

# ESTUDIO AERODINÁMICO DEL CUERPO DE AHMED MEDIANTE MÉTODOS DE VISUALIZACIÓN PARA FLUJOS EXTERNOS

Juan Francisco Alonso León-Morales<sup>1</sup>, Christian Muñoz-Valenzuela<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Mecánica, Universidad Tecnológica Metropolitana, Chile. Email: juan.leonm@utem.cl

<sup>2</sup> Departamento de Mecánica, Universidad Tecnológica Metropolitana, Chile. Email: christian.munoz@utem.cl

## Resumen

El trabajo investigativo muestra la comparación de los patrones de flujo generados al utilizar mechones, aceite y humo como métodos de visualización para flujo externo incompresible sobre geometrías del cuerpo de Ahmed en escala 1:5, con ángulos de inclinación en la zona posterior ( $\phi$ ) de 5°; 12,5° y 30°; frente a los resultados presentes en la literatura para cuerpos con dimensiones completas. Las pruebas se desarrollaron en un túnel de viento de baja velocidad con circuito abierto, generando una velocidad de flujo menor a la utilizada en el estudio de referencia, alcanzando un número de Reynolds de  $2,91 \times 10^5$ . Los resultados obtenidos permiten concluir que, a pesar de no existir semejanza dinámica; los patrones generados son análogos, exhibiendo puntos de desprendimiento, formas de estela y comportamiento de capa límite similares a la referencia para todos los casos analizados.

**Palabras clave:** aerodinámica; cuerpo de Ahmed; flujo externo; métodos de visualización.

## Abstract

This research shows the comparison of the flow patterns generated by using tufts, oil and smoke as visualization methods for external flow on Ahmed body geometries in scale of 1:5, with inclination angles in the rear zone ( $\phi$ ) of 5°; 12,5° and 30°; against the results present in the literature for bodies with full dimensions. The tests were performed on an open-circuit low-speed wind tunnel, generating a flow velocity lower than that used in the references, reaching a Reynolds number of  $2,91 \times 10^5$ . The results obtained allowing to conclude that, despite the inexistence of dynamic similarity, the patterns generated are similar, exhibiting separation points, wake shapes and boundary layer behavior like the references for all the cases analyzed.

**Keywords:** aerodynamic; Ahmed body; external flow; visualization methods.

## 1. Introducción

En aerodinámica, se obtiene una mayor comprensión de los distintos fenómenos al lograr observarlos. Una de las opciones con mayor facilidad de ejecución y que permite un mayor esclarecimiento es la aplicación de métodos visuales. Lo relevante de aplicar dichos métodos es obtener resultados cualitativos de forma empírica.

Sobre cualquier geometría, las fuerzas de arrastre se producen por efecto de fricción y presión. El cuerpo de Ahmed es un modelo simplificado de vehículo, en

estos, el arrastre de presión (o de forma) es el que mayor contribución posee, dado que es consecuencia de la separación de flujo. Promediado en el tiempo, las regiones de flujo separado exhiben macroestructuras cinemáticas. Dichas estructuras en la estela —principal región de flujo separado en el campo de flujo de un vehículo—, determinan la resistencia aerodinámica experimentada por el cuerpo.

En el estudio se utilizaron como métodos de visualización de flujos mechones, aceite y humo para analizar el comportamiento de la capa límite sobre el cuerpo de Ahmed en una escala 1:5, contrastando los

resultados obtenidos con los presentados en [1]. De los métodos utilizados, mechones y aceite son considerados como visualización del flujo superficial; principalmente se aplican para obtener información sobre el estado de la capa límite evidenciando líneas de separación y transición en la capa límite y también extensión de las zonas de separación. El humo es considerado como método de visualización del campo de flujo; tal método se utiliza fuera de la superficie y sirve para apreciar los rasgos característicos del flujo fuera de la capa límite.

La relevancia del trabajo radica en la búsqueda de patrones aerodinámicos similares con un número de Reynolds un orden de magnitud menor  $4,29 \times 10^6$  en referencia [1]; y  $2,91 \times 10^5$  en este estudio experimental— para cuerpos con ángulos posteriores de  $5^\circ$ ,  $12,5^\circ$  y  $30^\circ$  respectivamente. Se plantea que los patrones generados serán similares en forma y comportamiento, a pesar de no existir semejanza dinámica entre el estudio de referencia y las pruebas realizadas.

El estudio solo abarca métodos cualitativos, por lo que las conclusiones y análisis se realizaron basándose en los patrones visuales obtenidos para cada ensayo; obviándose mediciones de cualquier magnitud física.

## 2. Método(s), metodología

El cuerpo de Ahmed se modeló en una escala 1:5, empleando el software Solidworks Student Edition 2022, para posteriormente fabricar las geometrías con una impresora 3D Creality CR-10 Max, acompañada del software Ultimaker Cura, en su versión 5.2.2. El material empleado para todos los elementos obtenidos mediante impresión 3D fue PLA (polylactic acid por sus siglas en inglés). En cada caso analizado (ángulos posteriores  $\phi$  de  $5^\circ$ ,  $12,5^\circ$  y  $30^\circ$  respectivamente), se generaron dos modelos (uno para ensayo con hilos y otro para ensayos de aceite y humo), obteniéndose seis geometrías en total.

Las caras laterales, frontal, posterior y superior de cada geometría fueron tratadas superficialmente, dejando sin tratamiento la cara inferior, para reducir la rugosidad superficial en las zonas de interés. El tratamiento consistió en suavizar las caras mencionadas con lija para madera grano 150 teniendo como objetivo quitar las rebabas generadas en el proceso de impresión. Luego se aplicó masilla en base a resinas de poliéster (masilla mágica Marson) por toda la extensión de las caras —lijando las imperfecciones con lija al agua grano 240— en un proceso iterativo hasta alcanzar superficies uniformes y lisas. Seguido a

ello se suavizaron las superficies con lijas al agua grano 600 y 1.200, para luego aplicar un imprimante en aerosol (fondo multiuso blanco para todo tipo de superficies; fabricante: Zinsser), y finalmente se suavizaron las caras tratadas con lija al agua grano 1.200 nuevamente. Para las geometrías a utilizarse con aceite, se aplicó adicionalmente pintura negra en aerosol (spray uso general; fabricante: Rex) buscándose un buen contraste de colores. Para obtener una medida sobre la reducción en las irregularidades de las superficies, se midió la rugosidad previa y posteriormente al procedimiento descrito. En la sección 3.1 (Tratamiento superficial) se desglosan los valores medidos. A todas las geometrías se les marcaron líneas en la cara lateral derecha —cada 10 mm—, con el fin de comparar las distancias a las que se producen los diferentes fenómenos aerodinámicos.

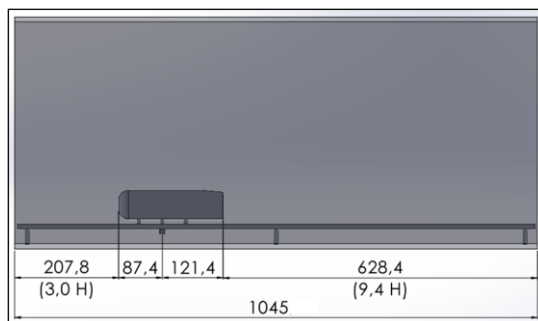
Las pruebas se realizaron en el túnel de viento de baja velocidad, y de circuito abierto, del Departamento de Mecánica (DEMEC) de la Universidad Tecnológica Metropolitana. Éste posee una sección de prueba de  $1045 \times 435 \times 445$  mm para el largo, ancho y alto respectivamente (con una sección transversal de  $193.335 \text{ mm}^2$  aproximadamente), acompañada de un variador de frecuencia Mitsubishi D700, (programado de 0 a 50 Hz) con el cual se regula la velocidad del flujo succionado, alcanzando una máxima de 26,14 m/s a 50 Hz ( $Ma = 0,08$ , flujo subsónico e incompresible). La frecuencia utilizada en todos los ensayos fue 40 Hz; equivalente a una velocidad de flujo de 21,12 m/s ( $Re = 2,91 \times 10^5$ ).

Para evitar perturbaciones en el desarrollo del flujo —como consecuencia del punto de ubicación de las geometrías—, se utilizó una guía desarrollada por la European Cooperation in Science and Technology [2]. En la Figura 1 se muestra un esquema de la sección de pruebas (vista lateral), con la geometría en su interior. En el centro de los apoyos, (distancia de 87,4 mm en Figura 1) se ubicó el acople para fijar las geometrías a la base dispuesta dentro de la sección de pruebas. La relación de bloqueo <sup>1</sup>fue de 3,86%; considerando solo la geometría del cuerpo de Ahmed (área frontal de  $7.466 \text{ mm}^2$ ) y 6,29% incluyendo la base y apoyos de la plataforma donde se montó el cuerpo ( $12.160 \text{ mm}^2$ ). Tanto la zona de pruebas como la plataforma son de polímero termoplástico transparente (acrílico); todo de espesor 10 mm.

Para evitar una distorsión excesiva del flujo, numerosas normas de diseño limitan las relaciones de bloqueo permisibles, indicando como máximo a un 5%, aunque algunas permiten hasta un 10% [3]. En el flujo de entrada, una capa límite en equilibrio se consigue

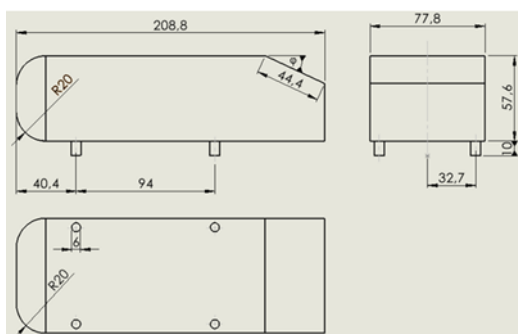
<sup>1</sup> Relación de bloqueo: cociente entre el área frontal de una geometría y el área de la sección transversal del túnel de viento en dirección perpendicular al flujo

ubicando el modelo al menos a  $5H$ , del ingreso a la sección de prueba (siendo  $H$  la altura de la geometría,  $H=67,6$  mm), no obstante, al tenerse una geometría aislada y una baja relación de bloqueo se sugiere  $2H$ . Respecto al flujo de salida, para obtener un flujo sin perturbaciones tras la estela, como mínimo se requiere  $15H$  [2]. Las dimensiones mostradas en la Figura 1 se aproximan a lo establecido en [2]; adecuándose al tamaño de la sección de prueba y a la vez, teniendo en cuenta que la escala seleccionada (1:5) permita distinguir de manera clara los distintos fenómenos aerodinámicos generados sobre las geometrías.



**Figura 1.** Ubicación de las geometrías analizadas dentro de la sección de pruebas. Fuente: elaboración propia

Las dimensiones para un cuerpo de Ahmed en escala 1:5 se exhiben en la Figura 2, manteniéndose constante el largo de la zona inclinada (44,4 mm) para los tres ángulos posteriores ( $\phi$ ) estudiados.



**Figura 2.** Dimensiones de un cuerpo de Ahmed en escala 1:5. Fuente: elaboración propia

Es de gran relevancia mencionar que todos los registros visuales fueron obtenidos con una cámara digital Canon modelo SX-60 HS.

Para el ensayo con mechones se utilizaron 50 hilos de algodón mercerizado para cada geometría analizada, todos con un diámetro de 0,7 mm. Del total de los hilos 40 se dispusieron por toda la extensión de la cara superior con un largo de 22,5 mm y separación de 15,64 mm. En la cara posterior se utilizaron 9 hilos en

todos los cuerpos estudiados, variando solo su largo según el ángulo de inclinación posterior (manteniendo la separación indicada); siendo los largos 22,5, 18,5 y 12,5 mm para  $\phi$ :  $5^\circ$ ;  $12,5^\circ$  y  $30^\circ$  respectivamente. El hilo restante se ubicó al comienzo del punto de inclinación en la zona trasera teniendo un largo de 30 mm. Todos los mechones empleados se fijaron a las geometrías con pegamento en base a cianoacrilato de etilo (loctite super bonder ultra) aplicando un patrón de baja incidencia aerodinámica. En la sección 3.2 (Ensayo de mechones) se exhiben los registros obtenidos.

Para el ensayo realizado con aceite se utilizó una mezcla de aceite SAE 30, dióxido de Titanio ( $TiO_2$ ) y gasolina de 93 octanos según lo indicado en [4], llegándose a la consistencia requerida mediante ensayo y error. Se determinaron las propiedades físicas principales (densidad y viscosidades cinemática y dinámica) de la mezcla. En la sección 3.3 (Ensayo de aceite) se detalla el procedimiento para su obtención y también, se muestran los registros mensurados en la prueba.

Para el ensayo de humo, este último se produjo mediante una máquina XFOGGER YAB-1500. Se fabricó una base regulable en altura y se utilizó una canalización con fin de dirigir el humo a través de solo una descarga hacia la sección de pruebas (descarga de humo con diámetro de  $1/2''$ ).

### 3. Resultados

#### 3.1. Tratamiento superficial

Para cuantificar la reducción en las irregularidades de los modelos analizados, se registraron las rugosidades promedio ( $R_a$ ) y de profundidad ( $R_z$ ) de las caras previa y posteriormente al tratamiento superficial. En la Figura 3 se detallan los puntos de medición utilizados sobre la cara lateral izquierda (considerando una vista desde atrás) en una geometría con  $\phi$ :  $12,5^\circ$ ; sin recibir tratamiento alguno, donde los rectángulos representan la disposición del rugosímetro para tomar las mediciones. Las zonas se replican en el resto de caras (exceptuando la cara frontal, donde solo se midió la parte plana —obviándose las zonas curvas— y la cara superior; en la que se tomó registró antes del comienzo de la sección inclinada). Cabe destacar que no se tomaron medidas de la cara posterior. En la Tabla 1 se exhiben los valores de  $R_a$  y  $R_z$  para la geometría de la Figura 3.

Todas las mediciones se realizaron con un rugosímetro marca Time, modelo 3110. Si bien se realizó el tratamiento a las seis geometrías utilizadas, solo se detallan las mediciones para  $\phi$ :  $12,5^\circ$ , con el fin de entregar la información de forma clara y concisa.

De lo expuesto en la Tabla 1, debe destacarse que, la cara lateral derecha estuvo adherida a la placa de impresión en todas las geometrías y la lateral izquierda fue donde culminó la extrusión. En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos para las rugosidades en un cuerpo con  $\phi$ : 12,5° posterior a la aplicación de imprimante.



**Figura 3.** Puntos de medición utilizados sobre cara lateral izquierda de geometría con  $\phi$ : 12,5° sin tratamiento superficial. Fuente: elaboración propia

**Tabla 1.** Rugosidades en geometría con  $\phi$ : 12,5° previo a tratamiento superficial.

Punto de medición	Ra [ $\mu$ m]	Rz [ $\mu$ m]
Cara lateral izquierda		
1	6,34	34,30
2	6,38	30,50
3	8,31	36,60
Media aritmética	7,01	33,80
Cara lateral derecha		
1	19,62	46,90
2	17,63	46,90
3	16,69	46,90
Media aritmética	17,98	46,90
Cara superior		
1	16,23	47,30
2	17,39	47,30
3	16,94	47,30
Media aritmética	16,85	47,30
Cara frontal		
Valor registrado	18,35	47,30

En la Tabla 3, se muestran las rugosidades para una geometría con  $\phi$ : 12,5° posterior a la aplicación de imprimante y pintura negra.

### 3.2. Ensayo de mechones

A continuación, se muestran los registros obtenidos para el ensayo de mechones. Cabe destacar que en las figuras un mayor comportamiento oscilatorio de los hilos se representa por la distorsión de las tomas; dicho de otro modo, a menor nitidez, mayor movimiento. En la Figura 4 a), se muestran los registros realizados para una geometría con ángulo posterior de 5°, encerrándose con corchetes ({} ) las zonas de flujo perturbado.

**Tabla 2.** Rugosidades en geometría con  $\phi$ : 12,5° posterior a aplicación de imprimante.

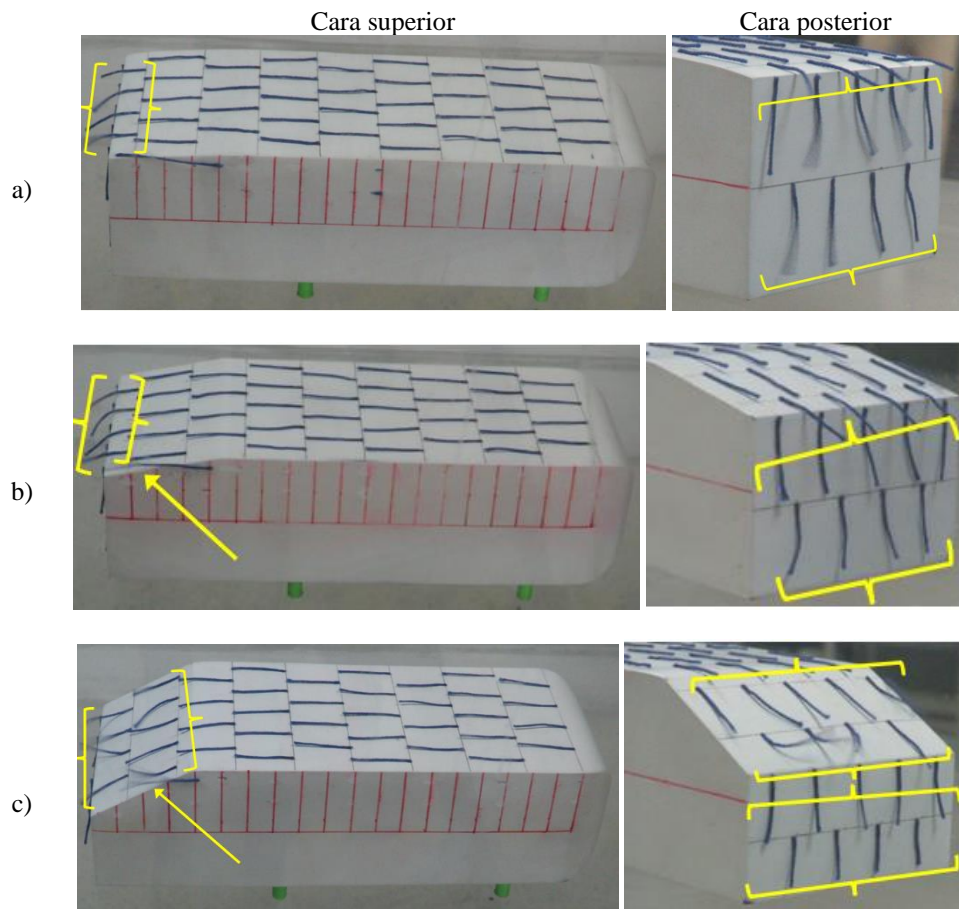
Punto de medición	Ra [ $\mu$ m]	Rz [ $\mu$ m]
Cara lateral izquierda		
1	1,79	4,14
2	1,03	4,58
3	1,78	7,61
Media aritmética	1,53	5,44
Cara lateral derecha		
1	0,68	3,61
2	1,58	7,57
3	2,38	11,96
Media aritmética	1,55	7,71
Cara superior		
1	4,22	20,1
2	3,51	16,89
3	2,09	7,14
Media aritmética	3,27	14,71
Cara frontal		
Valor registrado	0,94	6,07

**Tabla 3.** Rugosidades en geometría con  $\phi$ : 12,5°, posterior a aplicación de imprimante y pintura negra.

Punto de medición	Ra [ $\mu$ m]	Rz [ $\mu$ m]
Cara lateral izquierda		
1	1,26	5,85
2	0,90	4,26
3	1,73	6,20
Media aritmética	1,30	5,44
Cara lateral derecha		
1	1,25	5,03
2	1,05	4,28
3	1,51	7,14
Media aritmética	1,27	5,48
Cara superior		
1	1,21	4,91
2	1,41	6,40
3	1,17	4,22
Media aritmética	1,26	5,18
Cara frontal		
Valor registrado	0,90	4,60

En la Figura 4 b) se encierran con corchetes las zonas con movimiento de los hilos y, además, se señala con una flecha el movimiento del hilo lateral, puesto ahí para capturar el vórtice de la arista posterior en una geometría con  $\phi$ : 12,5°.

En la Figura 4 c) se muestra el resultado para la geometría con ángulo posterior 30°. La elevación de los hilos es un indicador de capa límite desprendida.



**Figura 4.** Resultados en ensayos de mechones: a)  $\varphi: 5^\circ$ , b)  $\varphi: 12,5^\circ$ , y c)  $\varphi: 30^\circ$ .

### 3.3. Ensayo de aceite

Las propiedades físicas del fluido compuesto utilizado para la visualización superficial del flujo se obtuvieron mediante experimentación. Su comportamiento visual fue del tipo newtoniano. La mezcla, consiste en Dióxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ ), aceite SAE 40 (Pennzoil) y gasolina de 93 octanos, en las cantidades descritas según la Tabla 4.

**Tabla 4.** Composición de mezcla para visualización con aceite

Componente	Cantidad
$\text{TiO}_2$ [g]	0,27
Aceite SAE 40 [ml]	10,0
Gasolina 93 octanos [ml]	4,50

Para la mezcla se determinaron las propiedades principales —densidad y viscosidades cinemática y dinámica—. En la primera el valor obtenido fue  $\rho = 0,808 \text{ g/cm}^3$ , utilizando el método de la balanza y el volumen, mientras que para la viscosidad cinemática ( $\nu$ ) se utilizó un viscosímetro CANNON-FENSKE

calibre 200 del tipo Ostwald. En la estimación de  $\nu$  se empleó la Ecuación (1) del fabricante,

$$\nu (cSt) = t(s) \times c \left( \frac{cSt}{s} \right) \quad (1)$$

donde:

$\nu$ : viscosidad cinemática (en centiStoke)  
 $t$ : tiempo registrado al utilizar viscosímetro (en segundos)  
 $c$ : constante del viscosímetro según calibre (0,1  $cSt/s$  para calibre 200)

Para obtener la viscosidad dinámica, se multiplicó  $\rho$  por  $\nu$  como se muestra en la Ecuación (2),

$$\mu (cP) = \rho \left( \frac{g}{cm^3} \right) \times \nu (cSt) \quad (2)$$

donde

$\mu$ : viscosidad dinámica (en centiPoise)  
 $\rho$ : densidad de la mezcla en ( $\text{g/cm}^3$ )



Se realizaron cuatro mediciones, con una temperatura ambiente de 20°C, las cuales se exhiben en la Tabla 5. Con esto, se obtuvieron valores promediados equivalentes a  $\nu = 14,61 \text{ cSt}$  y  $\mu = 11,81 \text{ cP}$  para las viscosidades cinemática y dinámica de la mezcla, respectivamente.

**Tabla 5.** Mediciones realizadas para calcular viscosidades cinemática y dinámica de mezcla.

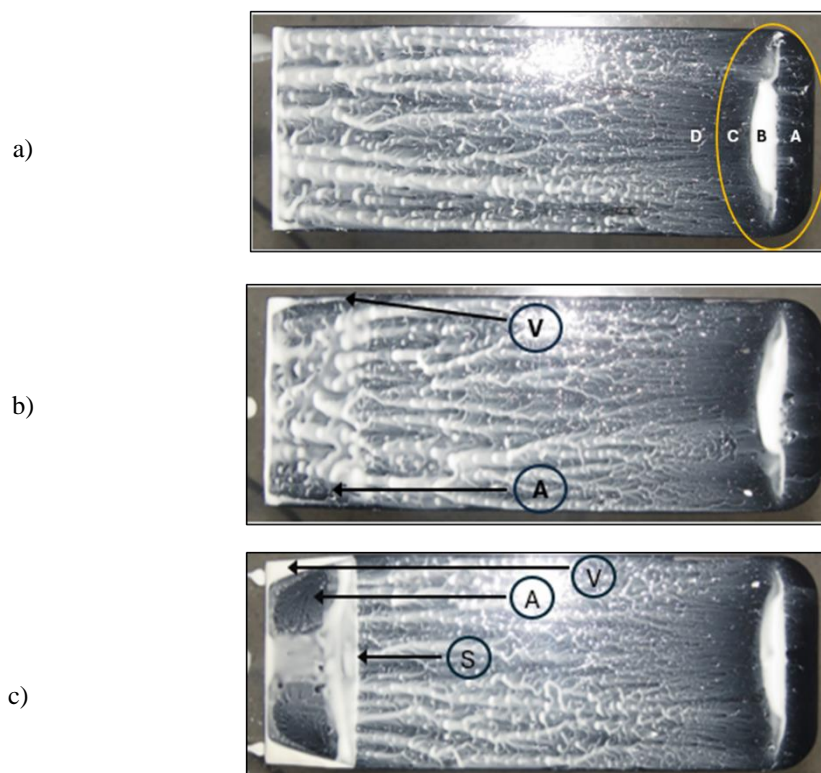
Registro N°	Tiempo [s]	$\nu$ [cSt]	$\mu$ [cP]
1	142,06	14,21	11,49
2	149,00	14,90	12,05
3	147,05	14,71	11,89
4	146,06	14,61	11,81
Media aritmética		14,61	11,81

En la Figura 5 se exhiben los resultados obtenidos para el ensayo de aceite sobre la cara superior de las geometrías estudiadas. En la Figura 5 a), se encierra con un ovalo la burbuja de recirculación en la superficie para  $\phi: 5^\circ$ , donde las líneas de aceite suaves indican un comportamiento laminar de la capa límite. También, se señalan las regiones interiores, donde la letra A representa la zona del flujo en la sección redondeada que se encuentra adherido a la superficie, con una capa límite laminar, el que al desplazarse a través de la superficie se desprende, —se deduce debido a la acumulación de aceite— indicándose el punto desprendido con la letra B para luego adherirse nuevamente en la pequeña región indicada con C. Entre C y D se genera el punto de reacoplamiento y posterior

a D el flujo es arrastrado más rápidamente, como consecuencia de la capa límite turbulenta, esto se evidencia con los patrones del aceite con mayores dimensiones aguas abajo de D. No se evidencia desprendimiento de capa límite ni aparición de vórtices longitudinales en los bordes de la superficie inclinada. Dado que el punto y comportamiento es similar en todas las geometrías, para los dos ángulos restantes, no se señalaron las posiciones mencionadas.

En la Figura 5 b), se muestra el registro obtenido para  $\phi: 12,5^\circ$ . Donde en la delgada región V se genera una acumulación de aceite que indica la aparición de vórtices longitudinales en los bordes de la superficie inclinada. Adyacente a los vórtices laterales V se genera una zona de flujo adherido “A”. Para esta geometría no se aprecia desprendimiento de la capa límite sobre la superficie.

En la Figura 5 c); se señala con V la zona donde se presentan vórtices laterales. La región señalada con S muestra la parte de flujo separado sobre la superficie inclinada y abarca toda la zona que presenta una mayor acumulación de aceite; el desprendimiento de capa límite se produce aguas abajo del comienzo de la inclinación. Contiguo al flujo desprendido, se genera una zona de reacoplamiento con forma aproximadamente circular que presenta baja acumulación de aceite; donde el flujo se encuentra adherido a la superficie entre V y S, señalada con la letra A.



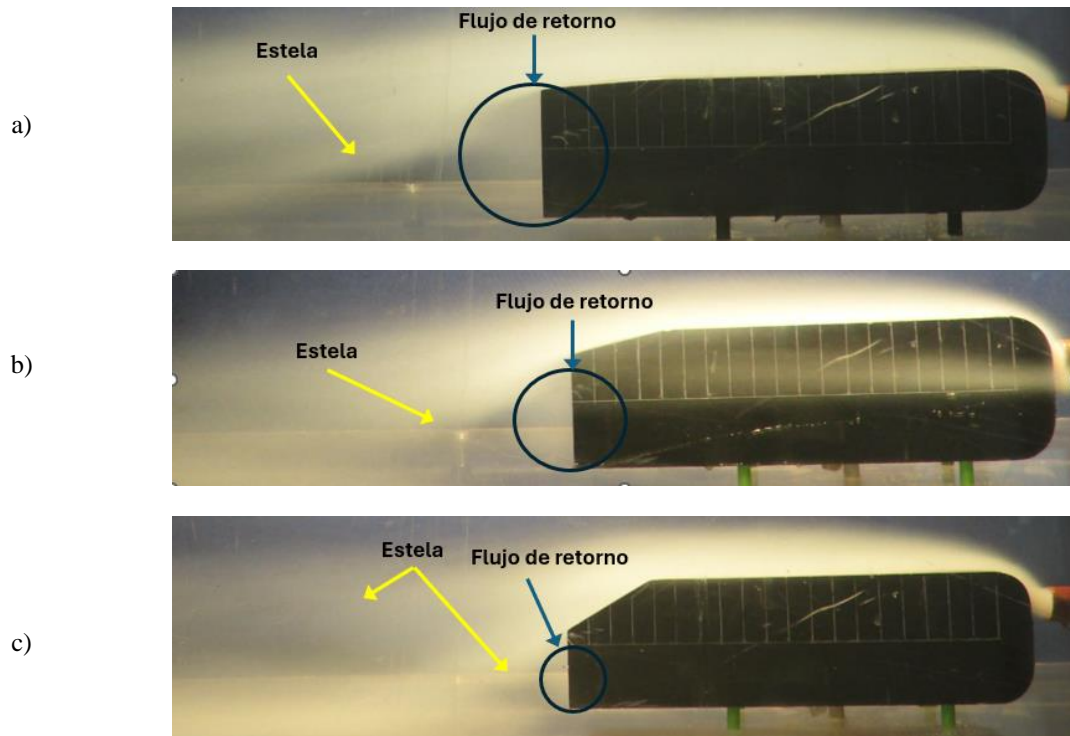
**Figura 5.** Resultado en el ensayo de aceite para cara superior: a)  $\phi: 5^\circ$ , b)  $\phi: 12,5^\circ$ , y c)  $\phi: 30^\circ$ .

### 3.4. Ensayo de humo

En esta sección se presentan los registros obtenidos para el ensayo de humo, es importante mencionar que el flujo de humo se inyectó en la sección central de las geometrías. En la Figura 6 a) se muestran los registros obtenidos para la geometría con  $\phi:5^\circ$ , en la cual, se señala con una flecha de color amarillo la zona donde se genera la estela (sección sin humo) detrás del cuerpo de Ahmed y también, se encierra con un círculo azul la zona de flujo de retorno.

En la Figura 6 b) se muestran los resultados para  $\phi:12,5^\circ$ , señalándose al igual que en la figura anterior, la estela y el flujo de retorno.

En la Figura 6 c) se exhiben los resultados para la geometría con  $\phi:30^\circ$ , indicándose los mismos puntos que en las figuras anteriores. Si bien en esta geometría el flujo de retorno posee menor extensión que en el resto de los casos analizados, se logra apreciar la aparición de una doble estela.



**Figura 6.** Resultados del ensayo de humo: a)  $\phi: 5^\circ$ , b)  $\phi: 12,5^\circ$ , y c)  $\phi: 30^\circ$ .

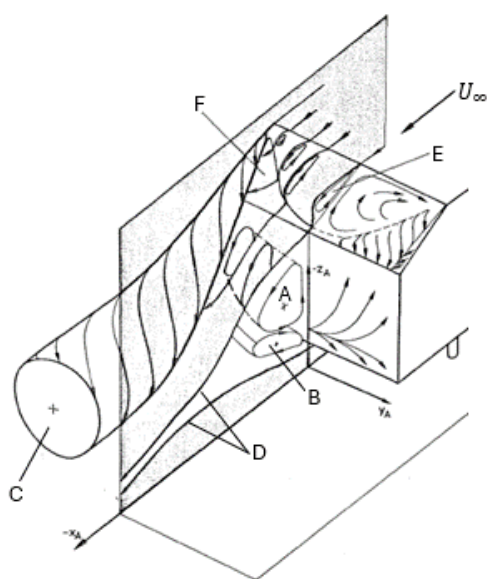
### 4. Discusión de resultados

Respecto a las rugosidades, el tratamiento superficial fue altamente efectivo. Al aplicarse solo imprimante se logró reducir  $R_a$  en una diferencia porcentual mínima de 78% en la cara lateral izquierda y máxima de 95% en la cara frontal comparando los valores promediados previa y posteriormente al tratamiento. En cuanto a  $R_z$ , las diferencias alcanzaron valores de 69% en cara superior como mínimo y 87% como máximo en cara frontal. Posterior a la aplicación de imprimante y pintura negra,  $R_a$  se redujo un mínimo de 82% en la cara lateral izquierda y un máximo de 95% en la cara frontal.  $R_z$  se redujo un mínimo de 84% en la cara lateral izquierda y un máximo de 90% en la cara frontal. Con esto, se puede inferir que la rugosidad es menor en las superficies tratadas con imprimante y pintura. Debe recalcar que, al ser un proceso manual, por más que el tratamiento fuese igual para todas las

superficies, los valores de rugosidades variaron en los puntos de medición seleccionados, lo mostrado en las Tabla 2 y Tabla 3 manifiesta lo mencionado. A pesar de ello, se cumplió el objetivo, ya que, sin tratar las superficies, podrían haberse generado desprendimientos de capa límite antes de lo conseguido, por efecto de las irregularidades superficiales y también, la burbuja de separación se hubiese originado a una distancia menor.

Uno de los puntos más relevantes del estudio de referencia se muestra en la Figura 7, donde se exhibe el esquema planteado en [1] para la formación de vórtices en la estela. La capa de corte que emerge del borde lateral inclinado; se curva formando un vórtice longitudinal señalado como C. También, en el borde superior e inferior de la sección vertical posterior, la capa de corte se enrolla como se indica en la Figura 7 formándose una sobre otra las regiones de flujo

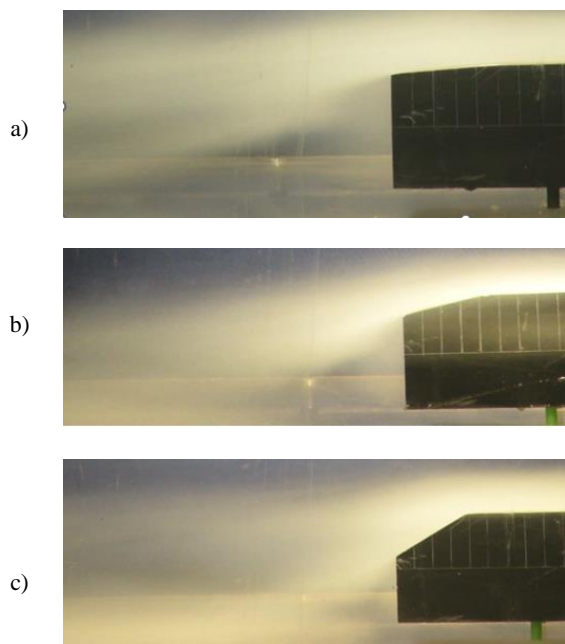
recirculatorio A y B —ambas en forma de herradura— dentro de la estela (también conocida como burbuja de separación) indicada por D. El flujo se separa aguas abajo del comienzo de la superficie inclinada y debido a la presencia de fuertes vórtices en los bordes laterales (C) el flujo separado no se expande por toda la superficie. Por efecto del flujo separado se genera una burbuja de recirculación “E” envuelta por dos superficies de flujo adherido señaladas con F. Las líneas de corriente en la superficie de la base, mostradas esquemáticamente detallan el proceso descrito para una superficie con  $\varphi: 30^\circ$ . Para geometrías con inclinación menor, los puntos E y F no se producen, presentándose líneas de corriente completamente adheridas a la superficie inclinada.



**Figura 7.** Esquema de formación de vórtices en estela para  $\varphi: 30^\circ$ . Fuente: [1].

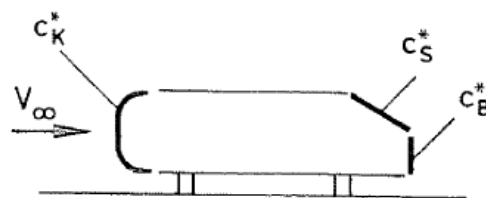
Para hacer una comparación entre lo planteado en la Figura 7 y las pruebas realizadas; en la Figura 8 a), b) y c); se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de humo con enfoque en la zona posterior para ángulos de inclinación  $\varphi: 5^\circ; 12,5^\circ$  y  $30^\circ$  respectivamente. Al comparar los registros ante el esquema de vórtices presentado en [1]; para las tres geometrías, se puede distinguir claramente el conjunto de los puntos A y B en la zona cercana a la base vertical posterior (señalado como flujo de retorno en Figura 6), disminuyendo su extensión al aumentar el valor del ángulo posterior  $\varphi$ . También, para los tres cuerpos estudiados, logra distinguirse la región D, correspondiente a la estela.

De haberse inyectado humo más cerca de alguna cara lateral (no al centro como se hizo), posiblemente se habría obtenido una visualización del flujo desprendido en el borde lateral de las superficies inclinadas (vórtice longitudinal), indicado como C en referencia.



**Figura 8.** Registros para ensayo de humo: a)  $\varphi: 5^\circ$ , b)  $\varphi: 12,5^\circ$ , y c)  $\varphi: 30^\circ$ .

En el estudio de referencia se midió la componente axial de presión (presión estática) de diferentes superficies a lo largo de la geometría. para determinar las contribuciones de arrastre relativo por efecto de presión debido a: parte frontal ( $C_K^*$ ), superficie inclinada ( $C_S^*$ ) y base vertical posterior ( $C_B^*$ ), según el lugar de la geometría, esto se indica en la Figura 9.



**Figura 9.** Definición de componentes para  $C_{D,presión}$ . Fuente: [1]

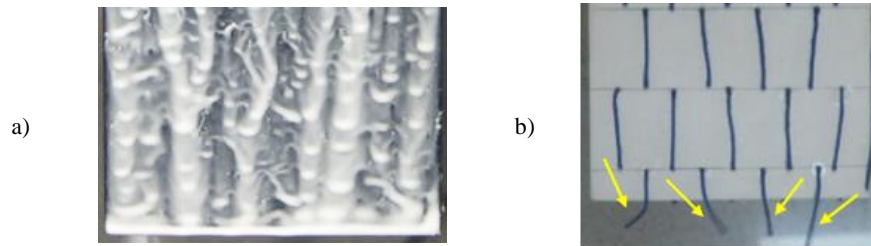
En la Tabla 6 se detallan las contribuciones de arrastre relativo para la obtención del coeficiente de arrastre por efecto de presión ( $C_{D,presión} = C_K^* + C_S^* + C_B^*$ ) y el coeficiente de arrastre total ( $C_D$ ) para todo el cuerpo de las tres geometrías analizadas ( $C_D = C_{D,fricción} + C_{D,presión}$ ).

**Tabla 6.** Contribuciones de arrastre relativo según estudio de referencia.

$\varphi$	$C_D$	$C_K^*$	$C_S^*$	$C_B^*$
$5^\circ$	0,231	0,016	0,010	0,158
$12,5^\circ$	0,230	0,016	0,037	0,122
$30^\circ$	0,378	0,016	0,213	0,092

Fuente: [1]

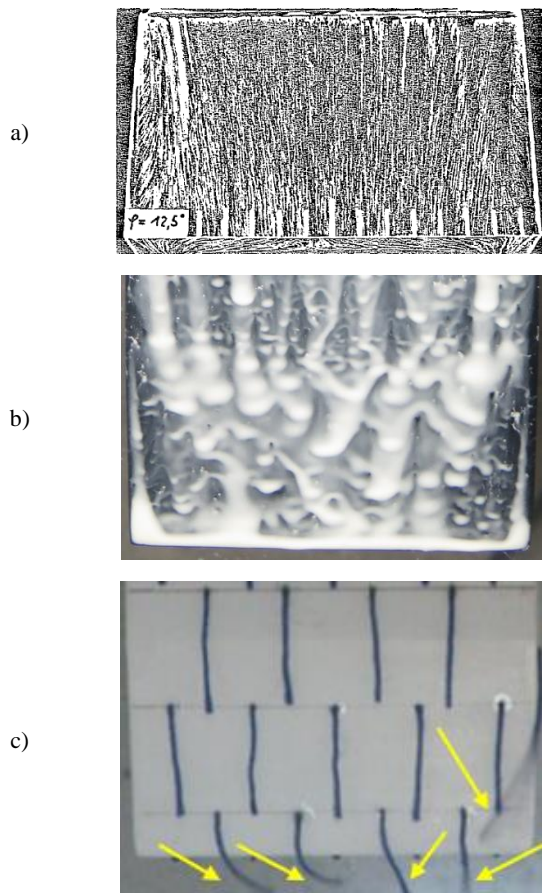




**Figura 10.** Comparación de patrón de flujo en superficie inclinada trasera  $\phi: 5^\circ$ : a) aceite, b) mechones.

En la Figura 10 se muestra una comparación entre los resultados obtenidos de manera experimental para los métodos de visualización sobre superficies aplicados a una geometría con  $\phi: 5^\circ$ , enfocándose en la superficie inclinada; donde, la Figura 10 a) muestra los resultados para el ensayo de aceite y la Figura 10 b) lo mismo para mechones, indicándose en esta última con flechas amarillas los hilos que presentaron mayores perturbaciones.

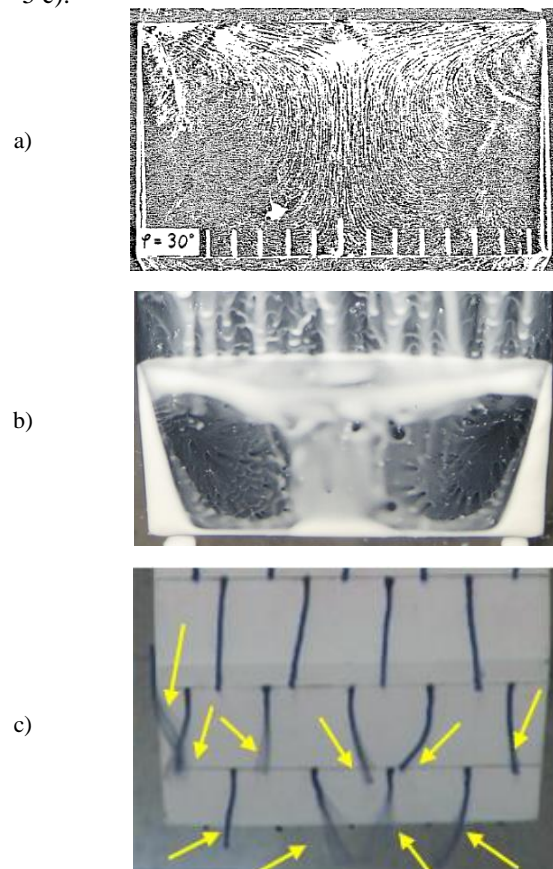
En el estudio de referencia se utilizó aceite para obtener el patrón de flujo en la zona inclinada trasera de las geometrías con  $\phi: 12,5^\circ$  y  $30^\circ$ . En la Figura 11 a) se exhibe el resultado obtenido en [1] para  $\phi: 12,5^\circ$ .



**Figura 11.** Comparación de patrón de flujo en superficie inclinada trasera  $\phi: 12,5^\circ$ : a) referencia, b) aceite y c) mechones. Fuente a): [1]

En la Figura 11 b) se muestra el patrón obtenido de forma experimental para la misma inclinación en el ensayo de aceite y en la Figura 11 c) se exhibe el comportamiento de los mechones; indicándose también con flechas los hilos con mayor movimiento. La flecha de mayor longitud apunta al hilo lateral.

Del mismo modo que en la Figura 11; en la Figura 12 se realiza la comparación para  $\phi: 30^\circ$ . Al contrastar entre los resultados del patrón de flujo en [1] y los obtenidos experimentalmente, se puede apreciar su similitud, en cuanto a la extensión y forma. También, con los resultados del ensayo de aceite logran visualizarse los puntos C, E y F de la referencia, señalados como V, S y A respectivamente en la Figura 5 c).



**Figura 12.** Comparación de patrón de flujo en superficie inclinada trasera  $\phi: 30^\circ$ : a) referencia, b) aceite y c) mechones. Fuente a): [1]

Según la Tabla 6, en  $\phi: 5^\circ$  y  $12,5^\circ$  el mayor arrastre por efectos de presión se produce en la zona vertical trasera ( $C_B^*$  en Figura 9); al analizar los resultados, se dilucida que es consecuencia del flujo de recirculación. Los vórtices en forma de herradura en ambos casos poseen la magnitud suficiente para mover los hilos, esto se corrobora con los registros del ensayo de mechones sobre la cara posterior en la Figura 4 a) y b) y también en la Figura 10 b) y Figura 11 c), donde los hilos en la parte inferior de la superficie inclinada ( $C_S^*$  en Figura 9); se mueven como consecuencia del flujo de retorno. Para  $\phi: 30^\circ$  el flujo de retorno es el de menor extensión, con una magnitud que no provocó movimiento en los hilos de la cara posterior, lo que se aprecia en la Figura 4 c). No obstante, en la superficie inclinada se produce el mayor arrastre por efectos de presión según se indica en la Tabla 6; por consecuencia de la compleja interacción entre el flujo adherido y los flujos desprendidos desde el borde lateral y la superficie inclinada, teniéndose un flujo dominado por efectos de presión con magnitud suficiente para mover todos los hilos dispuestos en la superficie inclinada tal como se muestra en la Figura 12 c).

## 5. Conclusiones

En cuanto tratamiento superficial, se concluye que fue efectivo, dado que los patrones generados en los tres ensayos realizados fueron similares en forma y se corresponden con los valores presentados en el estudio de referencia. Con esto se asume que los resultados expuestos en la Tabla 6 pueden considerarse análogos para las geometrías a escala.

En [1] se menciona que la interferencia entre el flujo de la parte trasera y la parte delantera es débil, como consecuencia de la sección media relativamente larga; no asegurando el resultado para una configuración con sección media corta. Posterior al estudio se concluye que lo propuesto en la referencia también se cumple para las geometrías en escala 1:5. Esto se corrobora con los resultados obtenidos en el ensayo de aceite (Figura 5), ya que la zona donde se produce la burbuja de recirculación es casi idéntica para los tres ángulos de inclinación analizados y también con la Tabla 6, donde se indica que la contribución de arrastre relativo por efectos de presión debido a la parte frontal ( $C_K^*$  en Figura 9) se mantiene constante para las tres geometrías. Por lo tanto, los efectos generados en la zona posterior son netamente debido al ángulo de inclinación y se generan sobre la superficie inclinada y la base vertical posterior ( $C_S^*$  y  $C_B^*$  respectivamente en Figura 9).

Uniando los resultados de las tres pruebas se puede concluir que en la geometría con  $\phi: 5^\circ$  no se generan vórtices longitudinales —por lo exhibido en el ensayo de aceite (Figura 10 a)) y el nulo movimiento del hilo

lateral en ensayo de mechones (Figura 10 b))—, pero si se tiene una mayor extensión de flujo de retorno (o reverso), es por ello que los hilos presentaron mayor movimiento en la cara vertical trasera de la geometría. En la geometría con  $\phi: 12,5^\circ$  se generan vórtices laterales —de baja magnitud— y una región de flujo adherido aledaña a los vórtices. Una configuración trasera de baja resistencia induce un flujo reverso débil en la estela, debido a aquellos los hilos en la sección trasera fueron los que menos oscilaciones presentaron. En el ensayo de humo la extensión de la estela es la de menor tamaño demostrando que el ángulo posterior de  $12,5^\circ$  es el que presenta mejor comportamiento aerodinámico de los tres analizados. La presión se recupera fuera de la estela y dado que mientras mayor sea su extensión, mayor será el efecto de arrastre de forma (o presión), la geometría con ángulo posterior de  $30^\circ$  es la que mayor arrastre posee, por dos razones: la segunda estela generada es de mayor extensión que cualquiera producida en las otras geometrías —se genera como consecuencia del flujo desprendido en la sección central de la superficie inclinada—. Y la segunda; el flujo en la superficie inclinada presenta tres condiciones. Por una parte, los vórtices laterales; por otra, la capa límite desprendida y el flujo adherido de forma aproximadamente circular entre las dos secciones, los que ocasionan un alto nivel de perturbaciones en el flujo.

Finalmente, se puede aseverar que los resultados obtenidos dan muestra clara de que se cumple el planteamiento inicial respecto a la similitud de patrones generados en forma y comportamiento, a pesar de no existir semejanza dinámica, basándose en los resultados de las tres pruebas realizadas al compararlos con lo exhibido en [1].

## 6. Referencias

- [1] S. R. Ahmed, G. Ramm y G. Faltin , «Some Salient Features of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake,» *SAE Technical Paper Series*, 1984.
- [2] COST, Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment, Brussels: COST Office, 2007.
- [3] C. Chang-Koon y K. Dae-Kun, «Wind tunnel blockage effects on aerodynamic behavior of bluff body,» *Wind and Structures*, vol. 1, n° 4, pp. 351-364, 1998.
- [4] J. B. Barlow , W. H. Rae y A. Pope , *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, Third ed., New York: John Wiley and Sons, 1999.