

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO AERODINAMICO DE UN ALERON TRASERO EN EL DISEÑO DE VEHICULO TIPO FORMULA SAE.

J. Palencia

Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, jpalenci@usb.ve

N. García

Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, ngarcia@usb.ve

M. Pinto

Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela

RESUMEN

La competencia Formula SAE es un concurso de estudiantes de ingeniería, el cual consiste en diseñar, construir y probar un vehículo tipo formula. Este trabajo de investigación, estudia el comportamiento aerodinámico de uno de esos vehículos, con alerón trasero incorporado. Por lo tanto se estudia la selección de un alerón de dos elementos, la mejor relación entre la sustentación y el arrastre aerodinámico (L/D). Se estudia el comportamiento del vehículo cambiando la posición del alerón. La metodología utilizada, comienza con un estudio numérico del comportamiento de varios perfiles aerodinámicos, que puedan formar el alerón. Para esto se utilizaron programas bidimensionales y otro que permitía estudiar la escala real y tres dimensiones. Finalmente se presentan los estudios en túnel de viento sobre modelos a escala. Los resultados muestran la localización del centro de presiones (C_p) para el vehículo con y sin alerón. También son reportados los coeficientes de arrastre (C_d), de sustentación (C_l), las características de localización y ángulo de ataque relativo de los elementos del alerón.

Palabras claves: Aerodinámica, Simulación Numérica, Vehículo Formula.

ABSTRACT

The Formula SAE competition is a students' engineering contest, which consists of designing, constructing and testing a vehicle type formula. This investigation work study the aerodynamic behavior of one of these vehicles, with a back aileron added. Therefore there is studied the selection of an aileron of two elements, the best relation between lift against aerodynamic dragging (L/D) and the vehicle performance is studied changing the aileron position. The used methodology begins with the study -by Numerical Simulation- of the different profiles behavior, that will create the aileron. For this two-dimensional programs were used and other one that allows study in an actual scale and three dimensions. Finally the results with actual experiments in Wind tunnel, using models to scale, are presented. The results shows location of pressures center (C_p) for the vehicle with and without back aileron. The changes are obtained in dragging coefficient (C_D), lift coefficient (C_L), the characteristics of location and relative attack angles of the aileron elements.

Keywords: Aerodynamics, Numerical Simulation, Formula Vehicle.

INTRODUCCION

El significado de la palabra aerodinámica es "Estudio de las leyes que regulan el movimiento de los gases, y de los sólidos dentro de aquellos." (Potter, 1977). Aunque se pueda ver a la aerodinámica como una ciencia, lleva en

sí mucho arte, donde la imaginación del creador y la ayuda de ciertas herramientas hacen del aire más que un gas vital.

La aerodinámica no son sólo alerones y una estética agradable a la vista, ésta influye desde la eficiencia de las ruedas hasta la del motor. De alguna forma, se puede decir que cada día la aerodinámica toma parte más importante en el desempeño automotriz. La misma necesidad de aprovechar este fluido al máximo, ha llevado a la creación de herramientas que permitan evaluar el comportamiento de un objeto dentro de éste. Entre las herramientas se encuentran programas computarizados tipo CFD, basados en elementos finitos o volúmenes finitos. Por otro lado, existen herramientas para pruebas experimentales, como lo son los túneles de viento.

El fundamento de este trabajo está en el estudio aerodinámico del Formula SAE USB 2003 (Fig. 1), el cual fue diseñado y construido en la Universidad Simón Bolívar por estudiantes de Ingeniería. El estudio fue realizado en un Túnel de Viento, para el cual se realizó análisis de similitud y así obtener las dimensiones del modelo a estudiar. El proyecto abarcó desde el desarrollo del montaje experimental hasta la obtención de curvas características. Se cuantificaron los valores de los coeficientes de arrastre (C_d), sustentación (C_l) y momento (C_m), así como el efecto suelo del fórmula. Se proponen modificaciones que mejoren su comportamiento aerodinámico y de esta forma su desempeño en pista.



Figura 1. Formula SAE USB 2006

CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA.

En este trabajo de investigación se planteó el estudio aerodinámico de la geometría óptima de un alerón trasero de dos elementos, para el prototipo *Formula SAE 2006* de la USB (ver Fig.1), a través del modelaje con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) usando el Método de Elementos Finitos.

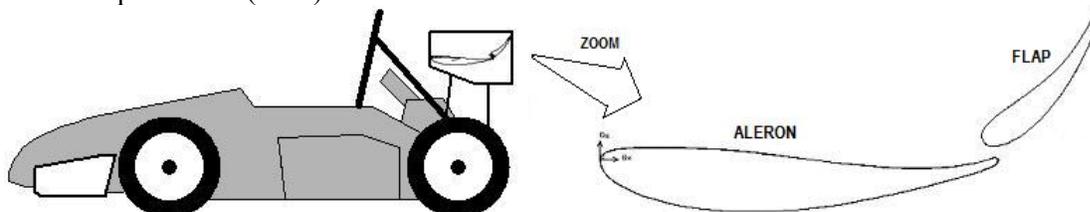


Figura 1. Prototipo *Formula SAE* con el alerón trasero y detalle de este (alerón y flap).

La herramienta computacional a utilizar para la realización de las simulaciones en ambiente CFD, utiliza como método de discretización del dominio el de elementos finitos, donde las ecuaciones de gobierno, conservación de la masa, momentum (Navier-Stokes) y energía, son resueltas de manera iterativa para cada volumen de control:

El

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{C}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \cdot \vec{C}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{C} \otimes \vec{C}) = \nabla \cdot \left(-P \cdot \delta + \mu \cdot \left(\nabla \vec{C} + (\nabla \vec{C})^T \right) \right) + S_M \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho \cdot h_0}{\partial t} - \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{C} \cdot h_0) = \nabla \cdot (\lambda \cdot \Delta T) + S_E \quad (3)$$

modelo a utilizar en el CFD, fue elaborado previamente con una herramienta CAD, se importó al CFD donde se realizó la creación de la malla para la simulación. Este proceso de no es más que la interpretación numérica de la geometría obtenida en un grupo de elementos finitos de formas preestablecidas (tetraedros, prismas, pirámides, etc.) que se adaptan a las superficies presentes. Mientras más elementos de malla estén presentes, mayor será la precisión de los resultados que se generen en la simulación, bajo ciertas consideraciones (Atramis, 2005).

MODELO FÍSICO.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo proponer la colocación de alerones en la parte trasera del monoplaza del equipo de FSAE de la Universidad Simón Bolívar. El mismo será un alerón de dos perfiles, el primero con una cuerda de 1.6 m y una envergadura de 1.4 m, y el segundo con una cuerda del 20% al 30% del primero con la misma envergadura, posicionados a una distancia entre ellas de un 2% a un 4% a la cuerda del primero, moviendo la posición del segundo sobre el borde de fuga del primer alerón. Se buscara la mejora de este arreglo con la colocación de placas laterales (end plates) tipo formula indy.

Alerones de dos elementos. Si se necesita una mayor carga aerodinámica de la que se puede obtener con un alerón de un solo elemento, y el monoplaza del equipo de FSAE de la Universidad Simón Bolívar puede tolerar la consiguiente resistencia aerodinámica adicional, entonces puede proponerse la utilización de alerones más complejos. De la ecuación básica de carga aerodinámica (sustentación), $L=0.5\rho AC_L V^2$ es evidente que a cualquier velocidad dada, la carga puede aumentarse aumentando el valor del área en planta del alerón (A), o de coeficiente de sustentación (C_L). (García 2006).

El diseño de alerones de varios elementos más sencillo es el de dos elementos, donde el plano principal (alerón) va acompañado de un flap. Existen dos geometrías clásicas para alerones de dos elementos, y se conocen como la configuración del “flap externo” y la del “flap de ranura” ó “flap tipo Fowler” (Katz, 2004), (Guillespie, 2004).

El flap de ranura, más complejo por su forma, y por tanto más difícil de construir. El flap externo utiliza un plano principal (alerón) más sencillo, y resulta más fácil de construir, esta es la razón por la que se selecciona este tipo de configuración para el modelo Formula SAE USB.

Para la selección de los perfiles es necesario considerar ciertos factores que garantizarán una buena elección de las mismas, como lo son:

Perfil 1: Para la selección del perfil del alerón, se siguió el procedimiento descrito a continuación: Velocidad promedio que el monoplaza mantiene en distintos circuitos. Esto para poder considerar el número de Reynolds, que es un factor muy importante para conocer bajo que tipo de perfiles se va a trabajar.

Normas de los perfiles aerodinámicos de la competencia. En este caso estudiaremos las restricciones de diseño de cada perfil para poder cumplir estrictamente con las normas.

En cada caso se observara las curvas (sustentación, arrastre, etc.) para cada uno de los perfiles seleccionados. Los requerimientos del equipo de diseño del Formula SAE, son: de 20 a 30 kg de sustentación y un máximo de arrastre de 12% de la sustentación.

Tabla N° 1. Perfiles a ser evaluados para el alerón y flap.

PERFIL	TIPO	N° REYNOLDS
DRELA DAE 31	XFOIL	375000
EPPLER 423		375000
GOTTINGEN 417 ^a	selig	398800
PT-40	selig	399000
SG6040	selig	399758
CLARKY	selig	399900
BW-3	selig	400000
TRAINER 60	selig	400000
E231	XFOIL	400400
SELIG DONOVAN SD7062	selig	401200
DALE HOUSE D44009	selig	401700
USNPS-4	selig	401700
CG-ULTIMATE	selig	402300
ESA	selig	403806
SELIG S8036	selig	408000

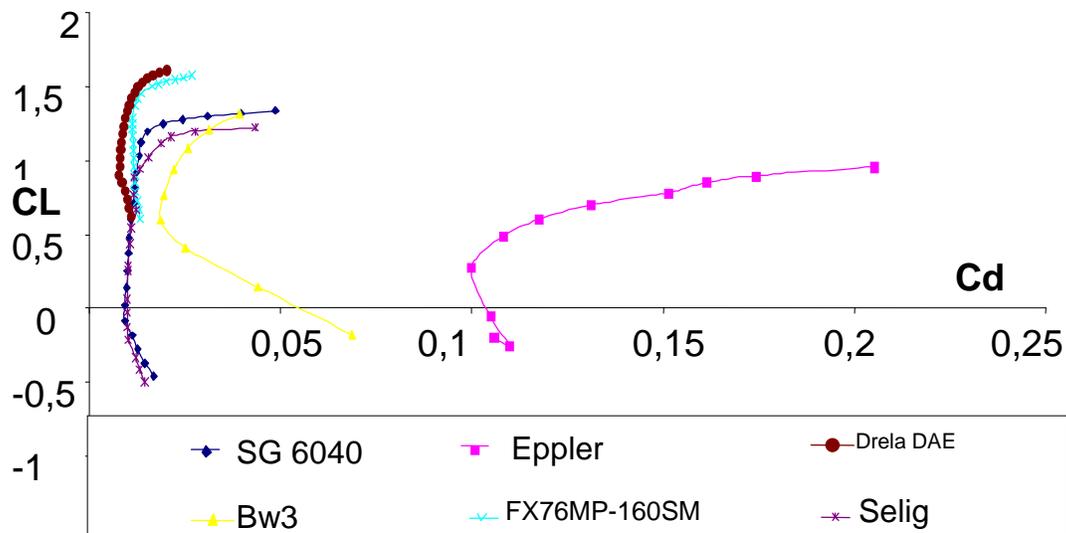


Gráfico N° 1. Comparación Cl vs Cd para varios perfiles.

Comparando las diferentes curvas el perfil DRELA DAE 31 muestra una mejor relación CL-Cd, para el grupo de perfiles mostrados.

Perfil N°2: El procedimiento para la selección del segundo perfil es más complejo, porque se desea trabajar este perfil con un 30% de la cuerda del primero lo cual dificulta el cumplimiento de las normas que se exigen en la competencia, básicamente con el del radio del borde de ataque que tiene que ser de 12.7mm lo cual limita la lista de perfiles a seleccionar (SAE Rules, 2005).

Debido a esto, el único perfil con el que se puede trabajar es el RAF 32, el cual cumple con las normas y se encuentra bajo el mismo número de Reynolds que el caso anterior.

Ranura del alerón y el flap. Otras de las referencias que se tomo en cuenta fue la separación del borde de ataque del segundo alerón al borde fuga del primero, encontrando que la separación del segundo alerón con respecto al primero debería ser del 1% al 4% de la cuerda del primero sobre un eje horizontal y vertical con un origen a partir del borde de fuga del primero, y variando su separación sobre los ejes positivos. En la figura 2, se muestra la versión normalizada de los perfiles seleccionados.

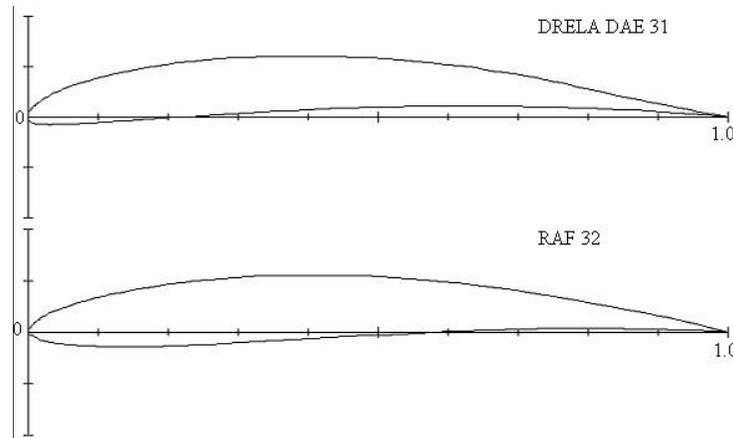


Figura 2. Pefiles seleccionados par aleron y flap.

El la figura 3, se muestra el arreglo aerodinamico propuesto, puede notarse la ventana donde podra variarse la posición del flap referido al alerón.

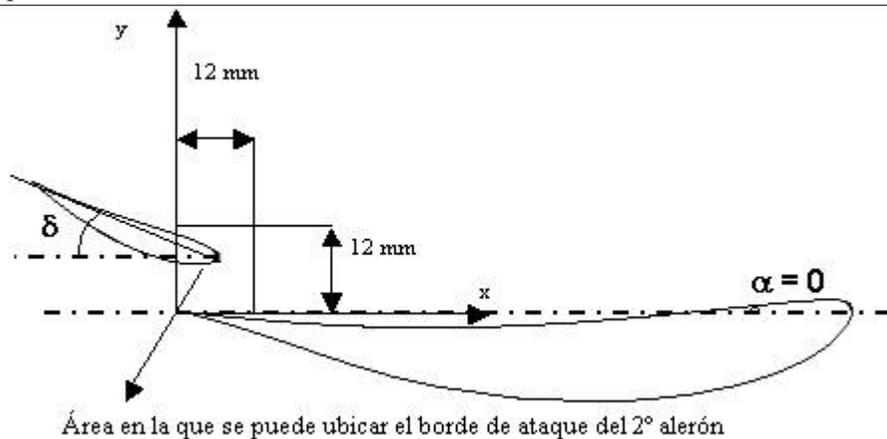


Figura 3. Descripción del arreglo aerodinámico, mostrandose la posición relativa entre alerón y flap en la configuración sugerida.

DOMINIO COMPUTACIONAL DEL ARREGLO AERODINÁMICO

La realización del estudio numérico tiene como referencia un estudio experimental realizado en conjunto con la simulación numérica. En este se utilizo un modelo a una escala 1:12 dentro de un túnel de viento sub-sónico con una sección de pruebas de 0,45x0,45 m, ubicado en el laboratorio de Fluidos de la Universidad Simón Bolívar.

Debido a que se utilizarían los datos experimentales para validar los resultados numéricos, fue necesario adecuar la geometría numérica tratando de estar lo mas cerca posible de las condiciones experimentales y con esto obtener una buena similitud de resultados. Claro esta que el estudio numérico se realizó a la misma escala (1:12) permitiendo eliminar los efectos del escalamiento presentes en los resultados experimentales (García, 2006).

Para la evaluación del de la geometría óptima, se realizó un estudio de campo con los alerones utilizados por otros equipos F-SAE a manera de tener una primera aproximación. Se logró evidenciar que el ángulo de ataque del primer alerón era de 0° y el ángulo de incidencia del segundo alerón varia entre 20° y 30°.

Con esta primera aproximación, se planteo la comparación numerica de los aportes de sustentacion y arrastre de cuatro casos, tres con una configuración hibrida Drela-Raf y una cuarta con el perfil Drela para aleron y flap. Para la simulación numerica del arreglo seleccionado, se constuyo una caja con las siguientes dimensiones: dos cuerdas (2c) arriba y abajo del aleron, una cuerda (1c) aguas arriba y tres cuerdas (3c) aguas abajo del arreglo, esta configuración puede verse en la figura 4, en la misma se muestra un segundo dominio computacional utilizado para la evaluación de placas laterales (End Plates).

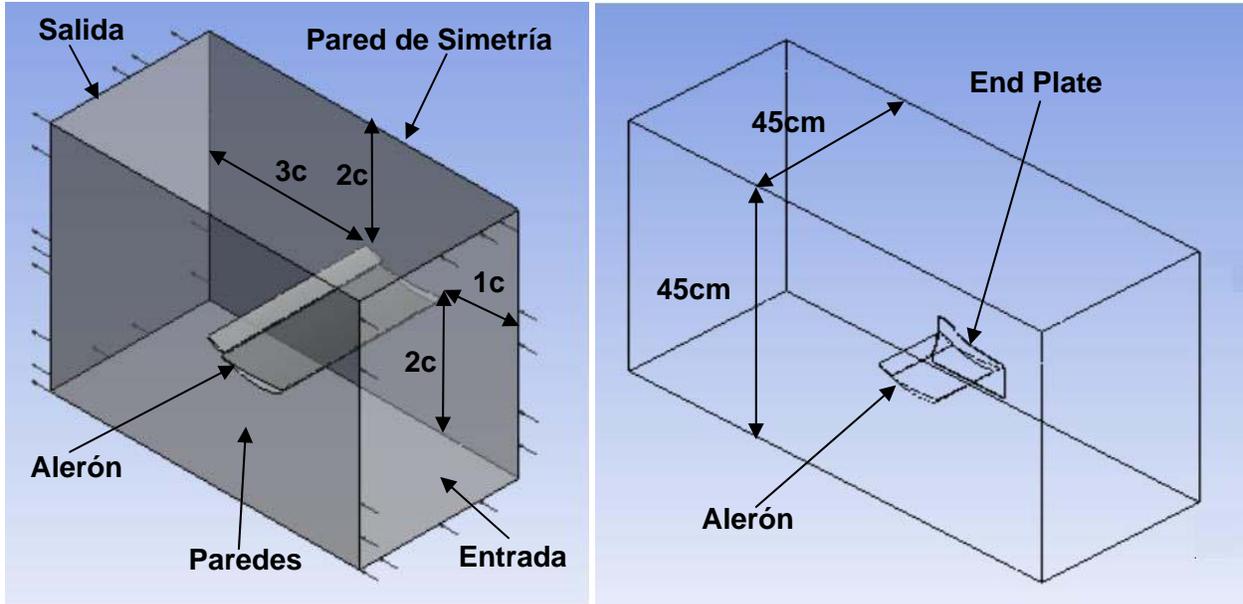


Figura 4. A la izquierda descripción del dominio computacional. A la derecha Dominio computacional para la evaluación con Placas Laterales (End Plates).

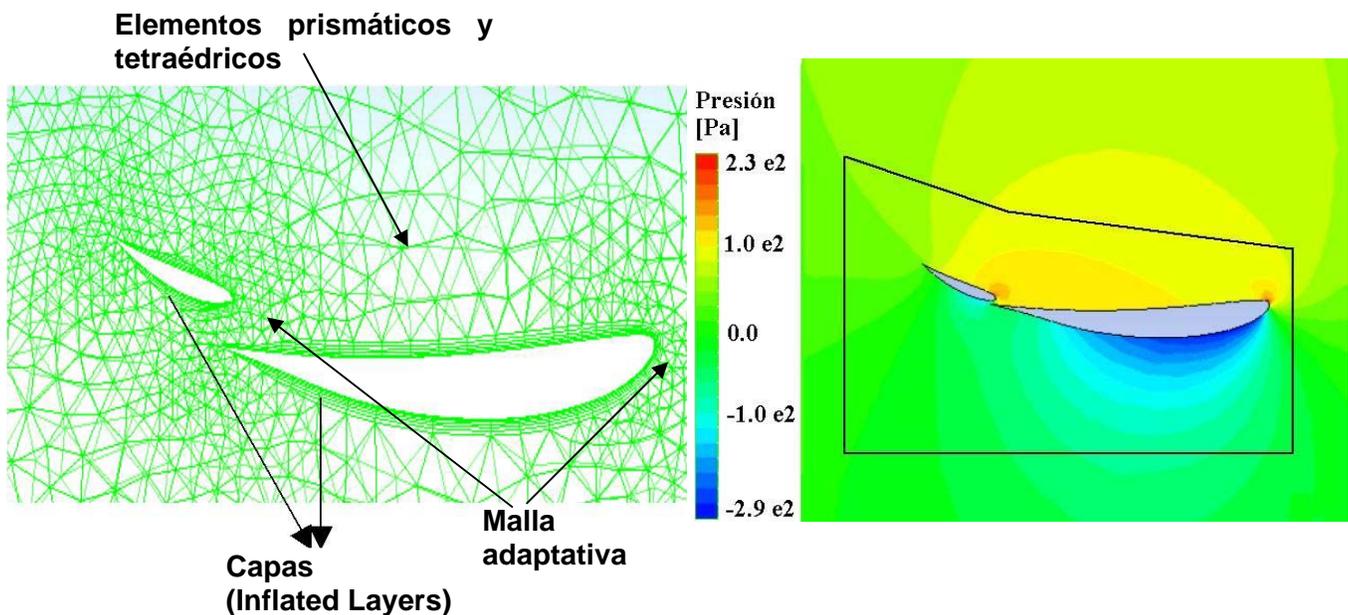


Figura 5. A la izquierda dominio computacional para la evaluación con end plate, a la derecha configuración aproximada para la selección del end plate, a partir del contorno de presión del prototipo.

En la figura 5, se reporta la composición de la malla validada. La misma esta compuesta de elementos triangulares y tetraedricos, utilizandose la función malla adaptativa para mejorar la distribución de elementos según se necesiten. Para la evaluación de la capa límite se utilizaron cinco capas de elementos prismaticos, alrededor del arreglo.

Para mejorar los efectos del perfil de presiones sobre el aleron y disminuir problemas de vorticidad en los bordes del aleron, se propondra la colocación de Placas laterales. En la figura cinco se puede apreciar como se selecciona el area a cubrir con las placas.

ANALISIS DE RESULTADOS

El programa utilizado, trabaja para el cálculo de los resultados con el método de elementos finitos. Es por ello que se requiere conocer antes de realizar la malla como se comportaría el flujo sobre el perfil. En este caso, las zonas críticas se encuentran sobre el borde de ataque y de fuga de la geometría y en estos puntos, es conveniente refinar la malla. De igual manera, sobre la superficie superior e inferior del perfil se deben establecer unas condiciones de mallado que permitan realizar un análisis del comportamiento de flujo para que exista una buena aproximación del desprendimiento de esta al variar el ángulo de incidencia del perfil.

Para el proceso de validación se construyeron las siguientes mallas, usándose como condiciones de prueba las mismas condiciones físicas para el dominio, a velocidad de entrada del flujo de 20.0m/s.

- Malla 1: cuenta con 50000 nodos.
- Malla 2: cuenta con 70000 nodos.
- Malla 3: cuenta con 90000 nodos.

Para todas, se uso el mismo estilo de mallado no estructurado, con elementos tetraédricos y prismáticos. Se utilizaron cinco capas de inflación (inflation layers) en la superficie del alerón, con el fin de hacerlos más abundantes en áreas de interés en donde los gradientes de las propiedades analizadas son mayores. Las tres mallas fueron refinadas en buena medida mediante la herramienta Malla Adaptativa. Esta permitió refinar localizadamente donde fluctúe un parámetro critico a ser estudiado, en especifico el de velocidad. Mejorandose asi la predicción de zonas de desprendimiento, estancamiento y vorticidad.

Similitud dinámica y geométrica de la simulación numérica y el análisis experimental:

El realizar una simulación, tanto numérica como experimental a escala de los perfiles, generará errores por efecto de escala. Por ello es necesario aproximar cual es el error que va a existir para validar los estudios realizados para cuantificar la incertidumbre. El proceso consiste en verificar bajo distintas velocidades cual es la línea de tendencia que se produce y verificar si el coeficiente de correlación de producto Pearson produce un buen ajuste. Para validarlo debe generarse un producto cercano a la unidad y de esta manera se validaría el proceso.

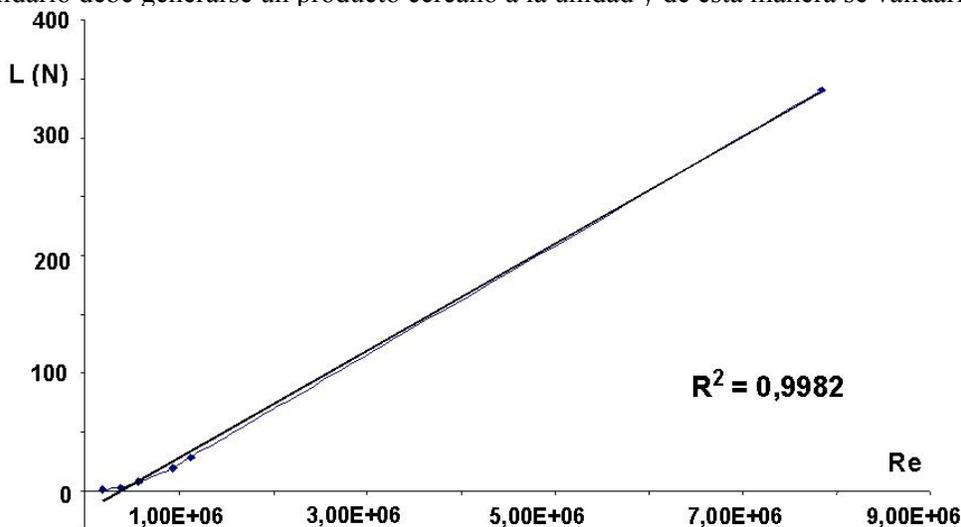


Gráfico 2. Verificación de la similitud Dinamica y Geometrica, a traves de la correlación de producto Pearson.

El gráfico 3 nos muestra la validacion a traves de la comparación de tres experimentos con la simulación numerica. En el caso del Coeficiente de sustentación (Cl) vs el angulo de ataque (α), vemos que existe

congruencia entre los resultados de los experimentos 1 y 3. En el caso del coeficiente de arrastre (C_d) vs el angulo de ataque (α), vemos que aunque los resultados estan alejados (hasta por 30 %), muestran una misma tendencia.

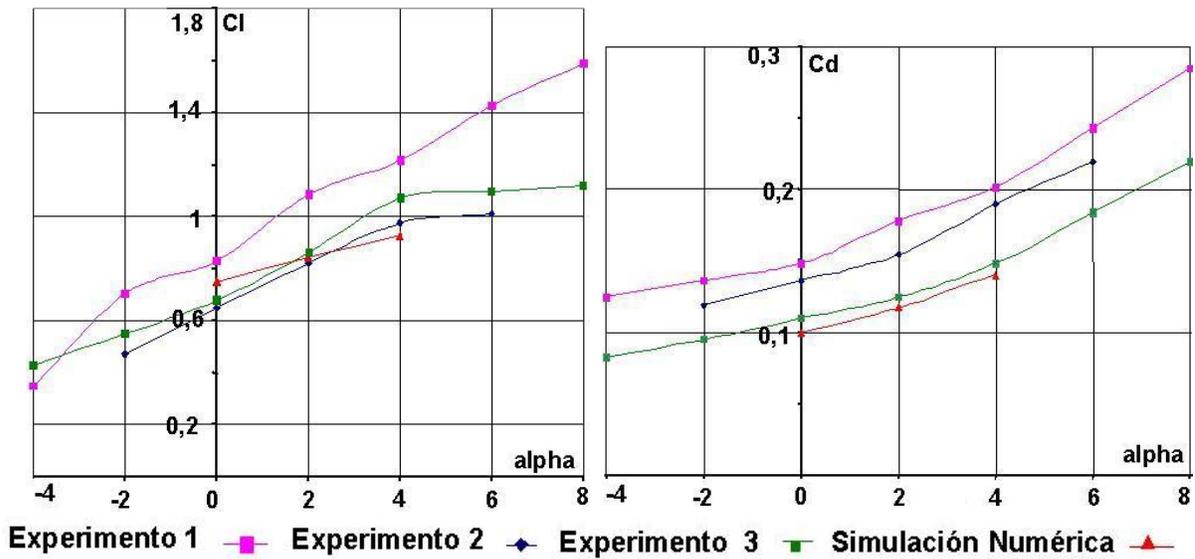


Grafico 3. Validación por comparación entre tres resultados experimentales y la simulación numérica.

RESULTADOS

Se compararon cuatro configuraciones de aleron, como se muestra en la tabla N° 1, seleccionandose el caso N° 2. Se repórtan los perfiles de presiones y el perfil de velocidades para una configuración de aleron y el perfil de presiones para una configuración de aleron con placas laterales. Las mismas pueden verse en las figuras 6 y 7. En ésta configuración se obtuvo una sustentación de 163.93 N, y un arrastre de 21.38 N, que como pertenece a la mitad del sistema placa-alerón, se multiplica por un factor de 2 para obtener los resultados del sistema completo, cuyos valores serian 327.89 N de sustentación y 42.78 de arrastre. El equivalente en kg de de estas fuerzas es de 33.40 kg para la sustentación y de 4.36 Kg para el arrastre. El arrastre corresponde al 13% de la sustentación. En los requerimientos de F_{sae} el arrastre representara el 12% de la sustentación, sin embargo el 1 % considerado en masa solo equivale a 300 g, pudiendo considerar un peso despreciable.

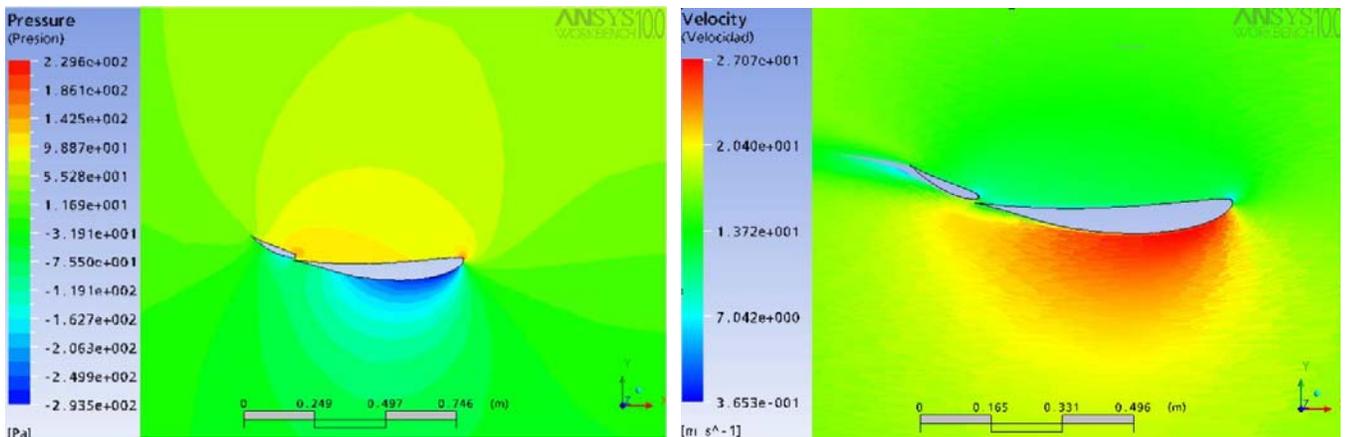


Figura 6. A la izquierda perfil de Presiones y al derecha perfil de velocidades, para una configuracion de aleron.

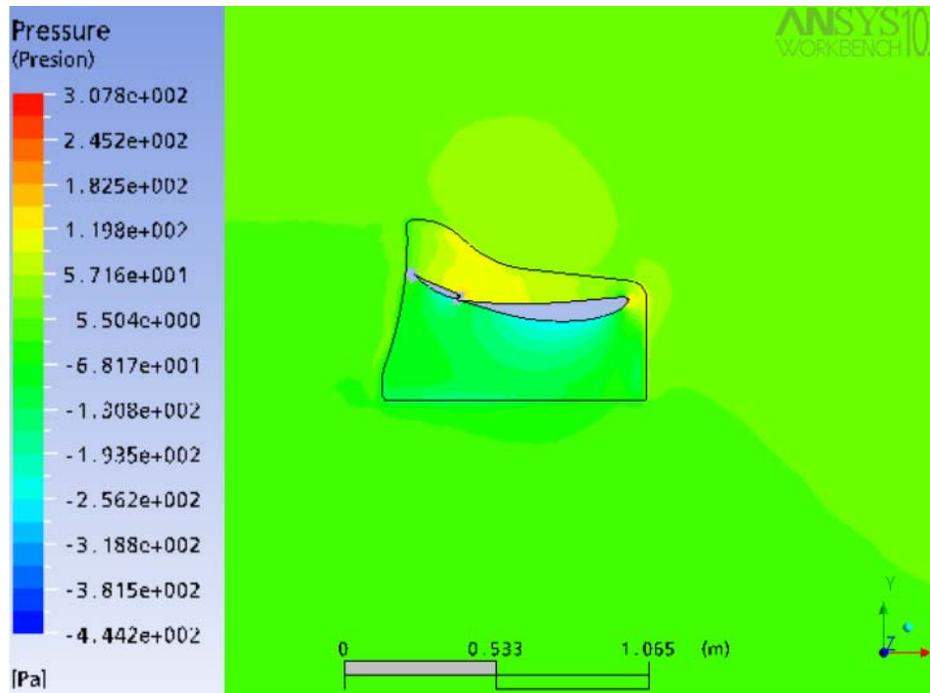


Figura 7. Influencia de las placas laterales en el perfil de Presiones del arreglo.

CONCLUSIONES

Se reporta un arreglo aerodinámico de Alerón y flap externo, formado respectivamente por un perfil DRELA DAE 31 y un RAF 32.

Se reporta la mejora del modelo propuesto con la colocación de placas laterales tipo Indy.

Se reporta, para el arreglo final, una sustentación (L) de 33.395 kg y un Arrastre (D) de 4.375 kg.

Entre los errores experimentales y de la simulación que se encontró, los mas destacados fueron los siguientes:

El modelo construido a escala fue un diseño completamente artesanal, con lo cual podemos afirmar que existen muchas aproximaciones en su construcción como por ejemplo, el borde de ataque y el borde de fuga lo cual representa un margen de error

En la similitud del túnel de viento para la simulación matemática no se tomo en cuenta el chaflán que posee éste a lo largo de sus vértices, lo cual modifica el perfil de velocidades que se desarrolla dentro del túnel de viento. Las paredes y los alerones en la simulación matemática fueron simulados sin deslizamiento mientras que en los estudios experimentales siempre existe cierta rugosidad en cada uno de sus componentes.

AGRADECIMIENTOS

A los laboratorios de Conversión de Energía Mecánica y Mecánica de Fluidos, en cuyas instalaciones se desarrollaron las simulaciones y la experimentación y al personal de las mismas que fueron de gran ayuda en la elaboración de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS.

Atramiz, Eliana. Tesis de Grado “Estudio experimental de la aerodinámica de un carro tipo fórmula”. Universidad Simón Bolívar, Enero 2004.

Clarembaux J. Et al. Estudio Aerodinámico De La Carrocería Del Prototipo USB-Solar 2006, ASME USB 2006.

García, N. et al. Estudio Aerodinámico Del Alerón Trasero De Un Vehículo Formula Student Usando Dinámica De Fluidos Computacional, Cimenics 2008.

Guillesspie T. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers, Inc. 2004.

Katz, J. Race Cars Aerodynamics. Bentley Publishers. 2005

Nigro, N. Et al. Análisis aerodinámico de un automóvil mediante CFD, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMEC, Santa Fe – Argentina

Potter, Merle C. y D.C. Wiggert, “Mecánica de Fluidos”. Prentice Hall, México. Segunda Edición, pp 243-244 (1997).

Society Automotive Engineers Inc. “2006 Fórmula SAE Rules”.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en los procedimientos de la conferencia. LACCEI o los editors no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.