

# Modelación del flujo de aire alrededor de automóviles para la determinación de las fuerzas "lift" y "drag" por medio de elementos finitos

## Modeling of the air flow around automobiles for the determination of forces lift and drag by means of finite elements

### **WILSON RODRÍGUEZ CALDERÓN**

Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, Especialista en Gerencia Integral de Obras, Escuela de Ingenieros Militares, Magíster en Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, director de los grupos de investigación: Informática y Métodos Matemáticos (registrado en Colciencias) y Simulación y Control Numérico "SICON" (reconocido por Colciencias). Profesor investigador de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C.  
wilroca50@hotmail.com

### **MYRIAM ROCÍO PALLARES MUÑOZ**

Ingeniera Civil, Universidad Industrial de Santander, Magíster en Métodos Numéricos para Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña  
mrocio03@hotmail.com

Fecha de recepción: mayo 02 de 2005

Clasificación del artículo: investigación  
Fecha de aceptación: junio 27 de 2005

**Palabras clave:** elementos finitos, simulación numérica, turbulencia.

**Key words:** finite elements, numeric simulation, turbulence.

### **RESUMEN**

Este trabajo ilustra una aplicación de simulación numérica en el análisis de un problema típico de flujo de fluidos de solución compleja. El problema de flujo de aire alrededor de automóviles es significativo en el diseño de formas adecuadas que generen la menor resistencia posible al choque o fricción con el aire y la menor fuerza vertical o de sustentación que permita una mayor adherencia del auto al suelo. Existen varias maneras de modelar el flujo de aire sobre los contornos de los autos; en este trabajo se quiso aprovechar la versatilidad y complejidad del

módulo de flujo de fluidos *FLOTRAN* de *ANSYS*<sup>1</sup>, para caracterizar las dos condiciones de flujo que exhibe este problema en particular (el punto de desprendimiento del aire crea un límite que divide el dominio en dos zonas muy definidas, en las cuales las condiciones de flujo cambian drásticamente). Arriba de esta frontera, se genera flujo laminar –hipótesis de flujo potencial–, y debajo de

<sup>1</sup> Para la implementación del modelo se empleó el programa comercial de elementos finitos *ANSYS*, con las restricciones propias de la capacidad del paquete en su versión educativa.

ella se produce un fenómeno complejo con turbulencias y bajas velocidades, en el cual la teoría de flujo potencial no se satisface; de esta forma, se realiza un análisis global del fenómeno, que sólo paquetes robustos como ANSYS pueden lograr con fidelidad.

## ABSTRACT

This work illustrates an application of numerical simulation in the analysis of flow of a typical problem of flow of complex solution. The problem of air flow around automobiles is significant in the design of suitable forms that generate the smaller possible resistance to the shock or friction with the air and the smaller vertical force or of sustentation that allow a greater adhesion of the car to the

ground. Several ways exist to model the air flow on the contours of the cars; in this work it was wanted to take advantage of the versatility and complexity the module of flow of fluid FLOTRAN of ANSYS, to characterize the two conditions of flow that exhibits each problem in individual (the burble point of the air creates a limit that divides the dominion in two zones very defined, in which the conditions of flow change drastically). It arrives of this border is generated laminar flow - hypothesis of potential flow -, and underneath her takes place a complex phenomenon with turbulences and losses speeds, in which the theory of potential flow is not satisfied; of this form a global analysis of the phenomenon is made, that single robust packages as ANSYS can obtain with fidelity.

\*\*\*\*\*

## 1. Introducción y antecedentes

Muchos problemas actuales de ingeniería física necesitan resolverse utilizando métodos numéricos aplicados a las ecuaciones de la mecánica de fluidos. Pese a las severas simplificaciones impuestas a las hipótesis de partida, muchos casos prácticos se solucionaron en forma satisfactoria gracias a la gran capacidad de cálculo de los computadores modernos. De tiempo atrás, los altos costos de los ensayos experimentales ha motivado el estudio de las posibilidades de los métodos de cálculo; la mayor parte de los desarrollos se concentraron en el empleo de métodos de diferencias finitas y de la técnica asociada de volúmenes finitos. Sólo en los últimos años se ha advertido el potencial ofrecido por el método de elementos finitos, campo que se viene desarrollando con rapidez.

Una de las principales ventajas de utilizar la aproximación por elementos finitos, es su gran capacidad para ajustar geometrías complejas y permitir un refinamiento local en los lugares del modelo en que se hace necesario. Sin embargo, la mejora en la solución es también muy importante, ya que en general, en los problemas prácticos se precisa de una discretización en tres dimensiones, con un número de grados de libertad mucho mayor que en problemas típicos de estructuras (son usuales en dichos casos de  $10^5$  a  $10^6$  grados de libertad). Lo anterior indica que los problemas de flujo de

gases usualmente son de gran envergadura, por lo cual los métodos de solución directa son inadecuados e impracticables y se utilizan preferiblemente métodos iterativos.

Los problemas que presenta el flujo de gases a gran velocidad tienen una clara importancia práctica. Entre los más destacados se encuentran los aerodinámicos, en los que un cuerpo debe moverse dentro de un fluido, siendo éste mayoritariamente el aire; también puede darse el caso en que el cuerpo está detenido y alrededor de él circula aire. Ejemplos de estos problemas son el cálculo de flujo alrededor de automóviles, trenes, aviones, o en general cualquier medio de transporte (también el caso de estructuras civiles sometidas a fuerzas del viento: edificios, torres de enfriamiento, tanques, etc.). En todo caso, se trata de modelizar el flujo de aire para obtener las fuerzas de resistencia al avance, sustentación y/o fuerzas y momentos de diseño.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Variable fundamental en los problemas de fluidos

En mecánica de fluidos la variable fundamental es la velocidad, de la misma forma que en mecánica de sólidos lo es el desplazamiento y en problemas térmicos la temperatura. Se trata de una variable vectorial que puede ser designada mediante sus

componentes en las direcciones  $x, y, z$ , denotadas respectivamente como  $u, v, w$ ; en ocasiones por  $u_x, u_y, u_z$  o también  $u_i$ , con  $i = 1, 2, 3$ . Asimismo, las coordenadas de un punto podrían ser  $x, y, z$  o  $x_1, x_2, x_3$ . En mecánica de fluidos generalmente se hace referencia al valor de velocidad en un punto del espacio y no a la velocidad de una partícula; es lo que se conoce como una formulación *euleriana* o formulación espacial, contraria a la formulación *lagrangiana* o material.

## 2.2 Simplificaciones de las ecuaciones de fluidos

Las ecuaciones para fluidos laminares compresibles, viscosos y transitorios pueden ser simplificados para casos particulares, en los cuales algunas de las variables son despreciables frente a otras, hasta llevarlas al caso más sencillo de flujo potencial estacionario.

### 2.2.1 Fluidos estacionarios

La primera simplificación es considerar el caso estacionario, es decir, cuando el movimiento del fluido se ha desarrollado por completo y, si bien sigue en movimiento, las velocidades y demás variables en un punto del espacio no cambian con el tiempo. Es de notar que, a diferencia de los problemas estructurales, y aunque el problema sea estacionario, la variable tiempo siempre está implícita en las ecuaciones de la mecánica de fluidos. Efectivamente, las variables velocidad y aceleración no tienen significado sin la variable tiempo. La velocidad y la aceleración no son nulas en los problemas estacionarios, pero su valor es constante para un punto en el espacio.

### 2.2.2 Fluidos incompresibles

Quizá los tipos de fluidos más estudiados en problemas de ingeniería sean los incompresibles. Esto se debe a que en casi la totalidad de las aplicaciones, el agua se comporta como fluido incompresible; además, a velocidades relativamente bajas el aire se comporta como incompresible. La experimentación práctica indica que hasta  $Mach^2$

$\leq 0,3$  la diferencia entre considerar el flujo compresible o incompresible es mínima. Teniendo en cuenta que a presión y temperatura normal el aire tiene una velocidad del sonido del orden de 1.000 km/hora, pueden estudiarse como fluidos incompresibles problemas de aerodinámica de automóviles, trenes y otros vehículos de transporte, hasta velocidades de 300 km/hora. La característica principal de los fluidos incompresibles se expresa como  $\rho = cte$ , y sólo se tienen en cuenta las ecuaciones de conservación de masa y de momento, que junto con la condición de estacionariedad, constituyen en sí mismas las ecuaciones de *Navier Stokes*, en las que las principales constantes físicas que intervienen son la densidad  $\rho$  y la viscosidad  $\mu$ , que pueden relacionarse en función del número adimensional, *Reynolds*<sup>3</sup>.

*Ecuaciones de Navier Stokes*

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad -\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij}) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i = 0$$

*Conservación de masa*                      *Conservación de momento*<sup>(1)</sup>

Las ecuaciones de *Navier Stokes* pueden simplificarse para dos casos extremos: a) cuando las fuerzas viscosas son despreciables frente a las fuerzas de inercia, esto es, para grandes números de *Reynolds*; b) cuando las fuerzas viscosas son preponderantes, lo cual ocurre a bajos números de *Reynolds*.

### 2.2.3 Fluidos inviscidos

Para altos números de *Reynolds*, es decir, cuando las fuerzas viscosas son despreciables frente a las demás, todos los términos de corte ( $\tau_{ij}$ ) de la ecuación de momento de *Navier Stokes* pueden despreciarse, quedando reducidas a lo que se conoce como *ecuaciones de Euler*,

<sup>2</sup> Mach es el cociente entre la velocidad del fluido y la velocidad del sonido en el mismo,  $Mach = |u|/c$ .

<sup>3</sup>  $Re = \rho L/\mu$ , donde L es una dimensión característica del problema.

*Ecuaciones de Euler*

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad -\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i = 0 \quad (2)$$

Para fluidos inviscidos incompresibles, estas ecuaciones suelen utilizarse para  $Re > 1.000$ , o mejor aún,  $Re > 10.000$ ; no obstante, su utilización en la práctica no es muy frecuente por dos motivos: a) porque en la realidad los fluidos con  $Re > 10.000$  suelen comportarse en forma turbulenta; por tanto, esta teoría deja de tener aplicación para fluidos laminares, salvo que se introduzcan modificaciones que tengan en cuenta la viscosidad turbulenta; b) la gran mayoría de los fluidos inviscidos cumplen con una condición matemática llamada "de irrotacionalidad"<sup>4</sup>, la cual simplifica considerablemente las ecuaciones; por consiguiente, si el fluido además de ser inviscido es irrotacional, conviene utilizar la simplificación. Sin embargo, si bien es cierto que un fluido irrotacional debe ser inviscido, lo contrario no es cierto.

#### 2.2.4 Flujo potencial

La mayor simplificación que puede introducirse en las ecuaciones de la mecánica de fluidos es para el caso de flujo de fluidos estacionario, incompresible, inviscido y además irrotacional. La condición de irrotacionalidad se da para el caso de fluidos no viscosos. Efectivamente, la viscosidad del fluido introduce en él la condición contraria, es decir, la rotacionalidad. Un fluido que al ingresar a un dominio es irrotacional, continuará siéndolo salvo que haya una zona viscosa que le cambie esta condición; ésta puede ser una zona del dominio en la cual la velocidad sea muy grande y por tanto el  $Re$  sea pequeño; también ciertas geometrías especiales como el borde de fuga<sup>5</sup> de un ala de avión pueden

<sup>4</sup> La condición de irrotacionalidad se escribe matemáticamente como,

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_i} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

<sup>5</sup> El borde de fuga bien determinado, con un ángulo suficientemente agudo, hace que el desprendimiento del fluido se produzca precisamente ahí, en el punto de fuga.

introducir una zona viscosa capaz de eliminar la irrotacionalidad del fluido. Pese a estas limitaciones, la simplicidad del tratamiento de las ecuaciones de flujo irrotacional justifica que en muchos casos prácticos se considere al fluido como tal. Un fluido irrotacional puede obtenerse con facilidad a partir de una función potencial. Por ejemplo, sea  $\varphi = \varphi(x, y, z)$  una función continua en todo el dominio; si se expresan las componentes del campo de velocidades, como:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (3)$$

es fácil observar que la velocidad obtenida cumple con la condición de irrotacionalidad. Ahora, en función del potencial, la ecuación de incompresibilidad se reduce a:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) = \nabla^2 \varphi = 0 \quad (4)$$

El problema puede solucionarse en forma desacoplada para la función  $\varphi$ . Inicialmente se halla una función  $\varphi$  cuyo laplaciano sea cero y las condiciones de contorno adecuadas; después, por derivación, se calcula la velocidad y posteriormente la presión. Evaluada la presión en los puntos de interés, la resistencia al avance o arrastre (*drag*) y las fuerzas verticales o de sustentación (*lift*) de la geometría a estudiar, por integración de la propia presión sobre la geometría se pueden calcular:

$$Drag = \int_{\Gamma} p l d\Gamma \quad Lift = \int_{\Gamma} p m d\Gamma \quad (5)$$

donde  $l$  y  $m$  son los cosenos directores de la normal exterior a la superficie  $\Gamma$ .

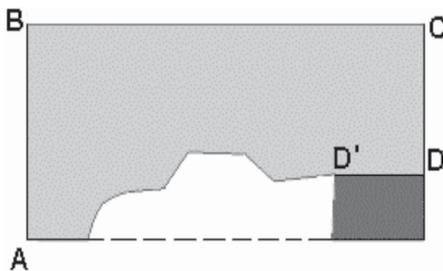
#### 2.2.5 Límites de aplicación de flujo potencial

La teoría de flujo potencial y su solución numérica se utiliza en gran variedad de problemas de ingeniería. Su simplicidad y bajo costo computacional hacen imprescindible su utilización en casi todos los problemas de fluidos aunque solo sea una primera

aproximación. Sin embargo, sus limitaciones son muy grandes y su incorrecta utilización puede generar valores erróneos. En el caso objeto de estudio en este artículo, que representa la forma de un automóvil, el dominio sobre el cual se puede suponer la hipótesis de flujo potencial comprende desde la línea **A-D** hacia arriba. El punto indicado con **D'**, en la figura 1, representa el lugar en el cual termina el vehículo conocido como punto de desprendimiento. En la parte inferior a la línea **D'-D** se produce un fenómeno complejo, con turbulencias y bajas velocidades en las cuales la teoría de flujo potencial no se satisface. Si la zona inferior a la línea **D'-D** se incorpora al estudio se obtendrían resultados erróneos en esa zona, incluso en el valor del *drag*.

La evaluación del punto de desprendimiento es fácil de determinar en algunos casos (como en el automóvil de la figura 1) pero difícil en otros. En el modelo aquí expuesto, por ejemplo, el punto de desprendimiento **D'** está determinado por el extremo del alerón trasero; en otros casos, este puede variar con la velocidad y para su determinación se utilizan otras teorías conocidas, como la "teoría de la capa límite".

Figura 1. Configuración del problema



**2.3 Análisis de flujo en régimen estable con ANSYS**

Dentro de sus aplicaciones el *ANSYS Flotran Analysis* contempla el análisis de flujo en régimen estacionario (*steady state flow analysis*). Un análisis de este tipo calcula los efectos de los perfiles de velocidad externos, comunes en problemas de aerodinámica, o los efectos de los perfiles de velocidad internos, típicos en problemas de turbo-

maquinaria. Por medio del análisis se determinan los parámetros de la solución del problema, es decir, las velocidades y las presiones en el dominio discretizado.

Habitualmente, la mecánica de fluidos computacional hace un planteamiento del problema con mallas eulerianas, en las que aparece en las ecuaciones el

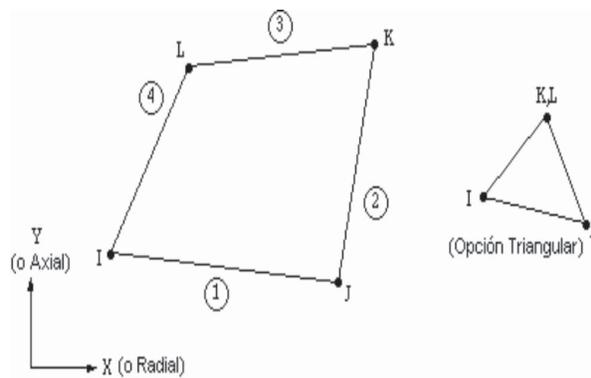
$$\text{denominado término convectivo, } u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}.$$

Este término hace que el problema resuelto con mallas eulerianas siempre sea no lineal y deba ser resuelto iterativamente, *incluso cuando las propiedades de los materiales son constantes.*

**2.3.1 Elemento fluid141 (fluid thermal- 2d)**

El elemento *FLUID141* es un elemento plano con capacidad de conducción térmica que puede formarse con tres o cuatro nodos. Los grados de libertad del elemento son la velocidad y la presión, y las propiedades del material son isotrópicas. El elemento se emplea en análisis de flujo de calor estacionario 2D o transitorio; se utiliza para desarrollar modelos de flujo compresible e incompresible, laminar o turbulento.

Tabla 1. Descripción de los datos de entrada del elemento FLUID141



Nombre: PLANE42
Nodos: I, J, K, L
Grados de libertad: Vx, Vy, presión
Propiedades del material: densidad y viscosidad

### 2.4 Organización del programa

El programa ANSYS está organizado en dos niveles básicos: entrada y procesamiento (o nivel de rutinas). El nivel de entrada actúa como una puerta dentro y fuera del programa y se usa para el control global del programa; en el nivel de procesamiento están disponibles varios procesadores, cada uno constituido por un conjunto de funciones que hacen una tarea del análisis específica. Así, en el preprocesador general (/PREP7), se construye el modelo paramétricamente (geometría, materiales, acoplamiento y restricciones a los grados de libertad), en el procesador de solución (/SOLU), se aplican las cargas y se obtiene la solución del problema, y en el posprocesador general (/POST1), se evalúan los resultados sobre todo el modelo en puntos específicos.

### 3. Planteamiento y datos del problema

#### 3.1 Descripción del problema

El problema consiste en hallar la distribución de velocidades y presiones que ejerce el aire al circular alrededor de un objeto bidimensional (como la idealización del automóvil de la figura 1), por medio de la construcción de un modelo de elementos finitos 2D, utilizando el módulo de fluidos *FLOTRAN* del programa comercial de elementos finitos *ANSYS*. La solución incluye determinar la curva de presiones alrededor del auto y el perfil de velocidades en la zona posterior de la cabina, en la cual se presentan turbulencias marcadas a medida que aumenta la velocidad del vehículo.

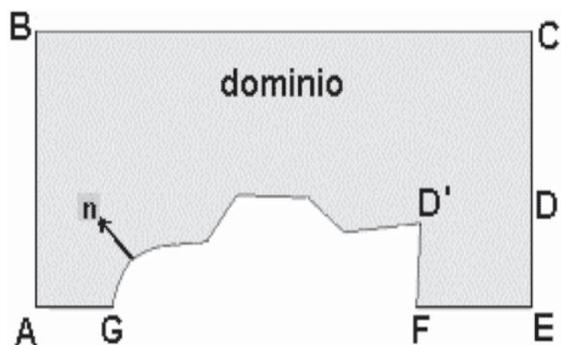
#### 3.2 Geometría del problema

La figura 2 esquematiza la geometría del dominio del problema y representa la forma de un automóvil (línea GD'F). La frontera GABCEF particulariza el dominio de flujo adecuado para la correcta modelación del fenómeno.

#### 3.3 Condiciones de contorno

1) Sobre la cara AB:  $\frac{\partial \varphi}{\partial x} = u$  = velocidad del vehículo (se especifica un perfil uniforme de veloci-

Figura 2. Dominio del problema



dad horizontal, equivalente a la velocidad del auto).

2) Sobre la frontera AGD'FE:  $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$  (se declara velocidad normal nula).

3) Sobre la cara superior BC:  $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$  (se especifica velocidad vertical cero).

4) Sobre la cara posterior CE:  $\varphi = 0$  (se define presión cero).

En las condiciones de contorno se ha supuesto que:

- Las caras AB y BC están suficientemente alejadas del objeto a estudiar, de tal forma que el flujo no esté perturbado
- La condición impuesta sobre la cara CE es en cierta medida arbitraria; podría haberse impuesto  $\varphi = \text{cte.} \neq 0$  con idéntico resultado. Esto está indicando la independencia del campo de velocidades y del fluido en general, del valor en sí de la función potencial; solo depende de las derivadas de  $\varphi$ . De otra parte y por la misma razón, es necesario imponer en algún punto del dominio un valor de  $\varphi$  para que el problema no quede indeterminado. La condición de  $\varphi = \text{cte}$  sobre la pared CE

implica, además, que  $\frac{\partial \varphi}{\partial y} = v = 0$  sobre esta

pared, suponiendo que el fluido ya se encuentra horizontal sobre la misma.

### 3.4 Datos de entrada del problema

- Velocidad de entrada del auto: 20 y 120 km/hora
- Densidad del aire:  $12,93 \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$
- Viscosidad del aire:  $1,8214\cdot 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2$

### 3.5 Discretización del dominio

El dominio del problema se discretizó con elementos tipo *FLUID141* de la librería de elementos del programa *ANSYS*. En la figura 3 se ilustra este dominio discretizado con cierto grado de refinamiento en la zona de mayor interés, es decir, el perfil que representa el vehículo. Para el desarrollo de este trabajo se utilizó la versión educativa del programa, con la restricción en el número de elementos que ello supone; aunque del grado de refinamiento dependen los resultados, con la utilización de esta versión se lograron resultados satisfactorios para efectos académicos.

### 3.6 Solución y posproceso

Para la solución del problema se utilizó el módulo de fluidos *FLOTRAN* de *ANSYS* que se basa en la aplicación de algoritmos iterativos. En el posproceso se hizo la verificación de los resultados de velocidad y presión, por medio de la interfase gráfica del programa (visualización vectorial del campo de velocidades, isocontornos de velocidad y presión y movimiento de las partículas a través de las líneas de corriente, entre otras).

Además, el estudio de los perfiles de presión alrededor del automóvil permitió determinar la

resistencia al avance (*drag*) y las fuerzas verticales o de sustentación (*lift*). Estas fuerzas se calcularon por medio de integración numérica de la propia presión sobre la geometría de la cabina.

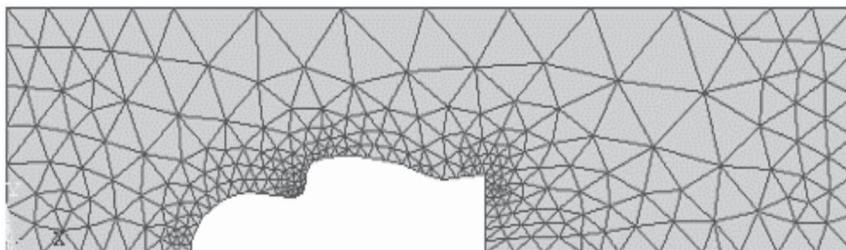
## 4. Resultados y discusión

Los resultados más interesantes corresponden a la distribución de flujo y presión sobre el contorno que representa la superficie del auto. Asimismo, el cálculo de las fuerzas de arrastre (*drag*) y de sustentación (*lift*) obtenido mediante integración numérica sobre el perfil, derivó en un ejercicio bastante interesante.

La versatilidad y complejidad del módulo de flujo de fluidos *FLOTRAN* de *ANSYS* permitió caracterizar las dos condiciones de flujo de este problema y facilitó un análisis global del fenómeno. Lo que ocurre es que el punto de desprendimiento del aire en el auto crea un límite que divide el dominio en dos zonas, en las cuales las condiciones de flujo cambian drásticamente. Arriba de la frontera existe flujo laminar y allí las hipótesis de flujo potencial son válidas; por debajo de ella se produce un fenómeno complejo con turbulencias y bajas velocidades y la teoría de flujo potencial no se satisface.

Luego, empleando las herramientas de posproceso como isocontornos, campos vectoriales, líneas de corriente y perfiles, se obtuvieron conclusiones importantes de este análisis. Los modelos fueron realizados a velocidades de 20 y 120 kph; esto permitió observar cambios significativos de comportamiento con la velocidad (generación de fenómenos de tur-

**Figura 3.** Discretización del dominio (malla elementos finitos FLUID141)

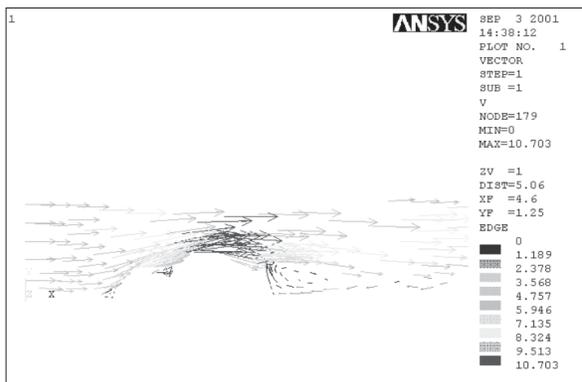


bulencia en la zona posterior del modelo a medida que aumenta la velocidad del vehículo).

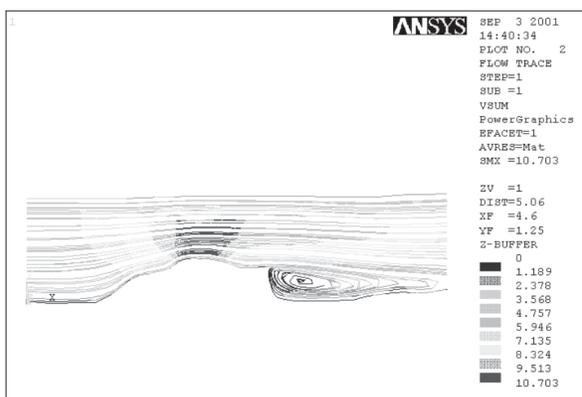
**4.1 Análisis del problema con velocidad de 20 kph**

En el campo de velocidades ilustrado en la figura 4, se distingue un cinturón de turbulencia localizado en la parte posterior del vehículo. Las líneas de corriente de la figura 5 permiten diferenciar la trayectoria de las partículas, y al igual que en el esquema vectorial de la figura 4, se identifica allí un área de turbulencia o de remolinos denominada comúnmente *cono de succión*; su aparición es fundamental a velocidades significativamente altas.

**Figura 4.** Campo de velocidad ( $v = 20$  kph)



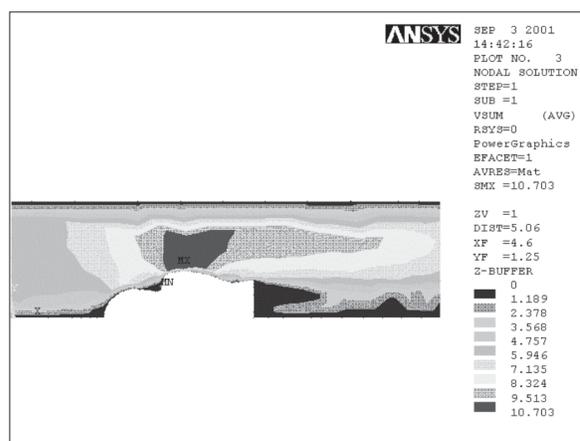
**Figura 5.** Líneas de corriente ( $v = 20$  kph)



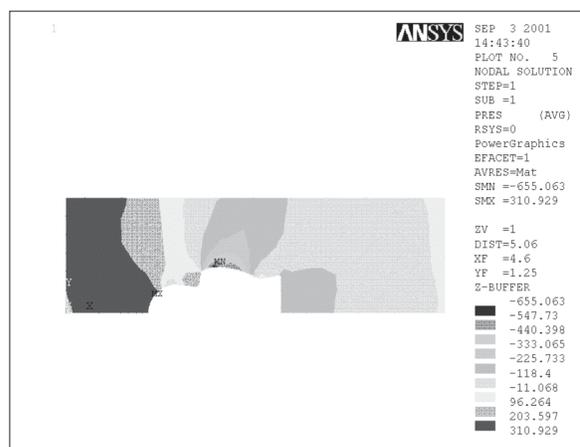
A partir de los isocontornos de velocidad presentados en la figura 6 se concluye que las mayores velocidades del flujo de aire se presentan justo en la región más alta de la cabina (franja de color negro). De los

isocontornos de presión mostrados en la figura 7 puede advertirse una ligera succión en la parte superior del auto, justo donde se presenta la mayor velocidad; también puede notarse la succión presentada en la parte posterior del auto. Este fenómeno de succión se incrementa con la velocidad del vehículo que en el caso de carreras de automovilismo es aprovechado para adelantar empleando menos energía que en una situación normal, logrando así optimizar la potencia de los motores.

**Figura 6.** Isocontornos de velocidad ( $v = 20$  kph)



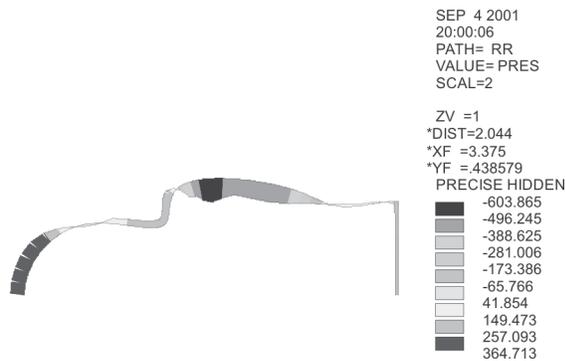
**Figura 7.** Isocontornos de presión ( $v = 20$  kph)



En el análisis del perfil de presiones de la figura 8 se evidencian esfuerzos de compresión en la región delantera (exceptuando una pequeña succión en la zona en que cambia abruptamente la pendiente del

perfil del auto), succiones mayores en la región superior y menores en la parte posterior del vehículo. Es importante observar la pequeña compresión generada en la parte superior trasera del auto, debido principalmente a la forma (pendiente) del perfil en esa zona; por esto la importancia de los alerones traseros en los diseños de autos de carreras.

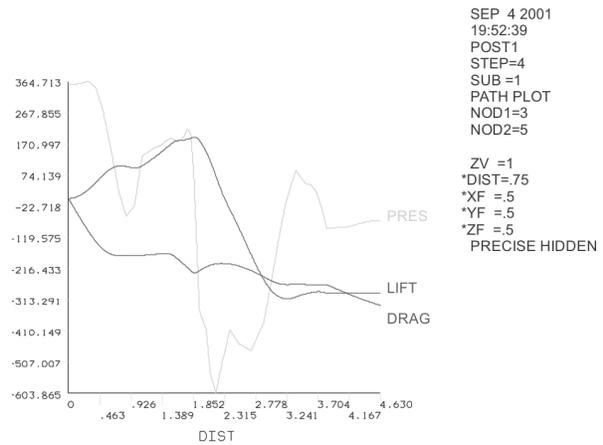
Figura 8. Perfil de presión (v = 20 kph)



La figura 9 muestra que la fuerza vertical (*lift*) (positiva en dirección hacia abajo) aumenta inicialmente sobre la región frontal del vehículo, disminuye más adelante de manera abrupta por los efectos de la succión en la parte superior del auto hasta alcanzar valores negativos, los cuales indican que en el auto se están presentando fuerzas que intentan provocar sustentación en lugar de adherencia al piso; no obstante, sus magnitudes son muy bajas y no es posible que el carro se levante, si se tiene en cuenta que su peso es mucho mayor que la fuerza de elevación generada. En la parte posterior hay succión, pero la fuerza vertical no se afecta dado que no existe componente vertical.

La fuerza de arrastre (*drag*) (negativa, hacia la derecha del modelo, en contra del movimiento) en la figura 9 aumenta (se opone al movimiento del auto) rápidamente en la parte frontal del auto, debido a la compresión de esta zona. Se observa además un mínimo local ubicado exactamente en el punto donde ocurre el cambio de compresión a succión. Después de este punto se registra una disminución

Figura 9. Arrastre y fuerza vertical (v = 20 kph)



en la fuerza horizontal *drag*, debido a que la succión colabora inicialmente al movimiento del auto; sin embargo, más adelante, por efecto de la curvatura del perfil, la fuerza vuelve a actuar en contra. Finalmente, en la parte posterior del auto se registran aumentos del *drag* debido al cono de succión presente en esta zona; no obstante, estos aumentos no son de magnitud considerable.

#### 4.2 Análisis del problema con velocidad de 120 kph

En los isocontornos de presión mostrados en la figura 10 se advierten succiones mayores en la parte superior del auto, lo cual coincide con los puntos en que se presenta la mayor velocidad. Se observa que el fenómeno de succión crece con la velocidad del vehículo; sin embargo, la compresión en la parte delantera también crece, lo cual obliga al auto a permanecer adherido al piso. La figura 10 presenta el incremento de la presión negativa en el modelo debido al aumento en la velocidad de 20 kph a 120 kph. Se observa una ampliación del cono de succión en extensión y magnitud. Por su parte, la figura 11 refleja la ampliación de la turbulencia en la zona posterior, debido al cambio en la velocidad del vehículo.

En los isocontornos de velocidad de la figura 12 se registra un incremento importante en la velocidad del aire provocado por el aumento de velocidad del

Figura 10. Isocontornos de presión ( $v = 120$  kph)

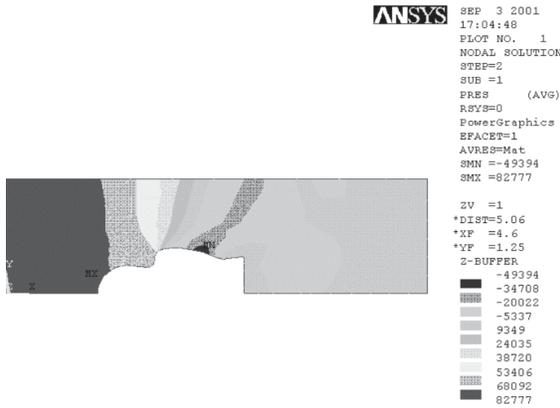


Figura 11. Líneas de corriente ( $v = 120$  kph)

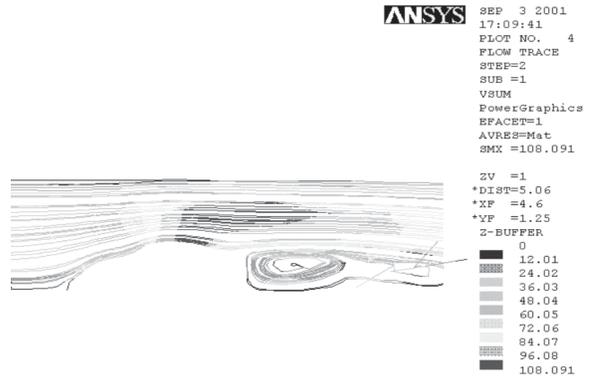


Figura 12. Isocontornos de velocidad ( $v = 120$  kph)

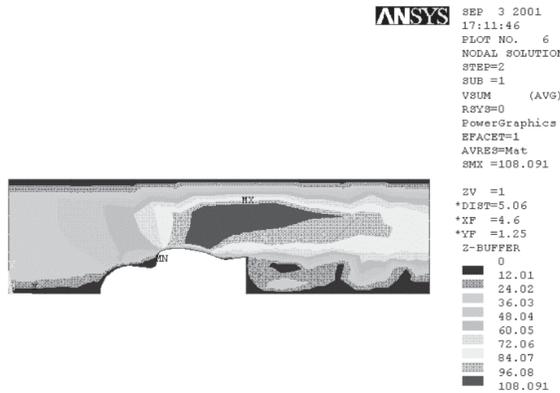
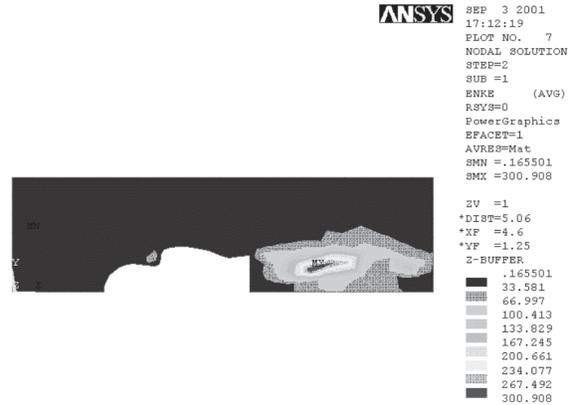


Figura 13. Zonas de turbulencia ( $v = 120$  kph)



vehículo; en la figura 13 se distingue con claridad la zona de turbulencia en la parte posterior del vehículo.

El análisis del perfil de presiones presentado en la figura 14 evidencia la compresión en toda la región delantera (desaparece la succión que exhibe el análisis a 20 kph); sin embargo, en la misma zona sigue existiendo un cambio repentino en la presión, succiones altas en la región superior y succiones bajas en la parte posterior del vehículo. Al igual que en el análisis a 20 kph, la parte superior trasera del auto sigue presentando compresión, debido principalmente a la forma del perfil en esa zona; sin embargo, esta es mayor que la registrada para 20 kph.

La figura 15 revela que la fuerza vertical (*lift*) (positiva en dirección hacia abajo) aumenta inicialmente sobre la parte delantera del vehículo. En la parte superior, específicamente en el punto en que aparece el cambio de compresión a succión la fuerza empieza a disminuir, pero esta vez no alcanza valores negativos. Esta situación garantiza que el auto no pierda su adherencia al piso; no obstante, si la velocidad aumenta excesivamente, como en el caso de autos de carreras, pueden originarse valores negativos importantes en la fuerza vertical; por esta condición se justifica la presencia de alerones traseros en vehículos de este tipo porque de lo contrario el auto podría volar. En la parte posterior del auto se genera una pequeña succión,

Figura 14. Perfil de presión ( $v = 120$  kph)

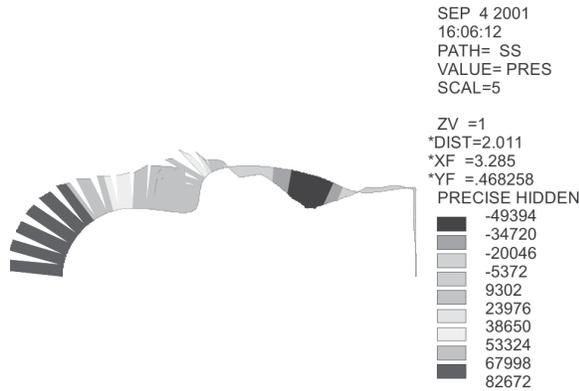
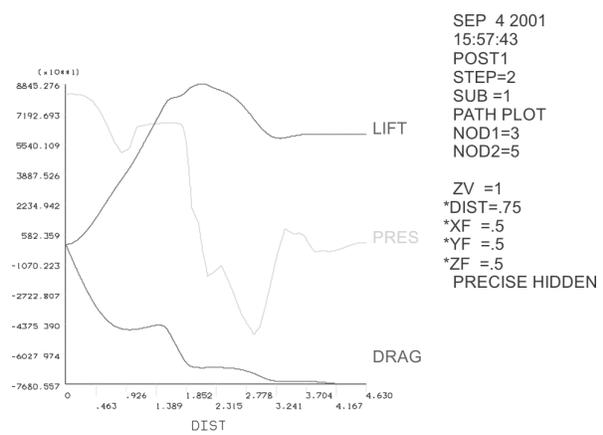


Figura 15. Arrastre y fuerza vertical ( $v = 120$  kph)



sin embargo, esto no afecta la fuerza vertical ya que no existe componente vertical.

La fuerza de arrastre (*drag*) (negativa, en contra del movimiento) de la figura 15 aumenta de forma importante en el área frontal de la parte delantera del auto, debido a la compresión presente en esta zona. También se observa que desaparece el mínimo local registrado a 20 kph, y que el *drag* prácticamente aumenta en todo el recorrido del perfil del auto, salvo algunas zonas planas de la curva. Finalmente, en la parte posterior no se identifican aumentos en el *drag*; pese a ello, el cono de succión se desplaza hacia la derecha alejándose de la parte posterior del auto. Este efecto lo reciben los autos que se acercan demasiado. Cuando se trata de carreras de automovilismo, esta situación es aprovechada con mucha pericia por los pilotos expertos pilotos.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

- Los análisis realizados a 20 y 120 kph demuestran fuertes contrastes y detalles que sólo se logran con la modelación numérica. Emplear esta alternativa implica menores costos para fabricantes y diseñadores de vehículos, y una considerable disminución en las pruebas físicas que deben hacerse para comprobar el desempeño aerodinámico de los automóviles.

- La concentración de la malla en zonas intuitivamente importantes del modelo (mallado adaptativo) garantizan precisión en los resultados. Para fines más formales, el análisis del problema puede realizarse con una mejor malla, utilizando la versión profesional del programa. Los resultados obtenidos en este trabajo son cualitativamente satisfactorios, y bastante útiles al contribuir a comprender la influencia de las fuerzas horizontales y verticales a lo largo del perfil del auto, pese a las restricciones propias de la versión educativa del programa.
- El cálculo del perfil de presiones y de fuerzas (*lift* y *drag*) constituye una herramienta útil de análisis; después de la ejecución de múltiples análisis consecutivos permite optimizar la forma de un automóvil que garantice menor resistencia al avance y mayor adherencia al piso. La optimización del diseño permite alcanzar este propósito con rapidez; no obstante, implementar un análisis de optimización en ANSYS significa parametrizar el modelo e incluir un nuevo módulo de trabajo (con el procesador /OPT del programa); esto se propone para una segunda fase del proyecto.
- Los resultados advierten la importancia del método de elementos finitos como técnica de solución adaptable a diferentes grados de complejidad geométrica y numérica del problema.

- La riqueza de información que puede obtenerse empleando formulaciones matemáticas e hipótesis apropiadas para modelar fenómenos, garantiza rigor y buen juicio en la toma de decisiones de diseño de vehículos, influyen positivamente sobre sus costos, funcionalidad, seguridad, estética y confort.
- El análisis de flujo desarrollado en este trabajo puede extenderse a aviones, barcos, proyectiles, etc; se trata de ajustar la geometría, seleccionar las propiedades adecuadas de los materiales y reconocer las condiciones de contorno del problema.
- Los métodos numéricos constituyen hoy una de las herramientas más avanzadas y efectivas en la solución de problemas de ingeniería, y es un área del conocimiento que cualquier ingeniero debe dominar. Mediante el uso de esta herramienta se obtiene una mejor comprensión física y matemática de los problemas para el diseño de soluciones prácticas y económicas, ajustadas al alcance de los recursos del entorno empresarial.

---

## Referencias bibliográficas

---

- [1] BAKER, A. J. (1983) *Finite Element Computational Fluid Mechanics*, Mc Graw-Hill Book Company, New York, pp. 266-284.
- [2] C. HIRSCH (1988). *Numerical Computation of Internal and External Flows*, Vol. 1, Wiley.
- [3] Harlow, F.H., Amsden, A.A. (1971) *A Numerical Fluid Dynamics Calculation Method for all Flow Speeds*, Journal of Computational Physics, Vol. 8.
- [4] HUERTA A. AND LIU, W.K. (1988) *Viscous Flow with Large Free Surface Motion. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 69, pp. 277-324.
- [5] J. SZMELTER (1989) *Computational Methods for Compressible and Incompressible Fluid Mechanics*, Ph.D. Thesis, University of Wales, Swansea.
- [6] J.T. ODEN, O.C. ZIENKIEWICZ, R.H. GALLAGHER y C. TAYLOR (eds) (1975). *Finite Elements in Fluids*, Vols. 1 y 2, Wiley.
- [7] LAUNDER, B.E., SPALDING, D.B (1974). *The Numerical Computation of Turbulent Flows*, *Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, pp. 269-289.
- [8] M. KAWAHARA, N. YOSHIMŪRA y K. NAKASAWA (1974) *Analysis of Steady Incompressible Viscous Flow. Finite Element Methods for Flow Problems* (eds J.T. Oden, O.C. Zienkiewicz, R.H. Gallagher y C. Taylor), pp. 107-200, University Of Alabama, Huntsville.
- [9] M.D. OLSON (1975). *Variational Finite Element Methods for Two Dimensional and Navier-stokes Equations* (Eds J.T. Oden Et Al.) Vol. 1, Wiley, pp. 57-72.
- [10] O.C. ZIENKIEWICZ y R.L. TAYLOR (1994). *El método de los elementos finitos*. Volumen 2, Mc.Graw Hill, 4ta. ed.
- [11] R.H. GALLAGHER, O.C. ZIENKIEWICZ J.T. ODEN y M. MO-RANDI CECCHI (Eds) (1978) *Finite Elements In Fluids*, Vol. 3, Wiley.
- [12] RAO, S. S. (1989) *The Finite Element Method in Engineering*, Ed. Pergamon Press. New York.
- [13] REDDY, J. N. (1984). *An Introduction to the Finite Element Method*, Mc Graw-Hill Book Company.
- [14] RICHARDS, J.R., LENHOFF, A.M., AND BERIS, A.N. (1994) *Dynamic Breakup of Liquid-Liquid Jets*, Physics of Fluids, Vol. 8, pp. 2640-2655.
- [15] SHARIPOV, F. (1999) *Rarefied Gas Flow Through a Long Rectangular Channel*, Journal Vac. Sci. Technol., A17(5), pp. 3062-3066.
- [16] STREETER, V.L. Y WYLIE, B.E. (1988) *Mecánica de los fluidos*, Ed. Mc Graw - Hill, Mexico, pp. 84-162, 323-340.
- [17] SWANSON ANALYSIS SYSTEMS, INC. HOUSTON. *Ansys User Manual/Revision 5.0*. Volume I (Procedures), Volume II (Comands), Volume III (Elements), Volume IV (Theory).
- [18] WHITE, F.M. (1991). *Viscous Fluid Flow*, 2nd ed, McGraw-Hill, New York.
- [19] YUAN, S. NW. (1976) *Foundations of Fluid Mechanics*, Prentice-Hall International, Inc., London, pp. 71-102.