



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## MEDICIONES DE PRESION MEDIA Y FLUCTUANTE EN TUNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD Y CALCULO DE FUERZAS AERODINAMICAS DE UN PERFIL NACA 4412

Branco, Juan<sup>\*1</sup>, Marighetti, Jorge<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ingeniería Química– Facultad Regional Resistencia, Universidad Tecnológica Nacional  
French 414. Resistencia, Chaco, Argentina  
correo-e: branco89@hotmail.com

<sup>2</sup> Laboratorio de Aerodinámica – Universidad Nacional del Nordeste  
Av. Las Heras 727. Resistencia, Chaco, Argentina  
correo-e: jomaringha@gmail.com

### RESUMEN

Problemas de inestabilidad aerodinámica en tableros de puentes suspendidos son analizadas con la teoría de flameo (flutter) de perfiles alares, semejantes en comportamiento aerodinámico. Expresiones teóricas de las derivadas aerodinámicas (o coeficientes de flameo) en perfiles alares fueron desarrolladas por Glauert, Theodorsen, Kasner, entre otros. Posteriores estudios en túnel de viento con modelos seccionales suspendidos, mostraron similitud de las derivadas aerodinámicas obtenidas. Actualmente, modelos seccionales de tableros de puentes, de bordes cortantes, son estudiados de similar manera a los perfiles alares, para el análisis de desprendimientos de vórtices y velocidades críticas de viento disparadores de flameo u oscilaciones divergentes. El estudio de tableros de puentes en túnel de viento se obtiene coeficientes medios de sustentación, arrastre y momento, en modelos seccionales estáticamente vinculados y derivados aerodinámicos en modelos suspendidos con movimiento forzado.

En este trabajo, que forma parte del estudio en tableros de puentes, se realizan mediciones de presiones medias y fluctuantes en túnel de viento sobre modelo rígido seccional reducido del perfil alar NACA 4412, obteniéndose por integración, fuerzas de sustentación, arrastre y momento para distintos ángulos de ataque. La sección de ensayo del modelo es de 0,5 m x 0,5 m con viento suave y uniforme de aproximadamente 16 m/s de velocidad. Tomas de presión, ubicada en la línea central del ancho del modelo seccional y en el perímetro del perfil, permite definir las áreas de integración. El registro, almacenamiento y procesamiento de datos se realiza con transductores electrónicos, plaqueta de adquisición y programa desarrollado en el laboratorio para este ensayo. Este trabajo, orientado al estudio de inestabilidad de puentes, permite desarrollar y calibrar el sistema de adquisición y procesamiento de datos y la balanza dinámica de medición para cargas globales y derivativas aerodinámicas en modelos seccionales dinámicos en túnel de viento de la UNNE.

**Palabras Clave:** Túnel de viento, presión media y fluctuante, perfil alar, fuerzas aerodinámicas, técnica experimental.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevas tecnologías constructivas y la utilización de materiales novedosos en la Ingeniería Civil, permitió realizar estructuras más ligeras, esbeltas y flexibles [1]; como consecuencia, las características de masa, amortiguamiento y rigidez estructurales disminuyen dramáticamente provocando comportamientos altamente sensibles a efectos dinámicos inducidos por el viento. En tableros de puentes, estructuras civiles de bordes cortantes, esbeltos y flexibles, las fuerzas originadas en la interacción fluido-estructura pueden originar fenómenos de inestabilidad capaces de provocar el colapso de las mismas; expuestas a la acción del viento atmosférico, son susceptibles de alcanzar comportamientos inestables estáticos, dinámicos o efectos aeroelásticos (oscilaciones autoexcitadas); entre los primeros, se destacan, el volcamiento, la divergencia o pandeo, en tanto, los dinámicos son originados por el desprendimiento de vórtices. El comportamiento aeroelástico se manifiesta sobre la estructura como galope (vibraciones transversales autoinducidas estacionarias), el martillamiento debido a la turbulencia del viento, la divergencia torsional, la inestabilidad flectora y torsional y, por acoplamiento de modos de vibración, el flameo (flutter) de la estructura.

Existe un paralelismo en el estudio de los fenómenos de inestabilidad en perfiles alares y tableros de puentes [2]. Los primeros estudios de tableros de puentes, por su semejanza geométrica y comportamiento estructural, se realizaron en base a los desarrollos en perfiles alares aeronáuticos; estos últimos, fueron tempranamente estudiados por Glauert, Theodorsen y Kasner, entre otros, permitiendo obtener soluciones de ecuaciones de equilibrio en forma cerrada. Sin embargo, por las complejas características del comportamiento fluido-estructura de los tableros de puentes, la aplicación de esas soluciones deja de ser efectiva; aún hoy la mayor parte de las investigaciones son realizadas con ensayos en túneles de viento, tanto para aplicación en desarrollos analíticos, como para aplicación al diseño. El comportamiento estático estructural por acción del viento medio, son valoradas con cálculos analíticos a partir del conocimiento de las componentes medias de fuerzas de sustentación, arrastre y momento obtenidas de esta manera, al igual que los coeficientes adimensionales, para resolver las ecuaciones de movimiento de los modos de vibración [3]. La obtención de coeficientes aerodinámicos (o aeroelásticos), son obtenidos en túnel de viento, por métodos experimentales desarrollados por Scanlan et. al, actualmente los más empleados en este tipo de estudios estructurales de puentes; este procedimiento, está siendo abordado por el Laboratorio de Aerodinámica de la UNNE, considerando la disponibilidad del túnel de viento de capa límite "Prof. Jacek Gorecki" y un canal de aire, de similares características.

En este trabajo, se realizan ensayos aerodinámicos con modelos de escala reducida en un canal de aire, con vientos estacionarios, uniformes y suaves, empleando métodos desarrollados por Scanlan et. al. En una primera etapa, la necesidad de ajustar técnicas experimentales,



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

equipamiento de medición, sistemas de adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos, se realizan ensayos en el canal de aire de un modelo rígido de un perfil alar NACA 4412; se miden presiones medias y fluctuantes para la obtención, por integración, de fuerzas de sustentación, arrastre y relación sustentación/arrastre, para distintos ángulos de incidencia del perfil alar. De esta manera, se calibró y evaluó la confiabilidad del sistema de medición y las técnicas experimentales; el perfil alar es ensayado estáticamente en el canal de aire, permitiendo obtener los primeros resultados de referencia para ensayos de características dinámicas de perfiles y estructuras de tableros de puentes.

## 2. DESCRIPCION DE LOS ENSAYOS

Los estudios aerodinámicos del perfil alar NACA 4412 fueron realizados en el canal de aire del Laboratorio de Aerodinámica (UNNE), considerando las características de velocidad media e intensidad de turbulencia para un viento atmosférico suave y uniforme [4]. El modelo del perfil alar, fue construido a una escala geométrica compatible con la relación de bloqueo admisible para la cámara de ensayo del canal de aire, de alrededor del 5%. A la velocidad máxima, se midieron presiones fluctuantes en la superficie del modelo con tomas de presión estática, utilizando una válvula neumática Scanivalve, transductores electrónicos de presión, tarjeta de adquisición y ordenador. Las diferencia de presión estática medidas en cada una de las tomas de presión distribuidas sobre el perfil alar son referenciadas con la presión dinámica de flujo sin perturbar, permitiendo definir los coeficientes de presión local. La presión dinámica de referencia, medida en el flujo no perturbado, es obtenida con tubo de Pitot-Prandtl. Los ensayos fueron realizados con viento incidiendo desde  $-7,5^\circ$  a  $+25^\circ$ , a intervalos de  $5^\circ$ . Para cada dirección de viento analizada, se determinaron coeficientes de fuerza en las áreas tributarias de cada toma de presión, las que posteriormente son integradas para obtener las fuerzas de sustentación y arrastre globales.

## 3. CARACTERISTICAS DEL ESCURRIMIENTO DEL CANAL DE AIRE

El canal de aire utilizado en los estudios, es una reproducción a escala de túnel de viento de capa límite "Jacek P. Gorecki" de la UNNE. Este, es un canal de aire de circuito abierto, con cámara de ensayo de 0,5 m de ancho  $\times$  0,5 m de alto  $\times$  4,5 m de largo y dos zonas de ensayo; el escurrimiento uniforme y suave es obtenido en la parte anterior de la cámara del canal, en tanto, al final de la misma, el flujo es no- uniforme y turbulento. Para los ensayos del perfil alar, vinculado por medio de un eje transversal a media altura de la cámara de ensayo, se desarrolla un escurrimiento con intensidad de turbulencia de 0,01. En general, estudios similares de perfiles alares se realizan de manera simplificada en flujo bidimensional, considerado un escurrimiento estacionario, uniforme y suave; tales condiciones se reproducen en estos ensayos, para permitir el análisis con bibliografía especializada. El aire está condiciones normales de presión y temperatura,



con número de Mach despreciable, en correspondencia con el comportamiento ideal de fluidos incompresibles y no viscosos. En (Figura 1) se muestra el perfil de velocidades medias (m/s) y la intensidad de turbulencia en altura (mm) del escurrimiento en la cámara de ensayos del canal.

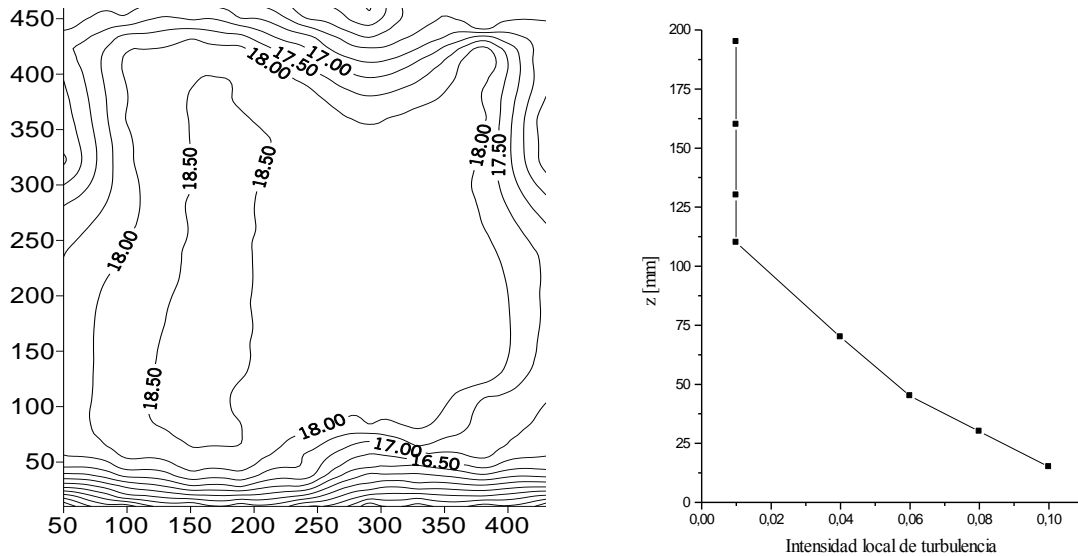


Fig. 1. Distribución de velocidades medias y perfil de intensidad de turbulencia en altura de la cámara de ensayos del canal de aire.

#### 4. MODELO REDUCIDO DEL PERFIL ALAR

El modelo del perfil alar NACA 4412 reproduce geoméricamente la estructura real dentro de un rango de escalas asociados a las escalas geométricas presentes en el flujo incidente. El modelo fue construido con un aspecto aerodinámico que produce un bloqueo en la cámara de ensayos de 4,5 %, menor al bloqueo admisible (5 a 8%) en este tipo de estudios. En (Figura 2) se muestra el modelo del perfil alar y la disposición tubos capilares de conducción de la señales de presión en el interior del mismo.

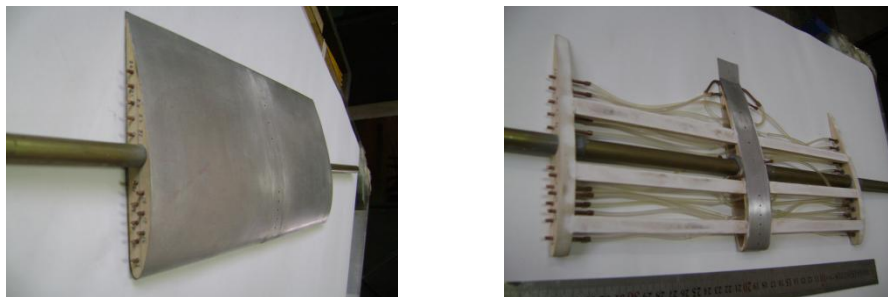


Fig. 2. Detalles del modelo reducido del perfil alar NACA 4412 utilizado en el ensayo.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

El ángulo de ataque,  $A_{taq}$ , del viento incidente miden el ángulo entre la dirección de la componente longitudinal del viento respecto a la cuerda,  $c$ , del perfil alar; ángulos negativos, a partir del  $0^\circ$ , son medidos en la inclinación anti horaria del modelo y, positivos, a partir del  $0^\circ$ , en su inclinación horario para las catorce posiciones ensayadas. La generación del perfil, resulta en un perfil con una cuerda de 0,150 m, 0,32 m de envergadura, 0,155 m de perímetro superior y 0,152 m de perímetro inferior. Veintiséis tomas de presión estáticas son dispuestas en la parte media de la envergadura, en posiciones consecutivas sobre todo el perímetro del perfil (Figura 3).

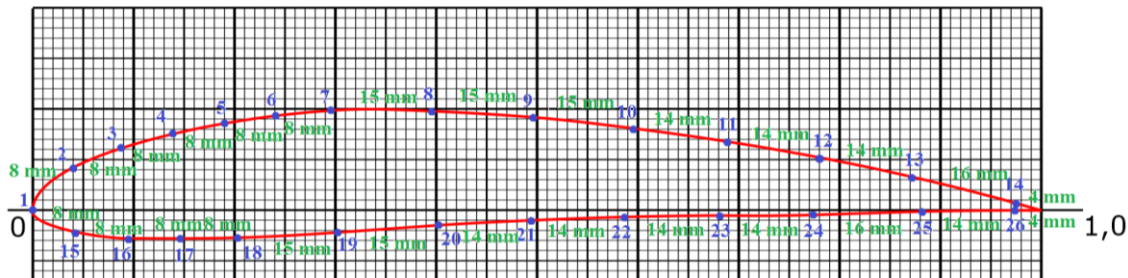


Figura 3: Ubicación de las tomas de presión estáticas perfil aerodinámico NACA 4412.

## 5. EQUIPAMIENTO Y TECNICA EXPERIMENTAL

En las 26 tomas de presión sobre la superficie del perfil alar, se midieron en su componentes media y fluctuante con sensores de presión electrónicos Honeywell® 160PC, conectados por tubos capilares de PVC de 1,5 mm de diámetro a una válvula secuencial Scanivalve de 48 canales y controlador solenoide CTRL2/s2-s6 [5]. La adquisición de datos se realizó a través de una plaqueta PCI-DAS1602/16 Measurement Computing®, controlada y calibrada con software InstaCal®. Los datos fueron almacenados en un computador Pentium 4.2, de 4GHz de memoria, RAM 736MB, procesados en tiempo real con programa de cálculo creados por este laboratorio con Data Acquisition Toolbox de la aplicación MatLab®: R2008 [6], versión 7.6 y Office Excel® 2003 [7]. La duración de los registros de presiones fue de 5 segundos cada una, con intervalos de 8 segundos para equilibrar las señales de presión en los tubos capilares.

### 5.1. Programa de control, adquisición y procesamiento de datos

Se utilizó una metodología de control de algoritmia lineal recursiva, basada en programación lineal clásica, con interfaz alfanumérica e introducción de parámetros obtenidos de los ensayos, decisiones básicas y presentación de resultados gráficos y numéricos. La presentación de resultados consta de dos fases: una, en la que se generan funciones de la señal transformada Vs. tiempo y, otra, como espectros de frecuencias del fenómeno y relevancia energética, utilizando el método de transformada rápida de Fourier; ambos gráficos, son mostrados en pantalla de información luego de cada registro. Posteriormente, se exportan variables de interés a archivos de planilla Excel® y planillas MatLab®.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 5.2. Parámetros de ensayo para la adquisición de registros

En el análisis de frecuencias relevantes en el fenómeno se observan valores aproximados a 500Hz, definiendo una frecuencia de adquisición óptima de 1000Hz. Ensayos con ángulo de ataque cero y períodos de muestreo de 2, 5 y 10 segundos de duración, permitieron definir la duración de la muestra adoptada (5 segundos), con un nivel de confianza del 99,7%. En (Tabla 1) se muestran datos obtenidos en estos ensayos de la Presión dinámica,  $P_{din}$ , el Coeficiente de arrastre,  $C_D$ , el Coeficiente de sustentación,  $C_L$ , y sus desviaciones.

Tabla 1: Mediciones de parámetros para distintos períodos de duración de la muestra.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Tiempos de muestreo	2 s	5 s	10 s
Presión Dinámica media	160,10 Pa	160,34 Pa	161,08 Pa
Coeficiente de Arrastre	$0,70 \pm 0,002$	$0,72 \pm 0,001$	$0,71 \pm 0,001$
Desviación Estándar $C_D$	0,030	0,032	0,033
Coeficiente de Sustentación	$0,77 \pm 0,014$	$0,77 \pm 0,007$	$0,87 \pm 0,005$
Desviación Estándar $C_L$	0,204	0,160	0,164

La calibración estática del sistema de medición, es realizada previa y posteriormente al ensayo, con una frecuencia de adquisición de 1000 Hz, 1 segundo de duración y valores de presión de - 50, 0, 50, 100 y 200 Pa.

## 5.3. Condiciones de ensayo

La presión dinámica,  $P_{din}$ , y presión estática,  $P_{est}$ , de referencia, fueron medidas a media altura de la cámara de ensayo en flujo no perturbado, con tubos Pitot-Prandtl y sensor de presión electrónicos Honeywell PC 160. La presión estática en cada toma de presión fue medida con sensor Honeywell PC 160 a través de la válvula secuencial Scanivalve. Adicionalmente, se midieron la temperatura absoluta,  $T$ , (de bulbo seco) y la presión atmosférica,  $P_{atm}$ , para el ajuste de la densidad,  $\rho$ , del aire. En (Tabla 2) se muestran las condiciones de ensayo para cada uno de los ángulos de ataque ensayados.

Tabla 2: Condiciones de ensayo del perfil alar NACA 4412.

	Ángulos de Ataque [°]						
	-7,5	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5
T [K]	293,15	293,15	293,15	294,15	293,65	293,15	293,15
$P_{atm}$ [Pa]	101058,4	101058,4	101058,4	101058,4	101058,4	101058,4	101125,0
$\rho$	1,201	1,201	1,201	1,197	1,199	1,201	1,202
$P_{din}$ [Pa]	156,06	157,30	159,54	160,34	159,65	160,61	161,25
V [m/s]	16,12	16,18	16,30	16,37	16,32	16,35	16,38
Re	160.151	160.786	161.924	161.645	161.635	162.467	162.844



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

Ángulos de Ataque [°] (Continuación)

	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
T [K]	294,15	293,65	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
P <sub>atm</sub> [Pa]	101191,7	101191,7	101191,7	101191,7	101191,7	101191,7	101191,7
ρ	1,199	1,201	1,203	1,203	1,203	1,203	1,203
P <sub>din</sub> [Pa]	161,85	162,44	163,36	163,90	164,39	159,82	158,90
V [m/s]	16,43	16,45	16,48	16,51	16,53	16,30	16,26
Re	162.507	163.153	163.959	164.229	164.476	162.175	161.708

## 6. CALCULOS DE COEFICIENTES DE SUSTENTACION Y ARRASTRE

Las fuerzas resultantes originadas sobre el perfil alar fueron descompuestas en dirección (positiva) paralela y perpendicular a la dirección del viento incidente. La fuerza de sustentación y arrastre neta en un perfil es dada por integración de las presiones en sus áreas tributarias. El método de cálculo por distribución de presiones, para la obtención de los coeficientes de sustentación y arrastre en un cuerpo sometido a un flujo unidireccional, es utilizado por la consistencia numérica observada en los ensayos.

### 6.1. Método de cálculo por Distribución de Presiones

A cada toma se le asigna el área tributaria (Tabla 3), obtenida como la distancia media entre puntos de toma sucesivos y un ancho medio total en la envergadura (Fórmula 1):

$$\text{Ancho medio total " AmT " } = \frac{\text{Envergadura}}{\text{Tomas}} \cong 12 \text{ mm} \quad (1)$$

Tabla 3: Ángulos de la superficie relativos a la cuerda y área tributaria asignada a cada toma.

Tomas (superiores)	Área mm <sup>2</sup>	Ángulo [rad]	Tomas (inferiores)	Area mm <sup>2</sup>	Ángulo [rad]
1	96	1.570796	15	96	-0.14263
2	96	0.50385	16	96	-0.01855
3	96	0.34962	17	96	0.02286
4	96	0.25600	18	96	0.04045
5	96	0.18174	19	138	0.04708
6	96	0.11731	20	180	0.03716
7	138	0.05946	21	174	0.04127
8	180	-0.03545	22	168	0.03954
9	180	-0.08566	23	168	0.03419
10	174	-0.12722	24	168	0.02693
11	168	-0.16136	25	180	0.01834
12	168	-0.19280	26	180	0.01222
13	180	-0.22297			
14	144	-0.25718			



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

Los coeficientes de presión definen como la diferencia de la presión estática, respecto a la presión dinámica del flujo sin perturbar (Fórmula 2) y (Fórmula 3)

$$\Delta p = p_i - p_\infty = \rho \times \left( \frac{v_\infty^2}{2} - \frac{v_i^2}{2} \right) \rho \times \frac{v_\infty^2}{2} \times \left( 1 - \frac{v_i^2}{v_\infty^2} \right) \quad (2)$$

$$C_p = \frac{\Delta p}{\rho \times \frac{v_\infty^2}{2}} = \left( 1 - \frac{v_i^2}{v_\infty^2} \right) \quad (3)$$

La resultante de los coeficientes de presión normal,  $C_n$ , y tangencial,  $C_t$ , son integradas de las contribuciones de los coeficientes de presión de cada una de las tomas (Fórmula 4).

$$C_{n_{Ataq}} = \int_S C_p \times dS_N \quad (4)$$

La expresión discreta para cada una de las 26 tomas de presión a lo largo del extradós e intradós, están dadas por las (Fórmula 5) y (Fórmula 6).

$$C_{n_{Ataq}} = \left[ - \sum_{i=1}^{14} (C_{p_i} \times \cos(\text{Áng}_i) \times \Delta \text{per}_{sup}) \right] \times \frac{1}{c} + \left[ - \sum_{i=15}^{26} (C_{p_i} \times \cos(\text{Áng}_i) \times \Delta \text{per}_{inf}) \right] \times \frac{1}{c} \quad (5)$$

$$C_{t_{Ataq}} = \left[ \sum_{i=1}^{14} (C_{p_i} \times \text{sen}(\text{Ángulo}_i) \times \Delta \text{perim}_{sup}) - \sum_{i=15}^{26} (C_{p_i} \times \text{sen}(\text{Ángulo}_i) \times \Delta \text{perim}_{inf}) \right] \times \frac{1}{c} \quad (6)$$

Los Coeficientes de Sustentación,  $C_L$ , y Arrastre,  $C_D$ , referidos a la dirección del escurrimiento son las resultantes vectoriales de los Coeficientes Normal y Tangencial afectados del ángulo de ataque del perfil para cada situación de muestreo (Fórmula 7) y (Fórmula 8).

$$C_L(\text{Ataq}) = C_{n_{Ataq}} \times \cos(\text{Ataq}) - C_{t_{Ataq}} \times \text{sen}(\text{Ataq}) \quad (7)$$

$$C_D(\text{Ataq}) = C_{n_{Ataq}} \times \text{sen}(\text{Ataq}) + C_{t_{Ataq}} \times \cos(\text{Ataq}) \quad (8)$$

## 7. RESULTADOS

En (Tabla 4) se muestran resultados de los coeficientes normal, tangencial, de sustentación, de arrastre y relación sustentación/arrastre para el perfil NACA 4412 obtenidos para un Número de Reynolds de 164.000.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

# FoDAMI

Tabla 4: Coeficientes normal, tangencial, de sustentación, de arrastre y relación sustentación-arrastre para el perfil NACA 4412.

$A_{\text{taq}}$	-7,5	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5
$C_n$	-0,403	-0,164	0,021	0,191	0,363	0,553	0,729
$C_t$	0,064	0,032	0,048	0,051	0,042	0,021	-0,007
$C_L$	-0,391	-0,161	0,023	0,191	0,361	0,549	0,723
$C_D$	0,116	0,046	0,047	0,051	0,058	0,069	0,088
L/D	-3,377	-3,466	0,489	3,753	6,264	7,911	8,196

$A_{\text{taq}}$	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
$C_n$	0,920	1,105	1,269	1,374	1,391	1,086	1,064
$C_t$	-0,051	-0,113	-0,196	-0,272	-0,307	0,011	0,009
$C_L$	0,915	1,104	1,276	1,393	1,412	1,000	0,960
$C_D$	0,109	0,129	0,139	0,154	0,187	0,425	0,458
L/D	8,365	8,565	9,197	9,060	7,555	2,350	2,097

En gráficos (Figura 4,5) se muestran fuerzas de sustentación, arrastre y relación sustentación/arrastre, obtenidos de los ensayos en canal de aire y los calculados con analíticamente, para distintos ángulos de ataque.

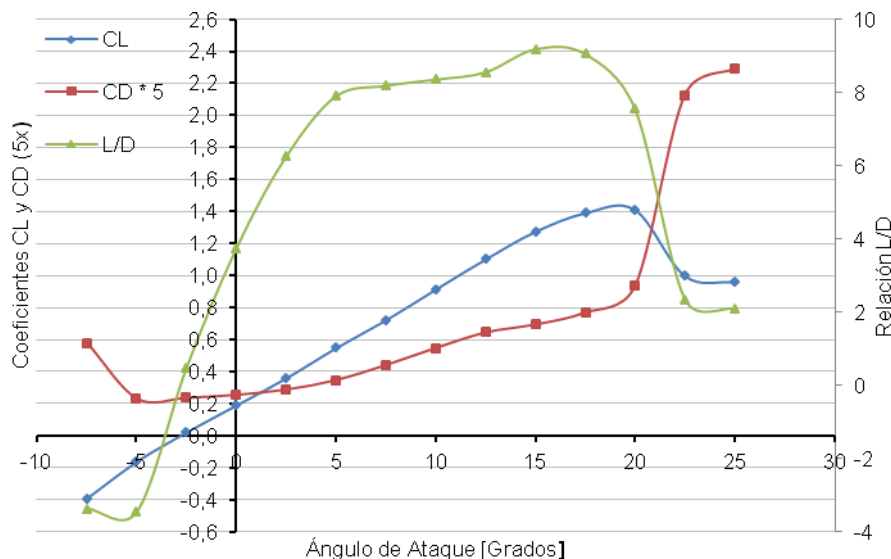


Figura 4: Coeficientes aerodinámicos obtenidos en canal de aire del perfil NACA 4412.

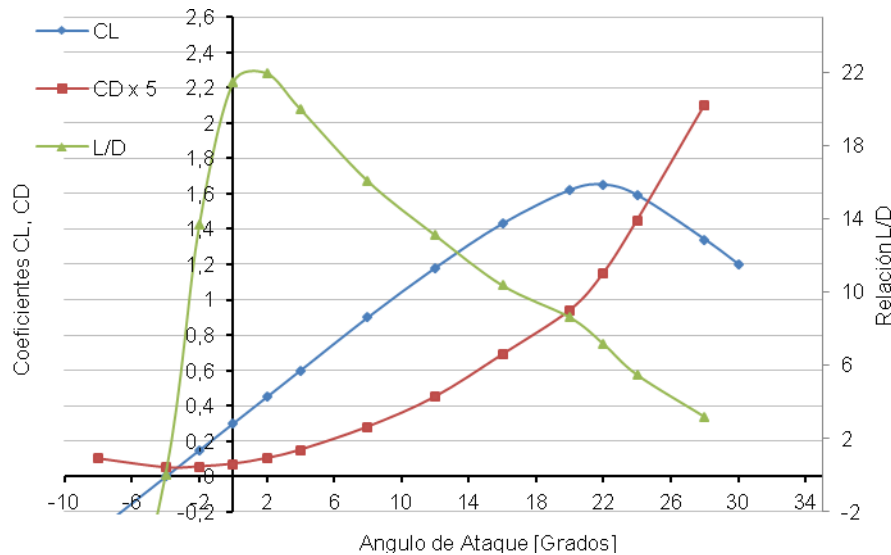


Figura 5: Coeficientes aerodinámicos teóricos del perfil NACA 4412.

## 8. DISCUSIONES

Los espectros de frecuencias en cada uno de las tomas de presión, revelan ruido eléctrico de 50 y 200 Hz, generando algún nivel de error en las lecturas; una banda de ruido mecánico con frecuencias inferiores a 25 Hz, que influye en la conformación de una capa límite de transición, fuera del alcance del presente trabajo.

El comportamiento de los coeficientes  $C_L$ ,  $C_D$ , obtenidos de los ensayos, comparado con los obtenidos de cálculos analíticos, muestran algunas diferencias en magnitudes; en tanto, la relación  $C_L/C_D$  muestra diferencias en valores y evolución. Se observa que el Coeficiente de Arrastre aporta mayor influencia en la diferencia encontrada en el Coeficiente  $C_L/C_D$ . El desprendimiento observado en los ángulos de ataque entre  $21,3^\circ$  y  $-6,3^\circ$  se caracteriza por vibraciones con centro en el eje de vinculación del perfil alar. El análisis de los espectros de frecuencias permite discriminar zonas de aparición del desprendimiento de flujo en el perfil a ángulos de ataque mayores que el ángulo crítico. Los Vórtices de Karman, generados en el borde de salida, presentan frecuencias predominantes entre 10 y 100 Hz, con energía decreciente.

## 9. CONCLUSIONES

El coeficientes  $C_L$  presenta un error sistemático negativo, en tanto, el coeficiente  $C_D$  uno positivo; las curvas siguen la misma tendencia teórica en función de los ángulos de ataque del perfil alar, aunque los valores absolutos muestran diferencia.

La relación Sustentación/Arrastre,  $L/D$ , presenta un comportamiento distinto como resultado de la desviación del arrastre respecto a los datos teóricos; las discrepancias halladas tienen su principal



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

causa en la condición de escurrimiento del canal de aire, con Numero de Reynolds de 164.000, sustancialmente menor que para los cálculos teóricos. Para cuerpos fuselados, donde domina los efectos de fricción, valores pequeños de Reynolds generan altos efectos viscosos que alteran la capa límite del modelo a escala reducida respecto a los modelos teóricos de NACA y, en consecuencia, la sustentación y el arrastre. Una capa límite laminar de mayor espesor induce la posibilidad de desprendimiento anticipado del flujo; este desprendimiento, por el aumento del ángulo de ataque difiere negativamente respecto el teórico en aproximadamente 0,7 grados. Adicionalmente, por efecto de la baja velocidad del escurrimiento en el canal de aire, no se alcanza a formar la capa límite turbulenta angosta necesaria para soportar el gradiente de presiones.

De los resultados obtenidos y la comparación gráfica, el software desarrollado para el registro, almacenamiento y procesamiento de datos demostró estabilidad aceptable a lo largo de su implementación en ensayos de escala reducida. La adquisición automatizada de datos a altas frecuencias permite realizar análisis de fenómenos altamente turbulentos y no estacionarios con alta precisión y confiabilidad.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] John D. Holmes, Wind Loading of Structures, 2<sup>o</sup>.Edition, Tylor & Francis, London, UK, 2007.
- [2] Tom Lawson, Building Aerodynamics, Imperial College Press, London, UK, 2001.
- [3] Joaquim Blessmann, Aerodinâmica das Construcões 1<sup>o</sup> Edição SAGRA 1983.
- [4] Gisella Alvarez, Guillermo Castro, Jorge Marighetti, Adrián Wittwer, Mario De Bórtoli, Relevamiento en vacío canal de aire, Facultad de Ingeniería UNNE, Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, 2003 (T 052).
- [5] Hans-Petter Halvorsen - DAQ in MatLab. Telemark University College Department of Electrical Engineering, Information Technology and Cybernetics.
- [6] K. Ogata - Ingeniería de Control Moderna 5<sup>a</sup> Ed Prentice Hall Pearson Educación
- [7] Boylestad y Nashelsky - Electrónica Teoría de Circuitos 6<sup>a</sup>Ed / Datsheet 4N25 - Fairchild Semiconductor Corporation.

## Agradecimientos

A los señores Beatriz Iturri, Julián Ortiz, y Amadeo Arrieta. Los autores de este trabajo desean agradecer además a la SGCyT de la Universidades Nacional del Nordeste y la Universidad Tecnológica Nacional (FRRe).