

Desarrollo Experimental de Equipo de Tomoscopia Láser

Resumen: El presente trabajo trata sobre la visualización de flujo de aire mediante la técnica de tomoscopia láser. En particular, se muestra el desarrollo experimental del equipo de tomoscopia láser del túnel de viento mayor del LAyF. Se indican los detalles de diseño del generador de humo, del láser y del sistema de posicionamiento. Finalmente se evalúa su comportamiento para la visualización de flujos estacionarios y no estacionarios, correspondientes al ensayo en túnel de viento de diversos tipos de maquetas. Los resultados mostraron que el equipo es de gran utilidad para visualizar flujos vorticosos y estelas, permitiendo además ver claramente la zona de recirculación de flujo luego de la separación de capa límite.

Palabras Claves: Tomoscopia láser, visualización de flujo, aerodinámica experimental, túnel de viento.

Abstract: This paper deals with the airflow visualization by means of laser sheet technique. In particular, it shows the experimental development of the laser sheet equipment for the LAyF's main wind tunnel. Design details are indicated for the smoke generator, laser and traversing system. Its behavior is finally evaluated for both steady and unsteady flow field's visualizations, corresponding to the wind tunnel testing of several kinds of models. The equipment was found to be very useful for the visualization of vortical flows and wakes, also allowing to see clearly the recirculation zone after the detachment point of the boundary layer.

Keywords: Laser sheet, flow visualization, experimental aerodynamics, wind tunnel

Miguel A. Aguirre, Fabio W. Milanese, Juan P. Ruscio, Carlos Olmedo.

ILAyF (Laboratorio de Aerodinámica y Fluidos) - Departamento de Ingeniería Aeronáutica -

Facultad Regional Haedo - Universidad Tecnológica Nacional

Paris 532 - Haedo - CP1706 - Bs. As - Argentina

Mail: www.frh.utn.edu.ar - aguirre.utn@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de la aerodinámica experimental es poder realizar un diagnóstico de flujo completo de un cierto caso de estudio. Esto implica realizar mediciones con balanzas, con sondas, etc. Al mismo tiempo, es necesario complementar estas mediciones con diversas técnicas de visualización de flujo que provean información adicional sobre el campo de movimiento alrededor de un modelo. Combinando la información cualitativa con la cuantitativa es posible lograr una comprensión profunda del comportamiento aerodinámico del modelo de estudio. La tomoscopia láser es una técnica de visualización de flujo que permite ver la posición de las partículas de humo suspendidas en el aire cuando atraviesan un plano laser gracias a la dispersión de luz que estas generan.

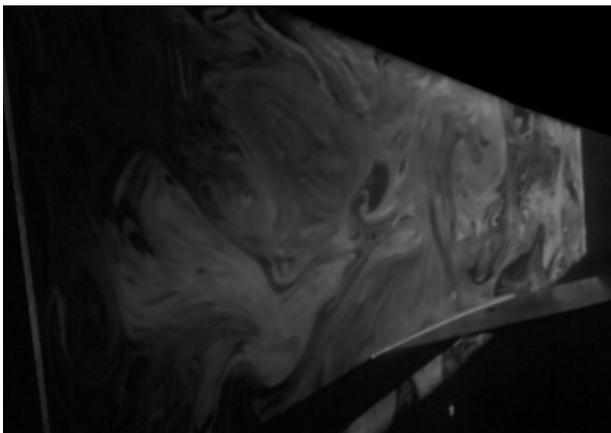


Figura 1 – humo atravesando un plano láser.

En la Figura 1 se puede ver un ejemplo de un plano laser atravesando una masa de humo confinada en una cámara de ensayos a velocidad nula.

Cualquier ensayo aerodinámico moderno requiere la utilización de técnicas avanzadas de visualización de flujo, por ello resulta fundamental contar con un equipo versátil de tomoscopia láser. Ese es el objetivo del presente trabajo de desarrollo experimental.

DESARROLLO DEL EQUIPO

Sistema

El objetivo de la tomoscopia laser es poder visualizar el patrón de flujo de aire contenido en un plano. Para lograr esto en un ensayo en túnel de viento, se monta un láser a un lado de la cámara de ensayos. Este laser tiene incorporado una óptica que permite generar un plano laser divergente, el cual atraviesa la cámara de ensayos. Del otro lado de la cámara de ensayos está el observador. El plano laser se ubica en posiciones específicas alrededor de la maqueta, por ejemplo por detrás de la misma, con el fin de ver el patrón de flujo generado por el modelo. Esto se aprecia esquemáticamente en la Figura 2.

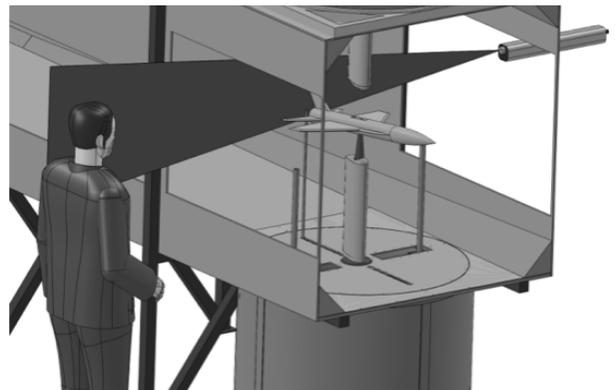


Figura 2 – sistema de tomoscopia láser.

Láser

El primer láser utilizado en el proyecto fue un láser metrológico de Helio-Neón con una potencia de 20mW y una longitud de onda de 632nm (color rojo). El mismo tiene un haz láser de alta coherencia pero como contraparte el equipo es muy grande y pesado, lo cual dificulta su manipulación: tiene 60cm de largo y pesa 2Kg.

A dicho láser se le agregó una lente tipo Powell que

convierte la viga láser en un plano divergente de 15° (Erickson e Inenaga, 1994). El lente se monta en una base magnética por delante del láser. El conjunto se observa en la Figura 3.



Figura 3 – láser original y lente Powell.

Con este equipo se realizaron las primeras pruebas del concepto de tomoscopia láser. La visualización del plano láser se lograba mediante vapor de agua (Corlett, 1982). En este punto no se buscaba trabajar en la tomoscopia propiamente dicha sino que se buscaba evaluar el sistema láser. Se encontró que al tener separados el láser de la lente Powell se dificultaba el proceso de alineación cuando se deseaba mover el plano láser.

La solución más simple es montar ambos componentes en una placa de modo que queden fijos entre sí. Sin embargo esto hace que el sistema láser sea aún más grande y pesado. La solución adoptada fue prescindir de la base magnética y vincular la lente Powell directamente al láser según se observa en la Figura 4. Este apéndice no

solo permite mantener alineado en todo momento el lente con el haz laser, sino que además permite girar la óptica. De esta forma se pueden hacer tomoscopías con la inclinación del plano láser regulable a voluntad.



Figura 4 – láser reformado.

Con este equipo se evaluó uno de los aspectos más críticos de la tomoscopia láser: difusión hacia adelante vs. retrodifusión.

La configuración de retrodifusión fue la primera en ser ensayada. En este caso, tanto el láser como el observador están ubicados del mismo lado de la cámara de ensayos. La intensidad de luz que percibe el observador será baja ya que la luz dispersada por las partículas que cruzan el plano láser es más intensa en la dirección opuesta. Esta configuración sin embargo es más compacta, requiere que el túnel de viento tenga una sola ventana y permite efectuar tomoscopías en zonas de difícil acceso (cavidades, tomas de aire, etc.).

La difusión hacia adelante en cambio, requiere que el observador esté del otro lado de la cámara de ensayos con el fin de observar una intensidad de luz dispersa mucho mayor. La calidad de la visualización es significativamente mejor, sin embargo esta configuración demanda

mayor espacio y requiere que el túnel de viento tenga dos ventanas. Con el fin de obtener la mejor visualización de flujo posible, se decidió implementar la difusión hacia adelante. Esto implicó reformar el túnel de viento, incorporándose dos ventanas de gran tamaño.

Un factor de gran importancia para lograr una tomoscopia láser exitosa es la oscuridad de la cámara de ensayos. En plena oscuridad se logra discriminar claramente el patrón de flujo observado. Esto se logra de dos formas: oscureciendo la cámara de ensayos u oscureciendo el laboratorio completo. Dado que el túnel de viento mayor del LAyF es de circuito abierto, la mejor solución fue oscurecer el laboratorio completo.

Otro aspecto a mejorar fue el color del láser. El equipo original emitía un haz de color rojo el cual es de baja visibilidad para el ojo humano. Por este motivo se realizaron experimentos con módulos láser comerciales standard de color verde (50mW). A igualdad de potencia del haz, el láser verde presenta mayor visibilidad.

Asimismo, una limitación del láser existente es que tiene un ángulo de apertura de solo 15°. Esto implica que si se desea hacer una tomoscopia en un plano de gran tamaño, se debe alejar mucho el láser de la cámara de ensayos. Esto resulta impráctico para realizar campañas de ensayos en túnel de viento. Por este motivo se decidió experimentar con ópticas Powell de 45° de apertura. El único inconveniente encontrado es que la intensidad de luz en el plano laser disminuye al incrementar el ángulo de apertura. No obstante los ensayos preliminares mostraron buenos resultados.

Otro problema encontrado es que el equipo original resultaba muy grande y pesado como para hacer tomoscopias de forma manual. En estos ensayos el aerodinamista mueve manualmente el láser para ir observando el patrón de flujo en zonas de difícil acceso. Se requiere entonces un láser más pequeño y liviano.

Como consecuencias de estas experiencias, LAyF decidió diseñar y construir su propio láser que se observa en la Figura 5. Tiene las siguientes características: dos planos láser de color verde de 50mW cada uno. El plano superior es de 15° de divergencia y tiene posición vertical. El plano inferior es de 45° de apertura y tiene posición horizontal.

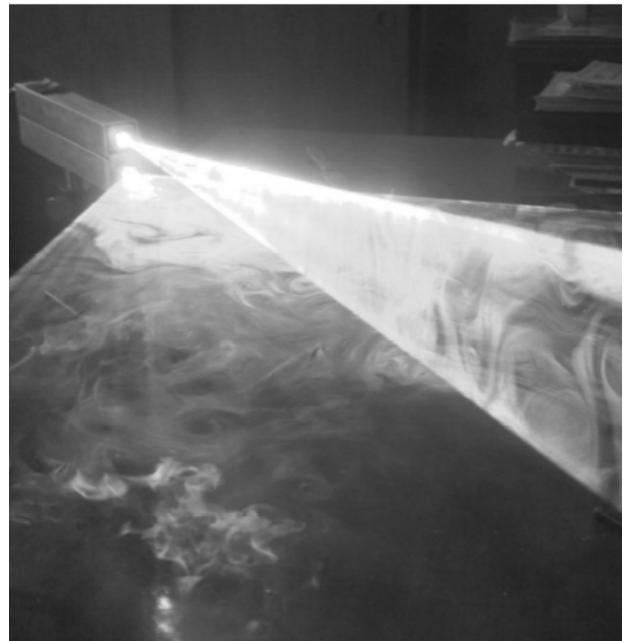


Figura 5 – láser LAyF LS-X1.

Este láser se adapta perfectamente a las necesidades del LAyF pues es significativamente más pequeño y liviano (16cm de largo y 200 gr de peso), con el agregado de que su diseño es modular, lo que lo hace fácilmente reparable en caso de falla. Asimismo, los dos planos perpendiculares entre sí son de utilidad para realizar tomoscopias complejas.

Generador de Humo

Para la ejecución de los ensayos de tomoscopia láser se requiere de un generador de partículas que ponga en

evidencia el patrón de flujo. Las primeras experiencias se realizaron con vapor de agua pero rápidamente se cambió por un generador de humo comercial estándar.

Con este equipo se realizaron una serie de ensayos preliminares para comprender su funcionamiento. Inicialmente se inyectaba el humo directamente en la cámara de tranquilización del túnel de viento (Inyección global). Esto hacía que se llenara de humo toda la cámara de ensayos y por ello se podía visualizar todo el plano laser completo. Pronto se descubrió que, para poder discriminar ciertas estructuras del flujo, es necesario inyectar el humo localmente en zonas específicas de la cámara de ensayos. Esta técnica permite identificar patrones característicos del flujo de aire, pero requiere que el humo sea introducido en la cámara de ensayos por medio de un tubo director (inyección local).

Este tubo director tiene asociado una pérdida de carga propia y por ello restringe el caudal de humo que circula en su interior. La solución es asistir este sistema con un ventilador como puede verse en la Figura 6.

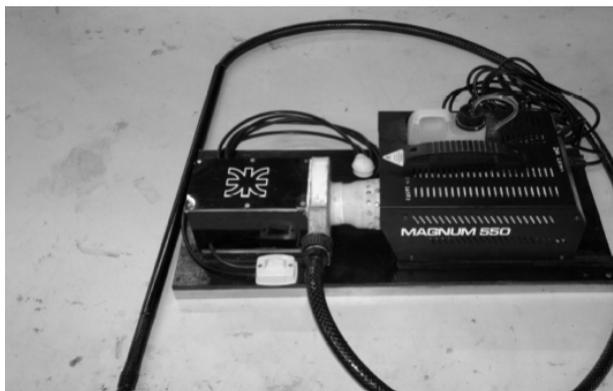


Figura 6 - Prototipo del generador de humo.

El primer punto a estudiar de este generador de humo asistido es la boquilla de descarga de humo. Se encontró que para realizar tomoscopías se necesita una descarga de humo localizada pero no tan pequeña como la requie-

rida para visualizar líneas de corriente por medio de filamentos de humo. Con una boquilla de descarga de 1cm de diámetro se encontraron muy buenos resultados.

La boquilla es precedida por un codo de 90º y un tubo director. Esto permite introducir el tubo director perpendicularmente a la cámara de ensayos y al mismo tiempo, el humo que sale de la boquilla queda alineado con la corriente de aire. De esta forma hay una mínima perturbación de la corriente de aire principal.

El tubo director está compuesto por dos tubos telescópicos de fibra de carbono. El material elegido apunta a minimizar la cantidad de humo que se condensa en su superficie interna. Asimismo, los tubos telescópicos permiten extender el largo total del tubo director y de esta forma se puede introducir la boquilla en cualquier punto de la cámara de ensayos. Este tubo director está unido a una manguera flexible que es resistente a la alta temperatura del humo (aproximadamente 100ºC).

La pérdida de carga asociada al conjunto boquilla/tubo director/manguera es vencida por un ventilador de asistencia de tipo centrífugo. El mismo aspira una mezcla de aire y humo, que lo envía luego hasta la boquilla de descarga.

Este prototipo fue ensayado exhaustivamente dando muy buenos resultados, por lo cual se procedió a construir el modelo definitivo que se muestra en la Figura 7.



Figura 7 - generador de humo final.

En el equipo definitivo se introdujeron ciertas mejoras de diseño para agilizar la manipulación y transporte: la bandeja permite desmontar fácilmente el generador de humo. Esto es necesario cuando se desea usar el generador de humo para que inyecte partículas en toda la cámara de tranquilización del túnel de viento. Es decir que el equipo permite realizar los dos tipos de inyección de partículas: local y global.

Asimismo, el ventilador y el generador de humo se controlan a distancia. Esto permite montar el generador de humo en una posición conveniente para el ensayo, mientras que el operador puede moverse libremente alrededor del túnel de viento para visualizar el flujo de aire.

Sistemas de posicionamiento

El objetivo del equipo de tomoscopia láser es que pueda ser operado por una sola persona. Esto implica que el operador pueda efectuar cuatro tareas con la mayor simpleza posible:

- Prender/apagar el generador de humo y el ventilador de asistencia.
- Posicionar la boquilla de descarga en el lugar más conveniente de la cámara de ensayos.
- Posicionar el plano láser.
- Visualizar el flujo de aire.

En los primeros ensayos estas tareas eran efectuadas por cuatro operadores diferentes (uno por cada tarea), lo cual demandaba una gran coordinación. Para solucionar este problema se diseñaron y construyeron dos sistemas de posicionamiento: uno para el tubo director de humo y otro para el láser.



Figura 8 – Sistema de posicionamiento.

El sistema de posicionamiento del tubo director de humo se observa en la Figura 8. Se trata de un mecanismo manual de 3 grados de libertad (rolido, cabeceo y desplazamiento axial del tubo) que permite posicionar con precisión la boquilla de descarga de humo.

El movimiento de rolido del tubo se logra por medio de dos casquillos de aluminio en donde entra el tubo de carbono con ajuste deslizante sin juego. Se puede rolar al tubo fácilmente de forma manual y la misma fricción lo mantiene en su lugar. El desplazamiento axial se logra moviendo el casquillo trasero a lo largo del riel que soporta los dos casquillos. El movimiento de cabeceo se logra desplazando el brazo de articulación a lo largo de un riel vertical y se retiene fácilmente con un tornillo moleteado.

El sistema de posicionamiento del láser se observa en la Figura 9.

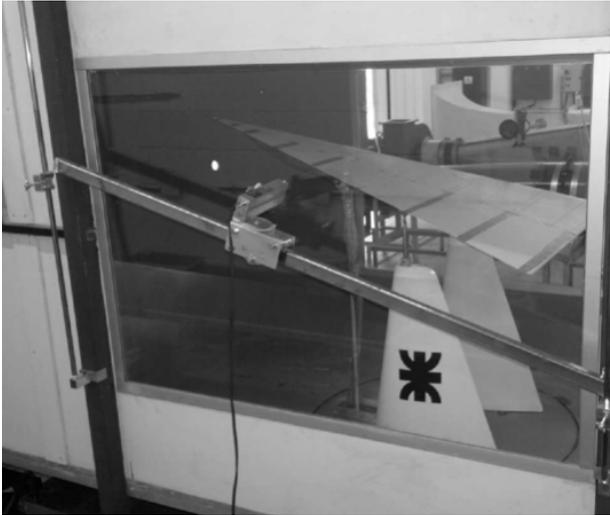


Figura 9 - Sistema de posicionamiento.

Se trata de un mecanismo manual de 5 grados de libertad que permite posicionar con precisión al plano láser. Está conformado principalmente por un riel y un carro. El riel es rectangular y tiene 2 grados de libertad: traslación vertical y rotación en el plano. Este movimiento se logra gracias a dos guías lineales montadas verticalmente en los marcos estructurales del túnel de viento. El riel rectangular se apoya en sus extremos en estas dos guías lineales. Para mantenerlo en posición se ajusta un tornillo de retención. Una vez que el riel tiene la inclinación deseada, es posible realizar un barrido con el láser a lo largo del riel. Para lograr esto se monta el láser en un carro que recorre el riel y que puede bloquearse en cualquier posición deseada mediante un tornillo moleteado. El láser no está rígidamente montado en el carro sino que entre ellos hay un sistema de engranajes que permite girar al laser tanto en cabeceo como en guiñada. El ajuste de la posición angular se realiza manualmente moviendo las últimas ruedas del tren de engranajes. Tras realizar las pruebas de funcionamiento se encontró que ambos mecanismos son adecuados para la aplicación deseada.

Por último se agrega que los dos sistemas de posicionamiento son manuales pero pueden automatizarse fácilmente. En esta instancia se prefirió hacerlos manuales ya que la mayoría de las aplicaciones requiere fijar el plano láser en una sola posición durante un largo intervalo de tiempo (duración del ensayo). Solo en pocas aplicaciones se necesita realmente un desplazamiento continuo del plano láser. Eso se logra fácilmente desplazando el carro del láser a lo largo del riel de forma manual.

EVALUACIÓN OPERACIONAL

En este apartado se muestran algunas aplicaciones del equipo de tomoscopia láser. El objetivo es determinar cuáles son los tipos de flujo que pueden ser observados o detectados y cuáles son las limitaciones de la técnica.

Ala Delta

Para realizar el desarrollo del sistema de tomoscopia laser se utilizó un ala delta de 70° de flecha. Esto se debe a que esta maqueta está muy bien caracterizada por otros laboratorios (Huang, 2003) y por ello se conocía de antemano las características de flujo que debían ser observadas. En primer lugar se probó el generador de humo. El objetivo era ajustar la posición de la boquilla de descarga de humo de forma tal que se puedan visualizar los vórtices primarios que se forman sobre el ala delta. Esto se pudo hacer sin problemas en todo el rango de ángulos de ataque de la maqueta gracias al mecanismo de posicionamiento del tubo director.



Figura 10 - visualización de vórtices del ala.

Esta técnica de visualización de flujo (generador de humo solamente) permite ver la estructura de los vórtices primarios cuando el ala delta tiene ángulos de ataque moderados como se observa en la Figura 10.

Cuando se incrementa aún más el ángulo de ataque del ala delta se logra observar con claridad la ruptura de los vórtices primarios. Esto se aprecia en la Figura 11.



Figura 11 - ruptura de los vórtices primarios.

En la Figura 12 se muestra el detalle de la ruptura del vórtice derecho a grandes ángulos de ataque.

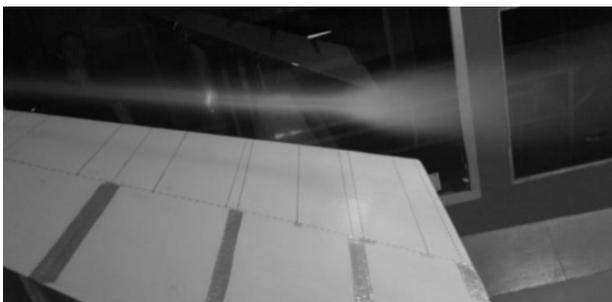


Figura 12 - detalle de la ruptura del vórtice.

En la zona donde el vórtice está estable se forma una región oscura en su parte central. Esto se debe a la centrifugación de las partículas de humo dentro del núcleo del vórtice. Luego de la ruptura, en cambio, desaparece ese núcleo libre de partículas de humo. Ahora el vórtice contiene partículas uniformemente distribuidas en su sección, lo que demuestra la reducción dramática de la intensidad del vórtice. Estas características las veremos en detalle con el sistema de tomoscopia láser.

Se repitió el ensayo de ruptura de vórtice pero a muy baja velocidad. Este permitió observar claramente la formación de la ruptura helicoidal que se muestra en la Figura 13. Al producirse la ruptura, el vórtice se desestabiliza adoptando una nueva configuración geométrica, pasando de la línea recta a un helicoides. En el ensayo a alta velocidad sigue existiendo el helicoides, pero como gira a gran velocidad no se logra ver su geometría en detalle.



Figura 13 - ruptura helicoidal.

En esta parte de la evaluación del sistema queda en evidencia una de las ventajas de la inyección local de humo: es posible visualizar uno de los vórtices o los dos al mismo tiempo simplemente cambiando la posición de la boquilla de descarga. Esto resulta muy útil en las campañas de tomoscopia láser ya que de esta forma el

aerodinamicista se puede concentrar en analizar una región específica del flujo de aire. Esto es algo que no se puede lograr con la inyección global de humo.

Una vez que se logra operar con fluidez el sistema de inyección de humo se puede proceder a realizar las tomoscopías. Para ello se posiciona la maqueta a ángulos de ataque moderados (sin ruptura de vórtice) y se activa el plano láser vertical. De esta forma queda en evidencia la sección transversal de los vórtices según se aprecia en la Figura 14.

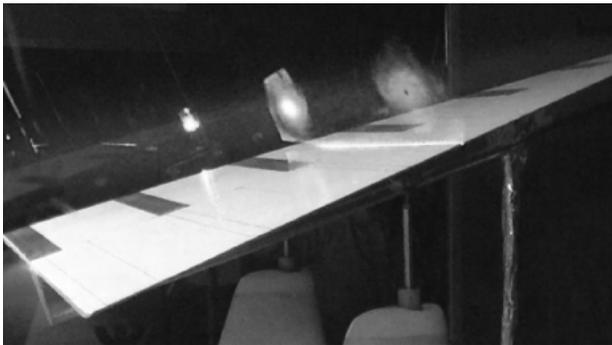


Figura 14 – tomoscopia de los vórtices.

Si bien es posible realizar tomoscopías con la maqueta iluminada, es conveniente oscurecer todo el recinto del laboratorio ya que permite mejorar la visualización de los vórtices. Esto se aprecia en la Figura 15.

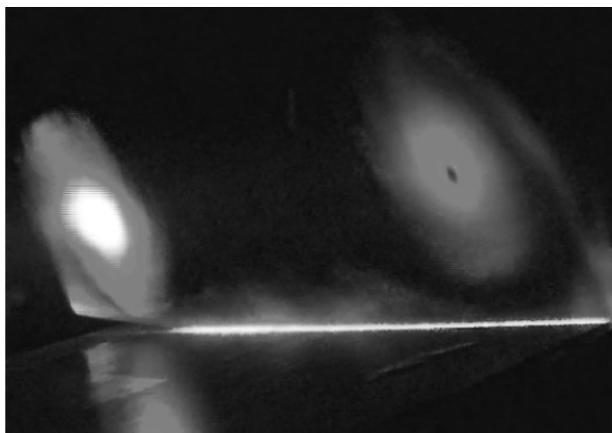


Figura 15 – detalle de la tomoscopia.

La tomoscopia láser transversal permite identificar claramente las 3 características del flujo sobre el ala delta: la lámina de corte que está separada del borde de ataque, el vórtice primario y el vórtice secundario. El vórtice primario particularmente revela la posición de su núcleo pues justamente allí no hay partículas de humo (ONERA, 1981).

Las características del patrón de flujo del ala delta se conservan incluso cuando se opera el túnel de viento a muy baja velocidad. Esto permite visualizar con claridad la trayectoria de las partículas que atraviesan el plano laser y realizar una mejor interpretación de resultados. En particular, se logra mejorar sustancialmente la visualización de los vórtices secundarios con respecto al ensayo a máxima velocidad.

El ensayo a baja velocidad se observa en la Figura 16, en donde se aprecia además, el filamento de humo a lo largo del núcleo del vórtice primario.

Para profundizar estas observaciones se hace una tomoscopia doble con los planos laser horizontal y vertical de acuerdo a lo observado en la Figura 17. El plano de 45° de apertura está alineado a lo largo del núcleo del vórtice. Allí se aprecia claramente una línea oscura que representa el núcleo.

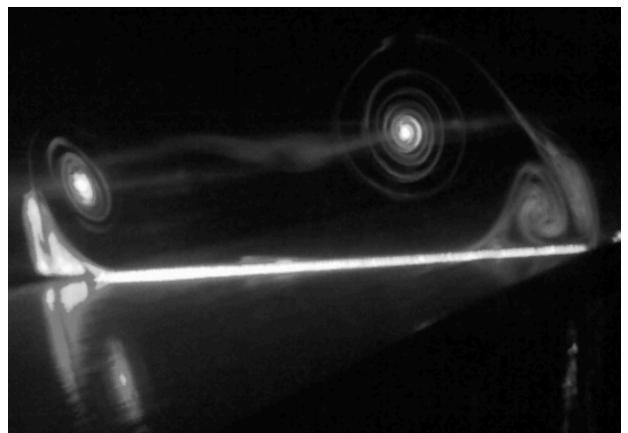


Figura 16 – tomoscopia a muy baja velocidad.

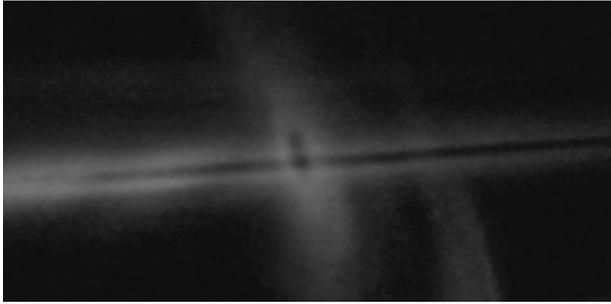


Figura 17 - tomoscopia laser doble.

Una vez analizado en profundidad la tomoscopia de los vórtices sin ruptura, se procede a estudiar su ruptura a grandes ángulos de ataque. En la Figura 18 se observa la tomoscopia láser doble del vórtice en condición de ruptura. El plano horizontal ilumina el núcleo del vórtice a lo largo del mismo, mientras que el plano laser vertical corta al vórtice aguas abajo del punto de ruptura.

Con el plano horizontal se observa que luego de la ruptura desaparece el núcleo libre de partículas de humo y que su tamaño se incrementa considerablemente producto de la desaceleración axial del núcleo.

El punto de ruptura puede identificarse con precisión mediante la lámina laser longitudinal alineada con el núcleo del vórtice. Por convención (Mitchell, 2003) se suele tomar la ruptura como el punto donde deja de existir el núcleo del vórtice libre de partículas de humo. Esto se observa claramente en la Figura 18.



Figura 18 - tomoscopia doble de la ruptura.

Repitiendo esta tomoscopia para diversos ángulos de ataque es posible trazar la curva de evolución de la ruptura del vórtice en función del ángulo de ataque del ala delta. Los resultados se aprecian en la Figura 19, en donde “ α ” es el ángulo de ataque del ala y “ X_{rv}/C ” representa la posición longitudinal de la ruptura referida a la cuerda del ala.

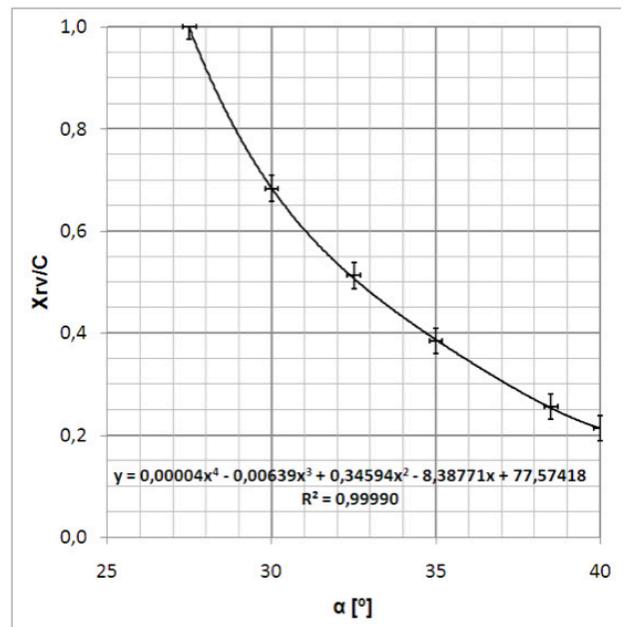


Figura 19 - posición de la ruptura de vórtice.

Finalmente, se repitió el ensayo de la figura 13 a muy bajas velocidades y con ruptura, pero esta vez se le hizo una tomoscopia longitudinal. El resultado se muestra en la Figura 20, donde queda en evidencia la sucesión de estructuras vorticosas. Esto confirma que el helicoide de ruptura es una estructura vorticiosa en espiral.

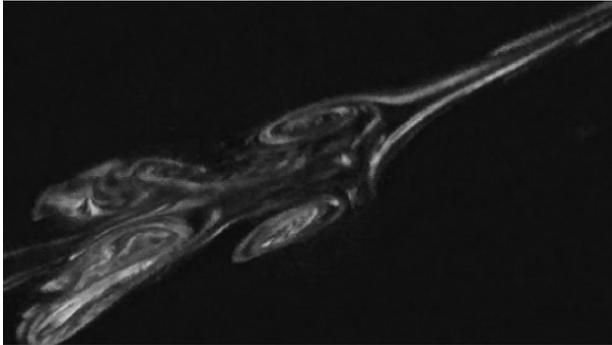


Figura 20 - tomoscopia de la ruptura.

La campaña de ensayos de visualización de flujo en el ala delta resultó sumamente satisfactoria. Se pudieron observar claramente todas las características aerodinámicas típicas, y además, el equipo de tomoscopia laser demostró tener las cualidades correctas para efectuar el ensayo fluidamente en todo el rango de velocidades del túnel de viento.

Semiala Rectangular

Una vez verificado el correcto funcionamiento del equipo de tomoscopia láser con el ala delta, se prosiguió a realizar una segunda etapa de evaluación. Esta vez se utilizó una semiala rectangular de alargamiento 5 con perfil NACA 4415. Con esta maqueta se trabajó en la visualización de la separación de capa límite que ocurre a grandes ángulos de ataque. El procedimiento a seguir fue similar al anterior. Primero se posicionó la boquilla de descarga de modo que el humo se disperse en la zona del extradós a la mitad de la semienvergadura. Luego se apagaron las luces del laboratorio y se activó el láser horizontal. El resultado obtenido se observa en la Figura 21. Allí se aprecia claramente el proceso de separación de capa límite en el extradós a grandes ángulos de ataque (Mulleners et al., 2012): inmediatamente después del punto de separación se

observa la zona de recirculación de flujo, junto a la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz. Aguas abajo ya empieza la zona de turbulencia a gran escala en donde el flujo se torna caótico y el humo se dispersa en la estela.

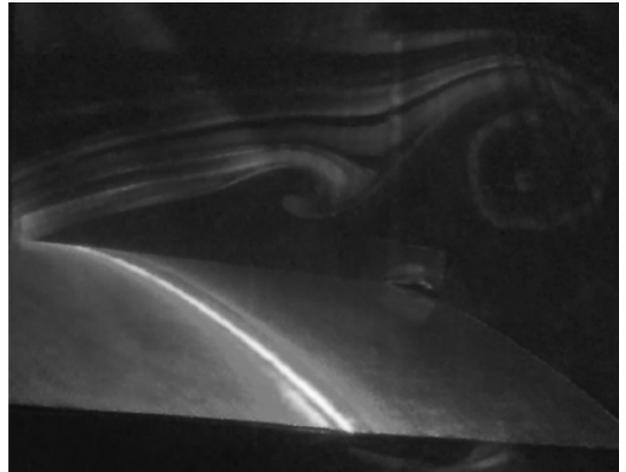


Figura 21 - separación de capa límite.

En el caso de separación de capa límite se encontró que resulta fácil identificar cada región del flujo cuando la velocidad de corriente libre es baja. A altas velocidades las regiones siguen existiendo bien definidas pero el ojo humano no es capaz de visualizarlo claramente. En este caso se requiere asistencia de una cámara de alta velocidad (Caso similar al del ala delta).

Cilindro

Para finalizar la evaluación del equipo de tomoscopia se realizó el estudio del flujo alrededor de un cilindro. En particular el objetivo fue visualizar la "calle de torbellinos de Von Karman" (Houghton y Carpenter, 2003).

La maqueta utilizada es un cilindro de acrílico de 55mm de diámetro montada de forma vertical en la cámara de ensayos del túnel de viento.

Para visualizar esta estela se tienen 2 alternativas: inyección de humo aguas arriba de la maqueta o inyección de humo en el interior de la maqueta.

El primer caso es similar al que hemos desarrollado hasta aquí: se posiciona la boquilla de modo que el humo se disperse alrededor del cilindro y luego se activa el plano láser horizontal. Con esta técnica sin embargo solo se observa la parte externa de la estela, mientras que la parte interna prácticamente no contiene partículas de humo.

Para poder visualizar únicamente la estela se utiliza un enfoque diferente: inyección de humo en el interior de la maqueta. Esto implica llenar todo el interior del cilindro con humo y efectuarle unas ranuras por las cuales salga el humo de modo que alimente directamente la estela. La tomoscopia correspondiente se muestra en la Figura 22.

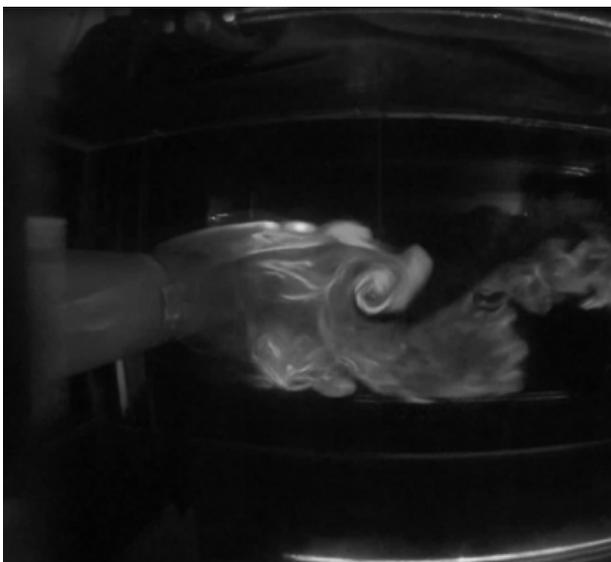


Figura 22 – vórtices de Von Karman.

Los resultados fueron muy satisfactorios ya que la tomoscopia no solo permitió visualizar la estela en detalle, sino que además permitió apreciar la variación de la frecuencia de los vórtices al incrementar la velocidad de corriente libre. A velocidades moderadas, nuevamente se encuentra la limitación del ojo humano, que no logra discriminar cada una de las estructuras vorticosas. Nuevamente, el problema se soluciona con una cámara de alta velocidad.

Otras Aplicaciones

El equipo de tomoscopia láser pasó de su etapa de desarrollo a la etapa de pleno servicio. Actualmente se lo utiliza en aplicaciones de investigación, académicas y de servicios a terceros.

CONCLUSIONES

La técnica de visualización de flujo por tomoscopia láser permite obtener una comprensión profunda de flujos tridimensionales complejos, especialmente en el caso de flujos separados y estelas. La técnica demostró ser sumamente versátil, permitiendo ver a voluntad tanto el flujo completo en un plano así como algunas estructuras aisladas.

El equipo desarrollado para el túnel de viento mayor del LAyF puede ser operado por una sola persona, lo cual resulta de gran practicidad para llevar adelante largas campañas de ensayos en túnel de viento.

La técnica resultó ser aplicable tanto en flujos estacionarios como no-estacionarios.

REFERENCIAS

Erickson, Inenaga, "Fiber-Optic-Based Laser Vapor Screen Flow Visualization System for Aerodynamic Research in Larger Scale Subsonic and Transonic Wind Tunnels", NASA-TM-4514, 35-36, (1994).

Corlett, "Operational Flow Visualization Techniques In The Langley Unitary Plan Wind Tunnel", NASA-CP-2243, 68, (1982).

Huang, "Critical Assessment Of Test Cases On Vortex Breakdown Over Slender Delta Wings Under Static Model Conditions", NATO RTO-TR-AVT-080, 35-40, (2003).

ONERA, "Visualisation d'écoulements aérodynamiques par plan laser", ONERA-Groupe Visualisation et métro-

logie Optique, (1981).

Mitchell, "Experimental Data Base Selected For Numerical And Analytical Validation And Verification: Onera 70-Deg Delta Wing", NATO RTO-TR-AVT-080, 4-7, (2003).

Mulleners, Le Pape, Heine, Raffel, "The Dynamics of Static Stall", 16th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 09-12 July, 2012, 3-4, (2012).

Houghton, Carpenter, "Aerodynamics for Engineering Students", fifth edition, Butterworth-Heinemann, England, 399-406, (2003).