

TUNEL DE VIENTO: DESARROLLO DE SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CONTROL COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO EN ESTRUCTURAS Y PERFILES AERODINÁMICOS PARA MEJORARLA COMPETITIVIDAD EN PROYECTOS DE INGENIERÍA¹

Blanco Enzo²; Gonzalez Facundo³; Haupt María⁴

¹ Trabajo de Investigación, Proyecto del Programa de Incentivos Código 16I132

² Integrante de Proyecto, Blanco Enzo, blancoenzomatias@gmail.com

³ Co - Director de Proyecto, Ingeniero Electromecánico, facundog@fio.unam.edu.ar

⁴ Director de Proyecto, Ingeniero Electromecánico, mariacristinahaupt@gmail.com

Resumen

El presente trabajo hace referencia a la instrumentación del túnel de viento instalado en la Facultad de Ingeniería, en el cual se llevan a cabo trabajos de investigación mediante la utilización del mismo con modelados de perfiles aerodinámicos y la interacción del viento incidente con estructuras civiles. El proyecto abarca la instalación de un sistema de medición de velocidad del flujo de aire, el relevamiento del perfil de velocidades dentro del túnel, y el diseño, implementación y evaluación de un sistema de medición de fuerzas en perfiles aerodinámicos

Palabras Clave: *Túnel de Viento - Instrumentación - Medición de Parámetros*

Introducción

Dentro de las aplicaciones del túnel de viento para análisis experimental en modelos, dos son los campos de investigación que se destacan, ensayos aeronáuticos y ensayos de ambiente externo.

Los ensayos aeronáuticos son aquellos que determinan parámetros aerodinámicos como coeficientes de sustentación, arrastre/momento y distribución de presiones alrededor de un perfil aerodinámico.

Desde el punto de vista de ensayos de ambiente externo se refiere al efecto que produce el viento atmosférico sobre las estructuras civiles. También es posible estudiar la difusión de gases de industria en la atmósfera.

Para poder evaluar adecuadamente los parámetros cuantitativos envueltos en la experimentación con el túnel de viento se hace necesario contar con un sistema integral de medición de parámetros con un nivel adecuado para laboratorios, el cual no posee actualmente el túnel. Además se entiende que deberán ser desarrollados diferentes tipos de subsistemas para ser utilizados en la gran variedad de ensayos que será posible realizar en el túnel.

El trabajo tiene como objetivo general la adecuación del túnel de viento instalado en la Facultad de Ingeniería, para poder llevar a cabo trabajos de investigación mediante la utilización del mismo como modelado de perfiles aerodinámicos y la interacción del viento incidente con estructuras civiles.

Los objetivos específicos del trabajo son:

- Instrumentar el túnel de viento para adquirir y controlar diferentes parámetros.
- Desarrollo de un sistema de medición de fuerzas en perfiles aerodinámicos.
- Determina la distribución espacial de velocidades media.

Metodología

Esta sección, se dividirá en dos partes. La primera de ellas, tratará el ensayo de relevamiento de perfil de velocidades en el túnel y la segunda de ellas tratará el ensayo de fuerza de sustentación.

1- Relevamiento perfil de velocidades

El relevamiento se realizó con la cámara de medición del túnel instalado en la Facultad de Ingeniería (Figura 1) sin ningún cuerpo de prueba dentro. Mediante esto, se determinó las características del comportamiento del flujo dentro del mismo y el perfil de velocidades.



Figura 1: Túnel de viento Facultad de Ingeniería

El túnel, es un canal de circuito abierto cuya longitud total es de 7,2 m, su cámara de ensayos consiste en un conducto de sección cuadrada de 0,5 m de lados y de 0,9 m de longitud, como puede apreciarse en la figura 2.



Figura 2: Cámara de ensayos

Para el relevamiento, se empleó tubos de Pitot y un sensor iTarget VP6 series de presión diferencial como se puede apreciar en la figura 3. Los datos técnicos del mencionado sensor son expuestos en la tabla 1.



Figura 3: Tubo de Pitot y sensor de presión diferencial

Tabla 1: Datos técnicos sensor VP6 series de presión diferencial

Pressure range	0 ~ 100Pa ~ 1.0MPa
Accuracy	±0.1%FS, ±0.25%FS, ±0.5%FS, ±1.0%FS optional
Power supply	Transmitter: +24Vdc, +12Vdc, +5Vdc
Output	0/0.5/1.0-4.0/4.5/5.0V/10V(3 wires), 4-20mA(2 or 3 wires)
loading Capacity(Transmitter)	Current output model $\leq 500 \Omega$; Voltage output model $\geq 100k \Omega$
zero offset	±0.5%FS
FS offset	±1.0%FS
Compensation temperature	-10°C~50°C
Operation temperature	-20°C~75°C, $\leq 85\%RH$
Storage temperature	-40°C~85°C, $\leq 95\%RH$
Safe overpressure	150%
limit overpressure	200%
Temperature drift	0.02%FS/°C
Long-term stability	±0.2%FS/year
Housing	316L Stainless steel

El conjunto (tubo de pitot, sensor) se montaron sobre tornillos sin fin (encima y debajo de la cámara de ensayo) solidarios a una manivela cómo se aprecian en las figuras 4 y 5.



Figura 4: Disposición tubos de Pitot dentro de la cámara de ensayo



Figura 5: Tornillo sin fin y manivela

Montados el conjunto (tubo de pitot, sensor), estos fueron conectados a un adquisidor de datos Quantum MX840 (figura 6) con los canales de medición configurados para entrada de 0-10V, para así mediante la PC y el programa Catman Easy AP extraer los valores de las mediciones efectuadas.



Figura 6: Adquisidor de datos Quantum MX840

Al momento del ensayo, se midieron las condiciones ambientales (temperatura, presión), en base a estos parámetros, se determinó la densidad del aire.

La determinación de esta variable es de suma importancia y ello se debe a que esta tiene gran incidencia en la velocidad del fluido al desplazarse dentro de la cámara de medición. Dicha densidad, se determinó en base a la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{P * M}{R * T}$$

Donde:

- ρ : Densidad del aire a las condiciones ambientales en kg/m^3 .
- P: Presión ambiente en Pa.
- M: Masa molar $0,02885 \frac{\text{Kg}}{\text{Mol}}$.
- R: Constante del gas $8,31 \frac{\text{J}}{\text{K} * \text{Mol}}$.
- T: Temperatura ambiente dada en Kelvin.

Se establecieron grillas de 5x5cm dentro de la cámara de medición del túnel y se relevó punto a punto como lo indica la figura 7. El relevamiento se efectuó con dos tubos de pitot (encima y debajo de la cámara de medición), en el cual el tubo superior partía (en su punto de medición) a una distancia vertical de 5cm del panel superior de la cámara y a una distancia horizontal de 5cm del panel lateral. El mencionado tubo se desplazó en forma horizontal con la manivela (figura 5) y en forma vertical mediante la guía metálica como la expuestas en la figura 4 y 5. De igual forma se realizó esto con el tubo inferior, pero este partió a una distancia de 5cm del panel inferior del tubo y a una distancia horizontal de 5cm del panel lateral.

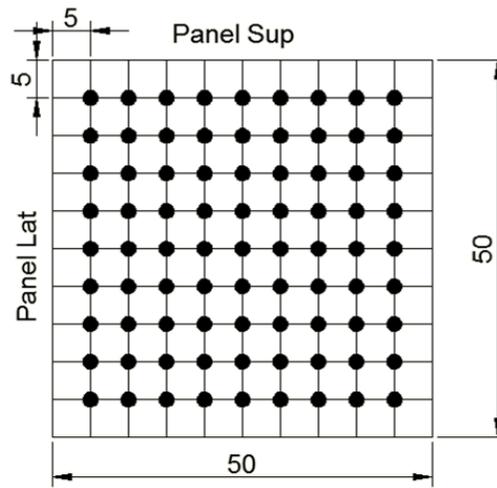


Figura 7: Grilla medición

Se realizó el barrido de toda la grilla (figura 7) relevando las velocidades variando la frecuencia (Hz) del motor impulsor como lo indica la tabla 3.

Tabla 3: Diferentes frecuencias empleadas en los ensayos

Medición	Frecuencia (Hz)
1	53,3
2	50,0
3	45,0
4	40,0
5	35,0
6	30,0
7	25,0
8	20,0
9	15,0
10	10,0
11	5,0

2- Fuerza de sustentación

Se realizó el ensayo mediante el empleo de un sensor strain gage montado sobre el elemento que se observa en la figura 8. Este elemento se deforma bajo la acción de la fuerza de sustentación que experimenta el perfil.

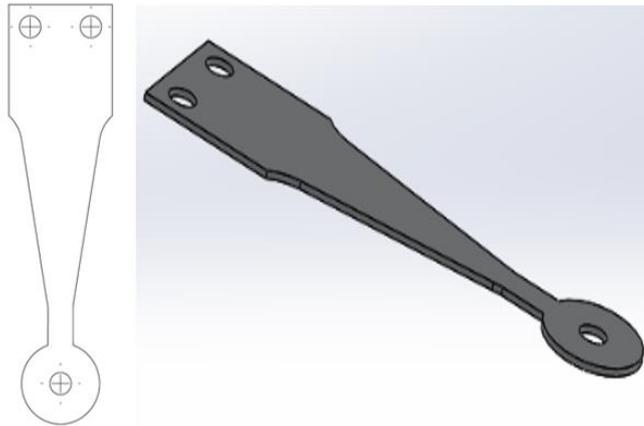


Figura 8: Elemento deformante bajo la acción de la fuerza de sustentación

Se optó por este elemento (Figura 8) y su geometría dado que esta corresponde al diseño de una probeta en viga cantilevér, cuyo detalle más importante es que los bordes de la sección de ensayo convergen hacia el centro de carga, en donde está montada la varilla que conecta al perfil aerodinámico.

En la figura 9 se aprecia el montaje del dispositivo por el cual se optó para el ensayo. En ella se observa el conjunto de elementos que constituyen el sistema de medición. Estos elementos son:

- Varilla roscada de 6mm de sección [1]: Vincula la viga cantilevér (fuera de la cámara de medición) con el soporte del perfil. Además permite mediante la mariposa (encima viga) y tuerca (debajo viga) regular la altura a la cual se monta el perfil dentro de la cámara de medición.
- Viga cantilevér: Elemento deformable producto de la fuerza de sustentación transmitida por la varilla.
- Strain Gages: Sensor montado sobre la viga anteriormente descrita.
- Apoyo viga: El extremo de la viga está colocado entre dos elementos que ejercen presión sobre viga y la mantienen firme. El elemento superior es un perfil rectangular de 2 mm de espesor y sección 20x45mm, en medio se encuentra la viga y el elemento inferior es un perfil de espesor de 20mm y sección 20x45mm. Los tres elementos (viga, perfil superior e inferior) están unidos a través de una varilla roscada que atraviesa los tres elementos y la cámara de medición del túnel. Por encima del conjunto se los sujeta con una mariposa y por debajo (interior de la cámara de medición) con tuerca.
- Mariposas: Son empleadas para la sujeción fuera de la cámara de medición ya que son de fácil montaje a mano.

Dentro de la cámara de medición se cuenta con los siguientes elementos:

- Varilla roscada: Ídem descripción [1].
- Marco soporte: Marco de aluminio destinado a vincular la varilla roscada que ingresa a la cámara con el perfil.

- Perfil: Este elemento estará sometido a la fuerza de sustentación y a través de los diferentes elementos vinculados entre si transmitirá esta fuerza al sensor (Strain Gages).
- Indicador de ángulo: El elemento está vinculado al perfil e indica el ángulo de inclinación que tiene este (ángulo de ataque).



Figura 9: Disposición de los elementos en el túnel

La disposición anteriormente descrita presenta las siguientes ventajas:

- Bajo costo.
- Disponibilidad de medios para la construcción y montaje.
- Sencillez.
- Capacidad de conexión a PC y gran almacenamiento de datos en forma digital.
- Confiabilidad en los datos medidos.

Se montaron los elementos como se apreció en la figura 9 y se realizó la alineación tanto vertical de dispositivo de sujeción como la horizontal mediante el nivel digital Skil (Figura 10).



Figura 10: Nivel digital Skil

Los diferentes elementos y su disposición para la realización de la medición, se montaron cómo es posible observar en la siguiente figura.



Figura 11: Ensayo fuerza de sustentación

En la figura 11 se puede apreciar el sensor Strain Gages (anteriormente mostrado en mayor detalle en la figura 9) que estará conectado al adquirente ubicado sobre la cámara de medición y de este a la notebook, para así visualizar las mediciones realizadas.

Además se montaron los tubos de pitot (mayor detalle figura 4) para monitorear y controlar la velocidad (mediante variador de velocidad del motor impulsor del ventilador). Estos tubos están conectados al adquirente (figura 6) y mediante conexión wifi, se pueden visualizar en la notebook.

Inconveniente: Al momento de realizar el ensayo, se produjo el siguiente inconveniente.

Al aumentar la velocidad del aire dentro de la cámara de medición, se producía inestabilidad en la estructura del sistema de medición. Esta inestabilidad tenía su origen en la fuerza de arrastre que se producía sobre el conjunto perfil – soporte (figura 9) y al ser la varilla rígida, esta fuerza de arrastre producía deformación en la viga cantiléver, afectando significativamente la medición de la fuerza de sustentación.

Solución propuesta: Se optó por vincular mecánicamente al perfil por encima y por debajo de este con igual disposición y elementos de medición tanto encima como por debajo cómo es posible apreciar en la figura 12. Con esta disposición, el conjunto de todos los dispositivos vinculados mecánicamente, solo tienen la posibilidad de movimiento vertical, desafectándose así la componente horizontal de la fuerza de arrastre.



Figura 12: Dispositivos de medición

Como se aprecia en la figura 12, el nuevo sistema cuenta con dos vigas cantilever y dos sensores Strain Gages, en la cual la fuerza neta ejercida sobre el perfil, será la suma de lo registrado por ambos sensores en forma independiente.

Al momento del ensayo se realizaron incrementos de velocidad en la velocidad del viento mientras se mantuvo constante el ángulo de ataque del perfil, posteriormente con un nuevo ángulo de ataque se repetía nuevamente el barrido de velocidades. Un resumen de estos ensayos son expuestos en la sección anexo tabla 4.

La deformación producida en los sensores debida a la fuerza de sustentación están dada en $\frac{\mu m}{m}$ y se debe relación esta deformación con dicha fuerza.

Según Hoffmann (1989) la relación entre el momento flector y deformación en una viga sometida a flexión es:

El momento flector al cual se encuentra sometida da viga es:

$$M_b = \sigma_b W_b$$

Donde:

- M_b : Momento flector de la viga.
- σ_b : Tensión de flexión.
- W_b : Modulo resistivo a la flexión.
- A su vez σ_b lo podemos calcular como:

$$\sigma_b = 0.5 \varepsilon_a E$$

Donde:

- σ_b : Tensión de flexión.
- ε_a : Deformación Indicada por el sensor.

- E : Modulo elástico de la viga cantilevér

Además para W_b la bibliografía propone la siguiente forma de cálculo según su sección transversal como se indica en la figura 13.

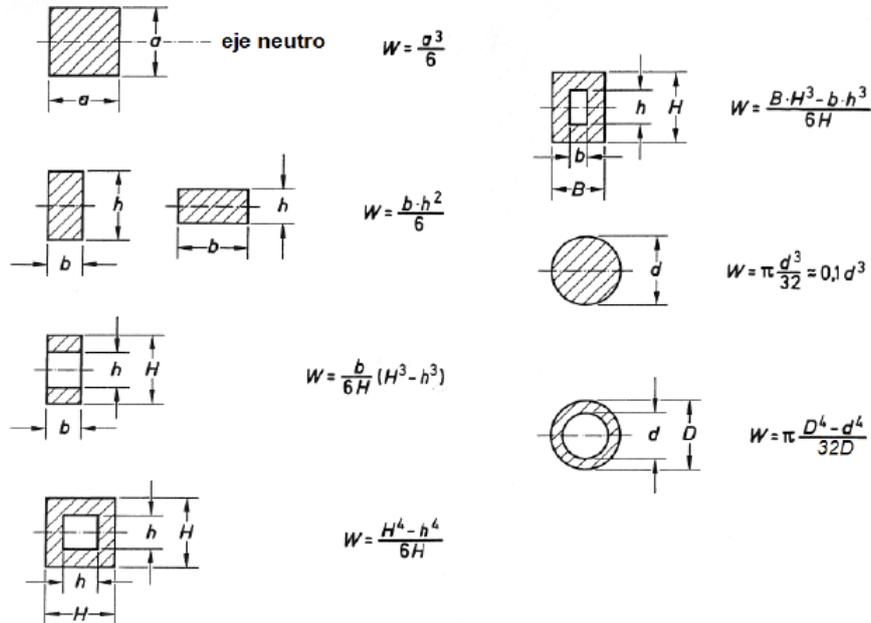


Figura 13: Modulo resistente a flexión para algunas secciones transversales

Para el caso planteado.

$$W_b = \frac{bh^2}{6}$$

Las vigas cantilevér presentan las siguientes dimensiones:

$$b: 0,015m$$

$$h: 0,002m$$

En base a lo descrito anteriormente, se calcula el momento flector al que se encuentra sometida la viga producto de la fuerza de sustentación.

Para poder determinar la fuerza de sustentación, se toma la distancia desde el centro de carga de la viga (centro de la varilla roscada) hasta el punto medio del sensor y con ello descomponemos la fuerza.

$$M_b = Fd$$

Donde:

- M_b : Momento flector de la viga en Nm.
- F : Fuerza de sustentación en N.
- d : Distancia centro de carga al sensor en m.

En la práctica se utilizan coeficientes adimensionales que representan la efectividad de la forma de un cuerpo para producir sustentación y se usan para facilitar los cálculos y los diseños.

El modelo matemático de la fuerza de sustentación es:

$$L = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * A * C_l$$

- L es la fuerza de sustentación en N.
- ρ es la densidad del fluido, en kg/m^3 .
- V es la velocidad, en m/s.
- A es el área de referencia del cuerpo (también llamado "superficie alar"), representado por m^2 .
- C_l es el coeficiente de sustentación.

En base a lo anteriormente expuesto es posible determinar el coeficiente de sustentación.

Resultados y Discusión

Al igual que en la sección anterior, en esta se procederá de igual forma al exponer los resultados y discusiones por separado.

1- Relevamiento perfil de velocidades

En base a lo expuesto en la sección anterior, se determinaron los diferentes perfiles de velocidad a las diferentes frecuencias (Hz) y estos resultados fueron graficados mediante el software Matlab. A continuación se exponen dos de las once mediciones detalladas en la tabla 3.

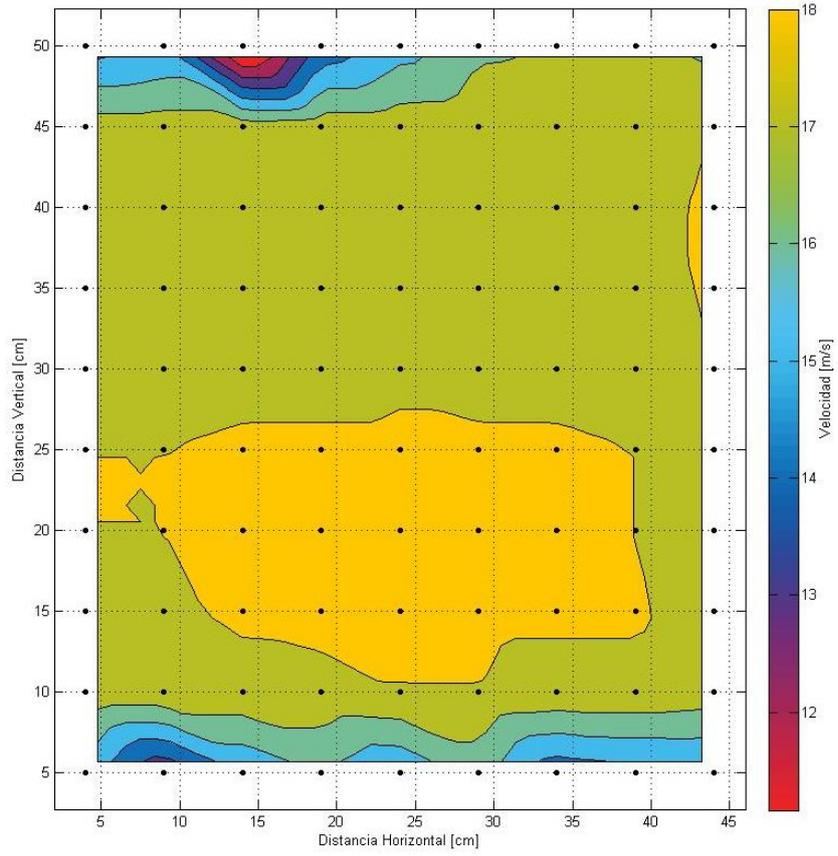


Figura 14: Perfil de velocidades 53,3Hz

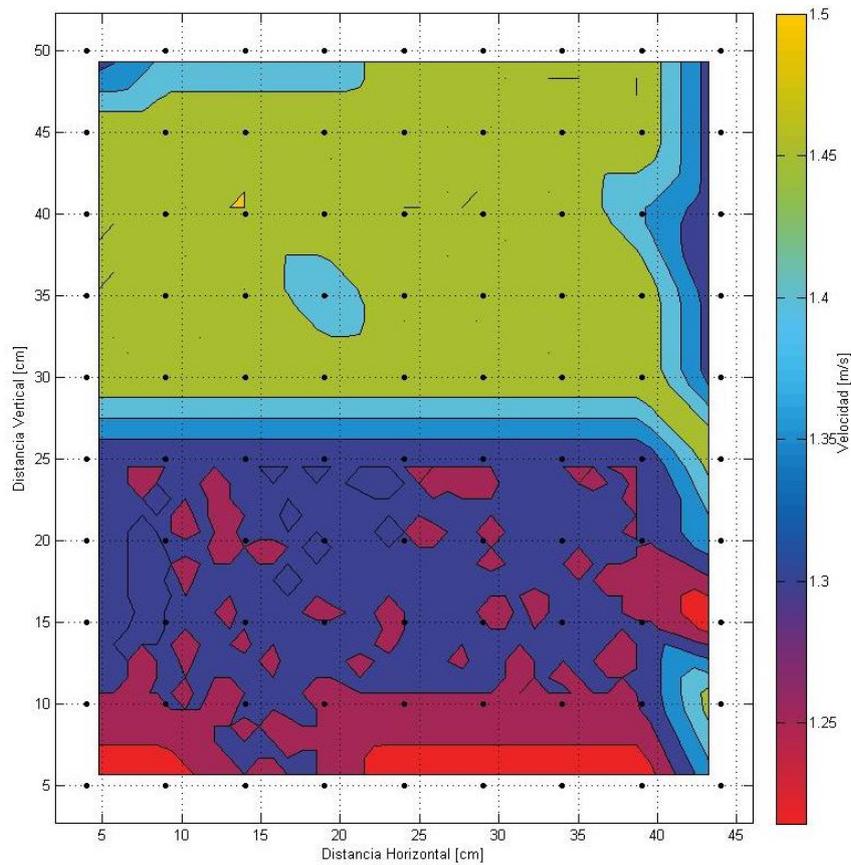


Figura 15: Perfil de velocidades 5,0Hz

Las anteriores figuras se representan el relevamiento de la cámara de medición a 53,3Hz y 5Hz. La figura 14 corresponde a la máxima velocidad que puede alcanzar el motor impulsor del ventilador. En la figura 14, se aprecia que en la mayor parte de la superficie la velocidad se mantiene en torno a los 17 m/s, teniendo una variación porcentual de 11% en su campo de medición. Es posible observar que existen puntos particulares en los cuales la velocidad se encuentra en 12m/s. Estos son debidos a discontinuidades en la estructura del interior de la cámara de medición del túnel.

En cuanto a la figura 15, esta corresponde a la mínima velocidad que puede alcanzar el motor impulsor. En la figura 15, es posible apreciar que en la mayor parte de la superficie, la velocidad se mantiene en torno a los 1,3m/s, teniendo una variación porcentual de la velocidad de 13% en su campo. Al contrario de lo que ocurría en el ensayo de máxima velocidad, en este, el rango de velocidad es más acotado y las irregularidades del túnel no tienen gran incidencia debido a la baja turbulencia que se genera debido al paso del aire a baja velocidad.

2- Fuerza de sustentación

En base a lo expuesto y detallado en la sección anterior, se realizaron los diferentes ensayos y cuyos resultados en detalle son expuestos en la sección anexo tabla 4.

En la siguiente figura se observa la variación del coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque para diferentes velocidades dentro de la cámara de medición.

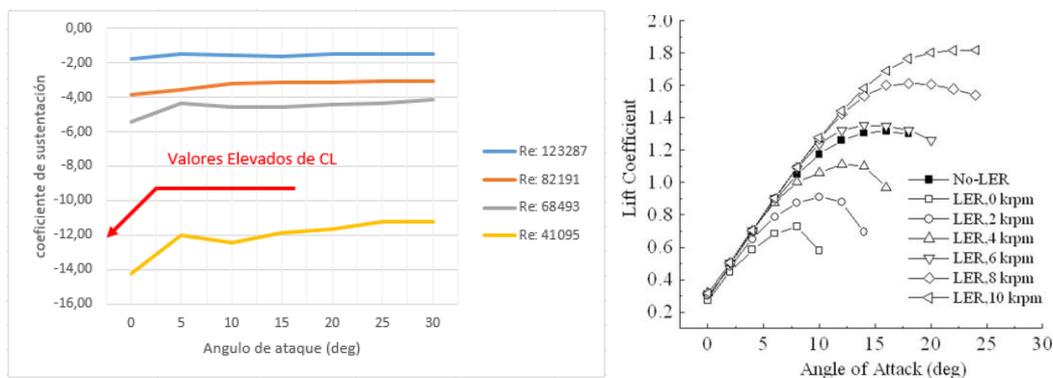


Figura 16: Variación del coeficiente de sustentación con el ángulo de ataque IZQ. Medido DER. Referencia

En la anterior figura se puede observar las siguientes cuestiones:

- El coeficiente de sustentación se incrementa conforme desciende la velocidad del fluido dentro de la cámara de medición.
- La tendencia de las diferentes curvas es a continuar aumentando el coeficiente de sustentación conforme se continúe incrementando el ángulo de ataque, lo cual no es verdad, ya que a partir de cierto ángulo, el coeficiente de sustentación comienza a reducirse.
- Se observan valores de Cl de muy alta magnitud con lo que se deben analizar la medición realizada

Conclusiones

En base a lo desarrollado podemos concluir que la distribución de velocidades dentro de la cámara de medición del túnel tiene gran importancia ya que la velocidad media, será la base para la realización de cálculos futuros. Además de ello, se apreció que la distribución espacial de velocidad se conserva en un rango acotado, manteniendo una variación porcentual del orden del 10%. De esta manera es posible emplear perfiles de gran variedad de tamaño o desplazar los mismos dentro de la cámara de medición sin alterar los resultados debido a la no homogeneidad de la distribución de velocidades. El relevamiento de los campos de velocidad en el túnel también permiten identificar las regiones de velocidad uniforme para poder compararla con el fenómeno de bloqueo del túnel de viento en donde se determina el tamaño máximo del modelo a introducir en el túnel a partir de la superficie activa de la cámara.

En cuanto al ensayo para la determinación del coeficiente de sustentación, podemos concluir que estos no fueron los esperados. Esta discrepancia entre lo obtenido con lo esperado se debe a varias cuestiones, como ser:

- Las vigas cantilever fueron mecanizadas por proveedores locales. En los proveedores donde se realizó la mecanización no se obtuvieron elementos con buena precisión y además de ello, el espesor de la viga era elevando, tornando al sistema de medición poco sensible.
- El sistema propuesto como solución al inconveniente de la fuerza de arrastre, no logro desafectarlo en su totalidad, continuando cierto error en las lecturas de la fuerza de sustentación.

Se propone como mejora a futuro, realizar el mecanizado de las vigas cantilever con otra técnica de corte como ser electroerosión por hilo, además de ello, se debería rever el material empleado en la viga y el espesor adoptado, para así lograr un sistema de medición con mayor sensibilidad.

Otro aspecto a tener en cuenta como mejora a futuro es establecer una estructura o sistema que transmita en forma confiable la fuerza de sustentación del perfil al sensor, desafectando en su totalidad la incidencia de otras variables como ser la fuerza de arrastre.

Referencias

- MOORE, Principios de análisis experimental de tensiones mecánicas (HASA Buenos Aires 1956).
- BARLOW, J.B; RAE,W.H.; POPE,A.; Low-speedwindtunneltesting (Wiley – England 1999).
- KARL HOFFMANN, An introduction to measurements using strain gage (Hottinger Baldwin Messtechnik GnbH, 1989).

Anexo

Tabla 4: Ensayo coeficiente de sustentación

Frecuencia (Hz)	Velocidad (m/s)	Angulo Ataque (Grados)	Strain Gages Sup ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gages Inf ($\mu\text{m/m}$)	F Sup (N)	F Inf (N)	F Net (N)	C	Re
52.3	18	0	-64.26	-9.28	-1.50	-0.22	-1.72	-1.77	123287.67
52.3	18	5	-65.22	4.33	-1.52	0.10	-1.42	-1.46	123287.67
52.3	18	10	-67.03	2.24	-1.56	0.05	-1.51	-1.56	123287.67
52.3	18	15	-66.37	-0.23	-1.55	-0.01	-1.55	-1.60	123287.67
52.3	18	20	-63.95	1.45	-1.49	0.03	-1.46	-1.50	123287.67
52.3	18	25	-62.77	0.15	-1.46	0.00	-1.46	-1.50	123287.67
52.3	18	30	-61.49	-0.38	-1.43	-0.01	-1.44	-1.49	123287.67
35.4	12	0	-57.57	-13.09	-1.34	-0.31	-1.65	-3.82	82191.78
35.4	12	5	-65.31	-0.85	-1.52	-0.02	-1.54	-3.57	82191.78
35.4	12	10	-57.65	-1.19	-1.35	-0.03	-1.37	-3.18	82191.78
35.4	12	15	-54.57	-2.98	-1.27	-0.07	-1.34	-3.11	82191.78
35.4	12	20	-54.53	-2.89	-1.27	-0.07	-1.34	-3.10	82191.78
35.4	12	25	-52.13	-4.08	-1.22	-0.10	-1.31	-3.04	82191.78
35.4	12	30	-51.74	-4.81	-1.21	-0.11	-1.32	-3.05	82191.78
30	10	0	-56.07	-13.37	-1.31	-0.31	-1.62	-5.40	68493.15
30	10	5	-54.11	-1.55	-1.26	-0.04	-1.30	-4.33	68493.15
30	10	10	-56.3	-2.69	-1.31	-0.06	-1.38	-4.59	68493.15
30	10	15	-53.59	-4.97	-1.25	-0.12	-1.37	-4.55	68493.15
30	10	20	-51.96	-4.75	-1.21	-0.11	-1.32	-4.41	68493.15
30	10	25	-49.7	-5.88	-1.16	-0.14	-1.30	-4.32	68493.15
30	10	30	-48.41	-5.18	-1.13	-0.12	-1.25	-4.17	68493.15
17.6	6	0	-53.8	-11.9	-1.26	-0.28	-1.53	-14.19	41095.89
17.6	6	5	-49.74	-5.7	-1.16	-0.13	-1.29	-11.98	41095.89
17.6	6	10	-52.13	-5.42	-1.22	-0.13	-1.34	-12.43	41095.89
17.6	6	15	-49.03	-6.03	-1.14	-0.14	-1.28	-11.90	41095.89
17.6	6	20	-47.79	-6.06	-1.12	-0.14	-1.26	-11.63	41095.89
17.6	6	25	-45.14	-6.74	-1.05	-0.16	-1.21	-11.21	41095.89
17.6	6	30	-45.23	-6.55	-1.06	-0.15	-1.21	-11.19	41095.89