

Estudio experimental de los campos de velocidades de dos diseños de boquillas de melt blown

Experimental study on the velocity field of two melt blown die designs

Ignacio Formoso¹, Alejandro Rivas², Gorka Sánchez³, Juan Carlos Ramos⁴, Raúl Antón⁵

Recibido: junio 2018

Aprobado: setiembre 2018

Resumen.- Se han realizado mediciones de los campos de velocidades del aire en dos diseños de boquillas de melt blown utilizando anemometría de hilo caliente, obteniéndose resultados para dos componentes de la velocidad. En este artículo se presentan y se comparan los principales resultados obtenidos para cada diseño de boquilla. También se analiza el efecto que producen los distintos parámetros geométricos de las boquillas en los campos de velocidades generados por las mismas. Las conclusiones emergentes de este trabajo ayudan a profundizar la comprensión acerca del funcionamiento de las boquillas de melt blown destinadas a aplicaciones de cola caliente.

Palabras Clave: *Melt blown; textil no tejido; anemometría de hilo caliente*

Summary.- *The air velocity field of two melt blown die designs has been measured using hot wire anemometry. The aim of this article is to present and compare the results obtained for the two designs. Moreover, the effect that the main geometric parameters have on the resulting velocity field of each design is also discussed. The conclusions that emerge from this work help to gain a much deeper insight into the performance of the melt blown dies designed to produce hot melt adhesives.*

Keywords: *Melt blown; nonwoven fabric; hot wire anemometry*

1. Introducción.- El proceso conocido como ‘melt blown’ o ‘meltblowing’ (MB) tiene como principal objetivo producir microfibra a partir de resinas termoplásticas, compuestas a base de polipropileno y polibutileno, siendo uno de los procedimientos utilizados para la fabricación de los textiles no tejidos. Éste encuentra una gran variedad de aplicaciones industriales, tales como la fabricación de productos sanitarios, medios de filtración y accesorios médicos, pero también se utiliza para la aplicación de adhesivos de cola caliente. Este artículo presta especial atención a esta última aplicación.

El proceso encontró su origen ya en la década de 1950 en el Laboratorio Naval de Investigación en los Estados Unidos, aunque luego el proceso de fabricación entró en desuso y hace algunas décadas recobró interés por parte del sector industrial [1]. El MB es un proceso de un solo paso: el

¹ TECNUN, Universidad de Navarra, San Sebastián, España, iformoso@tecnun.es

² TECNUN, Universidad de Navarra, San Sebastián, España, arivas@tecnun.es

³ TECNUN, Universidad de Navarra, San Sebastián, España, gsanchez@tecnun.es

⁴ TECNUN, Universidad de Navarra, San Sebastián, España, jcramos@tecnun.es

⁵ TECNUN, Universidad de Navarra, San Sebastián, España, ranton@tecnun.es

adhesivo es fundido en un tanque, o bien en una extrusora, y es bombeado por medio de una bomba de engranajes hasta que, después de atravesar un cabezal, al que también ingresa una línea de aire comprimido, éste llega a la salida del sistema que consiste en un conjunto de boquillas. Normalmente, éstas se componen de un arreglo de orificios o ranuras por los cuales el adhesivo fundido y el aire caliente son expulsados al exterior. Apenas abandona el sistema, la fibra es arrastrada y atenuada por dicha corriente de aire caliente de alta velocidad, para finalmente ser depositada sobre una cinta o sustrato [1] (Figura I). Dependiendo de la finalidad a la que se destine el resultado del MB, éste podrá ser sometido a procesos posteriores ya sean de carácter superficial, ultrasónico, térmico o de otra índole. La nomenclatura que ha sido utilizada en la Figura I se describirá en la siguiente página.

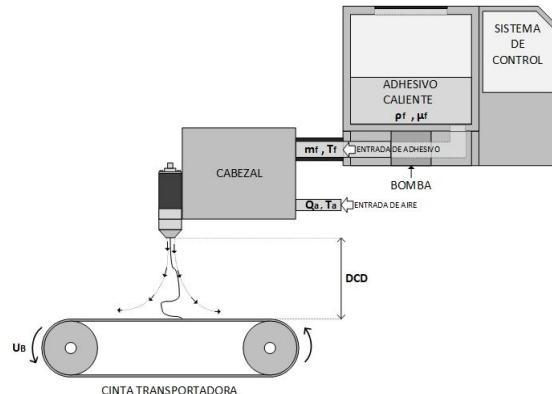


Figura I.- Esquema del proceso de fabricación de MB

Las boquillas representan una pieza fundamental del sistema y existen diversos diseños de las mismas, utilizándose uno u otro diseño según el patrón de adhesivo que se desee obtener sobre el sustrato. Los diseños de boquilla que se utilizan en mayor medida son los de doble ranura ('slot'), los anulares ('annular') y los de espiral ('swirl') (Figura II). En este trabajo se estudiará una clase de boquillas ligeramente distintas a las de slot y que presentan ciertas semejanzas geométricas con otro diseño de boquillas denominadas de tipo 'Schwarz'. En este último diseño de boquillas, las salidas capilares de adhesivo se encuentran rodeadas de salidas de aire en forma de orificios [2]. Cabe destacar que, aunque los diseños de boquilla presenten diferencias geométricas entre sí, el principio de formación del MB es siempre el mismo: el estiramiento de una fibra adhesiva caliente a expensas de la inyección de aire comprimido a alta temperatura [3].

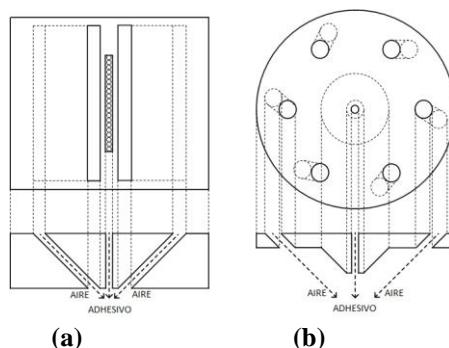


Figura II.- Diseños de boquilla más utilizados en la fabricación de MB: (a) de doble ranura, (b) de espiral

El diámetro final que alcanzan las fibras adhesivas depende de muchas variables, siendo las siguientes algunas de las más importantes: la temperatura del aire (T_a), la temperatura del adhesivo (T_f), el gasto de aire (Q_a), el gasto mísico de adhesivo (mf), la distancia de las boquillas al sustrato (DCD), la velocidad del sustrato (UB) y por último la viscosidad del adhesivo (μ_f), la cual normalmente se expresa a través del *Melt Flow Rate* (MFR) que indica cuántos gramos de adhesivo fluyen por un orificio, de diámetro especificado, bajo una carga determinada en un tiempo de 10 minutos. Si bien el diámetro final de las fibras no resulta ser completamente uniforme, en general responde a una distribución log-normal y, en la mayoría de las aplicaciones, el rango de diámetros de la misma puede variar desde 2 hasta 10 micrómetros [2].

Algunas de las propiedades más interesantes que destacan en los entramados de microfibras producidos por MB son las estructuras porosas que forman y la gran área superficial de los mismos. La primera de estas cualidades es aprovechada en la producción de filtros y la segunda en el desarrollo de uniones adhesivas. Sin embargo, este proceso industrial no se encuentra exento de mejoras. Uno de los mayores inconvenientes que se encuentra en la fabricación de MB, bajo determinadas condiciones de operación, es la aparición de la gota ('shot'), siendo ésta una de las principales razones que impulsa a continuar con la investigación del proceso. No obstante, la principal razón por la cual se estudia este proceso es con el objetivo de disminuir el diámetro de las fibras, dentro de sus límites de resistencia, y también generar conocimientos para así poder controlar y uniformizar la producción de fibras. El diámetro final que alcancen las fibras es uno de los factores que determina la utilidad del MB, por esta razón, el poseer control sobre el diámetro de las mismas despierta un gran interés industrial. Más aún, ya se ha probado que muchas características del campo de velocidad del aire influyen de forma determinante tanto en el diámetro final de la fibra adhesiva como en su frecuencia de vibración [4]. Por ende, resulta ser de gran utilidad el disponer de un conocimiento lo más detallado posible acerca de los campos de velocidad del aire creados por los distintos diseños de boquillas, para luego ser capaz de controlar las características del MB producido por las mismas, y sobre esto último es justamente donde este artículo pretende profundizar. El principal objetivo de este artículo es analizar la influencia que tienen los parámetros geométricos más característicos de dos diseños de boquillas en los respectivos campos de velocidades del aire creado por las mismas.

2. Estado del arte.- A lo largo de las últimas dos décadas se han llevado a cabo un gran número de trabajos experimentales sobre distintos diseños de boquillas de MB, los cuales han sido conducidos por diversos grupos de investigación. En este artículo se presentan únicamente algunos de los resultados más destacados.

Sheng Xie et al. (2018) han realizado mediciones de velocidad y temperatura del aire sobre una boquilla de doble ranura. Éstos utilizaron un anemómetro de temperatura constante (CTA) y estudiaron las magnitudes instantáneas y promedio de ambas cantidades. Esto les permitió conocer las fluctuaciones de las mismas y relacionarlas con la falta de uniformidad de los diámetros de la fibra adhesiva producida por dicho diseño de boquilla. Si bien utilizaron una sonda bidimensional para medir la velocidad del flujo de aire, lamentablemente en el artículo no se presentan resultados acerca de la segunda componente de la misma que les ha proporcionado dicha sonda [5].

Eric M. Moore et al (2004) han publicado mediciones del campo de velocidad y temperatura del aire llevadas a cabo sobre un diseño de boquilla de doble ranura, entre otros aportes que contiene el artículo. Como instrumento de medición utilizaron un tubo de pitot y un termopar, habiendo realizado las medidas para diversas condiciones de operación industrial [4]. El estudio concluye con dos expresiones adimensionales que indican la relación entre la velocidad y la temperatura con la posición, siendo dichas expresiones válidas únicamente para dicho diseño de boquillas.

Harpham y Shambaugh (1997) realizaron mediciones de velocidad y temperatura sobre el campo de aire no-isotermo de una boquilla de doble ranura. Para ello, utilizaron un tubo de pitot y un termopar. Éstos han obtenido perfiles de velocidad y temperatura en dos direcciones y también han contrastado sus resultados frente a otros anteriores (Rajaratnam 1976; Bradbury 1965), presentando gran acuerdo con los mismos [6].

El presente trabajo agrega a los anteriores en que se han medido dos componentes del campo de velocidades del aire y se han realizado mediciones en las tres direcciones del espacio. Otro aporte significativo lo representa el hecho que el estudio se llevó a cabo bajo condiciones de operación puramente industriales, en lo que refiere al gasto de aire, por lo cual las conclusiones que emergen de la discusión de los resultados encuentran una aplicación directa en el sector industrial.

3. Descripción de la Investigación

En este apartado se comienza por explicar la técnica experimental que ha sido utilizada para luego proceder a describir las distintas secciones que conforman el trabajo realizado.

3.1 Introducción a la Anemometría de Temperatura Constante. - De entre los distintos instrumentos de medición puntual del campo de velocidades, el Anemómetro de Temperatura Constante (CTA) recibe un uso extendido en lo que refiere a investigación aplicada. El principio físico acerca del funcionamiento que subyace detrás de este instrumento de medición ya ha sido descrito con gran profundidad en numerosos trabajos y conferencias [7-8].

En líneas generales, el instrumento se compone de una sonda que alberga un hilo cuya resistencia eléctrica varía linealmente con la temperatura de éste de la siguiente manera:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)]$$

Donde R_0 representa la resistencia del hilo a la temperatura T_0 y α el coeficiente de temperatura del mismo.

Un circuito electrónico, cuyo principal componente es un *puent de Wheatstone*, es el encargado de mantener la sonda a una temperatura constante⁶, y éste lo logra al aplicarle una diferencia de potencial (E) en sus extremos. A modo de ejemplificar, se puede pensar que cuando el hilo se encuentra fuera de la corriente fluida de velocidad media, de ahora en adelante llamada U , éste requerirá de un valor de E relativamente bajo para alcanzar la temperatura de consigna. No obstante, cuando a éste se lo introduzca en dicha corriente, el control electrónico deberá aplicarle un valor de E mayor, a efectos de compensar las pérdidas de calor adicionales que surgen de la convección forzada a causa del flujo, y poder así mantener la temperatura del hilo en un valor constante. A fin de conocer la relación que mantienen E y U , se debe exponer el hilo a distintos valores de U y registrar el valor de E que se obtiene en cada caso. A este proceso se le denomina *calibración de velocidad* y el CTA dispone de un dispositivo que permite conocer la relación funcional entre ambas variables, es decir, la curva $U=U(E)$. Normalmente esta relación se presenta a partir de una curva de ajuste polinómica de cuarto orden, o bien, una curva potencial de la siguiente forma:

$$U = C_0 + C_1 \cdot E + C_2 \cdot E^2 + C_3 \cdot E^3 + C_4 \cdot E^4$$

⁶ Habitualmente el hilo se mantiene a una temperatura cercana a los 220°C sobre la temperatura ambiente.

$$U = \left(\frac{E^2 - A}{B} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Donde C_0, C_1, C_2, C_3 y C_4 son las constantes de calibración para el modelo polinómico, mientras que A, B y n son las correspondientes al modelo potencial, a determinar en el ajuste.

Cuando se realizan mediciones utilizando sondas bidimensionales, es decir sondas que cuentan con dos hilos, es necesario determinar una curva de calibración para cada uno de ellos. Más aún, también es necesario determinar cómo varía el valor de E de cada hilo a medida que éstos son inclinados en la corriente fluida. Para ello es necesario realizar una segunda etapa de calibración, denominada *calibración direccional*, que posibilite determinar un coeficiente (k) para cada hilo y que indique la relación de dependencia que presenta el valor del voltaje con el ángulo de incidencia de la velocidad. Esta clase de sondas posibilita determinar dos componentes de la velocidad, en concreto aquellas dos que se encuentran contenidas en el plano que forman los hilos.

Como todo instrumento de medida, el CTA no se encuentra exento de limitaciones. Algunas de las principales son la medición sobre flujos a alta temperatura y la medición sobre flujos que presentan grandes gradientes de velocidad. La primera limitación yace en que, dado que el principio físico de medición del CTA se basa en la transferencia de calor desde el hilo al flujo, cualquier cambio en la temperatura de este último implicará alteraciones en la medición. La segunda de ellas radica en que, si bien teóricamente el hilo simboliza una medida puntual de la velocidad, en la práctica éste posee físicamente una longitud, por lo cual, cualquier gradiente de velocidad que pueda existir a lo largo de la longitud del hilo derivará en incertidumbres en la medida.

En lo que respecta a mediciones sobre flujos de alta temperatura, se han sugerido numerosas fórmulas de corrección del valor de E en función de la temperatura de la corriente fluida (T_a) [9-10-11]. En este trabajo se ha utilizado la fórmula sugerida por S.F. Benjamin y C.A. Roberts, la cual establece que:

$$E_{corr} = \left(\frac{(T_w - T_o)}{(T_w - T_a)} \right)^{0.55} \cdot E$$

Donde E es la señal adquirida, T_w es la temperatura del sensor, T_o es la temperatura a la cual se realizó la calibración del hilo y T_a es la temperatura de la corriente fluida.

3.2 Parámetros geométricos característicos de los diseños de boquilla. - Se ha medido el campo de velocidades del aire producido por dos diseños de boquillas, los cuales serán llamados *diseño A* y *diseño B* respectivamente, y cuyas geometrías resultan ser muy distintas. Por un lado, las salidas de aire del diseño A se encuentran contenidas en un único plano que a su vez contiene a las salidas de adhesivo. Por otro lado, las salidas de aire en el diseño B se encuentran distribuidas en dos planos, donde cada uno de ellos forma un ángulo (α), con el plano que contiene las salidas de adhesivo. Más aún, el número de orificios de aire que rodean cada orificio de adhesivo (N_{af}) es distinto en ambos diseños, como también el número total de orificios de uno y otro tipo. En la Tabla I se especifican los principales parámetros geométricos de cada diseño, siendo N_{af} el número de orificios de aire por cada orificio de adhesivo, w_a el cociente entre el ancho que ocupa un conjunto compuesto por N_{af} orificios de aire con su respectivo orificio de adhesivo y el ancho de un orificio de aire y por último el ángulo α que forman los planos de salida del aire con el de adhesivo. Dado que ambos diseños de boquillas resultan ser prototipos industriales, no comerciales, se ha decidido no presentar los planos de los mismos, manteniéndolos bajo reserva.

	w_a	N_{af}	α (°)
Diseño A	9.09	2	0
Diseño B	6.13	4	≠ 0

Tabla 1.- Parámetros geométricos de los diseños de boquilla

3.3 Dominio experimental. - El estudio experimental se encuentra dividido en dos etapas: en la primera parte *-estudio unidimensional (E1D)-*, se midió la velocidad utilizando únicamente una sonda unidimensional (Figura III a y c). En la segunda parte *-estudio unidimensional/bidimensional (E1D/2D)-*, se midió la velocidad utilizando una sonda unidimensional en la región cercana a la boquilla (en las cotas z1 y z2 en el Diseño A y en la cota z1 en el Diseño B, ver Figuras III b y d) y una sonda bidimensional en el resto del dominio. La razón por la cual no se ha utilizado únicamente la sonda bidimensional en todo el dominio del estudio E1D/2D radica en que, en la región cercana a la boquilla, existe un gran gradiente de velocidades en la dirección perpendicular al plano que contiene los hilos de dicha sonda, por lo tanto, en dicha región éstos quedarían expuestos a velocidades muy distintas, introduciendo así un error muy grande en la medida de la misma [12].

Los dominios experimentales han sido adimensionalizados utilizando la longitud característica (L_R), la cual se define como el diámetro hidráulico de un orificio de aire, el cual resulta ser distinto para cada diseño. A las coordenadas X, Y y Z adimensionalizadas se les ha llamado x , y y z respectivamente. Tras realizar medidas preliminares utilizando una sonda bidimensional y luego de haber comparado los datos obtenidos con aquellos del estudio E1D, se pudo concluir que es posible realizar mediciones confiables con dicha sonda a partir de un valor en la coordenada z cercano a 30 y 60 en los diseños A y B respectivamente. Medidas preliminares adicionales permitieron descubrir los rangos de variación de la velocidad en las direcciones x e y , lo cual permitió definir un dominio experimental de forma piramidal para el estudio E1D/2D, como puede observarse en las Figuras III b y d.

Los puntos que se presentan en la Figura III simbolizan puntos de medición, entendiéndose que estos se corresponden físicamente con la posición del centro de la sonda. Sin embargo, como ya se ha mencionado anteriormente, se debe tener en cuenta que, debido a que el hilo presenta una longitud de 1.25mm, la medida resultante representa la velocidad media del flujo en un entorno muy próximo al punto de medición. En las Figuras IIIa y c, los ejes que son identificados con la letra “b” simbolizan rectas concéntricas a las salidas de adhesivo y aquellos que se representan por la letra “f” simbolizan rectas equidistantes a dos de éstas (Figura IV). En cambio, en las Figuras IIIb y d, al tratarse esta vez de un dominio tridimensional, las letras b y f no representan únicamente ejes en la coordenada z , sino que representan planos que contienen salidas de adhesivo y planos equidistantes a dos de éstos últimos y que además son paralelos entre sí. A partir de este momento, a las rectas/planos representados por la letra b se le denominará posiciones ‘centrales’ de medición, mientras que a aquellas representadas por la letra f se les denominará posiciones ‘frontera’ de medición. De la Figura III puede deducirse inmediatamente que, en el estudio E1D, se realizaron mediciones sobre 5 ejes centrales y sobre 4 ejes frontera en el diseño A, mientras que en el diseño B se midió sobre 12 ejes centrales y sobre 11 ejes frontera. De la misma manera, puede observarse que en el estudio E1D/2D, se realizaron mediciones sobre 2 planos centrales y sobre 3 planos frontera en el diseño A, mientras que en el diseño B se midió sobre 6 planos centrales y sobre 6 planos frontera.

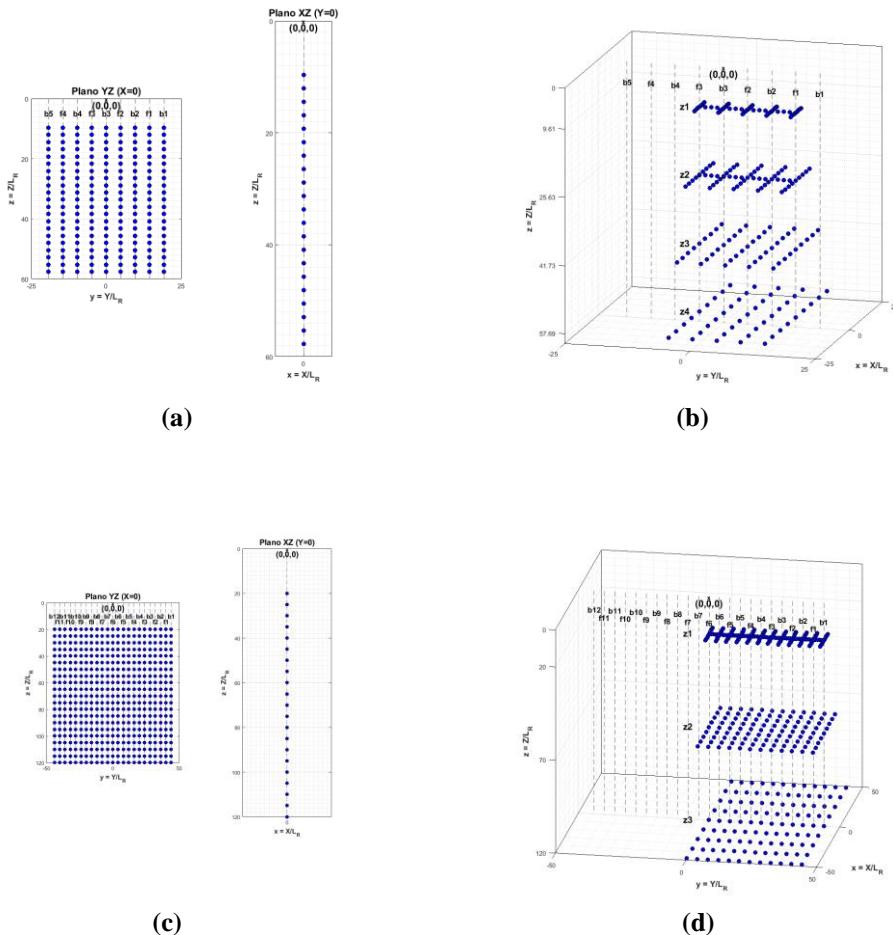


Figura III.- Dominios de medición: (a) EID diseño A, (b) EID/2D diseño A, (c) EID diseño B, (d) EID/2D diseño B

Por último, por razones prácticas, se le ha asignado un nombre distinto a cada cota de la coordenada z en lo que refiere al estudio EID/2D. En cuanto al dominio experimental del diseño A, se ha denominado “z1”, “z2”, “z3” y “z4” a las cuatro cotas de z en las cuales se realizaron las medidas. Por su parte, en cuanto al diseño B, se ha denominado “z1”, “z2” y “z3” a las tres cotas de z en las cuales se midió en este caso. El uso de dicha nomenclatura cobrará mayor significado una vez llegado el momento de presentar y discutir los resultados.

3.4 Banco Experimental e Instrumentos de medida. - El banco de ensayos fue construido y las medidas experimentales han sido llevadas a cabo en el Área de Ingeniería Térmica y de Fluidos de TECNUN (Universidad de Navarra). En el presente apartado se proporcionan detalles acerca del banco experimental y de los instrumentos de medida que han sido empleados.

El banco experimental se compone de un sistema móvil y de un sistema fijo. Por un lado, el sistema móvil lo conforman un cabezal unido a un conjunto de boquillas intercambiables de MB, el cual a su vez se encuentra sujeto a un *traversing system*. Por otro lado, el sistema fijo consiste de dos micrómetros, montados el uno sobre el otro, sobre los cuales se encuentran colocadas las sondas

de aire y temperatura del CTA y que permiten desplazarlas en las direcciones X e Y (Figura V). Ambos sistemas han sido alineados mediante el uso de un reloj comparador y un nivel.

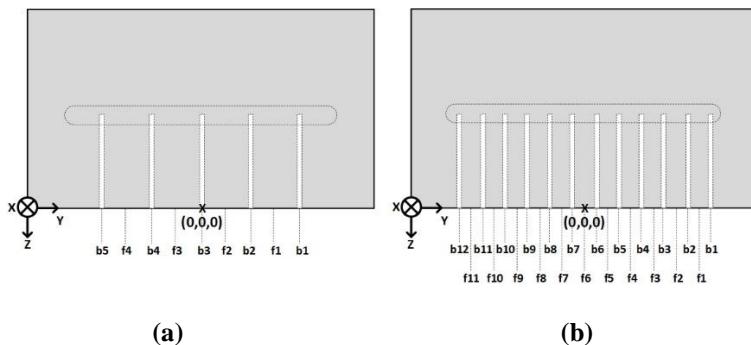


Figura IV.- Nomenclatura a utilizar: (a) Diseño A, (b) Diseño B

La unidad de calibración de las sondas de velocidad representa un elemento auxiliar del banco experimental y se ha utilizado cada vez que se debió medir sobre una nueva boquilla. Esta dispone de 4 toberas, de distinto diámetro, que permiten regular el rango de velocidades de calibración desde 0.02 hasta 300 m/s. En el estudio E1D se utilizó una tobera de 8.7 mm de diámetro (5-120 m/s) y luego en el estudio E1D/2D, ya conociendo el rango de variaciones del campo de velocidad, se colocó una tobera de 12mm de diámetro (0.5-60 m/s) en el dispositivo de calibración. Este módulo se ha utilizado para calibrar tanto la sonda unidimensional como también la bidimensional.

Se ha medido la velocidad y la temperatura haciendo uso de un CTA de múltiples canales (StreamLine 90N10, DANTEC DYNAMICS). Como ha sido mencionado en el apartado anterior, con el fin de medir la velocidad se han utilizado dos sondas distintas, utilizándose en una primera etapa una sonda unidimensional unidireccional (55P11) con un hilo de 5 μ m de diámetro y 1.25mm de largo de tungsteno revestido en platino y luego se procedió a utilizar una sonda bidimensional de un único cuadrante (55P61) con sendos hilos de 5 μ m de diámetro y 1.25mm de largo del mismo material que la anterior. Las incertidumbres experimentales han sido estimadas según el procedimiento sugerido por Robert J. Moffat en su trabajo en lo que refiere a mediciones de muestreo múltiple [13]. Siguiendo este procedimiento, la incertidumbre que se le atribuye a las medidas de velocidad se han estimado en el entorno del 6%.

Como instrumento de medición de la temperatura se utilizó la sonda de temperatura que proporciona el propio CTA (90P10), con un tiempo de respuesta de 1s y una incertidumbre de $\pm 0.5^\circ\text{C}$, según informa el fabricante de la misma.

El aire ha sido extraído de la red de aire comprimido de la universidad para luego ser filtrado por medio de una unidad de mantenimiento. El gasto de aire ha sido regulado por medio de una válvula reguladora de presión electro-neumática (ITV3050, SMC), con un rango de trabajo de 0.5-9 bar y una precisión de $\pm 3\%$ (FS) y un caudalímetro (SFAB-600U, FESTO), con un rango de trabajo de 6-600 l/min y una precisión de $\pm 0.3\%$ (FS). La temperatura del aire ha sido controlada desde el mando de control del sistema de fabricación de MB (Figura I). El control de temperatura funciona en lazo cerrado, recibiendo una señal proveniente de una sonda de temperatura para luego enviar una señal de respuesta a un calentador eléctrico de doble resistencia, el cual es capaz de controlar la temperatura de la sonda en un rango de $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Tanto la sonda como el calentador se encuentran ubicados dentro del cabezal del sistema.

Como dispositivo de transferencia de datos entre el CTA y el ordenador, se utilizó una tarjeta de adquisición de datos (PCI-MIO-16E-1, NATIONAL INSTRUMENTS) con una frecuencia máxima de adquisición de 1.25MHz y con un máximo de 8 canales para entradas analógicas. En el presente trabajo, se debió utilizar como máximo dos canales de la tarjeta de forma simultánea, encontrándose disponibles 625KHz por canal⁷, lo cual resulta ser una frecuencia de muestreo más que suficiente para la necesidad de la aplicación.

El traversing system que ha sido utilizado (41T333, DANTEC DYNAMICS) es de accionamiento eléctrico y dispone de tres motores paso-a-paso que permiten un posicionamiento tridimensional con una precisión de 6.25μm en cualquiera de los tres ejes. Éste se desplaza a una velocidad de 25mm/s y posee un rango de movimientos de 1010mm en cada uno de éstos. El sistema ha sido comandado de forma automática desde el propio software de adquisición de datos del anemómetro (StreamWare), habiéndole proporcionado al mismo la rejilla de puntos a recorrer en cada caso.

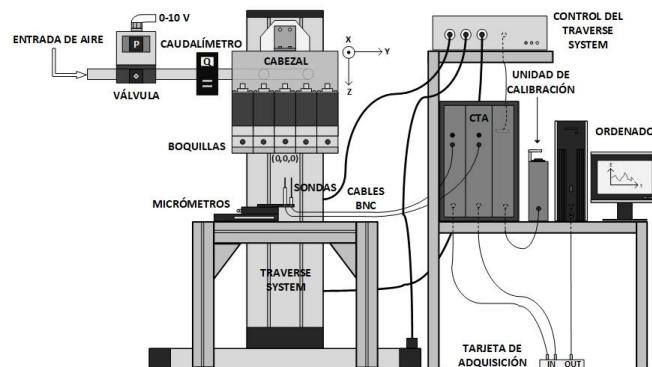


Figura V.- Esquema del Banco Experimental

	Q_a (NL/min ⁸)	T_a (°C)
Diseño A	65	20
	135	20
	100	60
	65	100
	135	100
Diseño B	106	20
	225	20
	165.5	60
	106	100
	225	100

Tabla 2.- Condiciones de medida

⁷ La frecuencia máxima de adquisición de una tarjeta se divide entre los canales de la misma que se utilicen.

⁸ Valores expresados en condiciones normales, esto es, a una temperatura de 0°C y una presión de 1 bar.

3.5 Condiciones y Procedimiento de medida. - Dado que se ha trabajado en ausencia de adhesivo, las condiciones de operación del sistema comprenden únicamente dos variables: el gasto de aire (Q_a) y su temperatura (T_a). Las condiciones relativas al gasto provienen, en todos los casos, de aplicaciones industriales destinadas a la producción de adhesivos de cola caliente, mientras que aquellas relativas a la temperatura se han escogido de tal forma de no sobrepasar la temperatura máxima de operación de las sondas de velocidad. En la Tabla 2 se presentan todas las condiciones de operación en las que se ha medido.

Como puede observarse en la Tabla 2, los factores considerados presentan una condición base - punto central- para cada diseño, siendo las demás condiciones de operación simples diferencias en el caudal y/o en la temperatura respecto de estas. El punto central correspondiente a la boquilla del diseño A tiene por gasto 100 Nl/min y por temperatura 60°C, mientras que para la boquilla del diseño B se tiene 165.5 Nl/min y 60°C, de forma respectiva. Las diferencias en el caudal (ΔQ) y en la temperatura (ΔT) representan el 36 y el 66 por ciento respecto a los valores del punto central tanto en el diseño A como en el diseño B. En lo que resta del artículo, a los valores del gasto y la temperatura del aire que se correspondan con el punto central se les adjudicará el subíndice “med”, mientras que a aquellos que sean inferiores o superiores se les añadirá el subíndice “min” y “max” respectivamente (Figura VI).

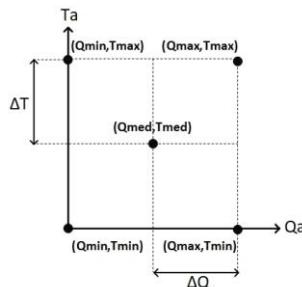


Figura VI.- Condiciones de medida

Llegado a este punto, es importante advertir que los valores de Q_a se corresponden con el gasto de aire de cinco boquillas funcionando en paralelo y, por lo tanto, el que corresponde a la boquilla sobre la cual se realizan las mediciones representa tan sólo una quinta parte del total. Es también oportuno señalar que la temperatura del aire se controla dentro del cabezal del sistema, por lo cual cuando éste sale expulsado fuera de la boquilla, lo hace a una temperatura sustancialmente menor. Se siguió el mismo procedimiento de medida en todos los casos. Primero, se calibró la sonda de velocidad y se procedió a fijar el origen del sistema de coordenadas del traversing system (el sistema móvil), estableciéndolo a partir de las cotas definidas en los planos de cada diseño de boquilla. A tales efectos, se utilizó una plataforma micrométrica, la cual permitió aumentar el grado de precisión en el posicionamiento en las direcciones X e Y (Figura V). Luego, como paso previo a la configuración de los parámetros de medición, se posicionaron las sondas de velocidad y de temperatura sobre dicha plataforma. En todos los casos, el hilo de la sonda de velocidad se posicionó a lo largo del eje X, dado que sobre esta dirección el gradiente de velocidades sobre el mismo es menor, y consecuentemente, el error incurrido en la medida también lo es. Finalmente, se seleccionaron los parámetros de medida, esto es, la frecuencia de medición o ‘sampling ratio’ (SR) y el número de puntos a medir en cada posición (N). Por un lado, dado que en el estudio se buscó medir valores medios de la velocidad, la frecuencia de muestreo se determinó de tal modo de asegurar la ausencia de solapamiento, o mejor conocido como ‘aliasing’, en las medidas. Por otro lado, el número de puntos a medir se determinó a partir de una expresión estadística que lo relaciona al nivel de confianza de la distribución gaussiana, la intensidad turbulenta y la

incertidumbre deseada en la medición. En el presente estudio se trabajó con valores de SR y N cercanos a 500Hz y 2500 respectivamente, resultando en un tiempo de medida próximo a 5s en cada punto de medición. Como ya ha sido comentado con anterioridad, la frecuencia máxima de adquisición de datos impuesta por la tarjeta de adquisición utilizada resulta ser más que suficiente para transferir los datos del CTA al ordenador, para los valores de SR y N seleccionados. Tras especificar los parámetros de medida, se debió introducir la rejilla de puntos a recorrer en cada caso por parte del traversing system. Los tiempos de medición se extendieron entre 15 y 40 minutos, dependiendo del caso en consideración. Finalmente, se le impusieron al sistema las condiciones de consigna relativas al gasto y la temperatura del aire, siempre esperando el funcionamiento en régimen de forma previa al comienzo de las mediciones.

Siempre que se trabajó a una temperatura de aire mayor a la temperatura de calibración, concretamente para valores de temperatura de 60°C o 100°C, para estos casos se midió también la temperatura del aire en los mismos puntos en los que se midió la velocidad. Con tal finalidad se utilizó la sonda de temperatura proporcionada por el propio CTA. Luego, de forma previa a la linealización⁹ de la señal de voltaje proporcionada por el CTA, se procedió a realizar una corrección analítica sobre ésta, para así eliminar el error que introduce el cambio de la temperatura del flujo en la medición de la velocidad, como ya ha sido explicado en menor detalle al principio del artículo.

Por último, a modo de incorporar al estudio las posibles diferencias que podrían existir entre distintas boquillas de un mismo diseño (por cuestiones de mecanizado y montaje), todas las medidas han sido realizadas sobre dos unidades distintas, denominadas '1' y '3' a partir de este momento, tanto para el diseño A como para el diseño B. La boquilla sobre la cual se realizaron las mediciones ha sido colocada en todos los casos en la posición central del cabezal.

4 Resultados. - A modo de ser consistentes con el planteamiento anterior, se ha optado por denominar 'U' a la componente de la velocidad según el eje Z (componente principal) y 'V' a la componente según el eje X. No se ha medido la componente de la velocidad según el eje Y.

Las leyendas de las gráficas, como también los títulos de las figuras, se encuentran de acuerdo a la nomenclatura presentada anteriormente en lo que refiere a las condiciones de funcionamiento y la posición en la cual se realizaron las medidas. A efectos de facilitar la exposición y posterior discusión de los resultados obtenidos, se han agrupado y graficado aquellos correspondientes a las posiciones centrales (a la izquierda) por separado de aquellos relativos a las posiciones frontera (a la derecha), para cada uno de los diseños de boquilla y para cada una de las condiciones de funcionamiento. Las gráficas incluyen de forma indiscriminada las mediciones realizadas en los módulos 1 y 3, por lo cual, a cada posición de medida le corresponden 2 valores experimentales. Se ha escogido presentar las gráficas en forma adimensional, habiéndose elegido una longitud de referencia (L_R) y una velocidad de referencia (U_R) como variables de adimensionalización. La primera de estas se corresponde con el diámetro hidráulico de un orificio de aire, la cual ya ha sido utilizada en el presente artículo, mientras que la segunda se define como la velocidad a la que fluiría el aire justo antes de salir de la boquilla, si este se encontrara en condiciones normales, es decir, a una temperatura de 0°C y una presión de 1bar. A las componentes adimensionales de la velocidad según los ejes Z y X se les ha llamado u y v respectivamente.

⁹ Con esto nos referimos a la obtención de U a partir de E.

4.1 Resultados del estudio E1D.- En las Figuras VII y VIII se presentan los perfiles adimensionales de la componente U de la velocidad que han sido obtenidos en el estudio E1D. Dado que este estudio comprende un menor número de puntos de medida que en el caso del estudio E1D/2D, se ha optado por graficar todas las condiciones de funcionamiento en un mismo gráfico, tanto para las medidas realizadas en la posición central como para aquellas realizadas en la posición frontera, para ambos diseños. En esta ocasión, se han graficado los resultados correspondientes a las posiciones b2, b3, b4, f1, f2, f3, f4 en el diseño A y b3, b4, b5, b8, b9, b10, f2, f3, f4, f6, f8, f9 y f10 en el diseño B, para las unidades 1 y 3 respectivamente. A modo de ejemplo, se puede observar que, dada una condición de operación, a cada valor de z de la Figura VII (a) le corresponden 6 puntos experimentales, dos por cada una de las posiciones centrales b2, b3 y b4 del diseño A.

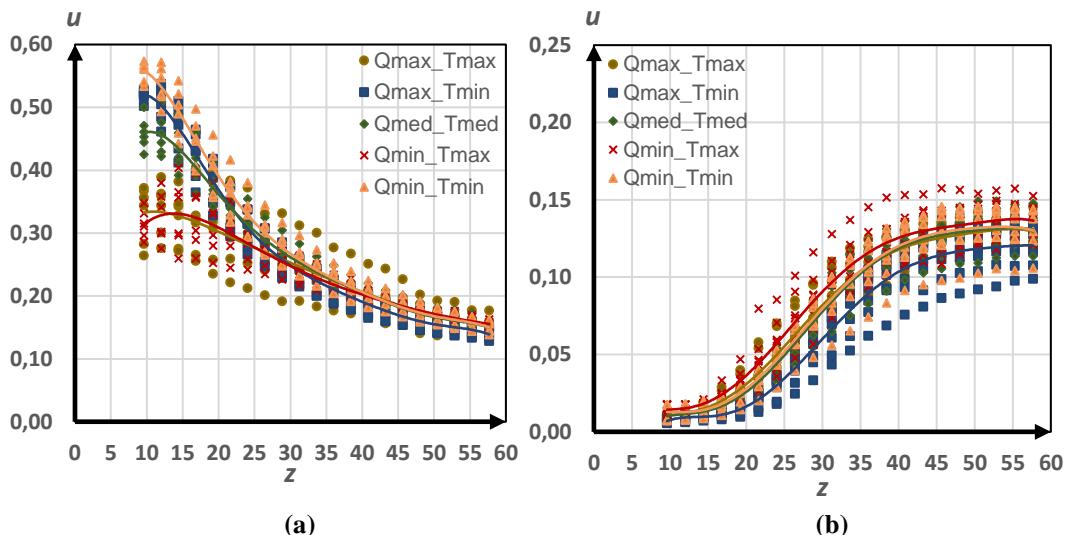


Figura VII.- Perfiles adimensionales de la velocidad para el diseño A: (a) medidas centrales, (b) medidas fronteras

Figura VIII.- Perfiles adimensionales de la velocidad para el diseño B: (a) medidas centrales, (b) medidas fronteras

Con la intención de facilitar la interpretación de los resultados, se han trazado curvas de ajuste polinómicas (de orden 6) para cada condición de operación, con valores de R^2 dentro de los rangos 0.75-0.97 y 0.71-0.86 para los diseños A y B respectivamente.

4.2 Resultados del estudio E1D/2D.- En las Figuras IX y X se presentan los perfiles adimensionales de la componente U de la velocidad obtenidos en el estudio E1D/2D, mientras que en las Figuras XI y XII se exponen aquellos asociados a la componente V de la velocidad. Todas estas figuras incluyen una única condición de operación – $Q_{\text{med}}T_{\text{med}}$ – debido a que, al tratarse de perfiles cuya tendencia resulta ser la misma a aquella ya expuesta en los resultados del estudio E1D, no se considera necesario presentar la totalidad de las curvas en esta ocasión.

A diferencia del estudio E1D, en este caso se han graficado todos los valores medidos, esto es, los resultados correspondientes a las posiciones b2, b3, f1, f2, f3 en el diseño A y b1, b2, b3, b4, b5, b6, f1, f2, f3, f4, f5 y f6 en el diseño B, para las unidades 1 y 3 respectivamente. Al igual que en el caso anterior, se han trazado curvas de ajuste polinómicas (de orden 6), pero esta vez una por cada cota en el eje Z. En este caso, en relación a los gráficos de u , los valores de R^2 se encuentran dentro de los rangos 0.21-0.97 y 0.79-0.93 para los diseños A y B respectivamente, mientras que, en cuanto a los gráficos de v , los valores de R^2 no superan el valor de 0.45 en ninguno de los casos, resultando incluso en valores menores a 0.12 en las gráficas correspondientes al diseño B.

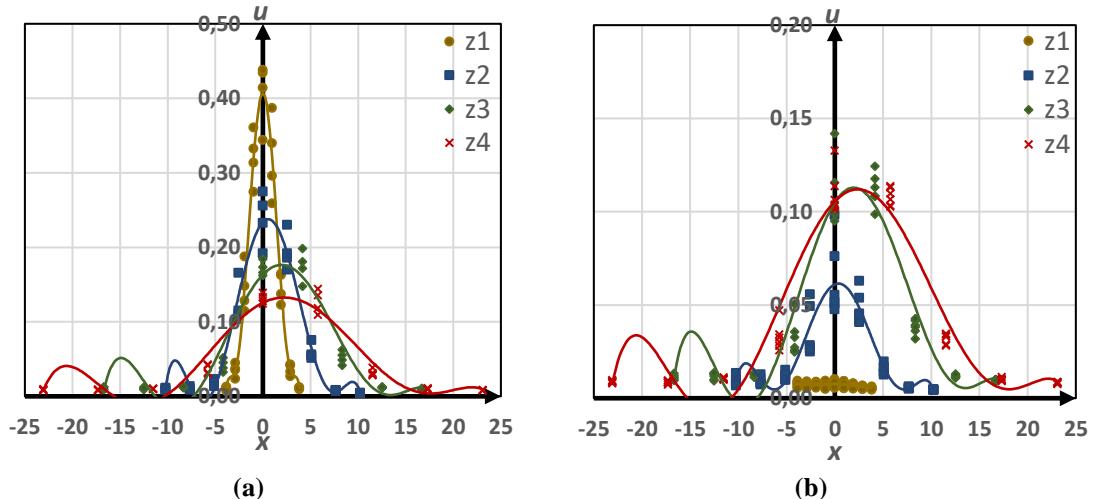


Figura IX.- Perfiles adimensionales de la componente U de la velocidad para el diseño A, condición $Q_{medTmed}$: (a) medidas centrales, (b) medidas frontera

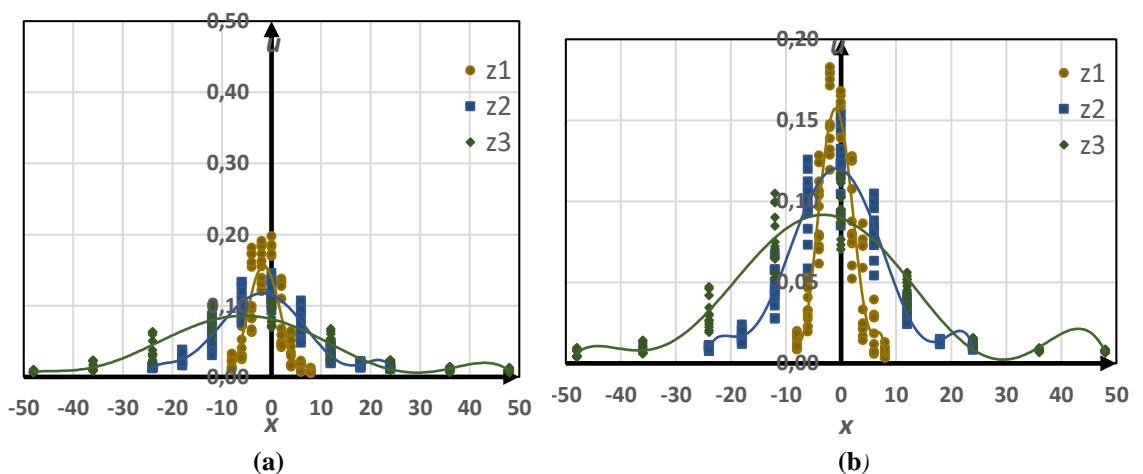


Figura X.- Perfiles adimensionales de la componente U de la velocidad para el diseño B, condición $Q_{medTmed}$: (a) medidas centrales, (b) medidas frontera

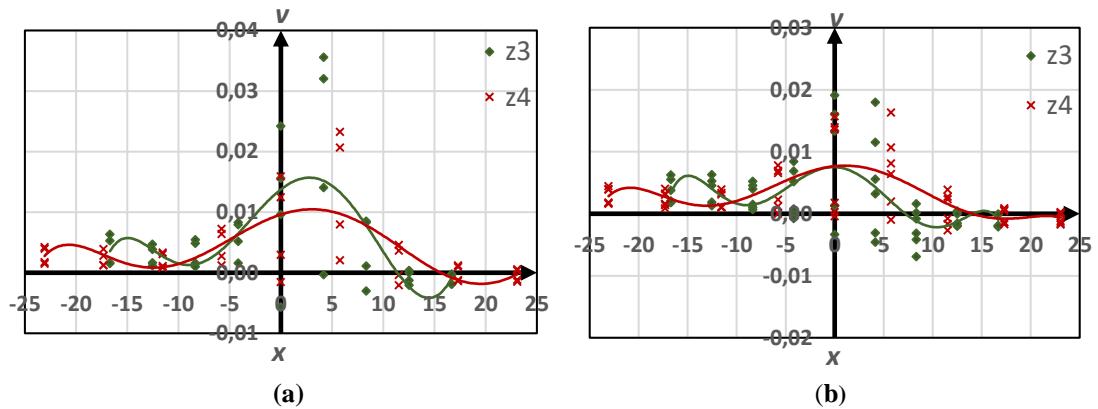


Figura XI.- Perfiles adimensionales de la componente V de la velocidad para el diseño A, condición $Q_{medTmed}$: (a) medidas centrales, (b) medidas frontera

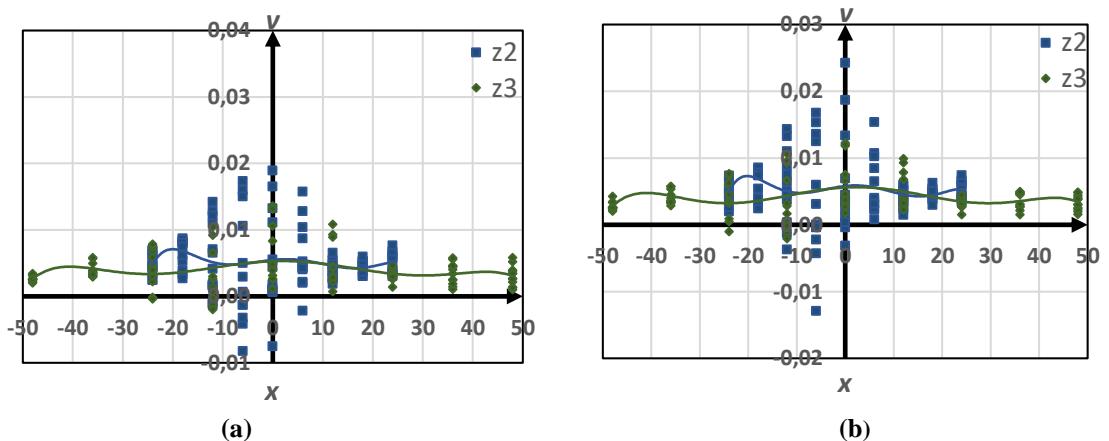


Figura XII.- Perfiles adimensionales de la componente V de la velocidad para el diseño B, condición $Q_{medTmed}$: (a) medidas centrales, (b) medidas frontera

4.3 Discusión de los resultados. - En primer lugar, a partir de los resultados provenientes del estudio E1D se puede inferir que los campos de velocidad de los dos diseños de boquilla presentan grandes diferencias entre sí. Por un lado, el campo de velocidades generado por la boquilla del diseño A presenta valores de velocidad de hasta el 55% aproximadamente respecto a su velocidad de referencia y también presenta una pendiente de decaimiento muy pronunciada en la dirección Z. Por otro lado, el campo de velocidades generado por la boquilla del diseño B presenta valores de velocidad de tan sólo el 23% aproximadamente respecto a su velocidad de referencia y, por ende, presenta una pendiente de decaimiento sensiblemente menor que la del diseño A. También se deduce que la boquilla del diseño A genera un campo de velocidades con un gran gradiente en la dirección Y, mientras que la boquilla del diseño B logra generar perfiles uniformes en dicha dirección. Esta última observación se hace evidente cuando se comparan las medidas centrales y las medidas frontera para cada uno de los dos diseños.

Es de suma importancia señalar que el notorio solapamiento que presentan los perfiles en uno y otro diseño de boquilla, para valores de $z > 30$, revela indicios que la temperatura del aire no resulta ser una variable dominante en lo que respecta al campo de velocidades generado por dichos diseños. De existir una relación fuerte entre la temperatura y los campos de velocidad del aire, la diferencia entre unos y otros perfiles habría de ser más notoria. Sin embargo, si se analizan cuidadosamente los perfiles de velocidad correspondientes al diseño A, es posible afirmar que, para valores de $z < 30$, un aumento en la temperatura del aire tiende a disminuir su velocidad. Los perfiles de velocidad correspondientes al diseño B no sufren mayores diferencias entre sí debido a cambios en la temperatura del aire, aunque sí es de destacar que un aumento en la temperatura del mismo tiende a aumentar levemente su velocidad.

Los resultados del estudio E1D/2D confirman ciertamente las conclusiones procedentes del estudio E1D y además contribuyen al conocimiento de los perfiles de velocidad en la dirección X. Este estudio revela que la boquilla del diseño A logra generar un perfil de velocidades con una mayor velocidad máxima, pero que a la vez es más estrecho que aquel generado por el diseño B, para condiciones de funcionamiento análogas. De las Figuras IX y X puede observarse que el valor máximo que presentan los perfiles de velocidad sufre una leve desviación respecto al plano $x=0$, presentando una tendencia hacia valores positivos de x en el diseño A, y hacia valores negativos de x en el diseño B. Más aún, dicha desviación se incrementa cuanto mayor es el valor de z . Dado que las salidas de aire presentan simetría en la coordenada x , respecto al plano $x = 0$, se intuye que dichas desviaciones no pueden ser causadas debido a una asimetría geométrica y éstas se atribuyen, más bien, a posibles imprecisiones cometidas tanto en el posicionamiento de la sonda, la alineación del banco experimental y el montaje de las boquillas. En lo referente a la segunda componente de la velocidad, en las Figuras XI y 12 se puede observar que ésta presenta una magnitud muy inferior en relación a la componente principal, existiendo entre ambas componentes un factor mayor a 10 en el diseño A e incluso mayor a 15 en el diseño B.

En lo relativo a las características geométricas de cada boquilla, se presume que el ángulo α que forman las salidas de aire con las de adhesivo en el diseño B juega un rol preponderante en el sentido que posibilita aumentar el área efectiva que atraviesa el flujo de aire en su recorrido vertical, generando un perfil más uniforme y de menor velocidad en comparación con el del diseño A. Sin embargo, la presencia de un ángulo α distinto de cero también conlleva a un impacto más frontal de los chorros de aire a la salida de la boquilla del diseño B. Es de sentido común suponer que esto último se traduce en una mayor producción de energía cinética turbulenta y, presumiblemente, en un aumento del grado de rotura de la fibra adhesiva en dicha región. Por otra parte, puede inferirse que un mayor número de salidas de aire por cada salida de adhesivo (N_{af}), permite distribuir el gasto de aire en una mayor área de salida, confiriéndole al perfil de velocidades un aspecto más uniforme en las coordenadas x e y . El experimentar con un tercer diseño de boquilla, que presentase un valor de N_{af} semejante al del diseño A y, a la vez, un valor de α semejante al del diseño B (o viceversa), permitiría saber cuál de los dos parámetros geométricos incide en mayor medida en la uniformidad del campo de velocidades del aire de una boquilla de MB.

5. Conclusiones. - Por un lado, el diseño A logra generar un campo de velocidades cuyo módulo es muy superior que el que genera el diseño B en las proximidades a las salidas de adhesivo. Debido a que es capaz de generar un perfil de velocidades con un gran módulo, lo cual se traduce en una gran diferencia de velocidades entre la fibra adhesiva y la corriente de aire, el primero de estos diseños dota las regiones próximas a las salidas de adhesivo de un gran esfuerzo cortante. Esto último sugiere que este diseño es adecuado para aplicaciones en las cuales se busque obtener un gran estiramiento de la fibra adhesiva.

Por otro lado, el diseño B logra generar un campo de velocidades notoriamente más uniforme que aquel generado por el diseño A, aunque presumiblemente con un mayor grado de intensidad turbulenta en la proximidad a las salidas de adhesivo, encontrándose esta región de forma muy cercana a la zona de choque de los chorros de aire. Es de esperar que esta última característica permita aumentar el nivel de rotura de la fibra adhesiva y, en tal caso, este segundo diseño resultaría ser efectivo en aplicaciones que busquen maximizar la rotura de la misma. No obstante, esta última representa tan sólo una suposición y no una conclusión del presente artículo.

Referencias

- [1] R. Gahan, and G. C. Zguris, "A review of the melt blown process," in Proceedings of 8th Annual Battery Conference on Applications and Advances, 2000, pp. 145–149.
- [2] R. L. Shambaugh, "A macroscopic view of the melt-blowing process for producing microfibers," Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 27, no.12, pp. 2363–2372, 1988.
- [3] E. M. Moore, "Experimental and Computational Analysis of the Aerodynamics of Melt Blowing Dies," Ph.D. dissertation, School of Chemical Engineering and Materials Science, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, 2004, <https://shareok.org/bitstream/handle/11244/743/3131076.PDF?sequence=1> Accessed on: Oct. 9, 2018.
- [4] E. M. Moore, D. V. Papavassiliou, and R. L. Shambaugh, "Air velocity, air temperature, fiber vibration and fiber diameter measurements on a practical melt blowing die," International Nonwovens Journal, vol.13, no. 3, pp. 43–53, 2004.
- [5] S. Xie, "Turbulent air flow field in slot-die melt blowing for manufacturing microfibrous nonwoven materials," Journal of Materials Science, vol. 53, no. 9, pp. 6991–7003, 2018.
- [6] A. S. Harpham, and R. L. Shambaugh, "Velocity and Temperature Fields of Dual Rectangular Jets," Industrial and Engineering Chemistry Research, vol. 36, no. 9, pp. 3937–3943, 1997.
- [7] L. M. Fingerson, "Thermal anemometry, current state, and future directions," Review of Scientific Instruments, vol. 65, no. 2, pp. 285–300, 1994.
- [8] J.-D.Vagt, "Hot-wire probes in low speed flow," Prog. Aerospace Sci., vol. 18, no. 271, pp. 271–323, 1979.
- [9] M. Hultmark, and A. J. Smits, "Temperature corrections for constant temperature and constant current hot-wire anemometers," Measurement Science and Technology, vol. 21, no. 10, 2010.
- [10] K. Bremhorst, "Effect of fluid temperature on hot-wire anemometers and an improved method of temperature compensation and linearisation without use of small signal sensitivities," Journal of Physics E: Scientific Instruments, vol. 18, no. 1, pp. 44–49, 1985.
- [11] S. F. Benjamin, and C. A. Roberts, "Measuring flow velocity at elevated temperature with a hot wire anemometer calibrated in cold flow," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 45, no. 4, pp. 703–706, 2001.
- [12] H.H. Bruun, Hot-Wire Anemometry. Principles and Signal Analysis. New York: Oxford University Press, 1995, pp. 60-61.
- [13] R. J. Moffat, "Describing the uncertainties in experimental results," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 1, no. 1, pp. 3–17, 1988.