modelos a escala de los vehículos deseados. Inversiones iniciales en ensayos aerodinámicos consiguen gran impacto

en el rendimiento del vehículo, pero el avance por este camino resulta cada vez más caro, aunque su eficacia queda fuera de toda discusión.

El trabajo en túnel es, por tanto, indispensable y costoso, tanto para un vehículo a escala real como incluso para una maqueta a escala 1:2. Mediante el uso de técnicas CFD y con el fin de ahorrar costes, se eliminan aquellas soluciones no óptimas y se seleccionan un número pequeño de configuraciones a reproducir con absoluta precisión en el interior del túnel.

Sin embargo, es evidente que el acceso a dichos ensayos en túnel de viento no se produce de forma mayoritaria. Grandes escuderías, marcas automovilísticas fuertes o laboratorios de calibración poseen sus propios túneles de viento, pero resulta inviable el mantenimiento de un túnel en cada centro universitario o laboratorios de ensayo. ¿Cómo conseguir entonces acercar el ensayo aerodinámico a un mayor número de entidades?

En la mayoría de centros universitarios a nivel nacional centrados en carreras técnicas o ingenierías, el estudio aerodinámico de cualquier vehículo se reduce, en gran medida, al estudio de modelos teóricos que no materializan el flujo de aire real en torno a un vehículo. Debido a ello, a lo largo del presente proyecto se tratará de desarrollar y diseñar una herramienta de ensayo que sirva como complemento al estudio aerodinámico y que a su vez permita determinar el comportamiento del flujo circundante a un vehículo, con la particularidad de ser accesible, principalmente, a universidades o pequeños laboratorios. Dicho método de ensayo permitirá caracterizar de forma cualitativa y cuantitativa el flujo de aire en aquellas zonas del vehículo a tamaño real en las que se pretenda desarrollar un estudio, descripción, análisis...o bien introducir mejoras a nivel aerodinámico, ya sea mediante alerones, cambios y mejoras en el diseño, introducción de elementos aerodinámicos...

1.2. Historia de la aerodinámica

En los inicios de la invención del automóvil principalmente se pensaba en este como un medio de transporte y las velocidades conseguidas dependían, en mayor medida, de la cilindrada y la potencia de su motor. Sin embargo, a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, la preocupación de los fabricantes de automóviles pasó a centrarse en el desarrollo y optimización de los componentes mecánicos de un automóvil: el motor y la transmisión.

Por descontado, la estética jugaba un papel fundamental en el diseño pero básicamente los coches consistían en un chasis precario sobre el cual se montaba el motor, la transmisión y las tres o cuatro ruedas con su respectivo sistema de dirección. Todo esto se completaba con una carrocería a la moda, generalmente diseñada por carroceros italianos o ingleses, con un fin más estético que ingenieril.

A lo largo de los siglos XIX y XX ^[1], el diseño de los automóviles respondía a la imaginación de especialistas o ingenieros que concebían las carrocerías. Durante los años 30, el coeficiente de resistencia aerodinámica era de 1'50, lo cual afectaba de forma negativa a los vehículos puesto que los hacía consumir elevadas cantidades de combustible, lo que explicaba la baja autonomía de los mismos, como consecuencia de la carga aerodinámica, que todavía no era tan notoria ya que los vehículos no eran especialmente rápidos.

Décadas después, extensivos análisis en el túnel de viento realizados por los ingenieros de Chrysler demostraron que los automóviles estaban diseñados "literalmente a la inversa". Las altas parrillas, largos capots y parachoques, extremadamente largos, luchaban contra el viento malgastando combustible y reduciendo las velocidades máximas, lo cual se demostró en pruebas realizadas al aire libre con el modelo de Chrysler denominado DeSoto, en su modelo sedán de 1933, que se había preparado para conducirse a la inversa, es decir, apuntando su parte posterior al viento. El DeSoto, figura 1.1, aportó más kilómetros por litro y velocidades máximas más elevadas.



Figura 1. 1 Modelo de Chrysler "DeSoto".

Investigaciones posteriores demostraron que la forma de gota, figura 1.2, era la más aerodinámica y fue aplicada a las carrocerías de los DeSoto y al Imperial Airflow de 1934, figura 1.3.



Figura 1. 2 Carrocería en forma de gota.



Figura 1. 3 Modelo de Chrysler "Imperial Airflow

Como resultado, se obtuvieron unos diseños que mejoraron la oposición al viento pero que iban en contra de la estética imperante en esa época, a pesar de que ofrecía abundantes innovaciones en su diseño, tales como la nueva distribución del peso para reducir el balanceo, un fuerte chasis construido en una sola pieza y la cabina del pasajero ubicada por delante de las ruedas posteriores para aumentar el confort interior. Pero pese a todas las virtudes del imperial Airflow, de $C_x = 0'5$, sólo se compraron unas pocas unidades, lo que provocó su salida de producción en 1937.

Otros dos modelos destacables de aquellos días son el Lincoln Zaphyr, figura 1.4 y el TuckerTorpede 51, figura 1.5, que con $C_x = 0'45$ y $C_x = 0'39$ respectivamente, fueron otros de los modelos con mejor diseño aerodinámico de la época.



Figura 1. 4 Modelo Lincoln Zaphyr



Figura 1. 5 Modelo TuckerTorpede 5

Décadas después comenzaron a potenciarse las formas más suaves y redondeadas, evitando los ángulos vivos de los modelos previos para conseguir, principalmente, un mayor atractivo estético. Algunos de dichos diseños se corresponden con los modelos que se muestran en las siguientes figuras, destacando la evolución del Chevrolet Corvette, en el que se aprecia

claramente la abundancia de líneas redondeadas y estilizadas, que efectivamente contribuyen a una mejora estética muy notable a la vez que favorecen al ahorro de combustible.



Figura 1. 6 Peugeot 402, 1935.



Figura 1. 7 Chrysler air flow, 1936.



Figura 1. 8 Chevrolet Corvette, 1957.



Figura 1. 9 Fiat 500, 1957

Con la llegada de la crisis petrolera de los años 70, se impusieron una serie de limitaciones que impulsaron de forma notable los estudios aerodinámicos sobre los automóviles, por lo que se hizo imprescindible un estudio en este campo que permitiera un menor consumo de combustible como objetivo principal. También a principios de los setenta, se aprecia un interés creciente por la componente vertical de la fuerza aerodinámica, con el objetivo de buscar por primera vez downforce en los vehículos, lo que desembocaría en los diseños de efecto suelo. Esta tendencia, años más tarde, irá pasando poco a poco al resto de automóviles, lo que se hace palpable en distintos elementos cotidianos en los vehículos de hoy en día como por ejemplo el spoiler trasero o los alerones que favorecen el comportamiento aerodinámico, proporcionando consumos mucho menores y rendimientos muy elevados. Para garantizar el éxito de estos avances, en la actualidad resultan necesarios extensos estudios aerodinámicos que garanticen resultados óptimos del comportamiento de los vehículos en el seno de los fluidos.

1.3. Introducción a la aerodinámica

La aerodinámica ^[1] es la rama de la mecánica de fluidos que se centra en el estudio del aire y otros fluidos gaseosos, así como de las fuerzas que actúan sobre ellos. Algunos ejemplos de estudios aerodinámicos son el movimiento de un avión a través del aire, las fuerzas que ejerce el viento sobre una estructura determinada o, tal y como se tratará a lo largo del presente proyecto, las fuerzas que intervienen en el desplazamiento de un vehículo.

La forma del objeto de estudio afecta enormemente a la resistencia al movimiento que ejerce el aire sobre él. Como ejemplo, una esfera y sobretodo una forma cuadrangular, obligan al aire a cambiar de dirección, con lo que el objeto se frena al presentar una fricción. En cambio, un plano aerodinámico casi no provoca perturbación en el aire, con lo que la resistencia opuesta por el aire es mucho menor. Una de las leyes fundamentales que rigen el movimiento de los fluidos es el Teorema de Bernoulli, que relaciona un aumento de velocidad de flujo con una disminución de la presión y viceversa. Como ejemplo, cabe destacar que el teorema de Bernoulli aporta la explicación a la fuerza de sustentación que actúa sobre el ala de un avión.

La aerodinámica presenta su mayor representación en los coches y camiones actuales a través de su contribución en las cargas del vehículo. En el diseño de un vehículo moderno es de vital importancia la forma de la carrocería ya que esta influye tanto en el aprovechamiento de la potencia que desarrolla el motor, como en la estabilidad a altas velocidades y el consumo, siendo el estudio aerodinámico sobre el vehículo en cuestión la mejor herramienta para garantizar los mejores resultados.

Las fuerzas aerodinámicas interactúan con el vehículo y son la causa del arrastre, sustentación, fuerzas laterales, momentos y ruidos, conceptos todos ellos en los que se profundizará más adelante. Dicho conjunto de fuerzas provoca alteraciones en el consumo, el rendimiento, la forma de conducción y la estética del coche. Los parámetros que rigen las formas de un vehículo utilitario son muy diferentes a las de un coche de competición. Aunque ambos modelos se ven sometidos a las limitaciones que impone el hombre y la naturaleza, dichos límites surgen de requisitos diferentes: mientras en los coches de competición la sustentación negativa, la eficiencia aerodinámica y la normativa propia de cada competición son las pautas que dan forma al vehículo, en los coches utilitarios el consumo, la seguridad, la estética, la funcionalidad,

y el uso concreto de cada modelo son los principales parámetros a la hora de determinar el diseño exterior.

La facilidad con la que un automóvil se mueve en el seno de una corriente de aire viene determinada por un el coeficiente de resistencia aerodinámica denominado C_x . Dicho parámetro es adimensional, su valor se obtiene mediante medidas experimentales y viene determinado por la forma de cada carrocería. La aerodinámica juega también un importante papel en el confort de los pasajeros puesto que el diseño condiciona las formas de la carrocería y por lo tanto, la ventilación interior y el ruido aerodinámico en el interior del habitáculo. En cuanto a la estabilidad del vehículo es muy importante que el centro de presiones, punto donde se concentran todas las fuerzas aerodinámicas, quede lo más cerca posible del centro de gravedad del vehículo, lo cual resulta complicado de conseguir porque a altas velocidades el flujo de aire cambia completamente. Para solucionar dicho problema, algunos coches muy sofisticados cuentan con sistemas de aerodinámica activa como alerones y spoilers que se despliegan en determinadas situaciones como pueden ser una frenada o al alcanzar determinadas velocidades.

2. Antecedentes y objetivos

Gracias al inmenso desarrollo tecnológico de las últimas décadas el mundo de la aerodinámica ha sufrido importantísimos avances que se ven reflejados en los diseños de los vehículos tanto a nivel del turismo comercial como en los coches de competición.

Los estudios aerodinámicos previos al lanzamiento de un nuevo modelo y los realizados con posterioridad para lograr una mejora continua en los diseños futuros, tienen como principales objetivos la disminución del consumo de combustible sin renunciar al confort, seguridad y por supuesto diseño. Dichos estudios requieren la aportación de elevadas inversiones económicas y la posibilidad de disponer de las últimas tecnologías casi en tiempo real. Dichos estudios aerodinámicos se desarrollan, principalmente, en los túneles de viento y a través de la dinámica de fluidos computacional o CDF.

Los ensayos realizados en túnel de viento requieren, inevitablemente, inmensas superficies que alberguen las instalaciones para la realización de las pruebas sobre vehículos a tamaño real. El vehículo se aloja en el interior de la cámara de ensayos en la que se reproducen las condiciones climáticas deseadas en un entorno controlado mientras que gracias a un enorme ventilador situado en uno de los extremos, se hace incidir el flujo de aire sobre la superficie del vehículo a la velocidad deseada. Aporta resultados reales y muy fiables acerca de los vehículos objeto del ensayo pero su uso y mantenimiento es increíblemente caro, no siendo accesible a la mayoría de las marcas.

Por otra parte, la dinámica de fluidos computacional permite simular sobre un modelo creado por ordenador las características fluidodinámicas del flujo alrededor del mismo. Se basan en la resolución de las ecuaciones matemáticas que rigen el movimiento del fluido a través del ordenador, por lo que reducen de forma muy considerable el número de ensayos y pruebas de campo a la vez que permiten la simulación de condiciones extremas muy difíciles de conseguir en un entorno controlado. En contrapartida, el software de simulación es a día de hoy una tecnología tremendamente cara que requiere de hardware puntero por lo que no es una herramienta que se encuentre al alcance del gran público. Por otro lado, su manejo no es sencillo y requiere de personal cualificado, lo que igualmente contribuye a elevar el coste de su utilización.

En el caso de los centros universitarios, objeto del presente proyecto, la realización de un estudio aerodinámico sobre un modelo concreto de vehículo conlleva una serie de requisitos a cumplir que elevan el coste del ensayo. Como herramienta principal, es imprescindible disponer de un túnel de viento a escala que permita la realización de pruebas aerodinámicas sobre los modelos deseados, ya que resulta inviable el mantenimiento de un túnel a tamaño real. Como consecuencia, la realización de cualquier ensayo conlleva el disponer de una reproducción a escala, de la mayor calidad posible, del vehículo objeto del estudio. La realización de dicho modelo corre a cargo de especialistas encargados de un proceso de diseño y realización del modelo muy preciso, con herramientas y material específicos que implican tanto una demora en los plazos, como un coste adicional y elevado para cada una de las pruebas.

Con vistas a poder contar con la posibilidad de realizar estudios aerodinámicos sobre vehículos a escala real a un precio que resultara accesible a diversas entidades, como marcas de automóviles, centros universitarios, laboratorios de ensayos, etc se planteó la posibilidad de estudiar el comportamiento del flujo circundante a un vehículo en circulación mediante su perfil de velocidades.

Por lo tanto, como objetivo principal del presente proyecto se establece la necesidad de definir y desarrollar una metodología de ensayo con el fin de determinar las acciones aerodinámicas en el exterior de un vehículo en movimiento. Para ello se definirá el perfil de velocidades de un automóvil que caracterice la aerodinámica longitudinal del mismo mediante ensayos accesibles a un amplio y diverso abanico de clientes gracias a la reducción de costes, tiempo y simplificación de los ensayos.

En cuanto al comportamiento de la dinámica transversal en un automóvil, dada la complejidad de estudio experimental que presenta su caracterización, se describirán diversos métodos empleados a lo largo de la historia de la aerodinámica que definen la evolución de aerodinámica lateral a través de los tiempos.

3. Metodología

Como ya se ha comentado anteriormente, el objetivo principal del presente proyecto es la determinación de las acciones aerodinámicas en el exterior de un vehículo. Para ello, se dispondrá de un anemómetro portátil situado sobre la superficie de un turismo con el que se realizarán experiencias en campo abierto. Dicho anemómetro se situará en diferentes puntos del vehículo y se hará circular a una velocidad determinada. Gracias al software de control de mismo, los datos registrados por el sistema de medición según las diferentes condiciones de situación y velocidad serán almacenados para su posterior tratamiento y análisis, permitiendo de este modo disponer de forma fiable y precisa de la información necesaria para el estudio aerodinámico.

Ante la imposibilidad de disponer de una pista, circuito o entorno aislado del flujo de tráfico en el que poder llevar a cabo los ensayos en campo abierto, surgió la necesidad de establecer una serie de condiciones en el momento de realización de las pruebas, que permitieran la toma de medidas dentro de un marco de características homogéneas. Dichas condiciones hacen referencia a aquellos factores implicados en el entorno de medición y que influyen, directa o indirectamente, en el flujo circundante alrededor del vehículo objeto del estudio y se clasifican en condiciones ambientales, condiciones físicas de la pista en la que se realizan las pruebas y condiciones de la conducción. Cabe destacar que cualquier grupo de datos recogido bajo el incumplimiento de alguno de los criterios descritos a continuación, fue desechado del estudio por no considerarse apto para el mismo, puesto que dichos valores reflejarían la influencia de algún elemento externo no deseado.

Condiciones ambientales: las condiciones meteorológicas a la hora llevar a cabo los ensayos se presentaron como uno de los factores determinantes en el desarrollo del proyecto, puesto que condicionaban directamente el correcto funcionamiento del anemómetro. Por otra parte, teniendo en cuenta que la viscosidad del aire está directamente relacionada con el gradiente de velocidad que se produce entre las partículas en contacto con la superficie del vehículo y la zona del fluido que circula alrededor del mismo (capa límite), y que dicha viscosidad depende de la temperatura, se decidió que todos los valores experimentales serían tomados durante el transcurso de la misma jornada, a ser posible en un intervalo menor de 12 horas. De esta forma, la toma de valores se realizaría en todos los puntos con unas características ambientales similares y en un rango de temperaturas de entre 10º y 20º C, puesto que tal y como

se observa en la figura 3.1, dicho intervalo de temperaturas se corresponde con una mínima variación del valor de la viscosidad del aire.

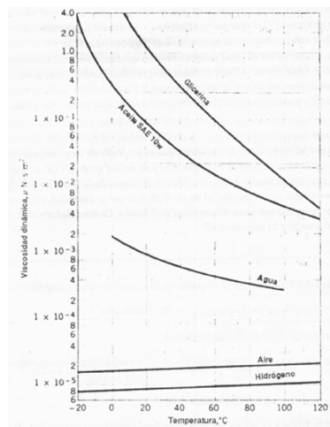


Figura 3.1 Variación de la viscosidad en función de la temperatura.

Por lo tanto, dicha variación en la viscosidad no presentará influencias relevantes en las características tanto de la capa límite como del flujo circundante alrededor del vehículo para cada una de las diferentes pruebas realizadas.

Además de haberse tenido en cuenta el factor de la temperatura, el día de la realización de las pruebas se evitaron tanto las lluvias como la presencia de fuertes ráfagas de viento que pudieran desestabilizar el vehículo y alterar de manera negativa los resultados recogidos, garantizando de este modo la fiabilidad de las medidas obtenidas y preservando el adecuado funcionamiento del equipo de medida.

Condiciones físicas de la pista: todos los ensayos fueron realizados en recorridos con características físicas similares con el fin de que todos los resultados recogidos estuvieran bajo el mismo marco de condiciones, las cuales son:

- Tramos rectos, sin curvas ni cambios de rasantes.
- Longitud mínima aproximada de 400 m.
- Asfalto liso, sin “peinar”, sin baches o irregularidades.
- Tramos abiertos, es decir, sin presencia de túneles.

Condiciones de conducción: al comienzo del estudio fueron establecidas una serie de condiciones referentes tanto al estilo como al entorno de conducción que permitiesen garantizar la no presencia de agentes externos que influyesen negativamente en los resultados, tales como:

- Circulación a una velocidad constante de 90 km/h.
- Circulación sin cambio de carril.
- Toma de datos evitando en todo momento la presencia de camiones, autobuses y vehículos pesados en un entorno próximo al vehículo.
- Mantenimiento de una amplia distancia de seguridad con el vehículo precedente para evitar posibles influencias en el campo de flujo alrededor del vehículo objeto del estudio.

3.1. Descripción del vehículo

Desde el comienzo del presente proyecto se tuvo muy claro que el tipo de vehículo para la realización del análisis sería un utilitario de tipo familiar con una línea moderna y aerodinámica que aportara resultados acordes con el rápido avance en el diseño de los automóviles actuales. Finalmente el modelo escogido para la realización de todos los ensayos fue un utilitario de tipo familiar, en concreto el Peugeot 407 SW mostrado en la figura 3.2. Se trata de un modelo robusto ^[14], de líneas aerodinámicas, con un largo capó y una trasera compacta que crean sensación de equilibrio. Con unas dimensiones de 4'765 m de longitud; 1'811 m de anchura; una distancia entre ejes de 2'725 m y una altura de 1'475 m, se sitúa dentro del núcleo de los coches familiares mientras que las notables mejoras en el diseño introducidas por la marca han permitido optimizar al máximo la aerodinámica del mismo, con un coeficiente de penetración o arrastre C_x de 0'29 frente al valor de 0'32 en la gama anterior, 406.

Se considera diseño familiar al tipo de carrocería utilizada en automóviles de tipo turismo, caracterizándose por estar formado por dos volúmenes en el que la tapa del maletero es un portón que incluye el cristal trasero, además de poseer un voladizo trasero relativamente largo y en el que el techo mantiene prácticamente la misma altura en casi todo el largo del mismo.

Por otro lado, este tipo de diseño, gracias a su notable longitud, otorgaba la posibilidad de establecer un amplio mapa de puntos de medida a lo largo del contorno en los que realizar los ensayos y obtener así mayor volumen de información.



Figura 3. 2 Dimensiones del Peugeot 407 SW.

3.2. Descripción del anemómetro

El anemómetro empleado a lo largo del proyecto puede observarse en la figura 3.3. Se trata del modelo *Kestrel 4500 POCKET WEATHER TRACKER* con brújula digital al que se ha añadido un kit de control denominado *Kestrel® Interface & Communicator Software*. El equipo software de control posibilita el envío de los datos almacenados desde el anemómetro al PC a través de un puerto USB. Esto permite la revisión, análisis y almacenamiento de datos a largo plazo con facilidad y eficacia. El anemómetro escogido^[5] se caracteriza por tratarse de un instrumento meteorológico completo que proporciona medidas rápidas y precisas de la velocidad del viento, temperatura, humedad, presión barométrica y otras funciones derivadas. Los datos recogidos se muestran a través de una pantalla LCD, permitiendo al usuario la elección de las unidades en las que va a realizarse la medición.

Por otro lado, la brújula digital integrada puede realizar un seguimiento y registro tanto de la dirección del viento como de la velocidad del mismo. Dichos valores de la dirección del viento se muestran en grados y en puntos cardinales.

- Velocidad del viento (actual, máxima y promedio).
- dirección del viento, viento cruzado, viento en contra / viento en cola.
- Medición de la temperatura.

- La temperatura de sensación equivalente frío
- Índice de calor.
- Medición de la humedad relativa.
- Punto de rocío calculado y las lecturas de temperatura de bulbo húmedo.
- Medición de la presión barométrica.
- La altitud y la medición de la densidad de altitud.
- Brújula digital.
- Hora y fecha.
- Máximo, mínimo y promedio de los valores.

3.3. Realización de los ensayos

3.3.1. Descripción general del proceso

Una vez definido el marco de características anteriormente descritas, los ensayos se llevaron a cabo a partir de la colocación del anemómetro portátil marca *Kestrel* modelo 4500 *Pocket Weather Tracker* mostrado en la figura 3.3, a lo largo de diferentes puntos del eje longitudinal del vehículo, equidistantes entre sí 25 cm en la delantera del coche y 35 cm desde el final de la luna delantera hacia la parte posterior del mismo, con el fin de que este registrase los valores de los diferentes parámetros referentes al flujo de aire circundante al automóvil, tales como velocidad del viento, velocidad y dirección del viento lateral y velocidad del viento de cola, así como temperatura ambiente y presión, además de una serie de parámetros no determinantes para el presente estudio que se detallarán a lo largo del proyecto.



Figura 3. 3 Kestrel modelo 4500 Pocket Weather Tracker.

Una vez finalizados los ensayos, los datos registrados por el *Kestrel 4500* fueron transferidos a un ordenador mediante el software de control propio del anemómetro, el *Kestrel Communicator*, para su posterior tratamiento y análisis.

3.3.2. Sistema de sujeción del equipo de medición

Uno de los detalles referidos a una de las funcionalidades del anemómetro que hubo de tenerse muy en cuenta durante el desarrollo de los ensayos fue el relativo a la obtención de la dirección del viento por parte del Kestrel 4500. Dicho modelo de anemómetro ^[5] está diseñado sobretodo para medir la dirección del viento, por lo que el componente de la brújula digital está alineado para funcionar con el Kestrel Meter en posición vertical, en la misma orientación utilizada cuando se mide el viento. Como en el caso de todas las brújulas, el componente de la brújula tiene que estar plano para que las lecturas sean precisas, por lo tanto, con el fin de maximizar la precisión de las lecturas de la brújula, el Kestrel 4500 debe estar colocado tan cerca de la vertical como sea posible cuando se emplea cualquier dirección relacionada con la brújula (dirección, viento de través y en contra, calibración).

Debido a ello, la sujeción del anemómetro a la carrocería del vehículo se presentó como la primera dificultad a resolver al inicio de los ensayos, puesto que el diseño del mismo presenta un perfil curvilíneo al que resultaba complicado adherir la unidad de medida, por lo que resultó necesaria la búsqueda de un sistema de anclaje que aportara tanto una elevada adherencia a la carrocería como la posibilidad de mantener el equipo en posición vertical. Se barajaron múltiples opciones tales como la construcción de una base especial, funda o carcasa que posibilitase sujetar la misma directamente a la superficie del vehículo, sujeción mediante tirantes o cintas desde el anemómetro a los laterales del coche o incluso situarlo directamente sobre la carrocería mediante algún tipo de cinta o adhesivo especial. Dichos métodos fueron desechados puesto que al ponerlos en práctica se detectaron irregularidades tales como la falta de verticalidad durante el intervalo de medida y sobretodo, la presencia de altas vibraciones en el equipo una vez que el vehículo iniciaba la marcha, lo que hizo temer que el sistema de agarre unido al instrumento, no soportasen las presiones producidas por el flujo de aire alrededor del vehículo una vez que este alcanzase la velocidad de medición a 90 km/h.

Dichas observaciones a la hora de comenzar los ensayos sirvieron para definir de forma concreta los requisitos que debía cumplir el conjunto formado por el anemómetro y el sistema de sujeción:

- Manejo sencillo, rápido y práctico.
- Mínima altura desde el punto de agarre en la carrocería hasta las aspas del anemómetro.
- Bajo peso.
- Sistema de agarre firme y de alta resistencia.
- Sistema de adherencia no fijo que permitiese un cambio rápido de posición.
- No agresivo para la superficie del vehículo.
- Capacidad de mantener la posición vertical durante el proceso de toma de datos.

Con dicho listado de características se buscó en el mercado un producto que se adaptase a las necesidades surgidas durante los ensayos, escogiéndose finalmente un soporte universal de Smartphone y GPS para automóvil que cubría dichos requisitos. Se trata de un modelo de la marca italiana *Cellular Line The Original*, mostrado en la figura 3.4 y cuyas características técnicas se detallan a continuación:



Figura 3. 4 Soporte empleado para el anemómetro.

- Carcasa con aletas laterales regulables desde 45 mm hasta 195 mm.
- Pulsador para abrir automáticamente las aletas.

- Cabezal con giro de 180° para orientar la unidad.
- Brazo flexible de alta resistencia de 96 mm de longitud que reduce al mínimo las vibraciones.
- Sistema de adhesión a través de ventosa de alta adherencia con lengüeta “easy-lift” que facilita el cambio de posición.

Como resultado de dicha diseño, se logró asegurar el agarre de la unidad a la carrocería del vehículo y el mantenimiento de la misma en posición vertical al doblar el brazo flexible en ángulo de 90° , tal y como puede observarse en la figura 3.5.



Figura 3. 5 Sistema de sujeción del equipo.

3.3.3. Esquema de medición

Con el objetivo de determinar las acciones aerodinámicas en el exterior del vehículo en movimiento, se creó un esquema de puntos de medida que garantizase la obtención de una amplia densidad de información. Dichos resultados serían la base para el estudio, caracterización y análisis del flujo circundante al vehículo a la vez que permitirían establecer conclusiones acerca del comportamiento aerodinámico del vehículo escogido.

Una amplia gama de datos implicaba establecer puntos de medida próximos unos a otros para poder obtener un perfil de velocidades continuo en torno al coche, por lo tanto quedó establecido que las posiciones de toma de datos estarían situadas en el eje longitudinal del vehículo y equidistantes entre sí 25 cm (medidos en el contorno) hasta el comienzo del techo solar; 35 cm desde el comienzo del techo hasta el final del mismo y de nuevo cada 25 cm en la trasera del vehículo, tal y como indica el esquema de la figura 3.6. De esta forma, se obtenían dieciocho puntos de análisis quedando cubierto el contorno del vehículo a lo largo de todo el eje central y contando con abundante información para el análisis posterior.

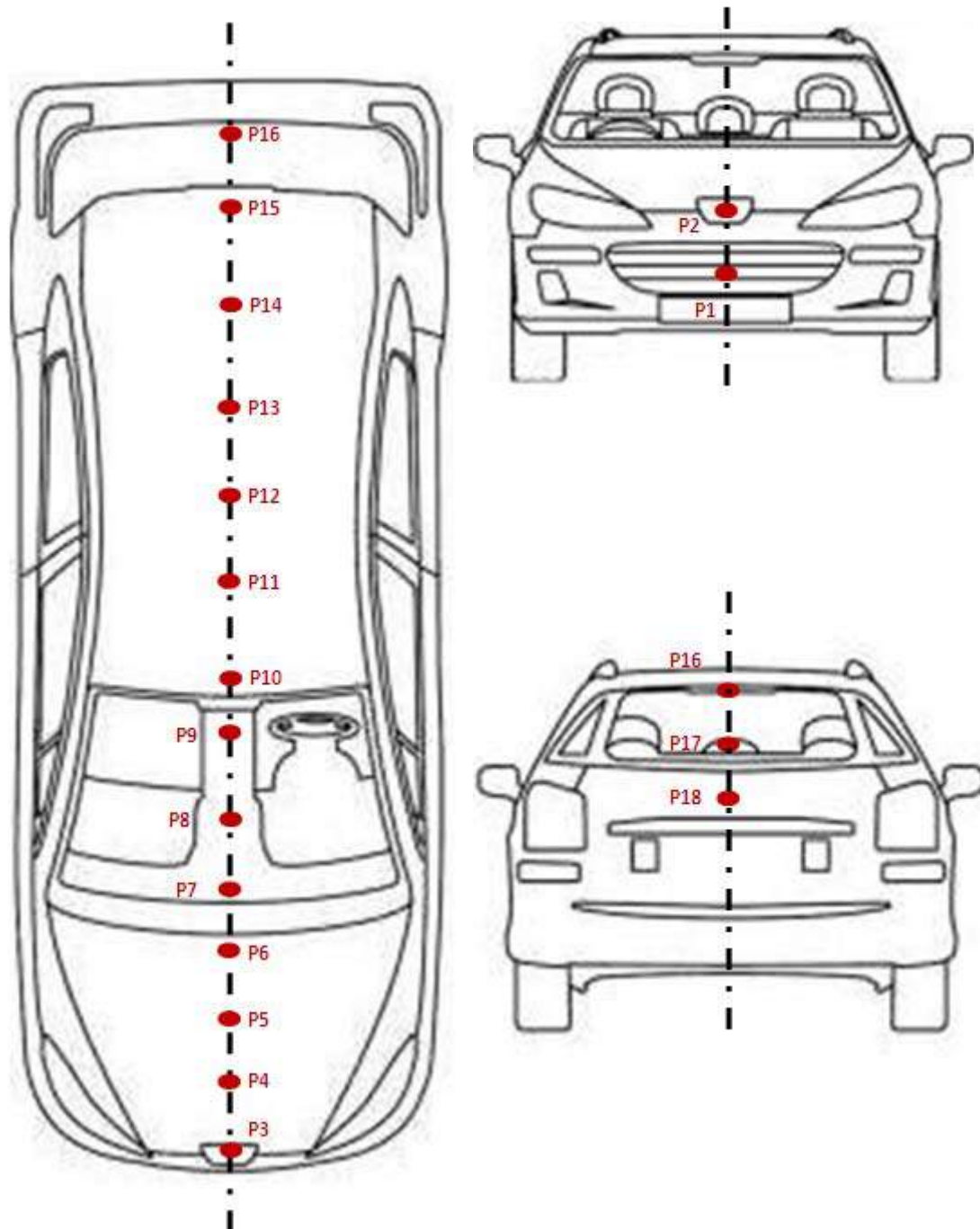


Figura 3. 6 Esquema de posiciones de ensayo.

3.3.4. Configuración del equipo

Un paso previo a realizar antes de comenzar los ensayos a pie de pista, fue la configuración inicial del equipo para el correcto funcionamiento de la brújula. Dicha configuración requería establecer si las medidas registradas por el mismo serían en función del norte magnético o el norte geográfico.

El modelo empleado de anemómetro, como cualquier otra brújula, localiza el norte magnético pero sin embargo es capaz de mostrar el norte geográfico si se programa la variación para la situación escogida. El “norte geográfico” es el eje septentrional de rotación de la Tierra y es el punto donde las líneas de longitud convergen en los mapas. Por otro lado, se define “norte magnético” como el punto de la superficie de la tierra donde su campo magnético apunta directamente hacia abajo. El norte magnético no coincide exactamente con el norte geográfico y su ubicación cambia con el tiempo, denominándose “variación” o “declinación” a la diferencia entre el norte magnético y el norte geográfico. Los valores de dicho parámetro pueden obtenerse a través de Internet, en el sitio web de la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos) y a él se recurrió para obtener la información necesaria que requería la configuración del equipo.

Los valores de latitud y longitud pueden obtenerse fácilmente mediante un dispositivo GPS, o de no disponer de él, a través de la herramienta Google Maps. Tras definir la localización en la que se va a realizar la calibración del equipo, se ejecuta en dicha web el comando que aparece en el recuadro rojo de la figura 3.7, que devuelve como resultado los valores de latitud y longitud en grados decimales, mostradas en el mensaje “Mensaje de usuario de Explorer” de la misma figura. Las coordenadas obtenidas como resultado, latitud 40’4397 N grados decimales y longitud -3’6393 W grados decimales, se contrastaron con las coordenadas proporcionadas por un GPS para confirmar la validez de las mismas.

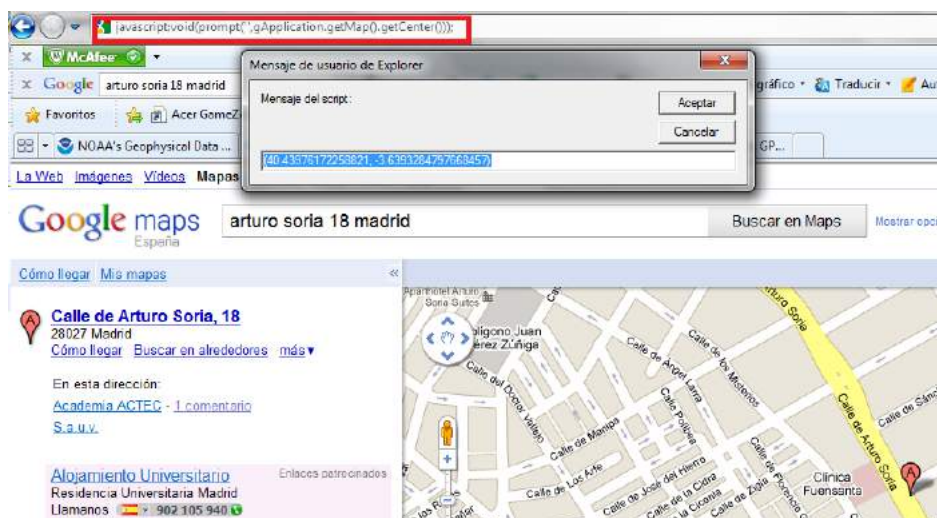


Figura 3. 7 Obtención de las coordenadas para la calibración del anemómetro.

La localización geográfica del área de Madrid en la que se llevó a cabo la configuración del equipo se indica en el mapa de la figura 3.8.

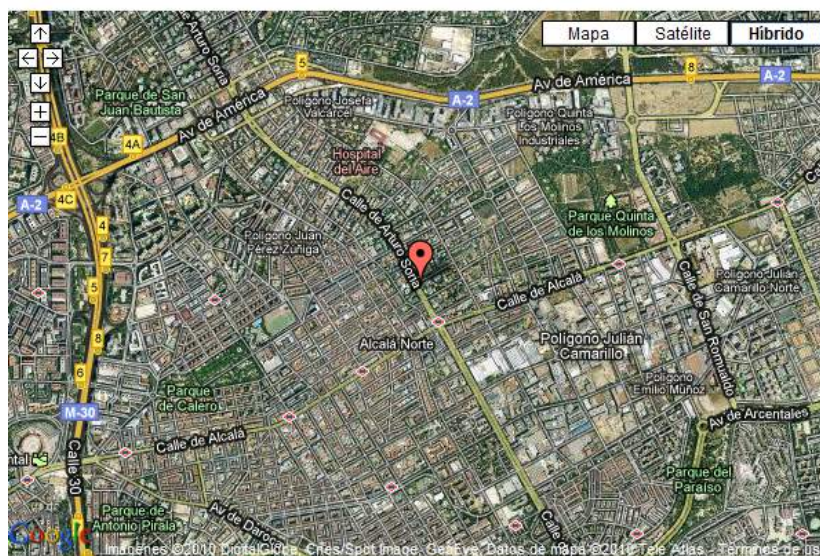


Figura 3. 8 Lugar geográfico de configuración del equipo.

Posteriormente se realizó la conversión a grados, minutos y segundos de las coordenadas deseadas (latitud $40^{\circ} 26' 23''$, longitud $-3^{\circ} 38' 21''$) para poder introducirlos en la página web de la NOAA, tal y como se observa en la figura 3.9.

Conversor de Coordenadas	Decimal	Grados, Minutos y Segundos
Latitud (I):	40.439761722	40° 26' 23.1432"
Longitud (L):	-3.639328479	-3° 38' 21.5802"

Figura 3.9 Conversión de unidades.

Dichos valores fueron los empleados en el cálculo de la declinación^[15] a través del enlace <http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/struts/calcDeclination>, el cual se muestra redondeado en verde en la figura 3.10 y que proporcionó un valor de dicho parámetro de 1° 17' W, equivalente a 1'2833 W grados decimales.



Figura 3.10 Cálculo de la declinación.

Resultado con el cual fue programada la unidad de medida con el fin de que los valores registrados lo fueran con respecto al norte geográfico. Para ello, se accedió a la pantalla de Dirección del viento, y se seleccionó la opción “modo” pulsando el botón de inicio central (■) del teclado del equipo para poder escoger entre los modos Magnético y Geográfico mediante los pulsadores de dirección señalados mediante flechas. Una vez quedó definido el modo de referencia, con los pulsadores de dirección vertical se seleccionó la opción “declinación” y se ajustó al valor deseado con las flechas laterales.

Tras establecer el punto de referencia, se procedió al ajuste de las unidades de medida que emplearía el equipo a través del menú “Unidades” del mismo, para lo cual sólo fue necesario desplazarse a través del menú mediante los pulsadores indicados con las flechas y seleccionar la unidad de medida deseada. Así mismo, a través del menú “Memoria” del anemómetro se definió la “tasa” o ritmo de almacenamiento de datos, es decir, la frecuencia a la cual se almacenan en el

equipo de forma automática los conjuntos de datos, que en el caso del presente proyecto quedó establecida en 2 s. Finalmente y antes de comenzar las pruebas, se sincronizó un cronómetro con el reloj del equipo para asegurar la equivalencia de tiempos entre los tramos de tiempo medidos desde el interior del vehículo y los intervalos de datos registrados por el anemómetro.

Una vez concluido el proceso de configuración sólo quedaba tomar las lecturas dadas por el anemómetro, para lo cual tan sólo era necesario mantener la unidad en posición vertical y apuntar la parte trasera de la misma hacia la dirección en la que se iba a desarrollar la prueba.

3.3.5. Metodología de los ensayos

Una vez se hubieron establecido las condiciones de los ensayos, configurado el equipo antes de la toma de datos, seleccionado y probado el sistema de soporte y por supuesto, definido el esquema de puntos a lo largo del eje longitudinal del vehículo, la metodología a seguir para la obtención de resultados fue la misma para cada una de las diferentes posiciones del eje longitudinal.

Empezando desde el frontal del vehículo (en este caso el punto central de la parrilla de ventilación del coche), hasta el punto más bajo de la trasera del mismo, el anemómetro fue desplazado a lo largo del eje hasta completar el recorrido, registrando los valores de los parámetros deseados en su memoria para cada una de las diferentes posiciones.

La rutina a seguir para cada una de las pruebas consistió en una serie de procedimientos de preparación en los que era necesario presentar una cuidadosa atención puesto que de su correcta ejecución dependerían tanto la validez de los datos registrados como el correcto funcionamiento posterior del equipo. Inicialmente, y debido a la delicadeza de la unidad, era necesario asegurar una absoluta limpieza de la carrocería antes de colocar la ventosa del soporte en su superficie, garantizando así la máxima adherencia y minimizando en todo lo posible el riesgo de despegue del equipo durante el proceso de medición. Por lo tanto, cada una de las pruebas comenzaba con la limpieza y adhesión del soporte al punto de medida. Seguidamente, se apuntaba la parte trasera del equipo en la dirección de medida y a partir de dicho momento el anemómetro comenzaba a registrar datos cada 2s. Con la misma orientación (parte trasera del mismo apuntando al frente), se encastraba la unidad en el cabezal del soporte de agarre

asegurando su correcto ajuste y comprobando la posición vertical del mismo, concluyendo así las acciones de colocación del equipo. A partir de este momento, se inicia la marcha del vehículo hasta alcanzar un movimiento rectilíneo uniforme a velocidad constante de 90 km/h, siempre y cuando el entorno cumpla todas las condiciones establecidas para el ensayo e indicando la hora de inicio y finalización del tramo de prueba rectilíneo. Los datos registrados por el anemómetro durante el período de circulación en tramo recto será la información válida para el análisis posterior. Al finalizar el ensayo en cada uno de los puntos del eje central, se estacionaba el vehículo en una zona habilitada para ello y se procedía la repetición del proceso de colocación del equipo en el siguiente punto de ensayo, desarrollando la misma dinámica de ejecución empleada en el ensayo precedente, y así hasta desarrollar los dieciocho ensayos correspondientes a los dieciocho puntos en los que había sido subdividido el eje longitudinal del vehículo.

3.4. Adquisición de datos

Según manual del equipo, la memoria interna del anemómetro, con una frecuencia de medición cada 2s, contaría con una capacidad de almacenamiento en tiempo próxima a los 47 minutos, lo que equivaldría a un registro de información alrededor de los 1.410 datos.

Puesto que el método de registro de datos por parte de la unidad de medida es continuo una vez puesto en marcha, se hace imprescindible señalar que el equipo comenzaba el almacenamiento de datos desde su encendido hasta el estacionamiento del vehículo para comenzar los preparativos del siguiente ensayo. Debido a ello, mucha información de la almacenada no cumplía los criterios establecidos para los ensayos con anterioridad pero ocupaba, inevitablemente, una gran cantidad de memoria. Dicha información se corresponde con intervalos de incorporación a la vía, tramos de abandono de la misma, tramos de recorrido con curvas, con presencia en las cercanías de vehículos pesados, densidad elevada de tráfico, etc. Como consecuencia, la memoria se completó en varias ocasiones durante la jornada de realización de los ensayos, ya que cada 3-4 pruebas aproximadamente, la memoria se llenaba y había que recurrir al volcado de datos a un PC para liberar la misma y poder proseguir con los ensayos.

Para la transferencia y almacenamiento de datos a largo plazo desde el *Kestrel 4500* al ordenador, se recurrió a un accesorio externo del anemómetro, el *Kestrel USB Interface*

acompañado de su propio software de comunicación. Se trata de una interfaz de soporte, mostrada en la figura 3.11, dotada de un sensor óptico en la que se acopla el anemómetro y con conexión a un cable USB que posibilita la transferencia de datos desde el equipo al PC.



Figura 3. 11 Interfaz de acople del Kestrel 4500 con conexión USB.

El funcionamiento de dicha interfaz de acople precisó la instalación del software de comunicación en el PC a partir del CD proporcionado por el fabricante, y una vez finalizada la configuración del mismo, sólo hubo de conectarse el extremo del cable serie con los pines del conector de la interfaz y el otro extremo del cable a un puerto USB disponible en el PC. Tras encender el anemómetro y encajarlo en la unidad de comunicación, el equipo estaría listo para iniciar la transferencia de datos, siendo la pantalla mostrada en la figura 3.12 la pantalla de inicio que se obtendría una vez iniciado el arranque del programa de comunicación.



Figura 3. 12 Pantalla de inicio del software de control.

3.5. Control del software de comunicación

3.5.1. Transferencia de datos desde el Kestrel 4500 al PC

Para iniciar la transferencia de datos^[5] desde el *Kestrel 4500* al PC se seleccionará “Load from Kestrel Tracker”, opción redondeada en verde en la figura 3.13 que almacenará los datos en el ordenador, mientras que el puerto de comunicación señalado en la pestaña “COM Port” lo establece el programa de forma automática, por lo que no es necesaria su configuración. Tras seleccionar el inicio de la transferencia de datos, el programa lanzará la pantalla de la figura 3. , en la que se muestra el progreso del almacenamiento.

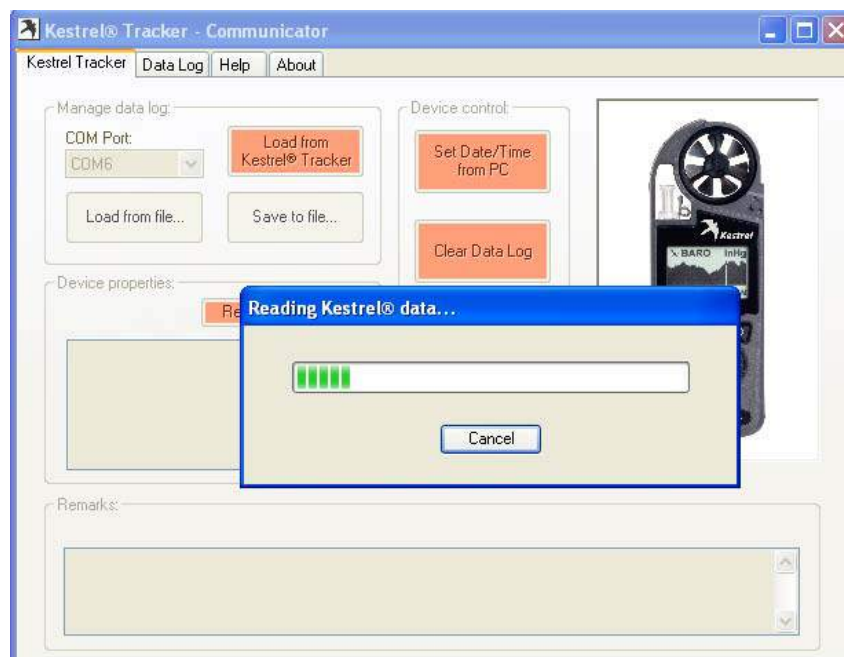


Figura 3. 13 Avance de transferencia de datos.

Una vez completado el proceso de transferencia, se mostrará en el lado derecho de la pantalla el modelo de equipo con el que se está llevando a cabo la comunicación, tal y como se comprueba en la figura 3.14, a la vez que los datos registrados por el Kestrel 4500 ya aparecerán en la pestaña “Data Log” señalada en verde en la figura 3.14.

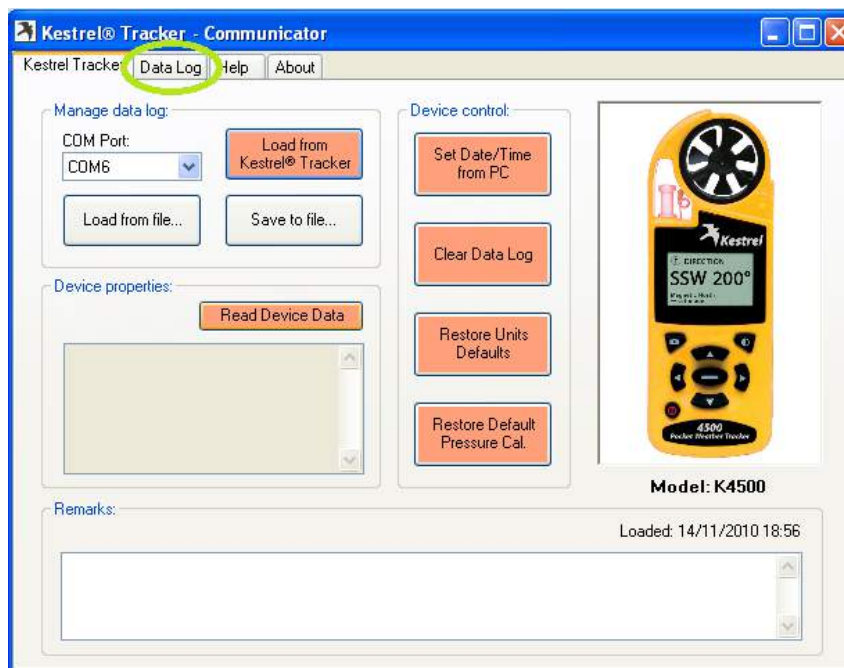
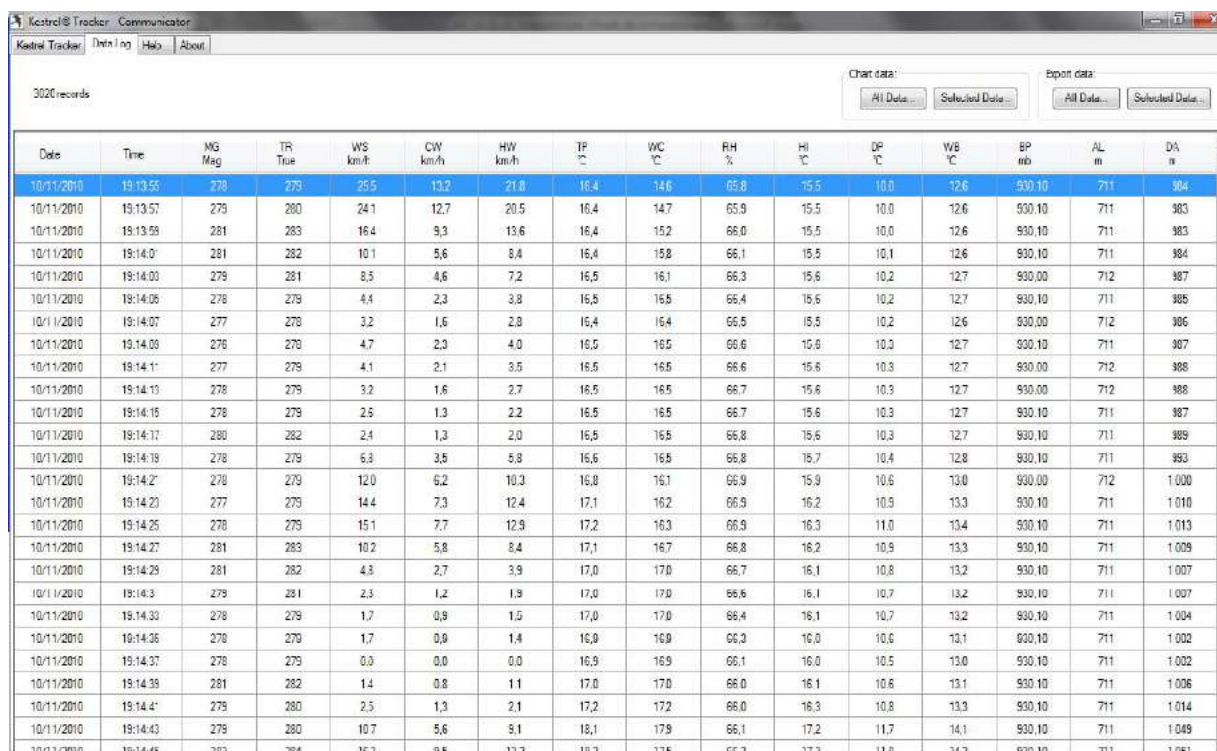


Figura 3. 14 Transferencia de datos completada.

A través de dicha pestaña se comprueba que el *Kestrel 4500* está configurado para mostrar las trece mediciones mostradas en la figura 3.15, algunas de las cuales son cálculos, como el viento de través y el viento de cola, que la unidad calcula de forma automática a partir de la dirección en la que se ha orientado el anemómetro al comienzo del ensayo y el valor de la velocidad del viento registrada por el equipo.



Date	Time	MG Mag	TR True	WS km/h	CW km/h	HW km/h	TP °C	WC °C	RH %	HI °C	DP °C	WB °C	BP mb	AL m	DA m
10/11/2010	19:13:55	278	275	25.5	13.2	21.0	16.4	14.6	65.8	15.5	10.0	12.6	930.10	711	904
10/11/2010	19:13:57	279	280	24.1	12.7	20.5	16.4	14.7	65.9	15.5	10.0	12.6	930.10	711	903
10/11/2010	19:13:59	281	283	16.4	9.3	13.6	16.4	15.2	66.0	15.5	10.0	12.6	930.10	711	903
10/11/2010	19:14:00	281	282	10.1	5.6	8.4	16.4	15.8	66.1	15.5	10.1	12.6	930.10	711	904
10/11/2010	19:14:03	279	281	8.5	4.6	7.2	16.5	16.1	66.3	15.6	10.2	12.7	930.00	712	907
10/11/2010	19:14:06	278	279	4.4	2.3	3.8	16.5	16.5	66.4	15.6	10.2	12.7	930.10	711	905
10/11/2010	19:14:07	277	278	3.2	1.6	2.8	16.4	16.4	66.5	15.5	10.2	12.6	930.00	712	906
10/11/2010	19:14:09	276	278	4.7	2.3	4.0	16.5	16.5	66.6	15.6	10.3	12.7	930.10	711	907
10/11/2010	19:14:11	277	279	4.1	2.1	3.5	16.5	16.5	66.6	15.6	10.3	12.7	930.00	712	908
10/11/2010	19:14:13	278	279	3.2	1.6	2.7	16.5	16.5	66.7	15.6	10.3	12.7	930.00	712	908
10/11/2010	19:14:15	278	279	2.6	1.3	2.2	16.5	16.5	66.7	15.6	10.3	12.7	930.10	711	907
10/11/2010	19:14:17	280	282	2.4	1.3	2.0	16.5	16.5	66.8	15.6	10.3	12.7	930.10	711	909
10/11/2010	19:14:19	278	279	6.8	3.6	5.8	16.6	16.6	66.8	15.7	10.4	12.8	930.10	711	903
10/11/2010	19:14:21	278	279	12.0	6.2	10.3	16.8	16.1	66.9	15.9	10.6	13.0	930.00	712	1000
10/11/2010	19:14:23	277	275	14.4	7.3	12.4	17.1	16.2	66.9	16.2	10.9	13.3	930.10	711	1010
10/11/2010	19:14:25	278	279	15.1	7.7	12.9	17.2	16.3	66.9	16.3	11.0	13.4	930.10	711	1013
10/11/2010	19:14:27	281	283	10.2	5.8	8.4	17.1	16.7	66.8	16.2	10.9	13.3	930.10	711	1009
10/11/2010	19:14:29	281	282	4.3	2.7	3.9	17.0	17.0	66.7	16.1	10.8	13.2	930.10	711	1007
10/11/2010	19:14:31	279	281	2.3	1.2	1.9	17.0	17.0	66.6	16.1	10.7	13.2	930.10	711	1007
10/11/2010	19:14:33	278	279	1.7	0.9	1.5	17.0	17.0	66.4	16.1	10.7	13.2	930.10	711	1004
10/11/2010	19:14:35	278	279	1.7	0.9	1.4	16.9	16.9	66.3	16.0	10.6	13.1	930.10	711	1002
10/11/2010	19:14:37	278	279	0.0	0.0	0.0	16.9	16.9	66.1	16.0	10.5	13.0	930.10	711	1002
10/11/2010	19:14:39	281	282	1.4	0.8	1.1	17.0	17.0	66.0	16.1	10.6	13.1	930.10	711	1006
10/11/2010	19:14:41	279	280	2.5	1.3	2.1	17.2	17.2	66.0	16.3	10.8	13.3	930.10	711	1014
10/11/2010	19:14:43	279	280	10.7	5.6	9.1	18.1	17.9	66.1	17.2	11.7	14.1	930.10	711	1049
10/11/2010	19:14:45	283	284	16.3	8.5	13.2	18.2	17.8	66.2	17.3	11.8	14.2	930.10	711	1061

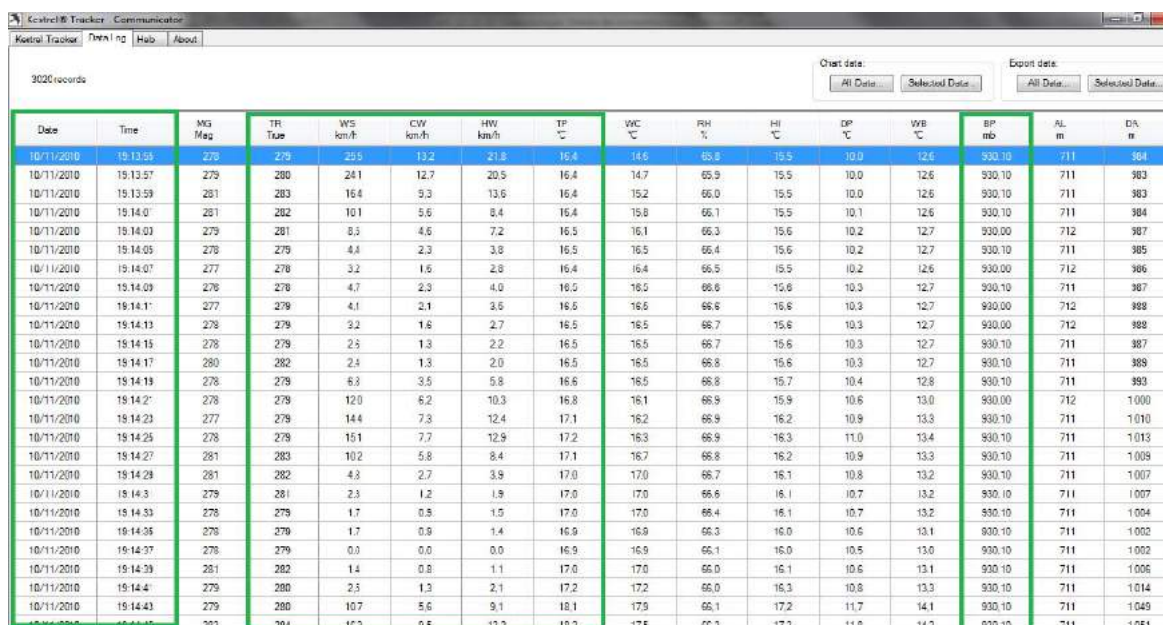
Figura 3. 15 Tabla de datos almacenados en el programa.

A continuación se detalla el significado de las siglas de cada una de las columnas de la figura anterior:

- MG Mag: dirección del viento con respecto al Norte Magnético.
- MG True: dirección del viento con respecto al Norte Geográfico.
- WS km/h: valor de la velocidad del viento, medida en km/h.
- CW km/h: valor de la velocidad del viento de través, calculada en km/h.
- HW km/h: valor de la velocidad del viento en contra/ de cola, calculada en km/h.
- TP °C: valor de la temperatura, en grados Celsius.
- WC °C: valor de la sensación térmica, en grados Celsius.

- RH %: valor de la humedad relativa, porcentaje.
- HI °C: valor del índice de calor, en grados Celsius.
- DP °C: valor de la temperatura punto de rocío, en grados Celsius.
- WB °C: valor de la temperatura del bulbo húmedo, en grados Celsius.
- BP mb: valor de la presión barométrica, medida en mb.
- AL m: valor de la altitud en el momento del registro, medida en m.
- DA m: valor de la altitud de densidad en el momento del registro, medida en m.

De entre las trece mediciones almacenadas en la unidad, se consideraron para el desarrollo del análisis los parámetros que resultaban imprescindibles para el estudio aerodinámico, fueron: Norte Geográfico y Velocidad del viento. Como información adicional se emplearon Velocidad del viento de través y Velocidad del viento de cola, todos ellos recuadrados en verde en la figura 3. Como datos de interés general a la hora de enmarcar los ensayos en un entorno exterior, además de con el objetivo de estudiar su posible influencia en las acciones aerodinámicas del vehículo, se seleccionaron los parámetros de Temperatura y Presión Barométrica, también resaltados en verde en la figura 3.16..



Date	Time	NS Mag	TR True	WS km/h	CW km/h	HW km/h	TP °C	WC °C	RH %	HI °C	DP °C	WB °C	BP mb	AL m	DA m
10/11/2010	15:13:55	270	279	25.5	13.2	21.8	10.4	14.6	65.8	15.5	10.0	12.6	930.10	711	984
10/11/2010	15:13:57	279	280	24.1	12.7	20.5	16.4	14.7	65.9	15.5	10.0	12.6	930.10	711	983
10/11/2010	15:13:59	281	283	16.4	9.3	13.6	16.4	15.2	66.0	15.5	10.0	12.6	930.10	711	983
10/11/2010	15:14:01	281	282	10.1	5.6	8.4	16.4	15.8	66.1	15.5	10.1	12.6	930.10	711	984
10/11/2010	15:14:03	279	281	8.5	4.6	7.2	16.5	16.1	66.3	15.6	10.2	12.7	930.00	712	987
10/11/2010	15:14:05	278	279	4.4	2.3	3.8	16.5	16.5	66.4	15.6	10.2	12.7	930.10	711	985
10/11/2010	15:14:07	277	278	3.2	1.6	2.8	16.4	16.4	66.5	15.5	10.2	12.6	930.00	712	986
10/11/2010	15:14:09	276	278	4.7	2.9	4.0	16.5	16.5	66.6	15.6	10.3	12.7	930.10	711	987
10/11/2010	15:14:11	277	279	4.1	2.1	3.6	16.6	16.6	66.6	15.6	10.3	12.7	930.00	712	988
10/11/2010	15:14:13	278	279	3.2	1.6	2.7	16.5	16.5	66.7	15.6	10.3	12.7	930.00	712	988
10/11/2010	15:14:15	278	279	2.9	1.3	2.2	16.5	16.5	66.7	15.6	10.3	12.7	930.10	711	987
10/11/2010	15:14:17	280	282	2.4	1.3	2.0	16.5	16.5	66.8	15.6	10.3	12.7	930.10	711	989
10/11/2010	15:14:19	278	279	6.3	3.5	5.8	16.6	16.5	66.8	15.7	10.4	12.8	930.10	711	993
10/11/2010	15:14:21	278	279	12.0	6.2	10.3	16.8	16.1	66.9	15.9	10.6	13.0	930.00	712	1000
10/11/2010	15:14:23	277	279	14.4	7.3	12.4	17.1	16.2	66.9	16.2	10.9	13.3	930.10	711	1010
10/11/2010	15:14:25	278	279	15.1	7.7	12.9	17.2	16.3	66.9	16.3	11.0	13.4	930.10	711	1013
10/11/2010	15:14:27	281	283	10.2	5.8	8.4	17.1	16.7	66.8	16.2	10.9	13.3	930.10	711	1009
10/11/2010	15:14:28	281	282	4.3	2.7	3.9	17.0	17.0	66.7	16.1	10.8	13.2	930.10	711	1007
10/11/2010	15:14:31	279	281	2.3	1.2	1.9	17.0	17.0	66.6	16.1	10.7	13.2	930.10	711	1007
10/11/2010	15:14:33	278	279	1.7	0.9	1.5	17.0	17.0	66.4	16.1	10.7	13.2	930.10	711	1004
10/11/2010	15:14:35	278	279	1.7	0.9	1.4	16.9	16.9	66.3	16.0	10.6	13.1	930.10	711	1002
10/11/2010	15:14:37	278	279	0.9	0.0	0.0	16.9	16.9	66.1	16.0	10.6	13.0	930.10	711	1002
10/11/2010	15:14:39	281	282	1.4	0.8	1.1	17.0	17.0	66.0	16.1	10.6	13.1	930.10	711	1006
10/11/2010	15:14:41	279	280	2.5	1.3	2.1	17.2	17.2	66.0	16.3	10.8	13.3	930.10	711	1014
10/11/2010	15:14:43	279	280	10.7	5.6	9.1	18.1	17.9	66.1	17.2	11.7	14.1	930.10	711	1049
10/11/2010	15:14:45	281	284	16.3	8.8	13.3	18.2	17.5	66.1	17.3	11.8	14.2	930.10	711	1051

Figura 3. 16 Parámetros de interés.

Con el fin de asegurar el correcto almacenamiento de los datos en el ordenador, desde la consola principal del programa, en la pestaña "Kestrel Tracker", mostrada en la figura 3.17, se selecciona el botón "Save to file" señalado en verde, que desplegará la pantalla que permitirá guardar el programa con extensión .xml. Una vez almacenado el archivo .xml en el PC, para volver acceder a ellos, desde la consola principal del Kestrel Communicator, bastará con seleccionar el botón "Load from File", buscar el archivo .xml en el directorio en el que se haya guardado, y abrirlo. Automáticamente se producirá la carga de los datos archivados en la pestaña "Data Log", donde se podrá acceder al manejo y análisis de los mismos.

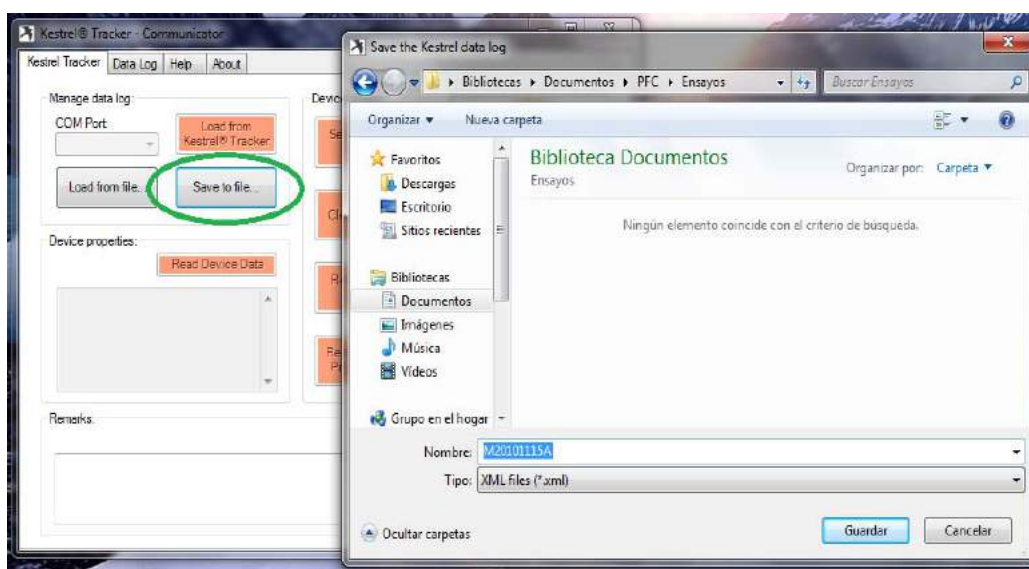


Figura 3.17 Almacenamiento de datos

3.6. Herramientas complementarias al estudio

3.6.1. Túnel de viento

Los primeros estudios aerodinámicos sobre automóviles ^[9] se llevaron a cabo en los años treinta, pero no fue hasta los años setenta cuando comenzó a potenciarse el diseño de los coches con la eficiencia aerodinámica en mente. El desempeño aerodinámico de un vehículo está directamente relacionado con su rendimiento y estabilidad y es una de las claves en la reducción del consumo de combustible, por lo que a mediados de la década de los setenta los principales fabricantes de automóviles empezaron a construir enormes túneles de viento.

A pesar de no ser tan exclusivo ni secreto como el túnel de viento de la marca Ferrari, la enorme instalación que General Motors inauguró en 1980 compensa cualquier fallo con su enorme tamaño, puesto que es uno de los mayores túneles de viento del mundo. Está operativo prácticamente las 24 horas del día y en él se estudia y optimiza la aerodinámica de los futuros lanzamientos de la casa, primero sobre moldes de arcilla y posteriormente sobre modelos a escala real de los vehículos.



Figura 3. 18 Turbina



Figura 3. 19 Aspas de la turbina



Figura 3. 20 Interior de la cámara de ensayos.

Las instalaciones principales que acogen al gigantesco túnel se dividen en dos partes, el túnel de viento y la cámara de pruebas. Cabe destacar el aislamiento de las paredes del túnel de viento, que tienen un aislamiento sonoro ejemplar, con un grosor mínimo de los aislantes de 30 cm, lo que asegura silencio de cara al exterior y de cara al personal técnico que trabaja en la cámara de pruebas, doblemente aislados en una cabina insonorizada.

El túnel de viento está formado por un enorme ventilador, figuras 8. Y 8., con sistema de admisión de aire y un túnel que canaliza el aire hacia la cámara de pruebas, figura 8.. La enorme turbina mide casi 10 metros de diámetro, y sus seis aspas de una tonelada de peso cada una

tienen una longitud de 4 metros. Propulsada por un motor eléctrico de 4.500 CV de potencia, es capaz de girar a un máximo de 270 rpm, lo que provoca una velocidad de los extremos de las aspas a máxima potencia de 664 km/h. Antes de alcanzar la cámara de pruebas, el aire es “ordenado” por una red de aluminio y se modifica su temperatura hasta alcanzar los 22 grados centígrados, una temperatura óptima para las pruebas.

En la cámara de pruebas se sitúa el centro de la acción ^[10], donde los ingenieros monitorizan directamente el vehículo objeto del análisis a la vez que controlan remotamente los flujos de aire que llegan desde la turbina. El coche a estudiar y optimizar se sitúa sobre una plataforma móvil, con la que se puede analizar fácilmente el efecto de un viento lateral de alta velocidad y adaptar las condiciones de la vida real a un laboratorio.

Para tener una representación visible del flujo de aire que impacta contra el coche se “colorea” parte de ese aire con una sustancia sintética llamada propilenglicol, lo que acaba conformando un pequeño flujo visible de viento tal y como se observa en la figura 3.21.



Figura 3. 21 Mercedes E Coupé con coeficiente aerodinámico 0,24.

*Figura 3. 22 Audi A6.**Figura 3. 23 Chervrolet Volt*

3.6.2. Dinámica de fluidos computacional (CFD)

3.6.2.1. Introducción

La dinámica de fluidos computacional o CFD es el arte ^[6], más que la técnica, que intenta utilizar los ordenadores para la simulación del movimiento de los fluidos y, en ocasiones, de otros fenómenos asociados: transferencia de calor, reacciones químicas, arrastre de sólidos, etc.

Los paquetes de CFD existentes en el mercado son lo suficientemente potentes y fáciles de utilizar como para que resulte rentable su utilización a nivel industrial. Sus beneficios vienen principalmente de la reducción del número de ensayos experimentales necesarios y del tiempo de desarrollo.

También pueden proporcionar bastante información complementaria del comportamiento detallado, que resulta muy difícil conocer experimentalmente. Un valor añadido es poder poner en el producto la etiqueta de "Diseñado con ayuda del ordenador", y la facilidad para generar dibujos espectaculares, que estimulan la "compra" del producto.

Con la proliferación de programas comerciales, un número creciente de técnicos ha entrado en contacto con estos métodos. Sin embargo, frecuentemente no se conocen bien las características que tiene el CFD, y por ello, los resultados a los que se llegan pueden no ser correctos, ni útiles. Por ello, se ha hecho muy importante para el manejo de CFD, la formación en dinámica de fluidos y el conocimiento de la filosofía, capacidades y limitaciones del sistema.

3.6.2.2. Utilidad

El software de CFD ^[8] busca el cálculo detallado del movimiento de los fluidos por medio de la utilización del ordenador para la resolución de las ecuaciones matemáticas que expresan las leyes por las que se rigen. En los resultados de estas técnicas, junto con el movimiento y la presión, pueden obtenerse las variaciones de las propiedades, las fuerzas que ejercen sobre los sólidos adyacentes, los intercambios de energía, etc.

Algunos de los campos de aplicación son:

- Aerodinámica de vehículos terrestres, aviones, entrada y salida de la atmósfera de vehículos espaciales.
- Diseño de motores de combustión, calderas, turbomáquinas (bombas, ventiladores, compresores, turbinas, etc.)
- Refrigeración de equipos eléctricos y electrónicos.
- Equipos para procesos físicos y químicos: reactores, sedimentadores, mezcladores, intercambiadores, eyectores, etc.
- Desarrollo de sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado.
- Predicción meteorológica.
- Influencia del viento sobre edificios, puentes, etc.
- Dispersión de contaminantes en la atmósfera, ríos y mares.
- Biomedicina: respiración y circulación de la sangre.
- Hidrología y oceanografía: corrientes en ríos, estuarios y océanos.
- Hidrodinámica de buques.

En general, son casos en los que resulta necesario entrar en los detalles de la dinámica de fluidos para obtener los resultados que se buscan.

Las ecuaciones que definen en cualquier punto del espacio la velocidad y presión de un fluido fueron descubiertas hace más de siglo y medio por el ingeniero francés Claude Navier y el irlandés

George Stokes. Estas ecuaciones se derivan directamente de las leyes del movimiento de Newton, y son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Las ecuaciones son las mismas para cualquier situación de flujo de fluidos. La particularización a los casos concretos viene definida por las condiciones de contorno y los valores iniciales. Por ejemplo, los cuerpos sólidos sumergidos en una corriente, o actuando como contornos exteriores van a definir por exclusión la zona del espacio en la que hay que resolver las ecuaciones, y van a introducir condiciones de contorno en la variable velocidad (velocidad nula en las paredes).

Estas ecuaciones son lo suficientemente complicadas como para que su solución analítica sólo sea posible en casos muy elementales. La utilización del ordenador para su resolución numérica es lo que ha dado origen a la dinámica de fluidos computacional o CFD. Incluso hoy día, la complejidad del cálculo y las limitaciones de los superordenadores más potentes, hacen que sea absurdo intentar utilizar las técnicas de CFD en los casos en los que otras técnicas han logrado simplificaciones adecuadas, como el cálculo de pérdidas de carga en tuberías y canales, golpe de ariete, diseño de sistemas oleohidráulicos y neumáticos, etc. También resultan impracticables para procesos muy extensos, como puede ser la simulación global de una planta química, una depuradora, o incluso un motor de explosión o una turbina de gas en su conjunto.

3.6.2.3. Ventajas e inconvenientes de los CFD

Hasta el final de los 60 ^[8], los ordenadores no alcanzaron velocidades de cálculo suficientes para resolver casos sencillos, como el flujo laminar alrededor de un obstáculo. Antes de eso, la experimentación constituía el medio básico de cálculo y desarrollo.

En la actualidad, los ensayos experimentales siguen siendo necesarios para la comprobación de diseños no excesivamente complejos. Los continuos avances en los ordenadores y algoritmos, permiten una reducción importante en el número de ensayos necesarios. El diseño típico de un modelo de ala de avión, se hace ahora con tres o cuatro ensayos en túnel aerodinámico, en vez de los diez ó quince que eran necesarios anteriormente.

Las ventajas que proporciona el análisis por CFD se pueden resumir en:

- Reducción sustancial de tiempos y costes en los nuevos diseños.

- Posibilidad de analizar sistemas o condiciones muy difíciles de simular experimentalmente: velocidades hipersónicas, temperaturas muy altas o bajas, movimientos relativos, etc.
- Capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas o más allá de sus condiciones límite de funcionamiento, por ejemplo accidentes.

Nivel de detalle prácticamente ilimitado. Los métodos experimentales son tanto más caros cuanto mayor es el número de puntos de medida, mientras que los códigos de CFD pueden generar un gran volumen de resultados sin coste añadido, y es muy fácil hacer estudios paramétricos.

Las técnicas de CFD no son baratas. En primer lugar, son necesarias máquinas de gran capacidad de cálculo y un software con precio todavía no accesible al gran público.

En segundo lugar, se necesita personal cualificado que sea capaz de hacer funcionar los programas y analizar adecuadamente los resultados.

Los desarrollos en el campo del CFD se están acercando cada vez más a los de otras herramientas de CAE como las de análisis de esfuerzos en sólidos y estructuras. El motivo del retraso es la gran complejidad de las ecuaciones y, sobre todo, la dificultad de modelizar adecuadamente la turbulencia.

El mayor inconveniente del CFD consiste en que no siempre es posible llegar a obtener resultados suficientemente precisos, y la facilidad de cometer graves errores de bulto. Esto proviene de:

La necesidad de simplificar el fenómeno a estudiar para que el hardware y software sea capaz de tratarlo. El resultado será tanto más preciso cuanto más adecuadas hayan sido las hipótesis y simplificaciones realizadas.

La limitación de los modelos existentes para la turbulencia, flujo bifásico, combustión, etc.

3.6.2.4. Resumen del método

Considérese, por ejemplo, el flujo del aire alrededor de un coche. En teoría, con las ecuaciones de Navier-Stokes, se puede calcular la velocidad y la presión del aire en cualquier punto (en un caso de flujo compresible o en el que haya transferencia de calor, también son variables a considerar la temperatura y la densidad). Esto permite calcular la resistencia aerodinámica, la adherencia al suelo de los alerones o faldones delanteros, la adecuada colocación de las tomas de aire, etc.

Junto con las ecuaciones, hay que utilizar las condiciones iniciales y de contorno referentes a las variables y las referentes a la superficie sólida. En este caso, las condiciones referentes a las variables, vienen definidas por la velocidad del coche y la presión, igual a la atmosférica en los puntos suficientemente alejados. Las condiciones de las superficies sólidas vienen definidas por la forma, expresada matemáticamente en las coordenadas adecuadas.

Para resolver las ecuaciones ^[9], el programa transformará las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas, y las resolverá únicamente en un número finito de puntos del espacio. Por eso, lo primero que hay que hacer es representar el vehículo o, más bien, su entorno mediante una malla de cálculo; cuanto mayor sea el número de puntos de esta malla, mayor será la precisión y realismo de la simulación, y más difícil de generar y resolver. En casos con geometría complicada, esta fase puede ocupar días e incluso semanas.

3.6.2.5. Discretización de las ecuaciones del flujo

Para que un ordenador pueda resolver las ecuaciones que describen el movimiento del fluido, éstas han de ser transformadas en expresiones algebraicas que sólo contengan números, combinados mediante operaciones sencillas, tales como sumar, restar y multiplicar.

La transformación de las ecuaciones diferenciales en su análogo numérico, es lo que se llama proceso de discretización numérica. Hay varias técnicas de discretización, dependiendo de los principios en que se basen. Las más usadas son: diferencias finitas, volúmenes finitos, y elementos finitos. Aquí se describirá brevemente el método de los volúmenes finitos, que es el utilizado por el programa FLUENT.

3.6.2.6. Método de los volúmenes finitos

Este método consiste ^[10], fundamentalmente, en convertir las ecuaciones diferenciales en su análogo numérico, mediante una transformación física de las ecuaciones. Por ejemplo, la ecuación de la cantidad de movimiento puede ser considerada como una serie de flujos dentro de un volumen de fluido, junto con un término de fuente que es el gradiente de presiones.

Para mostrar la discretización, se crean volúmenes finitos (particiones del espacio) en la dirección x, y se fija la atención en el volumen n-ésimo por simplicidad. En la figura se puede ver un volumen finito, o celda, típico donde el centro del volumen, punto P, es el punto de referencia en el que se quiere hallar el análogo numérico de la ecuación diferencial. Los puntos centrales de las celdas vecinas se denominan W y E (celda oeste y celda este). Las caras que delimitan la celda a un lado y a otro se denominan w y e (cara oeste y cara este).

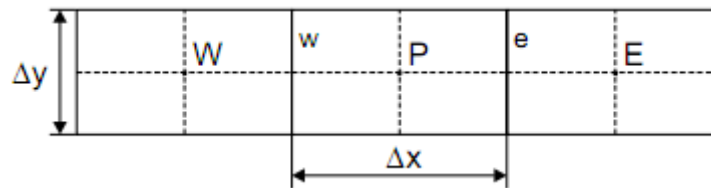


Figura 3. 24 Ejemplo de volumen finito o celda.

Supóngase que se quiere discretizar la derivada segunda siguiente:

$$\left(\frac{\partial U^2}{\partial x^2} \right)$$

Ecuación 3.1

Hay que hacerlo a partir de las derivadas primeras en las caras que limitan la celda:

$$\left(\frac{\partial U^2}{\partial x^2} \right)_P = \frac{\left(\frac{\partial U}{\partial x_e} - \frac{\partial U}{\partial x_w} \right)}{x_e - x_w}$$

Ecuación 3.2

Estas derivadas se calculan, a su vez, a partir de los valores de la variable U en los centro de las celdas vecinas:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_e = \frac{U_E - U_P}{x_E - x_P}$$

Ecuación 3.3

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_w = \frac{U_P - U_W}{x_P - x_W}$$

Ecuación 3.4

Estas expresiones son utilizadas para implementar las derivadas de las ecuaciones en una celda cualquiera. De esta manera, se puede hallar el análogo numérico de las ecuaciones diferenciales para cada volumen finito, y después resolver el sistema de ecuaciones algebraicas que resulta. De la misma manera, pueden introducirse las condiciones de contorno, añadiendo términos fuente en las ecuaciones de las celdas correspondientes.

3.6.2.7. Resolución de las ecuaciones discretizadas

Una vez discretizadas las ecuaciones diferenciales ^[6], lo que se obtiene es un sistema de ecuaciones algebraicas, que se puede escribir en notación matricial de la siguiente manera:

A es la matriz del sistema, **b** es la columna de términos independientes, y **x** es el vector incógnita. Para resolver este sistema de ecuaciones, existen dos tipos de métodos: los directos y los iterativos.

$$A \cdot x = b$$

Ecuación 3.5

Los métodos directos consisten en hallar la inversa de la matriz A. Normalmente estos métodos parten de la descomposición de la matriz A en el producto de dos matrices: L*U, una triangular superior y la otra triangular inferior, a partir de lo cual todo es teóricamente muy sencillo. Pero cuando la matriz es un poco grande estos métodos no son rentables, computacionalmente hablando.

Los métodos iterativos tratan de hallar la solución partiendo de una solución aproximada y calculando, a partir de ella, una solución más aproximada, acercándose en cada iteración a la solución real. De este tipo son los métodos de Jacobi, Gauss-Seidel, TDMA (algoritmo de la matriz tridiagonal), SIP (procedimiento implícito de Stone), CGM (método del gradiente conjugado), etc. Cada uno de ellos con sus adeptos y variantes, lo que normalmente quiere decir que van bien en unos casos y no tan bien en otros.

3.6.2.8. Dependencia del tiempo y no linealidad

Los métodos que se han comentado resuelven sistemas de ecuaciones lineales, con coeficientes constantes, y no se pueden usar directamente para resolver las ecuaciones del flujo, pues no son lineales (hay en ellas productos de variables). Además, la velocidad y la presión del fluido pueden depender del tiempo, por lo que hay que resolver todo el sistema para cada instante de tiempo. Por tanto, habrá que discretizar el tiempo, como ya se hizo con el resto de variables, y resolver el sistema para cada paso temporal.

Para que sea posible emplear los métodos de resolución de sistemas que se han comentado, se linealizan las ecuaciones. Los términos no lineales, como hemos visto, son los productos de las velocidades por sus derivadas. Por ello se discretiza la derivada, y se usa el valor de la velocidad existPor ello se discretiza la derivada, y se usa el valor de la velocidad existente en la celda de que se trate:

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right)$$

Ecuación 3.6

Se convierte en:

$$u \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\delta x}$$

Ecuación 3.7

Así se puede resolver iterativamente el sistema lineal de ecuaciones. Una vez resuelto, el valor de la velocidad en la celda i,j habrá cambiado, se vuelve a linealizar el sistema con los nuevos valores de las velocidades, y se repite el proceso hasta que se llegue a una solución.

Posteriormente, habrá que incrementar el paso temporal, y resolver el sistema para el nuevo instante de tiempo. En el caso de que sea un problema estacionario, este último proceso de cambiar el paso temporal se omite.

3.6.2.9. Condiciones de contorno

La solución de un problema^[6] depende de las condiciones iniciales y de las condiciones de contorno a las que está sometido el fluido. Las condiciones de contorno más habituales que suelen aparecer en los problemas resueltos con CFD son las siguientes:

- Presión en un determinado contorno. Se puede fijar presión estática o presión total.
- Velocidad en el contorno. Se puede fijar dirección y módulo, o sólo dirección, combinada con la condición de presión. En ocasiones se especifica el caudal en vez de la velocidad.
- Si interviene la ecuación de la energía también hay que concretar condiciones de contorno para la temperatura: valor fijo, flujo de calor...

Imponiendo estas condiciones, se puede simular el comportamiento de los contornos reales de un fluido, tales como paredes, entradas en tuberías, salidas al exterior, etc.

Las paredes sólidas son condiciones de contorno especialmente críticas. Esto es debido al comportamiento del fluido en las proximidades de la misma. En las superficies sólidas se genera una capa límite de fluido en la que la velocidad varía rápidamente a medida que nos acercamos a la pared. La simulación directa de la capa límite es extremadamente difícil y requiere unos recursos desproporcionados, por lo que se suelen utilizar modelos específicos.

3.6.2.10. Metodología

En los paquetes de software existentes de CFD^[6], el usuario debe especificar las condiciones del problema que se va a resolver, así como proveer al ordenador de ciertos parámetros de resolución para que el programa consiga encontrar una correcta solución del problema. Los pasos genéricos que hay que seguir son:

-
- Especificación de la geometría del problema. Es preciso introducir al programa los contornos del dominio del problema. Este proceso es relativamente simple cuando el modelo es bidimensional. Cuando el modelo es tridimensional, la especificación de la geometría puede ser realmente compleja.
 - Creación del mallado, o celdas en las que van a ser calculadas todas las variables. El mallado puede ser estructurado o no estructurado. El mallado estructurado está formado por rectángulos o paralelepípedos ordenados, que pueden deformarse para adaptarse a las superficies curvas de la geometría. El mallado no estructurado está habitualmente formado por triángulos o tetraedros y, en cualquier caso, no tiene un orden matricial. Este último tipo de mallado es mucho más sencillo de ajustar a formas complejas que el anterior, aunque es más costoso de calcular.
 - Definición de los modelos que se van a utilizar. Básicamente de turbulencia, pero para ciertas simulaciones pueden hacer falta modelos de radiación, flujo bifásico, multiespecie, etc. Estos modelos deben estar implementados en el software.
 - Especificación de las propiedades del fluido, tales como la viscosidad, la densidad, las propiedades térmicas..., etc. En su caso el programa debe ser capaz de manejar las ecuaciones de variación de estas propiedades con la temperatura, la presión, etc.
 - Imposición de las condiciones de contorno, que controlan los valores de ciertas variables en los límites del dominio. Básicamente se imponen valores fijos de la presión, velocidad y temperatura, o de sus gradientes. También hay que imponer condiciones para las variables de turbulencia que haya, según el modelo que se esté utilizando.
 - Introducción de las condiciones iniciales. En el caso de un problema no estacionario, hace falta definir unos valores de las variables para todos los puntos del dominio, desde los cuales empezará el programa a calcular las soluciones de los sucesivos pasos temporales. En el caso de un problema estacionario, es preciso introducir al programa unos valores iniciales de las variables, de los cuales partirá el proceso iterativo.
 - Control de los parámetros que afectan a la resolución numérica del problema. Se puede actuar sobre el proceso iterativo definiendo los tipos de discretización, variando los factores de relajación, y fijando los criterios de finalización de las iteraciones.

-
- Proceso de cálculo. Durante el mismo es habitual monitorizar la convergencia y controlar la evolución de las variables en algunos puntos.
 - Análisis de la solución. Comprobación de que la resolución es correcta y estudio de los resultados. La gran cantidad de datos que se genera hace necesario el uso de sistemas de postproceso gráfico.

4. Desarrollo

4.1. Análisis aerodinámico de un vehículo

La aerodinámica vehicular^[1] tiene como objeto el estudio del conjunto de acciones y efectos que ejerce el aire sobre el vehículo en movimiento, así como la forma de lograr que dichos efectos sean lo más favorables posible. Existen dos grupos de efectos asociados a dos flujos diferentes de aire:

- ***Flujo de aire externo al vehículo.***

Dicho flujo, actuando sobre las superficies exteriores del vehículo, produce zonas de presión o depresión y rozamiento viscoso con las paredes, lo que origina esfuerzos que influyen tanto en el avance del vehículo, ofreciendo una resistencia de naturaleza aerodinámica, como en las cargas sobre las ruedas y la estabilidad del automóvil. Por otra parte, las partículas en suspensión en el seno del aire ensucian las superficies del vehículo, lo cual afecta a la seguridad. El diseño aerodinámico del vehículo afecta directamente a este problema.

Además, ciertos fenómenos como el despegue de la capa límite si se producen de forma intermitente a frecuencias audibles, se convierten en fuentes de ruido.

- ***Flujo de aire que pasa a través de compartimentos del vehículo.***

La circulación interna del aire viene exigida por la refrigeración del motor y la aireación del habitáculo de pasajeros. La primera de ellas ha adquirido mayor importancia en el proceso de diseño debido al aumento y mejora en la potencia de los motores, mejora del tamaño del motor, etc. En cuanto a la segunda de ellas, la aireación del espacio para pasajeros y los criterios de confort, exigen mejoras continuadas en los criterios de diseño.

Ambos tipos de flujos no son independientes entre sí, por lo tanto a la hora de situar las superficies previstas para las entradas y salidas de aire para la correcta aireación del habitáculo y evitar el paso de agua, se han de tener muy en cuenta las zonas de mayor presión y depresión del vehículo.

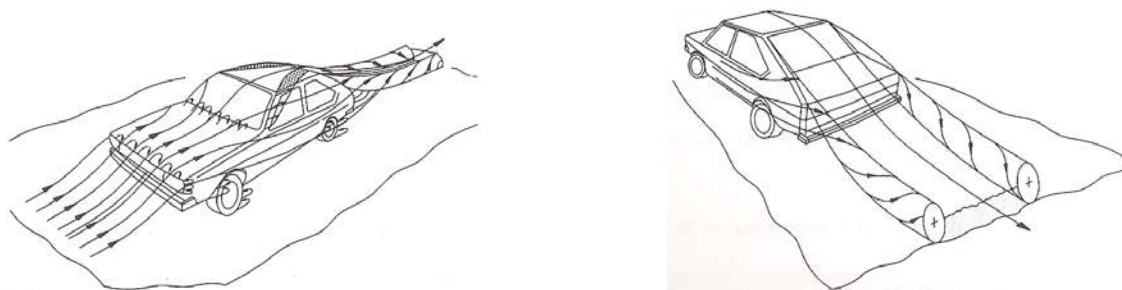


Figura 4. 1 Flujo alrededor de un vehículo automóvil. (Hucho 1986)

4.1.1. Tipos de flujo

Cada tipo de vehículo plantea una serie de problemas aerodinámicos que son críticos en aspectos diferentes, siendo la mayor preocupación en los turismos la reducción de la resistencia al avance por razones de economía.

La aerodinámica de los vehículos^[1] se basa en los conocimientos del campo de la aeronáutica y hoy en día, los mayores progresos conseguidos a nivel de vehículos automóviles se han realizado a nivel experimental, no existiendo aun una teoría general aplicable a los mismos. En el caso de los vehículos de superficie, las demandas respecto a su estilo, prestaciones, comportamiento direccional, seguridad, confort y problemas de producción reducen la importancia relativa de la aerodinámica en el diseño de los mismos. Por otra parte, la proximidad al suelo, dimensiones y formas de los vehículos crean un campo de flujo alrededor del automóvil que principalmente puede ser:

- **Flujo uniforme**

Tipo de flujo en el que las partículas se mueven a lo largo de trayectorias uniformes en capas o láminas, deslizándose suavemente una capa sobre la adyacente, sin que exista mezcla macroscópica o intercambio transversal entre ellas. En este tipo de flujo la velocidad del fluido en cualquier punto no cambia con el tiempo, siendo la ley de Newton de la viscosidad la que rige el flujo laminar, definida en la ecuación 4.8.

Esta ley establece la relación existente entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación angular. La acción de la viscosidad puede amortiguar cualquier tendencia turbulenta que pueda ocurrir en el flujo laminar.

En situaciones que involucren combinaciones de baja viscosidad, alta velocidad o grandes caudales, el flujo laminar no es estable, lo que hace que se transforme en flujo turbulento.

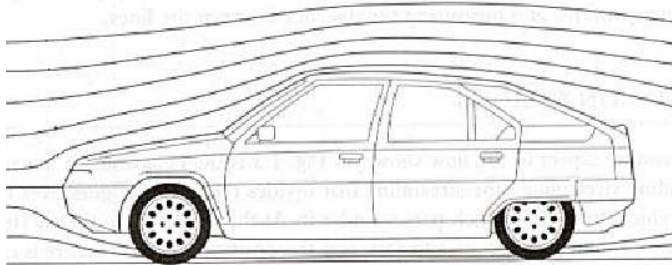


Figura 4. 2 Flujo laminar alrededor de un vehículo automóvil.

- **Flujo turbulento**

Es el tipo de flujo más frecuente en las aplicaciones prácticas y en él, las partículas del fluido se mueven en trayectorias muy irregulares, originando un intercambio de cantidad de movimiento de una porción del fluido a otra.

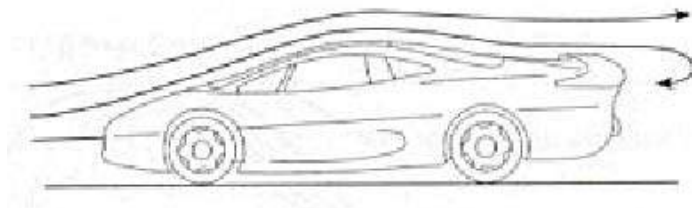


Figura 4. 3 Flujo turbulento alrededor de un vehículo automóvil.

4.1.2. Propiedades de los fluidos incompresibles

Un fluido incompresible^[1] es aquel en el que los cambios de densidad de un punto dentro del campo de flujo a otro son despreciables, es decir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

Ecuación 4.1

Por lo tanto, a la velocidad a la que circula un vehículo, puede considerarse que la densidad se mantiene constante a lo largo de los puntos del campo de flujo.

Para el estudio de la aerodinámica de los vehículos interesan tres propiedades fundamentales del aire: densidad, viscosidad y conductividad térmica. Siendo las dos primeras las de mayor importancia.

- **Densidad**

La densidad de un fluido depende de la presión y de la temperatura. Para las gamas normales de velocidad de los vehículos automóviles, la variación de la presión y de la temperatura en el campo de flujo, varía poco respecto a los valores correspondientes al flujo libre del fluido a cierta distancia del vehículo, por lo tanto resulta obvio suponer que la densidad no varía y, debido a ello, que el aire actúa como un fluido incompresible.

Dichos flujos incompresibles cumplen el llamado teorema de Bernoulli, enunciado por el matemático y científico suizo Daniel Bernoulli en 1738.

Teorema de Bernoulli

El teorema de Bernoulli ^[1] es una de las leyes fundamentales que rigen el movimiento de los fluidos y relaciona un aumento en la velocidad de flujo con una disminución de la presión y viceversa. Afirma que la energía mecánica total de un flujo incompresible y no viscoso, es decir, sin rozamiento, es constante a lo largo de una línea de corriente. Las líneas de corriente son líneas de flujo imaginarias que siempre son paralelas a la dirección del flujo en cada punto, y en el caso de flujo uniforme coinciden con la trayectoria de las partículas individuales de fluido.

Dicho teorema implica una relación entre los efectos de la presión, la velocidad y la gravedad, e indica que un aumento en la velocidad de flujo implica una disminución de la presión y viceversa. El efecto Bernoulli es simplemente el resultado de la conservación de la energía.

En el teorema de Bernoulli influyen tres tipos de energía: la energía potencial gravitatoria, la energía de flujo y la energía cinética.

- *Energía potencial gravitatoria*: energía que posee la masa de un fluido debido a su elevación respecto a una cota de referencia, se define como:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

Ecuación 4.2

Donde:

- m = masa de fluido (kg).
- g = aceleración de la gravedad $\left(\frac{m}{s^2}\right)$.
- h = altura desde una cota de referencia (m).

Energía de flujo o energía de presión: energía que un fluido contiene debido a la presión que posee. Queda definida a partir de la ecuación:

$$W = p \cdot A \cdot dx = p \cdot V = p \cdot \frac{m}{\rho}$$

Ecuación 4.3

Donde:

- p = presión (Pa)
- A = área (m^2)
- x = incremento de distancia (m)
- V = volumen (m^3)
- m = masa de fluido (kg)
- ρ = densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

Energía cinética: hace referencia a la energía que tiene el fluido debida a su velocidad, siendo su expresión:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Ecuación 4.4

Donde:

- $m =$ masa de fluido (kg)
- $v =$ velocidad del fluido $\left(\frac{m}{s}\right)$

Por tanto la energía total de un fluido, considerado ideal, será la suma de las tres energías citadas anteriormente:

$$E_T = E_p + W + E_c = m \cdot g \cdot h + p \cdot V + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Ecuación 4.5

Dividiendo la ecuación 4.5 entre el volumen, y teniendo en cuenta la relación $\rho = m/V$, se obtiene la expresión de la energía total de un fluido:

$$E_T = \rho \cdot g \cdot h + p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

Ecuación 4.6

Donde:

- $v =$ velocidad del fluido en la sección considerada.
- $g =$ aceleración de la gravedad.
- $h =$ altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.
- $p =$ presión a lo largo de una línea de corriente.
- $\rho =$ densidad del fluido.

Puesto que la energía total se conserva $E_T = cte$ y despreciando el término correspondiente a la energía potencial se obtiene la expresión de la ecuación de Bernoulli.

$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = cte$$

Ecuación 4.7

Donde:

- p = presión a lo largo de una línea de corriente.
- ρ = densidad del fluido.
- v = velocidad del fluido en la sección considerada.

Dicho teorema se aplica al flujo sobre superficies, como las alas de un avión, las hélices de un barco o cualquier superficie sólida.

Un ala, o plano aerodinámico, está diseñada de forma que el aire fluya más rápidamente sobre la superficie superior que sobre la inferior, lo que provoca una disminución de presión en la superficie de arriba con respecto a la de abajo. Esta diferencia de presiones proporciona la fuerza de sustentación que mantiene el avión en vuelo. Los coches de carrera son muy bajos con el fin de que el aire se desplace a gran velocidad por el estrecho espacio entre la carrocería y el suelo. Esto reduce la presión debajo del vehículo y lo aprieta con fuerza hacia abajo, lo que mejora el agarre. Estos coches también llevan en su parte trasera un plano aerodinámico con forma de ala invertida para aumentar la fuerza contra el suelo. La vela de un balandro en movimiento también constituye un plano aerodinámico. Una hélice también es un plano aerodinámico, es decir, tiene forma de ala. En este caso, la diferencia de presión que se produce al girar la hélice proporciona el impulso que mueve los barcos.

- **Viscosidad**

La viscosidad está originada por rozamiento molecular en el seno del fluido, lo que provoca un gradiente de velocidad entre las partículas que se encuentran en contacto con la superficie del cuerpo y la zona del fluido que circula libremente alrededor del mismo.

La zona en la que se produce dicho gradiente de velocidad se denomina capa límite y su espesor es muy reducido.

La viscosidad relaciona las tensiones cortantes entre superficies paralelas a la del cuerpo, dentro de la capa límite, con el gradiente de velocidad, de la forma:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Ecuación 4.8

Donde:

- μ es denominada viscosidad dinámica y es un factor constante para ciertas condiciones del fluido. Generalmente depende de la temperatura del mismo.
- u es la velocidad del fluido.

Otro valor deducido del anterior que suele emplearse es la viscosidad cinemática ν , siendo:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Ecuación 4.9

Dicho valor se ve afectado por la presión y la temperatura. Si se trata de fluidos incompresibles, sólo por la temperatura.

La viscosidad del aire produce en los vehículos una resistencia aerodinámica como consecuencia del rozamiento con las superficies de éstos, siempre que exista una capa límite con un gradiente de velocidad.

- **Conductividad térmica.**

La conductividad térmica K es un valor dependiente de la temperatura y relaciona el flujo de calor por unidad de área q con el gradiente de temperatura según la expresión:

$$q = -K \frac{dT}{dy}$$

Ecuación 4.10

4.1.3. Flujo exterior

El flujo externo^[1] de aire actúa sobre las superficies exteriores del vehículo produciendo zonas de presión o depresión y rozamiento viscoso con las paredes, generando así fuerzas y momentos que afectan, no sólo al avance del vehículo, sino también a la estabilidad, y por tanto a la seguridad del mismo.

Si se considera el aire en reposo o que su velocidad es despreciable frente a la del vehículo, se puede suponer que éste está quieto y es el aire el que se mueve respecto a él con la velocidad V_{∞} con que el automóvil avanza. Alrededor del vehículo se forma un campo de flujo como el representado en la figura 4.4.



Figura 4. 4 Flujo de aire alrededor de un vehículo automóvil.

En las zonas en las que no se producen “separaciones” entre el fluido y la superficie del vehículo se forma una capa límite de unos pocos milímetros de espesor gobernada por la viscosidad del aire.

Teoría de la Capa Límite

El concepto de capa límite^[2] nace a principios del siglo XX cuando en 1904, Ludwig Prandtl (1875- 1953), introduce la Teoría de la Capa Límite. Dicha teoría establece que el fluido que se mueve y evoluciona alrededor de un sólido puede considerarse ideal en todo el espacio, salvo en una zona próxima al contorno del objeto inmerso en la corriente, donde el rozamiento no

puede despreciarse, ya que es proporcional tanto a la viscosidad como al gradiente de velocidades, esquematizado en la figura 4.5.

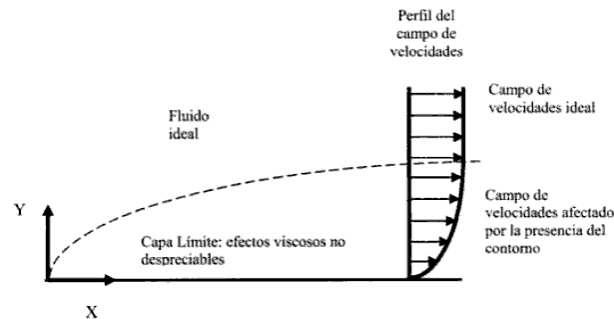


Figura 4. 5 Concepto de capa límite.

El flujo de aire que incide sobre el automóvil es viscoso, turbulento, tridimensional y presenta importantes vorticidades localizadas que se mueven sobre un contorno fuertemente irregular y con el único atenuante de ser incompresible, características que aumentan la complejidad del problema a tratar.

Una vez fuera de la capa límite el fluido se comporta como no viscoso. Al producirse la separación del flujo, como ocurre en la parte posterior del vehículo, la capa límite es destruida y el flujo queda regido por los efectos de la viscosidad.



Figura 4. 6 Esquema bidimensional flujo exterior.

En la figura 4.6 puede observarse el esquema bidimensional del flujo exterior sobre la superficie de un vehículo. En ella se comprueba la distribución de velocidades de la capa límite en la parte frontal así como la destrucción de la capa límite en la parte posterior del vehículo.

La presión sobre la capa límite está determinada por el flujo no viscoso que circula fuera de ella. Al aplicar la ecuación de Bernoulli a dos puntos de una línea de corriente y despreciando

el término correspondiente a la energía potencial gravitatoria, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

$$P_T = P + \frac{\rho}{2} V^2 = cte$$

Ecuación 4.11

Donde:

- P y V representan la presión y la velocidad a lo largo de una línea de corriente, siendo P la presión estática.
- $\frac{1}{2} \rho V^2$ se corresponde con la presión dinámica.
- P_T es la presión total, cuyo valor puede obtenerse considerando la presión del aire y la velocidad del vehículo, cuyos valores corresponden a puntos suficientemente alejados de su superficie.

$$P_T = P_{\infty} + \frac{\rho}{2} V_{\infty}^2$$

Ecuación 4.12

Una primera consecuencia que puede extraerse de la ecuación 4.12 es que en aquellos puntos en los que el fluido se “estanca”, como es el caso de los puntos más adelantados del vehículo, $V = 0$ y $P = P_T$, siendo éste el máximo valor de la presión que actúa sobre la superficie del mismo. Cuando V alcanza su valor máximo, la presión será mínima.

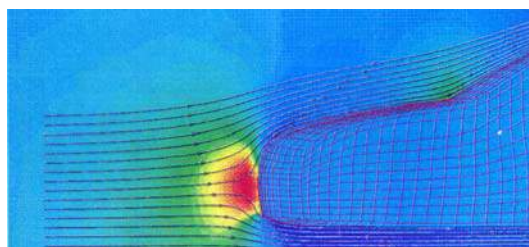


Figura 4. 7 Parte frontal del vehículo en la que $V = 0$ y $P = P_{total}$.

Si se aplican los conceptos anteriores al flujo que circula alrededor de una esfera o cilindro de gran longitud, se obtendría una variación de presiones, como las mostradas en la figura 4.8.

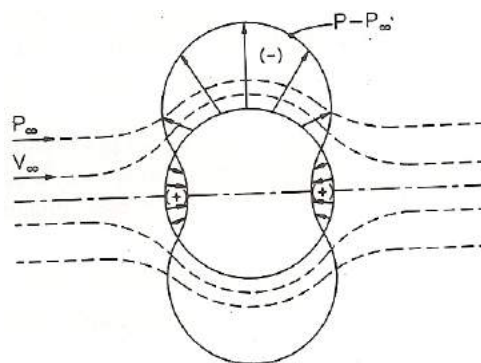


Figura 4. 8 Líneas de corriente y distribución de un fluido en torno a un cilindro de longitud infinita

Al integrar todas las fuerzas de presión en la dirección del movimiento y considerando un fluido ideal no viscoso, la resultante es nula, lo cual se conoce como la paradoja de D'Alembert, que enuncia que un fluido ideal no viscoso no ofrece resistencia alguna al movimiento de los cuerpos, como consecuencia de la compensación de las fuerzas de presión que actúan sobre él. En la realidad, como ningún fluido real está exento de viscosidad, la paradoja de D'Alembert no es aplicable.

Por tanto, la viscosidad es responsable de la resistencia que ofrecen los fluidos al movimiento de los cuerpos y se basa en dos efectos: el rozamiento y la modificación que produce sobre el campo de flujo como consecuencia de las separaciones, lo que origina una resultante no nula de presiones. Siendo el segundo efecto el más importante de ambos.

4.1.3.1. Resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica ^[1] es la resultante de la fuerza que experimenta un cuerpo en movimiento a través del aire en la dirección de la velocidad relativa entre el mismo aire y el cuerpo propiamente dicho. La resistencia aerodinámica tiene dos causas principales: una debida al rozamiento y otra a causa de la presión. La proporción en que cada una de ellas influye en la global, depende de la forma del cuerpo y de la lisura de sus superficies. Cabe destacar que no existen modelos teóricos precisos para predecir la resistencia aerodinámica, por lo que los resultados experimentales constituyen la fuente más fiable de datos y conocimientos sobre la influencia de diferentes variables geométricas, o de otra naturaleza, sobre los distintos coeficientes aerodinámicos.

A las resistencias anteriores debe añadirse la debida a los distintos salientes del coche, entre ellos los espejos retrovisores exteriores, denominada resistencia de densidad.

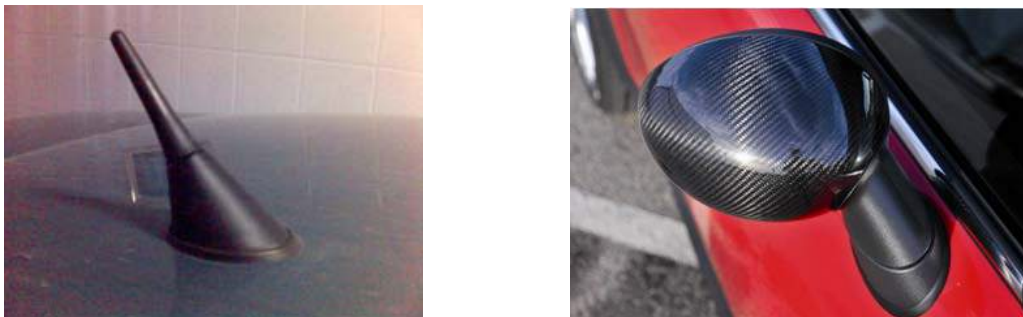


Figura 4. 9 Elementos salientes responsables de la resistencia de densidad.

Aunque la contribución de las diferentes resistencias a la total, varía de unos vehículos a otros, algunos valores orientativos se muestran a continuación:

- Resistencia de presión (o de forma) > 70%
- Resistencia de rozamiento (o viscosa) < 10%
- Resistencia de densidad > 10%
- Resistencia interna \approx 10%

Para minimizar las resistencias de rozamiento y densidad se recurre al alisamiento de las superficies y la eliminación de protuberancias mientras que la resistencia interna se reduce mediante la adecuada disposición de las superficies de entrada y salida de aire en el habitáculo del vehículo. Por último, la resistencia de presión, al ser la componente que más contribuye a la resistencia total, es a la que más atención hay que prestar para lograr su reducción.

A continuación se explica con detalle la influencia de las resistencias de rozamiento y presión en la resistencia aerodinámica global.

4.1.3.2. Resistencia debida al rozamiento

Ya se ha visto que uno de los efectos de la viscosidad es el rozamiento entre fluido y superficie, el cual es responsable de una tensión tangencial τ_s tal y como observarse en la figura 4.10.

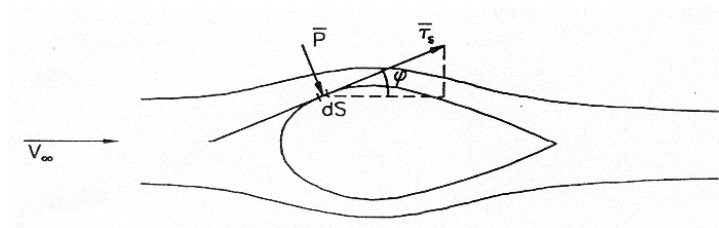


Figura 4. 10 Tensión tangencial debida al rozamiento.

Dicha tensión tangencial τ_s produce fuerzas, que al ser integradas, representan una primera componente de los esfuerzos que ejerce el fluido sobre el cuerpo en la dirección del movimiento relativo entre ambos.

La resistencia aerodinámica debida al rozamiento se expresa como:

$$R_{ar} = \int_s \tau_s \cos \varphi \cdot ds$$

Ecuación 4.13

Al sumarse todas las fuerzas de rozamiento que actúan en los diferentes elementos de superficie se obtiene, como resultante, una fuerza neta total de rozamiento aplicada en el centro de presiones del vehículo. Si dicha fuerza neta se descompone en dos direcciones, en la dirección de movimiento del fluido se obtendrá una fuerza de arrastre F_x , opuesta al desplazamiento del vehículo. La resultante en la dirección normal suele ser despreciable, pues si el vehículo presenta cierta simetría las fuerzas de un punto suelen compensarse con las del punto opuesto.

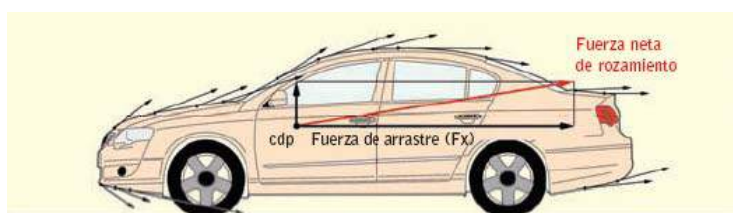


Figura 4. 11 Fuerza de rozamiento. (cdp: centro de presiones).

Para cuantificar el efecto de esta acción sobre el cuerpo se define el coeficiente de resistencia aerodinámica C_{xr} , coeficiente adimensional que no depende de las condiciones del flujo libre, es decir, de la presión dinámica. El valor de dicho coeficiente para la resistencia aerodinámica de rozamiento en la dirección X es:

$$C_{xr} = \frac{R_{ar}}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 A}$$

Ecuación 4.14

siendo A una superficie característica del cuerpo.

La viscosidad aparente se incrementa siempre que en la capa límite se produzca un flujo turbulento, y debido a ello, se produce un aumento de C_{xr}

Cabe destacar que a velocidades bajas las partículas del fluido siguen las líneas de corriente y los resultados experimentales coinciden con las predicciones analíticas, es el denominado flujo laminar. Sin embargo, a velocidades más elevadas, surgen fluctuaciones o remolinos en la velocidad del flujo, originando así un flujo turbulento, en una forma que ni siquiera en la actualidad se puede predecir completamente. Reynolds determinó que la transición del flujo laminar al turbulento era función de un único parámetro, que desde entonces se conoce como número de Reynolds, definido como:

$$R_e = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$$

Ecuación 4.15

Donde:

- v es la velocidad del fluido.
- L la longitud característica del cuerpo sumergido en la corriente fluida.
- ρ la densidad del fluido.
- μ viscosidad del fluido.

Dicho coeficiente carece de dimensiones y su valor marca la clasificación del tipo de flujo, quedando establecida de la forma:

- Si $Re < 2000$ se considerará flujo laminar.
- Si $2000 < Re < 4000$ comienza la aparición de pequeñas ondulaciones variables en el tiempo y se inicia el denominado régimen de transición.

- Si $Re > 4000$ se considera el paso a flujo turbulento.

Por otra parte, las rugosidades superficiales aumentan la resistencia aerodinámica cuando se produce flujo turbulento, donde cabe destacar que la transición entre los regímenes laminar y turbulento se ve favorecida por presiones bajas y números de Reynolds elevados.

4.1.3.3. Resistencia debida a la presión

Cuando un cuerpo se encuentra en el seno de fluido existiendo movimiento ^{[1] [2]} relativo de uno respecto al otro, se produce con frecuencia un incremento de presión hacia la parte posterior de dicho cuerpo, procedente del flujo exterior no viscoso. Dicho incremento de presión, como ya se ha visto anteriormente, puede producir separaciones. Según las condiciones en que dichas separaciones se producen respecto al caso ideal del flujo no viscoso, el flujo resultante es diferente.

La distribución de presiones viene impuesta por el flujo exterior y los regímenes laminar y turbulento en la capa límite, dependen de dicha distribución. Al aumentar la presión en la dirección del flujo, la fuerza de rozamiento entre la superficie y el fluido aumenta, retrasándose el flujo tanto más intensamente cuanto mayor sea su proximidad a la superficie. En estas condiciones puede llegar a producirse incluso, una inversión en el flujo, conociéndose este fenómeno con el nombre de separación. La tendencia a la separación aumenta a medida que se incrementa la presión en la dirección del flujo.

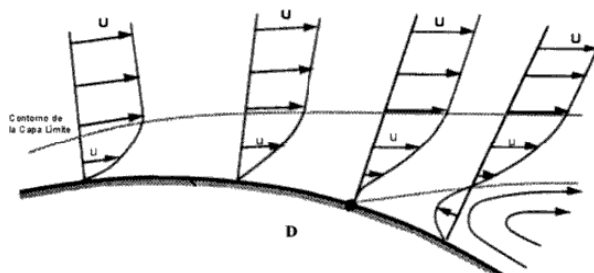


Figura 4. 12 Perfil de velocidad en una placa plana, con un gradiente de presiones adverso.

En la figura 4.12 se muestra la capa límite existente en una placa plana en la que se representan los perfiles de velocidad $(\delta u / \delta y)$ correspondientes a diferentes puntos de la misma. El perfil de velocidades en dichos puntos depende del gradiente de presiones que exista

en el sentido de avance del flujo. Cuando éste es positivo ($\delta p / \delta x > 0$), se obtiene un gradiente de presiones adverso que provoca la disminución de la velocidad del flujo de forma notable, llegando a producirse la separación en el punto D o punto de despegue, donde cabe destacar que:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = 0$$

Ecuación 4.16

Por otro lado, a la corriente de aire que recorre el perfil de un automóvil le corresponde un gradiente favorable ($\delta p / \delta x < 0$) desde el inicio de la parte frontal del mismo hasta la sección recta de la superficie máxima, ya que el fluido avanza con mayor velocidad como consecuencia de encontrar una menor sección útil de paso, aumentando la sección recta hasta llegar al habitáculo. En la zona de pendientes negativas de la carrocería o zonas posteriores del vehículo, aparecen gradientes de presiones adversos ($\delta p / \delta x > 0$) en los que la posibilidad de que se produzca la separación de la capa límite es mucho mayor, tal y como se observa en la figura 4.13. Cuando ello ocurre, se producen turbulencias que contribuyen a que aumente considerablemente la energía en el interior de la capa límite retrasando, como consecuencia, la aparición del punto de despegue. Dicho retraso provocará una menor resistencia al avance.

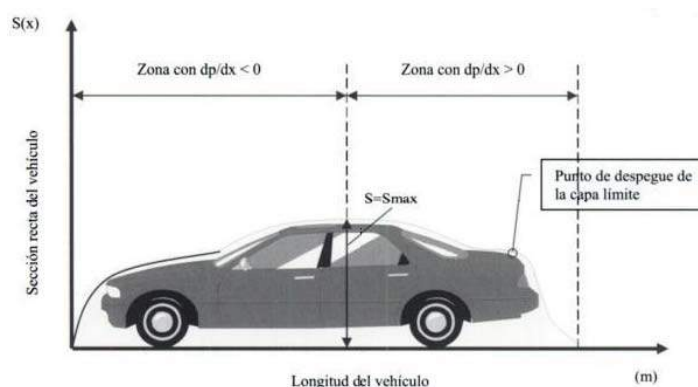


Figura 4. 13 Distribución del gradiente de presiones con que se encuentra el flujo de aire.

La forma más sencilla de determinar el reparto de presiones que actúan sobre el vehículo es considerar la presión estática alrededor del mismo. La figura 4.14 muestra la distribución de presiones relativas a lo largo del contorno del vehículo. El valor de la presión se expresa en función de la presión atmosférica, siendo positiva si es mayor, o negativa si es menor.

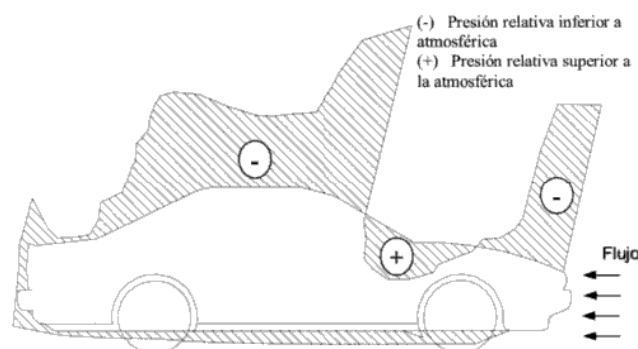


Figura 4. 14 Distribución de presiones relativas alrededor del vehículo.

Se observa que en la parte frontal la presión relativa es negativa, favoreciendo el levantamiento del vehículo y el giro del mismo. A medida que el flujo recorre la superficie del automóvil, se observa que próximo a la base del parabrisas y del capó el flujo ha de cambiar su rumbo hacia arriba provocando una gran presión en esta zona, lo que provocará una disminución de la velocidad del aire, cumpliéndose así el Teorema de Bernouilli, definido en la ecuación 4.7. Debido a estas bajas velocidades, dicha zona se convierte en un área estable e ideal para la ubicación de los limpiaparabrisas. Una vez alcanzada la línea del techo la presión vuelve a ser negativa puesto que el flujo de aire intenta adaptarse al contorno del vehículo. Esta zona de bajas presiones se mantiene hasta la parte trasera del vehículo y continúa siéndolo en la zona del maletero, siendo en esta última donde existe mayor probabilidad de separación del flujo, ya que el fluido no es capaz de hacer un cambio tan drástico de dirección.

Cabe destacar que el diseño aerodinámico de los ángulos y los detalles del contorno de la carrocería en esta parte del vehículo revisten una atención especial ya que debido a las bajas presiones, el flujo que atraviesa el vehículo por los laterales intentará acelerar el aire en la región trasera del maletero y potenciará la separación. Hay que tener en cuenta que al formarse una capa límite turbulenta las separaciones en la parte trasera se retrasan quedando menor superficie expuesta a depresión.

En la figura 4.15 se aprecia este efecto, donde se observa cómo el flujo lateral es arrastrado por las bajas presiones hacia la parte trasera, integrándose con el flujo procedente de la parte superior para formar vórtices que siguen al vehículo. Si estos torbellinos o vórtices tienden a girar hacia fuera, aumenta la resistencia al avancen en función de la estela de turbulencia. Debido a ello, los ingenieros centran sus objetivos en conseguir que los torbellinos

giren hacia adentro, tal y como esquematiza la siguiente figura, para lograr así una estela turbulenta inducida menor que la sección transversal y con ello, un arrastre mucho menor.

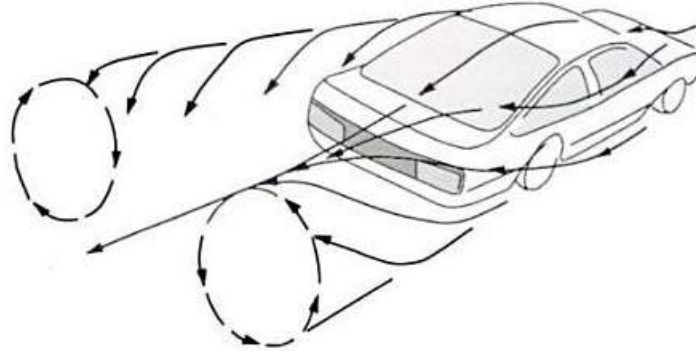


Figura 4. 15 Sentido de giro eficiente de las turbulencias.

La elección de la longitud del techo y de los ángulos que forman la parte trasera del vehículo tiene un impacto directo sobre las fuerzas aerodinámicas puesto que determina el punto de separación de la capa límite. Dicha separación debe ocurrir siempre en el mismo punto, intentando abarcar un área de contacto flujo-vehículo lo más pequeña posible, ya que ello implica menor arrastre.

Al sumarse todas las fuerzas de presión que actúan sobre los diferentes elementos de superficie se obtiene, como resultante, una fuerza neta total que estará aplicada nuevamente en el centro de presiones, tal y como se ilustra en la figura 4.16. Si se establece la dirección de movimiento del fluido (o automóvil) y esa fuerza neta se descompone en dos componentes, en la dirección de dicho movimiento y en su perpendicular, se obtendrá que la primera de esas componentes, llamada fuerza de arrastre se opone al avance del vehículo y la segunda, denominada fuerza de adherencia o sustentación, es la responsable de la tendencia a la adherencia o a la separación del vehículo respecto del suelo.

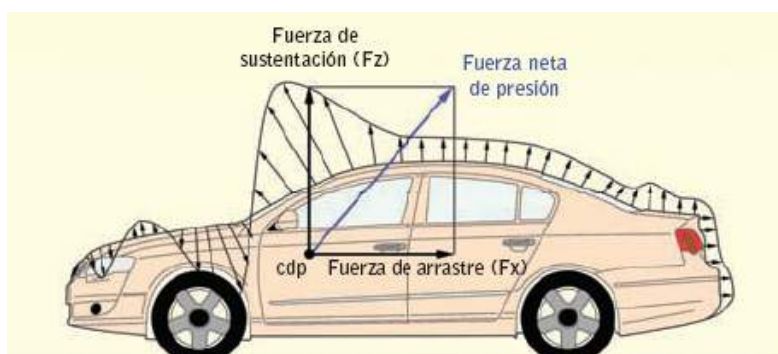


Figura 4. 16 Aplicación de la fuerza neta de presión.

La resistencia aerodinámica de presión es mayor que la de rozamiento y se expresa como:

$$R_{ap} = \int_s P \cdot \sin\varphi \cdot ds$$

Ecuación 4.17

Del mismo modo que sucede con la resistencia de rozamiento, en la resistencia de presión queda definido un coeficiente, el coeficiente de presión, C_p , que se expresa como:

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A}$$

Ecuación 4.18

Donde:

- P es la presión local sobre la superficie del cuerpo, para cada punto cuya situación en el plano viene definido por su coordenada angular.
- P_∞ y V_∞ son los valores de presión y velocidad en el flujo libre.

Dada la complejidad de los efectos del aire sobre el vehículo y con la finalidad de facilitar su estudio, se hacen depender todas estas relaciones de una única variable o coeficiente que permita, de forma sencilla, conocer los efectos que surgen a lo largo del estudio aerodinámico. Normalmente el valor de dicho coeficiente se determina de forma experimental en un entorno controlado, como puede ser un túnel de viento, en el que sea posible conocer la velocidad, la densidad del aire y el área de referencia. También es posible determinarlo de forma teórica, mediante ordenadores para la resolución de las ecuaciones de la mecánica de fluidos y programas de simulación que permitan optimizar el diseño de los automóviles desde el punto de vista aerodinámico, como herramienta complementaria a los túneles de viento.

Así pues, la suma de la resistencia debida al rozamiento y la debida a la presión constituye la resistencia aerodinámica total en una dirección X , siendo su expresión:

$$R_{ax} = R_{ap} + R_{ar}$$

Ecuación 4.19

Quedando definido el coeficiente de resistencia aerodinámica en la dirección X , también llamado coeficiente de arrastre, como:

$$C_x = \frac{R_{ax}}{\frac{\rho}{2} V_{\infty}^2 S}$$

Ecuación 4.20

Donde:

- C_x = coeficiente de arrastre.
- R_{ax} = fuerza de arrastre.
- ρ = densidad del aire.
- V_{∞} = velocidad del flujo libre.
- S superficie frontal de referencia del vehículo de la forma:

$$S = f \cdot B \cdot A$$

Ecuación 4.21

En principio, la superficie de referencia puede ser cualquiera del vehículo, tal y como se ilustra en la figura 4.17, siendo habitual tomar la superficie frontal proyectada del vehículo, tomando f un valor comprendido entre 0.8 y 0.85

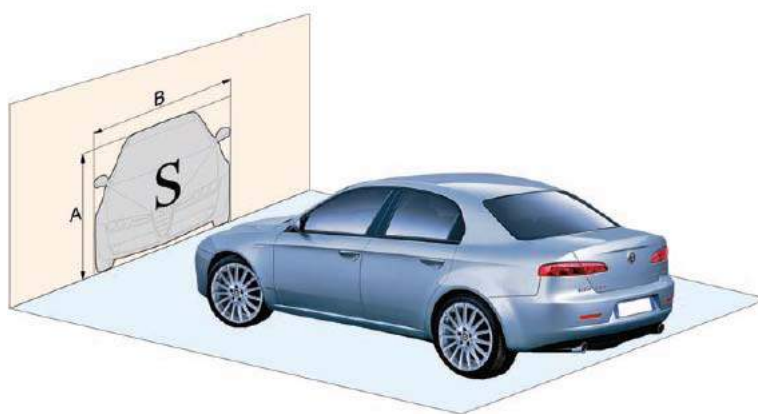


Figura 4. 17 Superficie frontal del vehículo.

Como ya se ha explicado anteriormente, el régimen laminar produce una mayor depresión en la parte posterior que el régimen turbulento, y por tanto una mayor resistencia (empuje). Puesto que el tránsito de un régimen a otro depende del número de Reynolds, el coeficiente de resistencia aerodinámica, C_x , también se verá afectado por este parámetro. Cabe destacar la existencia de un régimen laminar para valores de R_e pequeños, produciéndose la separación en zonas próximas a la de máximo espesor. Debido a ello, la zona de bajas presiones en la parte posterior es mayor y C_x también es más elevado.

Cuando se produce la transición al régimen turbulento, para $R_e = 5 \cdot 10^5$ aproximadamente, la separación de la capa límite respecto de la superficie se retrasa, lo que provoca una reducción de la zona de bajas presiones, una disminución de la zona de succión y por tanto, de C_x .










Un criterio de diseño de los vehículos automóviles es conseguir que C_x sea lo más independiente posible del número de Reynolds, y para ello es necesario lograr que la separación del flujo se produzca en ciertos puntos para cualquier condición. Por delante de estos puntos el diseño tiene como objetivo la unión del flujo a la superficie, siendo necesario para ello que la presión sea lo más alta posible para las diferentes condiciones del flujo libre.

Cabe destacar que la forma de la parte delantera del cuerpo tiene mucha menos influencia en la resistencia aerodinámica que la forma de la parte trasera, y ello se debe a la gran influencia que ejerce la resistencia de presión frente a la de rozamiento en el valor final de la resistencia aerodinámica.

Los valores del coeficiente de resistencia aerodinámica para diferentes cuerpos se muestran a continuación:

Tabla 4. 1 Coeficientes de resistencia aerodinámica para varios cuerpos.

(* corresponden a flujos subcríticos).

Cuerpo	Orientación del flujo	C_x
Placa circular		1.17
Esfera		0.47 *
Semiesfera		0.42 *
Cono (60°)		0.5
Cubo		1.05 *
Cilindro ($l/D > 2$)		0.82
Cilindro ($l/D < 1$)		1.15
Cuerpo currentilíneo $l/D = 2.5$		0.04
Medio cuerpo currentilíneo sobre el suelo		0.09

A partir de dichos valores se comprueba que el diseño óptimo para vencer la oposición que presenta el aire al avance de los vehículos ofreciendo por tanto, un menor valor del coeficiente C_x , es la forma de gota. También denominados sólidos currentilíneos, se caracterizan por presentar un valor mínimo de la resistencia aerodinámica al avance. El diseño de estos cuerpos permite a las líneas de corriente adaptarse al contorno del cuerpo, lo cual ayuda a evitar los despegues de la capa límite en la parte posterior del mismo, provocando así una disminución del valor de la resistencia aerodinámica.

Por otro lado, como ya se ha visto, la resistencia aerodinámica depende tanto del flujo exterior del vehículo como de la circulación interior del mismo. El primero, se relaciona con la resistencia debida al rozamiento y la resistencia de presión y la proporción en que cada una de ellas influye en la resistencia global, depende de la forma del cuerpo y de lo lisas que sean sus superficies. Por ejemplo, en un cuerpo currentilíneo con $C_x = 0.04 - 0.05$, la resistencia aerodinámica es debida, principalmente, al rozamiento. En cambio, en una placa plana con un coeficiente $C_x = 1.2$, la resistencia es casi puramente de presión, mientras que en formas como

cilindros, o paralelepípedos con sus ejes longitudinales orientados en la dirección del flujo, la contribución de la resistencia de presión es algo menor que en la placa, pero es predominante.

4.1.4. Flujo interior

Como ya se ha explicado, se considera flujo interior^{[1] [2]} a aquel que circula por el compartimento motor para refrigerar los órganos sometidos a fuentes de calor, así como al usado en airear el habitáculo de los pasajeros a través de ventilación, calefacción y aire acondicionado. La contribución de dicho flujo a la resistencia aerodinámica al avance global ha de ser la menor posible, de ahí que las exigencias impuestas al sistema de refrigeración sean cada vez mucho más exigentes. La naturaleza de un motor consiste en tener que crear movimiento a través de la combustión significa que existe mucho calor residual del que deshacerse. Conseguirlo de un modo eficaz es una misión del sistema de refrigeración y la aerodinámica interna y consiste, básicamente, en una transferencia de calor. Hay que trasladar el calor desde donde puede resultar peligroso, desde el punto de vista mecánico, hasta un lugar que pueda soportarlo.

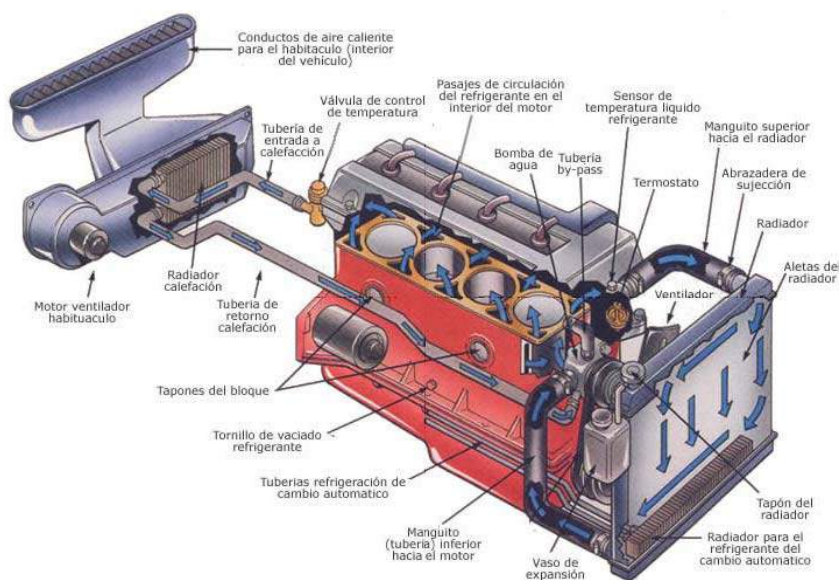


Figura 4. 18 Sistema de refrigeración del motor.

Día a día las exigencias impuestas a estos sistemas van creciendo, y la necesidad de optimización de los flujos no sólo se refiere a obtener los más altos rendimientos en las funciones

específicas que los originan, sino que es necesario reducir en la medida de lo posible su contribución a la resistencia aerodinámica al avance global.

Por lo general, el flujo interior no puede considerarse dividido en regiones viscosas y no viscosas ya que la proximidad de las superficies provoca prácticamente el solapamiento de las capas límite, haciendo que el flujo se comporte casi en toda su totalidad como un fluido viscoso, caracterizado por el número de Reynolds.

Los flujos interior y exterior en un vehículo están relacionados y se debe tener en cuenta que la diferencia de presiones exteriores (en las entradas y salidas de aire del flujo interior) debe ser igual a la suma de todas las pérdidas de presión en los diferentes elementos exteriores por los que circula el aire.

Por tanto, la velocidad del flujo depende de la velocidad del aire y ello hace difícil un diseño adecuado a cada velocidad, en especial debido a la disminución de flujo a velocidades reducidas, lo que lleva a la implantación de sistemas de bombeo en los sistemas de refrigeración y ventilación. Dichos sistemas han de ser reducidos para minimizar la potencia necesaria y para reducir las interferencias con el flujo exterior.

4.1.5. Fuerzas y momentos aerodinámicos

Como resumen a lo explicado anteriormente, se sabe que en todo fluido existen tres tipos de energía^[1]:

- la potencial (por cota o altura)
- la cinética (por velocidad)
- la de presión

Por otro lado, debido a que en todo proceso se conserva la cantidad total de energía, la suma de estas tres energías ha de permanecer constante. Esto permitió definir el Principio de Bernoulli, ecuación 4.7, el cual establece que en un fluido en movimiento la suma de la presión y la velocidad en un punto cualquiera permanece constante, por lo que si se aumenta la velocidad disminuye la presión, y a la inversa. Ello permite establecer una distribución de presiones a partir de una distribución de velocidades y viceversa. Como ya se ha explicado anteriormente, al sumar

todas las fuerzas de presión que actúan sobre los diferentes elementos de superficie, se obtiene como resultante una fuerza neta total aplicada en el centro de presiones. Al establecer la dirección de movimiento del fluido y descomponer esa fuerza neta en dos componentes, en la dirección de dicho movimiento y en su perpendicular, se obtiene que la primera de esas componentes, llamada fuerza de arrastre, se opone al avance del vehículo y la segunda, llamada fuerza de adherencia o sustentación, hace que el vehículo se adhiera o tenga tendencia a separarse del suelo.

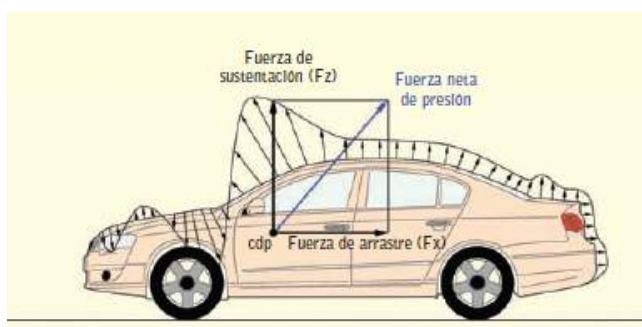


Figura 4.19 Fuerza de arrastre y de sustentación.

Existe una tercera fuerza, denominada fuerza de deriva, F_y , que actúa en la dirección transversal del vehículo, influyendo sobre su estabilidad cuando hay presente viento lateral. El hecho de que estas fuerzas aerodinámicas se encuentren aplicadas en el centro de presiones, punto imaginario que no coincide con el centro de gravedad del vehículo, hace que las mismas den lugar a unos momentos aerodinámicos, denominados giro o de guiñada, balanceo y cabeceo.

TABLA 4.2 Fuerzas y momentos aerodinámicos.

Dirección	Fuerza	Momento
Longitudinal (Eje X)	Arrastre (F_x)	Balanceo (M_x)
Transversal (Eje Y)	Lateral (F_y)	Cabeceo (M_y)
Vertical (Eje Z)	Sustentación (F_z)	Guiñada o giro (M_z)

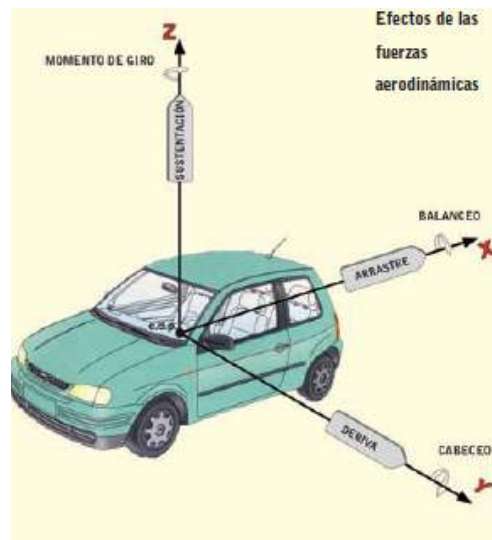


Figura 4. 20 Fuerzas y momentos aerodinámicos que actúan sobre el vehículo.

La fuerza de arrastre tiene una incidencia directa en la velocidad y en el consumo de combustible y la fuerza de sustentación en la adherencia del vehículo. A continuación se procede al estudio detallado de cada una de estas reacciones así como los efectos que producen sobre el automóvil.

4.1.5.1. Fuerzas aerodinámicas

- **Fuerza de arrastre**

La fuerza de arrastre F_x es la fuerza de carácter aerodinámico^[1] más grande e importante que se opone al desplazamiento del vehículo. La fuerza de arrastre total procede de la contribución de diversas fuerzas, la mayor parte de las cuales tiene su origen en el cuerpo del vehículo. Se trata de fuerzas derivadas de las turbulencias creadas en la parte delantera, inferior y trasera del automóvil. El arrastre aerodinámico se caracteriza por la ecuación:

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A_f \cdot v^2$$

Ecuación 4.22

Donde:

- A_f = área frontal del vehículo.
- C_D = coeficiente de arrastre aerodinámico.
- ρ = densidad del aire.
- v = velocidad del viento.

Coeficiente de arrastre, C_D ó C_x .^{[1][3]}

El coeficiente de arrastre se determina experimentalmente en los ensayos realizados en túneles de viento. Éste varía dentro de un amplio rango y depende especialmente de la morfología superficial, quedando definido a partir de la fórmula:

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{\rho}{2} V^2 A_f}$$

Ecuación 4.23

Donde:

- C_x = coeficiente de arrastre.
- F_x = fuerza de arrastre.
- ρ = densidad del aire.
- V = velocidad del aire.
- A_f = superficie frontal de referencia del vehículo.

Se trata de una magnitud adimensional que influye de forma decisiva en la resistencia aerodinámica al avance de los vehículos, encargándose de determinar cómo influye la forma del vehículo en la resistencia que presenta el aire al avance de los mismos. El coeficiente C_x es independiente del tamaño del vehículo, de su masa y de cualquier otra magnitud medible de los automóviles, lo que explica su carácter adimensional.

A partir de los ensayos realizados en el túnel de viento se obtienen los valores de la fuerza de arrastre o resistencia aerodinámica al avance, F_x , para unos determinados valores de densidad del aire y velocidad, pudiéndose entonces calcular de forma experimental a partir de la ecuación 4.23 el coeficiente de resistencia aerodinámica C_x .

Cabe destacar que, además del coeficiente C_x ^{[2] [8]}, también se miden los coeficientes C_y y C_z , que son los índices de resistencia aerodinámica en la dirección transversal del vehículo y en la vertical. El coeficiente transversal C_y es importante, ya que la dirección de incidencia del viento sobre el vehículo no es siempre longitudinal. El viento lateral es habitual y es necesario saber qué influencia tiene sobre el comportamiento dinámico del vehículo. Asimismo, hay una componente vertical de fuerzas que no influye teóricamente sobre la resistencia al avance pero que afectan directamente a la estabilidad. Se trata del coeficiente de sustentación C_z , que indica la tendencia de la carrocería a elevarse o a incrementar su presión contra el suelo.

Actualmente, a la hora de comparar la diferencia “real” en cuanto a la eficacia aerodinámica de los vehículos no se emplea tan sólo el coeficiente C_x , sino el producto $C_x \cdot S = S \cdot C_x$, que como se observa, es función de la superficie frontal del vehículo S y se mide en m^2 en el Sistema Internacional de Unidades.

A la hora de llevar a cabo un estudio comparativo entre dos vehículos diferentes, denominados por ejemplo “1” y “2”, en igualdad de condiciones, se considerará ante todo que tanto la densidad del fluido que les rodea, ρ , como la velocidad a la que circulan, V , sean iguales para ambos. De ahí que la resistencia aerodinámica que producirán sea:

$$F_{x1} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{x1} \cdot A_{f1} \cdot v^2$$

Ecuación 4.24

$$F_{x2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{x2} \cdot A_{f2} \cdot v^2$$

Ecuación 4.25

Si se junta el término $\frac{1}{2}\rho \cdot v^2$ en una variable B , se ve claramente que la resistencia aerodinámica, en igualdad de condiciones, de cada uno de los vehículos depende únicamente de su C_x y de su superficie frontal S .

$$F_{x1} = B \cdot C_{x1} \cdot A_{f1}$$

Ecuación 4.26

$$F_{x2} = B \cdot C_{x2} \cdot A_{f2}$$

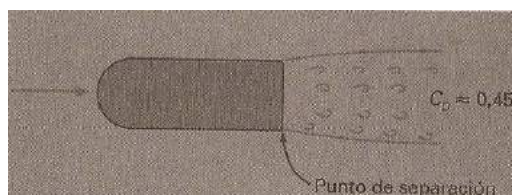
Ecuación 4.27

Por ello, a la hora de comparar resistencias aerodinámicas es suficiente con comparar el coeficiente $S \cdot C_x$, cuyo uso es mucho más cómodo que el empleo de fuerzas.

Actualmente, los esfuerzos para reducir la resistencia de los automóviles y por tanto reducir el consumo de combustible, ha influenciado enormemente el diseño de la carrocería de los mismos. En definitiva, el fin de dar una forma aerodinámica a un cuerpo es conseguir que el punto de separación de la capa límite se mueva lo más atrás posible para reducir el tamaño de la estela turbulenta al mínimo. Evidentemente, ha de prestarse especial atención tanto a la forma aerodinámica en la parte posterior, o aguas abajo, como en la parte anterior del cuerpo. La forma de la parte frontal del cuerpo es importante en cuanto que determina la posición del punto o puntos de separación en la parte posterior del cuerpo. Se consigue la mínima perturbación de las líneas de corriente empleando morro redondeado, por lo que es la forma más adecuada para flujos incompresibles a velocidades subsónicas. Ello puede comprobarse en la figura 4.21, donde se compara el flujo alrededor de un vehículo de motor con morro cuadrado con uno de morro redondeado.



Morro de bordes vivos con flujo separado a lo largo de toda la superficie lateral y con coeficiente de resistencia C_x o C_D grande. $C_D = 0.74$.



Morro redondeado con separación en la parte trasera del vehículo y coeficiente de resistencia pequeño $C_D = 0.44$.

Figura 4. 21 Vista en planta del flujo alrededor de un vehículo de motor (furgoneta de reparto).

(Adaptado a partir de de H. Schlichting. *Boundary Layer Theory*, 4ª. Ed., pág. 34, McGraw-Hill, New York, 1960).

Las siguientes figuras ilustran cómo cambia el coeficiente de arrastre en función de distintos factores:

a) En función del tipo de morfología:








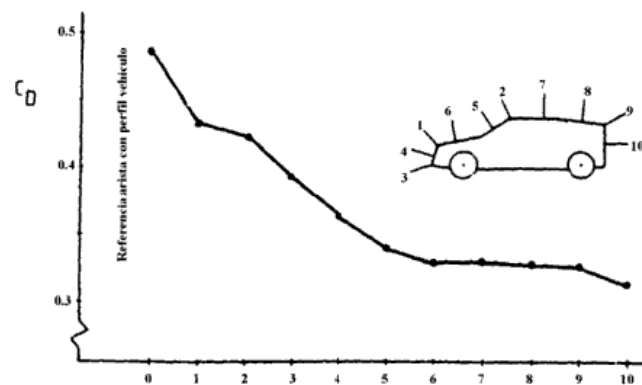
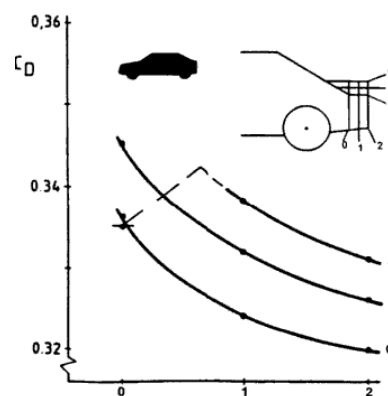
	Coeficiente de arrastre (C_D)	Potencia de arrastre en kW – valores medios para $A = 2\text{m}^2$ a diferentes velocidades ($v_0 = 0$) –			
		40 Km/h	80 Km/h	120 Km/h	160 Km/h
	0.15 a 0.02	0.29	2.3	7.8	18
	0.23	0.38	3.0	10	24
	0.2 a 0.25	0.37	3.0	10	24
	0.3 a 0.4	0.58	4.6	16	37
	0.4 a 0.55	0.78	6.3	21	50
	0.5 a 0.6	0.91	7.2	24	58
	0.5 a 0.7	1	7.9	27	38
Camiones, combinaciones	0.8 a 0.15	---	---	---	---
Motocicletas	0.6 a 0.7	---	---	---	---
Autobuses	0.6 a 0.7	---	---	---	---
Autobuses con líneas aerodinámicas	0.3 a 0.4	---	---	---	---

Figura 4. 22 Coeficiente de arrastre y requerimiento de potencia asociada para diferentes morfologías de vehículos.

A la vista de los resultados de la tabla mostrada se comprueba que el morro redondeado en la parte frontal del vehículo ofrece valores del coeficiente de resistencia aerodinámica C_x menores así como potencias de arrastre más pequeños. Dichos parámetros se incrementan a medida que el morro adquiere un perfil con mayor número de aristas.

b) En función del número y tipo de aristas:Figura 4. 23 Reducción de C_x o C_D en función del número y tipo de aristas redondeadasc) En función de las dimensiones del maletero:Figura 4. 24 Reducción de C_x o C_D en función de las dimensiones del maletero del vehículo.

Como se observa en la gráfica el valor del coeficiente C_D es tanto más pequeño cuanto mayor es la altura del maletero y menor la distancia al extremo final del mismo.

A continuación se explica con detalle la influencia de las diferentes morfologías de cada una de las zonas del vehículo sobre la fuerza de arrastre:

Parte trasera

La parte trasera del vehículo es la de mayor contribución a la fuerza de arrastre, ya que es en esta zona donde mayores turbulencias de aire se forman. La siguiente figura muestra la influencia de la inclinación de la parte trasera del vehículo para diferentes longitudes de la zona inclinada.

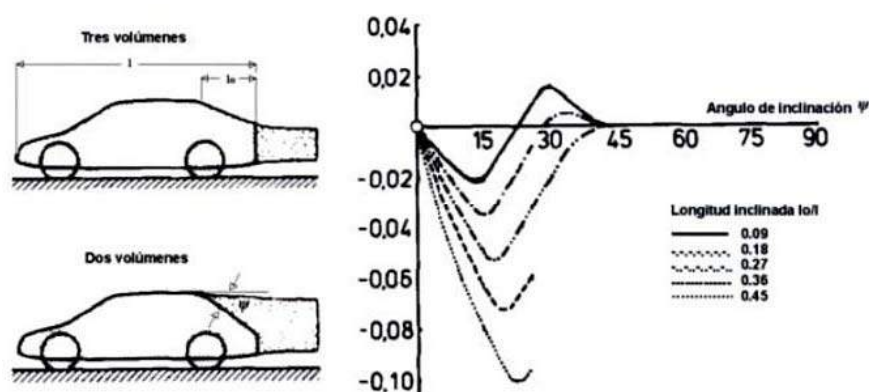


Figura 4.25 Influencia de la inclinación trasera del vehículo sobre la fuerza de arrastre.

Como se observa en la figura 4.25, conforme el ángulo de inclinación evoluciona hasta los 15° la fuerza de arrastre disminuye progresivamente. En cuanto se supera el valor de dicho ángulo, el arrastre empieza a aumentar debido a la mayor separación que se produce entre las líneas de flujo.

Parte delantera

El arrastre aerodinámico en la parte trasera del vehículo está ligado a los diseños del extremo frontal del mismo y del ángulo de entrada (ángulo de inclinación del parabrisas) del aire, puesto que el parabrisas establece la dirección del flujo en su aproximación al techo. El ángulo del parabrisas influye directamente en los efectos aerodinámicos, alcanzando mayor relevancia en los vehículos industriales. Los ángulos superficiales reducen el arrastre, pero dificultan el diseño del vehículo ya que aumentan, entre otras, las cargas térmicas solares. Así, para un ángulo superior a 60 grados se produce la difusión de la luz con merma de las condiciones de visibilidad.

Con un ángulo excesivo, la velocidad del flujo de aire que incide sobre el parabrisas se reduce por la gran presión generada en la zona. Con un ángulo menor se incrementa la velocidad del flujo, aumentando también las cargas aerodinámicas sobre el limpiaparabrisas.

Parte inferior

La parte inferior del vehículo también es un área crítica en la generación de fuerzas de arrastre. El sistema de suspensión, los sistemas de escape y otros componentes que forman parte de los bajos del vehículo exponen su resistencia en forma de fuerzas de arrastre. El flujo de aire en esta área es un plano cortante controlado por la velocidad cero del aire en la superficie de rodadura e inducido por los componentes que forman los bajos del vehículo. Se pueden reducir los efectos de arrastre en los bajos del vehículo acoplando unos paneles (spoilers) o faldones que reduzcan la distancia del cuerpo del vehículo con el suelo.

- **Fuerza lateral**

Un coche en circulación por una carretera se encuentra sometido a la acción del viento^[3], y con frecuencia puede actuar de forma lateral intentando cambiar la dirección de desplazamiento. Según su intensidad puede darse el caso de que la fuerza lateral tome más importancia que la fuerza de arrastre. Dicha fuerza lateral viene dada por la expresión:

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_s \cdot A_f \cdot v^2$$

Ecuación 4.28

Donde:

- A_f = superficie frontal del vehículo. También puede emplearse como superficie de referencia A_s , superficie lateral proyectada del vehículo.
- C_s = el coeficiente de fuerza lateral (función del ángulo de incidencia del viento).
- ρ = la densidad del aire.
- v = la velocidad relativa resultante del viento incidente.

El coeficiente de fuerza lateral se obtiene a partir de la ecuación 4.29:

$$C_s = \frac{F_y}{\frac{\rho}{2} V^2 A_f}$$

Ecuación 4.29

Donde:

- F_y = es la fuerza lateral que sufre el vehículo.
- A_f = superficie frontal del vehículo. También puede emplearse como superficie de referencia A_s , superficie lateral proyectada del vehículo.
- ρ = la densidad del aire.
- v = la velocidad relativa resultante del viento incidente.

En la figura 4.26 mostrada a continuación se observa un gráfico en el que se representa el coeficiente de fuerza lateral C_s en función del ángulo de incidencia del viento para diferentes tipos de vehículos, como pueden furgones, berlinas y turismos familiares. Como puede observarse claramente, a medida que aumentan las dimensiones del vehículo, mayor será el valor del coeficiente de fuerza lateral C_s .

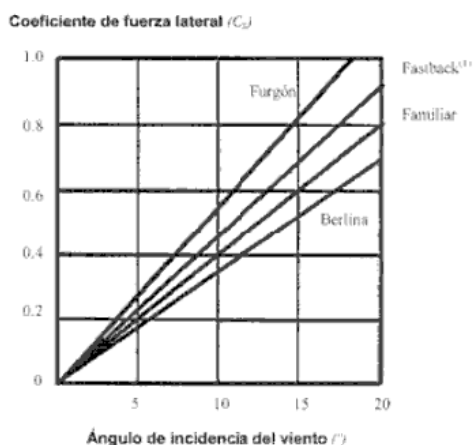


Figura 4. 26 C_s en función del ángulo de incidencia del viento para diferentes tipos de vehículos.

La fuerza lateral actúa sobre la carrocería en el centro de presión, punto que suele localizarse por delante del centro de gravedad, de modo tal que incita al viraje del vehículo.

Las fuerzas laterales que se generan como consecuencia de la aparición de un viento cruzado, y que normalmente son mayores en estos casos que la resistencia al avance, dependen del ángulo de incidencia de la resultante de la fuerza total del viento, que suele ser mayor que el ángulo resultante de la dirección del viento. Se comprueba en el esquema de la figura 4.27.

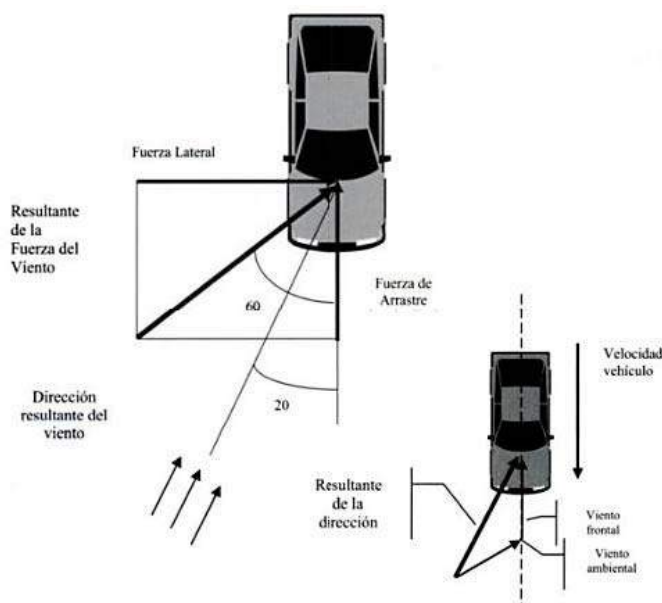


Figura 4. 27 Influencia del viento lateral en la resistencia al avance.

En estos casos es de gran importancia que el valor de la fuerza lateral que se transmite sobre el eje delantero, sea mayor que la fuerza lateral transmitida sobre el eje trasero.

También se puede deducir de la observación de la figura anterior que cuanto mayor sea la fuerza resultante de los vientos cruzados, mayor será la resistencia al avance que soportará el vehículo.

La forma del vehículo influye también en la fuerza lateral. En general, superficies laterales planas y prolongadas hacia la parte trasera, como en vehículos tipo furgoneta o familiares, tienden a incrementar el valor de la fuerza lateral F_y .

- **Fuerza de sustentación**

La fuerza de sustentación tiene su origen en la diferencia de presiones de la parte inferior y superior del vehículo. Normalmente esta fuerza tiene un sentido tal que compensa una parte del peso del vehículo, es decir, sentido vertical; descargando parcialmente los ejes. La fuerza de sustentación influye por tanto en la estabilidad del vehículo y afecta a la dirigibilidad del mismo. Además, esta fuerza se mide en la línea central del vehículo, en el centro de la distancia entre ejes y puede cuantificarse según la siguiente ecuación:

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_z \cdot A_f \cdot v^2$$

Ecuación 4.30

Donde:

- A_f = es el área frontal del vehículo.
- C_z = el coeficiente de sustentación aerodinámico.
- ρ = la densidad del aire.
- v = la velocidad del viento.

Dado que la fuerza de sustentación es vertical se buscará que tenga un sentido negativo o al menos que sea lo menos positiva posible, es decir, que intente pegar al vehículo contra el asfalto aumentando así su adherencia. Existen tres métodos fundamentales para llevar esto a cabo:

Configuración básica del vehículo

El valor del coeficiente de sustentación aerodinámico, C_z , y por tanto de la fuerza de sustentación, disminuye si se eliminan zonas de separación de flujo en la parte superior, las cuales originan disminución de presión. Los valores de C_z se reducen con una parte delantera baja, y si es posible cóncava, superficie lisa en el techo y parte posterior elevada. Pueden usarse spoiler u otras ayudas aerodinámicas para lograr efectos análogos. El ángulo de ataque del vehículo y la distancia al suelo de sus bajos afectan también a C_z .

Deflectores con “efecto de ala”

Para lograr sustentaciones negativas pueden instalarse “alas” invertidas, cuyo efecto aumenta con su separación del suelo, así como retrasando el “ala” posterior cuanto sea posible por detrás del eje trasero y separando la delantera por delante del eje anterior.

Efecto suelo

En el automovilismo se busca crear una zona de alta presión por encima del vehículo y una de baja presión por debajo. La diferencia de presiones provoca una succión que “aplasta” al

vehículo contra el suelo, mejorando el agarre, lo que se traduce en la posibilidad de trazar curvas a mayor velocidad.

Este efecto se introdujo en la Fórmula 1 a finales de los años 70, mediante faldones y un diseño especial de la parte inferior de la carrocería para lograr un efecto Venturi que disminuyera la presión del aire debajo del monoplace.

Sin embargo, esta técnica podía resultar peligrosa ya que en cuanto no hubiese una presión lo suficientemente pequeña por debajo del vehículo, lo cual por ejemplo podía pasar si se pasaba a gran velocidad por encima de un bache y el vehículo daba un "saltito", el vehículo podía volverse muy inestable e incluso podía salir literalmente despedido del suelo. Después de un período de dudosa tolerancia y tras varios accidentes muy aparatosos se prohibió o limitó la utilización del efecto suelo en los circuitos por motivos de seguridad.



Figura 4. 28 Accidente producido por las consecuencias negativas del efecto suelo.

Lo interesante del efecto suelo es que aumenta considerablemente el esfuerzo límite de adherencia entre los neumáticos y el suelo, sin aumentar la masa del automóvil, haciendo que el agarre sea mayor a velocidades más elevadas. El problema se presenta cuando los materiales de la banda de rodadura de los neumáticos llegan al límite de adherencia contra el suelo, o cuando por accidente se levanta una rueda o el monoplace avanza ladeado. Si esto ocurre, el vehículo simplemente se vuelve incontrolable.

Esta condición causó gravísimos accidentes en competiciones de coches de carreras, especialmente en Fórmula 1. Cabe recordar entre los más trágicos el que sufrió el piloto canadiense Gilles Villeneuve en la tanda clasificatoria del GP de Bélgica de 1982, donde al golpear con una de sus ruedas delanteras la rueda trasera de un coche rezagado, su Ferrari salió prácticamente volando, despidiendo por los aires a Villeneuve, quien murió en el acto.

4.1.5.2. Momentos aerodinámicos

4.1.5.2.1. Momento de balanceo

El momento de balanceo M_x ,^[1] es el momento resultante de las fuerzas aerodinámicas lateral F_y y de sustentación F_z respecto a la proyección del eje longitudinal sobre el plano de rodadura.

$$M_x = F_y \cdot h + F_z \cdot b$$

Ecuación 4.31

Donde los parámetros h y b corresponde a las distancias mostradas en la figura 4.29:

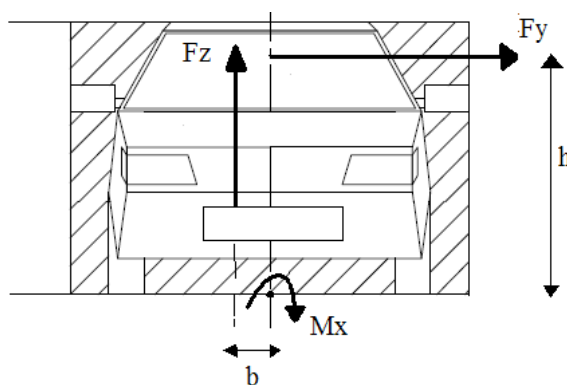


Figura 4. 29 Momento de balanceo.

El momento de balanceo tiene poca influencia sobre la estabilidad del vehículo y depende en gran parte de las propiedades de balanceo del sistema de suspensión. Este momento se puede cuantificar con la siguiente expresión:

$$M_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{Mx} \cdot A_f \cdot L \cdot v^2$$

Ecuación 4.32

En la expresión de los momentos se utiliza, como puede observarse, el área frontal del vehículo A_f y como longitud característica suele usarse la batalla o distancia entre ejes L . El coeficiente del momento de balanceo C_{Mx} es muy sensible a los cambios de la dirección del viento tomando valores que oscilan entre 0.1 y 0.3 en vehículos de tipo turismo.

4.1.5.2.2. Momento de cabeceo

Cuando la fuerza de sustentación ^[1] actúa reduciendo (o incrementando) el peso sobre los ejes, existe una reacción, debida al cabeceo del vehículo, que propicia la transferencia del peso entre los dos ejes delantero y trasero. El momento de cabeceo surge debido a que el arrastre no actúa al nivel del suelo y la fuerza de sustentación no actúa exactamente en el centro de la batalla del vehículo. El momento de cabeceo se define como:

$$M_y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{My} \cdot A_f \cdot L \cdot v^2$$

Ecuación 4.33

Donde los parámetros son los mismos que para el momento de balanceo excepto el coeficiente del momento de cabeceo C_{My} .

El momento puede trasladarse sin cambiar su efecto, por tanto no es necesario un punto de acción. Los vehículos más modernos tienen un coeficiente de momento de cabeceo en el rango 0.05 - 0.2, y es bastante sensible a la variación del ángulo de ataque del vehículo, tal y como se observa en la figura 4.30.

Coeficiente del momento de cabeceo (C_{My})

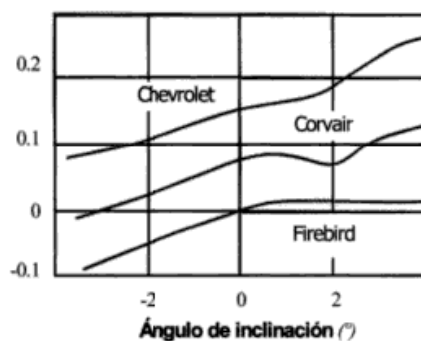


Figura 4. 30 Variación de C_{My} en función del ángulo de cabeceo de la estructura del vehículo.

4.1.5.2.3. Momento de guiñada

La fuerza lateral ^[3] causada por el viento lateral no actúa normalmente en el centro de la línea de batalla. A causa de este viento se crea un momento de guiñada, M_z , que puede cuantificarse como:

$$M_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{Mz} \cdot A_f \cdot L \cdot v^2$$

Ecuación 4.34

Donde el coeficiente momento de guiñada C_{Mz} , varía con la dirección del viento, comenzando con un ángulo relativo nulo del viento y con un crecimiento lineal del ángulo de 20° .

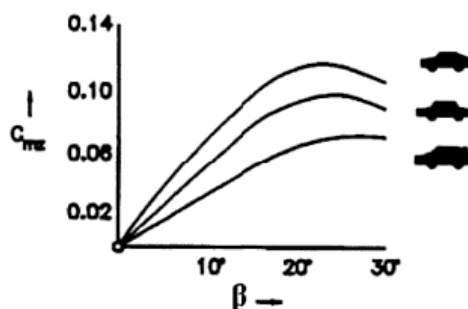


Figura 4. 31 Influencia de la forma trasera del vehículo en el momento de guiñada.

4.2. Problemas aerodinámicos especiales

A continuación se comentan tres efectos^[1] que debido a los problemas que causan a nivel aerodinámico, merecen especial atención.

4.2.1. Ruido

Cualquier elemento de la carrocería que forme salientes o protuberancias, origina separaciones periódicas de flujo que forman una calle de vórtices, llamada de Karman, corriente abajo desde el elemento perturbador creando una zona inestable de flujo. Si la frecuencia de los vórtices se sitúa dentro del campo audible, las fluctuaciones de presión dentro del campo de flujo inestable se manifiestan en forma de ruido.

La reducción del mismo se consigue o bien eliminando los elementos que provocan las separaciones o bien actuando sobre el flujo, es decir, eliminando el carácter periódico o modificando la frecuencia.

4.2.2. Efecto aeroelástico

La presión elástica produce deformaciones elásticas sobre los elementos elásticos del vehículo, que influyen en las formas aerodinámicas.

Como consecuencia surgen dos problemas:

Problema estático: supone la deformación de ciertos elementos hasta alcanzar el equilibrio con las fuerzas de presión para cada velocidad. No presenta gran importancia.

Problema dinámico: complejo. La vibración de ciertos elementos a determinadas frecuencias induce una oscilación periódica aerodinámica, de la misma frecuencia, en el fluido circundante. Ello puede provocar auto-excitación, con lo que el amortiguamiento interno del sistema elástico puede no ser suficiente para mantener la estabilidad, con lo que se originan oscilaciones de gran amplitud.

4.2.3. Transporte de partículas

El arrastre de partículas, líquidas o sólidas, en el flujo exterior y su trayectoria respecto al vehículo, influyen tanto en el ensuciado del vehículo, con los consiguientes problemas de seguridad, como en la proyección de dichas partículas hacia los vehículos que circulan detrás.

Generalmente la trayectoria de las partículas y las líneas de corriente no coinciden, no existiendo por el momento modelos adecuados para el cálculo de las trayectorias de las partículas, por lo que es necesaria la realización de investigaciones experimentales para definir las. De ellos se deduce que la acumulación de suciedad en la superficie del vehículo se debe al hecho de que las partículas no pueden seguir las líneas de corriente, sobretodo en las zonas donde éstas presentan mayor curvatura ya que la trayectoria de las partículas suele presentar una curvatura mínima hasta su impacto con el vehículo. Estos efectos se intensifican en las zonas de cambio de inclinación, como es la zona comprendida entre el capot y el parabrisas, así como la parte trasera, debido al flujo en forma de vórtices.

4.3. Objetivos de los estudios aerodinámicos en vehículos

Los ensayos aerodinámicos se realizan en carretera, pistas con instalaciones especiales y en túneles aerodinámicos.

La gran variedad de condiciones reales complica la simulación de las condiciones del ensayo: el flujo de aire no es homogéneo ya que se ve alterado por variaciones propias del viento; cambios de temperatura en diferentes puntos; la humedad, lluvia y nieve crean condiciones particulares, etc. Todo ello conlleva a que las condiciones del ensayo se alejen de la realidad tanto en las instalaciones como en los túneles aerodinámicos.

Todo estudio aerodinámico, bien sea en túnel, en pista o en carretera, tiene en cuenta las fuerzas aerodinámicas que se producen en el vehículo. Como ya se ha explicado a lo largo del desarrollo, en cada punto de la superficie del vehículo se producen dos fuerzas que tienen que ver con su movimiento en el seno de un fluido, como es el aire en este caso. La primera es la fuerza de presión que ejerce el fluido, con dirección normal a la superficie, y la segunda, la fuerza de rozamiento con el fluido debida a efectos viscosos, cuya dirección es tangencial a la superficie. Dichas fuerzas pueden observarse en la figura 4.32.

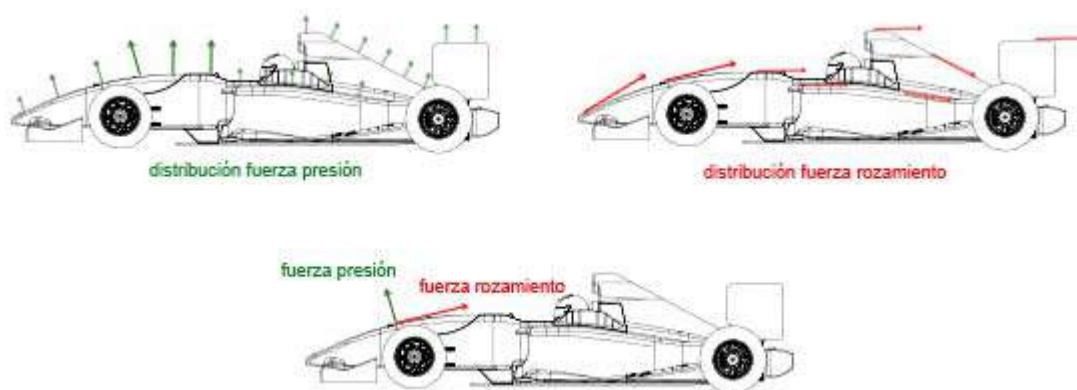


Figura 4. 32 Distribución de fuerzas en un automóvil.

Mediante el ensayo en el túnel de viento se obtienen distribuciones de presión a partir de las cuales, y a través de métodos numéricos, se obtendrán las distribuciones de fuerzas. Sumando dichas distribuciones se calcula la resultante que se aplica en el centro de presiones del vehículo previo cálculo de este. En el centro de presiones del vehículo (cdp) se aplicará la resultante de todas las fuerzas aerodinámicas mientras que en el centro de gravedad (cdg), se aplicará la

resultante de todas las fuerzas de gravedad del vehículo. Si estos dos centros divergen demasiado en su posición el vehículo será inestable y habrá que proceder al ajuste del reparto de pesos, que consiste en intentar ajustar la posición del centro de gravedad para que coincida lo máximo posible con el centro de presiones aerodinámicas de cara a que el vehículo sea lo más estable posible.

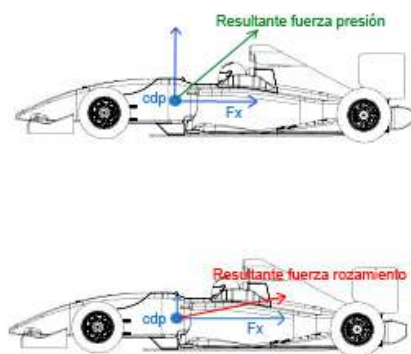


Figura 4. 33 Fuerzas resultantes sobre un automóvil.

Si no se consigue la coincidencia se producen pares de fuerzas que provocan momentos y con ello inestabilidad en el vehículo.

A partir de la figura 4.33, y como ya se ha visto anteriormente, se comprueba que las resultantes de las fuerzas aerodinámicas tienen una componente en el eje X que se opone al avance del vehículo llamada fuerza de arrastre, F_x , o resistencia aerodinámica, y una componente en el eje Y que tiende a elevar al vehículo llamada sustentación.

En los vehículos automóviles se persigue el equilibrio que minimice la fuerza de arrastre y la fuerza de sustentación, incluso en ocasiones, como es el caso de la Fórmula 1, se pretende que la fuerza de sustentación en lugar de hacia arriba vaya hacia abajo (downforce) para favorecer así el agarre y la tracción del vehículo.

5. Análisis de resultados

A la hora de comenzar el desarrollo del análisis se comprobó que los archivos de extensión *.xml* proporcionados por el software de control del *Kestrel 4500* no eran compatibles con ningún otro tipo de formato ni procesador de datos, por lo que fue necesaria la transformación de los mismos. Primeramente se seleccionaron aquellos tramos en los que se cumplían los criterios de ensayo, y seguidamente dichos archivos se transformaron al formato *.txt* para poder importarlos desde Microsoft Office Excel 2007.

5.1. Análisis de la dinámica longitudinal del vehículo

El estudio de las acciones aerodinámicas alrededor de la superficie del vehículo en movimiento implicaba una caracterización de la velocidad del flujo de aire incidente, con el objetivo de poder determinar el perfil de velocidades circundante al vehículo para distintas posiciones a lo largo del eje longitudinal del mismo.

Una vez el vehículo inicia la marcha y debido al efecto de la viscosidad, las partículas de fluido que entran en contacto directo con la superficie del vehículo, estando en este caso el punto de ataque en la parrilla frontal, tendrán velocidad nula y a partir de dicho punto de ataque, la velocidad pasa gradualmente desde cero en la superficie inmediata de la placa hasta el valor de flujo uniforme, U_0 , a una altura δ a partir de la cual la velocidad no varía ($du/dy = 0$), siendo esta distancia δ el espesor de la capa límite, es decir, la zona afectada por la viscosidad ocupa va la superficie de contacto hasta el borde de la capa límite. Fuera de dicha capa límite el fluido, aunque sea viscoso, no tiene intercambio de cantidad de movimiento entre las distintas partículas porque el gradiente de velocidades es nulo.

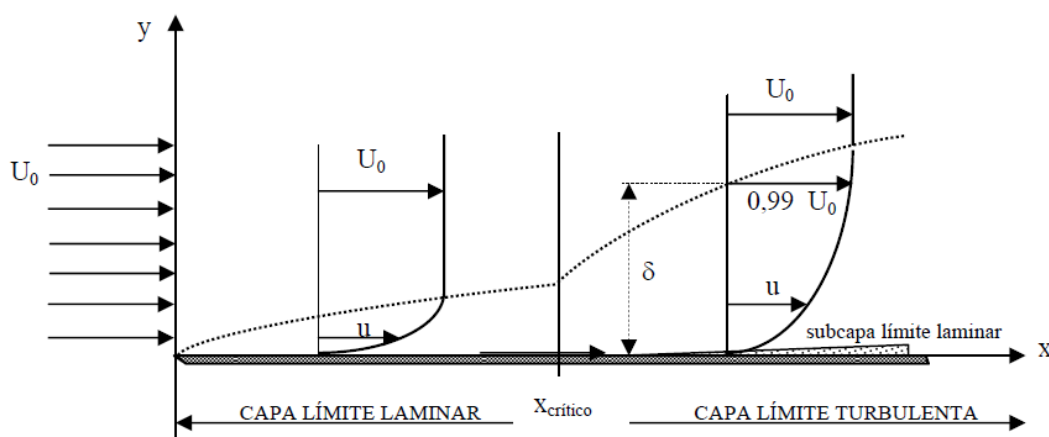


Figura 5.1 Esquema de la capa límite laminar y turbulenta.

Puesto que experimentalmente es difícil situar el punto en el que se anula el gradiente de velocidad, se suele definir el espesor de la capa límite como la distancia desde el punto de contacto con la superficie del vehículo al punto vertical para el cual la velocidad es el 99% de la velocidad de flujo uniforme:

$$\delta = y \quad u(y) = 0.99 \cdot U_0$$

Ecuación 5.1

A medida que se avanza en la dirección del eje x , aumenta el número de partículas frenadas y por lo tanto el espesor de la zona de influencia viscosa también aumenta, con las partículas alineadas direccionalmente en lo que se denomina capa límite laminar. Dicho flujo laminar continúa hasta que en un cierto punto el flujo se hace inestable, dando lugar a un engrosamiento más rápido de la capa límite acompañado de un aumento de la turbulencia. Dicha zona es la denominada capa límite turbulenta y puede observarse en la figura 5.1, destacando que incluso dentro de la región turbulenta existe una delgada capa pegada a la superficie en la cual las partículas están ordenadas direccionalmente en un flujo laminar, denominándose a dicha capa subcapa límite laminar. Fuera de dicha capa límite, es decir, en la zona en la que el fluido, aun siendo viscoso, no presenta intercambio de cantidad de movimiento entre las distintas partículas porque el gradiente de velocidades es nulo, el flujo es uniforme y presentará un valor constante de la velocidad del viento incidente en la superficie, en este caso, U_0 .

Por lo tanto, a la hora de caracterizar dicho perfil de velocidades, se recurrió al cálculo del valor medio de la velocidad del flujo en los puntos definidos para el ensayo, recurriendo a la ecuación de la media aritmética:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N}$$

Ecuación 5.2

Siendo x_i cada uno de los valores de la velocidad registrados por el equipo para diferentes instantes de tiempo y N el número total de valores tomados en el ensayo en cuestión.

5.2. Ensayos

La realización de los ensayos se desarrolló durante la jornada del 11 de octubre de 2010 a partir de las 18:00 h. La climatología de dicha jornada en el momento del inicio de los ensayos se caracterizó por cielo despejado, con intervalos de sol y nubes, presión barométrica de 929'59 mb y temperatura próxima a los 15 °C.

Los ensayos realizados desde la posición correspondiente al punto P1 hasta el punto P9, se llevaron a cabo en las afueras de Madrid, en la Carretera de Andalucía (A-4) entre las localidades de Getafe y Valdemoro, tanto en sentido Norte como Sur, aprovechando los cambios de sentido para desplazar el anemómetro de posición y cambiar el sentido de circulación. Dicha autovía cuenta con numerosos tramos rectos de elevada longitud en los que no suponía un riesgo la circulación a la velocidad a 90 km/h. Por el contrario, cabe destacar la presencia de tráfico denso entre las 18:00 y las 20:00 h, por lo que se decidió que la duración de cada ensayo en dicho tramo horario tuviera una duración mínima de minuto o minuto y medio, obteniendo así un mayor registro de datos en las posiciones de la zona delantera para poder garantizar la repetibilidad y validez de los mismos.

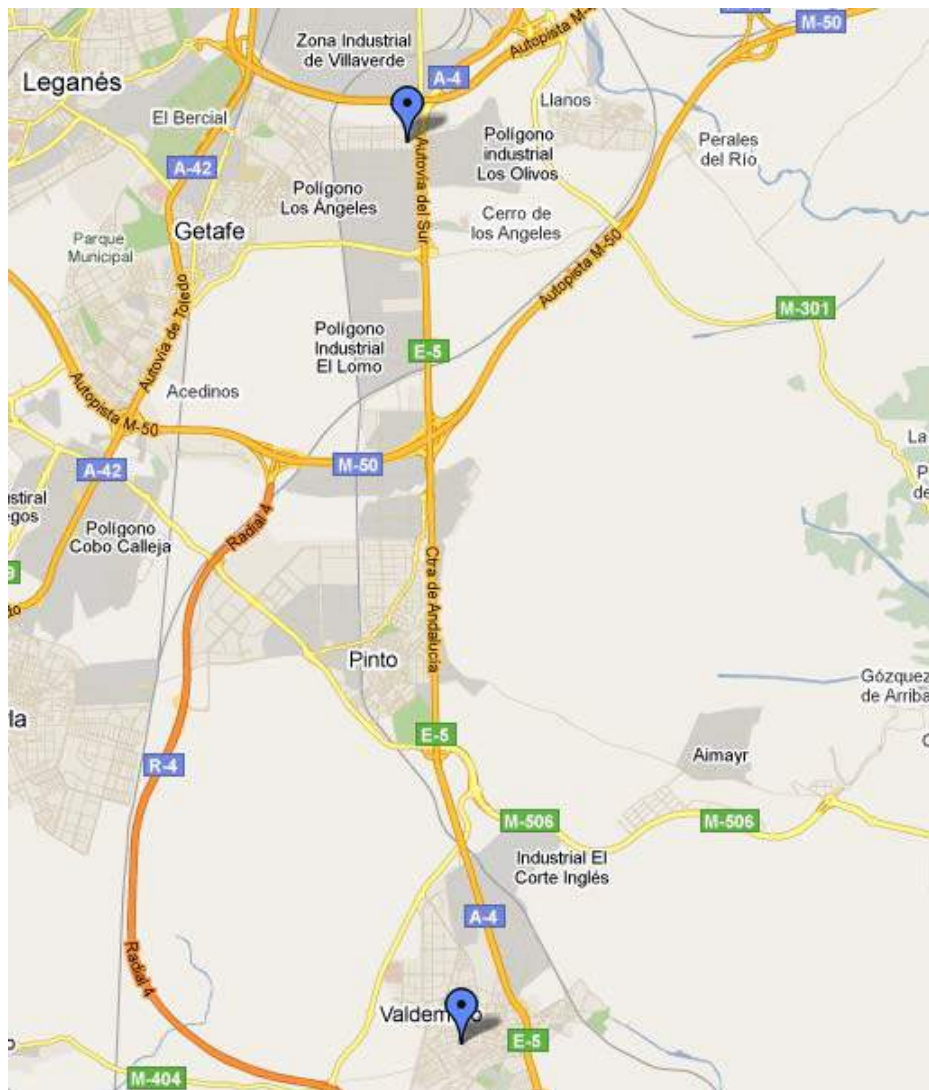


Figura 5. 2 Mapa de uno de los tramos de ensayo en la A-4.

5.2.1. Tratamiento del registro de datos

Cada una de las pruebas realizadas se llevó a cabo cumpliendo en todo momento las condiciones establecidas al comienzo del proyecto referentes al entorno, estilo de conducción y condiciones climáticas.

Con el objetivo de conseguir claridad a la hora de exponer los resultados obtenidos, se han dividido los datos registrados en cinco grupos: frontal, delantera o morro del vehículo, luna delantera, techo y trasera del vehículo.

Para cada uno de los ensayos realizados en los diferentes puntos, el total de datos registrados por el anemómetro se recogen en las tablas incluidas en el anexo del presente proyecto. En dichas tablas figura la fecha de registro, la hora de cada una de las mediciones, la dirección del viento con respecto al norte geográfico, la velocidad del viento en km/h y por último las condiciones ambientales de temperatura y presión barométrica. Con el fin de unificar las condiciones del estudio a la hora de realizar el análisis de datos, dentro de cada grupo de valores recogidos correspondientes a cada una de las posiciones del eje, se tomó una muestra de veinte valores correlativos para su posterior tratamiento y análisis.

Como ya se ha explicado anteriormente, aunque el aire es un fluido que resulta fácilmente compresible, ya que su densidad varía de forma muy sensible cuando es sometido a importantes cambios de presión, su comportamiento desde la perspectiva de la aerodinámica en los automóviles, permite asegurar que la densidad no varía sustancialmente, debido a que los cambios de presión sobre la superficie de la carrocería no son muy significativos. No obstante, no puede decirse lo mismo del efecto que este aire va a provocar sobre las fuerzas de arrastre y sustentación, cuya influencia hay que tenerla en cuenta por cuanto que actúan sobre superficies muy grandes y de formas irregulares. La consideración del aire como fluido incompresible puede ser aceptada en los vehículos hasta valores del número de Mach inferiores a 0,4, lo cual se comprobará en función de los datos obtenidos de velocidad del viento para cada uno de los puntos de ensayo a lo largo del presente capítulo.

Por otro lado, considerando que la densidad del aire en condiciones normales de presión y temperatura (1 atm de presión y 15 °C) tiene un valor de $1,225 \text{ kg/m}^3$ y que los ensayos fueron realizados bajo unas condiciones climáticas ligeramente diferentes a las normales (a una temperatura media de 14,98 °C y con una presión atmosférica media igual a 929,59 mbar), se hallará el valor de la densidad del aire en cada una de las pruebas. Con ello se pretende apoyar la suposición que afirma que el valor de la densidad se mantiene prácticamente constante a lo largo de todos los puntos del eje longitudinal, y por lo tanto puede tratarse como un fluido incompresible.

5.2.2. Consideración del aire como fluido incompresible

5.2.2.1. Análisis del número de Mach

Aunque la mayoría de los fluidos son incompresibles y, por lo tanto, puede asumirse una densidad fija de los mismos, es necesario considerar que los gases, y en el caso que nos ocupa el aire, son fluidos compresibles, es decir, que no mantienen una densidad constante y por lo tanto, no presentan un comportamiento fácilmente predecible. Sin embargo, resulta imprescindible destacar que los gases sólo tienen un comportamiento compresible cuando la velocidad relativa de los mismos es más del 40 % de la velocidad del sonido en dicho gas, entendiéndose por velocidad relativa del fluido como el valor de dicha velocidad con respecto al sólido en el cual está sumergido, bien considerando que el sólido es estacionario y el fluido se mueve sobre él, o bien que el fluido está estacionario y el sólido se mueve a través del fluido, siendo el segundo caso el de mayor importancia en aeronáutica y en el movimiento de todo tipo de vehículos a través de la atmósfera.

Según el *“Tratado sobre los automóviles”* de Font Mezquita [2], se define la relación “velocidad relativa/ velocidad del sonido” como *número de Mach*, siendo su expresión la ecuación 5.3, la cual permite afirmar que el aire se comporta como un fluido incompresible en situaciones de movimiento de vehículos a través del aire siempre y cuando el valor de dicho parámetro sea inferior a 0’4, siendo algunas de dichas situaciones competiciones deportivas como el motociclismo (velocidades superiores a los 200 km/h), automovilismo (velocidades superiores a 300 km/h) o conducción convencional (velocidades inferiores a 150 km/h).

$$M = \frac{v_r}{c}$$

Ecuación 5.3

Donde:

- v_r = velocidad relativa del cuerpo a través del fluido, en m/ s.
- c = velocidad del sonido, 343 m/s. **

**valor de la velocidad del sonido establecido por el “Manual de la técnica del automóvil”, Karl- Heinz Dietsche y Maria Klingebiel.

Se trata de un número adimensional típicamente usado para describir la velocidad de los aviones. Mach 1 equivale a la velocidad del sonido, Mach 2 es dos veces la velocidad del sonido, etc. Este número fue propuesto por el físico y filósofo austriaco Ernst Mach (1838-1916), como una manera sencilla de expresar la velocidad de un objeto con respecto a la velocidad del sonido. La utilidad del número de Mach reside en que permite expresar la velocidad de un objeto no de forma absoluta en km/h o m/s, sino tomando como referencia la velocidad del sonido, algo interesante puesto que de esta manera, no es necesario saber la velocidad del sonido para saber si un avión que vuela a una velocidad dada la ha superado, basta con saber su número de Mach.

Normalmente, las velocidades de vuelo se clasifican según su número de Mach en:

- Subsónico $M < 0,7$
- Transónico $0,7 < M < 1,2$
- Supersónico $1,2 < M < 5$
- Hipersónico $M > 5$

Como confirmación previa para aplicar el tratamiento de fluido incompresible al flujo de aire circundante al vehículo, se realizó un análisis del número de Mach una vez determinado el perfil de velocidades del vehículo objeto del análisis. Aplicando la ecuación 5.3 a las velocidades obtenidas en los diferentes puntos del ensayo, se obtienen los valores recogidos en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Valores nº Mach

Posición	Velocidad viento	nº Mach
Px	m/s	adimensional
P1	9,62	0,03
P2	19,35	0,06
P3	18,93	0,06
P4	20,98	0,06
P5	18,85	0,05
P6	16,79	0,05
P7	16,82	0,05
P8	18,28	0,05
P9	23,54	0,07
P10	26,85	0,08
P11	26,27	0,08
P12	25,81	0,08
P13	25,56	0,07
P14	24,13	0,07
P15	20,44	0,06
P16	16,01	0,05
P17	3,38	0,01
P18	3,49	0,01

A la vista de los resultados de dicha tabla se comprueba que para todas las posiciones definidas en el eje longitudinal del vehículo los valores calculados para el número de Mach son muy inferiores a 0'5, valor por debajo del cual puede aceptarse la consideración del aire como fluido incompresible en los vehículos.

5.2.2.2. Cálculo de la densidad del aire a lo largo de los ensayos

Suponiendo que el aire se comporta como un gas ideal o perfecto, el valor de la densidad vendrá dado en función de la temperatura y la presión en el momento de la prueba, y su valor será deducido a partir de la ecuación 5. :

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Ecuación 5.4

Donde:

- P = presión en Pa.
- V = volumen del gas en cuestión.
- n = número de moles.
- $R = 287.05 \text{ J / kg} \cdot \text{K}$, constante de los gases ideales.
- ρ = la densidad del gas en cuestión.
- T = temperatura del aire en grados Kelvin (K).

Sustituyendo en dicha ecuación 5.4 el número de moles, n , por la ecuación 5.5 :

$$\rho = \frac{n}{V} \qquad n = \rho \cdot V$$

Ecuación 5.5

Donde:

- V = volumen del gas en cuestión.
- n = número de moles.
- ρ = la densidad del aire (kg/m^3).

Se obtiene la expresión para el cálculo de la densidad del aire, tal y como se observa en la ecuación 5.6:

$$n = \rho \cdot V \quad P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \rightarrow \quad P \cdot V = \rho \cdot V \cdot R \cdot T$$

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{P}{R \cdot T}$$

Ecuación 5.6

Donde:

- P = presión en Pa.
- $R = 287,05 \text{ J} / \text{kg} \cdot \text{K}$, constante de los gases ideales.
- ρ = la densidad del aire (kg/m^3).
- T = temperatura del aire en grados Kelvin (K).

Otra posible método a la hora de hallar el valor de la densidad del aire bajo unas condiciones de presión y temperatura diferentes a las normales, según el “*Tratado sobre Automóviles Tomo IV*” de Font Mezquita, viene dado por la ecuación 5.7 que define el efecto de la temperatura y la presión en la densidad del aire.

$$\rho_{\text{aire}} = \rho_0 \left(\frac{P_r}{P_0} \right) \cdot \left(\frac{T_0}{273.15 + T_r} \right) (\text{kg} / \text{m}^3)$$

Ecuación 5.7

Donde, considerando que las condiciones normales de presión y temperatura se corresponden con 1 atm y 15 °C respectivamente, se tiene que:

- P_0 = presión en condiciones normales, en kPa. (101,325 kPa)
- T_0 = temperatura en condiciones normales, en grados K.
- ρ_0 = valor estándar de la densidad del aire en condiciones atmosféricas normales.
 $\rho_0 = 1,225 \text{ Kg} / \text{m}^3$
- P_r = presión atmosférica en kPa.
- T_r = temperatura del aire en °C.

Quedando la ecuación 5.7 de la forma:

$$\rho_{\text{aire}} = 1.225 \cdot \left(\frac{P_r}{101.325} \right) \cdot \left(\frac{288.15}{273.15 + T_r} \right) (\text{kg/m}^3)$$

Ecuación 5.8

*Equivalencias de unidades según las tablas oficiales de conversión de unidades del CEM (Centro Español de Metrología) ^[13]

Tal y como se comprueba en las tablas recogidas en el anexo de medidas, el anemómetro recoge los valores de temperatura y presión barométrica en °C y mbar, respectivamente. A partir de las tablas de conversión oficiales del CEM, recogidas en el anexo, se realizó la conversión de dichos parámetros a las unidades requeridas para poder hallar el valor de la densidad del aire en cada uno de los ensayos, mediante los dos métodos explicados anteriormente, pudiéndose comprobar dichas conversiones en las del anexo X. Una vez convertidas las mediciones a las unidades deseadas, se aplicaron a cada uno de los grupos de datos tanto la ecuación 5.4 de los gases ideales como la ecuación 5.7 que muestra el efecto de la temperatura y presión en la densidad del aire, con el objetivo de conseguir el valor exacto de la densidad para las condiciones de temperatura y presión imperantes en cada una de las pruebas realizadas. Los resultados del valor de la densidad del aire obtenidos se recogen en los anexos del presente proyecto.

Para proceder al análisis de los resultados obtenidos y poder estudiar las conclusiones, se procedió a hallar la media del valor de la densidad del aire para los dos métodos empleados, así como la desviación típica de los datos obtenidos, información que se recoge en la tabla 5.2.

Tabla 5. 2 Tabla de densidades.

Tabla de densidades	ρ_{aire} (Ecuación 5.6) kg/ m ³	ρ_{aire} (Ecuación 5.7) kg/ m ³
Promedio, \bar{X}	1,12398	1,12396
Desviación típica, σ	0,00314	0,00314
Coefficiente de variación (de Pearson), C_v	0,00279	0,00279

En dicha tabla se comprueba que tras aplicar a los valores de densidad del aire en los diferentes ensayos, tanto la ecuación 5.6 como la ecuación 5.7 el valor promedio obtenido apenas difiere según se emplee uno u otro método, lo que nos lleva a tomar un valor medio de la densidad del aire para el resto del presente proyecto de 1'1239 kg/ m³. Así mismo, se comprueba que la desviación típica obtenida por ambos métodos coincide y además su valor es muy pequeño, 0'00314, lo que nos lleva a decir que los diferentes valores calculados para la densidad del aire en cada uno de los ensayos, están muy próximos al valor medio obtenido de dicha

variable. Finalmente, con el objetivo de cuantificar la homogeneidad de los valores de la muestra para la densidad del aire y poder tomar como válido el supuesto de fluido incompresible aplicado al flujo de aire circundante al vehículo, se ha recurrido al coeficiente de variación de Pearson, ecuación 5.9.

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{X}}$$

Ecuación 5.9

Donde:

- \bar{X} = media aritmética o promedio de la variable a tratar.
- σ = desviación típica de la variable a tratar.

Aplicando dicha ecuación a los parámetros de desviación típica y media aritmética de la tabla 5.2, se ha obtenido un valor de dicho coeficiente en ambos casos de 0'00279, equivalente a un 0'279 %. Dicho resultado, mucho menor que 1, señala una alta homogeneidad en los valores registrados en la muestra, lo que permite confirmar un valor constante de la densidad del aire a lo largo de los ensayos en campo abierto.

Dicho resultado del estudio de la densidad del aire, unido a la obtención de un número de Mach muy inferior a 0'5 en el perfil de velocidades del vehículo, permite confirmar el comportamiento del aire como fluido incompresible y su tratamiento como tal.

5.3. Resultados de los ensayos

5.3.1. Grupo de ensayos en el morro del vehículo: P1, P2, P3

El primero de los tramos de datos registrados se corresponde con los ensayos realizados en las posiciones P1, P2 y P3, cuya ubicación puede apreciarse en las figuras 5.3.

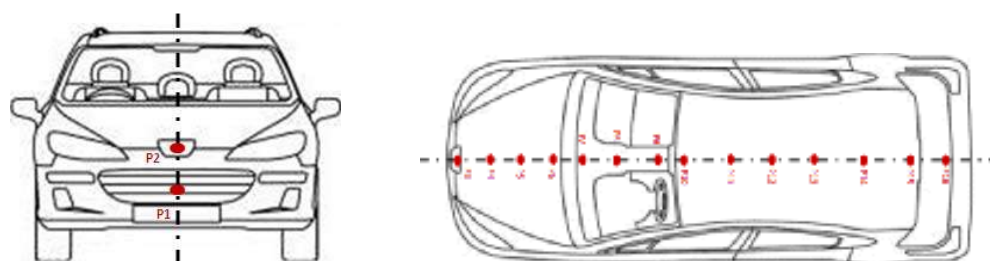


Figura 5.3 Esquema de las posiciones de ensayo.

En el anexo. se muestran las tablas con los resultados de las mediciones de cada una de las pruebas realizadas durante el transcurso de las mismas. Para el análisis y posterior tratamiento de dichos datos se tomó una muestra correspondiente con las veinte primeras mediciones correlativas, las mismas que fueron seleccionadas para los estudios anteriores del número de Mach y de densidad del aire. Aplicando la ecuación 5.2 de la media aritmética a los parámetros Velocidad del Viento, Temperatura y Presión barométrica se obtienen los resultados promediados resaltados en color en la tabla 5.3, en base a los cuales se llevaron a cabo los estudios para el perfil de velocidades del vehículo que se detallan a continuación. Cabe destacar que se ha realizado la conversión de dichos parámetros a las unidades del Sistema Internacional de Unidades, para facilitar su posterior tratamiento.

Tabla 5.3 Resultados en P1, P2 y P3.

Valores medios de las posiciones P1, P2 y P3				
Posición de ensayo	Velocidad del viento	Desviación típica	Temperatura	Presión barométrica
	km/h	km/h	°C	mb
P1	34,63	0,766	16,82	930,22
P2	69,65	1,833	16,82	930,43
P3	68,16	0,828	16,31	933,61

Dichos valores promedio de la velocidad del viento sombreados en la tabla 5.3 se corresponden con el diagrama en rojo del gráfico 5.1 en el cual cada uno de los escalones representa, de izquierda a derecha, el valor medio de la velocidad del viento de cada una de las posiciones del ensayo P1, P2 y P3.

Por otro lado, tal y como muestra la leyenda de dicho gráfico, el diagrama en azul recoge los datos registrados en los diferentes puntos de ensayo referentes al valor en km/h de la velocidad del viento en la zona frontal del vehículo.

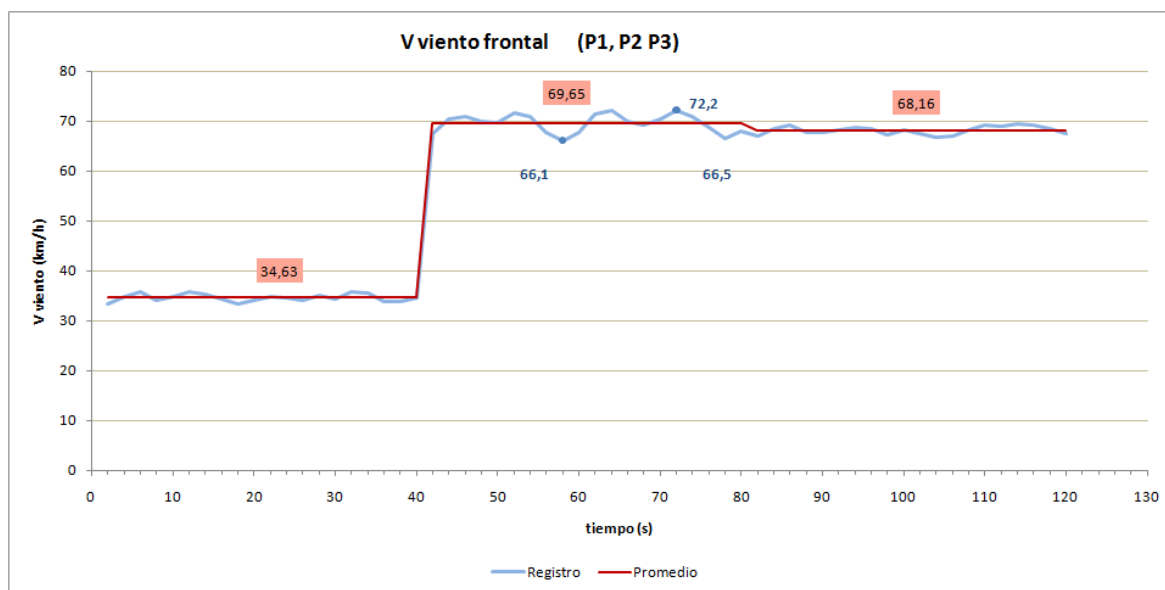


Gráfico 5. 1 Velocidad del flujo de aire en el frontal.

El primer tramo de medidas se corresponde con la posición P1 del eje longitudinal, concretamente centrado en la parrilla delantera del vehículo, y tal y como se comprueba tanto en la tabla 5. Como en el gráfico 5.1, presenta un valor medio de la velocidad del viento de 34'63 km/h con una desviación típica, σ , de 0'766 km/h. A la vista de la representación se observa una buena repetibilidad de los datos durante la duración del ensayo, por lo que la velocidad de incidencia del viento en dicha posición presenta un valor prácticamente constante, sin turbulencias ni cambios bruscos de la misma.

el equipo 25 cm sobre el contorno del vehículo hasta la posición P2, justo al borde del comienzo del capó delantero, se obtiene un valor medio de la velocidad del viento de 69'65 km/h con σ igual a 1'833 k/h. Puede comprobarse el notable aumento tanto de la velocidad de incidencia como del valor de σ en el comienzo del morro del coche, lo que implica una peor

repetibilidad de los datos. Como consecuencia, se comprueba que velocidad del viento presenta mayores fluctuaciones que en la posición precedente, tal y como se observa en el segundo escalón del gráfico 5., donde se aprecia claramente el aumento del valor medio de la velocidad así como una mayor dispersión de los resultados.

Continuando con el desplazamiento del anemómetro a lo largo del eje central del vehículo hasta la posición P3, se comprueba que la velocidad del viento incidente mantiene un valor ligeramente inferior al obtenido en la posición anterior, 68'16 km/h, mientras que la desviación típica obtenida también desciende a 0'828 km/h. A la vista de la representación gráfica que se observa en el gráfico 5.1, se comprueba que efectivamente, la velocidad media del flujo de aire incidente es algo menor a la vez que sin embargo, aumenta la linealidad de los datos registrados tal y como indicaba el descenso en el valor de la desviación típica.

5.3.2. Grupo de ensayos en el capó delantero del vehículo: P4, P5, P6

El segundo grupo de posiciones en el análisis del perfil de velocidades se corresponde con los puntos P4, P5 y P6, que recorren desde casi el comienzo del capó hasta el inicio de la luna delantera del vehículo.

Al igual que en el caso anterior, todos los datos registrados durante cada una de las pruebas se recogen en las tablas del anexo al final del proyecto. Para el tratamiento de los mismos se ha seguido el mismo procedimiento que en el ensayo precedente, aplicando la ecuación 5.2 de la media aritmética a los parámetros objeto del análisis se obtienen los valores medios mostrados en la tabla 5.4.

Tabla 5. 4 Resultados en P4, P5 y P6.

Valores medios de las posiciones P4, P5 y P6				
Posición de ensayo	Velocidad del viento	Desviación típica	Temperatura	Presión barométrica
	km/h	km/h	°C	mb
P4	75,53	1,53	15,77	934,35
P5	67,85	1,080	16,34	935,05
P6	60,43	1,100	16,23	935

Al igual que en el caso anterior, los datos sombreados en rosado en la tabla 5.4 se corresponden con los valores medios de las mediciones registradas en los ensayos y se han representado en color rojo en el gráfico 5.2 que figura a continuación, mientras que los datos recogidos directamente por el equipo se corresponden con el diagrama en azul.

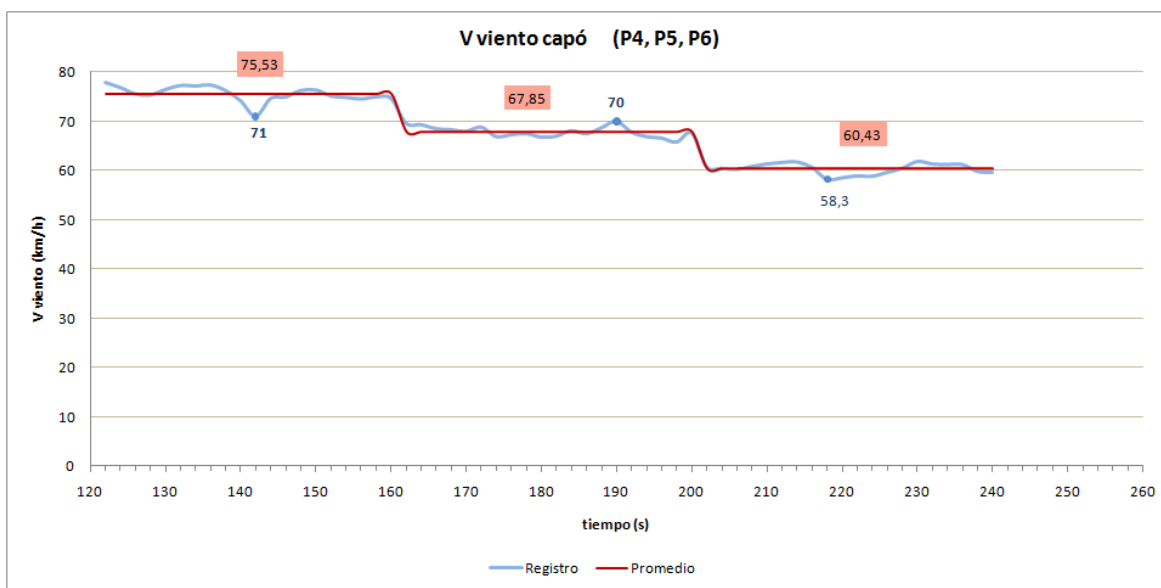


Gráfico 5. 2 Velocidad del flujo de aire en la delantera.

El primer tramo de medidas se corresponde con la posición P4 del capó y se caracteriza por un valor medio de la velocidad de 75'53 km/h y una desviación típica elevada de 1'53 km/h que indica, tal y como se observa en el diagrama, que efectivamente existen leves fluctuaciones en el flujo de aire que provoca que la linealidad de la misma presente irregularidades, tal y como se señalan en el gráfico 5.2.

El siguiente punto de ensayo, el P5, proporciona un descenso tanto de la velocidad media, 67'85 km/h, como de la desviación típica, 1'08 km/h. De la misma manera, la siguiente prueba realizada en la posición P6 proporciona un valor de la velocidad media de 60'43 km/h con una desviación típica de 1'10 km/h. A la vista de dichos resultados en ambas posiciones, se comprueba que a medida que el equipo se aproxima a la luna delantera o zona del parabrisas del vehículo, se produce tanto un descenso en la velocidad de incidencia del flujo de aire contra el coche, como

un aumento en la estabilidad de la misma, tal y como indica el descenso de la desviación típica en ambas posiciones así como la representación mostrada en el gráfico 5.2.

5.3.3. Grupo de ensayos en la luna delantera del vehículo: P7, P8, P9

El tercer grupo de pruebas se desarrolló en la luna delantera del vehículo, en los puntos denominados P7, P8 y P9 del eje longitudinal. Los datos registrados en el equipo para cada una de las pruebas se recogen en el anexo y al igual que en los ensayos precedentes, se ha tomado una muestra de dichos datos con los veinte primeros valores correlativos a los que se les ha aplicado la ecuación 5.2 para obtener el promedio de los parámetros mostrados en la tabla 5.5.

Tabla 5. 5 Resultados en P7, P8 y P9.

Valores medios de las posiciones P7, P8 y P9				
Posición de ensayo	Velocidad del viento	Desviación típica	Temperatura	Presión barométrica
	km/h	km/h	°C	mb
P7	60,56	1,47	16,25	930,2
P8	65,8	2,800	16,8	931,91
P9	84,73	3,510	13,98	926,12

Dichos datos promediados en rosado se corresponden con el diagrama en rojo representado en el gráfico 5.3 mientras que el azul, muestra las mediciones recogidas por el anemómetro durante cada una de las pruebas.

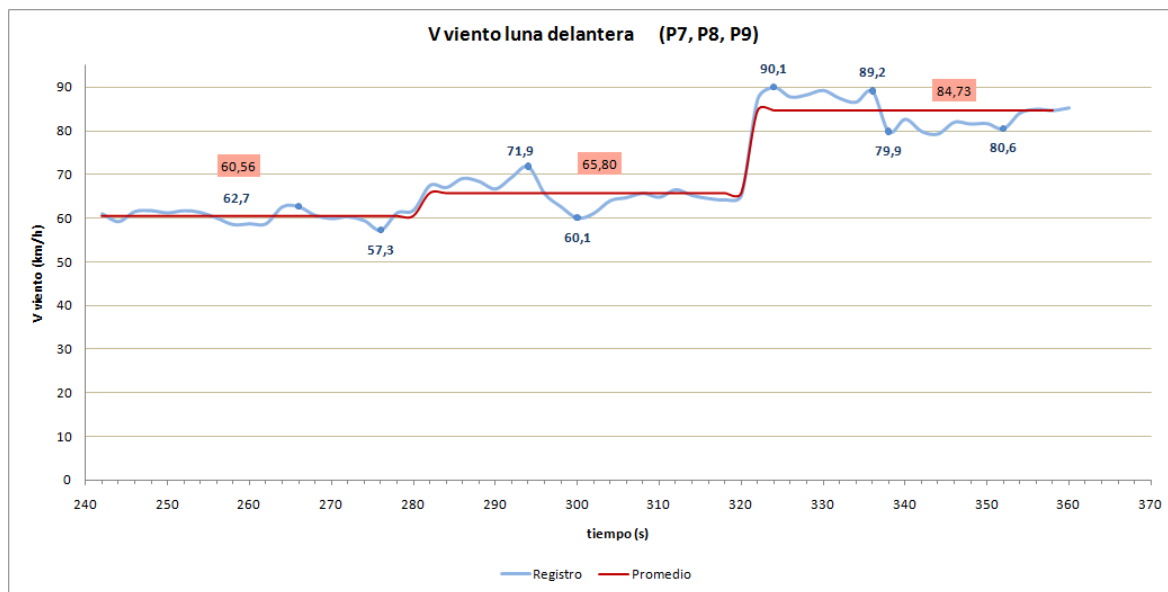


Gráfico 5.3 Velocidad del flujo de aire en la luna delantera.

La primera posición en el grupo de ensayos correspondiente a la luna delantera del vehículo comienza en el punto P7, posición situada en la zona inferior del cristal delantero y que proporciona un valor de la velocidad del flujo de aire incidente de 60'56 km/h prácticamente igual a la obtenida en la posición anterior P6, con un ligero aumento de la desviación típica de los datos registrados, tal y como se observa en el diagrama en azul del gráfico 5.3.

Seguidamente, se produce un aumento tanto en el valor de la velocidad del flujo incidente como en la σ al desplazar el equipo a la posición P8 situada aproximadamente en el centro de la luna, obteniéndose una velocidad de 65'8 km/h y una σ más elevada, de 2'8 km/h.

A medida que se avanza hacia el final del cristal delantero, continua el aumento muy significativo tanto del valor de la velocidad del aire que incide en el vehículo como en el de la desviación típica de los datos registrados, tal y como puede observarse en el gráfico 5.3. Al alcanzar la posición P9 situada casi al comienzo del techo del vehículo se produce un acusado aumento en el valor medio obtenido para la velocidad del flujo incidente, que alcanza los 84'73 km/h, a la vez que la σ de dicho conjunto de datos se eleva hasta 3'510 km/h, lo que indica una notable fluctuación en los valores recogidos, es decir, una mayor oscilación en el valor de la velocidad del aire incidente que se traduce en una estabilidad menor de dicho parámetro al alcanzar el comienzo del techo del vehículo, tal y como se comprueba gráficamente en el gráfico

5.3 a través de los diagramas representados, donde aparecen señalados en azul los puntos más representativos de esta variabilidad.

5.3.4. Grupo de ensayos en el inicio del techo: P10, P11, P12

El cuarto grupo de pruebas realizadas engloba a los tres puntos definidos desde el inicio del techo del vehículo hasta aproximadamente la mitad del mismo, correspondiéndose con las posiciones P10, P11 y P12 del eje longitudinal. La secuencia de datos registrados por el anemómetro durante el tiempo que duró el ensayo, aproximadamente un minuto, se recogen en el anexo. Tras aplicar el mismo procedimiento de análisis anteriormente descrito a los parámetros objeto del estudio, a través de las ecuaciones de la media aritmética (ecuación 5.2) y la desviación típica (ecuación 5.3) se obtuvieron los promedios que muestra la tabla 5.6.

Tabla 5. 6 Resultados en P10, P11 y P12.

Valores medios de las posiciones P10, P11 y P12				
Posición de ensayo	Velocidad del viento	Desviación típica	Temperatura	Presión barométrica
	km/h	km/h	°C	mb
P10	96,67	0,99	13,94	928,05
P11	94,58	2,05	13,87	927,18
P12	92,93	1,13	13,90	927,38

Sombreados en rosa se observan los valores correspondientes al valor medio de la velocidad del viento incidente, que aparece representado en las tres posiciones en el diagrama en rojo mostrado en el gráfico 5.4 se comprueba que el valor de la velocidad media en las tres pruebas presenta un ligero descenso a medida que se desplaza el anemómetro hacia la zona media del techo del vehículo.

Cabe destacar la elevada velocidad con la que el flujo de aire incide en la posición P10, con un valor de 96'67 km/h y desviación típica que no llega a la unidad, lo que se traduce en una

marcada estabilidad de la velocidad del aire que circunda al vehículo en dicho punto del ensayo. Por el contrario, a medida que se avanza en dirección hacia la parte posterior del vehículo, en las posiciones P11 y P12, se percibe por un lado un leve descenso en el valor de la velocidad del aire registrada, y por otro un aumento en la desviación típica de los datos, que lleva a deducir un aumento de turbulencias en el flujo de aire a medida que éste avanza hacia la zona trasera del techo del automóvil.

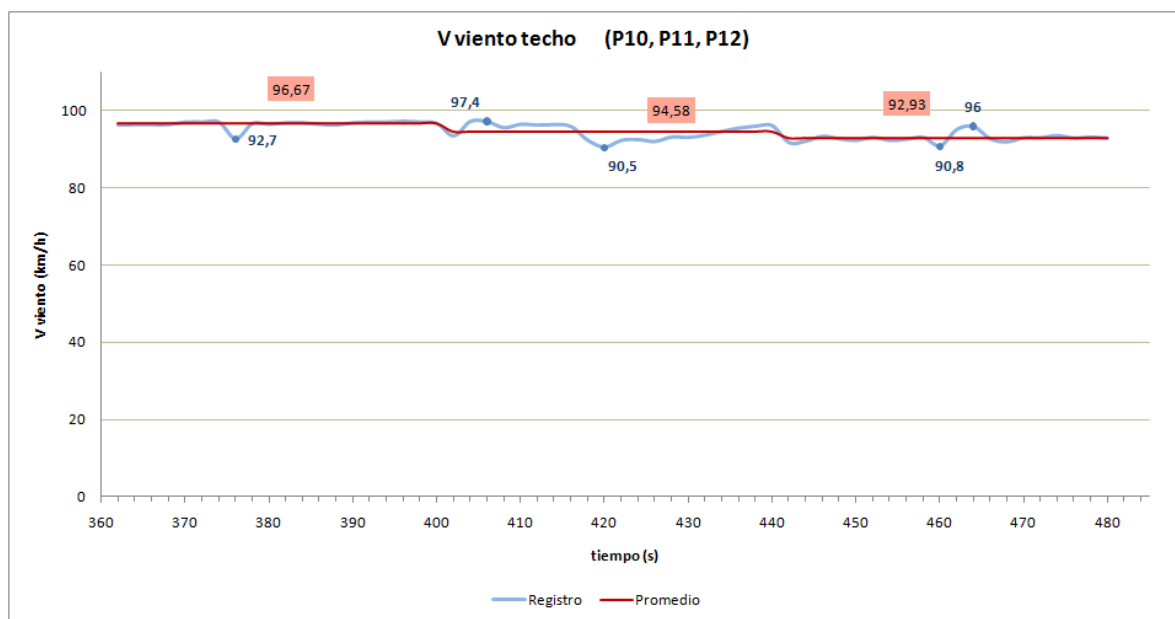


Gráfico 5. 4 Velocidad del flujo de aire en el inicio del techo.

5.3.5. Grupo de ensayos la zona trasera del techo: P13, P14, P15

Las pruebas realizadas en las posiciones P13, P14 y P15 conforman el quinto grupo de los ensayos realizados por zonas y se corresponden con el inicio de la trasera del vehículo. El conjunto de datos registrado por el equipo figura en las tablas del anexo, sobre el que se ha aplicado el método de análisis propuesto obteniendo así la tabla de promedios 5.7 que se detalla a continuación:

Tabla 5. 7 Resultados en P13, P14 y P15.

Valores medios de las posiciones P13, P14 y P15				
Posición de ensayo	Velocidad del viento	Desviación típica	Temperatura	Presión barométrica
	km/h	km/h	°C	mb
P13	92,03	2,49	13,9	928,74
P14	86,86	1,13	13,88	928,93
P15	73,6	2,91	13,87	928,09

En la prueba realizada sobre la posición P13 del eje, al final del techo del vehículo, se comprueba que, con unos valores de la velocidad del flujo incidente de 92'03 km/h y una desviación típica de 2'49 km/h, se mantiene la tendencia a la disminución en el valor medio de la velocidad ya observada en el grupo anterior de ensayos, a la vez que se confirma una mayor dispersión en los datos que desemboca en una aumento de la desviación típica de la muestra. Dicho aumento de la inestabilidad de los valores de la velocidad de flujo de aire se ilustra en el gráfico 5.5, a través del diagrama trazado en azul.

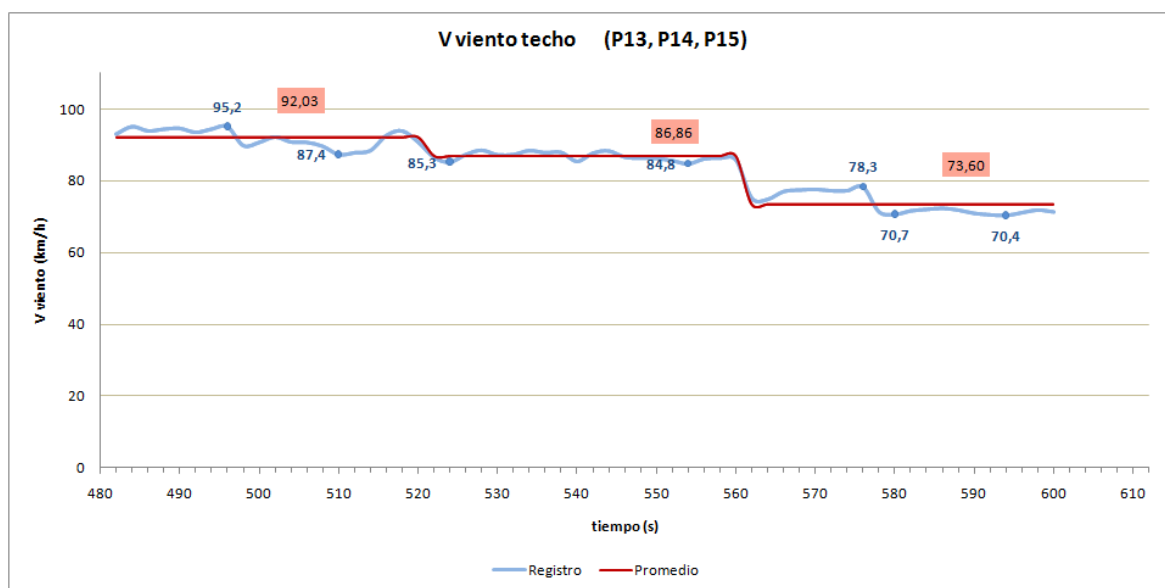


Gráfico 5. 5 Velocidad del flujo de viento en la zona posterior del techo.

A partir de los puntos de ensayo P14 y P15, ya situados en la luna trasera del vehículo, la tendencia al alza del valor de la desviación típica se mantiene mientras que sigue decayendo el valor de la velocidad del flujo de aire incidente. Es decir, la velocidad del flujo de aire va

disminuyendo progresivamente a la vez que aumentan las turbulencias a medida que el equipo se desplaza hacia el final del contorno del vehículo, tal y como se ilustra en el gráfico 5.5.

5.3.6. Grupo de ensayos la zona trasera del techo: P16, P17, P18

Finalmente, como último conjunto de posiciones de ensayo se llevaron a cabo las pruebas correspondientes a los puntos P16, P17 y P18 situados en el maletero del vehículo. Los resultados registrados se recogen en la tabla 5.8 del anexo y tras llevar a cabo el análisis de los mismos según el método descrito anteriormente, se obtuvieron los resultados promedio que se muestran a continuación en la tabla 5.8.

Tabla 5. 8 Resultados en P16, P17 y P18.

Valores medios de las posiciones P16, P17 y P18				
Posición de ensayo	Velocidad del viento	Desviación típica	Temperatura	Presión barométrica
	km/h	km/h	°C	mb
P16	57,62	1,37	14,02	926,47
P17	12,17	1,15	13,93	926,47
P18	12,58	0,86	12,93	924,47

Se comprueba que a medida que el flujo avanza hacia la parte inferior del maletero el valor de la velocidad del flujo de aire continúa su descenso, hasta casi los 58 km/h, a la vez que el valor de la desviación típica de los datos es bastante destacable, con 1'37 km/h, que indica un aumento de la inestabilidad en los datos registrados por el equipo. Al llegar a la posición P17, situada a tan sólo 25 cm sobre la superficie de contorno del punto P16, la caída en el valor de la velocidad del aire es tremendamente significativa, puesto que dicho valor medio desciende hasta casi los 13 km/h y se mantiene así hasta la posición P18, mientras que la inestabilidad de dichas mediciones sigue siendo importante, con valores de la desviación típica cercanos a 1 km/h. Gráficamente, se observan tanto los valores registrados como el valor medio de los mismos, en el gráfico 5.6.

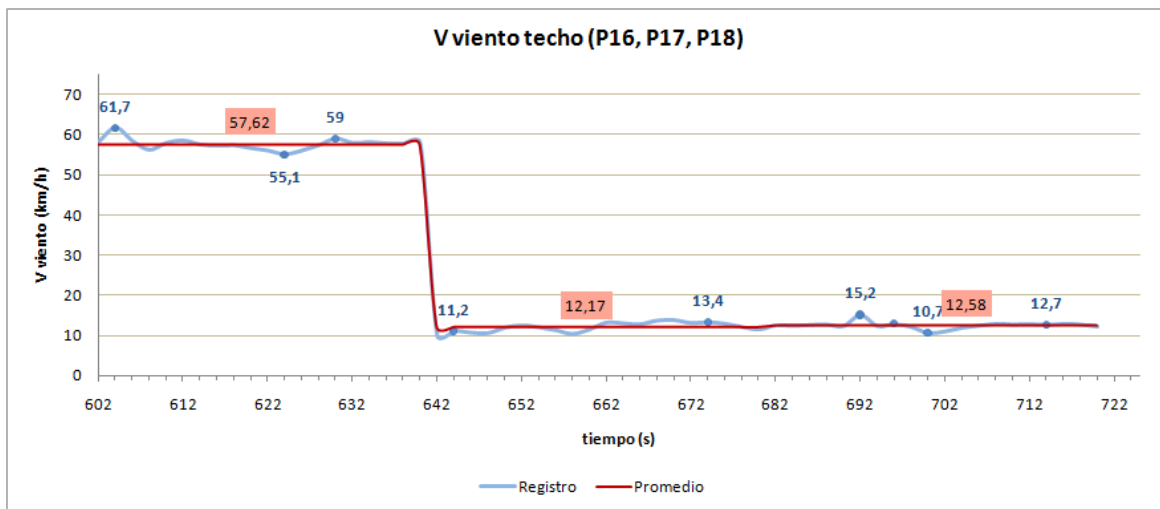


Gráfico 5.6 Velocidad del flujo de aire en la trasera.

A la vista de los resultados expuestos se confirma que el flujo de aire circundante al vehículo va perdiendo velocidad a lo largo de la superficie del mismo hasta que llega un punto en que dicho flujo no es capaz de seguir en contacto con el contorno del coche y se produce la separación del flujo con respecto a la superficie del vehículo, aumentando, como puede comprobarse en la tabla 5.8 de este apartado, la inestabilidad de la velocidad del flujo de aire. Dicha separación crea una zona de presiones adversas en la parte trasera del maletero que favorece la aparición de turbulencias y vórtices en los que puede llegar a producirse la recirculación del flujo de aire.



Figura 5.4 Diagrama de presiones relativas alrededor de una carrocería familiar.

Según el “Tratado sobre automóviles” de Font Mezquita [2], en la figura 5.4 se comprueba que efectivamente para un diseño con carrocería de tipo familiar, la zona de bajas presiones se mantiene tanto en la trasera como en el maletero del vehículo. Por otro lado, según los valores recogidos desde la tablas 5.7 en adelante, se observa un aumento muy significativo de la inestabilidad en el valor de la velocidad del flujo de aire a lo largo de todo el techo y maletero del vehículo, lo que indica un aumento de las turbulencias en esta región lo cual favorece que se

produzca el despegue de la capa límite al disminuir la velocidad del flujo de aire de forma tan notable. En la figura 5.5 se muestra la estela turbulenta que se forma tras el desprendimiento de la capa límite turbulenta.

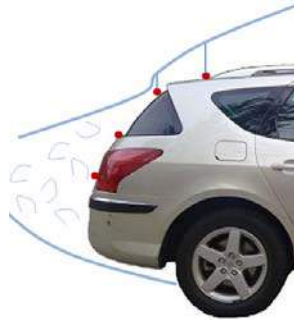


Figura 5. 5 Desprendimiento de la capa límite turbulenta.

5.4. Perfil de velocidades del Peugeot 407 SW

A partir de los resultados obtenidos en cada una de las diferentes pruebas detalladas anteriormente, se ha trazado el gráfico 5.7 en el que se muestran de forma conjunta los valores resultantes de la velocidad del flujo de aire que circunda al vehículo según los diferentes tramos en los que fue dividido su contorno. Como puede observarse, figura señalado cada uno de los tramos del contorno a los que pertenece cada uno de los ensayos comenzando desde la parrilla frontal del vehículo, formado por las posiciones 1, 2 y 3, hasta la trasera del mismo, que finaliza en las posiciones 16, 17 y 18. Con el objetivo de facilitar la interpretación de dicho diagrama, se han representado los módulos de la velocidad del flujo de aire con el fin de simular alrededor del vehículo el perfil de velocidades obtenido tras los ensayos. Dicha representación se recoge en la figura 5.6, y en ella se comprueban de forma sencilla tanto los valles como los picos del valor del parámetro analizado.

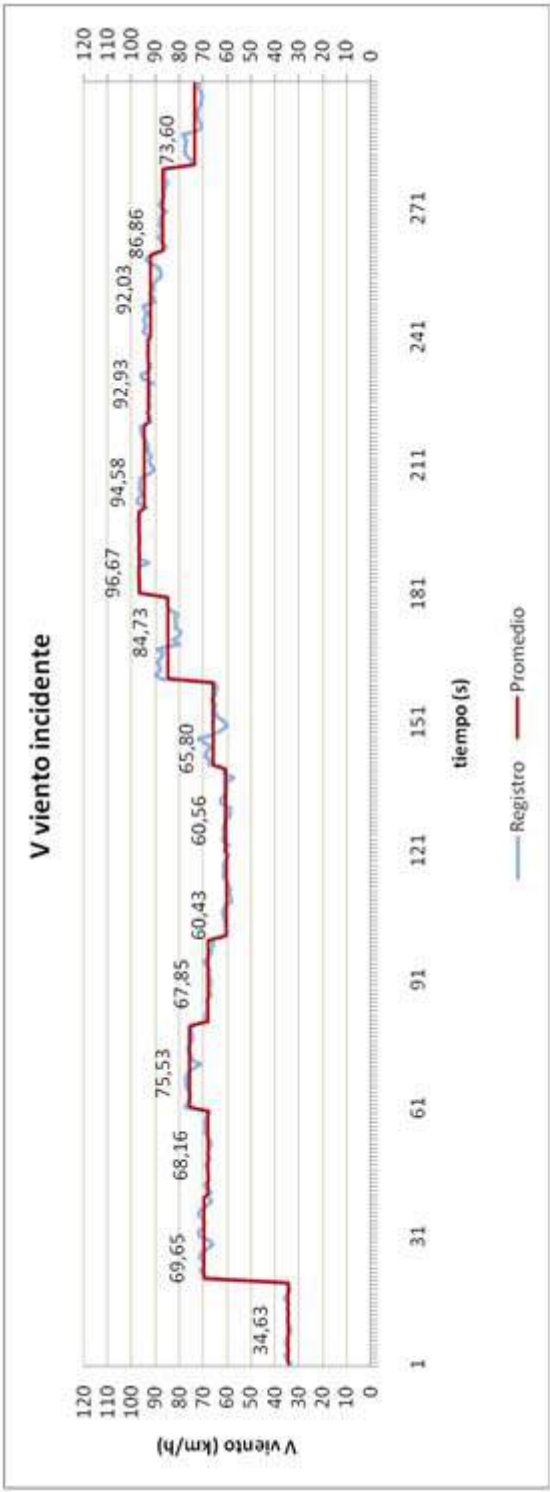


Gráfico 5. 7 Diagrama completo de la velocidad del flujo de aire



Figura 5. 6 Perfil de velocidades alrededor del vehículo

En base al gráfico 5.7 y la figura 5.6 en las que se muestra el comportamiento del flujo de aire durante el recorrido del contorno del vehículo, se procedió al análisis del comportamiento de la velocidad de dicho flujo en base a la distribución de presiones relativas alrededor del mismo.

5.4.1. Análisis del perfil de velocidades

Uno de los métodos para determinar el reparto de presiones que actúan sobre el vehículo es considerar la presión alrededor del mismo, y la figura 5.7 muestra la distribución de presiones relativas ^{[1] [3]} a lo largo del contorno del vehículo. Cabe destacar que el valor de dicha presión se expresa en función de la presión atmosférica, siendo positiva en aquellas zonas en las que es mayor que la presión atmosférica y negativa en las zonas en las que sea menor.

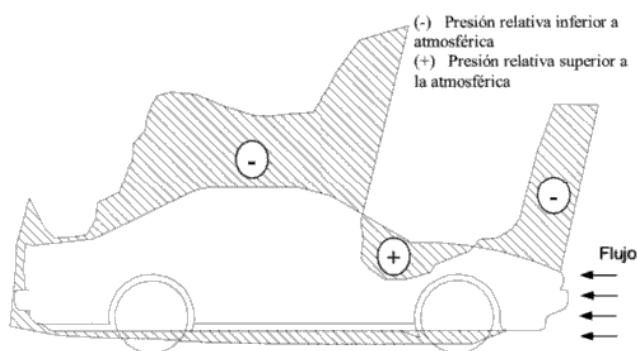


Figura 5. 7 Distribución de presiones relativas alrededor de un vehículo.

A partir de la figura 5.7 Se observan tres zonas claramente diferenciadas en las que el comportamiento de las presiones relativas es visiblemente distinto:

Parte frontal: se comprueba que en la zona correspondiente a la parte delantera del morro del vehículo la presión relativa es negativa, lo que favorece el levantamiento del vehículo y el giro del mismo.

Morro del vehículo: a medida que el flujo recorre la superficie del vehículo, se comprueba que en la zona próxima a la base del parabrisas y en la mitad de la luna delantera, el flujo ha de cambiar su rumbo hacia arriba provocando un aumento de presión en esta zona que provocará a

su vez una disminución de la velocidad del aire, cumpliéndose así el Teorema de Bernouilli definido en la ecuación 4.7.

Techo del vehículo: una vez que se alcanza la línea del techo la presión vuelve a ser negativa puesto que el flujo de aire intenta adaptarse al contorno del vehículo. Como se comprueba en la figura 5.7 Esta zona de bajas presiones se mantiene hasta la parte trasera del automóvil y continúa siéndolo en la zona del maletero, siendo en esta última región donde existe una mayor probabilidad de separación del flujo puesto que este no es capaz de realizar un cambio tan drástico de dirección.

El Teorema de Bernouilli ^[1], ya descrito en profundidad anteriormente, es una de las leyes fundamentales que rigen el movimiento de los fluidos y relaciona el aumento de la velocidad de flujo con una disminución de la presión y viceversa, quedando definido por la ecuación 5.4.

$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = cte$$

Ecuación 5.4

Donde:

- p = presión a lo largo de una línea de corriente.
- ρ = densidad del fluido.
- v = velocidad del fluido en la sección considerada.

El Teorema de Bernouilli es el resultado de la conservación de la energía y afirma que en un fluido en movimiento la suma de la presión y la velocidad en un punto cualquiera permanece constante, por lo que establece una relación entre los efectos de la presión y la velocidad e indica que un aumento en la velocidad del flujo implica una disminución en el valor de la presión y viceversa.

A la hora de realizar el presente análisis, no puede afirmarse que las diferentes posiciones en las que fue situado el equipo de medida pertenezcan a la misma línea de corriente puesto que el objetivo del presente proyecto no era la visualización de las líneas de flujo. En cambio sí es posible confirmar que los datos registrados por el anemómetro en cada una de las posiciones del eje longitudinal, sí pertenecen a la misma línea de corriente, puesto el equipo permaneció fijo durante el intervalo de tiempo que duró la toma de datos y como consecuencia todos los valores

pertenecen al mismo punto. Por otro lado, puesto que el anemómetro se situó en todas las pruebas a una distancia aproximada de 15 cm de la carrocería, cabría suponer que si bien no puede asegurarse que las velocidades registradas a lo largo del contorno del vehículo pertenezcan a la misma línea de corriente, al menos sí es posible suponer que dichas velocidades pertenecen a líneas de corriente muy próximas entre sí.

Como conclusión a lo expuesto anteriormente, en base al teorema de Bernouilli se analizará si el perfil de velocidades obtenido para el vehículo objeto del análisis cumple con la relación presión-velocidad establecida por dicho teorema, es decir, se establecerá una distribución de presiones a partir del perfil de velocidades obtenido en los ensayos de campo.

5.4.2. Conclusiones al análisis

Para la realización del presente estudio y con el objetivo de simplificar la comprensión de los resultados finales, se manejaron las firas 5.8 y 5.9, mostradas en tamaño reducido a continuación. En la primera de ellas, se reflejan de forma gráfica los resultados obtenidos en cuanto a la velocidad del flujo de aire a lo largo de todo el contorno del vehículo, quedando establecidos los valores registrados por el equipo cada 2 segundos en el diagrama azul y su valor medio en el diagrama en rojo. De esta forma, puede comprobarse que queda definido el comportamiento de la velocidad del flujo de aire en cada una de las diferentes secciones en las que se dividió el contorno del automóvil.

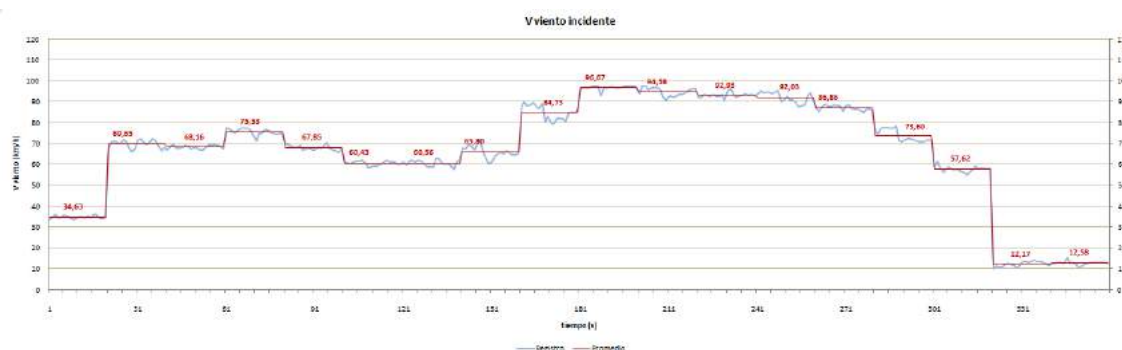


Figura 5. 8 Diagrama completo de los valores numéricos del perfil de velocidades del vehículo.

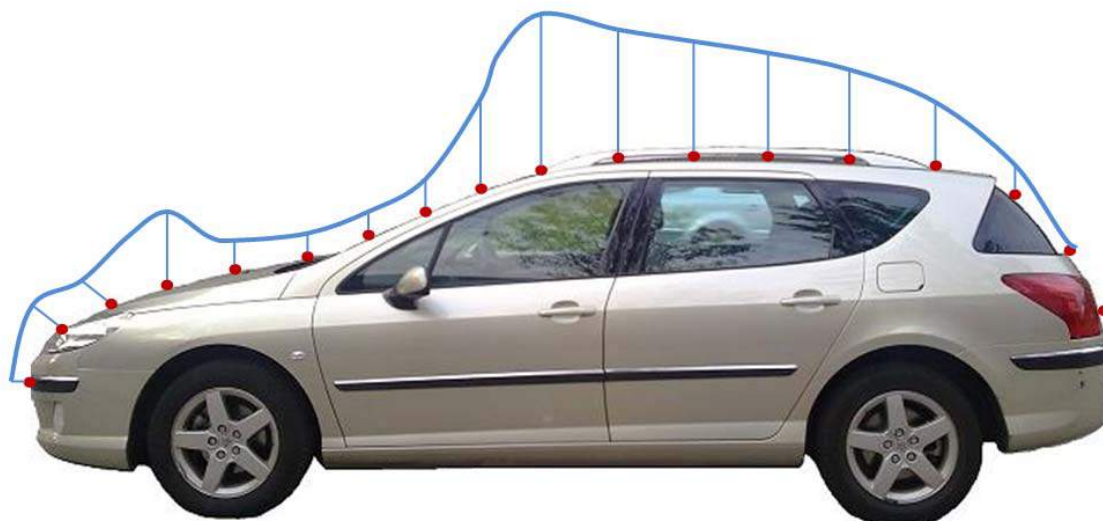


Figura 5. 9 Perfil de velocidad del flujo de aire circundante al vehículo.

Como punto inicial se toma la posición del eje longitudinal denominada P1, y a partir de ella se irá recorriendo la superficie del vehículo hasta alcanzar la parte posterior del mismo.

La primera posición de ensayo, la P1, se corresponde con la parte central de la parrilla de ventilación de la delantera del vehículo, tal y como se observa en la figura 5.8. El flujo de aire incidente en dicho punto lleva una velocidad determinada, 34'63 km/h, antes de impactar contra la superficie del vehículo, momento en el que las partículas sumergidas en el seno de flujo de aire pasan a tener velocidad cero, es decir, puesto que chocan y frenan contra la superficie del coche. Por lo que en dicha zona se dice que el flujo se estanca, es decir, la velocidad del flujo de aire se hace nula. En el caso de los ensayos hay que tener en cuenta que las aspas del equipo de medición están a una cierta distancia de la superficie real de impacto, por lo que la velocidad registrada por el anemómetro en dicho punto no es nula, sino que tiene un valor que se corresponde con la velocidad que lleva el flujo de aire en el momento en que atraviesa las aspas del equipo, aproximadamente a 2 cm del punto de impacto del aire contra la superficie del vehículo.

Seguidamente comienza el tramo de ensayos correspondiente al morro del coche, que engloba desde la posición P2 en el comienzo de la parte delantera, hasta la P5 situada en la zona central de la delantera. Dicha zona de ensayos se caracteriza por velocidades del flujo de aire elevadas y una leve inestabilidad en los valores registrados, presentando como característica destacable un pico de velocidad en la posición P4 de 75'53 km/h. En base a estos resultados, el

perfil de velocidades en dicha área frontal queda definida por velocidades de flujo cercanas a los 70 km/h y escasa turbulencia en los valores registrados, por lo que de acuerdo a la ecuación 5.4 de Bernouilli debería corresponderse con una zona de disminución de la presión que compensase el aumento del valor de la velocidad de flujo. A partir de la figura 5.9 que define la distribución de presiones relativas alrededor de un automóvil se comprueba que efectivamente, en la parte frontal del vehículo se produce una zona de presiones negativas que provocan un aumento en la velocidad del flujo de aire, garantizando así la conservación de la energía en la que se basa el teorema de Bernouilli.

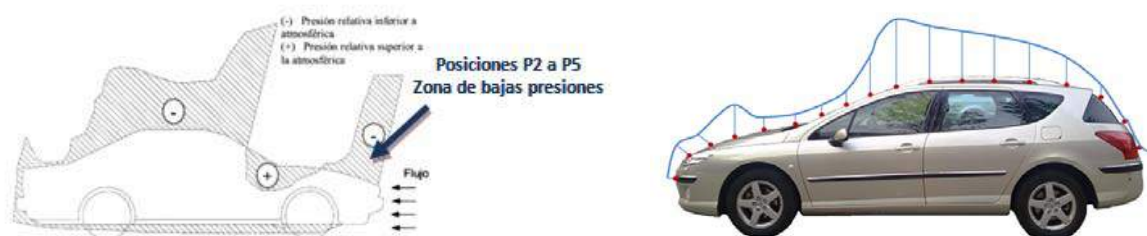


Figura 5.10 Zona de bajas presiones correspondiente con un aumento de velocidad en la delantera del vehículo.

Desde la posición P5 hasta la P8 se incluyen los puntos correspondientes a la zona del parabrisas y la luna delantera del vehículo. A partir de la figura 5.10 se comprueba que dicha área se caracteriza por proporcionar los valores mínimos de velocidad del flujo de aire de todo el contorno del vehículo, con una diferencia de casi 10 km/h respecto al tramo anterior. Resultados destacables son los registrados en las posiciones P6 y P7 de dicho tramo, en los que se obtiene una alta estabilidad de los datos y un notable descenso del valor de la velocidad del aire hasta los 60 km/h, aumentando dicho valor a medida que se recorre en sentido ascendente la luna delantera. Debido a dicho descenso en el valor de la velocidad, la base del parabrisas se convierte en un área estable e ideal para la ubicación de los limpiaparabrisas. Por otra parte, dicha disminución en el valor de la velocidad de flujo provocará un aumento en el valor de la presión en dicha zona, cumpliéndose así lo establecido por el teorema de Bernouilli, tal y como puede comprobarse en la figura 5.10, de la distribución de presiones sobre un automóvil.



Figura 5. 11 Zona de altas presiones correspondiente con una disminución de velocidad del flujo en la zona del parabrisas.

Seguidamente a la sección de la luna delantera, comienza la zona del techo del vehículo que abarca desde el comienzo en la posición P9, hasta el punto más atrasado del mismo, señalada por el punto P15. Según la figura 5.6, que muestra el perfil de velocidades completo se observa un aumento muy rápido de la velocidad del aire a medida que el flujo recorre el contorno del automóvil desde la posición P8 hasta la P10, pasando de los 66 km/h de la en P8 hasta los 97 km/h en P10 en un breve recorrido, lo cual marca un elevado pico de velocidad que se observa de forma gráfica en la figura 5.6. Debido a ello, y en base a la figura 5.11 de distribución de presiones, se comprueba que una vez alcanzada la línea del techo el flujo intenta adaptarse al contorno del coche, provocando una zona de bajas presiones que continúa hasta alcanzar la trasera del vehículo, lo que conlleva un elevado aumento de la velocidad del flujo de aire, cumpliéndose de esta manera el principio establecido por Bernouilli. A medida que el flujo de aire recorre avanza a lo largo del techo del vehículo, la velocidad del aire disminuye progresivamente, pasando de 97 km/h a 74 km/h al llegar al límite final del techo.

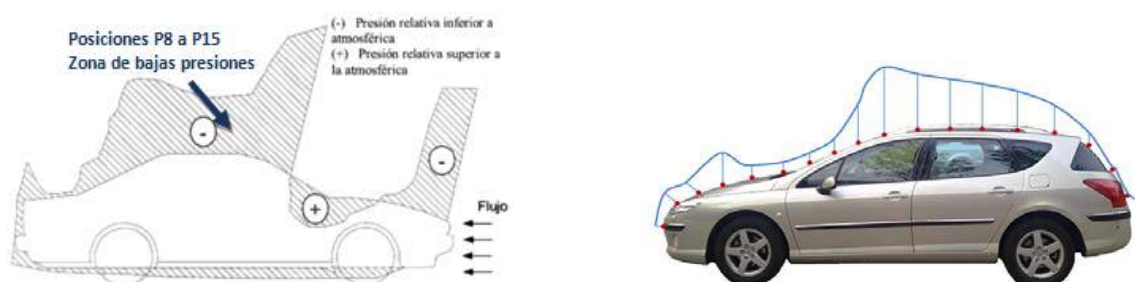


Figura 5. 12 Zona de bajas presiones correspondiente con un aumento en la velocidad del flujo a lo largo del techo del vehículo.

Finalmente, la última sección incluye las posiciones desde la P15 a la P18 y hace referencia a la trasera del vehículo. El flujo de aire alcanza el punto final del techo con una velocidad de unos 74 km/h, valor que continúa en descenso a medida que dicho flujo recorre la luna trasera del vehículo, con una notable disminución de su valor en las últimas posiciones del vehículo, con un valor aproximado de 13 km/h. Debido a ello, en esta zona de pendientes negativas de la carrocería se produce un gradiente de presiones adversos (elevadas presiones relativas) que provoca la disminución de la velocidad de flujo de forma muy notable aumentando la posibilidad de que en esta zona se produzca el despegue de la capa límite.

En resumen, a la vista del esquema completo mostrado en la figura 5.6 y de los resultados obtenidos a partir de los análisis parciales realizados anteriormente, tras los ensayos se ha definido un perfil de velocidades caracterizado por una zona frontal en la que los datos registrados toman valores muy próximos a los 70 km/h, llegando incluso a superar dicha velocidad en algunas posiciones, como por ejemplo en la posición P4 del eje longitudinal, con casi 76 km/h. A medida que el flujo de aire recorre la superficie del vehículo y alcanza la zona del parabrisas delantero, el valor de la velocidad del fluido cae de forma notable hasta los 60 km/h aproximadamente con una alta estabilidad de las mediciones obtenidas, por lo que dicha zona queda caracterizada por presentar los valores mínimos de la velocidad de flujo de aire del perfil obtenido. Debido a estas bajas velocidades, se considera el parabrisas delantero como el área de mayor estabilidad de todo el contorno del vehículo y por tanto, idónea para la colocación de los limpiaparabrisas. A medida que el flujo de aire avanza su recorrido por la luna delantera, la velocidad de dicho flujo aumenta de forma muy notable en el tramo comprendido entre las posiciones P8 y P10, alcanzando los 97 km/h en el comienzo del techo del automóvil, valor que irá descendiendo de forma escalonada a lo largo de todo el recorrido, a la vez que aumenta la inestabilidad de los valores registrados, provocando con ello un aumento de las turbulencias en dicha región. Una vez alcanzado el borde final del techo, la velocidad del flujo desciende de forma brusca desde aproximadamente 74 km/h hasta 13 km/h a lo largo del maletero, lo cual favorece la separación del flujo de la superficie del vehículo al no ser el fluido capaz de realizar un cambio de dirección tan brusco.

5.5. Análisis cualitativo del flujo

Una vez analizado en detalle el perfil de velocidades del vehículo tras la realización de los ensayos objeto del presente proyecto, y con el objetivo de complementar de forma cualitativa los resultados obtenidos, se decidió llevar a cabo un análisis de simulación de flujo de algún caso similar que aportara datos gráficos para poder realizar así un análisis intrínseco y comparativo de los detalles del flujo. Es decir, al aplicar sobre un modelo virtual similar al empleado en los ensayos de campo, unas condiciones de contorno próximas a las sufridas en las pruebas, analizar las condiciones fluidomecánicas del flujo creado alrededor de dicho modelo: comprobar que las estelas, capa límite, zonas de presión y turbulencia están en los sitios adecuados y que se desprenden, ensanchan y estrechan en los momentos oportunos.

Para ello se simuló a través del programa FLUENT el flujo de aire alrededor de un coche de forma muy básica y simple, a través de una simulación bidimensional y empleando para ello un mallado muy basto.

En la situación real de los ensayos objeto del proyecto el coche se mueve y el aire alrededor de él se mantiene quieto. En el caso de la simulación, es necesario considerar que se está realizando el análisis en un sistema de referencia relativo, siendo esta la situación que se da en los túneles de viento donde se prueban los prototipos. De esta forma, el coche se encuentra en reposo mientras que el aire y la carretera avanzan hacia él a la velocidad a la que circularía el vehículo. Las presiones y las fuerzas son las mismas en los dos sistemas de referencia.

Los elementos básicos que un software de CFD^[6] necesita para el desarrollo de los cálculos son la definición geométrica de la zona de fluido que tiene que calcular, dividida en celdas, y la definición de las condiciones de contorno. Lo primero es lo que se conoce como un mallado, grid o mesh, empleándose para su creación el programa GAMBIT. En dicho mallado se marcarán las zonas donde van las condiciones de contorno y posteriormente, mediante el programa FLUENT propiamente dicho, se fijarán los valores de las condiciones de contorno y los parámetros del proceso de resolución.

5.5.1. Condiciones generales del flujo

Como ya se ha señalado anteriormente, la simulación llevada a cabo es bidimensional e inevitablemente presentará diferencias frente a los ensayos tridimensionales en los que se ha centrado el presente proyecto. Aunque dichos resultados presentan ciertas discrepancias, a la hora de comprobar el comportamiento de un modelo familiar como el empleado en el seno de un fluido, la simulación bidimensional se centrará en los resultados cualitativos, aportando resultados gráficos válidos a la hora de complementar las conclusiones extraídas de los análisis cuantitativos llevados a cabo en los apartados previos.

Tras la generación del modelo, muy esquemático, de una carrocería de tipo familiar y el posterior mallado del mismo, se aplicaron unas condiciones de contorno muy próximas a las obtenidas tras los ensayos en campo abierto, obteniendo los siguientes resultados que ilustran el comportamiento del fluido alrededor del automóvil.

Como ya se ha visto en apartados precedentes, el flujo se define básicamente a través de la velocidad y la presión, siendo ésta una de los posibles métodos de representación tal y como se comprueba en la figura 5.12.

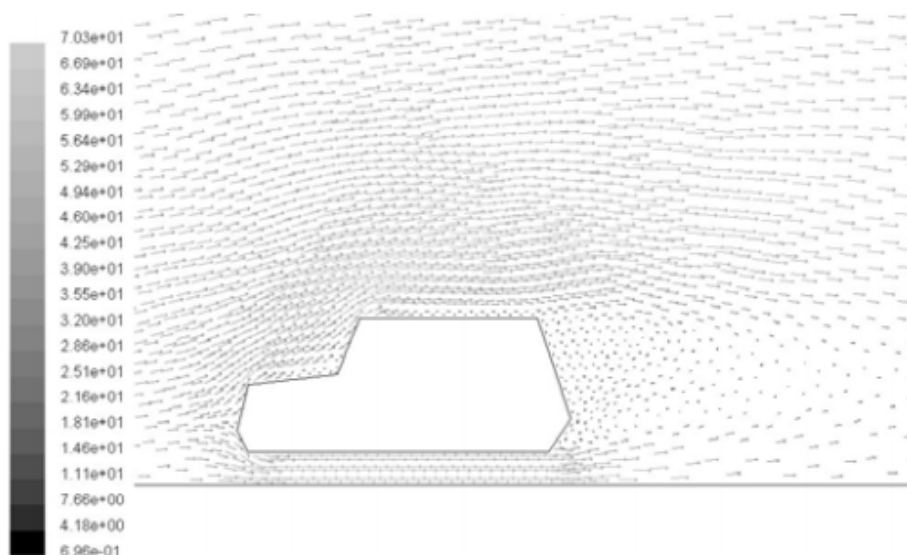


Figura 5. 13 Flujo de aire en función de la velocidad y la presión.

Otra forma muy gráfica para visualizar el recorrido del aire que circula alrededor de un cuerpo es a través de las líneas de corriente, líneas perpendiculares a los vectores de velocidad

que, cuando el flujo es estacionario, coinciden con el recorrido de las partículas. La figura 5.13 esquematiza dicho método de representación.

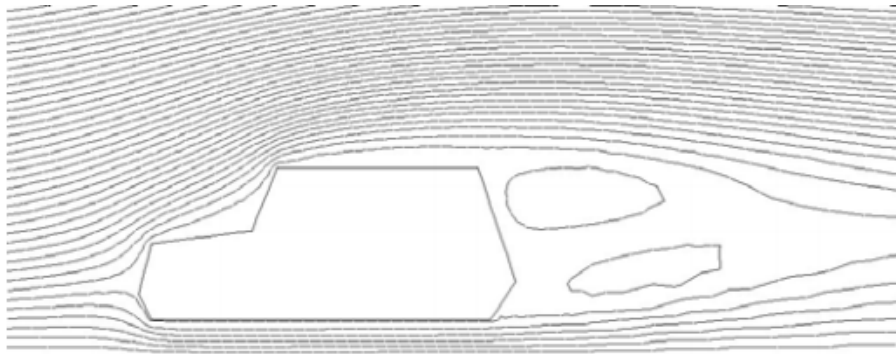


Figura 5. 14 Flujo de aire en función de líneas de corriente.

En las figura 5.12, y 5.13, se aprecian los principales fenómenos que ya fueron detectados a partir del perfil de velocidades obtenido mediante los ensayos, lo cual apoya las conclusiones anteriormente extraídas. Dichos fenómenos hacen referencia a:

- el estancamiento del flujo en la parte frontal del vehículo o parrilla y en la base del parabrisas.
- la separación del flujo en la parte superior del inicio de la delantera y en el final del parabrisas, que se corresponden con los picos de velocidad obtenidos entre las posiciones P3-P4 de la delantera y P9-P10 en el comienzo del techo del vehículo.
- la estela de la parte posterior del vehículo.

5.6. Conclusiones finales al análisis

En base a los resultados extraídos de la simulación sumados a los análisis previos llevados a cabo, se extraen las conclusiones finales que se detallan a continuación.

Delantera y parabrisas

Tanto en el área frontal del vehículo como en la zona del parabrisas delantero se observa un claro estancamiento del flujo, es decir, una evidente disminución de la velocidad y aumento de la presión en dicha región, tal y como se observa en la figura 5.14 se comprueba que

efectivamente, dicho estancamiento se corresponde claramente con la disminución de la velocidad detectada en las posiciones correspondientes al comienzo de la luna delantera y analizadas en el apartado correspondiente al análisis del perfil de velocidades. Por otra parte, cabe destacar que estas zonas de alta presión son responsables, en parte, del arrastre aerodinámico.

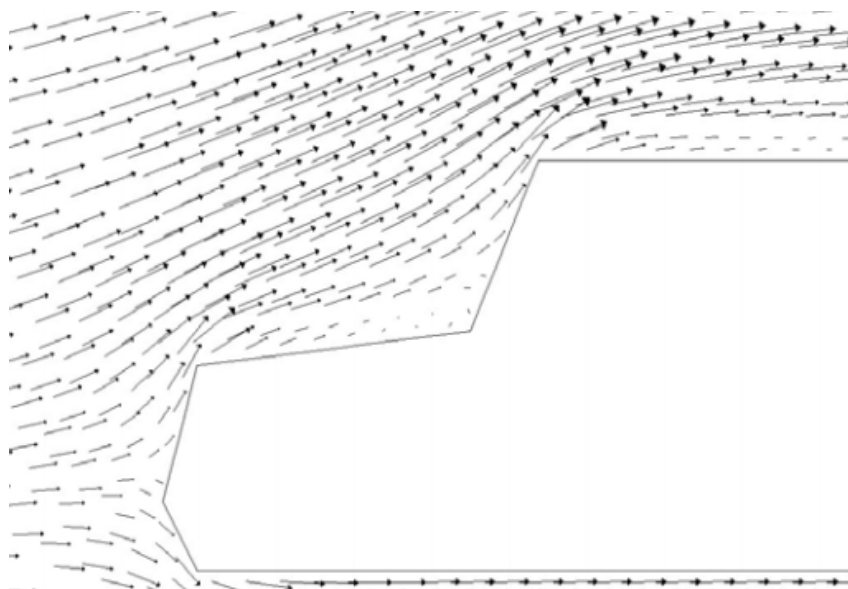


Figura 5. 15 Estancamiento del flujo en morro y parabrisas.

Las figuras 5.15 y 5.16, muestran la distribución de presiones relativas alrededor del vehículo, correspondiéndose el negro con las presiones más bajas y aclarándose el color a medida que el valor de la presión aumenta. En aquellas regiones en las que el fluido tiene que cambiar de dirección, como son la parte superior del frontal y la zona final del parabrisas, el flujo tiene mayores dificultades para seguir el contorno y puede llegar a producirse la separación, produciéndose entonces un descenso puntual de la presión muy alto, correspondiéndose con las áreas más oscuras de la figura 5.15.

A medida que el flujo recorre la delantera del vehículo tras superar dicho punto de bajas presiones, éste ha de cambiar su rumbo hacia arriba al llegar a la base del parabrisas para ascender por la luna delantera. Ello provoca una gran presión en la zona que conlleva a su vez un descenso en la velocidad del aire, cumpliéndose así el Teorema de Bernouilli. Este descenso de la velocidad del aire se corresponde muy satisfactoriamente con los resultados obtenidos de forma

experimental a partir de los ensayos realizados. Dicha región de altas presiones se corresponde con el área en tono gris claro que se observa en las figuras ya citadas.

Una vez alcanzado el final de la luna, el flujo volverá a cambiar de rumbo hacia arriba para adaptarse al contorno, provocando una disminución de la presión en la zona que efectivamente se corresponde con un aumento de la velocidad del flujo ya estudiada de forma experimental en el perfil de velocidades, y que se mantendrá a lo largo del techo del vehículo y en la zona del maletero hasta que se produzca el desprendimiento. Dicha desviación del flujo hacia arriba contribuye a que el arrastre sea mayor en dicha región.



Figura 5. 16 Bajas presiones en morro y parabrisas.

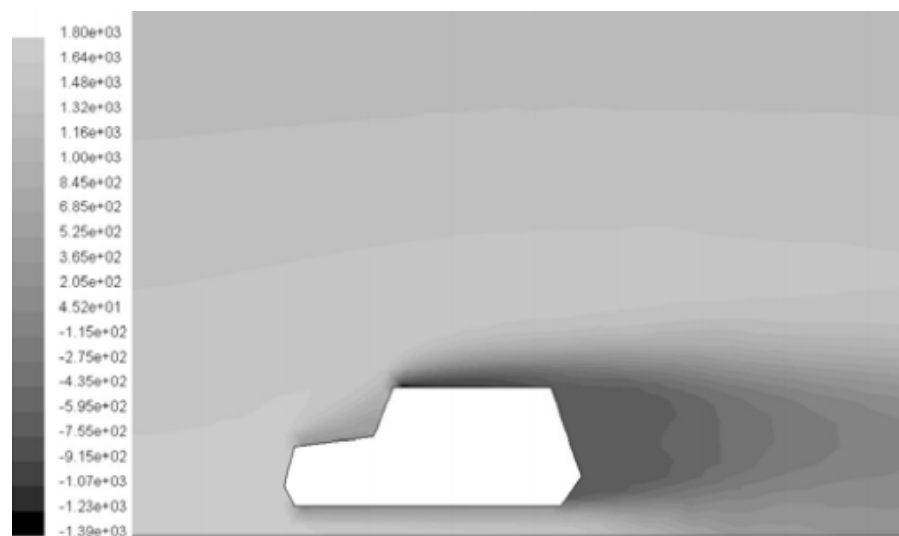


Figura 5. 17 Distribución de presiones en la superficie del modelo (Pa).

Estela

Una de las conclusiones ya desarrollada tras la realización del perfil de velocidades del vehículo hace referencia al punto en el que se produce el desprendimiento de la capa límite. La diferencia de velocidades de flujo existente entre la posición P16 (57'62 km/h) y P17 (12'17 km/h) hace suponer que la separación del flujo se produce en algún punto comprendido entre ambas posiciones, por lo que la estela turbulenta comenzaría a lo largo de la luna trasera..

El diseño aerodinámico del vehículo empleado para las pruebas difiere bastante, en cuanto al diseño de las esquinas, con el modelo esquemático empleado para la simulación, con una trasera no aerodinámica y angulosa. Por este motivo, tal y como se observa en la figura 5.17, el modelo simulado presenta una estela turbulenta que comienza prácticamente a partir del borde final del techo del vehículo, correspondiéndose con la característica zona de presiones negativas. Sin embargo, debido a los valores experimentales obtenidos y al diseño aerodinámico que presenta el maletero, cabe asegurar que el desprendimiento de la capa límite en el caso real se producirá en un punto más retrasado que en el del modelo, concretamente, a lo largo de la luna trasera. Es decir, el flujo es capaz de recorrer el contorno del vehículo un área mayor que la mostrada en la simulación antes de que se produzca la separación.

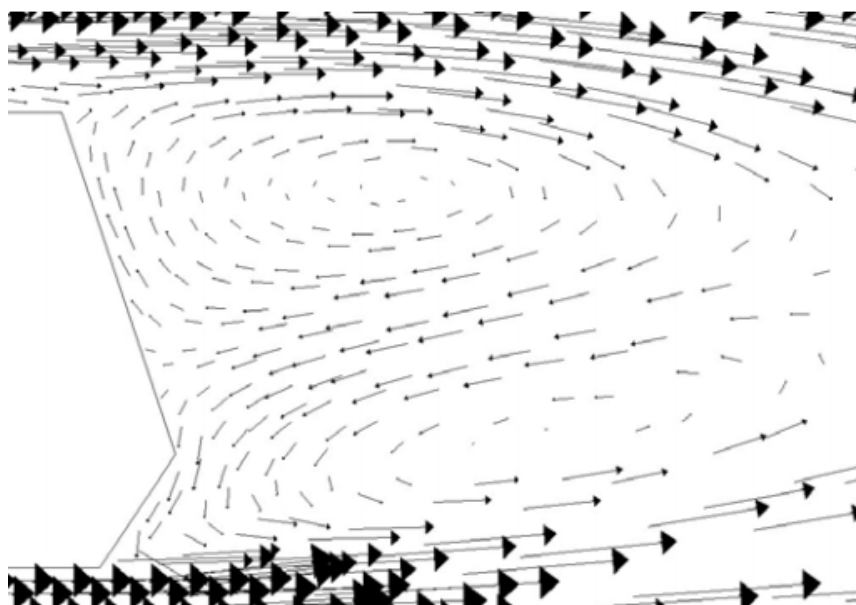


Figura 5. 18 Estela turbulenta indicada a través de vectores de velocidad.

Una vez sufrido el desprendimiento, se forma la estela turbulenta, figura 5.17, caracterizada por presiones negativas y velocidades muy bajas en la zona más próxima a la carrocería así como en los vórtices, llegándose incluso a producir recirculación de flujo. Al aumentar los vectores de velocidad, en dicha figura se aprecian dos vórtices girando en sentidos opuestos en la parte más cercana al maletero del vehículo.

Como se observa en la figura 5.17, la estela es el área en la que la intensidad de las turbulencias es mucho más significativa que en el resto del contorno. En un flujo incompresible, la ecuación de Bernoulli dice que, si no hay pérdidas, la suma de la energía debida a la presión más la debida a la velocidad más la potencial se mantiene constante. En un flujo de aire, donde la densidad es muy pequeña y por tanto, la energía potencial es despreciable, esto equivale a decir que la presión total es constante o, lo que es lo mismo, la disminución de la presión total nos indica las zonas donde hay pérdidas.

En la figura 5.18, puede verse cómo la estela es la zona en la que el flujo ha perdido más energía, y cómo ésta comienza en el desprendimiento de la parte superior del parabrisas. Aguas abajo, la mezcla con el flujo libre, va haciendo que la estela recupere energía y se uniformice con el flujo exterior.

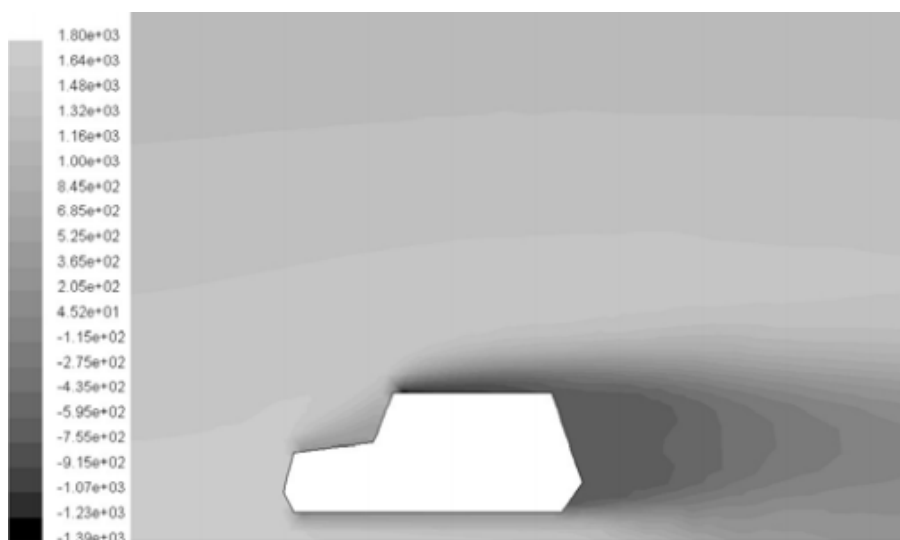


Figura 5. 19 Distribución de presiones totales (Pa).

A través de la figura 5.19, se indica la intensidad de la turbulencia, que será mucho mayor en la zona próxima a los vórtices de la estela, siendo la generación de la turbulencia y su posterior disipación viscosa, la principal causa de pérdidas en este flujo.

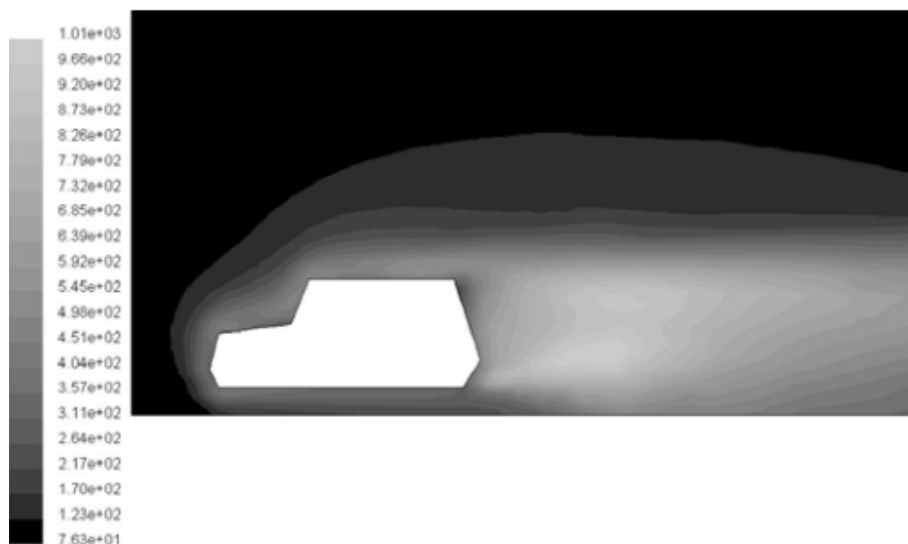


Figura 5. 20 Intensidad de la estela turbulenta (%).

5.7. Estudio de la capa límite laminar y turbulenta

Como resumen a lo desarrollado en apartados anteriores, la capa límite se estudia con el objetivo de analizar la variación de velocidades en la zona de contacto entre un fluido y un obstáculo que se encuentra en su seno o por el que se desplaza. La presencia de esta capa se debe principalmente a la existencia de la viscosidad, propiedad inherente de cualquier fluido y responsable de que el obstáculo produzca una variación en el movimiento de las líneas de corriente más próximas a él. La variación de velocidades, como indica el principio de Bernoulli, conlleva una variación de presiones en el fluido, que dan lugar a efectos como las fuerzas de sustentación y de resistencia aerodinámica, ya desarrolladas previamente.

En el seno de un fluido, el flujo laminar va perdiendo velocidad a lo largo de la capa límite hasta que finalmente se para o incluso retrocede, provocando el desprendimiento de la capa límite y que el flujo ya no siga la forma de la superficie, como ilustra la figura 5.20.

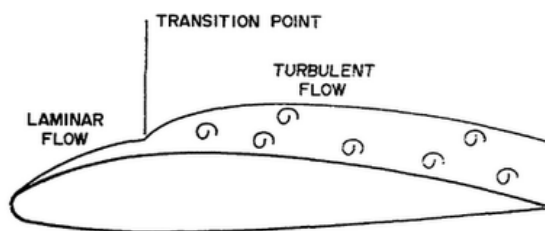


Figura 5. 21 Esquemización del comportamiento de la capa límite.

A partir de dicho punto de separación, el flujo pasa a ser turbulento, y a diferencia del flujo laminar, se caracteriza por un aumento en la velocidad de las partículas que produce una gran transferencia de cantidad de movimiento entre las mismas debido a la elevada energía cinética que adquieren. Como consecuencia de este aumento en la velocidad de las partículas, la presión estática dentro de la capa límite es más baja que la del aire situado inmediatamente por encima de esta, lo que genera un “aplastamiento” de la capa límite sobre el perfil retrasando su desprendimiento.

La transición a flujo turbulento provoca la aparición de los torbellinos o también llamados vórtices en el seno de la estela turbulenta. Son característicos del flujo turbulento y presentan diversidad de tamaños, como puede comprobarse en la figura 5.21. Estos vórtices se crean y se destruyen de forma aleatoria, debido a que los torbellinos grandes se rompen en otros menores, éstos a su vez en otros aún más pequeños, y así sucesivamente, hasta hacerse lo suficientemente pequeños y disiparse en forma de calor debido a la viscosidad.



Figura 5. 22 Vórtices generados en el seno de un flujo laminar debido a una perturbación.

5.7.1. Análisis de las turbulencias

La turbulencia^[11] se define como un fenómeno de inestabilidad intrínseca del flujo que provoca que el fluido pase a comportarse de forma aparentemente caótica pero que no siempre es indeseable debido a que, como ya se ha comentado, la capa límite turbulenta es más resistente al desprendimiento que la laminar.

Algunas de las ventajas de la capa límite turbulenta se materializan, por ejemplo, en los hoyos de las pelotas de golf, ya que causan una disminución en el tamaño de la estela al retrasar la transición de la capa límite de laminar a turbulenta disminuyendo sustancialmente el arrastre y consiguiendo lanzar la bola a más del doble de distancia con la misma fuerza, tal y como muestra la figura 5.22.

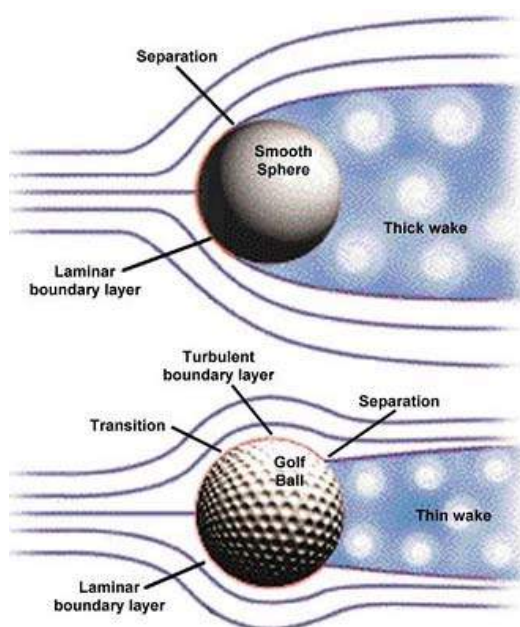


Figura 5. 23 Imagen superior: desprendimiento de la capa límite laminar sin hoyos en la superficie.

Imagen inferior: desprendimiento de la capa límite turbulenta con hoyos en la superficie.

En el caso de los aviones, sin embargo, el que una capa límite sea laminar o turbulenta depende del tamaño del mismo. Cualquier avión convencional tiene un tamaño que obliga a que la capa límite sea turbulenta, y, en realidad, los únicos aviones que son lo suficientemente pequeños como para volar en condiciones de flujo laminar son los de aeromodelismo. Pero una capa límite turbulenta tiene una ventaja muy importante frente a una laminar, ya que esta va

perdiendo velocidad hasta que se produce el desprendimiento de la capa límite y el flujo ya no recorre el contorno del cuerpo. Dicho efecto es especialmente indeseable en el ala de un avión, ya que la sustentación depende de que el flujo siga la forma del perfil del ala. El motivo de que un avión “entre en pérdida”, es decir, deje de sustentar y caiga de forma literal, no es otro que el desprendimiento de la capa límite de las alas, y si el piloto no es capaz de hacer que la capa límite vuelva a adherirse al ala, el avión caerá irremediablemente.

En aeronáutica aplicada a la aviación comercial, debido al tamaño de los aviones, los perfiles alares generan una capa límite turbulenta, que permanece adherida al perfil a mayores ángulos de ataque que la capa límite laminar, evitando así que el perfil entre en pérdida, es decir, deje de generar sustentación aerodinámica de manera brusca por el desprendimiento de la capa límite.

5.7.2. Análisis del número de Reynolds

Como ya se ha especificado anteriormente^[3], para determinar si un flujo es turbulento o no, se emplea el número de Reynolds, parámetro que indica la relación, o la importancia relativa, entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas de la corriente. Fuerzas inerciales grandes en relación con las viscosas tienden a favorecer la turbulencia, mientras que una viscosidad alta la evita. Dicho de otro modo, la turbulencia aparece cuando el número de Reynolds, parámetro adimensional, supera cierto valor, quedando definido a partir de la ecuación 5.9:

$$R_e = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$$

Ecuación 5.9

Donde:

- v es la velocidad del fluido.
- L la longitud característica del cuerpo sumergido en la corriente fluida.
- ρ la densidad del fluido.
- μ viscosidad dinámica del fluido.

En la mayoría de aplicaciones de Mecánica de fluidos los flujos son turbulentos, con excepción de algunos fluidos de movimiento lento y muy viscoso, como los utilizados en la lubricación hidrodinámica. En el caso de la aerodinámica del automóvil, con unas velocidades importantes en un fluido escasamente viscoso como el aire y con perfiles de cuatro o cinco metros de longitud, resulta inevitable que el flujo sea turbulento. Generalmente para número de Reynolds inferiores a 1.000.000 se puede hablar de régimen laminar y por encima de este valor, régimen turbulento.



Figura 5. 24 Visualización del flujo sobre diferentes carrocerías.

En las fotografías recogidas en la figura 5.23 Se muestran diferentes modelos de automóviles durante el desarrollo de pruebas aerodinámicas en túnel de viento y en ellas se observa con claridad el flujo de aire coloreado en blanco que circunda a cada modelo. A la vista de las imágenes anteriores se observa que aquellas líneas de flujo que nacen en la parrilla del vehículo recorren el contorno del mismo a escasos centímetros de la carrocería, por lo que se pierden a lo largo del parabrisas delantero y apenas logran alcanzar el techo del vehículo. Debido a ello, y teniendo en cuenta la altura propia del equipo de medición junto con su soporte, que sitúan las aspas del anemómetro a unos 15 cm de la carrocería del coche, para realizar el análisis del número de Reynolds a partir de los datos registrados, se decidió estudiar el valor de dicho parámetro tomando como punto de incidencia la posición P3 del eje longitudinal.

El desarrollo de los ensayos de la velocidad del flujo de aire alrededor del perfil del vehículo para cada una de las diferentes posiciones del eje longitudinal y el posterior análisis de los resultados registrados, permitieron la obtención de los valores de los parámetros de velocidad media de flujo de aire, temperatura, presión y viscosidad del aire para cada una de las diferentes pruebas. Dichos resultados fueron analizados en el apartado anterior *Análisis del perfil de velocidades* y los resultados se recogen en las tablas del anexo que sigue al final del presente proyecto.

Con la intención de definir y descubrir el comportamiento del flujo alrededor del vehículo objeto del estudio, a partir de los resultados aportados por el análisis previo de la velocidad de flujo, se aplicó la ecuación 5.9, del número de Reynolds considerando como coeficiente de resistencia aerodinámica el aportado por el fabricante del vehículo en su documentación oficial, correspondiéndose con un valor de 0'29. Los resultados obtenidos se recogen en la tabla 5.9, procediéndose a su análisis.

Tabla 5. 9 Valores del nº de Reynolds

Posición	nº Reynolds	Posición	nº Reynolds
P3	0	P11	3.422.441
P4	325.370	P12	3.923.191
P5	584.571	P13	4.440.224
P6	780.964	P14	4.714.632
P7	1.043.526	P15	4.438.776
P8	1.417.272	P16	3.724.282
P9	2.190.009	P17	817.714
P10	2.915.058	P18	876.800

El comportamiento del flujo a lo largo de la delantera del vehículo, desde las posiciones P3 a P6, muestra un comportamiento de flujo laminar puesto que los resultados del parámetro analizado se corresponden con valores menores a 1.000.000. Avanzando a lo largo de la carrocería, la zona del parabrisas delantero, resaltado en rosado en la tabla 5.9, presenta un posible punto de transición hacia el flujo turbulento, con un valor del número de Reynolds que supera de forma muy considerable el establecido entre las posiciones P7 y P8 y que indica claramente la aparición de la turbulencia. Estudiando de forma paralela los valores de la velocidad de flujo obtenidos en dicha región se observa que las posiciones P6 y P7 representan las velocidades mínimas obtenidas pertenecientes al perfil de velocidades, y que a partir de dicho punto P7 la velocidad inicia un aumento muy notable de su valor, alcanzándose altos grados de inestabilidad que inevitablemente indican un elevado grado de turbulencia.

Una vez alcanzado dicho punto, a partir de la posición P8 se obtienen las velocidades más elevadas del perfil, e inevitablemente valores muy altos del número de Reynolds que indican la presencia de flujo turbulento a lo largo de todo el techo del vehículo, hasta alcanzar la trasera del mismo. Es en esta zona trasera, en el maletero, donde el valor del número de Reynolds cae de forma brusca, al igual que lo hace la velocidad del flujo de aire. Dichos resultados, unidos a la premisa que indica que en las carrocerías de tipo familiar el desprendimiento de la capa límite se produce al borde final del mismo al no ser capaz el flujo de seguir el contorno del perfil, llevan a suponer que en la zona posterior es la región en la que se produce la separación de la capa límite turbulenta del vehículo.



Figura 5. 25 Simulación del flujo alrededor del vehículo.

5.8. Análisis de la dinámica transversal

5.8.1. La acción exterior: el viento

En el caso del presente análisis el viento, al actuar sobre la sección lateral del vehículo, va a modificar las condiciones normales de estabilidad del mismo, por lo que se le considera la acción exterior que provoca la deriva de los neumáticos.

Se define la deriva^[2] como el fenómeno que provoca que la trayectoria real seguida por el neumático sea distinta de la trayectoria teórica, que coincide con el plano ecuatorial de dicho neumático, debiéndose dicha diferencia a la deformación sufrida por el neumático.

El efecto de interacción entre neumático y suelo provoca el efecto de deriva y se produce por igual en los cuatro, seis u ocho neumáticos según el tipo de vehículo, no dependiendo de si el neumático pertenece a las ruedas del eje de dirección o a cualquiera del resto de ruedas del vehículo. Depende únicamente del tipo de neumático, de la fuerza aplicada sobre el mismo y de la carga vertical que soporta.

Cuando un vehículo circula por una vía en línea recta, no influyendo en él ningún tipo de acción exterior, la dirección del movimiento forma con respecto al plano ecuatorial del vehículo, un ángulo nulo, tal y como se observa en la figura 5.25.



Figura 5. 26 Ángulo nulo de la dirección del movimiento con respecto al plano ecuatorial del vehículo.

Estando el vehículo circulando en línea recta puede darse el caso de que una ráfaga de viento perpendicular o no perpendicular al vehículo actúe sobre él, con un ángulo de incidencia respecto a la dirección del vehículo determinado y de la que se toma la componente lateral. En caso de producirse dicha situación, el vehículo se desviará en mayor o menor cantidad, un determinado ángulo que será función de ciertas variables que se detallarán más adelante, y que provocarán una inestabilidad respecto a la marcha en condiciones de ausencia de viento. Dicho fenómeno consiste en el desplazamiento del vehículo en una dirección diferente de la del plano ecuatorial del mismo formando un ángulo con éste.

En estas condiciones, para proceder al estudio de la acción exterior y del efecto que ésta provoca, han de tenerse en cuenta principalmente dos factores o elementos:

Los neumáticos: ya que son la parte del vehículo que contacta con el suelo y los responsables de que el vehículo presente mayor o menor sensibilidad a las acciones exteriores.

La sección transversal recta del vehículo: ya que determinará la intensidad de la acción exterior puesto que es la sección que opone resistencia al viento, originando una fuerza que actuará sobre los neumáticos.

5.8.1.1. Comportamiento en marcha con viento lateral

Con un viento oblicuo respecto al vehículo, además de la resistencia del aire, aparece también la componente transversal de la fuerza del aire. Dicha fuerza ^[3] actúa en toda la carrocería, pero puede considerarse reducida a una sola, a la del viento lateral, que ataca en un punto denominado centro de presión. La posición del centro de presión depende de la forma de la carrocería del vehículo y del ángulo de ataque del viento, y por lo general suele estar situada en la mitad anterior del coche, tal y como se comprueba en la figura 5.23. En vehículos tipo familiar (con la parte trasera recta) el centro de presión queda más próximo al centro del coche que en las carrocerías de perfil continuo en descenso o carrocerías aerodinámicas, en las cuales pueden llegar a quedar por delante del eje delantero. Cabe destacar que las formas de tipo familiar tienen un centro de presión bastante más fijo que las carrocerías aerodinámicas, porque en éstas el centro de presión depende en mayor medida del ángulo de ataque del viento y por tanto sufre

mayor dispersión. En los coches de tipo familiar, a igualdad de condiciones, es mayor la fuerza lateral.

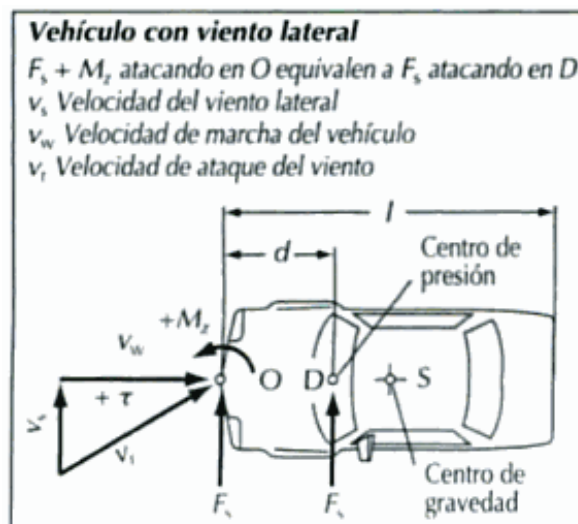


Figura 5. 27 Situación del centro de presión.

Para conseguir una representación general de la influencia del viento lateral, el centro de presión resulta pues inadecuado como punto de referencia, ya que no es un lugar fijo del vehículo. De igual forma, el centro de gravedad depende de las condiciones de carga del vehículo y tampoco es fijo. Resulta conveniente tomar como punto de referencia un punto centrado en el plano medio del vehículo en el extremo delantero de la carrocería, de forma que los datos sean también independientes del mecanismo de traslación respecto a la carrocería.

Al indicarse la fuerza del viento lateral para un punto de referencia distinto del centro de presión hay que tener en cuenta el momento de la fuerza del viento lateral respecto al centro de presión (par de fuerzas).

En aerodinámica es frecuente utilizar en lugar de fuerzas y momentos, coeficientes adimensionales que son independientes de la velocidad del viento incidente. En los diagramas de la figuras 5.27 se representan las curvas de los valores de los coeficientes de la fuerza lateral del viento y del momento de desviación de la dirección para vehículos de tipo familiar y aerodinámicos.



Figura 5. 28 Coeficientes de la fuerza lateral del viento y del momento de desviación de la dirección para vehículos de tipo familiar y aerodinámicos.

Es evidente que por la variedad de formas de las carrocerías sólo se trata de valores orientativos ya que para el comportamiento exacto de una carrocería determinada es necesario en cada caso un análisis en túnel de viento.

De los coeficientes adimensionales y tomando como superficie de referencia A_s , superficie lateral proyectada del vehículo, se obtienen las fuerzas y momentos según las siguientes ecuaciones:

$$\text{Fuerza lateral del viento: } F_s = C_s \cdot \rho \cdot \left(\frac{v_r^2}{2} \right) \cdot A_s$$

Ecuación 5.10

$$\text{Momento de desviación: } M_z = C_{MZ} \cdot \rho \cdot \frac{v_r^2}{2} \cdot A_s \cdot l$$

Ecuación 5.11

Donde:

- ρ densidad del aire.
- v_r velocidad relativa (resultante) del viento incidente.

- A_s superficie lateral proyectada del vehículo.
- l longitud total del vehículo (en unidades coherentes).
- C_s coeficiente de fuerza lateral del viento.
- C_{MZ} coeficiente del momento de desviación por viento lateral.

La distancia del centro de presión al morro del vehículo se obtiene de la ecuación:

$$d = \frac{M_z}{F_s} = l \cdot \frac{C_{MZ}}{C_s}$$

Ecuación 5.12



Figura 5. 29 Sección transversal recta

La fuerza lateral del viento es soportada por las ruedas por medio de fuerzas directoras laterales. La fuerza directora lateral de un neumático depende además del ángulo de marcha oblicua y de la carga de la rueda, del tipo y tamaño del neumático, de la presión de aire y de las propiedades de agarre del firme.

Por las propiedades específicas de los neumáticos, al elevar la carga de las ruedas y mantenerse constante el ángulo de marcha oblicua, la fuerza directora lateral no aumenta en la misma proporción que la carga en las ruedas. En el ejemplo que se muestra en la figura 5.29, al duplicarse la carga sobre la rueda, la fuerza directora lateral sólo aumenta de 1,5 a 1,7 veces.

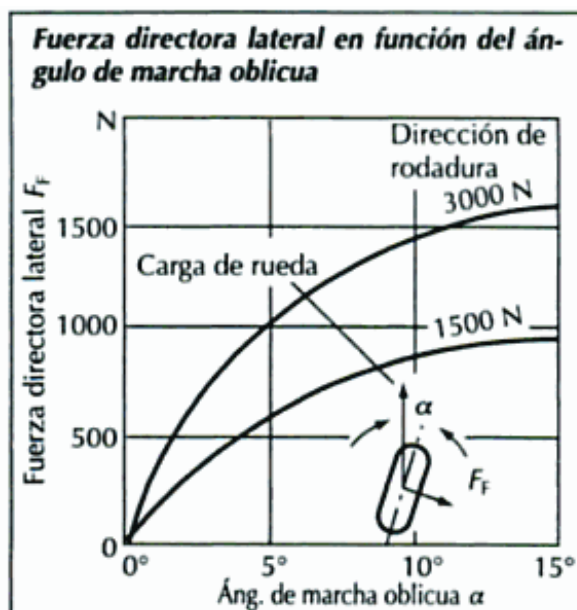


Figura 5.30 Fuerza directora lateral en función del ángulo de marcha oblicua.

Para conseguir que se duplique la fuerza directora lateral, debe aumentarse también el ángulo de marcha oblicua. En razón a esto los ejes más cargados, a igualdad de relación entre fuerza lateral y fuerza vertical que soportan, deben tomar un ángulo mayor de marcha oblicua que los ejes menos cargados, es decir, con menor fuerza vertical.

Si el viento lateral ataca en el centro de gravedad, se reparten las fuerzas directrices laterales necesarias entre los ejes delantero y trasero, en proporción a las cargas de las ruedas, es decir, aparecen en ambos ejes las mismas relaciones de fuerza vertical a la fuerza lateral.

Si el centro de gravedad está más cerca del eje delantero, la fuerza lateral del viento, a causa del mayor ángulo de marcha oblicua necesario en ese eje, desvía "hacia afuera", y en el caso de que el centro de gravedad esté hacia atrás, entonces actúa desviando "hacia dentro".

Se comprueba por tanto, que el centro de gravedad del vehículo se desplaza siempre, con respecto a la trayectoria primitiva, inicialmente hacia el lado opuesto de donde viene el viento. Al cesar la fuerza lateral del viento, el vehículo girado hacia afuera se aleja más de la trayectoria primitiva mientras que el girado hacia adentro invierte el movimiento del centro de gravedad, se acerca a la trayectoria primitiva y finalmente la rebasa.

Ahora bien, por lo general el punto de ataque de la fuerza lateral del viento, es decir, el centro de presión, no coincide con el centro de gravedad, sino que según la forma de la carrocería, queda más o menos alejado del centro del coche. Por lo tanto, el vehículo que con fuerza del viento aplicada teóricamente en el centro de gravedad se desvía hacia dentro, en la práctica, con viento real, se desvía igualmente hacia fuera.

A causa de la posición más adelantada del centro de presión en los vehículos de forma aerodinámica, con viento lateral tienen más tendencia a desviarse hacia fuera y es más difícil dominarlos que los de tipo familiar.

Por supuesto existe la posibilidad de trasladar el centro de presión hacia atrás hasta las proximidades del centro de gravedad por medio de la colocación de aletas estabilizadoras verticales en la parte trasera. En la práctica sin embargo, hasta ahora, no se ha aplicado esta opción más que en coches de carreras y construcciones especiales.

Para influir favorablemente en la estabilidad del vehículo con viento lateral se desea que el centro de presión esté próximo al centro de gravedad. Las desviaciones mínimas de la trayectoria se logran en un vehículo sobrevirado cuando el centro de presión está delante del centro de gravedad. Por el contrario, en un vehículo subvirado la posición más favorable del centro de presión es un poco por detrás del centro de gravedad.

Teniendo en cuenta que la fuerza lateral del viento por lo general es menor que la fuerza vertical en las ruedas (fuerza de contacto con el firme), y que la no linealidad de la relación de fuerza vertical a la fuerza lateral cuando esta última es pequeña, apenas influye, se deduce que las propiedades de los neumáticos por sí solas no determinan el comportamiento de un vehículo frente al viento lateral. Por añadido, desempeñan también una función importante a la hora de determinar el comportamiento, tanto la elasticidad en las suspensiones de ruedas como en la dirección, así como las medidas que considere el fabricante del chasis.

5.8.1.2. Sobrevirado y subvirado

Las fuerzas laterales de conducción^[2] sólo pueden generarse entre el firme y la rueda recubierta por el neumático de goma cuando la rueda gira en un plano que aún no contiene la dirección de la marcha, es decir, cuando forma un ángulo de marcha oblicua.

En base a ello, se define que un vehículo está subvirado cuando en el mismo, al aumentar la aceleración transversal, el ángulo de marcha oblicua aumenta mucho más en el eje delantero que en el trasero. El comportamiento inverso se denomina sobrevirado, tal y como se indica en la figura 5.30.

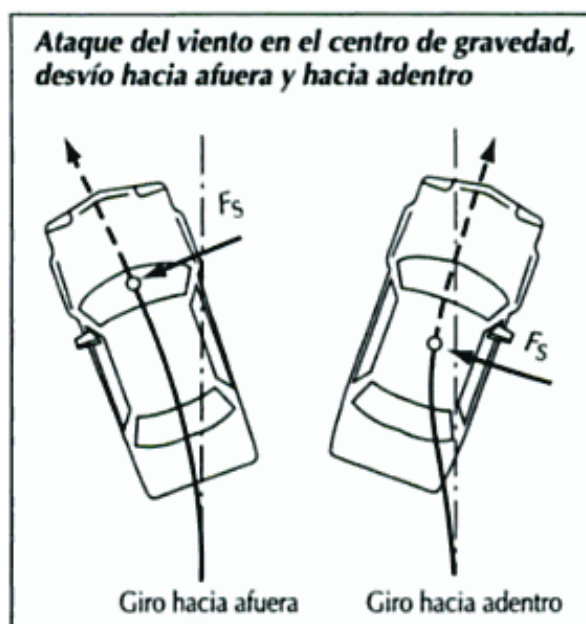


Figura 5. 31 Desviación del vehículo hacia fuera y hacia dentro según el ataque del viento lateral.

Cabe destacar que no es necesariamente preciso que un vehículo tenga el mismo comportamiento de autodirección en toda la gama de posibles aceleraciones transversales. Además de los vehículos que siempre están subvirados, están los que con pequeñas aceleraciones transversales están subvirados y en cambio con aceleraciones transversales elevadas cambian a sobrevirados y viceversa.

5.8.2. Descripción de estudios de la fuerza lateral

Como ya se ha comentado anteriormente, el valor del coeficiente aerodinámico de viento lateral C_y se determina mediante ensayos en túnel de viento^[2] y en los siguientes apartados se tratarán de explicar cuáles son las características más importantes a tener en cuenta en la

determinación de este coeficiente mediante el uso del túnel, así como la contrastación de los resultados experimentales obtenidos por varios investigadores en este campo.

5.8.3. Primeros ensayos en túnel de viento

Las características de un túnel de viento^[2] de los empleados en este tipo de ensayos vienen definidas, por ejemplo, en un estudio publicado en un artículo SAE en junio de 1967 por H. Bunningy F.N. Beauvais, en el que se muestran los resultados obtenidos en un túnel de viento tras el análisis de la estabilidad de los vehículos ante ráfagas laterales de viento, siendo el ángulo de incidencia del viento lateral respecto a la perpendicular a la dirección del vehículo de hasta 15 °.

Uno de los primeros túneles de viento utilizado puede observarse en la figura 5.31, en la que se aprecian las características y dimensiones más importantes del sistema, así como de las velocidades que se deben tener en cuenta a la hora de realizar los cálculos, como son la velocidad del vehículo V_u que en este caso coincide con la del túnel.

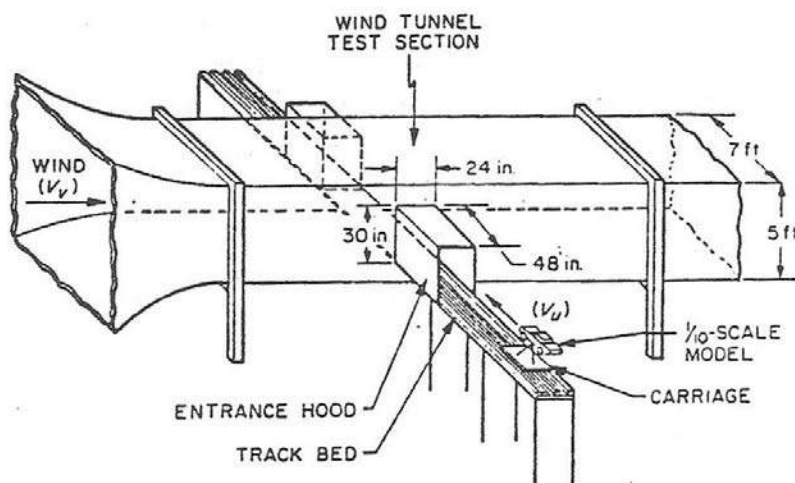


Figura 5. 32 Esquema de uno de los primeros túneles de viento.

Detalles más claros del modelo a estudiar, del carro y del camino de rodadura, se observan en la siguiente figura 5.32 en la que se aprecian con detalle las ruedas interiores y los raíles encargados de la sujeción del carro a la pista de rodadura.

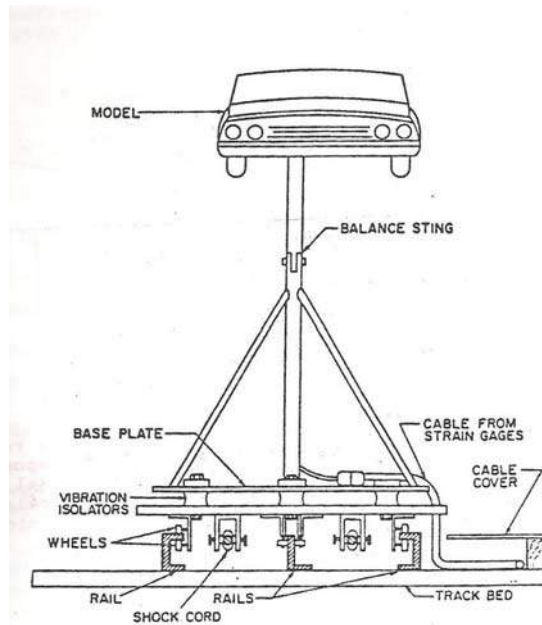


Figura 5.33 Detalles de la sujeción del modelo a la pista de rodadura.

Para este en concreto, los estudios realizados en el túnel de viento a partir de modelos tuvieron en cuenta dos tipos de estados del vehículo: el estático y el dinámico.

El test realizado en un estado estático del vehículo pretendía medir las fuerzas laterales estáticas y los momentos en función del ángulo de incidencia del viento respecto a la perpendicular a la dirección del vehículo. Las medidas para el caso estático del estudio a tratar fueron hechas para ángulos de 0° a 90° , en incrementos de 5° y para velocidades del túnel de viento de 20 a 70 fps en incrementos de 10 fps.

Para los tests dinámicos se empleó una amplia variedad de ángulos y velocidades de viento relativas totales. El ángulo de incidencia del viento se determinó a través de la velocidad del modelo, V_u y la velocidad de la ráfaga de viento V_r , que en este caso coincide con la velocidad del túnel. Una vez conocidas velocidades el ángulo quedó definido como:

$$\varphi = \arctan \frac{V_r}{V_u}$$

Ecuación 5.13

Siendo la velocidad relativa total que experimenta el modelo:

$$V = \sqrt{(V_u^2 + V_v^2)^2}$$

Ecuación 5.13

Durante el desarrollo de la prueba y para conseguir que la experiencia se aproximara lo máximo posible a la realidad, el vehículo modelo, inicialmente en reposo, fue catapultado a gran velocidad por el interior del túnel, lo que provocó un brusco cambio en la velocidad relativa y con ello, un incremento en la presión dinámica. En la figura 5.33 se muestra de forma esquemática el paso del modelo a través de la sección del túnel.

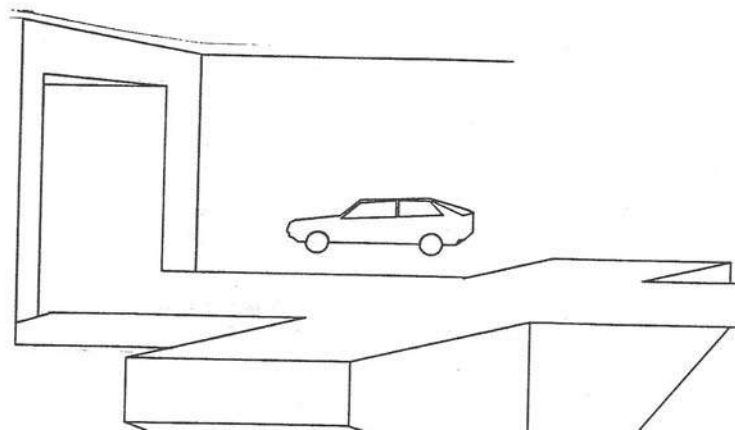


Figura 5.34 Detalle del pase del modelo a través del túnel.

Si inicialmente en el reposo la presión dinámica presentaba el valor de la ecuación 5.14:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot V_u^2$$

Ecuación 5.14

Una vez que el modelo penetró en el túnel a gran velocidad, dicha presión dinámica tomó el valor:

$$P_{\text{túnel}} = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2,$$

Ecuación 5.15

Siendo ρ la densidad de la masa de aire.

Un ejemplo de los datos obtenidos se recogen en la figura., en la que se muestra la variación de fuerza que se produce sobre el vehículo en un tiempo muy corto.

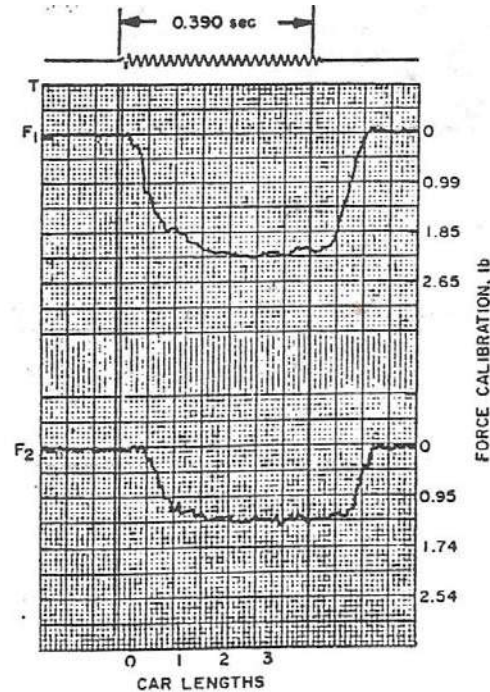


Figura 5.35 Variación de la fuerza sobre el vehículo en función del tiempo.

A partir de dichos resultados mostrados en la gráfica anterior, el coeficiente lateral aerodinámico fue medido a partir de la expresión:

$$C_y = C_{f1} + C_{f2}$$

Ecuación 5.15

Donde:

$$\begin{aligned} \circ \quad C_{f1} &= \frac{F_1}{q \cdot A} \\ \circ \quad C_{f2} &= \frac{F_2}{q \cdot A}, \text{ siendo:} \end{aligned}$$

- C_{f1} = coeficiente de fuerza frontal, dimensional.
- C_{f2} = coeficiente de fuerza trasera, dimensional.

- F_1 = balance de fuerza frontal, lb.
- F_2 = balance de fuerza trasera, lb.
- q = presión dinámica, lb/ sq ft.
- A = sección transversal máxima del vehículo, sq ft.

Tras analizar las características más importantes a la hora de hallar el coeficiente lateral aerodinámico C_y mediante ensayo en el túnel de viento, era igualmente necesario tener en cuenta las fuerzas que afectaban a un vehículo en movimiento.

Las fuerzas creadas entre las ruedas y la superficie de la carretera afectan y controlan el movimiento del vehículo. En otras palabras, el automóvil es “guiado” a lo largo de una trayectoria establecida por la configuración de las ruedas. Algunas fuerzas externas modifican las fuerzas en equilibrio cambiando con ello las condiciones de movimiento y en consecuencia, la trayectoria. El vehículo por sí mismo no posee la capacidad de conexión de estos cambios y su movimiento no es restablecido automáticamente. La recuperación de la trayectoria original se lleva a cabo mediante el uso de una desviación adicional de la rueda la cual introducirá una fuerza de fricción que restablecerá la trayectoria. Por lo tanto ha de distinguirse entre dos estados de movimiento: estado de movimiento estable y estado de movimiento transitorio.

A lo largo del presente análisis tan sólo se consideró el estado de movimiento estable en que en todas las fuerzas y momentos actuantes sobre el coche se encuentran en equilibrio. Es necesario tener en cuenta que en este estado de movimiento estable, la adhesión a la carretera y la dirección de marcha no pueden separarse de los efectos mecánicos, tales como la relación friccional entre rueda y carretera, masa y fuerza de inercia y fuerzas aerodinámicas. Los efectos de estas dos clases de fuerzas actuando conjuntamente han de tenerse en cuenta durante cualquier análisis que se vaya a desarrollar.

Por tanto, aceptando el significado del término “estabilidad” aplicado a los automóviles con las reservas anteriormente mencionadas y considerando en primer lugar el estado de movimiento estable, se observó que la corrección de la marcha dependía tanto de las fuerzas

implicadas como de la variación que se producía en la trayectoria del coche cuando se veía sometido a una corriente de aire.

En el diseño de los automóviles primitivos, alrededor de 1911, se asumía erróneamente que las ruedas simples se movían en su plano de simetría, lo que excluía tanto la posibilidad de deslizamiento lateral de la rueda sobre la carretera como la resultante de la fuerza lateral de fricción. Con posterioridad, el concepto de ángulo de desplazamiento lateral del neumático relaciona el giro de la trayectoria del coche en función de la interacción de la rueda con la carretera, tal y como se observa en la figura 5.35, así como todos los ejes y ángulos implicados.

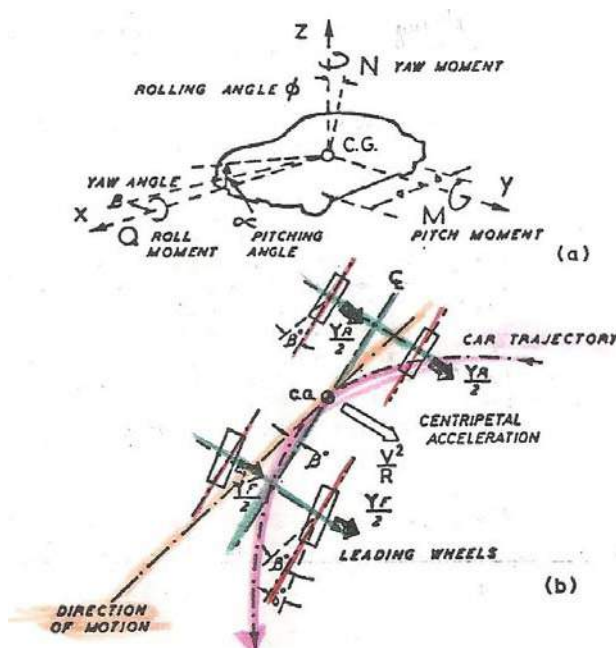


Figura 5.36 Esquema de la trayectoria lateral de un vehículo.

El ángulo de desviación lateral β entre la dirección del movimiento de una rueda y su plano de simetría (idéntico a su plano de rotación) es el resultado inevitable del giro. Para un coche que sigue una trayectoria curvilínea debe existir una fuerza oblicua que genere la aceleración centrípeta y que a su vez sea la causante de los ángulos correctores hacia la dirección instantánea del movimiento.

Manteniendo el coche a una trayectoria de giro dada, ésta es alcanzada girando las ruedas delanteras o ruedas de marcha un ángulo de marcha δ , con respecto al eje longitudinal del

vehículo. Dicho giro de las ruedas de marcha causa un par en las ruedas traseras, cuyo plano de rotación ha sido fijado relativamente al eje longitudinal del vehículo, para crear el mismo ángulo β a la dimensión del movimiento, por lo que la dimensión de las ruedas de marcha estará en efecto desviada por la suma de ambos ángulos $\delta + \beta$, tal y como se aprecia en la figura 5.35, creando una fuerza lateral de fricción Y_f que contribuye a la fuerza centrípeta $\frac{MV_2}{R}$.

Dichos ángulos de deslizamiento lateral junto con el consecuente balance de fuerzas laterales externas, dan un gran impulso al desarrollo de la teoría de la estabilidad, destacando que el coeficiente aerodinámico de la fuerza lateral de un coche de diseño aerodinámico, varía mucho con el ángulo de desviación lateral β , que hace que los coeficientes de coches típicos de salón sean aerodinámicamente menores.

Como ya se ha visto anteriormente, la fuerza total aerodinámica que crea la corriente de aire relativa alrededor de un vehículo puede ser considerada como actuando sobre un punto, el centro de presión (C.P.), tal y como muestra la figura 5.36.

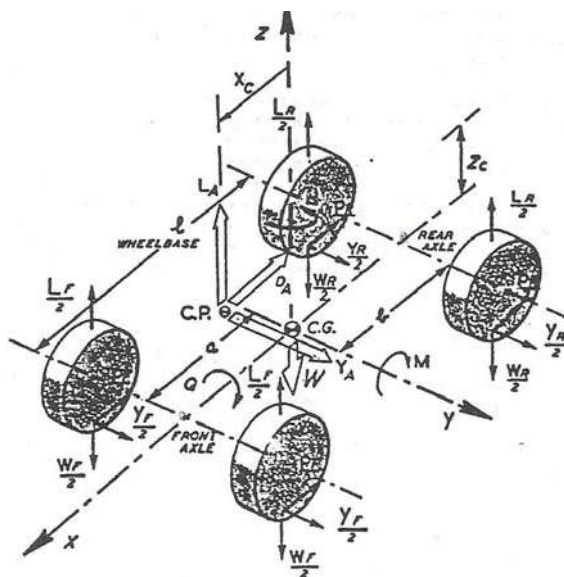


Figura 5. 37 Fuerzas aerodinámicas aplicadas en el centro de presión (C.P.)

La fuerza aerodinámica obviamente no produce momento sobre este punto, pero para algún otro punto situado a una distancia del centro de presiones existirá un momento de la fuerza aerodinámica neta. Como todas las fuerzas de masa e inercia actuando sobre un vehículo se

concentran en el centro de gravedad del mismo (C.G.) es obvio e interesante conocer cuáles de los momentos aerodinámicos están actuando sobre el C.G. Ello requiere el conocimiento de las posiciones relativas tanto del C.G. como del C.P.

Los análisis realizados en el túnel de viento durante los estados preliminares del modelo a escala, permiten determinar la posición del C.P. del vehículo. Cabe destacar que a lo largo del desarrollo del presente proyecto se asumirá que la posición de dicho C.P. ha sido determinada con anterioridad en los test en el túnel de viento, por lo que se supone conocida.

5.8.4. Efectos de la corriente de aire sobre el vehículo

Cuando la corriente de aire es paralela al plano vertical de simetrías del vehículo^[2], la fuerza aerodinámica resultante actúa en dicho plano y puede ser transformada en las componentes usuales de arrastre y sustentación. En cambio, cuando la corriente de aire está inclinada respecto al plano vertical de simetría, el flujo es asimétrico y provoca una fuerza dinámica lateral. Las causas de dicha asimetría se deben principalmente, a dos razones: primera, a las desviaciones de la trayectoria producidas por ráfagas de viento que soplan diagonalmente a la trayectoria del vehículo y segunda, al ángulo de deslizamiento lateral que se crea cuando el vehículo está girando. En cada uno de los casos, la resultante de la fuerza aerodinámica ha de resolverse con sus tres componentes: fuerza de arrastre, fuerza de sustentación y fuerza lateral.

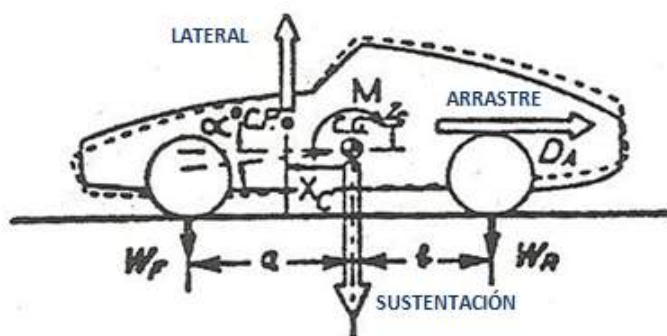


Figura 5. 38 Componentes de la fuerza aerodinámica.

La fuerza lateral actúa en el centro de presiones y como ya se ha visto anteriormente se expresa a partir de la ecuación 5.37. Cabe destacar que en todos los problemas relacionados con la estabilidad ha de considerarse el centro de gravedad del vehículo como el centro de masas en movimiento para el cual están referidos tanto las fuerzas como los momentos aerodinámicos.

5.8.4.1. Análisis de la reacción neumático – carretera

El análisis detallado de la reacción entre neumático y carretera necesario en todo problema de estabilidad, requiere descomponer la fuerza aerodinámica lateral en sus componentes de fuerzas laterales actuando sobre los ejes delantero y trasero:

$$Y_A = Y_{AF} + Y_{AR} = Y_A \left[\frac{b + X_c}{1} + \frac{a - X_c}{1} \right]$$

Ecuación 5.16

Donde:

- Y_A es la fuerza aerodinámica lateral.
- Y_{AF} fuerza aerodinámica lateral actuando sobre el eje delantero.
- Y_{AR} fuerza aerodinámica lateral actuando sobre el eje trasero.
- X_c es la distancia del C.P. al C.G.

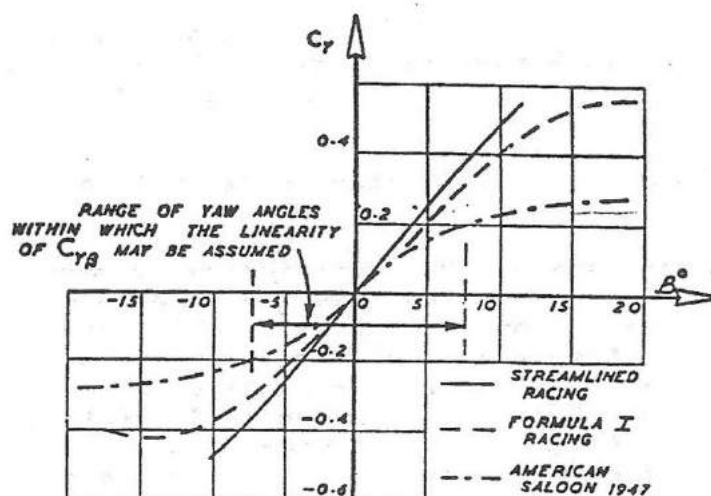


Figura 5.39 Coeficiente de fuerza lateral C_y en función del ángulo de incidencia β .

Considerando los coeficientes dimensionales en lugar de las fuerzas, el análisis es independiente del tipo de coche actual y puesto que la fuerza lateral aerodinámica es el resultado del ángulo de deslizamiento lateral, es muy importante para cada perfil típico de coches investigar la relación entre ambos parámetros. Dicha investigación suele llevarse a cabo con modelos a escala en túneles de viento, en los que la fuerza lateral es medida para un amplio rango de diferentes valores del ángulo de incidencia β . En la figura 5.38 se muestra un diagrama típico del coeficiente de fuerza lateral C_y en función del ángulo de incidencia β y en él puede observarse la relación entre ambos valores, ya que un cambio en β modifica el correspondiente valor de C_y .

Dicha relación se expresa en forma de derivada de la forma:

$$\frac{\partial C_y}{\partial \beta} = C_y \cdot \beta$$

Ecuación 5.17

Siendo dicha ecuación 5.17 la pendiente de la curva $C_y = f(\beta)$.

Esta dependencia entre el coeficiente aerodinámico de fuerza lateral y el ángulo de incidencia es una característica importante para un perfil de automóvil determinado. La curva C_y vs β es generalmente no lineal y su pendiente varía con β , pero debido a razones prácticas, se

considera tan sólo un pequeño rango de ángulos β partiendo de cero. La curva es casi lineal en la zona próxima a $\beta = 0$, asumiéndose en la práctica la linealidad en dicha zona, lo que lleva a considerar la derivada $C_y \cdot \beta$ como una constante para un vehículo determinado.

Una estimación preliminar de los efectos aerodinámicos sobre la estabilidad no puede ser hecha sin un conocimiento previo de la fuerza aerodinámica lateral Y_A frente al ángulo de incidencia β (Y_A vs β).

5.8.4.2. Métodos para la estimación del coeficiente C_y

La determinación de la relación dimensional de anchura y altura^[2] de un vehículo, $\lambda = \frac{b}{h}$, puede ayudar en la estimación del orden del valor de C_y , tal y como se observa en la figura 5.40. En la gráfica C_y vs β se comprueba que para tres relaciones diferentes entre anchura y altura, se obtienen diferentes formas de la curva $C_y = f(\beta)$, ya que a mayor valor de la relación λ , mayor pendiente presenta dicha curva.

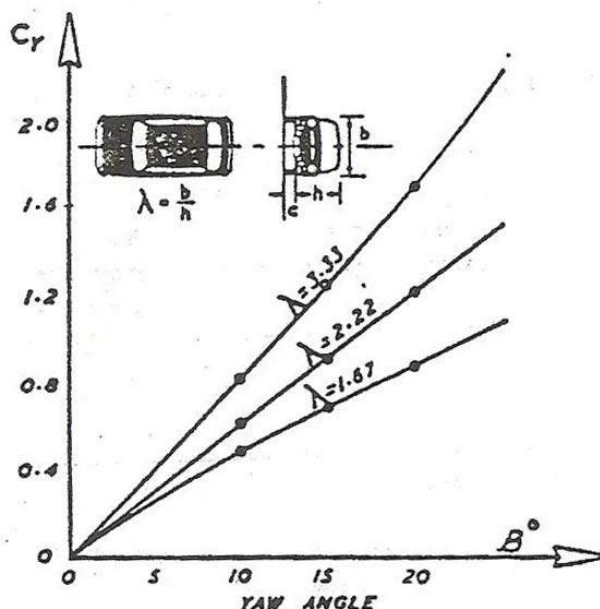


Figura 5.40 Relación del coeficiente lateral y ángulo de incidencia, para tres relaciones diferentes entre anchura y altura.

Por otro lado, cabe destacar la escasez de métodos prácticos a la hora de estimar de forma aproximada el coeficiente de fuerza lateral C_Y . A continuación se detalla de forma resumida la evolución a través de las últimas décadas de algunos de estos métodos.

Fórmula Bowman

Se trata de una fórmula empírica que tomó el nombre de su autor y que fue sugerida a partir de una aproximación estadística. Dicha fórmula aportaba un valor estimado del coeficiente de fuerza lateral C_Y para diferentes ángulos de incidencia:

$$C_Y = k \cdot \beta$$

Ecuación 5.18

donde β se medía en radianes y k era un factor establecido experimentalmente para cada grupo característico de perfiles de vehículos.

Método de la “tabla de evaluación”

Método nacido en el Reino Unido y basado en la relación entre las características particulares del perfil del vehículo y los coeficientes aerodinámicos medidos.

Se fundamentaba en una “tabla de evaluación” que recogía una serie de grupos en función de las formas particulares de diferentes perfiles de vehículos y a los que asignaba un valor determinado. Posteriormente el diseñador, habiendo exigido previamente un perfil concreto, comparaba dichas formas y establecía una composición del factor de fuerza lateral n_f . Introduciendo este valor en la ecuación 5.19 se llegaba a obtener de forma aproximada el coeficiente de fuerza lateral C_Y con un margen de error promedio del 20%.

$$C_Y = \frac{\text{Área}_{\text{lateral}}}{\text{Área}_{\text{frontal}}} \beta (0,005 + 0,0019 \cdot n_f)$$

Ecuación 5.19

Artículo SAE

“Effect of Unsymmetrical Wind Incidence on Aerodynamic Forces Acting on Vehicle Models and similar Bodies”

Artículo S.A.E. presentado en el *Congreso de Ingeniería del Automóvil* en Detroit en enero de 1965 por R. Barth, del Stuttgart Technical College,^[2] que ofrecía métodos destinados al cálculo del coeficiente C_Y .

En dicho artículo se proponía el análisis sobre grupos de diferentes modelos de vehículos con el objetivo de minimizar las deficiencias que podían llegar a provocar accidentes, como por ejemplo la acción de fuertes ráfagas de viento lateral o también propiedades inestables del contorno del vehículo que disminuían su seguridad. El desarrollo de dichas investigaciones tuvo lugar en el túnel de viento del “*Vehicle and Engine Research Institute*” del Stuttgart Technical College y en ellas se intentó asegurar por un lado, la comparación entre los resultados de las pruebas en el túnel de viento y por otro, la determinación del efecto de las dimensiones geométricas de los modelos, además de la obtención de datos que pudieran ser tenidos en cuenta de cara a ensayos futuros en el cuerpo diseñado.

Durante el desarrollo de los ensayos el efecto de las relaciones dimensionales de los modelos fue tenido en cuenta, aplicando dichos ensayos a diferentes grupos de modelos de vehículos, prestando especial atención a los cuerpos de formas rectangulares. El sistema de referencia empleado durante los ensayos se muestra en la figura 5.40 y en él se comprueba que la superficie de la carretera estaba representada por los ejes x e y , mientras que el plano de simetría del perfil del modelo era el formado por el plano xz .

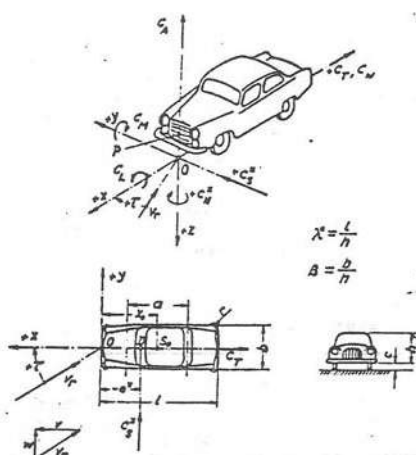


Figura 5. 41 Sistema de referencia para los ensayos.

La orientación del sistema de ordenadas se fijó con respecto al cuerpo, siendo la notación empleada la que se describe a continuación:

- X, y, z = sistema de ordenadas perpendiculares con origen en O .
- P = centro de presión dinámica por encima de O .
- So = Posición del centro de gravedad en el centro del eje.
- D = centro de presión. Punto de aplicación de la resultante de la fuerza aerodinámica lateral.
- Xo = Distancia del punto So al punto dado. Se mide en metros (m).
- W = Arrastre en la dirección del viento incidente. Positivo hacia $-x$. Se mide en kilogramos (Kg).
- T = Fuerza tangencial. Fuerza aerodinámica en dirección x (positivo hacia $-x$). Se mide en kilogramos (Kg). Cuando $T=0$ grados, $W = T$.
- S = Fuerza lateral. Fuerza aerodinámica en dirección Y (positiva hacia $+Y$). se mide en kilogramos (Kg).
- N = momento sobre el eje vertical, positivo en el sentido de las agujas del reloj.
- e = Distancia del centro de presión al punto dado O . Se mide en metros (m).

$$e = \frac{N}{S}$$

Ecuación 5.20

- F = área frontal. Máxima sección transversal en la dirección x , m^2 .
- Fs = área lateral. Máxima sección transversal en la dirección y , m^2 .
- l = longitud del vehículo, m.
- h = altura del vehículo, m.
- b = anchura del vehículo, m.
- a = distancia entre ruedas, m.
- c = altura del vehículo al suelo, m.
- λ = relación de longitud.

$$\lambda = \frac{l}{h}$$

Ecuación 5.21

- β = relación de anchura.

$$\beta = \frac{b}{h}$$

Ecuación 5.22

- t = ángulo entre la resultante del flujo de aire incidente y el eje longitudinal del modelo (eje x). positivo en el sentido de las agujas del reloj. Se mide en grados.
- q = presión dinámica de la velocidad del flujo de aire incidente. Se mide en Kg/m².
- C_s^* = coeficiente de fuerza lateral.

$$C_s^* = \frac{S}{q \cdot F_s}$$

Ecuación 5.23

5.8.4.3. Resultados basados en el artículo precedente

Los modelos investigados a lo largo del análisis fueron divididos en dos grandes grupos en función de sus rasgos característicos y sus dimensiones:

- Cuerpos rectangulares, teniendo:
 - Diferentes relaciones de longitud, λ .
 - Diferentes relaciones de anchura, β .
 - Ejes redondeados con diferentes radios, r .
- Modelos de vehículos:
 - Forma de pontón.
 - Ángulos aerodinámicos con considerable final trasero.
 - Coches deportivos y de competición.
 - Perfiles de cajón y vehículos con final de cola.

Las medidas para la obtención del coeficiente aerodinámico de fuerza lateral C_Y sobre los modelos de los vehículos investigados, fueron obtenidas mediante ensayos en el pequeño túnel de viento del "Vehicle and Engine Research Institute". Los resultados conseguidos se representaron como una relación entre los valores de t (ángulo entre la resultante del flujo de aire incidente y el eje longitudinal del modelo) y la relación de longitud λ , obteniéndose de este modo el coeficiente de fuerza lateral referidos al área frontal, C_s , o al área lateral, C_s^* , tal y como se muestra en la figura 5.41. Cabe destacar que los datos fueron tomados para un ángulo de incidencia del viento de $t = \pm 25$ grados.

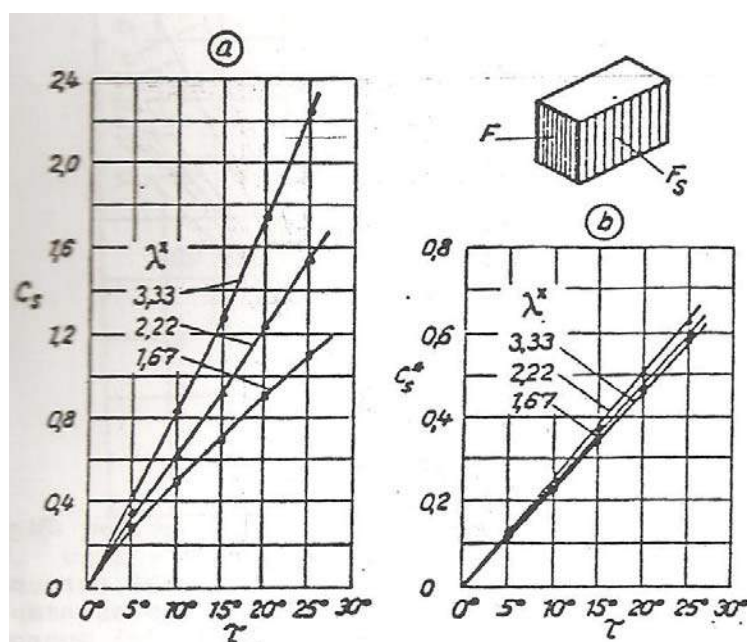


Figura 5.42 Coeficiente de fuerza lateral en función del ángulo de incidencia del viento.

Como análisis de los resultados obtenidos, se demostró que la dependencia lineal del coeficiente de fuerza lateral referido al área lateral C_s^* era destacable en el caso de cuerpos rectangulares con diferentes ratios de longitud λ , tal y como se observa en la figura 5.42.

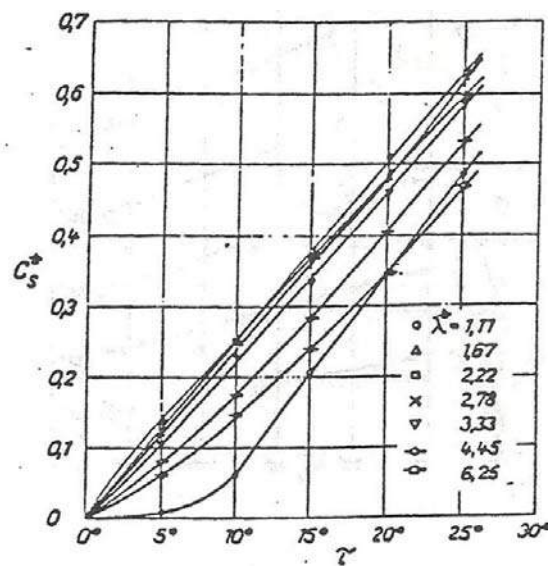


Figura 5.43 Dependencia lineal del coeficiente de fuerza lateral en cuerpos rectangulares para diferentes ratios de longitud, λ .

Por otro lado, se demostró el efecto de la anchura del cuerpo sobre el coeficiente de fuerza lateral. Ello se comprueba en la figura 5.43, en la que se indican las diferentes curvaturas en un rango de ángulos de incidencia de $t = 0$ hasta $t = 25$ grados mientras que para ángulos de mayor valor, la pendiente de la curva C_s^* llegaba a ser bastante lineal otra vez.

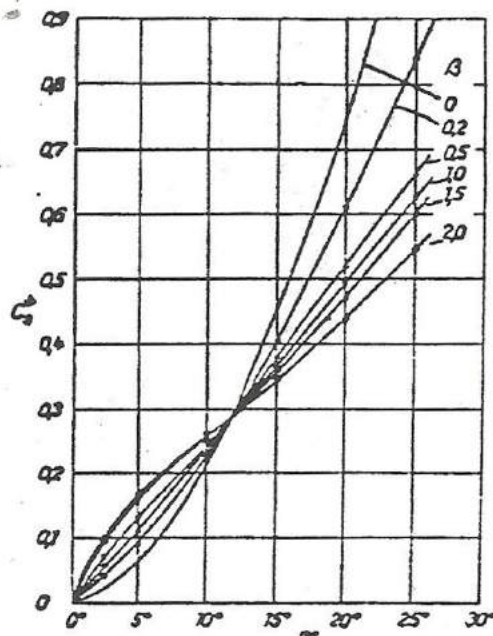


Figura 5.44 Efecto de la anchura del cuerpo sobre el coeficiente de fuerza lateral.

Al observar las gráficas quedaba patente que la mayor diferencia se obtenía para casos donde $\beta = 0^\circ$ y $\beta = 0,2^\circ$. En este caso, $\beta = 0^\circ$ representaba un panel liso en el que el valor de la anchura del mismo era mucho menor al de la altura, mientras que $\beta = 0,2^\circ$ era una variante principal del cuerpo rectangular.

En las figuras 5.44 y 5.45 quedaron recogidos los valores de los ángulos para los cuales la fuerza lateral referidos al área lateral C_s^* dependían de las relaciones dimensionales de altura λ y anchura β respectivamente.

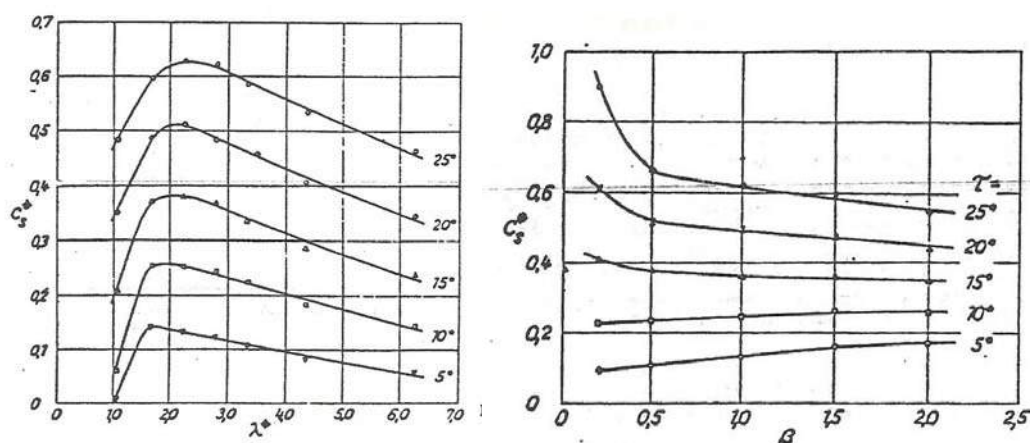


Figura 5. 45 Fuerza lateral referida al área lateral en función de la altura λ y anchura, β .

Una vez descritos y analizados los resultados obtenidos tras los ensayos propuestos en el artículo "Effect of Unsymmetrical Wind Incidence on Aerodynamic Forces Acting on Vehicle Models and similar Bodies" de R. Barth, se llegó a la conclusión de que dicho método no permitía la deducción de los valores del coeficiente aerodinámico lateral C_y para ángulos fuera del rango de -25 a 25 grados, ya que los valores de los ángulos de incidencia del viento no excedían dicho valor respecto al eje longitudinal, mientras que en el caso propuesto por el estudio dicho ángulo de incidencia debería ser de 90 grados, puesto que es el caso más desfavorable que puede aparecer.

Sin embargo, a pesar de este inconveniente, tanto este método como los descritos anteriormente, son muy aclaratorios en cuanto a la realización de experiencias de este tipo, siendo ésta una de las razones por las que se han incluido en este apartado. Por otro lado, las gráficas obtenidas permiten contrastar y calcular valores orientativos del coeficiente C_y para diferentes perfiles y ángulos de incidencia más pequeños, lo que aporta un valor significativo a los estudios descritos.

6. Presupuesto

6.1. Consideraciones previas

El presente presupuesto hace referencia al desarrollo y diseño de una metodología de ensayo aerodinámico accesible a un grupo de clientes a los que, actualmente, les resulta difícil el acceso a este tipo de ensayos, tales como entidades universitarias, laboratorios de ensayos, ciertas marcas automovilísticas... Para la materialización del presente proyecto es necesario tanto material específico, como acceso a instalaciones de ensayo adecuadas además de personal humano encargado de diseñar, controlar y supervisar el correcto transcurso de la prueba.

Por dichos motivos, el presente presupuesto asumirá costes derivados del material, del personal involucrado y los costes que conlleva la realización del posterior análisis de resultados.

El número de ensayos necesarios para cubrir la superficie del vehículo objeto del análisis variará en función del modelo del mismo, ya que evidentemente, los requisitos para un vehículo utilitario no serán los mismos que para un vehículo tipo familiar. El número mínimo de puntos de medición para garantizar unos resultados fiables se ha establecido como diez, por lo que en un principio, el proceso de análisis incluye la realización de diez pruebas por vehículo. Como es lógico, dicho número de posiciones podrá variar para ajustarse a las condiciones y asegurar que el ensayo se desarrolla de manera fiable.

6.1.1. Material

El material necesario para cada uno de los ensayos se compone de:

- el equipo de medición, compuesto por el anemómetro y el sistema de anclaje.
- Equipo informático: ordenador portátil, software de control del anemómetro y soporte de acople para la transferencia de datos al PC
- Vehículo objeto del ensayo: lo aportará el cliente o bien se proporcionará un vehículo de alquiler.

6.1.2. Costes de material

El material necesario para la realización de los ensayos asciende a un coste total de:

Anemómetro portátil:	395'78 €
Equipo informático:	1.800 €
Software de control y soporte de comunicación:	110'42 €
TOTAL material:	2.306'2 €

Amortización del equipo a partir de 50 ensayos:

coste total del material / 50 ensayos = 46'12 € de material / ensayo

6.1.3. Descripción general del análisis

Una vez establecidos los requisitos por parte del cliente, se procederá a comenzar las pruebas en la pista tras finalizar la fase previa de limpieza y preparación del vehículo. El coche lo podrá aportar o bien el propio cliente, puesto que desea el análisis sobre dicho vehículo en concreto, o bien lo aportará la empresa responsable del estudio, por lo que el alquiler del mismo supondrá un coste adicional al cliente.

Tras la preparación del vehículo, comenzará en pista la fase de desarrollo de las pruebas, consistente en la realización de los diez ensayos, bajo la supervisión y control del ingeniero encargado y un ayudante.

Una vez finalizado el ensayo, se pasará a la fase de tratamiento y análisis de datos, que desembocará en la elaboración de un informe final sobre las características dinámicas del vehículo por parte del ingeniero responsable de ello.

Como gastos adicionales se incluye el alquiler de la pista en función de las horas necesarias para el ensayo y gastos de combustible en caso de que el vehículo a ensayar sea de alquiler. Se excluirán del presupuesto los gastos derivados de dietas.

6.1.4. Elaboración de presupuesto

Se supone el caso de alquilar un vehículo para el ensayo, con los consecuentes gastos de combustible:

DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE	TIEMPO (Horas)	COSTE (€)	TOTAL
Alquiler vehículo		1 día	60	60
Gastos combustible				40
Alquiler pista		5 horas	35 €/hora	175
Equipo de medición (uso de PC, anemómetro, software, soporte)			46'12	46'12
Realización del ensayo	Ingeniero	2 horas	90 € / hora	180
Análisis de datos	Ingeniero	2 horas	90 € / hora	180
Elaboración de informe	Ingeniero	2 horas	90 € / hora	180
TOTAL				981.12 €

7. Síntesis de conclusiones finales

Tras el análisis del perfil de velocidades en cada uno de los tramos de la superficie del vehículo de forma detallada, se concluye que:

- El método de ensayo propuesto proporciona información válida para determinar el perfil de velocidades de un vehículo a lo largo de su carrocería.
- El Teorema de Bernouilli se confirma como herramienta principal para el estudio del flujo circundante al vehículo, proporcionando la base teórica que permite definir una distribución de presiones válida a partir de los resultados registrados en los análisis de campo.
- Como objetivo inicial se planteaba la posibilidad de diseño de una metodología de ensayo aerodinámico alternativo, con fines principalmente docentes. A la vista de los resultados finales, que muestran una correspondencia entre el modelo teórico y el práctico, se confirma la validez y viabilidad de la metodología diseñada.
- A parte de los fines educativos como posible práctica universitaria de este método de análisis, el presente estudio de campo proporciona información válida muy útil para posibles ampliaciones en trabajos futuros, centrando dichas mejoras en otro tipo de ensayos con el fin de mejorar las características aerodinámicas de los vehículos ensayados.
- Las instalaciones y herramientas empleadas a lo largo de las pruebas permiten que el coste total por ensayo sea notablemente menor al derivado de los ensayos mediante otras herramientas aerodinámicas, como el túnel de viento y el análisis de fluido computacionales.
- Facilita el acceso de las herramientas y mejoras aerodinámicas a un mayor número de clientes.

8. Desarrollos futuros

La metodología de ensayo descrita a lo largo del proyecto ha sido principalmente desarrollada y diseñada con el objetivo de servir de guía y apoyo para la realización de pruebas aerodinámicas en centros universitarios, de tal forma que el análisis de los resultados obtenidos influya de forma didáctica, facilitando la comprensión y el estudio de aquellas asignaturas relacionadas con la dinámica de fluidos.

Ahora bien, aplicando ciertos cambios en los equipos de medida y en las instalaciones adecuadas, con una metodología de ensayo similar a la propuesta, sería posible llevar a cabo estudios aerodinámicos en vehículos a escala real a otros niveles que no sean los docentes. A través de una unidad de medida que permita la transferencia de datos directamente desde el equipo al PC durante la realización de las pruebas, junto con la posibilidad de contar con unas instalaciones adecuadas (pistas de ensayos, circuitos, etc) que permitan alcanzar velocidades de circulación mayores y contando con un sistema de sujeción más fiable, podrían desarrollarse ensayos aerodinámicos que aportarían información muy interesante a la hora de mejorar el rendimiento del vehículo.

Por ejemplo, la determinación del perfil de velocidades de forma detallada en un área concreta del vehículo sobre la que se desee introducir alguna modificación, aportaría información muy valiosa sobre cómo afecta a la dinámica del vehículo la introducción de dicha variación y cómo actuar ante ella. Podría estudiarse en campo abierto y sin necesidad de simulaciones a través de software CFD's, los diferentes comportamientos de un vehículo ante la introducción de elementos aerodinámicos tales como faldones, alerones, viseras, cambios en el diseño de la carrocería... y aplicar las medidas necesarias para efectuar las mejoras.

Por otro lado, y volviendo al nivel docente, introduciendo modificaciones en la presente metodología, sería posible desarrollar estudios tanto a nivel de prácticas como de futuros proyectos, ampliando el estudio de las características fluidodinámicas del vehículo tanto a nivel longitudinal como transversal.

- ***Estudio de la capa límite alrededor del vehículo***

Una posible ampliación de este proyecto podría consistir en un estudio de la capa límite alrededor de un vehículo automóvil a partir de la determinación del espesor de la misma.

Sería necesario contar con un sistema de sujeción regulable en altura y con un ventilador centrífugo para aplicar una corriente de aire constante a una velocidad determinada. Al igual que en el presente proyecto, el equipo de medición se situaría en diferentes posiciones longitudinales a lo largo del chasis del vehículo, y en cada una de dichas posiciones se tomarían medidas del valor de la velocidad de flujo incidente pero a diferentes alturas de la superficie del vehículo, registrando los valores de dicha velocidad hasta que se no se tengan variaciones de dicho valor, es decir, se esté fuera de la capa límite con corriente de aire de velocidad constante. A partir de la realización de la curva “velocidad del viento en función de la altura”, sería posible desarrollar una práctica o estudio sobre cómo se comporta la velocidad del flujo de aire incidente a lo largo de la capa límite.

- ***Estudio de la dinámica transversal del vehículo***

El modelo de anemómetro escogido para el presente proyecto cuenta con la particularidad de trabajar con una función brújula que se orienta en función del norte magnético o geométrico según se seleccione una u otra opción en su menú. Un posible campo de análisis que puede desarrollarse a partir de dicha función consistiría en el estudio del flujo de aire incidente en el vehículo de forma transversal.

Contando con un sistema de sujeción capaz de girar sobre sí mismo tras aplicarle una ráfaga de aire lateral (una vez situado sobre él el equipo de medida), permitiría conocer el ángulo de incidencia con el que el viento lateral recae sobre la superficie del vehículo, ya que bastaría con calcular la diferencia entre los ángulos inicial (sin viento lateral) y final (tras la aplicación de la ráfaga). Por otro lado, el equipo también proporcionaría la velocidad de dicho viento lateral, con lo que se contaría con suficiente información para el estudio de la variación del coeficiente de fuerza lateral en función del ángulo de incidencia para diferentes tipos de vehículos, y como consecuencia, el comportamiento de la fuerza lateral actuando sobre la carrocería.

ANEXO I

(Tablas de datos)

Tabla A. 1 Registro de datos P1.

POSICIÓN P1 (parrilla)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	18:30:42	326	33,3	17	930,4
11/10/2010	18:30:44	327	34,8	16,8	930,2
11/10/2010	18:30:46	327	35,8	16,8	930,2
11/10/2010	18:30:48	327	34,1	16,9	930,2
11/10/2010	18:30:50	327	34,9	16,8	930,2
11/10/2010	18:30:52	327	35,7	16,8	930,1
11/10/2010	18:30:54	327	35,2	16,8	930,2
11/10/2010	18:30:56	326	34,3	16,8	930,2
11/10/2010	18:30:58	326	33,3	16,8	930,2
11/10/2010	18:31:00	326	34	16,8	930,3
11/10/2010	18:31:02	326	34,8	16,8	930,3
11/10/2010	18:31:04	325	34,7	16,7	930,4
11/10/2010	18:31:06	325	34,2	16,8	930,2
11/10/2010	18:31:08	325	35,1	16,8	930,2
11/10/2010	18:31:10	325	34,4	16,8	930,2
11/10/2010	18:31:12	325	35,8	16,8	930,2
11/10/2010	18:31:14	325	35,6	16,9	930,2
11/10/2010	18:31:16	325	33,9	16,8	930,1
11/10/2010	18:31:18	325	33,9	16,8	930,2
11/10/2010	18:31:20	324	34,7	16,8	930,2
11/10/2010	18:31:22	325	34,7	16,8	930,2
11/10/2010	18:31:24	325	34,5	16,8	930,2
11/10/2010	18:31:26	324	35,4	16,8	930,2
11/10/2010	18:31:28	324	34,5	16,8	930,2
11/10/2010	18:31:30	324	34,2	16,8	930,1
11/10/2010	18:31:32	324	34,4	16,8	930,2
11/10/2010	18:31:34	323	33,4	16,7	930,2
Promedios		325,80	34,63	16,82	930,22
Desviación típica			0,766		

Tabla A. 2 Registro de datos P2.

P2 (25 cm por encima de la parrilla)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	18:48:08	230	67,6	16,7	930,3
11/10/2010	18:48:10	228	70,5	16,7	930,6
11/10/2010	18:48:12	235	71	16,8	930,8
11/10/2010	18:48:14	230	70	16,8	930,9
11/10/2010	18:48:16	230	69,7	16,9	930
11/10/2010	18:48:18	230	71,7	16,9	930,2
11/10/2010	18:48:20	231	70,9	16,8	930,3
11/10/2010	18:48:22	230	67,8	16,8	930,3
11/10/2010	18:48:24	231	66,1	16,9	930,2
11/10/2010	18:48:26	231	67,8	16,7	930,3
11/10/2010	18:49:32	230	71,5	16,7	930,6
11/10/2010	18:49:34	218	72,1	16,8	930,8
11/10/2010	18:49:36	231	70	16,8	930,8
11/10/2010	18:49:38	229	69,3	16,9	930,9
11/10/2010	18:49:40	229	70,4	16,8	930,1
11/10/2010	18:49:42	229	72,2	16,9	930,2
11/10/2010	18:49:44	230	71	16,9	930,3
11/10/2010	18:49:46	229	68,7	16,8	930,3
11/10/2010	18:49:48	231	66,5	16,9	930,3
11/10/2010	18:49:50	229	68,1	16,9	930,3
11/10/2010	18:49:52	230	69,3	16,8	930,2
11/10/2010	18:49:54	230	70,1	16,9	930,2
Promedios		229,55	69,65	16,82	930,43
Desviación típica			1,833		

Tabla A. 3 Registro de datos P3.

P3 (25 cm por encima del fin de la parrilla)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	19:20:39	347	67	16,3	933,4
11/10/2010	19:20:41	347	68,6	16,3	933,4
11/10/2010	19:20:43	348	69,3	16,3	933,4
11/10/2010	19:20:45	347	67,7	16,3	933,4
11/10/2010	19:20:47	348	67,8	16,3	933,5
11/10/2010	19:20:49	347	68,3	16,3	933,4
11/10/2010	19:20:51	348	68,8	16,3	933,5
11/10/2010	19:20:53	348	68,4	16,3	933,5
11/10/2010	19:20:55	348	67,2	16,4	933,5
11/10/2010	19:20:57	347	68,2	16,3	933,6
11/10/2010	19:20:59	347	67,6	16,3	933,7
11/10/2010	19:21:01	347	66,8	16,4	933,7
11/10/2010	19:21:03	347	66,9	16,4	933,8
11/10/2010	19:21:05	347	68,2	16,4	933,8
11/10/2010	19:21:07	347	69,2	16,3	933,8
11/10/2010	19:21:09	347	68,9	16,2	933,8
11/10/2010	19:21:11	348	69,4	16,3	933,8
11/10/2010	19:21:13	348	69,1	16,2	933,7
11/10/2010	19:21:15	347	68,4	16,2	933,7
11/10/2010	19:21:16	347	67,4	16,3	933,8
Promedios		347,35	68,16	16,31	933,61
Desviación típica			0,828		

Tabla A. 4 Registro de datos P4.

P4 (frontal)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	19:31:01	329	77,8	15,6	933,5
11/10/2010	19:31:03	330	76,8	15,6	933,5
11/10/2010	19:31:05	330	75,5	15,6	933,4
11/10/2010	19:31:07	330	75,3	15,6	933,5
11/10/2010	19:31:09	330	76,4	15,6	933,5
11/10/2010	19:31:11	330	77,2	15,6	933,5
11/10/2010	19:31:13	330	77,1	15,6	933,6
11/10/2010	19:31:15	330	77,3	15,6	933,6
11/10/2010	19:31:17	332	76,2	15,7	933,7
11/10/2010	19:31:19	334	74,1	15,7	933,8
11/10/2010	19:31:21	335	71	15,7	933,9
11/10/2010	19:32:51	283	74,6	16	935,3
11/10/2010	19:32:53	283	74,9	16	935,3
11/10/2010	19:32:55	283	76,2	15,9	935,3
11/10/2010	19:32:57	283	76,3	15,9	935,4
11/10/2010	19:32:59	283	75,1	15,9	935,4
11/10/2010	19:33:01	282	74,8	16	935,3
11/10/2010	19:33:03	282	74,5	16	935,3
11/10/2010	19:33:05	282	74,9	15,9	935,2
11/10/2010	19:33:07	282	74,6	15,9	935
11/10/2010	19:33:15	278	72,6	15,8	934,4
11/10/2010	19:33:17	278	72,1	15,8	934,2
11/10/2010	19:33:19	276	72,6	15,8	934
11/10/2010	19:33:21	276	73	15,9	933,9
11/10/2010	19:33:23	276	73,7	15,9	933,8
11/10/2010	19:33:25	277	73,7	16	933,7
11/10/2010	19:33:27	277	74,9	16,1	933,6
Promedios		309,15	75,53	15,77	934,35
Desviación típica			1,53		

Tabla A. 5 Registro de datos P5.

P5 (frontal)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	19:45:55	270	69,6	16,3	935,5
11/10/2010	19:45:57	270	69,3	16,3	935,5
11/10/2010	19:45:59	270	68,5	16,3	935,3
11/10/2010	19:46:01	270	68,3	16,4	935,3
11/10/2010	19:46:03	270	68	16,4	935,2
11/10/2010	19:46:05	271	68,8	16,4	935,1
11/10/2010	19:46:07	270	66,9	16,4	935,1
11/10/2010	19:46:09	270	67,3	16,3	935,1
11/10/2010	19:46:11	271	67,5	16,3	935
11/10/2010	19:46:13	270	66,8	16,4	935
11/10/2010	19:46:15	270	67	16,4	935
11/10/2010	19:46:17	270	68,1	16,4	935
11/10/2010	19:46:19	271	67,5	16,4	934,9
11/10/2010	19:46:21	271	68,7	16,4	934,9
11/10/2010	19:46:23	271	70	16,3	934,9
11/10/2010	19:46:25	271	67,8	16,3	934,9
11/10/2010	19:46:27	270	66,9	16,3	934,8
11/10/2010	19:46:29	271	66,6	16,3	934,8
11/10/2010	19:46:31	271	65,8	16,3	934,8
11/10/2010	19:46:33	271	67,6	16,2	934,8
11/10/2010	19:46:35	270	67,7	16,2	934,7
11/10/2010	19:46:37	271	67,2	16,2	934,7
11/10/2010	19:46:39	271	66,9	16,2	934,7
11/10/2010	19:46:41	271	67,3	16,2	934,7
11/10/2010	19:46:43	270	68,3	16,2	934,7
11/10/2010	19:46:45	270	68	16,2	934,6
11/10/2010	19:46:47	270	67	16,2	934,6
11/10/2010	19:46:49	270	67,2	16,2	934,5
11/10/2010	19:46:51	270	68,1	16,2	934,5
11/10/2010	19:46:53	270	67,8	16,2	934,4
11/10/2010	19:46:55	270	68,5	16,2	934,4
Promedios		270,45	67,85	16,34	935,05
Desviación típica			1,08		

Tabla A. 6 Registro de datos P6.

P6 (hueco del limpiaparabrisas)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	20:05:47	248	60,8	16,1	935,4
11/10/2010	20:05:49	248	60,5	16,1	935,3
11/10/2010	20:05:51	249	60,3	16,2	935,3
11/10/2010	20:05:53	249	60,9	16,2	935,2
11/10/2010	20:05:55	249	61,4	16,2	935,2
11/10/2010	20:05:57	249	61,7	16,2	935,1
11/10/2010	20:05:59	249	61,8	16,2	935,1
11/10/2010	20:06:01	249	60,7	16,2	935
11/10/2010	20:06:03	249	58,3	16,3	934,9
11/10/2010	20:06:05	249	58,6	16,3	934,9
11/10/2010	20:06:07	249	59	16,3	934,9
11/10/2010	20:06:09	249	58,9	16,3	934,9
11/10/2010	20:06:11	249	59,7	16,3	934,9
11/10/2010	20:06:13	249	60,5	16,3	934,9
11/10/2010	20:06:15	249	61,9	16,2	934,9
11/10/2010	20:06:17	249	61,4	16,2	934,8
11/10/2010	20:06:19	249	61,3	16,2	934,8
11/10/2010	20:06:21	249	61,3	16,2	934,8
11/10/2010	20:06:23	249	59,9	16,3	934,8
11/10/2010	20:06:25	249	59,7	16,3	934,8
11/10/2010	20:06:27	249	59,2	16,3	934,7
11/10/2010	20:06:29	249	57,9	16,3	934,7
11/10/2010	20:06:31	249	58,1	16,3	934,6
11/10/2010	20:06:33	248	59	16,3	934,6
11/10/2010	20:06:35	248	58,6	16,3	934,5
11/10/2010	20:06:37	249	58,4	16,3	934,4
11/10/2010	20:06:39	249	59,4	16,3	934,5
11/10/2010	20:06:41	248	59,8	16,3	934,4
11/10/2010	20:06:43	248	61,2	16,3	934,4
11/10/2010	20:06:45	247	61,9	16,3	934,4
Promedios		248,90	60,43	16,23	935,00
Desviación típica			1,10		

Tabla A. 7 Registro de datos P7.

P7 (mitad luna delantera)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	20:20:59	242	61,1	16,4	929,6
11/10/2010	20:21:01	243	59,3	16,4	929,7
11/10/2010	20:21:03	243	61,6	16,4	929,8
11/10/2010	20:21:05	242	61,8	16,4	929,9
11/10/2010	20:21:07	242	61,3	16,4	930
11/10/2010	20:21:09	242	61,8	16,3	930,1
11/10/2010	20:21:11	241	61,4	16,3	930,2
11/10/2010	20:21:13	242	60,1	16,3	930,2
11/10/2010	20:21:15	242	58,6	16,2	930,3
11/10/2010	20:21:17	241	58,8	16,2	930,3
11/10/2010	20:21:19	241	58,8	16,3	930,3
11/10/2010	20:21:21	242	62,7	16,1	930,3
11/10/2010	20:21:23	242	62,7	16,1	930,3
11/10/2010	20:21:25	241	60,7	16,1	930,4
11/10/2010	20:21:27	242	60	16,1	930,4
11/10/2010	20:21:29	242	60,4	16,1	930,4
11/10/2010	20:21:31	242	59,5	16,2	930,4
11/10/2010	20:21:33	241	57,3	16,3	930,4
11/10/2010	20:21:35	241	61,3	16,2	930,5
11/10/2010	20:21:37	243	61,9	16,1	930,5
11/10/2010	20:21:39	242	61,5	16	930,5
11/10/2010	20:21:41	242	61,5	15,9	930,5
11/10/2010	20:21:43	242	62	15,9	930,5
11/10/2010	20:21:45	242	63,3	15,9	930,5
11/10/2010	20:21:47	242	60,9	15,9	930,5
11/10/2010	20:21:49	242	60,8	16	930,5
11/10/2010	20:21:51	242	61,5	16,1	930,5
11/10/2010	20:21:53	242	63,2	16,1	930,6
11/10/2010	20:21:55	241	64,4	16,1	930,6
11/10/2010	20:21:57	241	63,4	16,2	930,6
11/10/2010	20:21:59	242	60	16,3	930,6
11/10/2010	20:22:01	241	60,7	16,4	930,6
11/10/2010	20:22:03	241	61,9	16,4	930,5
11/10/2010	20:22:05	241	61,7	16,4	930,5
11/10/2010	20:22:07	242	60,7	16,5	930,5
Promedios		241,85	60,56	16,25	930,20
Desviación típica			1,47		

Tabla A. 8 Registro de datos P8.

P8 (mitad de la luna delantera)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	20:36:29	277	67,6	17,1	932,4
11/10/2010	20:36:31	278	67,1	16,9	932,2
11/10/2010	20:36:33	280	69,2	16,6	932,1
11/10/2010	20:36:35	280	68,5	16,6	932,1
11/10/2010	20:36:37	281	66,8	16,6	932
11/10/2010	20:36:39	282	69,5	16,6	931,9
11/10/2010	20:36:41	284	71,9	16,6	931,8
11/10/2010	20:36:43	284	65,7	16,7	931,8
11/10/2010	20:36:45	285	62,7	16,8	931,8
11/10/2010	20:36:47	285	60,1	16,8	931,9
11/10/2010	20:36:49	285	61,2	16,9	931,8
11/10/2010	20:36:51	285	64,1	16,9	931,8
11/10/2010	20:36:53	285	64,8	16,9	931,9
11/10/2010	20:36:55	285	65,8	16,8	931,9
11/10/2010	20:36:57	285	64,9	16,8	931,9
11/10/2010	20:36:59	284	66,6	16,8	931,9
11/10/2010	20:37:01	284	65,3	16,8	931,9
11/10/2010	20:37:03	284	64,6	16,9	931,8
11/10/2010	20:37:05	284	64,3	16,9	931,7
11/10/2010	20:37:07	284	65,3	16,9	931,5
11/10/2010	20:37:09	284	67,2	16,9	931,4
11/10/2010	20:37:11	282	68,5	16,7	931,3
11/10/2010	20:37:13	285	69	16,7	931,2
11/10/2010	20:37:15	285	69,2	16,7	931,1
11/10/2010	20:37:17	285	67,3	16,8	931,1
11/10/2010	20:37:19	285	68,7	16,9	931,1
11/10/2010	20:37:21	285	69,6	16,9	931,2
11/10/2010	20:37:23	286	70,9	17	931,3
11/10/2010	20:37:25	283	69	16,8	931,6
11/10/2010	20:37:27	283	69,6	16,8	931,5
11/10/2010	20:37:29	283	68,5	16,7	931,3
11/10/2010	20:37:31	283	67	16,7	931,1
11/10/2010	20:37:33	284	67,4	16,7	930,9
11/10/2010	20:37:35	285	68,5	16,7	930,5
11/10/2010	20:37:37	285	66,1	16,6	930,4
11/10/2010	20:37:39	284	66,3	16,7	930,4
Promedios		283,05	65,80	16,80	931,91
Desviación típica			2,80		

Tabla A. 9 Registro de datos P9.

P9 (final luna delantera)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	23:02:48	251	87,4	14,2	926,5
11/10/2010	23:02:50	251	90,1	14,2	926,5
11/10/2010	23:02:52	251	87,9	14,1	926,4
11/10/2010	23:02:54	250	88,4	14,1	926,3
11/10/2010	23:02:56	251	89,4	14	926,2
11/10/2010	23:02:58	251	87,6	13,9	926,1
11/10/2010	23:03:00	251	86,7	13,9	926,1
11/10/2010	23:03:02	251	89,2	14	926
11/10/2010	23:03:36	250	79,9	13,7	925,6
11/10/2010	23:03:38	250	82,8	13,8	925,7
11/10/2010	23:03:40	250	80	13,9	925,8
11/10/2010	23:03:42	251	79,4	13,9	925,8
11/10/2010	23:03:44	250	82,1	13,9	925,9
11/10/2010	23:03:46	251	81,7	13,9	926
11/10/2010	23:03:48	251	81,8	14	926,1
11/10/2010	23:03:50	250	80,6	14	926,1
11/10/2010	23:03:52	251	84,2	13,9	926
11/10/2010	23:03:54	251	85,1	14,1	926,4
11/10/2010	23:03:56	251	84,8	14,1	926,3
11/10/2010	23:03:58	250	85,4	14	926,5
11/10/2010	23:04:00	250	85,1	14,1	926,4
Promedios		250,65	84,73	13,98	926,12
Desviación típica			3,51		

Tabla A. 10 Registro de datos P11.

P10 (inicio techo panorámico)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	23:10:02	299	96,4	14,1	928,1
11/10/2010	23:10:04	299	96,5	14,1	928,2
11/10/2010	23:10:06	299	96,5	14	928,2
11/10/2010	23:10:08	299	96,5	13,9	928,2
11/10/2010	23:10:10	299	97,2	13,9	928,2
11/10/2010	23:10:12	300	97,2	13,9	928,1
11/10/2010	23:10:14	298	97,2	14	928
11/10/2010	23:10:16	299	92,7	14	927,9
11/10/2010	23:10:18	300	96,8	13,9	927,8
11/10/2010	23:10:56	298	96,6	14	927,9
11/10/2010	23:10:58	299	97	13,9	927,9
11/10/2010	23:11:00	299	97	13,9	928
11/10/2010	23:11:02	298	96,6	13,8	928,1
11/10/2010	23:11:04	299	96,4	13,9	928,2
11/10/2010	23:11:06	299	97	13,9	928,2
11/10/2010	23:11:08	299	97,2	13,9	928,1
11/10/2010	23:11:10	300	97,2	13,8	928
11/10/2010	23:11:56	299	97,4	13,9	927,9
11/10/2010	23:11:58	298	97,2	13,9	928,1
11/10/2010	23:12:00	298	96,8	14	927,9
11/10/2010	23:12:02	298	97,5	14,1	927,9
11/10/2010	23:12:04	299	97,3	14,1	927,8
11/10/2010	23:12:06	299	97,3	14,1	927,8
11/10/2010	23:12:08	300	97,2	14,1	927,9
11/10/2010	23:12:10	299	97,1	14,1	927,9
Promedios		298,90	96,67	13,94	928,05
Desviación típica			0,99		

Tabla A. 11 Registro de datos P12.

P11 (zona delantera del techo)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	23:17:52	319	93,5	14,1	927,4
11/10/2010	23:17:54	318	97,4	14	927,5
11/10/2010	23:17:56	319	97,3	13,9	927,4
11/10/2010	23:17:58	319	95,7	13,8	927,4
11/10/2010	23:18:00	319	96,6	13,8	927,3
11/10/2010	23:18:02	319	96,4	13,8	927,2
11/10/2010	23:18:04	319	96,5	13,8	927,2
11/10/2010	23:18:06	319	96	13,9	927,1
11/10/2010	23:18:08	319	92,3	14	927
11/10/2010	23:18:34	310	90,5	13,7	926,5
11/10/2010	23:18:36	316	92,3	13,9	926,8
11/10/2010	23:18:38	310	92,5	14	926,9
11/10/2010	23:18:40	310	92	13,9	927
11/10/2010	23:18:42	310	93,2	13,8	927,1
11/10/2010	23:18:44	311	93,1	13,8	927,2
11/10/2010	23:18:46	319	93,7	13,8	927,5
11/10/2010	23:18:48	319	94,7	13,8	927,4
11/10/2010	23:18:50	318	95,6	13,8	926,9
11/10/2010	23:18:52	319	96,1	13,8	927,4
11/10/2010	23:18:54	318	96,2	13,9	927,3
11/10/2010	23:18:56	319	96,1	13,7	927,2
11/10/2010	23:18:58	319	95,6	13,9	927,2
11/10/2010	23:19:00	319	96,4	13,9	927,3
Promedios		316,50	94,58	13,87	927,18
Desviación típica			2,05		

Tabla A. 12 Registro de datos P12.

P12 (zona media del techo)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	23:20:58	319	91,7	13,8	926,9
11/10/2010	23:21:00	320	92,1	13,9	927
11/10/2010	23:21:02	319	93,4	13,9	927,1
11/10/2010	23:21:04	320	92,7	13,9	927,2
11/10/2010	23:21:06	319	92,3	13,8	927,2
11/10/2010	23:21:08	319	93,1	13,8	927,3
11/10/2010	23:21:10	319	92,3	13,8	927,4
11/10/2010	23:21:12	319	92,6	13,9	927,5
11/10/2010	23:21:14	320	93,1	14	927,5
11/10/2010	23:21:40	320	90,8	14,1	927,6
11/10/2010	23:21:42	320	95,2	14,1	927,7
11/10/2010	23:21:44	319	96	13,9	927,7
11/10/2010	23:21:46	319	92,7	13,8	927,6
11/10/2010	23:21:48	319	91,9	13,8	927,6
11/10/2010	23:21:50	319	93	13,8	927,5
11/10/2010	23:21:52	320	93	13,8	927,4
11/10/2010	23:21:54	318	93,6	14	927,3
11/10/2010	23:21:56	318	92,9	13,9	927,2
11/10/2010	23:21:58	319	93,2	14,1	927,4
11/10/2010	23:22:00	319	92,9	13,8	927,5
11/10/2010	23:22:02	320	93,1	13,9	927,5
Promedios		319,20	92,93	13,90	927,38
Desviación típica			1,13		

Tabla A. 13 Registro de datos P13.

P13 (zona media del techo)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	23:25:10	333	93,1	14	928,9
11/10/2010	23:25:12	335	95,2	14	929
11/10/2010	23:25:14	335	94	13,9	929
11/10/2010	23:25:16	336	94,5	13,9	928,9
11/10/2010	23:25:18	335	94,7	13,8	928,8
11/10/2010	23:25:20	335	93,6	13,8	928,8
11/10/2010	23:25:22	334	94,5	14	928,7
11/10/2010	23:25:24	334	95,2	14	928,6
11/10/2010	23:25:52	334	89,9	13,8	928,1
11/10/2010	23:25:54	334	90,8	13,9	928,3
11/10/2010	23:25:56	335	92,3	13,9	928,6
11/10/2010	23:25:58	334	90,9	13,8	928,6
11/10/2010	23:26:00	335	90,8	13,8	928,7
11/10/2010	23:26:02	335	89,7	13,8	928,8
11/10/2010	23:26:04	335	87,4	13,8	928,8
11/10/2010	23:26:06	334	87,9	13,9	928,8
11/10/2010	23:26:08	335	88,5	14	928,9
11/10/2010	23:26:42	335	92,7	14,1	928,8
11/10/2010	23:26:44	336	94	13,9	928,9
11/10/2010	23:26:46	335	90,9	13,9	928,8
11/10/2010	23:26:48	335	90,8	13,9	928,7
11/10/2010	23:26:50	336	90,3	13,9	928,6
11/10/2010	23:26:52	334	89,2	14,1	928,5
11/10/2010	23:26:54	334	90,2	14,1	928,4
Promedios		334,70	92,03	13,90	928,74
Desviación típica			2,49		

Tabla A. 14 Registro de datos P14.

P14 (zona trasera del techo)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	23:30:44	347	86,6	13,9	928,9
11/10/2010	23:30:46	342	85,3	14	929
11/10/2010	23:30:48	345	87,4	14	929,1
11/10/2010	23:30:50	347	88,6	13,9	929,1
11/10/2010	23:30:52	346	87,3	13,8	929
11/10/2010	23:30:54	346	87,4	13,8	928,9
11/10/2010	23:30:56	347	88,5	13,8	928,9
11/10/2010	23:30:58	353	87,9	13,9	928,8
11/10/2010	23:31:00	344	88	13,9	928,7
11/10/2010	23:32:10	343	85,5	13,9	928,9
11/10/2010	23:32:12	343	87,8	14	929,2
11/10/2010	23:32:14	347	88,4	13,9	929,2
11/10/2010	23:32:16	347	86,7	13,8	929,1
11/10/2010	23:32:18	346	86,4	13,8	929
11/10/2010	23:32:20	346	86,3	13,8	928,9
11/10/2010	23:32:22	345	85,7	13,8	928,7
11/10/2010	23:32:24	344	84,8	13,9	928,7
11/10/2010	23:32:26	343	86,2	13,9	928,6
11/10/2010	23:32:28	345	86,4	13,9	929
11/10/2010	23:32:30	346	85,9	13,8	928,9
11/10/2010	23:32:32	346	86,3	13,8	928,7
Promedios		345,60	86,86	13,88	928,93
Desviación típica			1,13		

Tabla A. 15 Registro de datos P15.

P15 (zona trasera del techo)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	23:36:04	347	75,2	13,9	928,3
11/10/2010	23:36:06	346	74,9	14	928,3
11/10/2010	23:36:08	348	77,1	14	928,4
11/10/2010	23:36:10	348	77,5	13,9	928,3
11/10/2010	23:36:12	348	77,7	13,8	928,3
11/10/2010	23:36:14	348	77,3	13,8	928,1
11/10/2010	23:36:16	348	77,3	13,8	928,1
11/10/2010	23:36:18	347	78,3	13,9	928,1
11/10/2010	23:36:50	348	71,4	13,8	927,6
11/10/2010	23:36:52	347	70,7	13,8	927,7
11/10/2010	23:36:54	347	71,7	13,9	927,8
11/10/2010	23:36:56	347	72,1	13,8	927,9
11/10/2010	23:36:58	348	72,4	13,8	928,1
11/10/2010	23:37:00	348	71,9	13,8	928,1
11/10/2010	23:37:02	347	71	13,8	928,2
11/10/2010	23:37:04	348	70,6	13,9	928,1
11/10/2010	23:37:06	348	70,4	13,9	928,2
11/10/2010	23:37:08	348	71,2	13,9	928,1
11/10/2010	23:37:10	348	71,9	13,9	927,9
11/10/2010	23:37:12	348	71,4	13,9	928,1
11/10/2010	23:37:14	347	72,1	13,8	928,1
Promedios		347,60	73,60	13,87	928,09
Desviación típica			2,91		

Tabla A. 16 Registro de datos P16.

P16 (salida del techo)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	23:43:26	197	58,2	14	926,2
11/10/2010	23:43:28	186	61,7	14	926,3
11/10/2010	23:43:30	196	58,4	14,1	926,4
11/10/2010	23:43:32	196	56,2	14,1	926,5
11/10/2010	23:43:34	196	57,9	14,1	926,6
11/10/2010	23:43:36	196	58,5	14,1	926,7
11/10/2010	23:43:38	196	57,5	14	926,8
11/10/2010	23:44:48	195	57,2	13,9	926
11/10/2010	23:44:50	196	57,3	13,9	926,2
11/10/2010	23:44:52	201	56,6	13,9	926,3
11/10/2010	23:44:54	196	56	14	926,4
11/10/2010	23:44:56	196	55,1	14	926,5
11/10/2010	23:44:58	196	56	14	926,6
11/10/2010	23:45:00	196	57,3	14	926,8
11/10/2010	23:45:02	195	59	14	926,8
11/10/2010	23:45:04	194	57,9	14	926,8
12/10/2010	23:45:06	196	58,1	14,1	926,2
13/10/2010	23:45:08	196	57,8	14	926,3
14/10/2010	23:45:10	196	57,7	14,1	926,4
15/10/2010	23:45:12	195	57,9	14,1	926,6
16/10/2010	23:45:14	196	58,3	14,1	926,8
Promedios		195,55	57,62	14,02	926,47
Desviación típica			1,37		

Tabla A. 17 Registro de datos P17.

17 (maletero)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	0:13:26	204	10,1	13,8	926,2
11/10/2010	0:13:28	204	11,2	13,7	926,3
11/10/2010	0:13:30	204	10,8	13,8	926,4
11/10/2010	0:13:32	204	10,7	13,8	926,5
11/10/2010	0:13:34	204	12	13,9	926,6
11/10/2010	0:13:36	204	12,6	14,1	926,7
11/10/2010	0:13:38	205	12,1	14	926,8
11/10/2010	0:14:48	204	11,4	13,9	926
11/10/2010	0:14:50	204	10,5	13,9	926,2
11/10/2010	0:14:52	205	11,6	13,9	926,3
11/10/2010	0:14:54	205	13,3	14	926,4
11/10/2010	0:14:56	204	13,1	14	926,5
11/10/2010	0:14:58	204	12,9	13,9	926,6
11/10/2010	0:15:00	204	13,8	13,9	926,8
11/10/2010	0:15:02	204	13,9	13,9	926,8
11/10/2010	0:15:04	205	13,2	14	926,8
12/10/2010	0:15:06	205	13,4	14,1	926,2
13/10/2010	0:15:08	205	13	13,8	926,3
14/10/2010	0:15:10	204	12,2	14,1	926,4
15/10/2010	0:15:12	205	11,6	14,1	926,6
16/10/2010	0:15:14	204	12,7	14,1	926,8
Promedios		204,35	12,17	13,93	926,47
Desviación típica			1,15		

Tabla A. 18 Registro de datos P18.

P18 (final del maletero)					
Fecha	Hora	Dirección del viento	Velocidad del viento	Temperatura	Presión barométrica
	HH:MM:SS	Norte geográfico	km/h	°C	mb
11/10/2010	0:16:26	302	12,6	12,8	924,2
11/10/2010	0:16:28	302	12,5	12,7	924,3
11/10/2010	0:16:30	302	12,7	12,8	924,4
11/10/2010	0:16:32	301	12,8	12,8	924,5
11/10/2010	0:16:34	301	12,4	12,9	924,6
11/10/2010	0:16:36	301	15,2	13,1	924,7
11/10/2010	0:16:38	301	12,4	13	924,8
11/10/2010	0:17:48	302	12,9	12,9	924
11/10/2010	0:17:50	302	12,2	12,9	924,2
11/10/2010	0:17:52	302	10,7	12,9	924,3
11/10/2010	0:17:54	301	11,1	13	924,4
11/10/2010	0:17:56	300	12	13	924,5
11/10/2010	0:17:58	301	12,5	12,9	924,6
11/10/2010	0:18:00	301	13	12,9	924,8
11/10/2010	0:18:02	301	12,8	12,9	924,8
11/10/2010	0:18:04	301	12,9	13	924,8
11/10/2010	0:18:06	301	12,7	13,1	924,2
11/10/2010	0:18:08	301	13	12,8	924,3
11/10/2010	0:18:10	300	12,8	13,1	924,4
11/10/2010	0:18:12	300	12,3	13,1	924,6
11/10/2010	0:18:13	301	12,5	13,1	924,8
Promedios		301,15	12,58	12,93	924,47
Desviación típica			0,86		

Tabla A. 19 Tabla de la densidad del aire

DENSIDAD DEL AIRE					
Posición	Presión barométrica	Presión barométrica	Temperatura	Densidad del aire	Densidad del aire
	Pa	KPa	°C	kg/m ³	kg/m ³
				Ecuación 5.6	Ecuación 5.8
P1	93022	93,022	16,82	1,11756	1,11757
P2	93043	93,043	16,82	1,11781	1,11782
P3	93361	93,361	16,31	1,12361	1,12362
P4	93435	93,435	15,77	1,12660	1,12661
P5	93505	93,505	16,34	1,12522	1,12524
P6	93500	93,5	16,23	1,12559	1,12560
P7	93020	93,02	16,25	1,11974	1,11975
P8	93191	93,191	16,8	1,11967	1,11968
P9	92612	92,612	13,98	1,12364	1,12365
P10	92805	92,805	13,94	1,12614	1,12615
P11	92718	92,718	13,87	1,12536	1,12537
P12	92738	92,738	13,9	1,12548	1,12549
P13	92874	92,874	13,9	1,12713	1,12714
P14	92893	92,893	13,88	1,12744	1,12745
P15	92809	92,809	13,87	1,12646	1,12647
P16	92647	92,647	14,02	1,12391	1,12392
P17	92647	92,647	13,93	1,12426	1,12427
P18	92447	92,447	12,93	1,12575	1,12577
			14,97555556	1,12396	1,12398

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{P}{R \cdot T}$$

Ecuación 5.6

$$\rho_{\text{aire}} = 1.225 \cdot \left(\frac{P_r}{101.325} \right) \cdot \left(\frac{288.15}{273.15 + T_r} \right) \left(\text{kg/m}^3 \right)$$

Ecuación 5.8

ANEXO II

(Posiciones de medida)

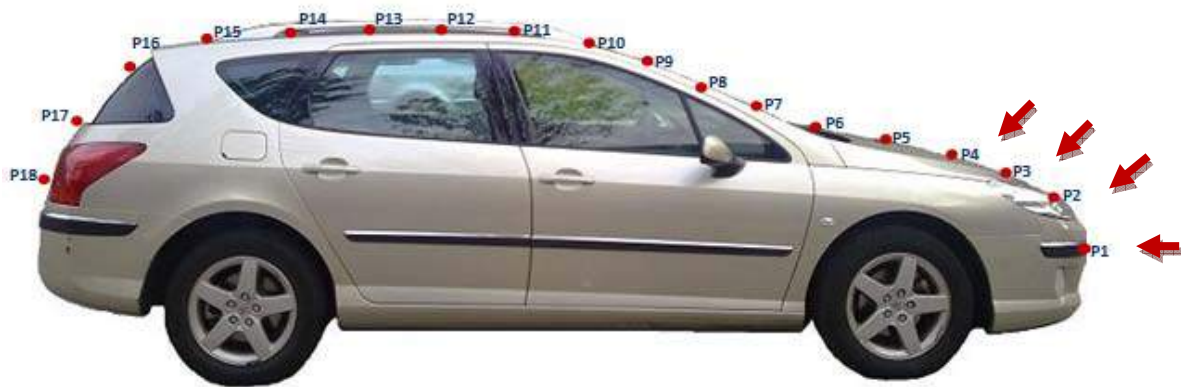


Figura A. 1 Esquema de las posiciones de ensayo. Desde P1 a P4.



Figura A. 2 P1



Figura A. 3 P2



Figura A.4 P3



Figura A. 4 P4



Figura A. 5 Esquema de las posiciones de ensayo. Desde P5 a P8.



Figura A. 6 P5



Figura A. 7 P6



Figura A. 8 P7



Figura A. 9 P8

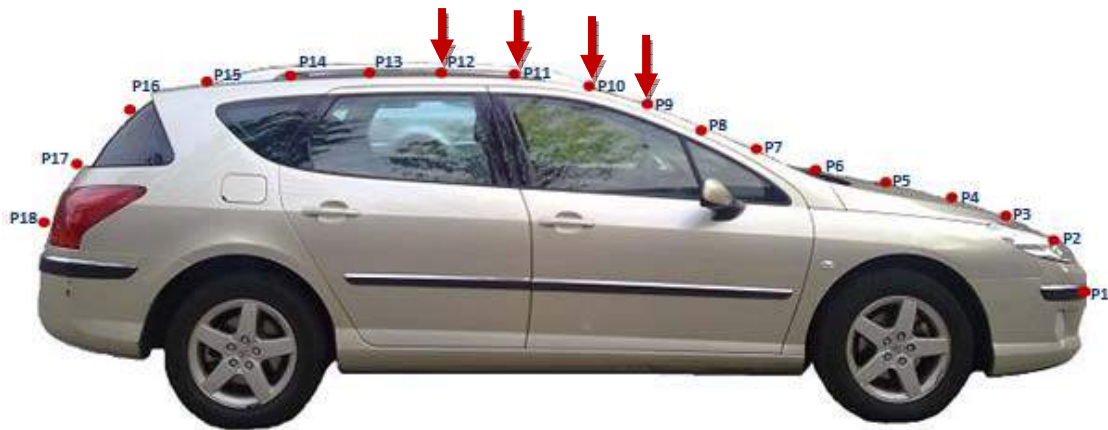


Figura A. 10 Esquema de las posiciones de ensayo. Desde P9 a P12.



Figura A. 11 P9



Figura A. 12 P10



Figura A. 13 P11



Figura A. 14 P12

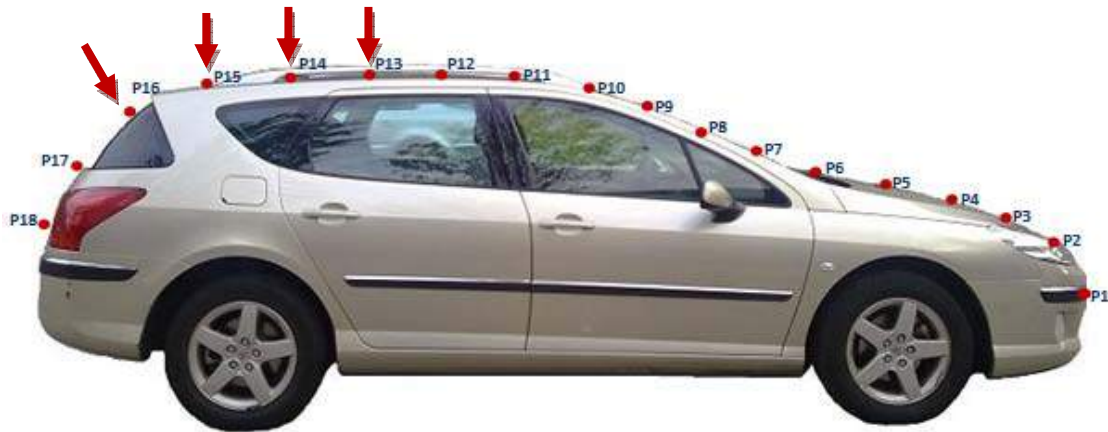


Figura A. 15 Esquema de las posiciones de ensayo. Desde P13 a P16.



Figura A. 16 P13

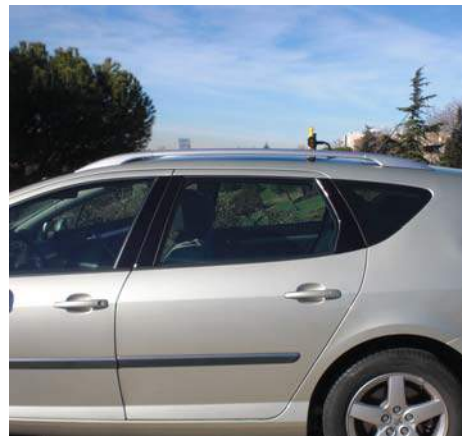


Figura A. 17 P14

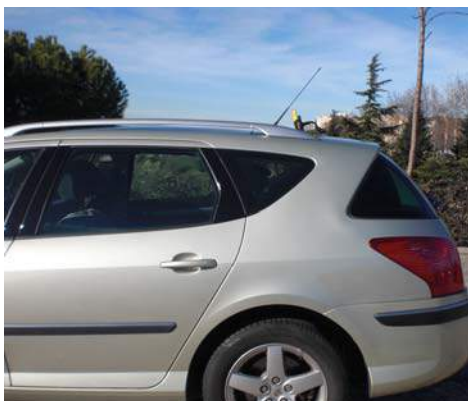


Figura A. 18 P1

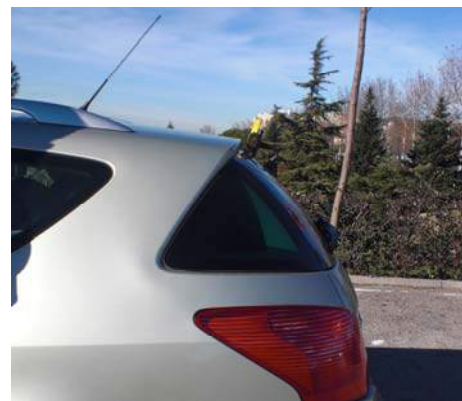


Figura A. 19 P16

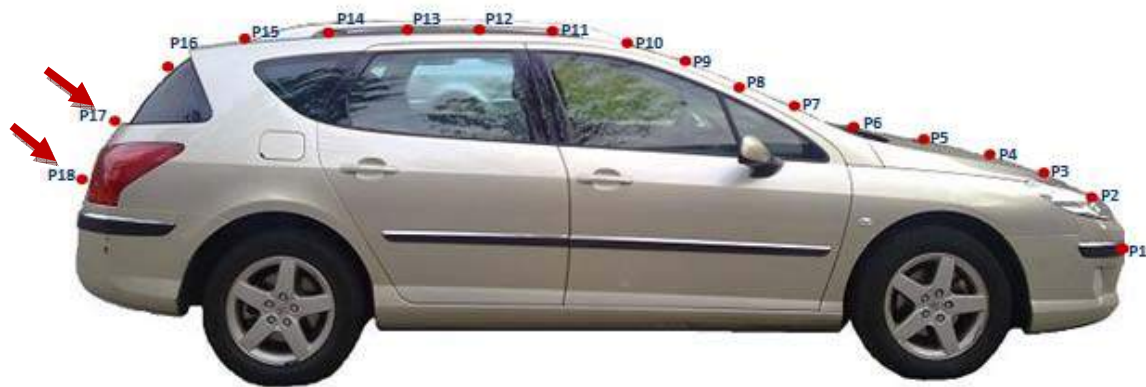


Figura A. 20 Esquema de las posiciones de ensayo. Desde P17 a P18.



Figura A. 21 P17



Figura A. 22 P18

Bibliografía

- [1] Aparicio Izquierdo, F. / Vera Álvarez, C. / López Díaz V. (1995). *“Teoría de los vehículos automóviles”*, cap.2, cap.3, cap.4. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Madrid.
- [2] Font Mezquita, J. (1997). *“Tratado sobre automóviles, Tomo IV: la dinámica del automóvil”*, cap.5. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- [3] Cypr, A. / Beer, A. / Bauer, A. (1996) *“Manual de la Técnica del Automóvil”*, cap. “Dinámica del automóvil”, BOSCH, Ed. REVERTÉ. Düsseldorf.
- [4] Font Mezquita, J. / De la Rosa Parras, J.C. (1991). *“Influencia del viento lateral en la seguridad del vehículo”*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ing. Mecánica y de Materiales. Valencia.
- [5] Nielsen-Kellerman, *“Manual de Instrucciones para los modelos Kestrel 4500 y Kestrel 4500 NV”*, versión: 4.15 ALL. USA: Boothwyn.
- [6] Universidad de Oviedo (2003), *“Simulación numérica de flujos (CDF)”*, Departamento de Energía, Área de Mecánica de Fluidos, E.P.S. de Ingeniería de Gijón. Gijón.
- [7] Universidad de Oviedo (2008), *“Capa límite”*, Área de Mecánica de Fluidos, E.P.S. de Ingeniería de Gijón. Gijón.
- [8] Medrano, D. (Revisión diciembre 2010), Mecánica de fluidos. *“Teoría de la capa límite Sustentación y arrastre”*.
<http://www.monografias.com/trabajos82/teoria-capa-limite-sustentacion-arrastre/teoria-capa-limite-sustentacion-arrastre2.shtml>
- [9] Roger Farrarons, R., (noviembre 2010), *“Túnel de viento (I)”*, rev. Enero 2011.
<http://www.f1aldia.com/10650/tuneles-de-viento-i/>
- [10] Briet, T. (Marzo 2010), *“Diseño de un túnel de viento”*, rev. enero 2010.
http://www.tecnica1.es/UserFiles/File/articulos/2010/27-marzo/tunel_de_viento.pdf

-
- [11] Juan de la Cierva, (Marzo 2008), “*Capa límite*”, rev. enero 2010
 - <http://juandelacuerva.blogspot.com/2008/03/capa-lmite.html>
 - [12] LMNO Engineering, rev. octubre 2010. Cálculo de la viscosidad del aire.
<http://www.lmnoeng.com/Flow/GasViscosity.htm>
 - [13] Centro Español de Metrología. (2007) Unidades del Sistema Internacional, rev. oct. 2010.
http://www.cem.es/cem/es_ES/metrologia/sistemaunidades_basicas.jsp?op=sistemaunidades_basicas
 - [14] Página comercial de Peugeot. Rev. oct. 2010
<http://www.peugeot.com>
 - [15] Página oficial de la NOAA, para el cálculo del ángulo de declinación. Rev. oct. 2010
<http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/struts/calcDeclination>