



4^{to} Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica



ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO MAGNUS SOBRE CUERPOS CILÍNDRICOS DE SECCIÓN TRIANGULAR

S. Pezzotti ^a, V. Nadal Mora ^a, A. Sanz Andrés ^b, M. Knoblauch ^c

^aUIDET-GTA-GIAI – Dto. de Aeronáutica - Facultad de Ingeniería – UNLP. Calle 116 e/ 47 y 48 - (1900). La Plata – Provincia de Buenos Aires – Argentina.

^bInstituto Universitario de Microgravedad Ignacio Da Riva – ETSI Aeronáuticos – UPM – Madrid – España.

^cDto. de Aeronáutica - Facultad de Ingeniería – UNLP. Calle 116 e/ 47 y 48 - (1900). La Plata – Provincia de Buenos Aires – Argentina.

Palabras claves: Efecto Magnus, estudio experimental, túnel aerodinámico.

Resumen

La presente publicación comprende el desarrollo de diferentes ensayos experimentales realizados con el fin de determinar las características aerodinámicas asociadas al efecto Magnus en cuerpos cilíndricos de sección triangular. Los ensayos se realizaron en un túnel de viento de circuito abierto. Los modelos ocupaban todo el alto de la sección de prueba. Se desarrolló una metodología de ensayo.

Se caracterizaron dos cuerpos de sección triangular, uno con aristas afiladas y otro con aristas redondeadas. Ambos cuerpos fueron ensayados a diferentes velocidades de la corriente libre y diferentes velocidades de giro, con el objeto de estudiar la influencia de cada una de las mencionadas velocidades en relación al efecto Magnus.

Los parámetros medidos fueron las fuerzas de sustentación y resistencia aerodinámicas, la velocidad de rotación de los modelos y la velocidad de la corriente en el túnel; además de las dimensiones de los modelos.

Los resultados se presentan relacionando los coeficientes aerodinámicos C_L y C_D en función de la relación de velocidades (velocidad tangencial en la superficie del modelo/velocidad de la corriente) u/v .

Por otra parte se realizaron visualizaciones del flujo, utilizando iluminación estroboscópica, humo y fotografías. Estos ensayos permitieron determinar la configuración del flujo en el entorno de los cuerpos, y relacionar los patrones del flujo con las curvas de C_L y C_D vs. u/v .

Se concluye que el redondeo de las aristas genera mayores valores de C_L y menores valores de C_D para un dado valor de u/v , lo cual se explica analizando los patrones del flujo, en particular los tamaños y ubicación de los torbellinos generados por las aristas de los cuerpos, y el ancho de la estela.

1. INTRODUCCIÓN

Se denomina efecto Magnus al fenómeno físico en el cual un cuerpo en rotación inmerso en una corriente de aire experimenta una fuerza de sustentación. Dicho efecto fue llamado así por ser Heinrich Gustav Magnus (1802 – 1870) el primer investigador que ha estudiado este fenómeno en 1851.

Esta fuerza de sustentación o efecto Magnus puede tener un efecto importante en el movimiento de un cuerpo en rotación que se desplaza en un fluido. Es el causante de la desviación de la trayectoria de proyectiles que rotan sobre su eje longitudinal (para lograr mayor estabilidad), hecho que motivó los estudios de Magnus. También es posible observarlo en las trayectorias de pelotas de tenis, golf, fútbol y otros deportes.

Existen múltiples potenciales aplicaciones del estudio propuesto, como cohetes o lanzadores espaciales, proyectiles aéreos (antigranizo, bélicos, etc.), sondas atmosféricas, objetos arrastrados por el viento en tornados o vendavales, y su movimiento y trayectoria, el vuelo del balasto en las inmediaciones de las vías del tren de alta velocidad, la propulsión de buques, sistemas de hipersustentación en perfiles alares, etc.

El presente trabajo aborda el estudio experimental del efecto Magnus para cuerpos cilíndricos de tres caras.

1.1. Estado del arte

Seifert [1] realiza una publicación en la cual se presenta una compilación de los estudios del efecto Magnus a través de la historia, describiendo ensayos, aplicaciones en aeronáutica y náutica, y presentando ecuaciones y curvas útiles para la presente publicación.

Los primeros estudios del efecto Magnus han sido realizados sobre cilindros circulares. En 1925, Betz [2] publica en un reporte N.A.C.A un estudio relacionado con el “Rotor de Flettner”, donde se describen los ensayos realizados sobre un cilindro en rotación inmerso en una corriente de aire.

L. Prandtl en 1926 [3] amplía el trabajo de Betz y realiza una publicación en la Revista “Die Naturwissenschaft” Vol. XIII, relacionada a la aplicación del efecto Magnus para la propulsión de barcos. En la misma hace un análisis de flujo potencial alrededor de un cilindro liso con circulación. Así mismo, la publicación presenta ensayos experimentales de visualización de flujo donde pueden observarse el flujo detrás de un cilindro en rotación sometido a una corriente de aire.

Miller [4] en 1979 presenta una publicación basada en ensayos de un cilindro con vanos para generar autorrotación con la corriente libre. El mismo estaba equipado con una gran cantidad de tomas de presión a lo largo de su superficie y se determinaron los coeficientes de presión C_p sobre el cuerpo en función de su posición y de las velocidades de giro y de la corriente. El estudio incluye una visualización de flujo alrededor del cuerpo, interesante para comprender los desprendimientos.

Cuevas *et al.* [5] han realizado una publicación donde se calcula el efecto Magnus para un cilindro de manera teórica, utilizando un modelo de flujo potencial para calcular su expresión y se expone como se relaciona ésta con el desarrollo de la vorticidad para un cuerpo con circulación y sin circulación.

Así mismo Mittal y Kummar [6] han realizado un estudio numérico de CFD para un cilindro en rotación en el cual presentan diferentes patrones de flujo, incluyendo la estela para las distintas relaciones de velocidad angular y de la corriente libre.

Queijo, Fletcher y Herman [7] publicaron en 1957 un reporte en el cual se ensaya un cilindro de diferente sección, con rotación y con diferentes ángulos de inclinación respecto a la corriente. En el mismo se determinan coeficientes C_L y C_D para cada sección y cada ángulo de ataque. En esta publicación puede observarse la importancia del efecto Magnus para dispositivos tipo cohetes y proyectiles cilíndricos de sección variable.

Swanson, Iversen y Power [8] [9] [10] [11] [12] realizan una gran variedad de estudios teóricos y analíticos relacionados con misiles, estudiando diferentes ángulos de ataque y generando ecuaciones matemáticas que determinan los coeficientes de sustentación producidos por el efecto Magnus.

Alaways y Hubbard [13] realizaron un estudio del vuelo de la pelota de baseball a partir de la rotación de la misma, considerando todas las fuerzas que están presentes sobre el cuerpo. Generaron visualizaciones con cámaras de alta velocidad y determinaron trayectorias. Además realizaron un análisis matemático aplicando ecuaciones de movimiento.

Kordi y Kopp [14] han presentado un estudio acerca de modelos de configuraciones de techos de casa con el objeto de analizar el comportamiento y trayectoria de chapas que se vuelan por vientos fuertes. Determinan que el vuelo posee rotación en los tres ejes y que se ve muy afectado por la sustentación generada por el efecto Magnus.

2. ENSAYOS EXPERIMENTALES

La presente publicación se centra en estudios experimentales, debido a que el estudio analítico del flujo turbulento en el entorno de cuerpos sometidos a un giro y a una corriente es complejo. Se diseñó, construyó, instrumentó y calibró, en la UIDET GTA-GIAI del Departamento de Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería, UNLP, un túnel aerodinámico para la realización de ensayos de medición de sustentación y resistencia en distintos modelos de cuerpos a diferentes velocidades de rotación y diferentes velocidades de la corriente de aire. Para el diseño se siguieron las indicaciones de la Norma IRAM 19004. Así mismo, se lo equipó con el instrumental necesario para la realización de visualizaciones de flujo. Se obtuvieron resultados y se concluyó acerca de los mismos.

2.1. Banco de ensayo

El túnel tiene una sección transversal de 0,2 x 0,2 m; la sección de prueba tiene una longitud de 0,3 m, donde se monta el modelo a ensayar. Dicha sección está provista de una ventana de acrílico con el fin de observar el ensayo y permitir la medición de la velocidad de rotación de los modelos desde el exterior, mediante el uso de un tacómetro estroboscópico. Además, tiene una tapa superior de vidrio removible para montar los modelos con comodidad y realizar los ensayos de visualización de flujo.

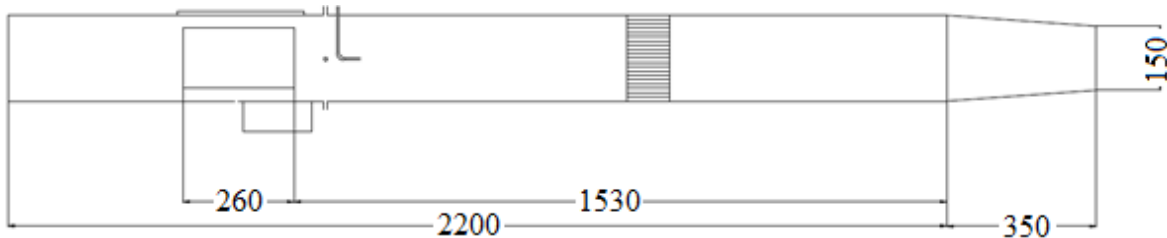


Figura 1: Túnel de viento (unidades en mm).

Así mismo, posee una sección de medición de presiones, donde se encuentra montada una toma de presión total en el centro y cuatro tomas de presión estática ubicadas una en cada pared. Las tomas de presión estática se encuentran conectadas entre sí y tienen una sola salida al micromanómetro. Midiendo la presión total y la presión estática se puede calcular la presión dinámica y así obtener la velocidad de la corriente.

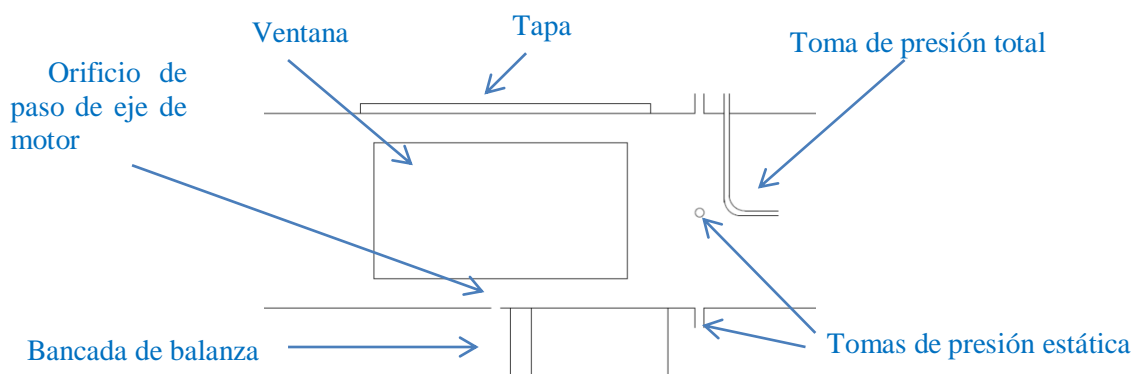


Figura 2: Sección de prueba y sección de medición de presiones.

El túnel de viento fue caracterizado con el fin de conocer los perfiles de velocidad y la intensidad de la turbulencia en la sección de prueba a diferentes velocidades de la corriente.

Se pudo determinar que la intensidad de la turbulencia según el eje x del túnel de viento se sitúa entre el 2 y 3% en la zona central donde se ubican los modelos.

2.2. Modelos

Los modelos para los ensayos fueron fabricados a partir del mecanizado de teflón. El mecanizado comprendió operaciones de torneado y fresado mediante la utilización de un plato rotativo para poder mecanizar planos a diferentes ángulos.

Modelo I – Triángulo de aristas filosas (T)

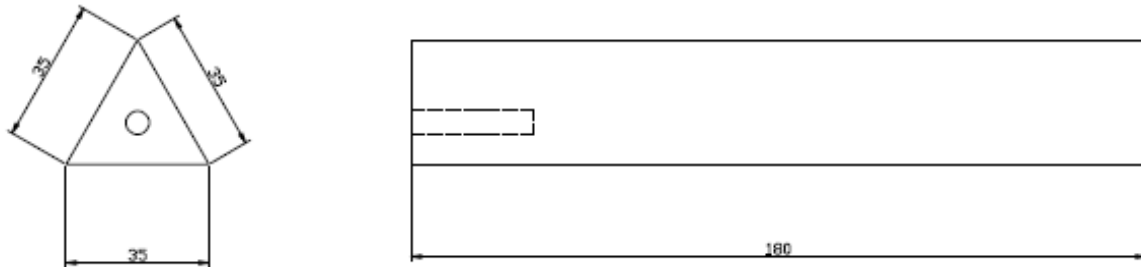


Figura 3: Modelo de triángulo de aristas filosas.

Modelo II – Triángulo de aristas redondeadas (TAR)

Tiene la particularidad de poseer las aristas redondeadas, para lo que se construyó una herramienta especial para el mecanizado.

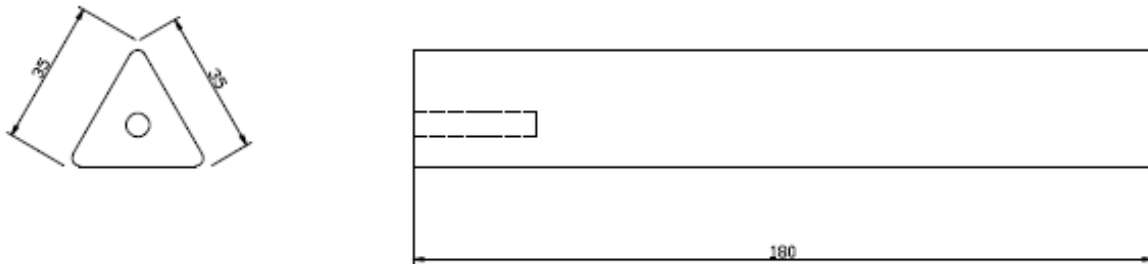


Figura 4: Modelo de triángulo de aristas redondeadas.

2.3. Tipos de ensayo

Se realizaron dos tipos de ensayo. Uno de mediciones de fuerzas de sustentación y resistencia en función de la velocidad de giro y de la velocidad de la corriente libre, con el objeto de caracterizar aerodinámicamente los cuerpos y otro de visualizaciones, con el fin de conocer los diversos patrones que adopta el flujo en el entorno de los cuerpos.

2.3.1. Ensayos de medición de fuerzas

A partir de un procedimiento específico de ensayo se realizaron ensayos de medición de fuerzas de sustentación y resistencia en función de la velocidad de giro y de la velocidad de la corriente libre. Un sencillo análisis dimensional muestra que uno de los parámetros adimensionales que debe influir en el problema es la relación entre la velocidad periférica del cuerpo, debido a la rotación del mismo $u = \omega R$, y la velocidad de la corriente libre v . Este parámetro se utiliza frecuentemente en la literatura.

Previo a mencionar las consideraciones utilizadas para la obtención de resultados se define:

Coeficiente de sustentación:

$$C_L = \frac{2L}{\rho v^2 S} \quad (1)$$

Coeficiente de resistencia:

$$C_D = \frac{2D}{\rho v^2 S} \quad (2)$$

Velocidad tangencial:

$$u = \omega R \quad (3)$$

Un punto de importancia relevante es definir el diámetro de referencia y la superficie frontal para los cálculos de C_L y C_D por su influencia en los resultados. Después de estudiar el problema se decidió tomar como criterio el diámetro del círculo medio (ϕ) entre el círculo inscrito y el círculo circunscrito de los cuerpos (figura 5).

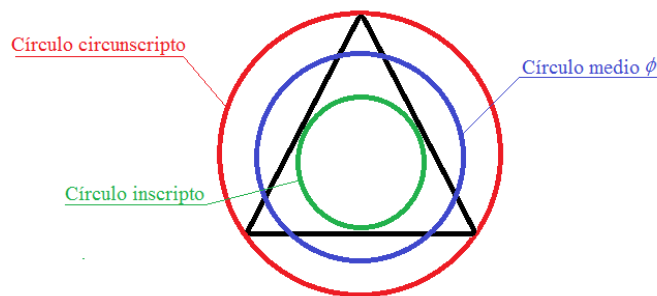


Figura 5: Círculos de referencia (inscrito, circunscrito y medio (ϕ))

2.3.2. Ensayos de visualización

Con el fin de estudiar y analizar el comportamiento del flujo alrededor de los cuerpos ensayados se realizaron ensayos de visualización a partir de la utilización de humo, una luz estroboscópica y una cámara fotográfica. Por la ventana lateral se instaló una luz estroboscópica y se procedió a opacar la sección de pruebas con el fin de mejorar el contraste en las fotografías. A su vez, se dotó el túnel con un sistema de generación de hilo de humo corriente arriba de la ubicación del modelo.

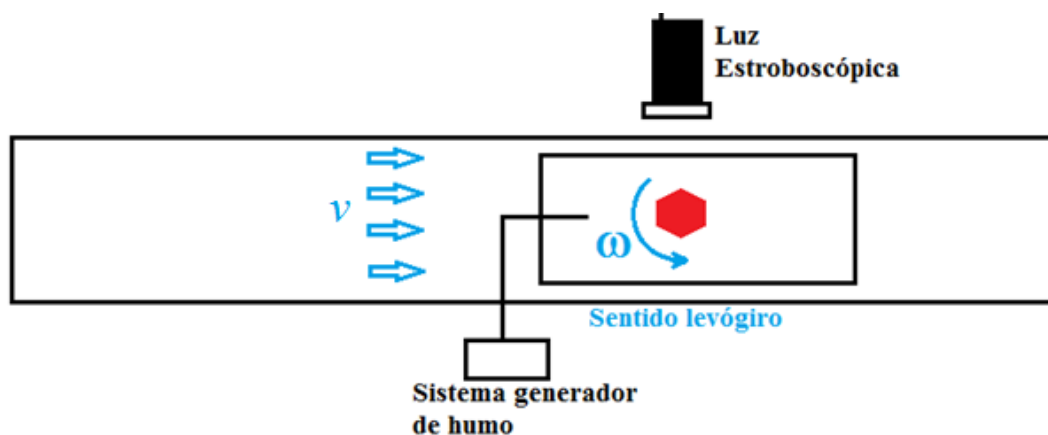


Figura 6: Sistema completo de visualización y obtención de fotos (vista superior).

Se realizaron ensayos sobre cada cuerpo a diferentes velocidades de la corriente libre y de rotación.

Con el objetivo de lograr visualizaciones precisas de los patrones de flujo se procedió a fijar la velocidad de la corriente libre y de rotación en un valor deseado. Luego se equiparó la frecuencia de la luz estroboscópica con la correspondiente a la velocidad de giro del cuerpo. De esta manera se logra una imagen del cuerpo “congelado” en una posición. Una vez realizado este paso se activa el sistema de humo y se procede a la toma de fotografías.

En todos los cuerpos se procedió a “congelar” la imagen para las diferentes posiciones de los mismos y se obtuvieron imágenes de los patrones de flujo para cada uno, para un instante de su giro determinado.

A modo de ejemplo, se presenta a continuación, una imagen (figura 9) de visualización para un cuerpo a diferente velocidad de la corriente libre y de giro (giro en sentido contrario a las agujas del reloj).

Cabe destacar que los patrones que se observan en las fotografías se mantienen estacionarios para cada posición de los cuerpos. La nitidez de la imagen fotográfica está relacionada con la repetitividad del flujo.



Figura 7: Visualización de flujo para el triángulo de aristas filosas.

2.4. Incertidumbre en las mediciones

Se calcula la incertidumbre para la determinación de los coeficientes aerodinámicos C_L y C_D , y de la relación de velocidades u/v para los ensayos experimentales realizados.

Considerando la ecuación (1),

$$U_{C_L}^2 = U_L^2 \left(\frac{\partial C_L}{\partial L} \right)^2 + U_\rho^2 \left(\frac{\partial C_L}{\partial \rho} \right)^2 + U_v^2 \left(\frac{\partial C_L}{\partial v} \right)^2 + U_S^2 \left(\frac{\partial C_L}{\partial S} \right)^2 \quad (4)$$

Considerando la ecuación (2),

$$U_{C_D}^2 = U_D^2 \left(\frac{\partial C_D}{\partial D} \right)^2 + U_\rho^2 \left(\frac{\partial C_D}{\partial \rho} \right)^2 + U_v^2 \left(\frac{\partial C_D}{\partial v} \right)^2 + U_S^2 \left(\frac{\partial C_D}{\partial S} \right)^2 \quad (5)$$

Considerando la relación de velocidad de la corriente con la velocidad de giro,

$$\frac{u}{v} = \frac{\omega R}{v} \quad (6)$$

$$U_{\frac{u}{v}}^2 = U_{\omega}^2 \left(\frac{\partial \frac{u}{v}}{\partial \omega} \right)^2 + U_v^2 \left(\frac{\partial \frac{u}{v}}{\partial v} \right)^2 + U_R^2 \left(\frac{\partial \frac{u}{v}}{\partial R} \right)^2 \quad (7)$$

Como fuentes de contribución de incertidumbre de cada instrumento se tomaron: para la balanza, el tacómetro y el calibre, las incertidumbres de resolución; para la medición de la velocidad se utilizó un procedimiento el cual tiene en cuenta las incertidumbres de resolución y calibración del micromanómetro, resolución de los termómetros de bulbo seco y húmedo, y del barómetro.

Analizando ambos cuerpos para todas las condiciones de ensayo se observa que los valores de incertidumbre para todo el conjunto de modelos para C_L y C_D varían desde 1,4% hasta un 3,2%, mientras que para u/v varían entre el 0,5% y 1,2%.

3. RESULTADOS

3.1.1. Ensayos de medición de fuerzas

Cabe señalar que los resultados que se presentan a continuación no están corregidos por efectos de bloqueo en el túnel de viento, ya que en esta instancia el análisis es comparativo entre los diferentes cuerpos.

Modelo I - Triángulo de aristas filosas ($\phi = 0,0325$ m)								
ω [rpm]	v [m/s]	L [N]	C_L	u/v	v [m/s]	D [N]	C_D	u/v
0	-	-	-	-	5,15	0,18	1,91	0,00
	-	-	-	-	7,84	0,42	1,95	0,00
	-	-	-	-	10,34	0,74	2,00	0,00
	-	-	-	-	11,59	0,94	2,01	0,00
1950	5,20	0,14	1,50	0,64	5,23	0,13	1,37	0,63
	7,89	0,25	1,14	0,42	7,73	0,31	1,50	0,43
	10,51	0,37	0,96	0,32	10,34	0,66	1,77	0,32
	11,67	0,44	0,94	0,28	11,70	0,82	1,73	0,28
2310	5,20	0,17	1,82	0,76	5,23	0,13	1,32	0,75
	7,89	0,27	1,25	0,50	7,86	0,31	1,45	0,50
	10,41	0,41	1,09	0,38	10,42	0,66	1,76	0,38
	11,71	0,47	0,99	0,34	11,77	0,85	1,77	0,33
2520	5,20	0,18	1,93	0,83	5,23	0,13	1,37	0,82
	7,89	0,29	1,32	0,54	7,94	0,31	1,42	0,54
	10,49	0,44	1,14	0,41	10,50	0,65	1,69	0,41
	11,67	0,50	1,06	0,37	11,74	0,85	1,77	0,37
2725	5,20	0,20	2,14	0,89	5,23	0,13	1,32	0,89
	7,89	0,31	1,42	0,59	7,94	0,31	1,40	0,58
	10,49	0,45	1,17	0,44	10,54	0,63	1,64	0,44
	11,71	0,54	1,13	0,40	11,77	0,82	1,70	0,39

Tabla 1: Resultados correspondientes a los ensayos de sustentación y resistencia para el triángulo de aristas filosas.

Modelo II - Triángulo de aristas redondeadas ($\phi = 0,0295$ m)								
ω [rpm]	v [m/s]	L [N]	C_L	u/v	v [m/s]	D [N]	C_D	u/v
0	-	-	-	-	5,20	0,13	1,48	0,00
	-	-	-	-	7,85	0,29	1,48	0,00
	-	-	-	-	10,60	0,52	1,46	0,00
	-	-	-	-	11,82	0,65	1,49	0,00
1950	5,21	0,14	1,59	0,58	5,20	0,10	1,12	0,58
	7,91	0,23	1,15	0,38	7,85	0,25	1,30	0,38
	10,57	0,32	0,92	0,28	10,60	0,46	1,31	0,28
	11,84	0,38	0,86	0,25	11,79	0,57	1,31	0,26
2310	5,21	0,16	1,89	0,69	5,20	0,09	1,06	0,69
	7,94	0,25	1,27	0,45	7,95	0,24	1,21	0,45
	10,55	0,37	1,05	0,34	10,56	0,46	1,32	0,34
	11,84	0,43	0,97	0,30	11,82	0,56	1,28	0,30
2520	5,21	0,18	2,13	0,75	5,20	0,09	1,06	0,75
	7,94	0,27	1,37	0,49	7,95	0,23	1,14	0,49
	10,55	0,40	1,14	0,37	10,56	0,47	1,33	0,37
	11,84	0,45	1,03	0,33	11,86	0,59	1,33	0,33
2725	5,17	0,19	2,28	0,81	5,24	0,09	1,05	0,80
	7,91	0,29	1,46	0,53	7,95	0,22	1,09	0,53
	10,57	0,43	1,22	0,40	10,58	0,46	1,30	0,40
	11,84	0,48	1,09	0,36	11,80	0,58	1,32	0,36

Tabla 2: Resultados correspondientes a los ensayos de sustentación y resistencia para el triángulo de aristas redondeadas.

Para el análisis de los flujos de ambos cuerpos se utilizan las curvas de variación de los coeficientes aerodinámicos C_L y C_D en función de la relación de velocidades u/v . Como predice el análisis dimensional, en la mayoría de los cuerpos dicha variación se superpone para las diferentes velocidades de giro ω ensayadas y por lo tanto se toma una única curva para cada cuerpo que representa el comportamiento de dicha variación (curva característica).

A continuación se muestra la curva característica, para C_L y C_D , de cada uno de los cuerpos (figura 8, figura 9).

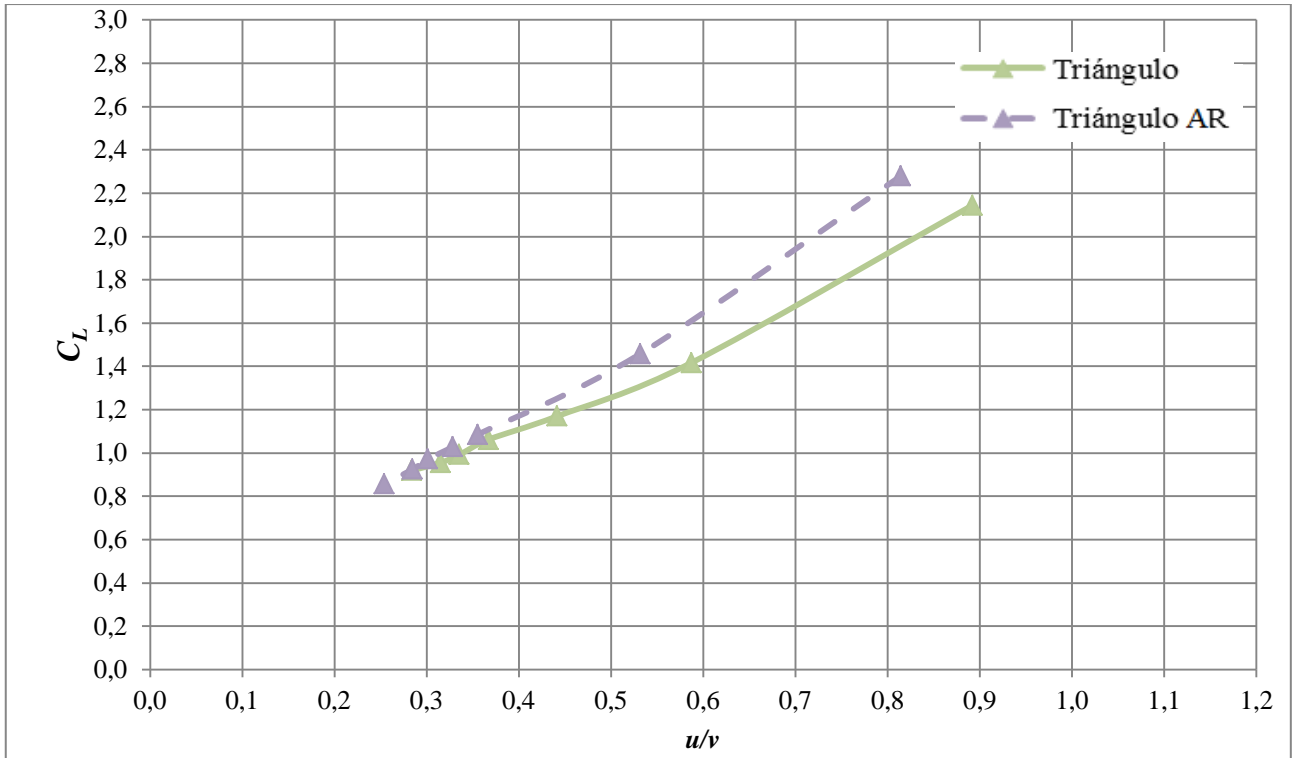


Figura 8: Variación del coeficiente de sustentación C_L en función de la relación de velocidades u/v para cada velocidad de giro ω .

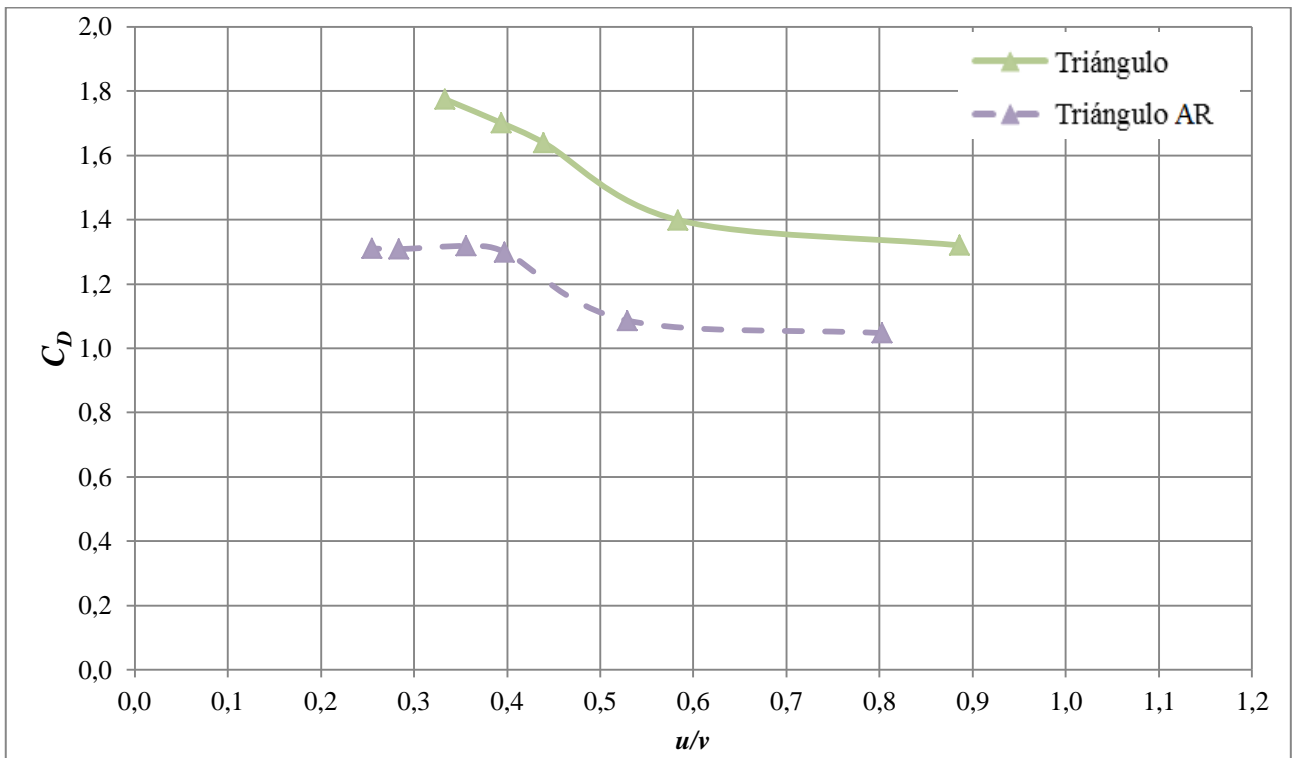


Figura 9: Variación del coeficiente de sustentación C_D en función de la relación de velocidades u/v para cada velocidad de giro ω .

3.1.2. Ensayos de visualización

Con el fin de caracterizar el flujo alrededor de los cuerpos y entender su comportamiento aerodinámico se realizan y analizan las visualizaciones, lo que permite comprender las variaciones en las fuerzas generadas. En las figuras de las visualizaciones se presentan fotografías del flujo junto a un esquema con las principales características del flujo (desprendimientos, torbellinos, líneas de corriente) para facilitar la explicación. A veces la interpretación de las fotografías ha sido realizada a partir de las secuencias de video construidas a partir de las fotografías, ya que los procesos dinámicos facilitan el reconocimiento de patrones.

R1 - Relación $u/v = 0,70$ ($\omega = 1950$ rpm, $v = 5,2$ m/s)

En la figura 10 se observa el comportamiento del flujo para el triángulo.

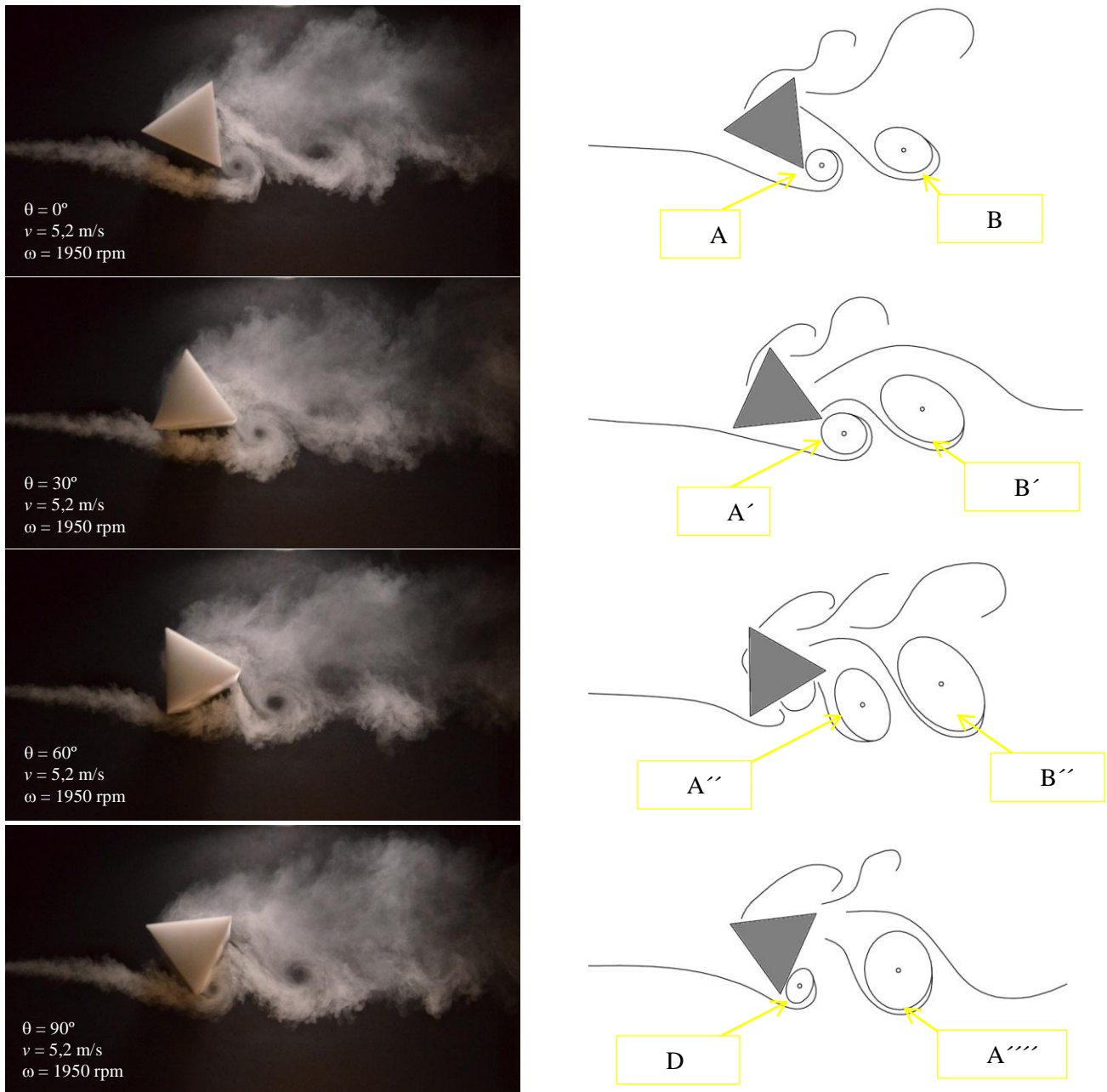


Figura 10: Configuración de flujo entorno al cuerpo en cada posición θ .

En la figura 11 se observa el comportamiento del flujo para el triángulo con aristas redondeadas.

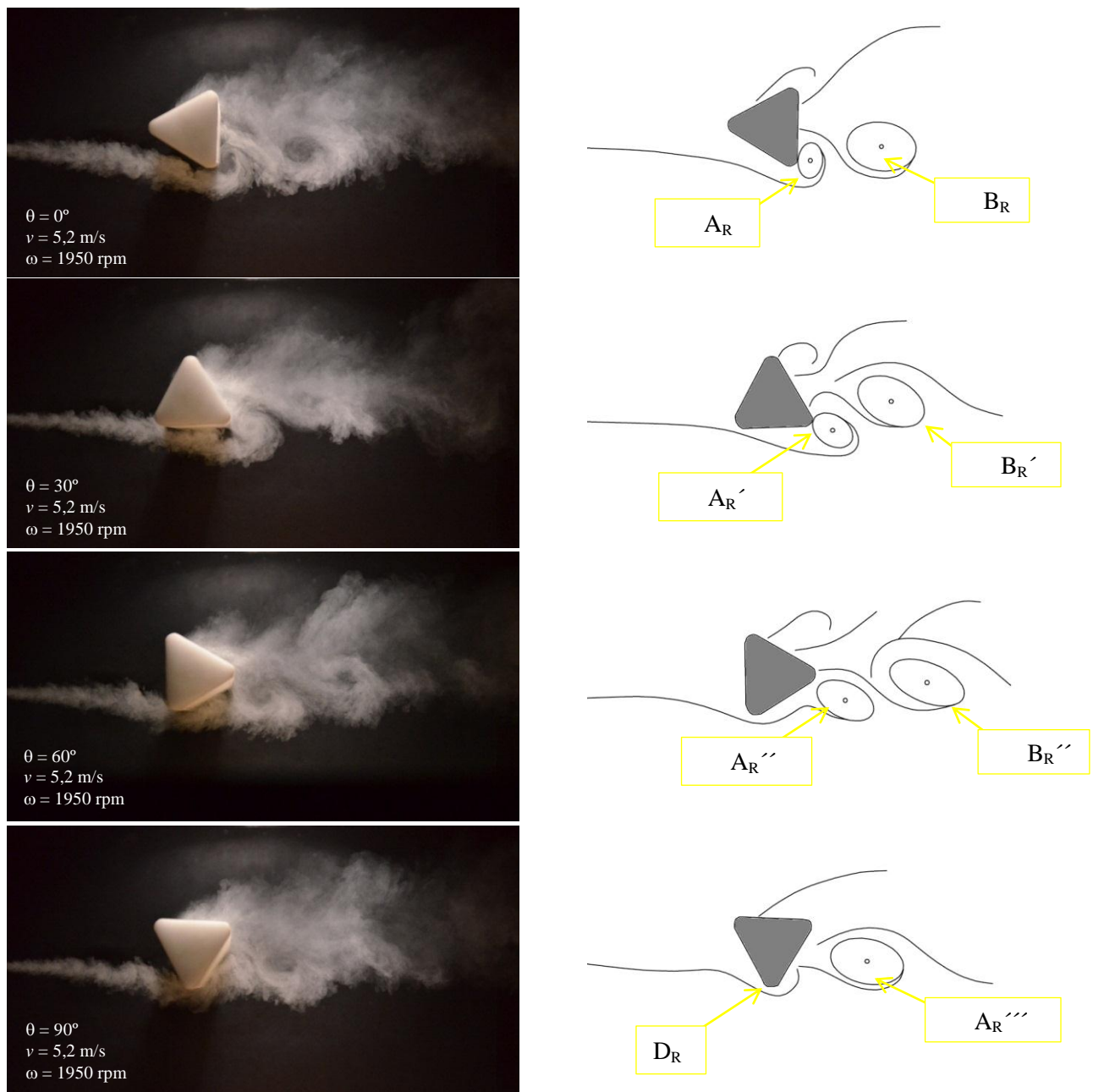


Figura 11: Configuración de flujo entorno al cuerpo en cada posición θ .

$\theta = 0^\circ$: el vértice agudo de triángulo genera un torbellino A más definido y de mayor tamaño que en caso del A_R . En tanto que el torbellino B es de mayor tamaño y se encuentra más separado del cuerpo respecto al B_R .

En la cara inferior el flujo se encuentra más adherido en el triángulo con bordes redondeados.

$\theta = 30^\circ$: los torbellinos A (en A') y B (en B') aumentan su tamaño y comienzan a separarse del cuerpo. En el caso del triángulo, los mismos se separan más distancia que en el de bordes redondeados (A_R' , B_R'), a su vez que el A se desplaza levemente hacia abajo.

$\theta = 60^\circ$: continúa el crecimiento de los torbellinos. El torbellino A (en A'') continúa desplazándose hacia abajo, en tanto que el torbellino A_R (en A_R'') mantiene su posición vertical.

Los torbellinos B (en B') y B_R (en B_R') continúan desplazándose corriente abajo.

$\theta = 90^\circ$: se observa el final del ciclo. Comienzan a generarse los nuevos torbellinos A (en D) y A_R (en D_R) respectivos para cada cuerpo, en tanto que los anteriores continúan corriente abajo generando una calle de torbellinos.

En ambos casos existe flujo en la cara superior producto de la succión generada por el cuerpo en rotación.

R2 - Relación $u/v = 0,47$ ($\omega = 1950$ rpm, $v = 7,7$ m/s)

En la figura 12 se observa el comportamiento del flujo para el triángulo.

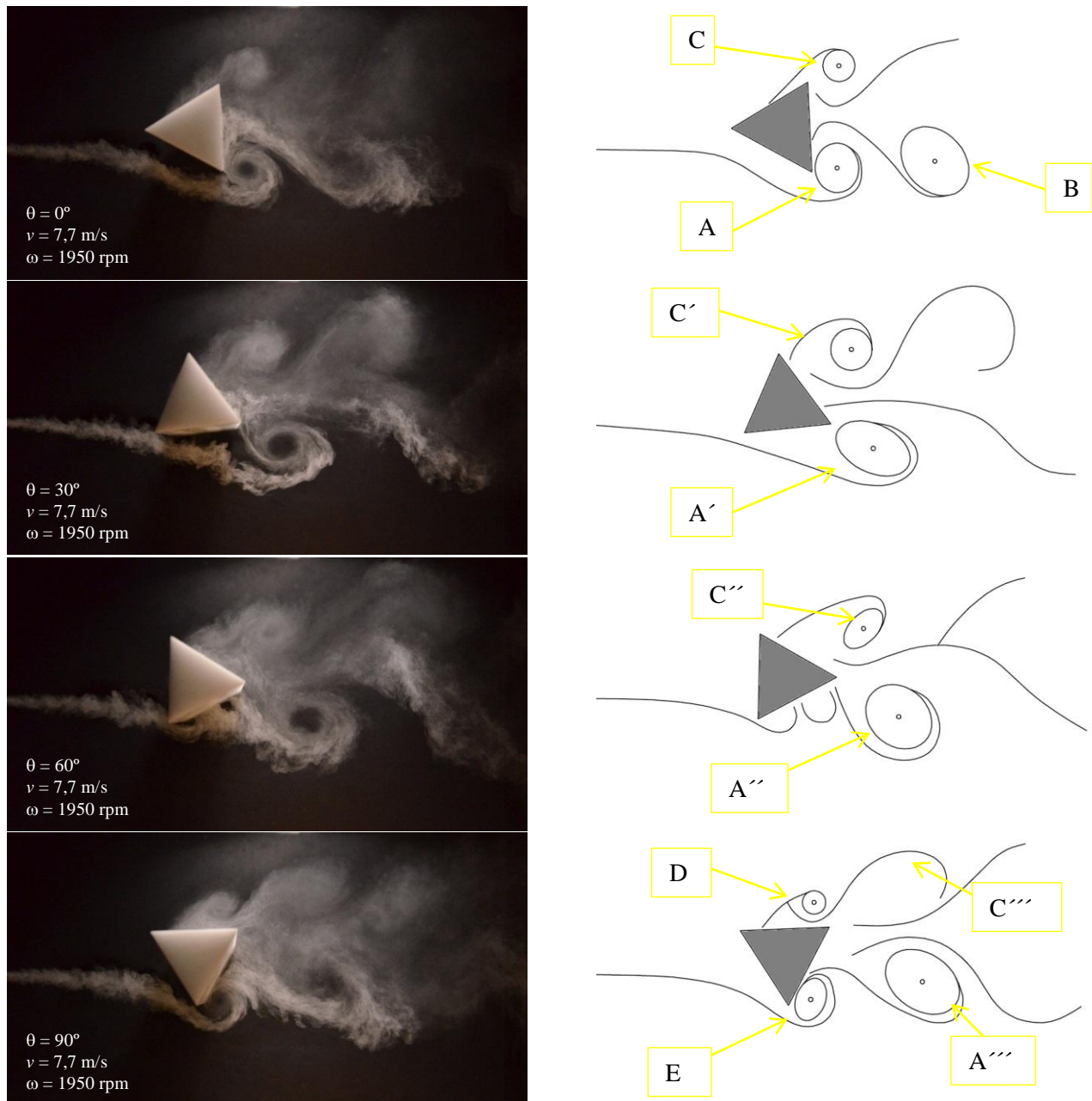


Figura 12: Configuración de flujo entorno al cuerpo en cada posición θ .

En la figura 13 se observa el comportamiento del flujo para el triángulo con aristas redondeadas.

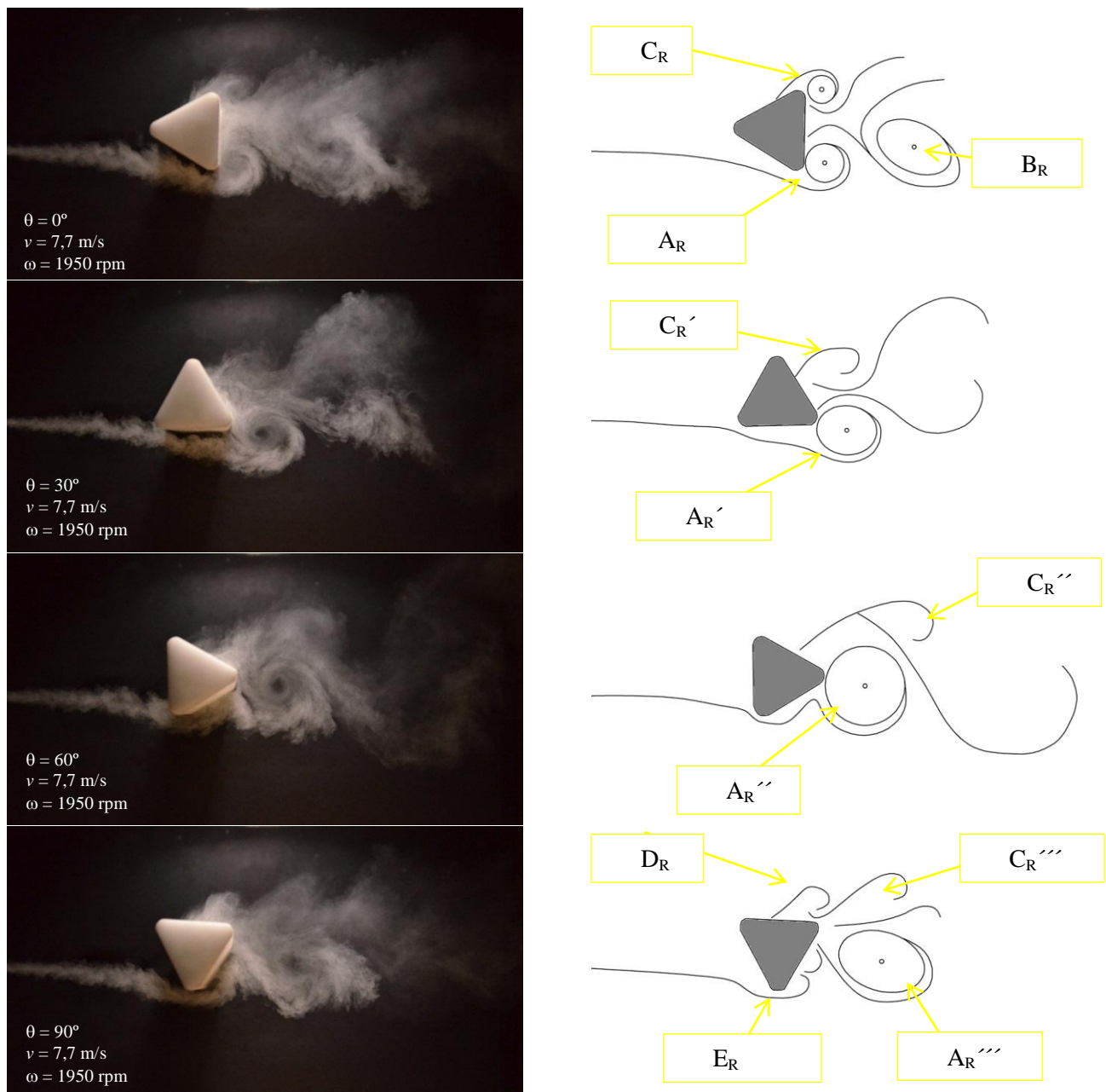


Figura 13: Configuración de flujo entorno al cuerpo en cada posición θ .

$\theta = 0^\circ$: la arista afilada del triángulo genera un torbellino A más definido y de mayor tamaño que en caso del A_R . En tanto que el torbellino B es de mayor tamaño y se encuentra más separado del cuerpo respecto al B_R .

En ambos cuerpos se produce la generación de torbellinos con sentido horario en la capa superior. El torbellino C es de mayor tamaño respecto del C_R .

En la cara inferior el flujo se encuentra más adherido en el triángulo con bordes redondeados.

$\theta = 30^\circ$: los torbellinos A (en A'), C (en C'), A_R (en A_R') y C_R (en C_R') aumentan su tamaño y se separan del cuerpo. En el caso del triángulo, los mismos se separan más distancia que en el de bordes redondeados, a su vez que el torbellino A se desplaza hacia abajo en A' .

$\theta = 60^\circ$: el torbellino A_R (en A_R'') se alinea con el vértice redondeado trasero en tanto que el A (en A'') se desplaza hacia abajo y se aleja del cuerpo.

Los torbellinos C y C_R (en posición C'' y C_R'' respectivamente) continúan avanzando en sentido de la corriente.

$\theta = 90^\circ$: se observa el final del ciclo. Comienzan a generarse los nuevos torbellinos A, C (en E y D), A_R y C_R (en E_R y D_R) respectivos para cada cuerpo. El resto de los torbellinos continúan desplazándose arrastrados por la corriente.

R3 - Relación $u/v = 0,36$ ($\omega = 1950$ rpm, $v = 10,2$ m/s)

En la figura 14 se observa el comportamiento del flujo para el triángulo.

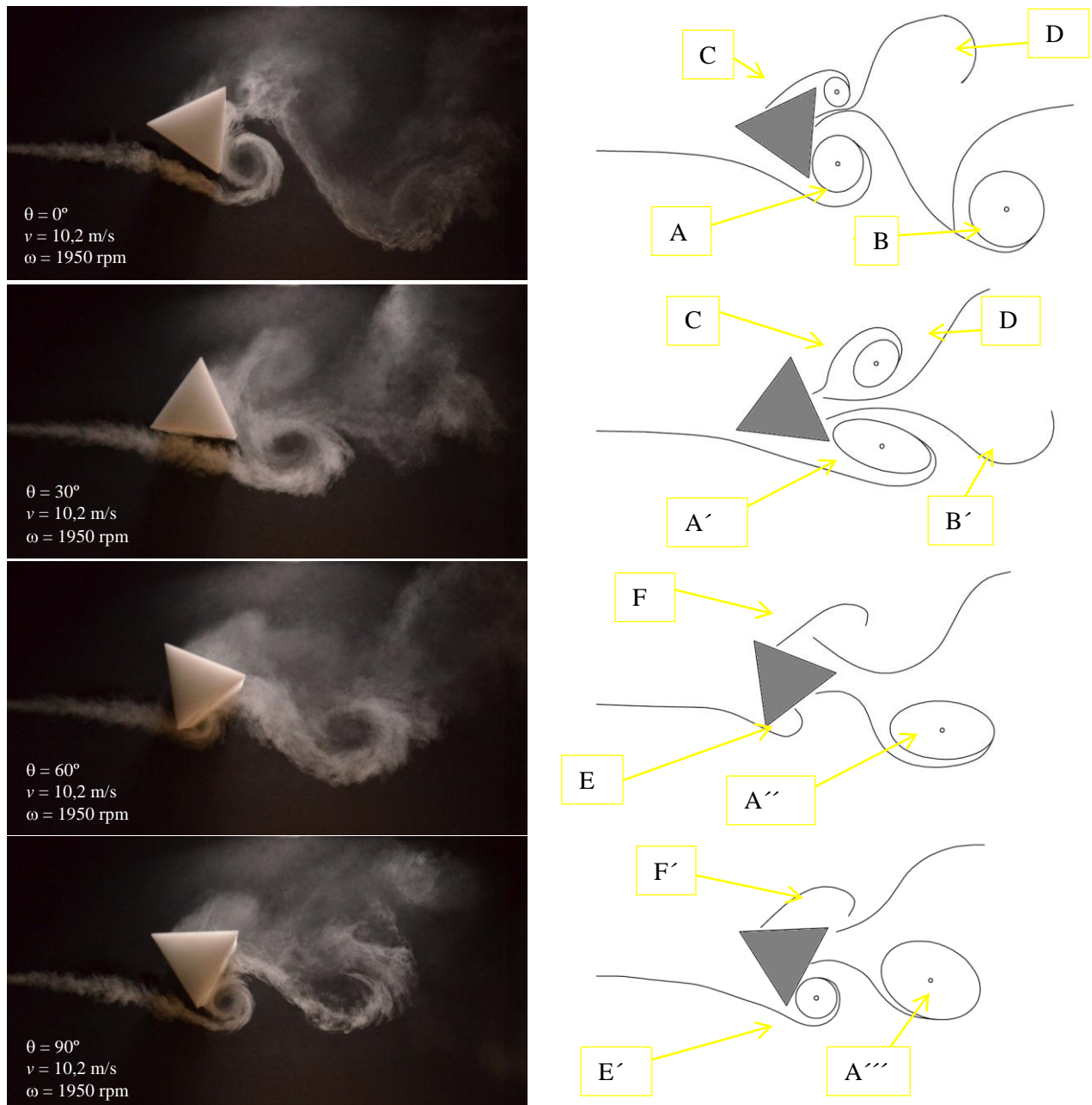


Figura 14: Configuración de flujo entorno al cuerpo en cada posición θ .

En la figura 15 se observa el comportamiento del flujo para el triángulo con aristas redondeadas.

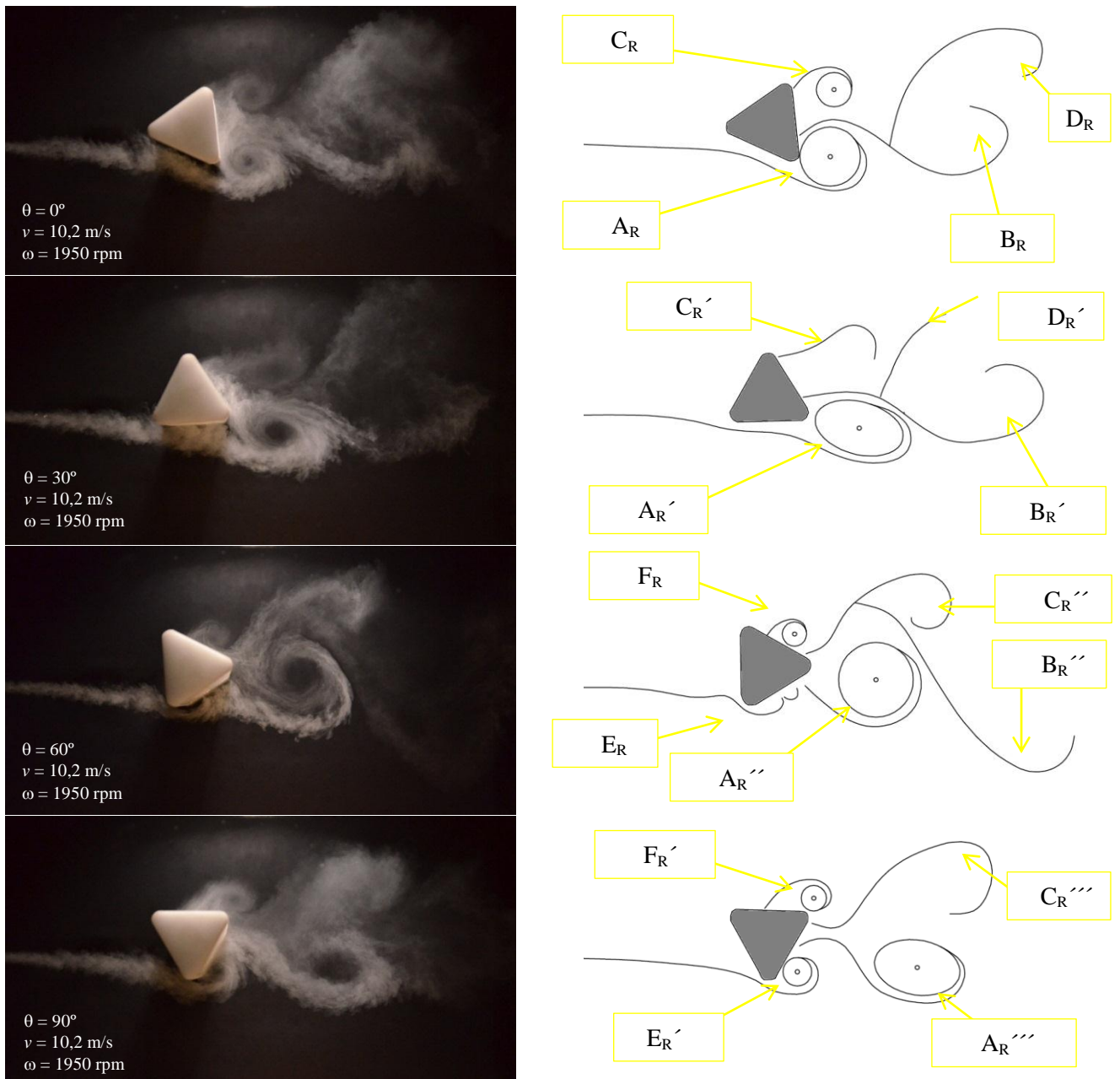


Figura 15: Configuración de flujo entorno al cuerpo en cada posición θ .

$\theta = 0^\circ$: el vértice agudo de triángulo genera un torbellino A más definido y de mayor tamaño que en caso del A_R . En tanto que el torbellino B es de mayor tamaño y se encuentra más separado del cuerpo respecto al torbellino B_R que se encuentra prácticamente desintegrado.

El torbellino C es de mayor tamaño respecto del C_R , en tanto que los torbellinos D y D_R se encuentran en proceso de desintegración.

En la cara inferior el flujo se encuentra más adherido en el triángulo con bordes redondeados.

$\theta = 30^\circ$: los torbellinos A (en A'), C (en C'), A_R (en A_R') y C_R (en C_R') aumentan su tamaño y se separan del cuerpo. En el caso del triángulo, los mismos se separan más distancia que en el de bordes redondeados, a su vez que el A se desplaza hacia abajo en A' .

$\theta = 60^\circ$: el torbellino A (en A''), se desplaza hacia abajo y se aleja del cuerpo, en tanto que el torbellino A_R (en A_R'') se alinea con el vértice redondeado trasero del cuerpo.

En el triángulo aparece un desprendimiento F en la parte superior. Así mismo en el triángulo con bordes redondeados comienza a formarse el torbellino F_R .

En ambos cuerpos se comienza a generar un desprendimiento E y E_R en el vértice inferior de los mismos.

$\theta = 90^\circ$: se observa el final del ciclo. Comienzan a generarse los nuevos torbellinos A y A_R (en E' y E_R'), y C y C_R (en F' y F_R') respectivos para cada cuerpo.

Los torbellinos C y C_R (en $\theta = 0^\circ$) se generan por efecto de la succión producida en la parte trasera del cuerpo que hace que el flujo se adhiera al mismo y luego se desprenda al tener menor energía que la corriente.

El resto de los torbellinos continúan desplazándose arrastrados por la corriente.

4. CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones específicas

Puede observarse que el C_L aumenta con el aumento de la relación de velocidades u/v .

El efecto Magnus que aparece sobre los cuerpos ensayados a la vista de las visualizaciones es una consecuencia de la generación de torbellinos, que es desigual entre las hileras superior e inferior de torbellinos que se desprenden del cuerpo.

La hilera inferior corresponde a una arista que avanza en la misma dirección de la corriente, por lo tanto con una velocidad relativa menor respecto al fluido, lo que da lugar a la generación de torbellinos bien definidos, intensos y, además, sincronizados con el paso de la arista.

La configuración de los flujos para el triángulo y el triángulo con aristas redondeadas es muy similar, sólo hay diferencia en los tamaños de los torbellinos (figuras 10 y 11).

La arista del triángulo es la encargada de generar torbellinos de mayor tamaño y junto con este un desprendimiento mayor del flujo, lo que se puede traducir en un aumento de la resistencia del cuerpo.

Se puede concluir observando las figuras 10 y 11 que en el caso del triángulo con arista afilada el torbellino se encuentra más alejado del cuerpo, disminuyendo su acción sobre la cara inferior, reduciendo la sustentación.

Así mismo se puede observar en el caso del triángulo con bordes redondeados la estela es más estrecha que en el otro cuerpo y por tal, disminuye su resistencia.

Al disminuir la relación de velocidades u/v los torbellinos en ambos cuerpos comienzan a tener un tamaño más grande y los patrones tienden a asimilarse cada vez más, aunque los torbellinos son más grandes y en el triángulo están más separados por lo que los C_L se equiparan, pero la diferencia de C_D se mantiene (anchura de la estela).

Por otro lado se observa que el hecho de poseer aristas redondeadas hace que los torbellinos se mantengan cercanos y detrás del cuerpo (estela más estrecha) durante más tiempo, razón por la cual se explican las diferencias en las curvas características de C_L y C_D respecto a los cuerpos con aristas afiladas.

4.2. Conclusiones generales

Se desarrollaron dos tipos de ensayos, uno correspondiente a mediciones de fuerzas aerodinámicas y otro de visualizaciones de flujo.

El primero es de gran importancia, ya que aporta datos novedosos a la literatura relacionados al estudio del efecto Magnus en cuerpos cilíndricos no circulares. Gracias a estos ensayos se pudieron determinar las fuerzas aerodinámicas (sustentación y resistencia) que se generan producto de la rotación y la corriente de aire y permiten calcular cómo varían los coeficientes de sustentación C_L y resistencia C_D en función de la relación de velocidades u/v .

En el caso de los ensayos de visualizaciones de flujo, los mismos permitieron conocer los patrones de torbellinos y estela que se generan en torno a los cuerpos, y con esto comprender el porqué de las fuerzas que se generan en un cuerpo en rotación. Así mismo, se pudo demostrar que el patrón es estacionario, es decir, que para

la misma condición de ensayo (tipo de cuerpo, velocidad de la corriente, velocidad de rotación y posición de la arista), siempre se genera el mismo patrón de torbellinos manteniendo su tamaño y posición respecto al cuerpo.

Gracias a los resultados obtenidos en ambos estudios experimentales se pudo determinar, analizar y comprender el comportamiento aerodinámico de los cuerpos.

REFERENCIAS

- [1] Seifert, J., "A review of the Magnus Effect in Aeronautics". Progress in aerospace sciences, 55, p: 17 – 45. 2012.
- [2] Betz, A., "The Magnus effect - the principle of the Flettner rotor", Technical Memorandums National Advisory Committee For Aeronautics. No. 310. 1925.
- [3] Prandtl, L., "Application of the Magnus Effect to the Wind Propulsion of Ships". Technical Memorandums National Advisory Committee For Aeronautics. No. 367. 1926.
- [4] Miller, C. "Wind Tunnel Measurement of the Surface Pressure Distribution on a Spinning Magnus Rotor". Journal of Aircraft. Vol. 16. No. 12, p: 815 – 822. 1979.
- [5] Cuevas, J. C., Ocaña, O., Hurtado, A., & Hidalgo, S. "El efecto Magnus y La paradoja de D'Alembert: consideraciones del flujo Potencial." Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 4. No. 2, p: 394 - 398. 2010.
- [6] Mittal, S., Kummar, B. "Flow Past a rotating cylinder". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 476, p: 303 – 334. 2002.
- [7] Queijo, M. J., Fletcher, Herman S. "Low-speed experimental investigation of the Magnus effect on various sections of a body of revolution with and without a propeller". Technical Memorandums National Advisory Committee For Aeronautics. No. 4013. 1957.
- [8] Swanson, W. M., "The Magnus Effect: A Summary of Investigations to Date", Journal of Fluids Engineering. Vol. 83, p: 461 – 470. 1961.
- [9] Iversen, J. "Correlation of Magnus force data for slender spinning cylinders" Journal of Spacecraft and Rockets. Vol. 10. No. 4, p: 268. 1973.
- [10] Power, H., Iversen J. "Magnus Effect on Spinning Bodies of Revolution". AIAA Journal. Vol. 11. No. 4, p: 417 – 418. 1973.
- [11] Power, H. "Spinning Missile Magnus Force Measurement". Technical Report of Naval Postgraduate School Monterrey California. 1974.
- [12] Power Jr., H. L. "Boundary layer contribution to the Magnus effect on a spinning cylinder at low angles of attack". A Dissertation Submitted to the Graduate Faculty in Partial Fulfillment of The Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. Iowa State University. 1971.
- [13] Always, L., Hubbard, M. "Experimental determination of baseball spin and lift". Journal of Sport Sciences. Vol. 19, p: 349 – 358. 2001.
- [14] Kordi, B., Kopp G. A. "Effects of initial conditions on the flight of windborne plate debris". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 99, p: 601 – 614. 2011.