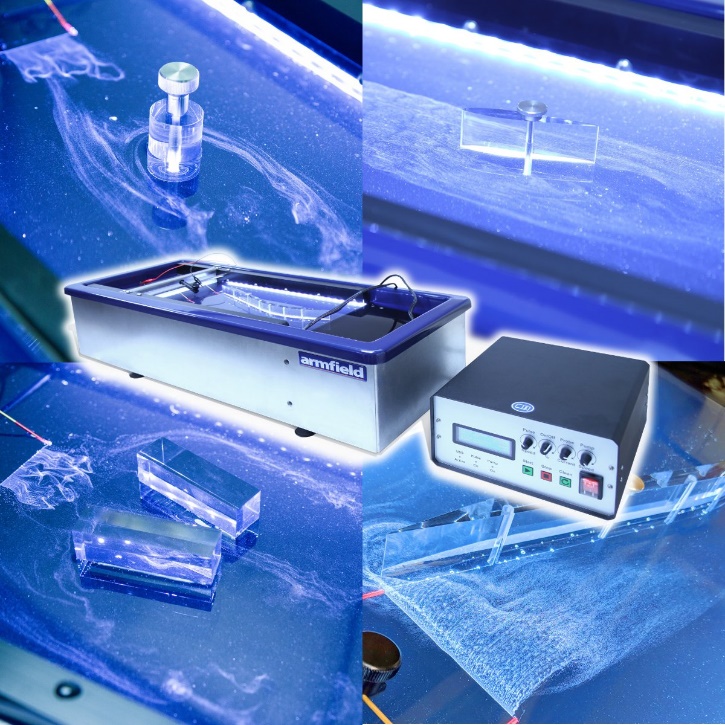
# C16-A - Visualizador de flujo por burbujas de hidrógeno TP 5: Flujo externo



## Previa

Hay un cuerpo de información previa que es imprescindible que tengas en cuenta antes de comenzar este trabajo experimental.

Lo vas a encontrar en:

<https://tecnoedu.com/recursos/UNLCHidrologia/ManualesCastellano/C16-A_RecomendacionesGenerales.docx>

## Placa plana inclinada

* Si se coloca una placa plana aguas abajo de un alambre de 75 mm de largo (preferiblemente aislado en por tramos y que produzca corrientes continuas de burbujas con un flujo de aproximadamente 25 mm/s), podrás ver varias de las características esenciales del flujo alrededor de una placa plana.
* Esta placa tiene extremos redondeados, pero la forma de los extremos hace muy poca diferencia cuando la placa está inclinada en un ángulo considerable con respecto a la corriente que se aproxima (ángulo de incidencia).
* Podrás ver que una corriente de burbujas se divide cuando golpea la placa, lo que indica que la velocidad a lo largo de la placa tiene un valor de cero en algún lugar cercano al centro de esta corriente.
* Dado que la velocidad normal a la placa en este punto debe ser cero, entonces claramente la velocidad resultante también es cero.
* Dado que esta parece ser una región de flujo donde hay poca turbulencia y, por lo tanto, poca pérdida de energía, podemos aplicar la ecuación de energía potencial del flujo:

constante a lo largo de una línea de corriente en esta región

* Si la velocidad V es cero, entonces la presión p debe alcanzar su valor máximo.
* Así, podemos ver que el punto de máxima presión, el punto de estancamiento, se produce cerca y ligeramente después del borde de fuga de la placa.
* Debajo de la placa el flujo se acelera y permanece relativamente tranquilo. Es muy similar a lo que se esperaría del flujo de un fluido ideal.
* Las velocidades más altas parecerían, considerando el ancho de las corrientes de burbujas, ocurrir en la parte inferior del borde de fuga.
* Por lo tanto, esperaríamos que la presión cayera desde un máximo en el punto de estancamiento hasta un mínimo en el borde de fuga.
* Por encima de la placa, el flujo obviamente se ha separado y la presión en la parte posterior de la placa estará fuertemente influenciada por las presiones existentes en los puntos de separación, es decir, relativamente bajas, por lo que se espera una fuerza neta en la dirección aguas abajo.
* Este patrón de flujo debe contrastarse con el de un fluido ideal; teniendo en cuenta la simetría que existe en el problema de flujo potencial, no habiendo fuerza de arrastre en el fluido ideal y una alta fuerza en el fluido real.
* Con ángulos de incidencia pequeños, el punto de separación se mueve ligeramente más aguas abajo en la parte superior de la placa y la estela resultante se vuelve más estrecha, inmediatamente hacia abajo, que el ancho proyectado de la placa con una reducción correspondiente en la resistencia.
* Con un ángulo de incidencia cero, los puntos de separación se mueven hacia la parte trasera de la placa y hay muy poca resistencia. Esto se debe a que las fuerzas de corte de la superficie se vuelven mucho más significativas.
* La naturaleza del flujo resultante se ve mejor colocando el alambre aguas abajo de la placa.

## Forma del borde de ataque

* Con ángulos de incidencia grandes, la forma del borde de ataque tiene poca importancia; Los puntos de separación están determinados en gran medida por el ángulo de la placa.
* Sin embargo, con ángulos pequeños la forma se vuelve muy importante.
* Para estudiar esto, el alambre debe ponerse en contacto con la sección. A medida que se acerca al punto de estancamiento, las burbujas, en virtud de su menor masa, se desvían más que el elemento equivalente de agua por el gradiente de presión creciente.
* Por lo tanto, si el alambre está a cierta distancia aguas arriba, no es posible que haya burbujas cerca de la superficie de la placa.
* Entre los accesorios incluidos hay una sección con dos remates, que se puede examinar con un ángulo de incidencia cero.
* La forma redondeada comentada anteriormente es muy buena, provocando muy poca o ninguna separación y mínima perturbación del flujo.
* Un solo chaflán provoca aún menos molestias en el lado plano, por lo que se utiliza como forma de las entradas de los conductos.
* Pero la separación ocurre en el otro lado y por lo tanto puede haber algún bloqueo en ese lado.
* Como era de esperar, la placa con extremo cuadrado causa separación en ambos lados y, como resultado, bastante más perturbación que cualquiera de las otras.

## El perfil aerodinámico

* El perfil aerodinámico es un caso especial de placa plana, diseñado para minimizar la probabilidad de separación y, por lo tanto, produce una resistencia mínima.
* El punto de separación está bastante abajo en el costado de la sección incluso con ángulos de incidencia considerables e incluso con los números de Reynolds muy bajos sugeridos para los experimentos anteriores.
* El retraso del inicio de la separación se logra reduciendo la curvatura de la superficie y, por tanto, la magnitud del gradiente de presión.
* Con números de Reynolds más altos, la separación ocurre más tarde debido al mayor impulso del flujo cerca de la superficie.
* Con frecuencia se incluyen alambres trampa para garantizar que la capa límite que se forma en la parte superior de la sección sea turbulenta, retrasando así aún más la separación.
* Otros dispositivos y técnicas utilizados para reducir la tendencia a la separación son las ranuras en el borde de ataque, que provocan un chorro de alta energía a lo largo de la superficie, y la succión, que elimina el fluido que se mueve lentamente de la capa límite antes del inicio de la separación y acerca el fluido que se mueve más rápido a la superficie.
* Con estos comentarios esperamos haber alimentado tu curiosidad y ganas de demostrar estas técnicas aprovechando las facilidades que te brinda este equipo.

## El vórtice inicial

* No hicimos mención de la sustentación en lo anterior ya que no es tan obvio como la resistencia en este entorno experimental.
* La sustentación depende del establecimiento de la circulación alrededor de la sección, ya sea de placa plana o de un perfil aerodinámico.
* Cuando un perfil aerodinámico comienza a moverse en relación con la corriente, el flujo inicial es muy parecido al de un fluido ideal. Por esto, el flujo en el borde de fuga tiende a rodearlo, desde la parte inferior hasta el punto potencial de estancamiento del flujo en la superficie superior.
* Sin embargo, a medida que el flujo se acelera, no puede doblar la esquina y se separa en el borde de fuga. Por lo tanto, un vórtice, que gira en sentido antihorario en las condiciones establecidas en la sección de *Perfil aerodinámico,* es arrastrado fuera de la sección hacia la corriente libre.
* La pérdida de este 'vórtice inicial' implica la existencia de un vórtice 'ligado' de la misma magnitud asociado con la sección. Este vórtice ligado debe existir ya que en todo el campo no había circulación antes de que comenzara el movimiento.
* Es el vórtice ligado el responsable de la generación de sustentación. La existencia de un vórtice inicial se puede demostrar colocando un alambre liso inmediatamente después de la sección en el centro del haz de luz.
* Es deseable un flujo bajo de 12 mm/s para mantener una lámina continua de burbujas aguas abajo.
* La sección, mantenida con un gran ángulo de incidencia, debe moverse repentinamente hacia arriba unos 25 mm aproximadamente.
* Un gran vórtice inicial se desprenderá del borde de fuga y verás que se mueve en ángulo recto con respecto al movimiento debajo de la sección.
* También podrás observar un vórtice de parada contrarrotativo.
* Con un perfil aerodinámico tridimensional de longitud finita, los vórtices iniciales y enlazados se unirán mediante los llamados vórtices de punta para formar un bucle de vórtice cerrado completo.
* Estos vórtices en las puntas se pueden observar con frecuencia en forma de estelas de vapor desde las puntas de las alas de los aviones que vuelan a gran altura.

## El cilindro circular

* Si un cilindro circular se coloca con su eje en ángulo recto con respecto al flujo de una corriente de fluido que se mueve lentamente, el flujo no se separa de la superficie del cilindro y se produce una estela estrecha y constante.
* Esto ocurre cuando los números de Reynolds (basados ​​en el diámetro del cilindro) son de un orden menor que la unidad.
* Para este problema del llamado flujo progresivo existe una teoría matemática atribuida a Lamb.
* Con números de Reynolds tan bajos, el concepto de capa límite contribuye poco a nuestra comprensión del problema.
* Se puede considerar que es extremadamente espeso y que afecta el flujo a una gran distancia del cilindro.
* A medida que aumenta el número de Reynolds, el concepto de capa límite se vuelve más útil.
* Llega un punto en el que se puede decir que la capa se separa de la superficie.
* Inicialmente esta separación se produce en la parte trasera del cilindro debido al gradiente de presión desfavorable que existe allí.
* Sin embargo, inmediatamente después de que se produce la separación, la estela se espesa y perturba aún más la "corriente libre", modificando así la distribución de presión.
* Como consecuencia de este bloqueo por la estela, los puntos de separación avanzan aguas arriba.
* Finalmente se estabilizan justo aguas arriba de la línea central del cilindro en lo que originalmente era una región con un gradiente de presión favorable.
* En esta etapa, se forman dos vórtices atrapados detrás del cilindro, simétricamente, y la estela resultante es laminar y constante.
* Con números de Reynolds en la región de 50, la estela comienza a oscilar lentamente alrededor de una posición media, pero los dos vórtices permanecen atrapados.
* Cuando el número de Reynolds aumenta aún más, la estela se vuelve rápidamente inestable y, a un valor de aproximadamente 70, los vórtices se desprenden alternativamente desde ambos lados del cilindro y se establece la familiar calle de vórtices oscilantes.
* Hay pocos cambios observables al aumentar el número de Reynolds, aparte de un aumento general de la turbulencia en la estela que se nota hasta números de Reynolds de aproximadamente 1e5. Sin embargo, los puntos de separación se mueven hacia la parte trasera del cilindro.
* Este movimiento es causado por la capa límite laminar anterior que se vuelve turbulenta con el resultado de que el punto de separación se retrasa.
* Si la corriente libre es muy turbulenta o el cilindro es rugoso, la transición de una capa laminar a una turbulenta se produce con números de Reynolds más bajos. Se pueden obtener valores cercanos a 1e4.
* Las variaciones anteriores en el patrón de la estela y el desprendimiento de vórtices relacionados tienen efectos significativos en las fuerzas que se observan en los cilindros.
* La separación inicial de la capa límite con sus vórtices atrapados provoca una desviación de la resistencia teóricamente predicha, lo que produce su ligera disminución.
* El establecimiento de la formación alterna de vórtices, que se produce a una frecuencia definida, da lugar a una fuerza de sustentación oscilante sobre el cilindro a medida que fluctúa la magnitud del vórtice ligado.
* Es esta fuerza de elevación oscilante la que puede causar la oscilación transversal de cilindros como los alambres de telégrafo, lo que resulta en su característico zumbido, y también en las chimeneas cilíndricas, con resultados en ocasiones desastrosos.
* Cuando los puntos de separación se mueven detrás del cilindro, la estela de presión relativamente baja se hace más estrecha y se da una reducción repentina en la resistencia experimentada por el cilindro.
* Alrededor del número de Reynolds crítico, la periodicidad definida asociada con el desprendimiento del vórtice se pierde, pero hay evidencia que sugiere que esto regresa en números de Reynolds del orden 4e6.
* Tené en cuenta el resultado algo sorprendente de que, dado que el número de Reynolds crítico puede reducirse haciendo más rugosa la superficie del cilindro, en las condiciones adecuadas un cilindro rugoso ofrecerá menos resistencia que uno liso.
* El mismo fenómeno se observa con una esfera y se ha aprovechado en el diseño de las pelotas de golf.
* Muchas de las características del flujo alrededor de un cilindro se pueden demostrar utilizando un alambre liso (75 mm de largo para producir una lámina continua de burbujas) y el surtido de cilindros concéntricos.
* Si bien la naturaleza del flujo aguas arriba y la ubicación de los puntos de separación se pueden determinar colocando el alambre aguas arriba del cilindro, el flujo en la estela se observa mejor colocándolo inmediatamente aguas abajo.
* Utilizando velocidades de flujo de 12 a 200 mm/s, cilindros de 3 a 25 mm de diámetro, podés estudiar la variación de la estela para números de Reynolds de 35 a 4,5e3.
* Cabe señalar la naturaleza tridimensional del flujo.
* Se pueden obtener valores más bajos de los números de Reynolds utilizando cilindros más finos; lo ideal es un palito de cóctel.
* Desafortunadamente, no es posible utilizar este equipo para acercarse al valor crítico del número de Reynolds. Incluso usando un cilindro de 100 mm de diámetro, el valor máximo sería 2e4, que está justo por debajo del valor crítico para los cilindros más rugosos.
* La dificultad de trabajar con números de Reynolds elevados no se limita a este aparato. Trabajar en el rango supercrítico por encima de 1e6 es difícil desde cualquier punto de vista y esto explica el suministro inadecuado de evidencia experimental que existe para flujos con números de Reynolds muy altos.
* Hemos discutido los vórtices iniciales en relación con los perfiles aerodinámicos. Por supuesto, se puede observar un fenómeno similar con el cilindro.En este caso hay dos, colocados simétricamente y contrarrotativos, ya que no se genera sustentación con números de Reynolds bajos. Estos se pueden observar de la misma manera que antes.

## El vórtice de herradura

* Si ubicás el alambre aguas arriba de los cilindros utilizados en la demostración anterior y cerca del lecho del canal, observarás un flujo tridimensional.
* La lámina de burbujas se enrollará formando un vórtice que será arrastrado hacia ambos lados del cilindro en forma de herradura.
* Esto se hace aún más evidente si cortás la corriente.
* El vórtice permanecerá visible durante muchos segundos después de que haya pasado el flujo principal de burbujas.
* Este vórtice es causado por la interacción del cilindro y la capa límite que crece desde el lecho del canal. Es una forma de separación de la capa límite.
* Probablemente una de las formas más sencillas de explicar el flujo descendente en la cara aguas arriba del cilindro es decir que la altura total asociada con el flujo cerca de la superficie es menor que la altura total a cierta distancia.
* Por lo tanto, la presión de estancamiento aumenta a medida que uno sube por el cilindro, es decir, hay un gradiente de presión que provoca el flujo hacia abajo cerca del pie.
* Una explicación alternativa se basa en la interacción del cilindro con la vorticidad asociada a la capa límite.
* En su forma más simple, esto puede representarse mediante un único tubo de vórtice que queda "atrapado" y, en consecuencia, estirado por el cilindro.
* Si se estira un tubo de vórtice, se vuelve delgado, por lo tanto, la velocidad de rotación aumentará de la misma manera que un patinador aumenta su velocidad de rotación doblando los brazos y reduciendo su momento polar de inercia.
* Este aumento en la vorticidad se puede observar como el vórtice de herradura.
* Este fenómeno se encontrará dondequiera que una capa límite se encuentre con una obstrucción, la raíz de una pala de turbina, el muelle de un puente en el lecho de un río (compará el patrón de erosión con la dirección del flujo en el vórtice) o un edificio alto en el sobre la superficie relativamente plana del planeta.
* Es el vórtice de herradura que se forma al pie de los edificios altos lo que da lugar a la corriente descendente desde la cara contra el viento del edificio y la inversión del viento a nivel del suelo.
* El efecto se intensifica si el cilindro se reemplaza por el bloque rectangular.
* Con su cara ancha normal al flujo, el tamaño del vórtice aumenta considerablemente y, bajo ciertas condiciones, se pueden observar múltiples vórtices.

## Lectura recomendada

Li y Lam 13; Olson 11; Pablo 9, 10; Prandtl 2, 3; Robinson 7, 9; Schlichting 9, 13, 24; Vennard