



Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad Valle de las Palmas

TEMA

“Rediseño de túnel de viento de FCITEC para aplicaciones aerodinámicas, estructurales y dispositivos porosos para aplicaciones de transporte de contaminantes”

TESIS QUE PRESENTA PARA OBTENER EL GRADO DE:

Ingeniero Aeroespacial

PRESENTA:

Karla Itzel Flores Gonzalez

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Oscar Adrián Morales Contreras

Febrero de 2022

ÍNDICE

Introducción.	7
Capítulo I: Estado del arte.	8
Capítulo II: Metodología experimental.	23
Capítulo III: Metodología numérica.	32
Capítulo IV: Análisis de resultados.	49
Conclusiones y recomendaciones.	62
Referencias.	64
Anexo.	66

Índice de Figuras

Figura 1.- Honeycomb de Loehrke y Nagib.	10
Figura 2.- Caída de presión dependiendo de la longitud del honeycomb.	11
Figura 3.- Perfiles de velocidad a la salida de honeycomb de 7.5cm de longitud.	11
Figura 4.- Comparación de perfil axial de u'/U_∞ para diferentes longitudes de panales.	12
Figura 5.- Perfiles de velocidad a la salida de honeycomb + cribas de 7.5cm de longitud.	13
Figura 6.- Visualización de flujo a la salida de túnel de agua con honeycomb.	13
Figura 7.- Túnel de presión transónica de Langley (NASA).	14
Figura 8.- Perfiles de velocidad promedio a) vertical y b) lateral.	16
Figura 9.- Túnel de viento del LABINTHAP-IPN.	17
Figura 10.- Honeycomb instalado en cámara estabilizadora.	18
Figura 11.- Planos de medición de velocidad.	19
Figura 12.- Turbulencia en zona de pruebas antes y después de colocar enderezadores de flujo.	19
Figura 13.- Honeycomb instalado en la entrada del túnel de viento.	21
Figura 14.- Caída de presión debida a enderezadores de flujo.	22
Figura 15. Perfil de velocidad en zona de pruebas.	22
Figura 16.- Tipos de honeycomb.	24
Figura 17.- Especificaciones de celdas de honeycomb (sin escala y acotada en mm).	25
Figura 18.- Nomenclatura para el hexágono.	26
Figura 19.- Honeycomb instalado en la cámara estabilizadora.	27
Figura 20. Instalación de honeycomb en cámara estabilizadora.	28
Figura 21.- Distribución da panales en cámara estabilizadora (acotada en mm).	28
Figura 22.- Protector de honeycomb en cámara estabilizadora.	31
Figura 23.- Componentes de túnel de viento de la FCITEC.	34
Figura 24.- Panel de Toolbox para seleccionar Fluid Flow (fluent).	34
Figura 25.- Panel para seleccionar el modelo.	35
Figura 26.- Dominio computacional importado a FLUENT.	35
Figura 27.- Pestaña de Repair en menú principal.	36
Figura 28.- Dominio computacional mallado.	37
Figura 29.- Entrada acampanada modificada en tamaño de volúmenes de control de 50mm.	38
Figura 30.- Cámara estabilizadora modificada en tamaño de volúmenes de control de 50mm.	39
Figura 31.- Sección de contracción modificada en tamaño de volúmenes de control de 40mm.	39
Figura 32.- Zona de pruebas modificada en tamaño de volúmenes de control de 10mm.	40
Figura 33.- Sección de transición modificada en tamaño de volúmenes de control de 40mm.	40
Figura 34.- Zoom en zona de pruebas de región de malla.	41
Figura 35.- Panel de inicio de SetUp.	41
Figura 36.- Modelos viscoso de simulación.	42
Figura 37.- Modelo de turbulencia K-epsilon.	43
Figura 38.- Selección de zona de entrada.	44
Figura 39.- Configuración de la velocidad por componentes.	45
Figura 40.- Solución de problema.	46
Figura 41.- Grafica de residuales.	46

Figura 42.- Vectores de velocidad en todo el túnel de viento.	47
Figura 43.- Vectores de velocidad en el centro de la zona de pruebas.	48
Figura 44.- Sección transversal de zona de pruebas con A) cribas y B) honeycomb.	53
Figura 45.- Arreglo de modelo de prismas cuadrados en zona de pruebas.	53
Figura 46.- Perfiles de velocidad sección A.	55
Figura 47.- Perfiles de velocidad sección B.	55
Figura 48.- Perfiles de velocidad sección C.	56
Figura 49.- Perfiles de velocidad sección D.	56
Figura 50.- Perfiles de velocidad sección E.	57
Figura 51.- Perfiles de velocidad sección F.	57
Figura 52.- Perfiles de velocidad sección G.	58
Figura 53.- Perfiles de velocidad sección H.	58
Figura 54.- Perfiles de velocidad sección I.	59
Figura 55.- Perfiles de velocidad sección J.	59
Figura 56.- Perfiles de velocidad en túnel de viento del Instituto Politécnico Nacional.	60
Figura 57.- Perfiles de velocidad en túnel de viento de la Universidad de Khulna.	61

Índice de Tablas

Tabla 1.- Características de malla y panel.	15
Tabla 2.- Intensidad de turbulencia en zona de pruebas.	16
Tabla 3.- Turbulencia a diferentes velocidades.	20
Tabla 4. Parámetros de Honeycomb.	21
Tabla 5.- Especificaciones de panel de Gill Corporation.	30
Tabla 6: Intensidad de la turbulencia en zona de pruebas de túnel de viento de la FCITEC.	52

DEDICATORIAS

Dedico cada uno de mis logros a Dios, por darme
fuerzas y el valor de vivir la vida, por siempre
mostrarme la luz en el camino.

A mi familia por su esfuerzo para que pudiera lograr
este logro tan importante y esperado en mi vida. A
mi mamá que me ha dado todo lo que soy como
persona, mis valores, mis principios, mi
perseverancia y mi empeño. Por darme paso a un
mundo de oportunidades.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a mis todos mis profesores, no tengo palabras para expresar tanta gratitud a su noble trabajo a lo largo de toda mi vida estudiantil. Gracias por toda su tolerancia, por los principios y conocimientos inculcados todos estos años. Quiero agradecer especialmente y con mucho cariño a mi asesor y profesor el Dr. Oscar Adrian Morales Contreras por los últimos tres años que me ha aconsejado y apoyado, por enseñarme que las oportunidades no llegan, sino que se construyen día con día, que no solo mi trabajo sino mi actitud hacia la vida, son lo que me abrirá los caminos que decida tomar en mi vida personal y profesional.

Por último, quiero agradecer a los doctores, maestros e investigadores que participaron para la realización de esta tesis, a los miembros del comité sinoidal, el Dr. Alejandro Alonzo García, M.C. Juan Antonio Paz González, M.C. Mauricio Leonel Paz González y el Dr. Antonio Gómez Roa. Y por supuesto a todos los miembros del departamento de Ingeniería Aeroespacial de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología de la cual me siento muy orgullosa de ser parte. Son la base de mi futuro como profesionista.

Introducción

Para realizar investigaciones experimentales dedicadas a la aerodinámica se utilizan túneles de viento que contienen una zona de pruebas que ofrece condiciones favorables como lo es una intensidad de turbulencia menor al 2%, perfiles de velocidad uniformes y desarrollados, además de flujo estable. Para lograr esto se utilizan enderezadores de flujo que pueden ser cribas o mallas, panal (honeycomb), alabes y figuras aerodinámicas que se colocan en una sección denominada cámara estabilizadora. Sin embargo, no existe una metodología clara que indique el procedimiento que permita alcanzar el estado ideal del flujo al interior de un túnel de viento, por lo que los diseñadores han optado por realizar combinaciones plasmadas en investigaciones ejecutadas desde los años 60 del siglo pasado hasta la actualidad en los laboratorios aeronáuticos de universidades y centros de investigación de todo el mundo, destacando los realizados en Alemania, Estados Unidos, Francia, Inglaterra y Rusia.

Actualmente se tienen gran cantidad de información de trabajos que indican que un honeycomb es un elemento fundamental para obtener un flujo estable en la zona de pruebas de un túnel de viento, pero el proceso de fabricación del mismo o la adaptabilidad de material existente en algunas ocasiones es costosa y de alta demanda de precisión. Por lo que se adecuan paneles que se utilizan en la industria aeroespacial como dispositivos enderezadores de flujo.

En esta investigación se explica el proceso de ajuste y validación del uso de un honeycomb comercial en el túnel de viento subsónico de la FCITEC que ayudara a reducir la intensidad de la turbulencia existente en la zona de pruebas, los resultados del comportamiento del flujo obtenidos experimentalmente se comparan con un estudio tridimensional realizado con la dinámica de fluidos computacional.

Esta tesis se compone de 4 capítulos que se describen a continuación:

Capítulo I se detalla el estado del arte del uso del honeycomb como sistema de alineamiento del flujo en túneles de viento a nivel mundial desde la posguerra.

Capítulo II se explica el proceso de validación del uso de panal comercial instalado en el túnel de viento subsónico de la FCITEC.

Capítulo III se describe la metodología seguida para realizar el análisis numérico del flujo turbulento de aire al interior del túnel de viento subsónico de la FCITEC.

Capítulo IV se analizan los resultados obtenidos experimentalmente de la caracterización del túnel de viento y se comparan con los adquiridos con la dinámica de fluidos computacional.

Capítulo 1

Estado del arte

Los primeros interesados en la aeronáutica se basaron en los pájaros para construir sus máquinas voladoras, pero estos modelos fallaron y la razón fue que no tenían conocimientos de las fuerzas aerodinámicas que actuaban sobre sus diseños. Pronto, aquellos inventores fueron conscientes de que necesitaban entender la física del problema al que se enfrentaban y por lo tanto construyeron instrumentos para analizar y ensayar sus diseños. Uno de estos instrumentos fue el túnel de viento que se considera una de las herramientas más importantes en el estudio de fenómenos aerodinámicos [1], y ahora es indispensable para el desarrollo aeronáutico al permitir diseñar objetos determinando sus propiedades de sustentación, arrastre, estabilidad, etc. [2].

Para realizar experimentos en el túnel de viento que sean confiables debe obtenerse flujo estable en la sección de pruebas, para lograr esto se tienen varios elementos que permitirán reducir la turbulencia, algunas de ellos son las placas divisorias, mallas, difusores, honeycomb (panel) y zonas de contracción los cuales se denominaron estabilizadores de flujo. Una de las primeras investigaciones sobre estos dispositivos las realizaron Mehta y Bradshaw [3], a finales de los años 70 del siglo pasado, ellos estudiaron el honeycomb por que logra disminuir la componente transversal (o lateral) del flujo, para hacer esto, el fluido es obligado a pasar por delgados tubos que van suavizando los posibles remolinos que este pueda tener, se podría decir que los paneles son vistos en pocas palabras como operadores que suprimen el nivel de la turbulencia entrante y generan, principalmente un flujo estable.

De las primeras investigaciones realizadas sobre honeycomb se puede destacar la realizada por los científicos Loehrke y Nagib [1], quienes realizaron sus experimentos en un túnel de viento impulsado con aire comprimido y utilizaron popotes para construir el panel. La sección de prueba estaba formada por segmentos de tubería de plexiglás y bridas mantenidas en compresión con tirantes, así la fricción entre las pajitas y la pared mantenía unido el panel. Los investigadores

empaquetaban los popotes sin distorsionar su forma circular, y el número promedio de pajitas por centímetro lineal fue de 2.25. Cada popote tenía un diámetro exterior de 4.45mm y un grosor de pared de 0.15mm. En la figura 1 se muestra una vista en ángulo de un panel de 7.5cm de largo.

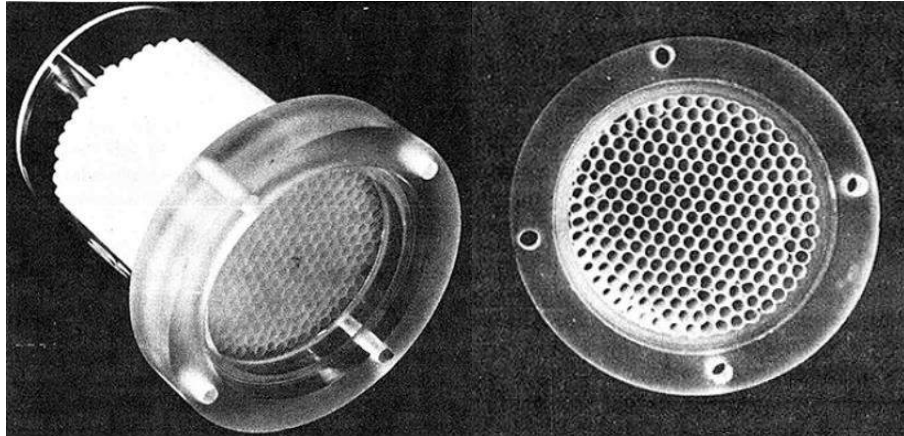


Figura 1. Honeycomb de Loehrke y Nagib

Loehrke y Nagib indicaron que una de las características importantes en un honeycomb es la solidez (σ_T) la cual se define como la relación entre el área sólida del panel contra el área total del dispositivo en el plano perpendicular a la dirección del flujo, que para este caso tuvo un valor de 0.2. Por otro lado para determinar el coeficiente de caída de presión ($K = 2\Delta P / \rho U_\infty^2$) y el número de Reynolds en la sección de pruebas se utilizó la velocidad de corriente libre U_∞ que fue de 4.6m/s. Las mediciones de velocidad se realizaron utilizando sondas de hilo caliente de tungsteno de 3.8 μ m de diámetro y 10mm de longitud.

En la investigación se analizaron 3 diferentes paneles que poseían 2.5, 7.5 y 25cm de longitud, ya que Lumley y McMahon [4], indicaron que los paneles en los que se tiene una gran longitud han logrado reducir con éxito la turbulencia a niveles aceptables. La dependencia del coeficiente de presión con respecto a longitud del honeycomb y la velocidad se aprecia en la figura 2.

Los perfiles de velocidad a la salida del panel de 7.5cm de longitud se muestran en la figura 3, se tienen 4 perfiles determinados a 0.25, 1.3, 3.8 y 5.1cm de distancia determinadas a partir del final del honeycomb a lo largo del eje axial. Puede observarse que el perfil de velocidad es estable y uniforme a una mayor distancia del panel.

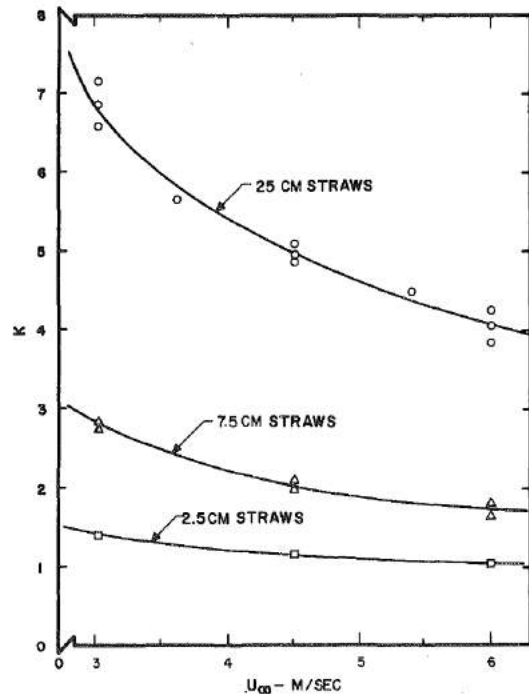


Figura 2. Caída de presión dependiendo de la longitud del honeycomb.

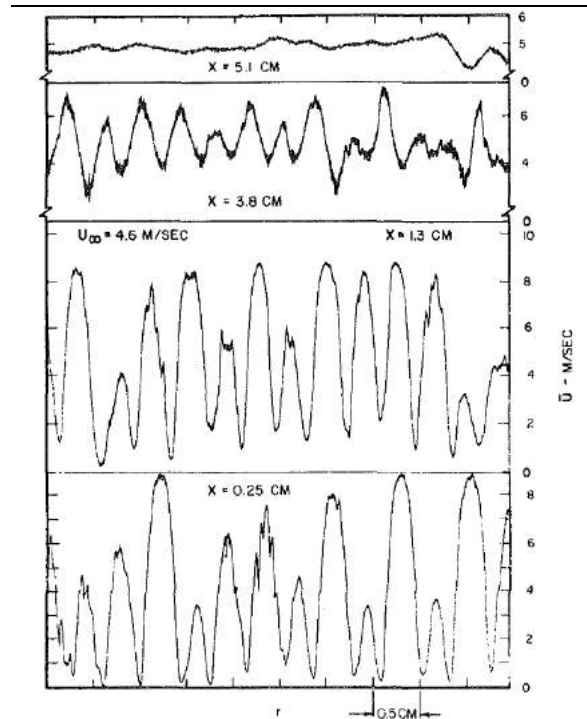


Figura 3.- Perfiles de velocidad a la salida de honeycomb de 7.5cm de longitud.

La relación entre la velocidad fluctuante (u') y la velocidad promedio a la salida (U_{∞}) de los diferentes casos de longitud de honeycomb analizados se muestra en la figura 4. Además, se muestra el estudio realizado en una corriente de flujo libre (sin panel en el interior del túnel de viento). Puede apreciarse que la turbulencia tiende a un valor menor al 5% en todos los casos a excepción del estudio cuando no se cuenta con un panel, por lo que se evidencia la utilidad del uso del honeycomb en un túnel de viento para reducir la turbulencia en la zona de pruebas.

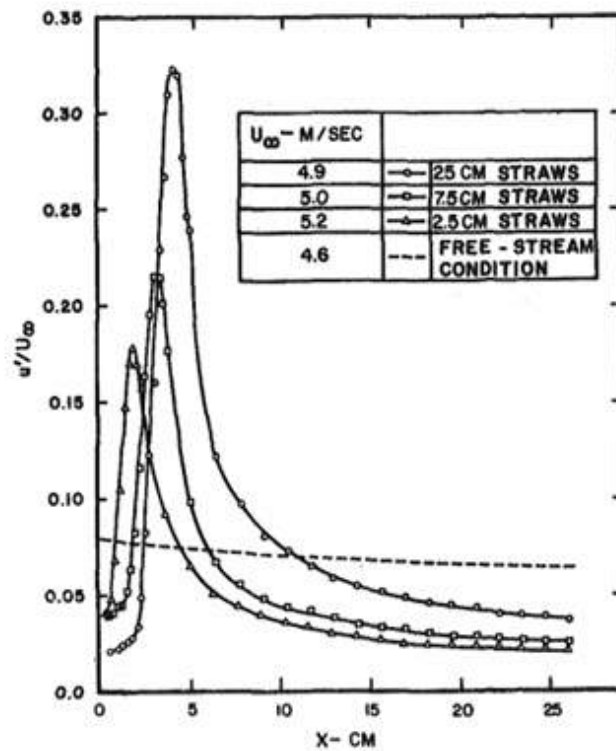


Figura 4. Comparación de perfil axial de u'/U_{∞} para diferentes longitudes de panales.

Otro resultado interesante encontrado en esta investigación es el efecto que tiene en el comportamiento del flujo la combinación del honeycomb + mallas o cribas colocada al final del mismo. En la figura 5 se muestran los diferentes perfiles de velocidad determinados a la salida de los accesorios mencionados, y para el encontrado a una distancia de 3.8cm se aprecia un comportamiento uniforme y estable a diferencia del perfil caótico obtenido a la misma distancia, cuando solo se contaba con un panel en el túnel de viento (figura 3).

Para demostrar esto en la figura 6 se presenta la visualización obtenida por Loehrke y Nagib utilizando la técnica de burbujas de hidrogeno en un túnel de agua que cuenta en su interior con honeycomb y/o malla. Las condiciones geométricas de los accesorios corresponden a las mismas establecidas en el túnel de viento y se aprecia que el flujo es uniforme y estable cuando se utiliza

un panel + honeycomb (6b) para las mismas condiciones al contar solo con el honeycomb (6a) donde el flujo es caótico y desordenado.

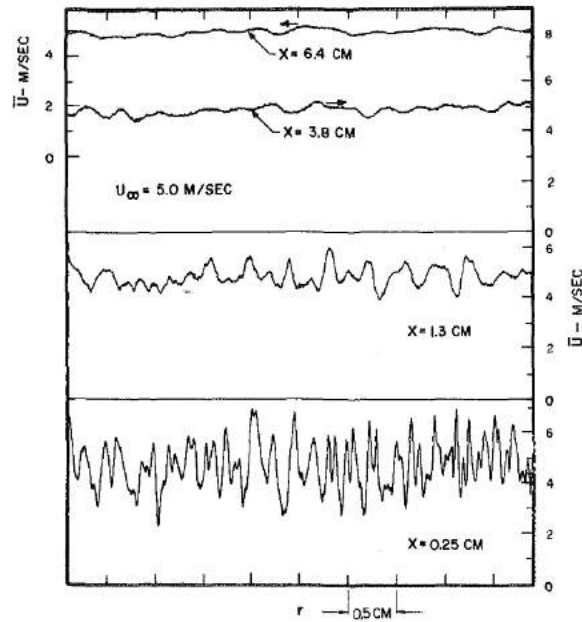


Figura 5. Perfiles de velocidad a la salida de honeycomb + cribas de 7.5cm de longitud.

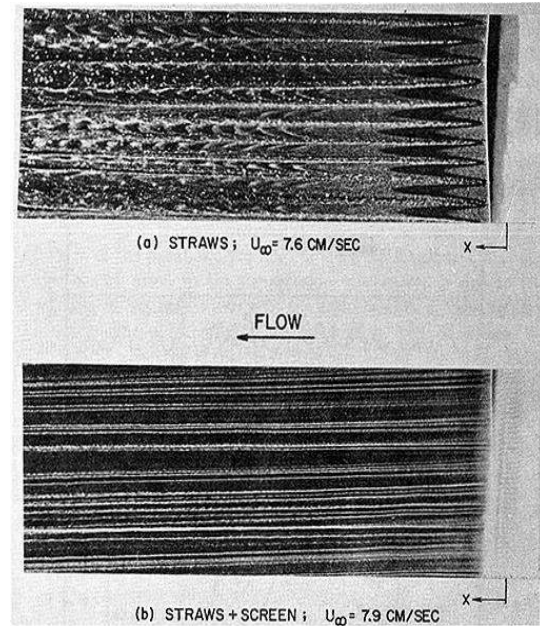


Figura 6. Visualización de flujo a la salida de túnel de agua con honeycomb.

Una investigación más que trata el estudio de un honeycomb es la realizada por Scheiman [5], quien estudio el flujo en un modelo a escala del túnel de presión transónica (TPT) instalado en el Centro de investigación de Langley en U.S.A., que se muestra en la figura siguiente.

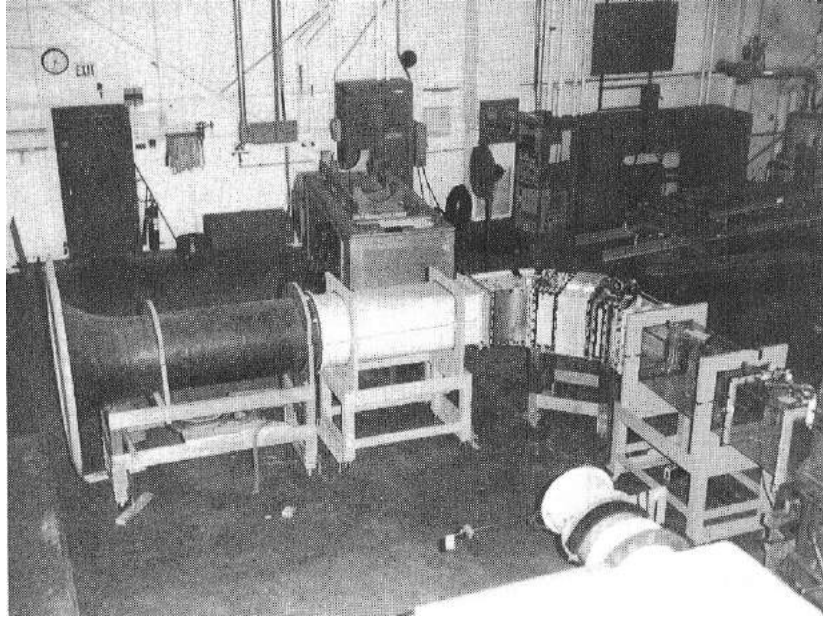


Figura 7.- Túnel de presión transónica de Langley (NASA).

Las mediciones en el TPT indicaron que las perturbaciones en el flujo fueron relativamente bajas cuando el túnel se encontraba sin dispositivos de reducción de turbulencia, sin embargo, el túnel requirió modificaciones para reducir la misma a niveles aún más bajos para permitir ensayos de flujo laminar en la sección de prueba. Se realizaron experimentos con combinaciones de mallas y honeycomb, se utilizaron seis tamaños de malla y cuatro celdas diferentes para el panel. Algunos datos de la investigación son:

- se utilizaron sondas de hilo caliente para medir la turbulencia axial y lateral.
- la velocidad de prueba impuesta varió entre 7.62 y 18.29 m/s.
- se consideró que el porcentaje de área abierta para la malla debe mantenerse al menos en 59%, tal como lo sugirió Schubauer [6].

- la relación entre la longitud de las celdas en forma de panal y el tamaño de las mismas fue entre 6 y 8, tal como lo indica Nagib [7].

Las dimensiones para las mallas y honeycomb elegidas se presentan en la siguiente tabla.

Screens			
Symbol	Mesh (wires/2.54 cm)	Wire diam., mm (in.)	Open area, percent
4M	4	1.27 (0.050)	64
8M	8	.660 (.026)	63
20M	20	.229 (.009)	67
28M	28	.190 (.0075)	62
36M	36	.165 (.0065)	59
42M	42	.140 (.0055)	59

Honeycomb			
Symbol	Cell size, cm (in.)	Cell length, cm (in.)	Material thickness, mm (in.)
1/16 HC	0.159 (1/16)	1.27 (0.50)	0.0254 (0.001)
1/8 HC	.318 (1/8)	1.90 (.75)	.0254 (.001)
1/4 HC'	.635 (1/4)	3.81 (1.50)	.0254 (.001)
1/4 HC	.635 (1/4)	3.81 (1.50)	.0762 (.003)
3/8 HC	.952 (3/8)	7.62 (3.00)	.0762 (.003)

Tabla 1. Características de malla y panal.

En la figura 8 se muestran los resultados de las mediciones de velocidad promedio a diferentes distancias aguas debajo de la posición de las mallas y el honeycomb. En el inciso a) se muestran los resultados de los perfiles de velocidad obtenidos a lo largo del eje vertical (eje-y) y en b) se indican los obtenidos en el eje lateral (eje-z). Se aprecia una gran influencia de la capa límite cerca de las paredes, sin embargo, en la región central de la zona de pruebas se tiene flujo uniforme que permite realizar pruebas aerodinámicas en esta región. Un evento interesante reportado por el autor es que durante la realización de los experimentos la sección donde se coloca el honeycomb resultó dañada (damaged), afectando los resultados obtenidos. Se realizaron comparaciones en las mediciones de la intensidad de la turbulencia antes y después de los daños sufridos en túnel, y los resultados se presentan en la tabla 2. Se determinó que la turbulencia se

incrementa 3 veces para los diferentes casos reportados cuando resulto dañada la sección de medición.

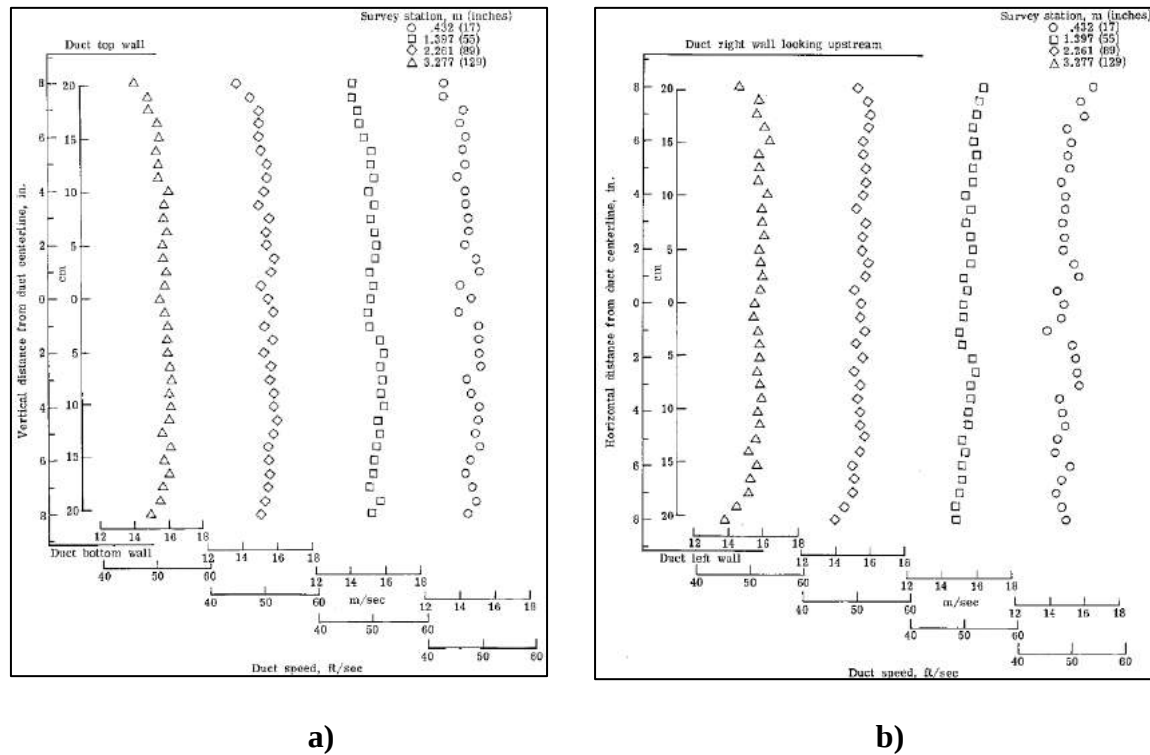


Figura 8. Perfiles de velocidad promedio a) vertical y b) lateral.

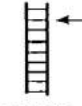
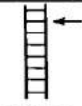
Run no.	U_{ref} , m/sec (ft/sec)	u'	v'	$\sqrt{\frac{(u')^2 + 2(v')^2}{3}}$	Remarks
363	15.6 (51.1)	0.56	1.67	1.40	 42M 28M 1/4 HC High-pass, 2-Hz, damaged honeycomb
364	12.4 (40.8)	.50	1.51	1.27	
365	9.3 (30.5)	.45	1.35	1.13	
366	7.7 (25.4)	.44	1.32	1.11	
Av		.49	1.46		
367	15.6 (51.3)	0.49	0.36	0.41	 42M 28M 1/4 HC High-pass, 2-Hz, undamaged honeycomb
368	12.5 (40.9)	.47	.40	.42	
369	9.3 (30.6)	.41	.39	.40	
370	7.8 (25.5)	.36	.38	.37	
Av		.43	.38		

Tabla 2. Intensidad de turbulencia en zona de pruebas.

Scheiman concluye que el uso de honeycomb como enderezador de flujo sumado a la aplicación de mallas como soporte se considera un enfoque excelente para la reducción de la turbulencia en la zona de pruebas de los túneles de viento y agua.

Una investigación reciente que trata sobre el uso de panal es la desarrollada por Rosas [8] quien trabajo en el túnel de viento subsónico del Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP) del Instituto Politécnico Nacional de México, en su investigación colocó una sección denominada cámara estabilizadora de flujo constituida por un honeycomb y 5 mallas metálicas, tal como se muestra en la figura 9.



Figura 9. Túnel de viento del LABINTHAP-IPN.

El panal mostrado en la figura 10 se colocó como primer elemento en la entrada acampanada y contiene más de 43000 celdas hexagonales, cada una con 0.0045 m de lado,

0.00025m de espesor y 0.011m de largo, lo que permite considerar un diámetro equivalente de 0.00105m.



Figura 10. Honeycomb instalado en cámara estabilizadora.

Para la obtención de la velocidad Rosas utilizó un anemómetro de hilo caliente que se colocó a diferentes posiciones a lo largo de la zona de pruebas, en la figura 11 se aprecian los diferentes planos de muestreo. En la figura 12 se presenta el plano de intensidad de turbulencia obtenido a 1.6m de la entrada y una velocidad de 30m/s. En color verde se grafican los resultados antes de colocar los enderezadores de flujo en el túnel de viento y en color azul después de insertar las mallas y el honeycomb.

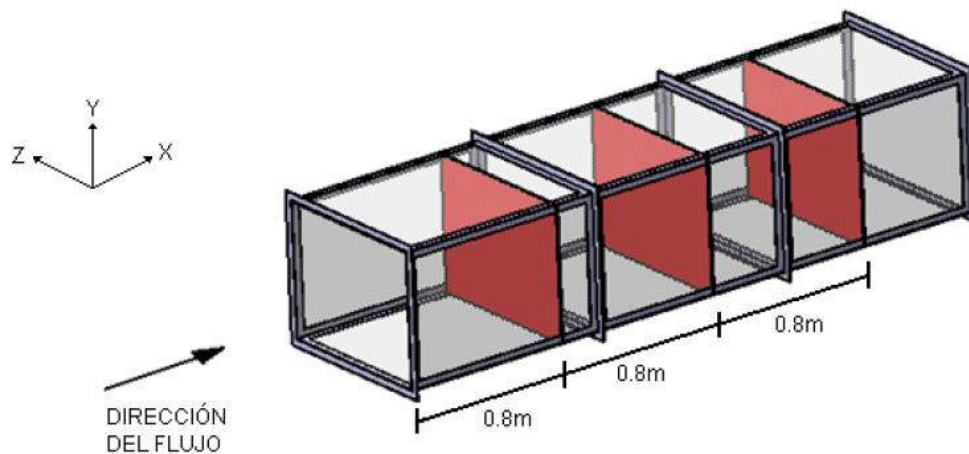


Figura 11. Planos de medición de velocidad.

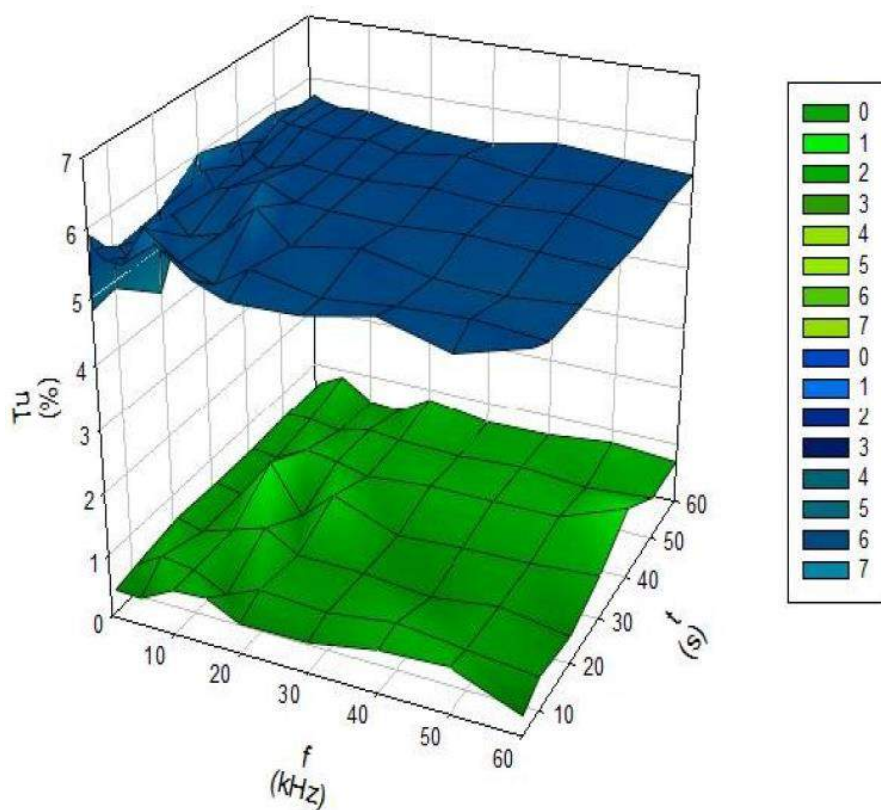


Figura 12. Turbulencia en zona de pruebas antes y después de colocar enderezadores de flujo.

En la tabla 3 se muestran los resultados de la variación de la turbulencia antes y después de realizar la inserción de la cámara estabilizadora en el túnel de viento a diferentes velocidades.

U (m/s)	Tu (%)	
	DESPUES	ANTES
5	0.679	3.2
10	0.699	3.2
15	0.639	4
20	0.717	3.4
25	0.679	3.5
30	0.727	3.5

Tabla 3. Turbulencia a diferentes velocidades.

Se concluye que la inserción de las mallas y el honeycomb en el túnel de viento lograron una reducción de la intensidad de la turbulencia de al menos 2.6%, lo que permite establecer una zona de pruebas accesible para realizar calibración de instrumentos de medición de velocidad.

Finalmente, otra investigación reciente que estudia el uso de honeycomb es la realizada por Arifuzzman y Mashud [9] quienes diseñaron un túnel de viento subsónico para la Universidad de Ingeniería y Tecnología de Khulna en Bangladesh, el cual tiene una sección transversal de 0.9m por lado y una longitud de 1.35m, por la cual circula aire a 40m/s. El túnel de viento cuenta con cámara estabilizadora que contiene mallas y honeycomb para reducir las variaciones fluctuantes en la velocidad transversal. La razón principal para usar un panal es que, con una longitud de aproximadamente 10 diámetros de celda, es un dispositivo de enderezamiento de flujo muy efectivo, las especificaciones del mismo se muestran en la Tabla 4, el cual se construyó utilizando tubos de PVC de clase A en forma de panal como se observa en la figura 13.



Figura 13. Honeycomb instalado en la entrada del túnel de viento.

Parámetros	Símbolo	Valor
Diámetro hidráulico	D_h	2.12 cm
Longitud de panal	L_h	12 cm
Numero de celdas	N	38000
Relación de diámetros	L_h/D_h	6
Porosidad de panal	β_h	0.8

Tabla 4. Parámetros de Honeycomb.

En la figura 14 se muestra la pérdida de presión generada por cada uno de los enderezadores de flujo instalados en el túnel de viento, puede apreciarse que el panal tiene poco efecto sobre la pérdida de presión ya que produce solo el 3% del total, mientras que las mallas (screen) generan el 18%.

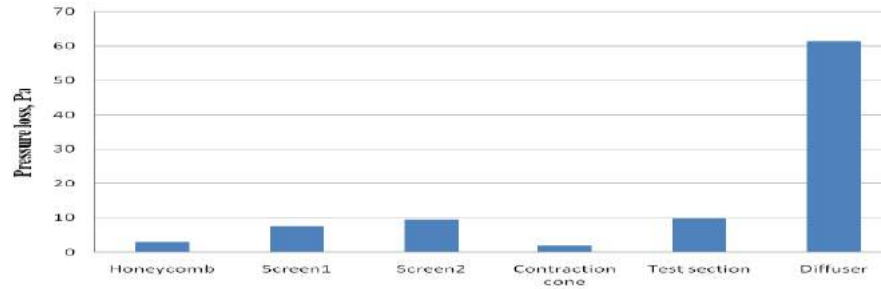


Figura 14. Caída de presión debida a enderezadores de flujo.

Los resultados de la caracterización de la zona de pruebas muestran un perfil de velocidad uniforme en la parte central del túnel, tal como se aprecia en la figura 15 y se concluye que cerca del 76% de la sección puede ser utilizada para investigaciones aerodinámicas.

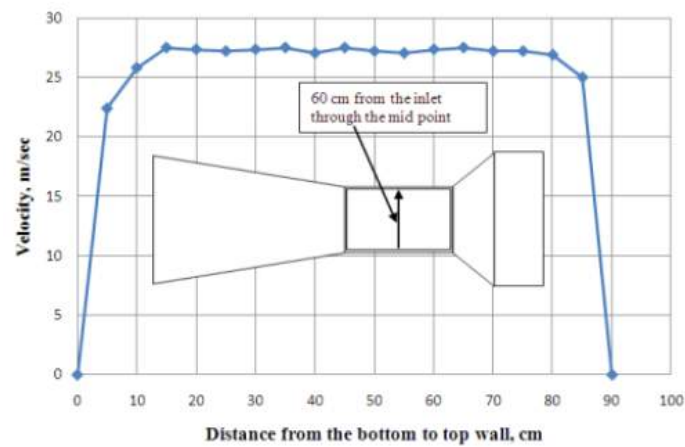


Figura 15. Perfil de velocidad en zona de pruebas.

Capítulo 2

Metodología experimental

El túnel de viento de la FCITEC fue diseñado con una cámara estabilizadora de flujo constituida por malla tipo criba, pero la caracterización de la zona de pruebas realizada por Morales et. al [10], mostro que la intensidad de la turbulencia (Tu) era aproximadamente del 5%, por lo que se propone sustituir la criba por un honeycomb para reducir la misma.

Barlow et. al. [11], sugiere que los coeficientes de pérdida de presión para geometrías de panel circulares, cuadradas y hexagonales presentan resultados de 0.3, 0.22 y 0.2, respectivamente, tal como se muestra en la figura 16, y para ello se considera que la relación de diámetros debe ser:

$$\frac{L_h}{D_h} \geq 6 \quad (2.1)$$

Donde L_h es el largo del honeycomb en la dirección del flujo y D_h es el diámetro hidráulico de cada celda que integra el panel. Los valores obtenidos indican que el honeycomb de celda hexagonal genera pérdidas de presión menores, lo que coincide con lo establecido por Peinado [12]; por lo que se sugiere implementar una sección de forma hexagonal en el túnel de viento.

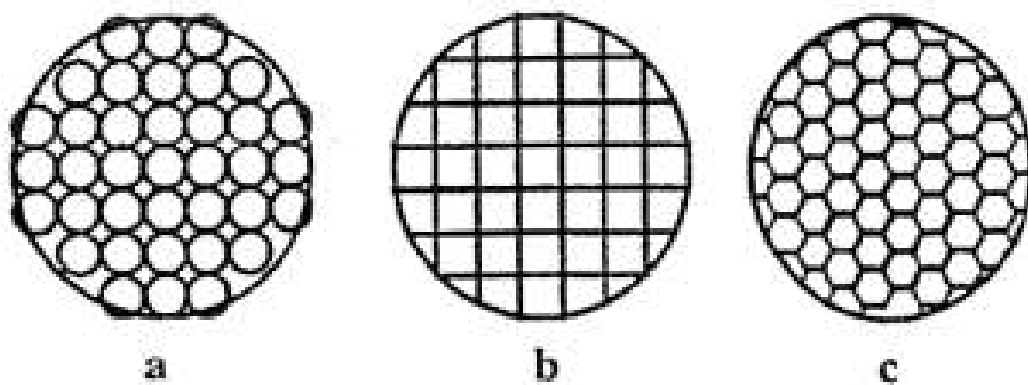


Figura 16. Tipos de honeycomb.

Barlow et. al. [11], también indica que otro factor importante a considerar en el diseño del honeycomb es la porosidad (β_h), la cual se define como:

$$\beta_h = \frac{A_{flow}}{A_{total}} \quad (2.2)$$

Donde A_{flow} es el área de la sección transversal del flujo real y A_{total} es el área de la sección transversal total y se debe verificar que se cumpla el criterio siguiente $\beta_h \geq 0.8$.

Por otro lado, Metha y Bradshaw [3] sugieren que para un beneficio óptimo se debe contar con al menos 25000 celdas en la cámara estabilizadora, esta afirmación la respalda Scheiman de su investigación experimental [5].

El honeycomb al cual se tiene acceso para instalar en el túnel de viento de la FCITEC tiene la especificación técnica de HK-5/32-2.5, que se toma del catálogo de Gill Corporation [13], cuyas condiciones geométricas para cada celda son las siguientes.

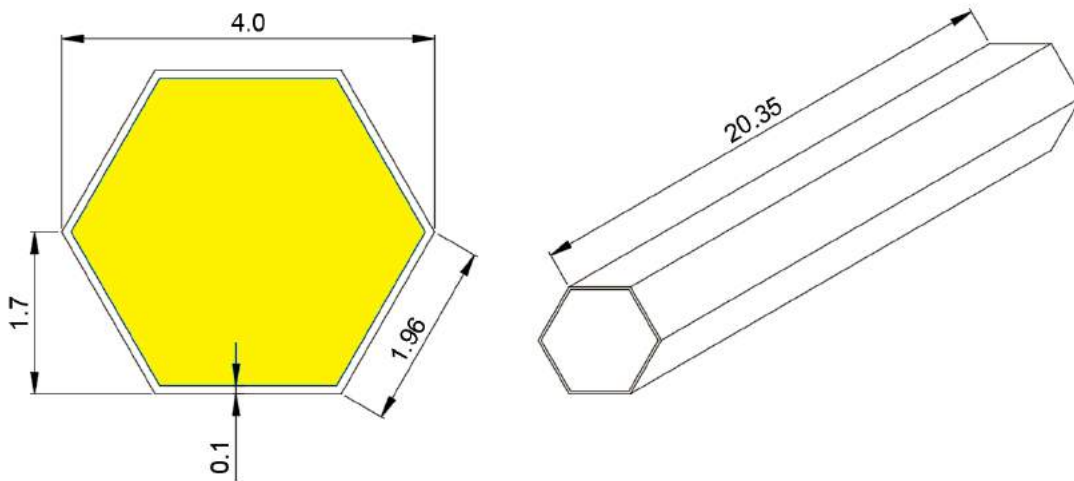


Figura 17. Especificaciones de celdas de honeycomb (sin escala y acotada en mm).

Con las especificaciones geométricas del panel se determina la relación de diámetros (L_h/D_h) y se obtiene un valor de aproximadamente 6, cumpliendo con lo sugerido por Barlow et. al. [11], como se demuestra a continuación, para determinar el diámetro hidráulico de una celda se utiliza la siguiente ecuación:

$$D_h = \frac{4A}{PM} \quad (2.3)$$

El área para la celda se determina con la relación $A = 3 * L * ap$, cuyas descripciones son:

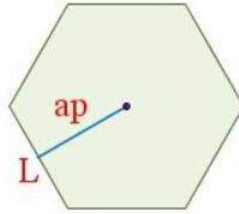


Figura 18.- Nomenclatura para el hexágono.

Para el perímetro mojado se consideran los 6 lados de la celda, así el diámetro hidráulico tiene un valor de 0.0034m, y como se indica en la figura 17 el largo del honeycomb en la dirección del flujo L_h es de 0.02035m por lo tanto la relación de diámetros queda:

$$\frac{L_h}{D_h} \cong 6$$

Para determinar la condición de la porosidad en el panel se considera que la celda tiene un espesor de 0.1mm, obteniéndose el siguiente resultado:

$$\beta_h = \frac{A_{flow}}{A_{total}} = 0.94$$

Considerando que la cámara estabilizadora tiene una sección transversal cuadrada de 0.735m, y cada celda del honeycomb tiene un área total de 0.000011m² se cuenta con 51042 celdas en la sección instalada en la cámara estabilizadora, cumpliendo así con el criterio establecido por Metha y Bradshaw [3]. La figura de una fracción del panel instalado en el túnel de viento se presenta a continuación:

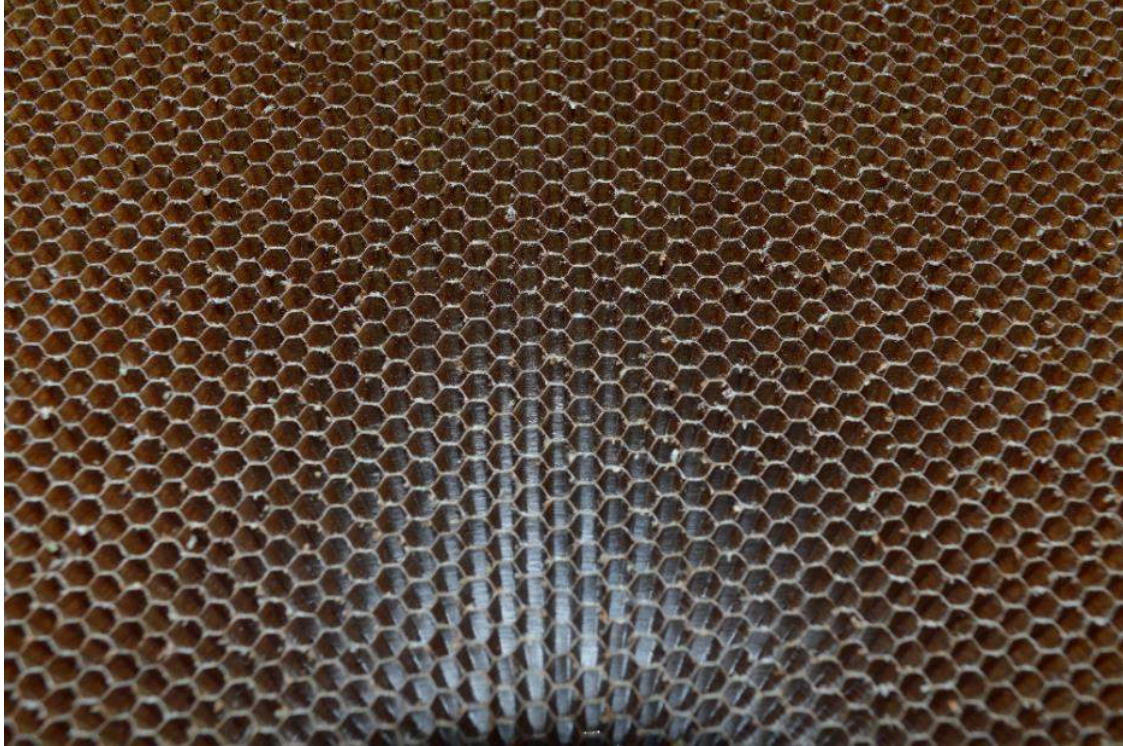


Figura 19. Honeycomb instalado en la cámara estabilizadora.

El panel hexagonal instalado está fabricado con material de aramida y para unirlo al interior de la cámara estabilizadora se utilizó soldadura escocesa (scotch-weld) con el adhesivo estructural de uretano EC-3532 B/A, para realizar la unión fue necesario limpiar la superficie con disolvente, posteriormente se mezcla isocianato, generalmente conocido como endurecedor o acelerador, con poliol durante 30 segundos aproximadamente, lo que proporciona un tiempo de trabajo entre 5 a 15 minutos, durante el cual se realizó la aplicación del adhesivo en el contorno del panel para posicionarlo al interior del túnel de viento tal como se muestra en la figura 20, una vez instalado se dejó curar durante 24 horas.



Figura 20. Instalación de honeycomb en cámara estabilizadora.

En la cámara estabilizadora se colocaron 2 paneles, en las mismas posiciones donde se encontraban colocadas las cribas de entrada y salida del flujo, tal como se indica en la figura siguiente:

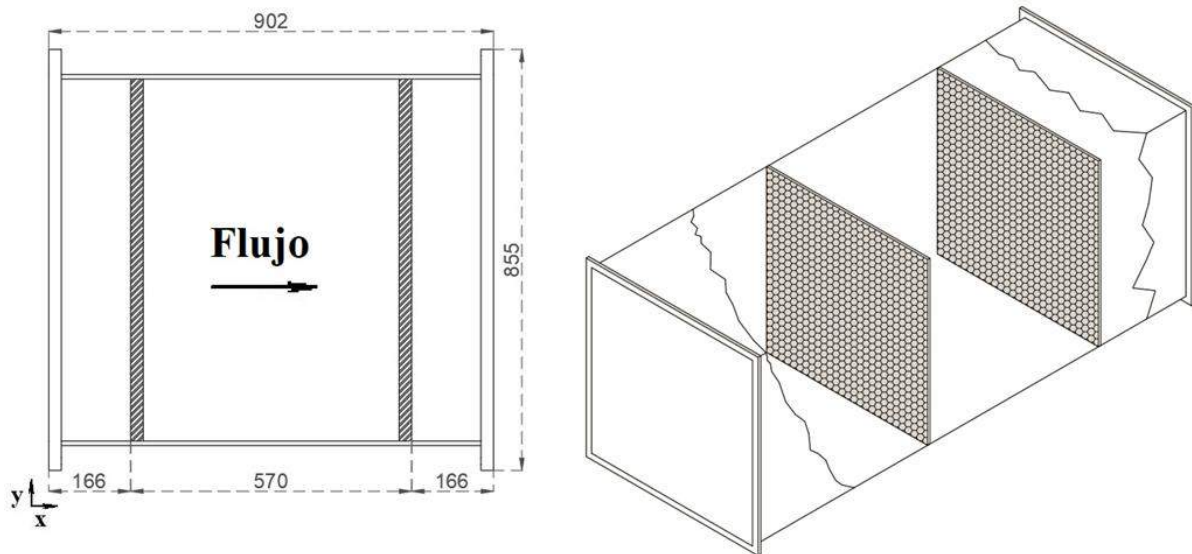


Figura 21.- Distribución de paneles en cámara estabilizadora (acotada en mm).

El material con el cual está construido el panal se conoce como fibras de aramida y son una clase de fibras sintéticas resistentes y termoestables. Se utilizan en aplicaciones aeroespaciales, militares, tejidos para chalecos antibalas, compuestos balísticos y neumáticos de bicicleta. La producción de fibras de aramida es conocida bajo los nombres de marca Kevlar y Nomex. La primera aramida producida fue llamada Nomex e introducido por Du Pont en 1961. Las características generales de Kevlar son [14]:

- Alta resistencia a la tracción en Bajo Peso.
- Elongación baja para romper.
- Módulo alto (rigidez estructural).
- Baja conductividad eléctrica.
- Alta resistencia química.
- Contracción térmica de baja.
- Alta Tenacidad (Work-A-Break).
- Excelente estabilidad dimensional.
- Resistencia High Cut.

Resistente al Fuego, autoextinguible.

En la tabla 5 se muestran las especificaciones técnicas del honeycomb producido por la empresa Gill Corporation [13], para la figura los símbolos mostrados corresponden a la configuración geométrica del panal donde T = largo, L = ancho y w = alto.

Gillcore® HK Honeycomb Description	Cell Size	Density	Compressive				Plate Shear					
			Bare		Stabilized		L Direction			W Direction		
			Strength		Strength		Strength		Modulus	Strength		Modulus
			TYP	MIN	TYP	MIN	TYP	MIN	TYP	TYP	MIN	TYP
	mm	kg/m³	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Gpa	Mpa	Mpa	Gpa
HK-5/32-2.5	4.0	40	1.94	1.79	2.14	1.97	1.60	1.41	0.10	0.93	0.81	0.06
HK-5/32-6.0	4.0	96	7.30	6.86	8.01	7.45	3.56	3.46	0.18	2.71	2.60	0.10
HK-3/16-2.0	4.8	32	2.23	2.00	2.45	2.32	2.22	2.00	0.13	1.16	1.07	0.06

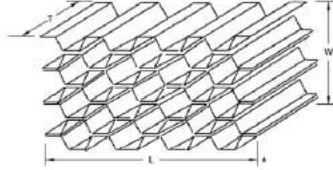


Tabla 5. Especificaciones de panel de Gill Corporation.

Esta información permite identificar los esfuerzos que puede soportar el material, y tomando en cuenta que la compresión será el esfuerzo más importante al que será sometido el panel, el mismo se determina con la siguiente ecuación:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

Donde F es la fuerza que ejerce el flujo y A es el área que presenta el honeycomb en su sección transversal considerando el espesor de 0.1mm de las 51042 celdas que lo constituyen.

De acuerdo con esto, la fuerza se determina con la ecuación siguiente:

$$F = u * \rho * Q = \frac{m}{s} * \frac{kg}{m^3} * \frac{m^3}{s} = N \quad (2.5)$$

Siendo u la velocidad promedio, ρ la densidad del aire y Q el caudal. El área de determina considerando el espesor de cada celda y la totalidad de las mismas, por lo que la fuerza de compresión aplicada al honeycom será:

$$P = \frac{10.2N}{0.03m^2} = 342.57 Pa$$

Comparando el valor de compresión obtenido con el indicado en la tabla 5, en la sección de compresión mínima libre (bare) que es de 1.79MPa se observa que no se tiene riesgo de falla en el material al no excederse el valor mínimo establecido por el fabricante.

Para alargar la vida del panel ya instalado en el túnel de viento se coloca un protector que evitará se acumule el polvo en las celdas, el cual tendrá las dimensiones de la cámara estabilizadora, tal como se ilustra en la figura siguiente. Además, periódicamente utilizando una aspiradora se dará limpieza al honeycomb para eliminar el polvo o basura que pudiera acumularse a pesar del protector.

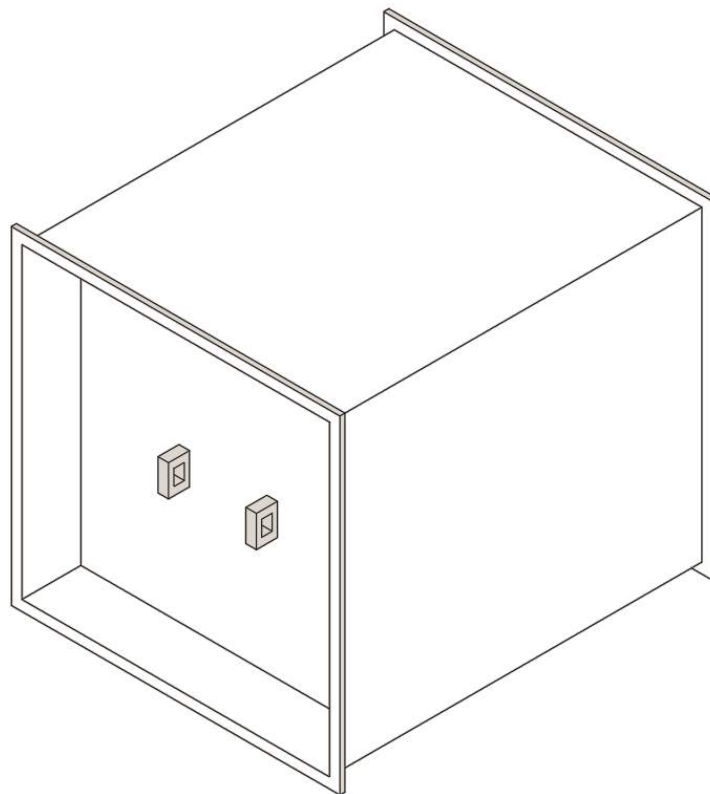


Figura 22.- Protector de honeycomb en cámara estabilizadora.

Capítulo 3

Metodología numérica

El análisis numérico del flujo al interior del túnel de viento de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología (FCITEC) se desarrolló con los softwares Solidworks® [15] y ANSYS-FLUENT® [16], y a continuación se detalla el proceso de simulación el cual está dividido en 3 etapas: pre-procesamiento, solver y pos-procesamiento.

A) Pre procesamiento: dominio computacional.

El dominio computacional se realizó utilizando el software Solidworks y reproduce fehacientemente las condiciones geométricas del túnel de viento de la FCITEC descritas por Morales et. al. [17], el cual se compone de los elementos mostrados en la figura 23 y se detallan brevemente a continuación.

A.- Entrada acampanada: permite obtener una perturbación mínima en el flujo antes de llegar a la zona de pruebas.

B: Cámara estabilizadora: almacena los enderezadores que permiten estabilidad en el flujo antes de la sección de contracción.

C: Sección de contracción: incrementa la velocidad promedio del flujo.

D: Zona de pruebas: lugar donde se llevan a cabo las mediciones y visualización del flujo.

E: Sección de transición: disminuye las pérdidas de presión a la salida.

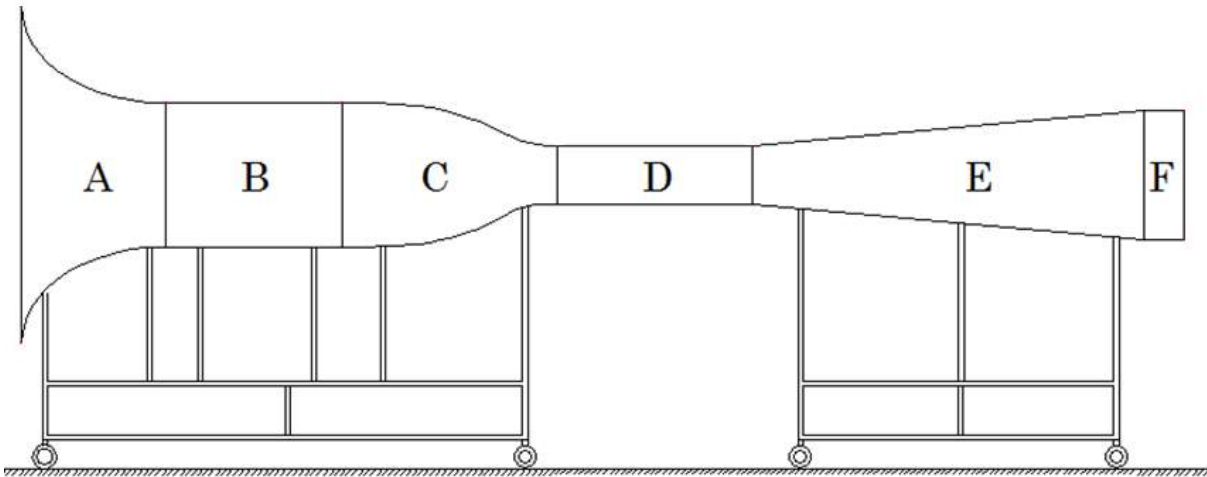


Figura 23. Componentes de túnel de viento de la FCITEC.

Una vez que se reproduce el dibujo en 3D en la plataforma de Solidworks se genera un archivo con la extensión STEP, aunque también puede utilizarse IGES, para poder exportar la pieza al programa de FLUENT en el que se trabaja de la siguiente forma:

Inicialmente debe seleccionarse el formato “Fluid Flow (Fluent)” de las opciones de la plataforma de ANSYS, como se indica en la figura siguiente.

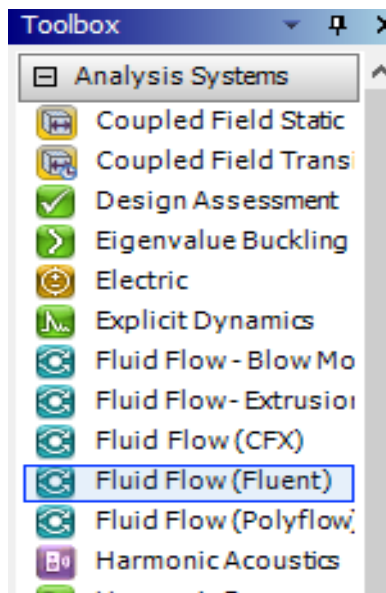


Figura 24. Panel de Toolbox para seleccionar Fluid Flow (fluent).

Para poder insertar el túnel de viento en la plataforma se debe seleccionar clic derecho al panel de geometría y donde se indica “import geometry” se busca el archivo a desplegar, tal como se muestra en la figura 25, el dominio computacional aparecerá como se observa en la figura 26.

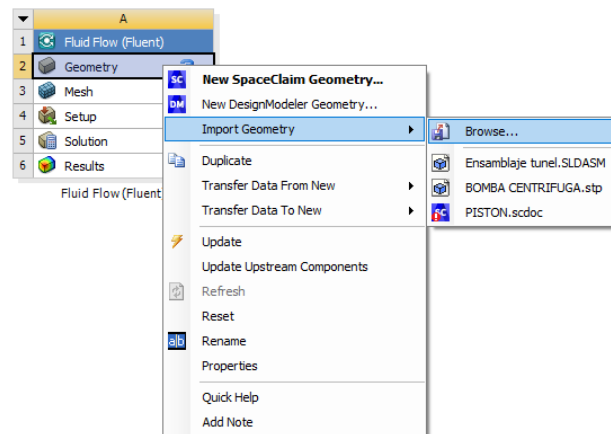


Figura 25. Panel para seleccionar el modelo.

Para poder eliminar los bordes extras del modelo se debe buscar la pestaña que indica “repair” y después debe seleccionarse “extra edges” como se observa en la figura 27.

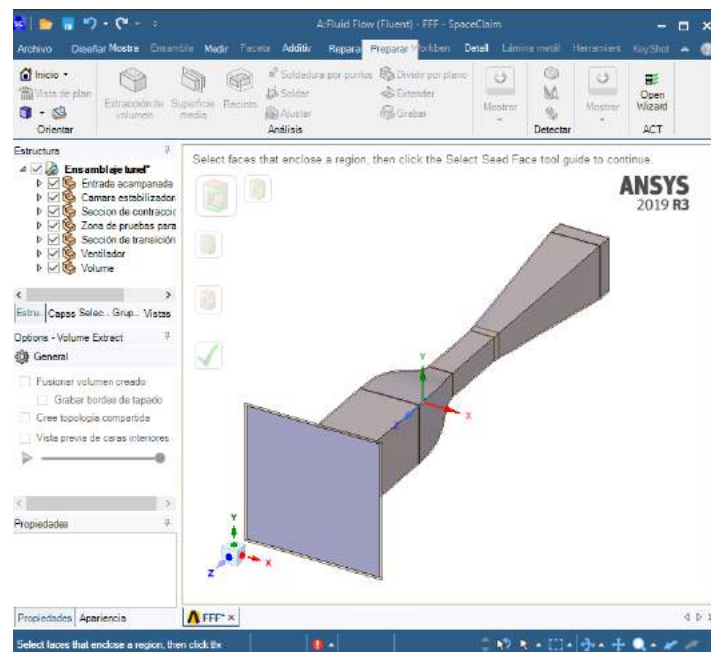


Figura 26. Dominio computacional importado a FLUENT.



Figura 27. Pestaña de Repair en menú principal.

Una vez cargado el dominio computacional como un volumen, en el panel del proyecto se selecciona la opción “mesh” para abrir la ventana del modelo, y deben suprimirse las partes de la geometría, excepto la del volumen, tal como se observa en la figura 28, los cubos marcados con una X azul son las partes suprimidas.

Una vez que se está en el panel del modelo, se selecciona la opción “malla” (mesh) con clic derecho y se selecciona la opción “generar malla”, por default se aplicará el método de mallados tetraédricos como se observa en el lado derecho de la figura 28.

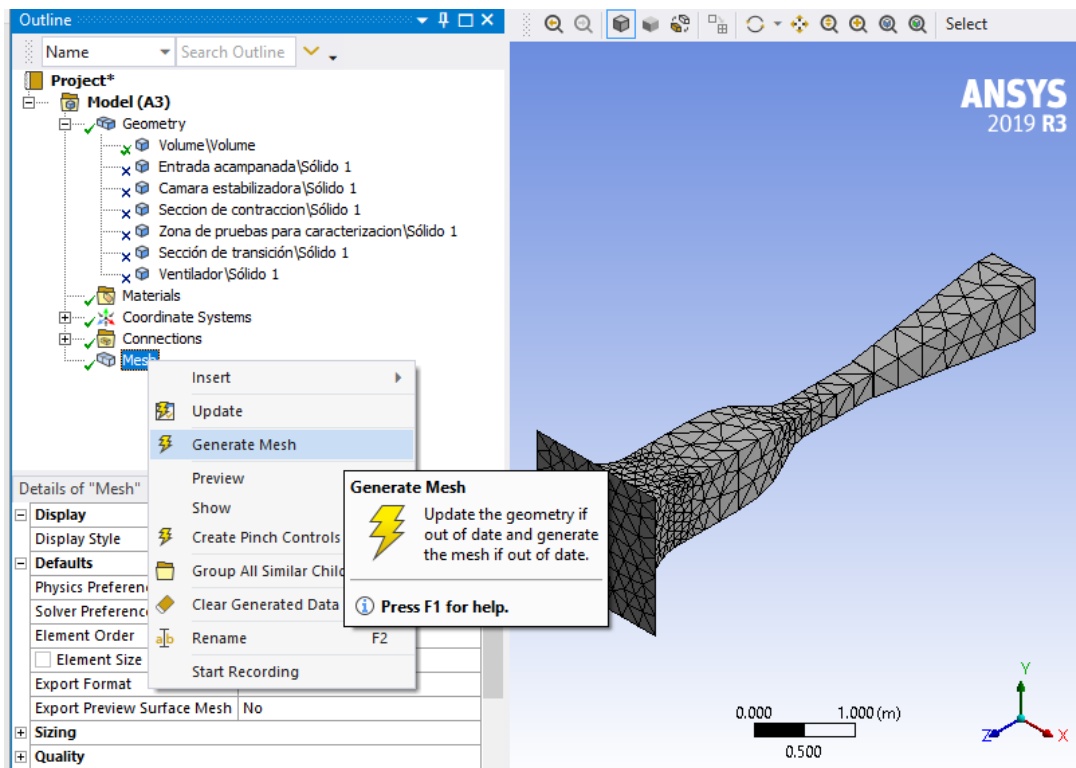


Figura 28. Dominio computacional mallado.

En la zona de pruebas se desea contener la mayor cantidad de elementos para realizar un análisis detallado del comportamiento del flujo, por lo tanto, para modificar el tamaño de los elementos de mallado se deben seleccionar de manera independiente las diferentes secciones del dominio computacional.

En la parte 1 (entrada acampanada) y 2 (cámara estabilizadora) seleccionadas en color azul como se observa en las figuras 29 y 30 respectivamente, se modificó la malla a tamaño de 50mm para cada volumen de control. Para la parte 3 (sección de contracción), se modificaron los volúmenes de control a un tamaño de malla de 40mm (figura 31), y en la parte 4 (zona de pruebas), se modificó a un tamaño de malla de 10mm (figura 32). Finalmente, en la parte de la salida se modificó la malla a un tamaño de malla de 40mm como se muestra en la figura 33.

Para calcular el tamaño de cada volumen de control en una malla no uniforme se utiliza la siguiente ecuación [18]:

$$l(n) = \frac{Li(e^n - 1)}{(e^N - 1)} \quad (3.1)$$

Donde:

$l(n)$ = Distancia hasta el volumen de control n , Li = Longitud total de la sección, e = Coeficiente de expansión, N = Volúmenes de control totales y n = Volumen actual. Se recomienda que el valor del exponente se encuentre entre 1 y 1.2 para obtener mejores resultados en la generación de la malla no uniforme, si el valor de “ $e=1$ ” indica que la malla es uniforme.

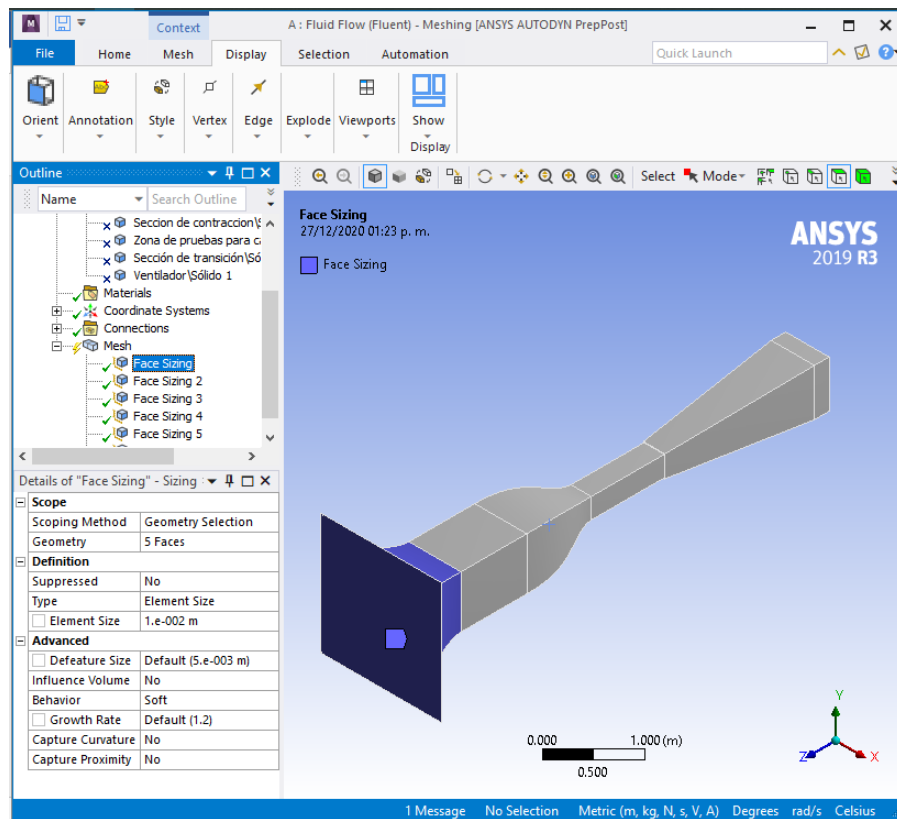


Figura 29. Entrada acampanada modificada en tamaño de volúmenes de control de 50mm.

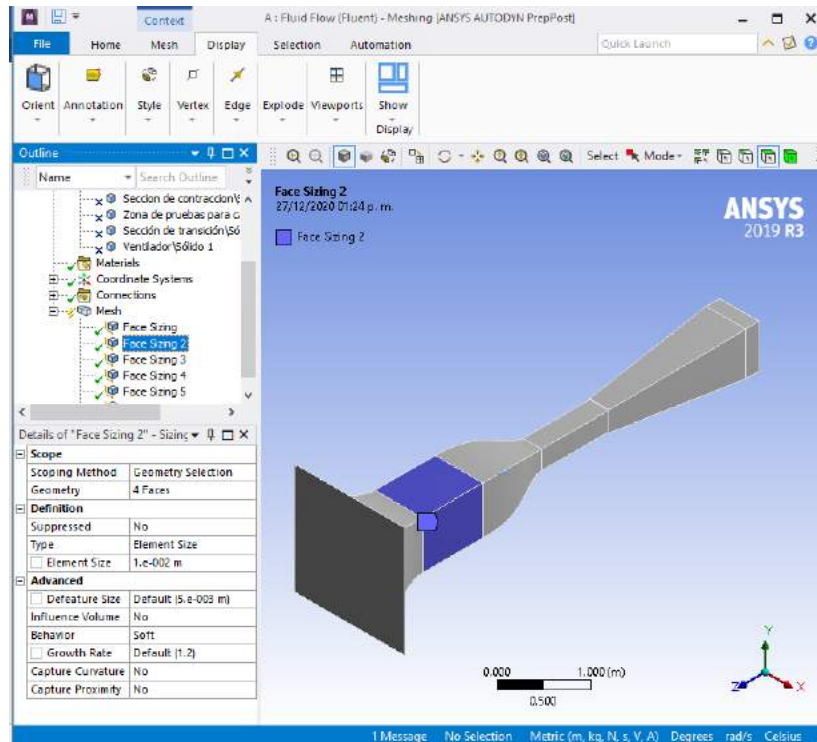


Figura 30. Cámara estabilizadora modificada en tamaño de volúmenes de control de 50mm.

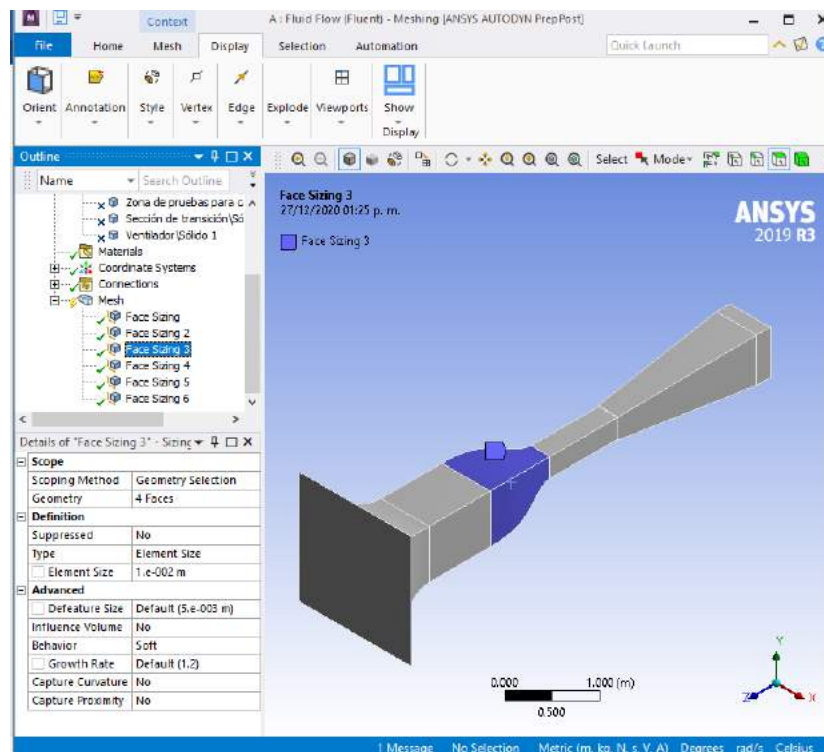


Figura 31.- Sección de contracción modificada en tamaño de volúmenes de control de 40mm.

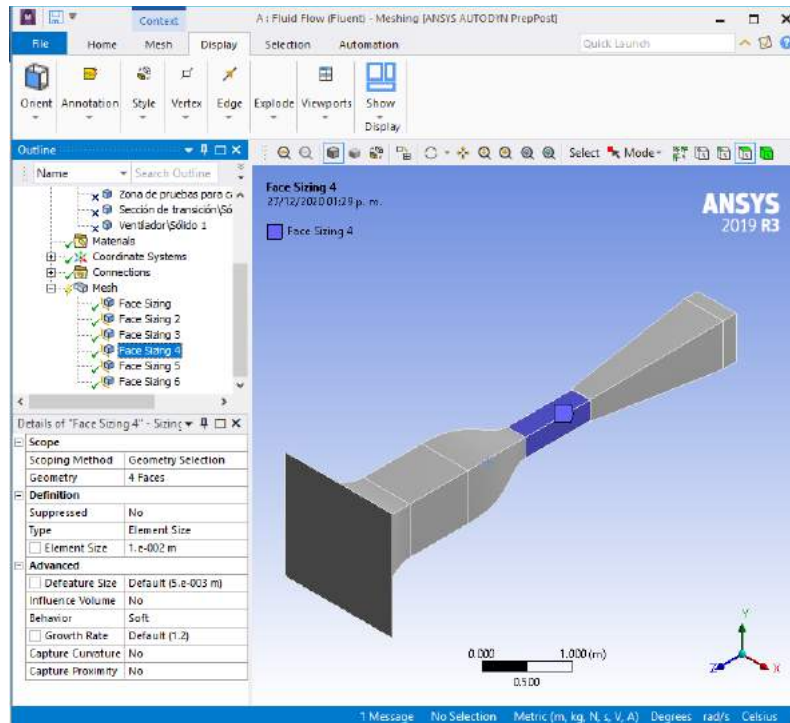


Figura 32.- Zona de pruebas modificada en tamaño de volúmenes de control de 10mm.

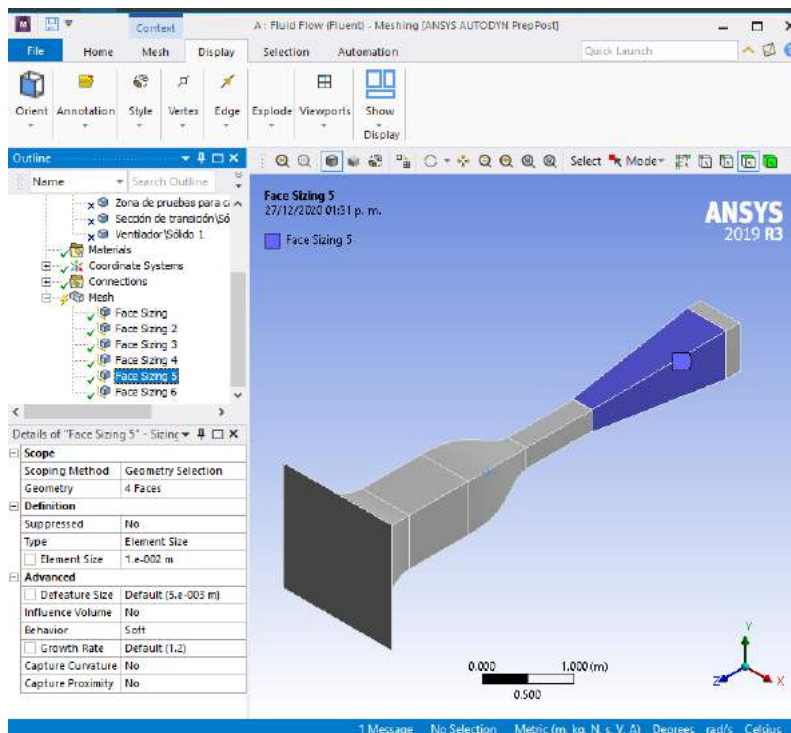


Figura 33. Sección de transición modificada en tamaño de volúmenes de control de 40mm.

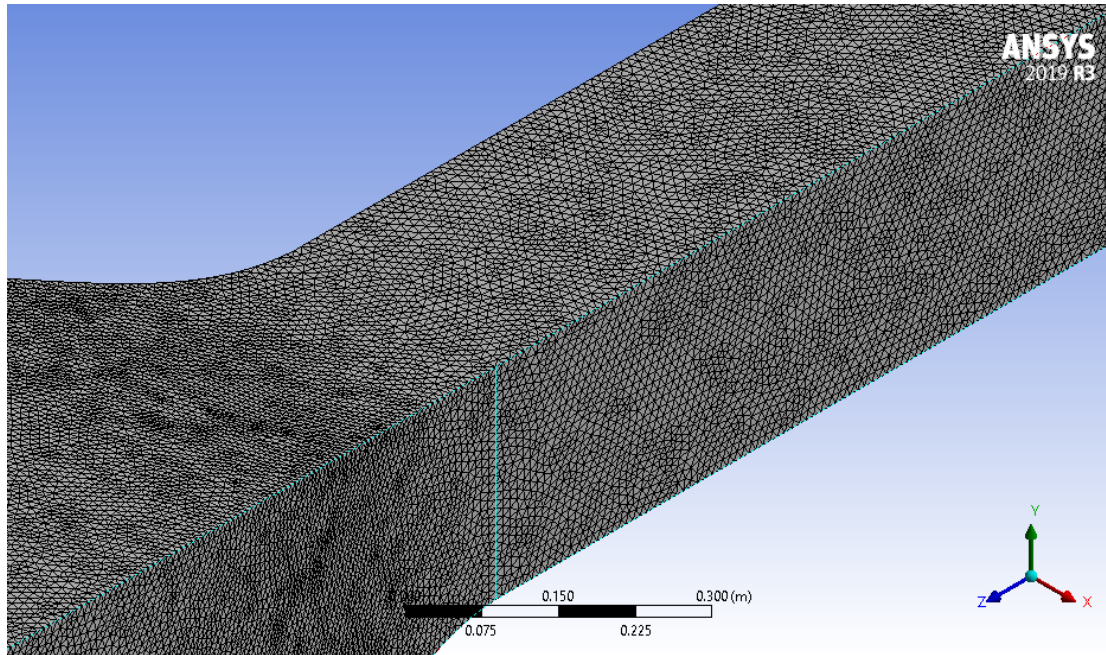


Figura 34.- Zoom en zona de pruebas de región de malla.

A) Solver: modelo de turbulencia, condiciones iniciales y de frontera.

Una vez establecida la malla en el dominio computacional deben establecerse las condiciones para la resolución del problema, por lo que debe seleccionarse SetUp en la plataforma la cual enviara una pantalla en la que se selecciona “3D” y “doble precisión”, esto para establecer que se trata de un análisis tridimensional y darle mayor confiabilidad a los resultados obtenidos como se indica en la figura 35.

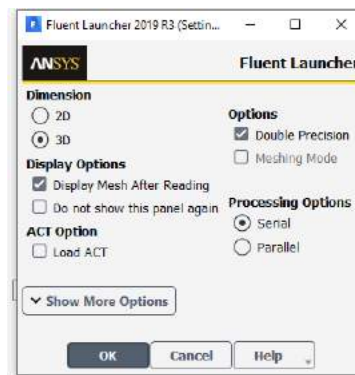


Figura 35. Panel de inicio de SetUp.

Una vez establecida la condición de precisión en los resultados, se da doble clic en la opción de models (figura 36), donde puede activarse entre otras cosas el modelo viscoso, la ecuación de la energía o transporte de especies y fluidos multifasicos, las cuales son condiciones que permiten resolver diferentes problemas de ingeniería tales como flujo, transferencia de calor y mezclado de sustancias, respectivamente.

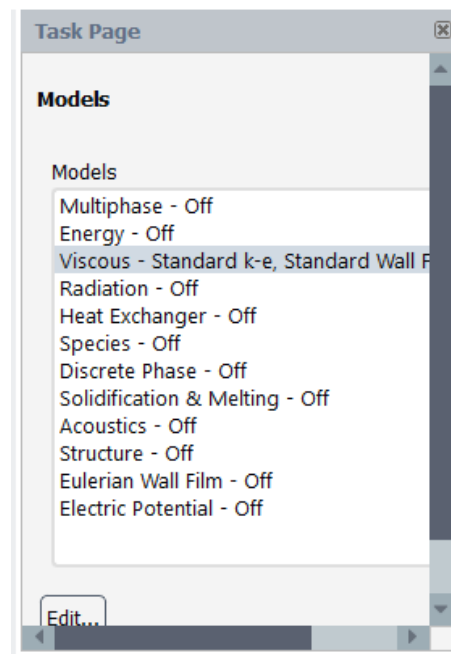


Figura 36. Modelos viscoso de simulación.

Al indicar viscous en el panel de modelo se abre una ventana en la cual puede establecerse el modelo de turbulencia que se utilizara para resolver la simulación de flujo turbulento, estable e incompresible al interior del túnel de viento. Para este caso se selecciona la opción de k-epsilon (2-eqn) Standard, como se indica en la figura siguiente.

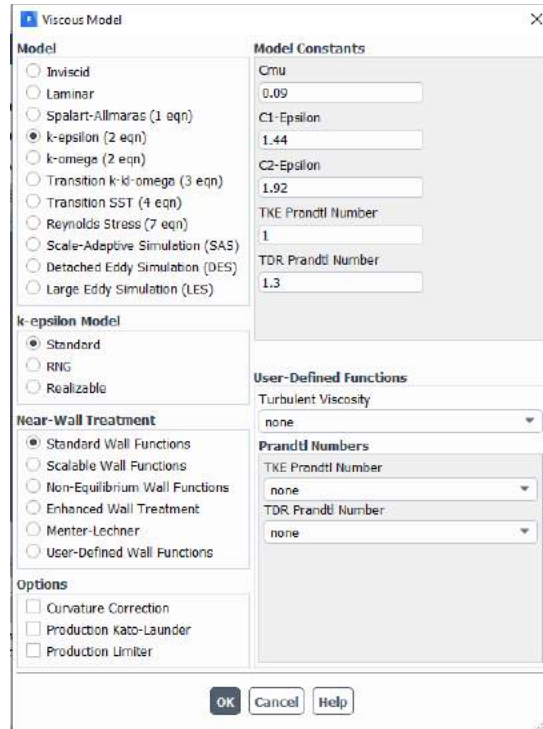


Figura 37. Modelo de turbulencia K-epsilon.

Es un hecho desafortunado que ningún modelo de turbulencia sea universalmente aceptado como superior para todas las clases de problemas. La selección del modelo de turbulencia dependerá de consideraciones tales como la física abarcada en el flujo, la práctica establecida en una clase específica del problema, el nivel de precisión requerido, los recursos computacionales disponibles, y la cantidad de tiempo disponible para la simulación. El más simple de los modelos completos de turbulencia es de dos ecuaciones en el cual la solución de las mismas se realiza por separado y permite que la velocidad turbulenta y las escalas de longitud sean determinadas independientemente. El modelo estándar k-epsilon cae dentro de esta clase de modelos de turbulencia y se ha convertido en el caballo de trabajo para cálculos prácticos de flujo en ingeniería. Robusto, económico, y razonablemente preciso para un gran rango de flujos turbulentos explica su popularidad en flujos industriales y simulaciones de transferencia de calor [19].

Una vez seleccionado el modelo de turbulencia deben especificarse las condiciones de frontera, para se da doble clic en boundary conditions, y posteriormente se hace un doble click en la zona de entrada (como se denomina a la cara de mayor dimensión de la entrada acampanada).

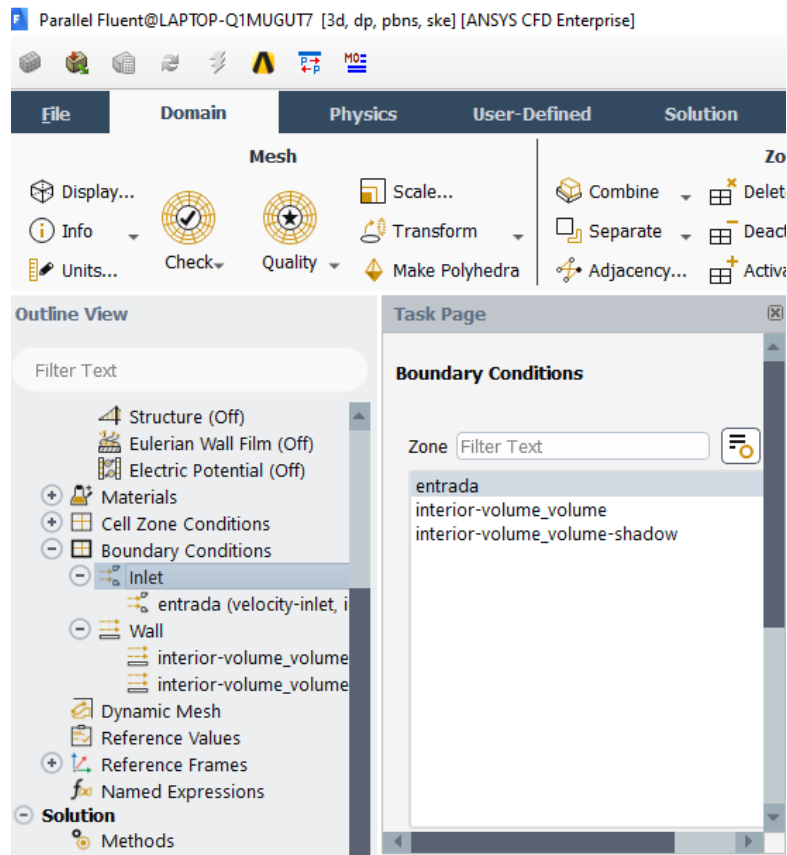


Figura 38. Selección de zona de entrada.

La configuración de frontera que se establece en este punto es la velocidad de entrada por componentes, como se observa en la figura 39, y se establece la condición de velocidad inicial de 0.734 m/s en el eje del sentido del flujo, que para este caso es el eje Z.

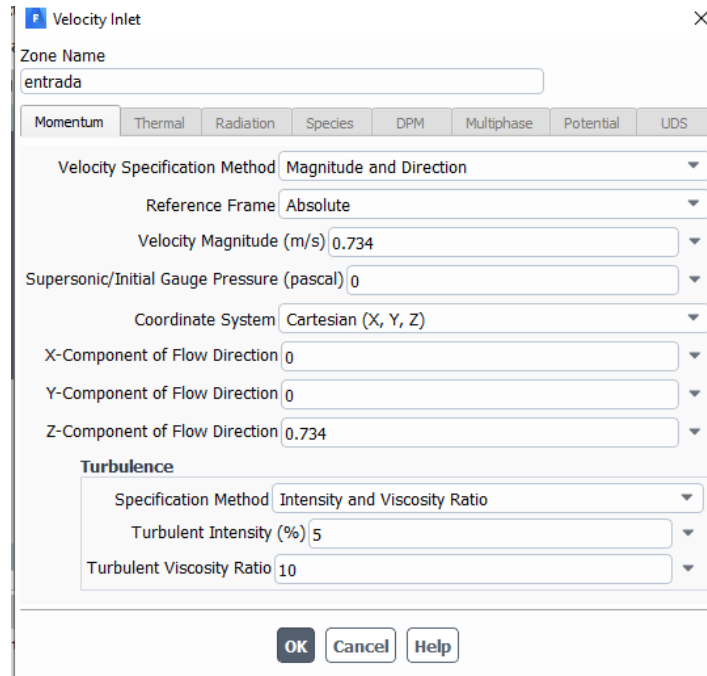


Figura 39.- Configuración de la velocidad por componentes.

La condición de outflow se utiliza para modelar la salida del flujo donde los detalles de la velocidad y de la presión del flujo no se conocen antes de la solución del problema. La condición de límite de la salida asume que existe un valor de cero para todos los gradientes de las variables del flujo [16].

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 ; \frac{\partial v}{\partial z} = 0 ; \frac{\partial w}{\partial z} = 0 ; \frac{\partial P}{\partial z} = 0$$

Para finalizar, se debe inicializar la solución del problema, para esto debe seleccionarse “run calculation”, y se despliega una ventana donde debe establecerse un número de iteraciones arbitrario en este caso 100 (figura 40), además puede observarse el comportamiento de los residuales de las ecuaciones solucionadas por el software, al presionar calcular se observará una gráfica como la mostrada en la figura 41.

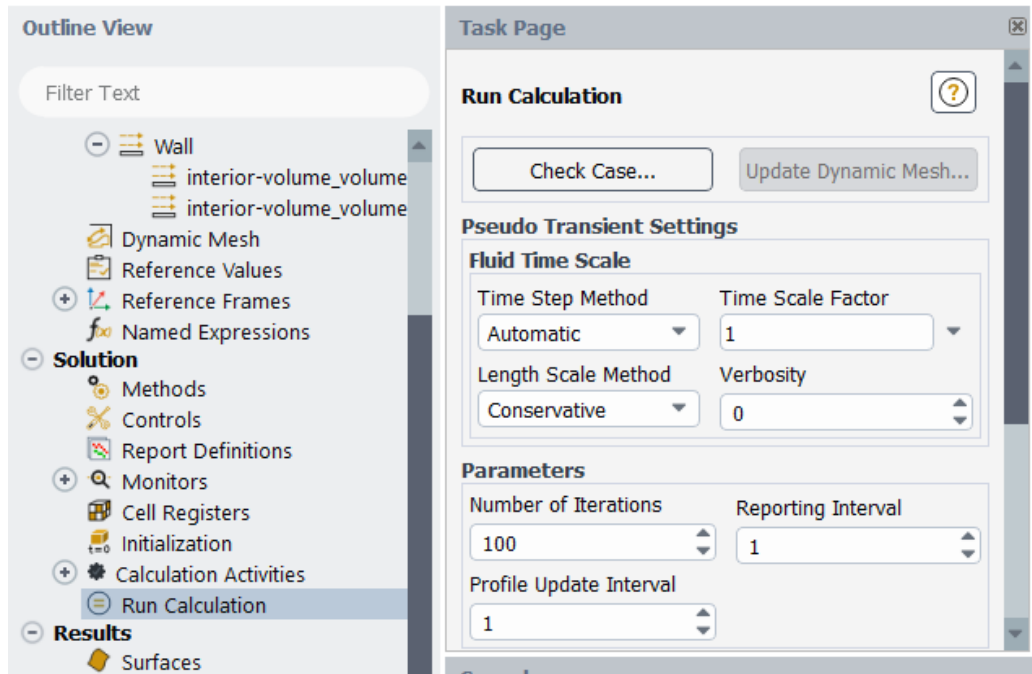


Figura 40. Solución de problema.

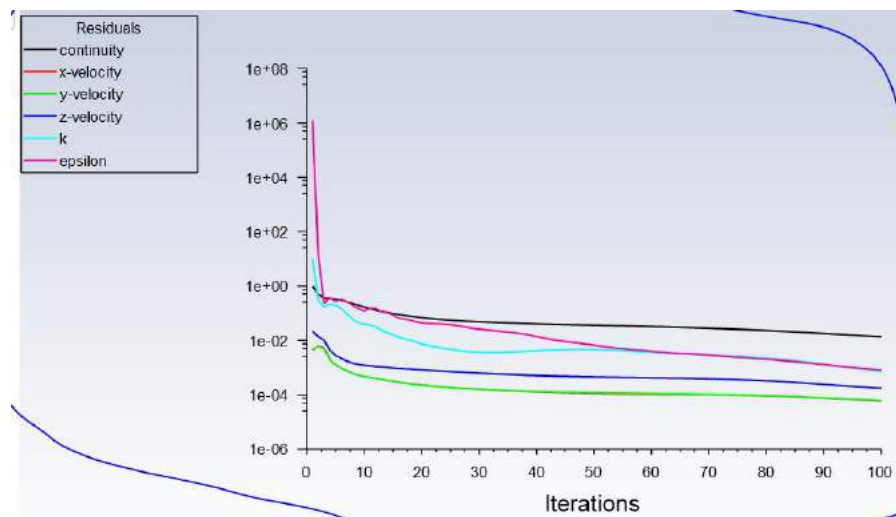


Figura 41. Grafica de residuales.

A) Post-procesamiento: mapas de vectores.

Para presentar la solución del problema se tienen mapas de vectores de velocidad como los mostrados en las figuras siguientes. Puede apreciarse en la figura 42 que los vectores de velocidad en la entrada del túnel presentan el mismo color, lo que significa el mismo valor impuesto en la condición inicial de 0.73m/s, lo que es coincidente con la condición de frontera “velocity inlet” ya que ésta impone un perfil de velocidades uniforme, también se establece claramente como el flujo se acelera hasta llegar al máximo en la zona de pruebas de aproximadamente 24m/s como valor promedio, para finalmente desacelerarse en la zona de transición. Para el caso de la figura 43 se aprecia la tridimensionalidad del flujo en el centro de la zona de pruebas, los vectores de velocidad cerca de la pared presentan un valor de velocidad cercano a cero por la condición de no deslizamiento.

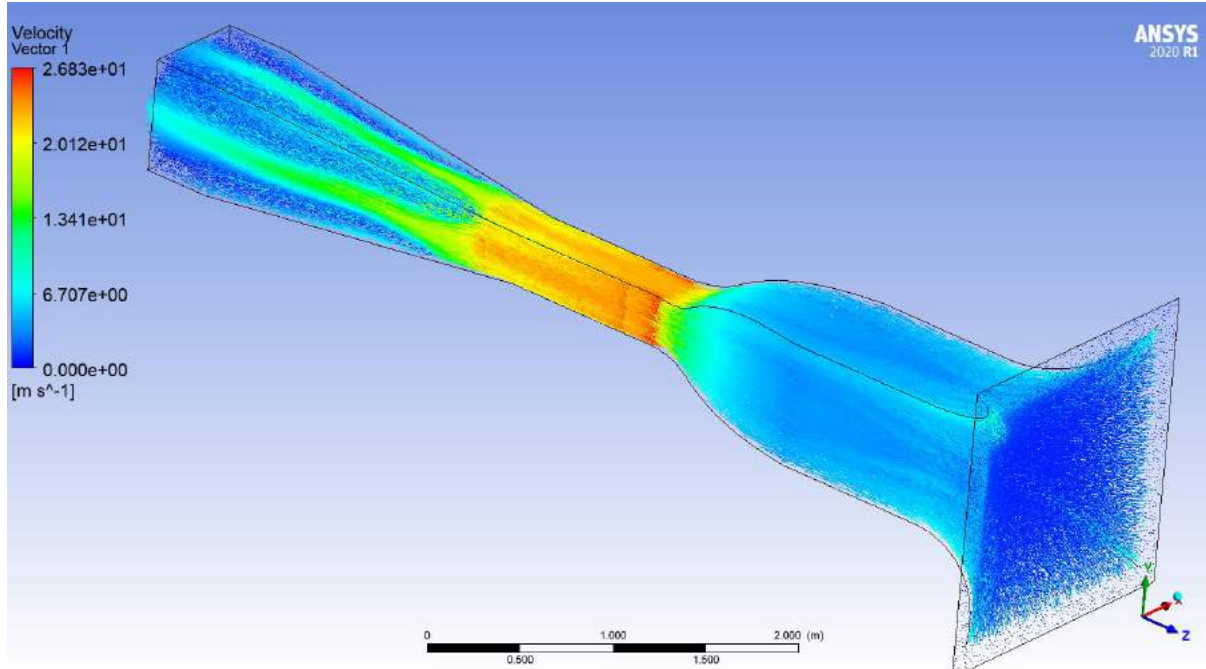


Figura 42. Vectores de velocidad en todo el túnel de viento.

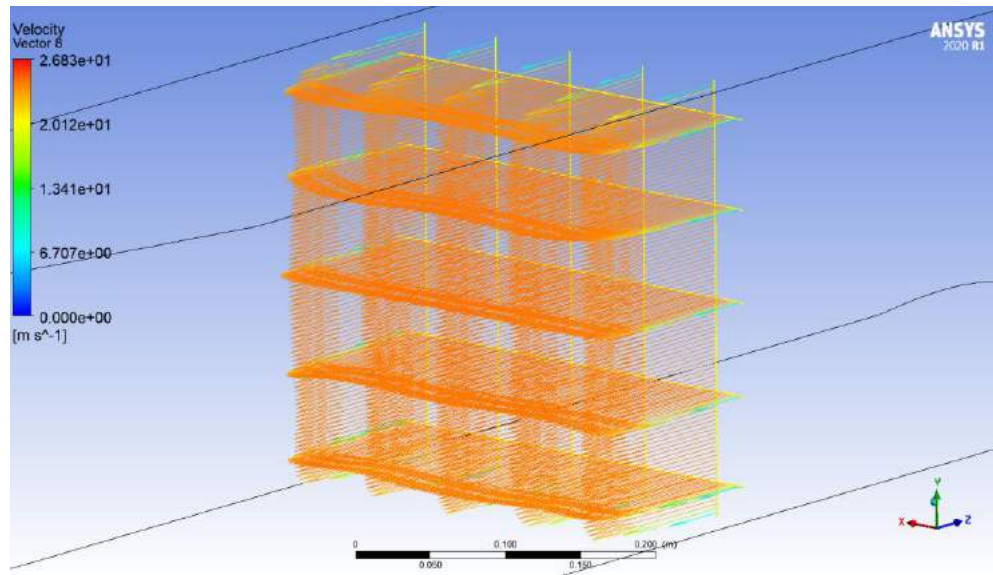


Figura 43. Vectores de velocidad en el centro de la zona de pruebas.

Capítulo 4

Análisis de resultados

En este capítulo se analiza de manera cualitativa y cuantitativa los resultados del comportamiento del flujo en la zona de pruebas. En las figuras 46 a 55 se presenta el comparativo de los perfiles de velocidad obtenidos experimentalmente cuando la cámara estabilizadora contiene las cribas (línea color azul) y el honeycomb (línea color naranja), además se agrega en estas mismas graficas el perfil de velocidades obtenido numéricamente (línea color negro), para complementar el análisis de los cambios producidos por la inserción del honeycomb en el túnel de viento, en la tabla 6 se enlista el valor de la turbulencia para cada perfil de velocidades la cual se determina con la ecuación siguiente [20]:

$$TU = \frac{u_{rms}}{u_{media}} \quad (4.1)$$

Donde la velocidad promedio temporal se define con la ecuación [20]:

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [u_i - u_{media}]^2} \quad (4.2)$$

Siendo N la cantidad total de la muestra, la velocidad promedio u_{media} se determina según lo indicado por Figliola [21]:

$$u_{media} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (4.3)$$

La velocidad puntual se calcula utilizando la ecuación mencionada por Morales et. al. [10]:

$$u_i = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (4.4)$$

Dónde: u_i = velocidad puntual (m/s), ΔP = presión dinámica (Pa) y ρ = densidad del aire (kg/m^3), ésta última se determina utilizando la ecuación de gas ideal completa sugerida en la metodología de Becerra y Guardado [22].

Las condiciones atmosféricas son monitoreadas con la estación meteorológica Vantage pro [23] instalada en la FCITEC, en este instrumento la presión atmosférica tiene una resolución de 0.1mb y precisión nominal de 1 mb, para la temperatura una resolución de 0.1°C y precisión nominal de 0.5°C, y para la humedad resolución de 1% y precisión nominal de 5%. Para medir la velocidad (u_i) en el interior del túnel de viento se utiliza un tubo de Prandtl acoplado a un anemómetro digital de la marca Extech con una resolución de 1Pa, y una precisión de $\pm 0.3\%$ de la escala total [24].

La velocidad promedio obtenida en la zona de pruebas del túnel de viento es de 24m/s (potencia máxima del ventilador) con una densidad del aire promedio registrada de 1.19kg/m^3 . La incertidumbre estadística para la velocidad promedio es de 0.541m/s y la incertidumbre expandida [22] para la densidad del aire es de 0.004621kg/m^3 . Con este valor de velocidad en la zona de pruebas se determina un número de Reynolds de 469479 y un número de Mach de 0.07, lo que indica que se tiene flujo turbulento e incompresible.

Sección	Cámara estabilizadora con cribas	Cámara estabilizadora con honeycomb	Diferencia
A	4%	4%	0%
B	3%	1%	2%
C	6%	2%	4%
D	3%	2%	1%
E	8%	8%	0%
F	10%	5%	5%
G	2%	1%	1%
H	2%	1%	1%
I	1%	2%	1%
J	7%	5%	2%
Promedio	5%	3%	2%

Tabla 6. Intensidad de la turbulencia en zona de pruebas de túnel de viento de FCITEC.

Los valores de la tabla anterior se muestran gráficamente en la figura siguiente, en A) se tienen los resultados del comportamiento del flujo cuando se tenían instalada las cribas en la cámara estabilizadora y en B) cuando se colocó el honeycomb. La figura 44 muestra la sección transversal de la zona de pruebas destacando la región de alta turbulencia en color azul para A) y en color naranja para B). Puede apreciarse que la zona de flujo estable es mayor para el caso B), representado por un sombreado en color verde.

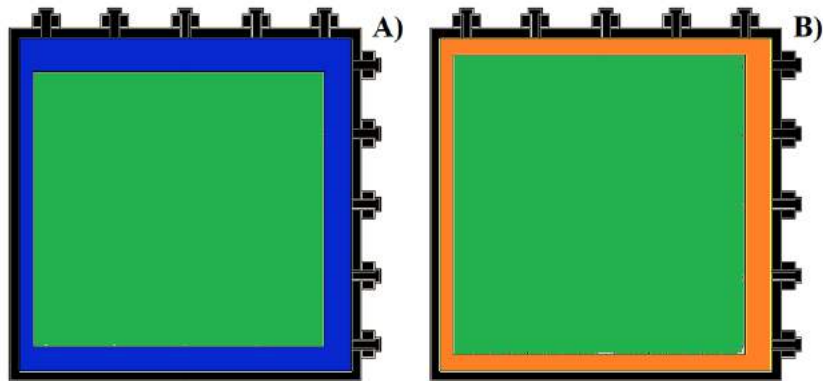


Figura 44. Sección transversal de zona de pruebas con A) cribas y B) honeycomb.

La modificación realizada en la cámara estabilizadora origina una disminución en la intensidad promedio de la turbulencia de dos puntos porcentuales, lo que permite considerar una región más amplia de flujo estable (aproximadamente un 85% de la total) en la sección central de la zona de pruebas como se indica en la figura 1, en la cual podrán realizarse experimentos con modelos aerodinámicos tales como perfiles alares o edificios a escala organizados como medios porosos (figura 45).

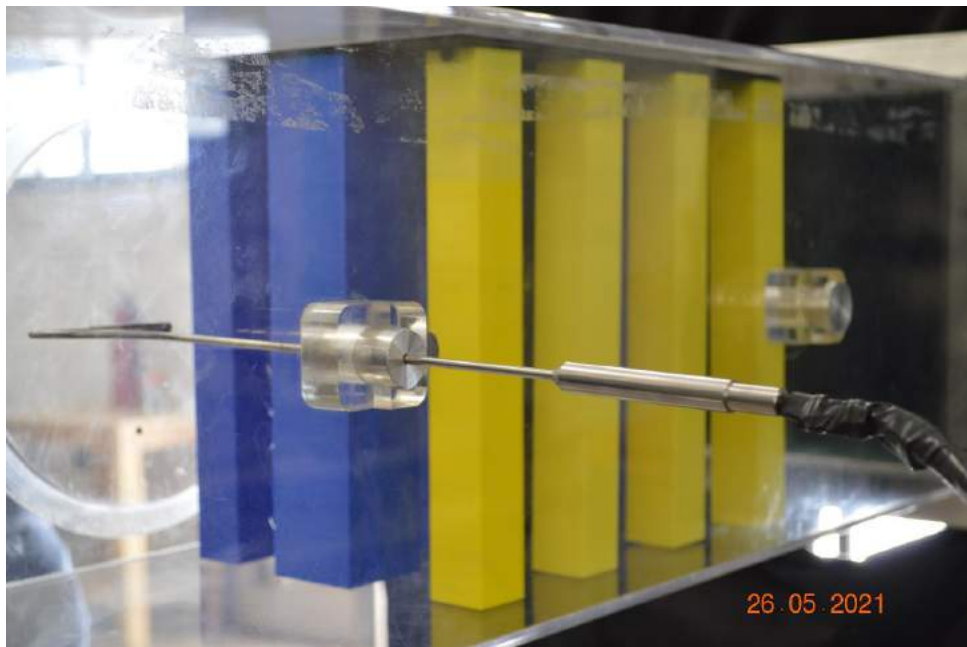


Figura 45. Arreglo de modelo de prismas cuadrados en zona de pruebas.

En los perfiles de velocidad obtenidos cerca de las paredes, secciones A, E, F y J (figuras 46, 50, 51 y 55, respectivamente), se observa un comportamiento irregular, esto se debe a que los mismos se midieron a una distancia de 0.024 m de la pared, por lo que existe una gran influencia de la capa limite en su comportamiento, debe recordarse que la zona de pruebas tiene una sección transversal cuadrada de 0.3 m por lado, esta situación deberá resolverse ya que existe una variación importante al comparar los resultados con el análisis numérico, teniéndose una diferencia de hasta 18% en la velocidad promedio para los mismos puntos de medición.

Para el caso particular del perfil de velocidad ubicado al centro de la zona de pruebas (sección C) medido para el eje Y (Figura 48), el cambio en el comportamiento del flujo es notable, y mientras la intensidad de la turbulencia era del 6% cuando se encontraban instaladas las cribas, ahora con la instalación del honeycomb se tiene una $Tu = 0.02$; mientras que para el otro perfil correspondiente a la misma zona (sección H) pero medido en el eje Z (figura 53), se mantiene el comportamiento uniforme del flujo reduciéndose la turbulencia en 1%.

En las secciones B, D, G e I (figuras 47, 49, 52 y 54, respectivamente), cercanas al centro de la zona de pruebas los perfiles de velocidad mantienen un comportamiento estable y uniforme, y la variación en la intensidad de la turbulencia es del 1.5% en promedio.

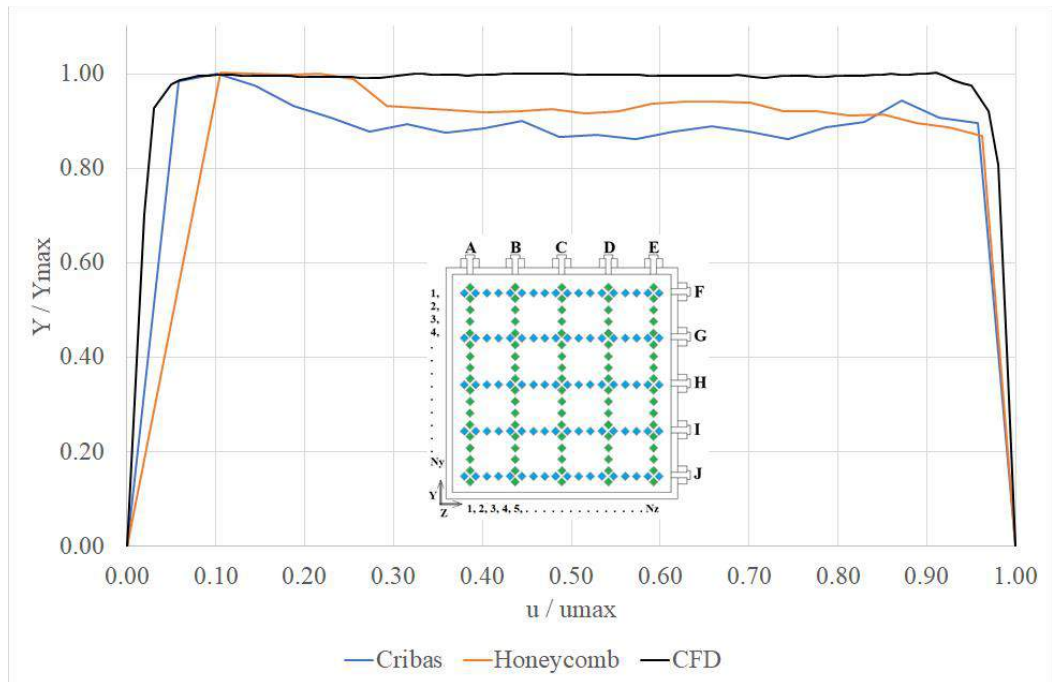


Figura 46.- Perfiles de velocidad sección A.

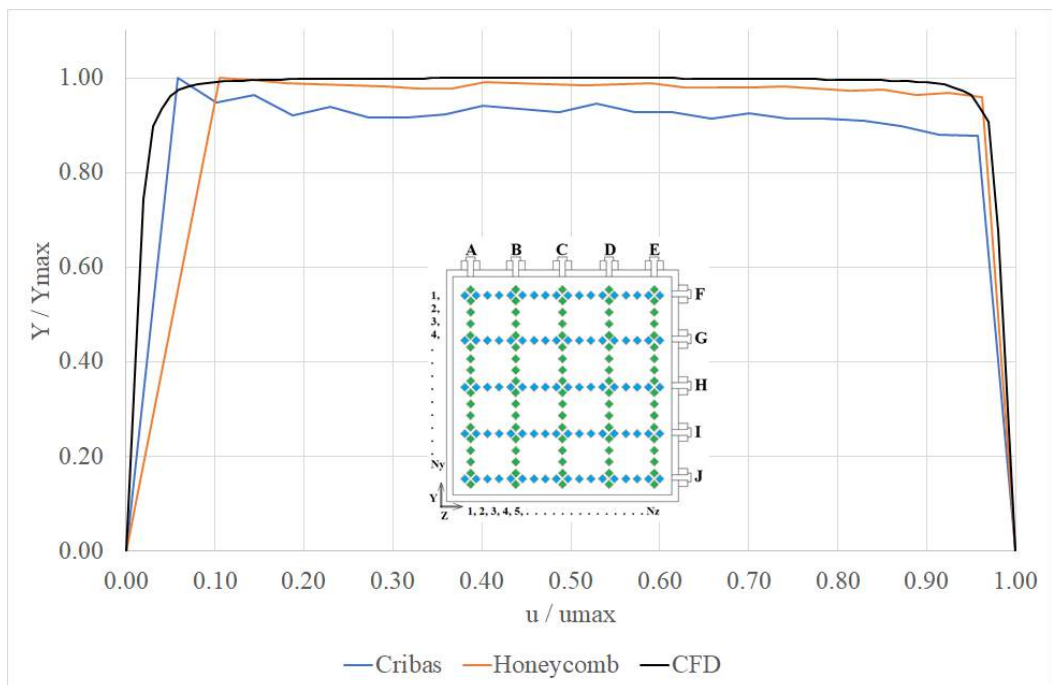


Figura 47.- Perfiles de velocidad sección B.

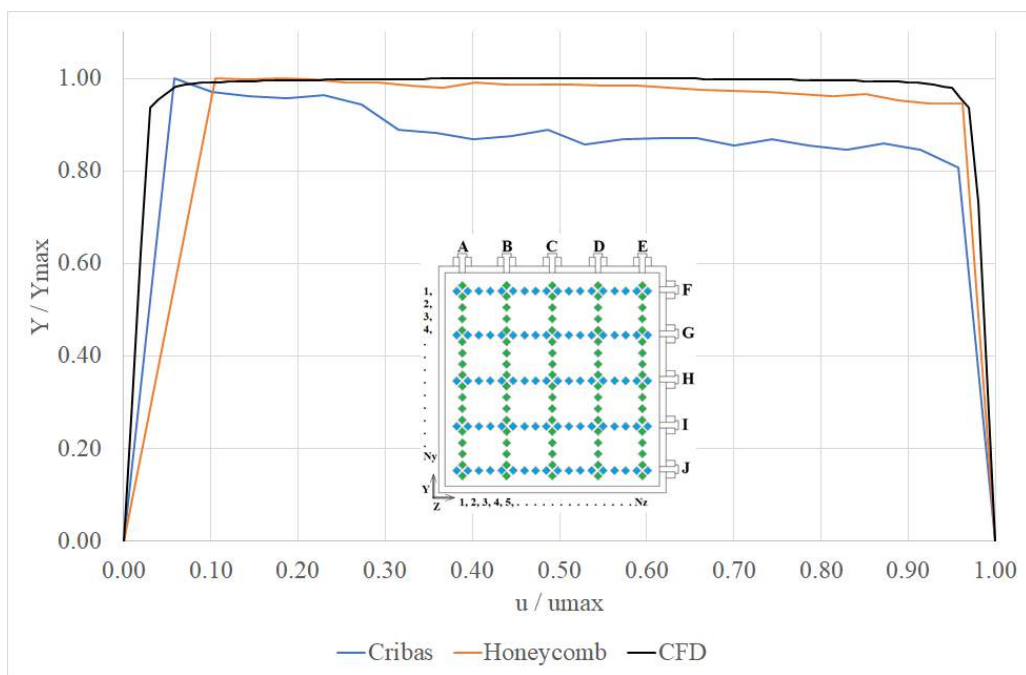


Figura 48.- Perfiles de velocidad sección C.

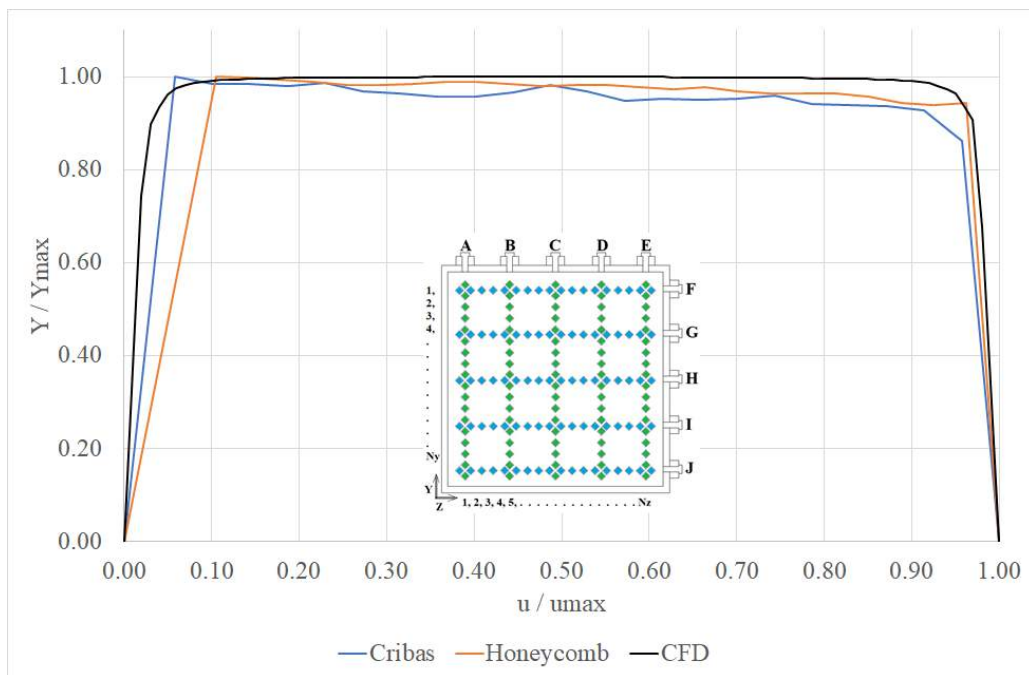


Figura 49.- Perfiles de velocidad sección D.

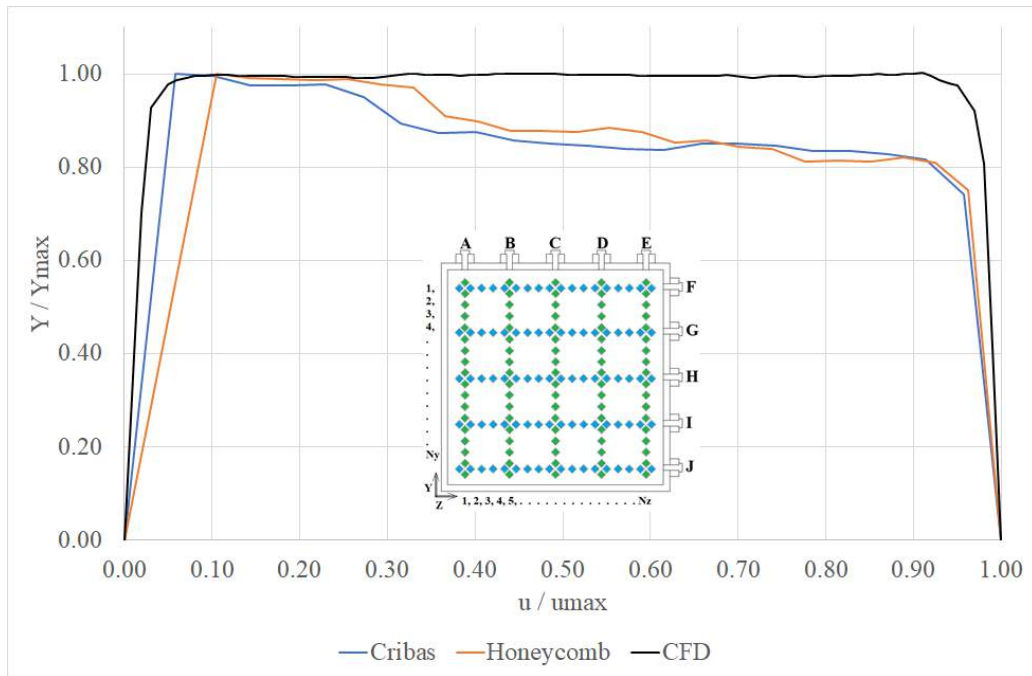


Figura 50. Perfiles de velocidad sección E.

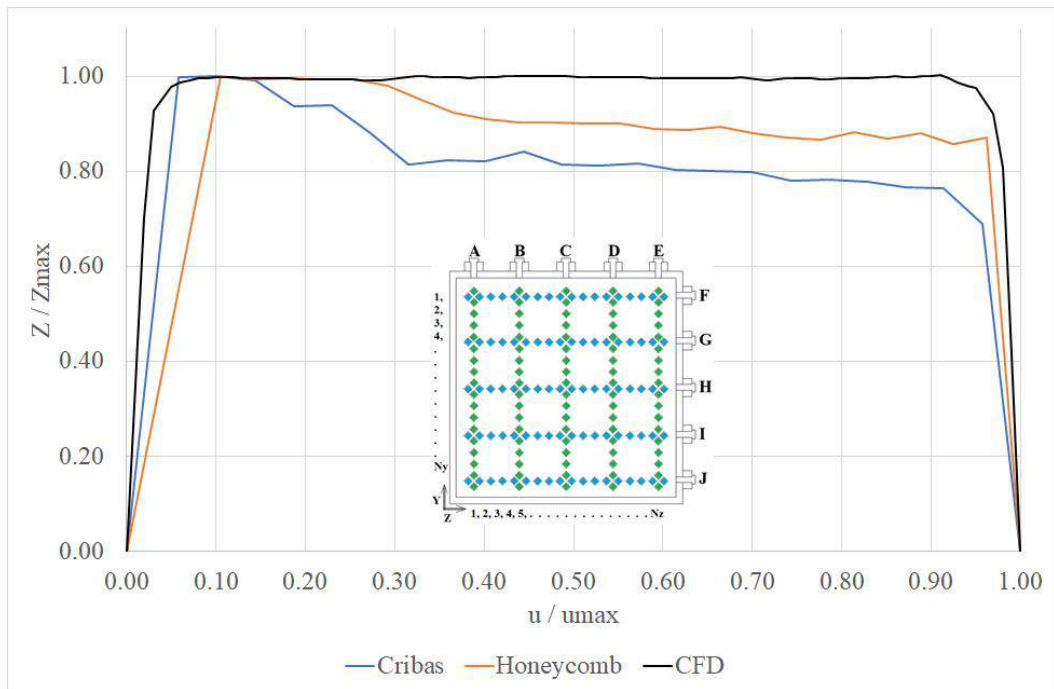


Figura 51. Perfiles de velocidad sección F.

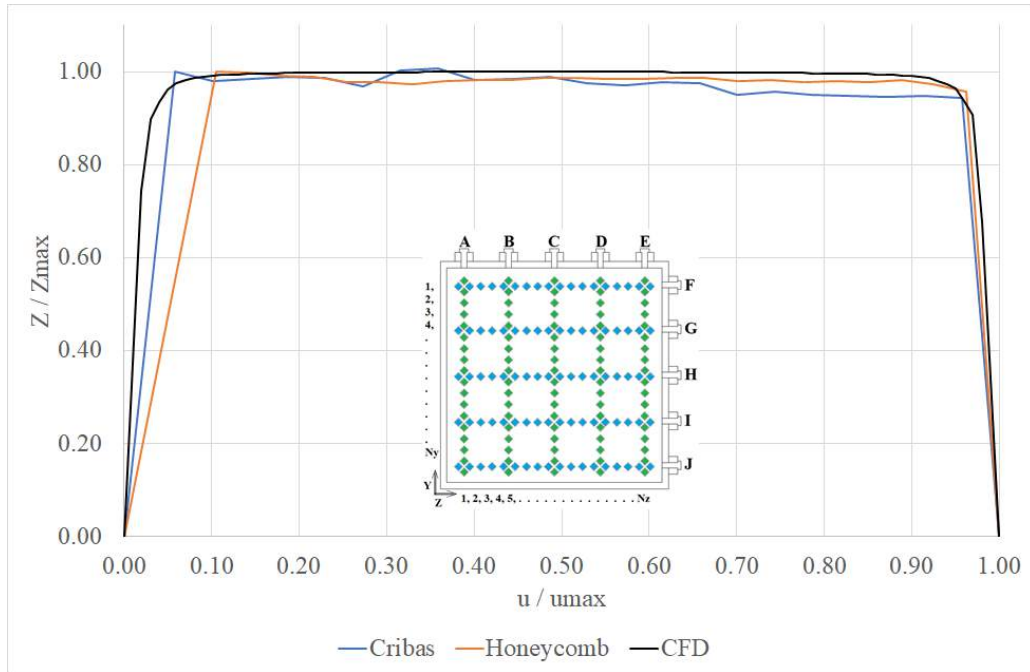


Figura 52. Perfiles de velocidad sección G.

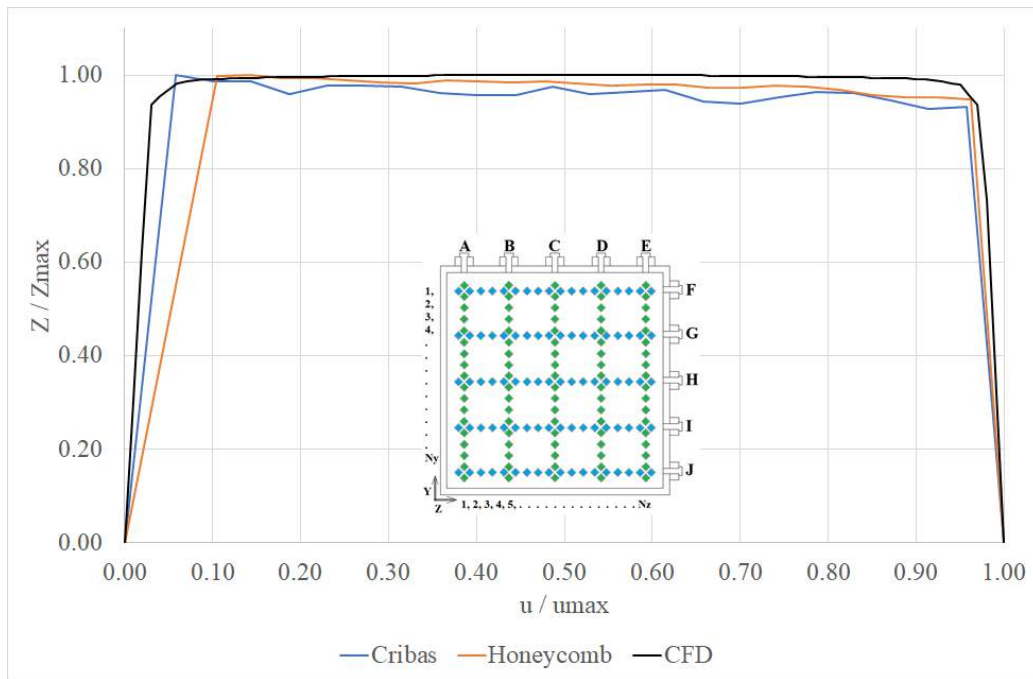


Figura 53. Perfiles de velocidad sección H.

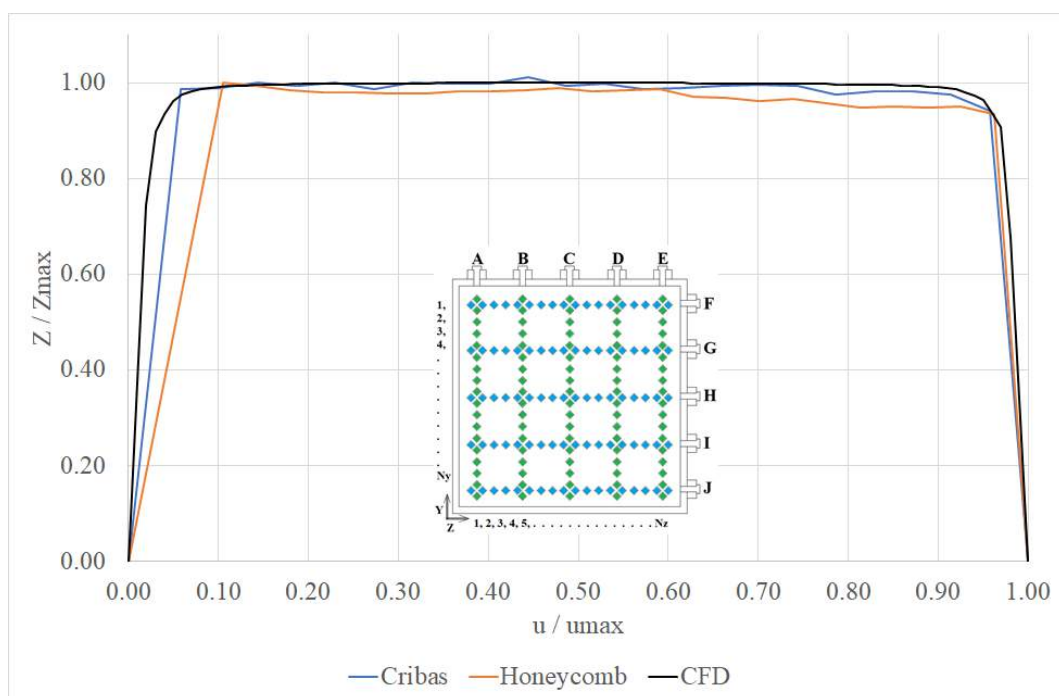


Figura 54. Perfiles de velocidad sección I.

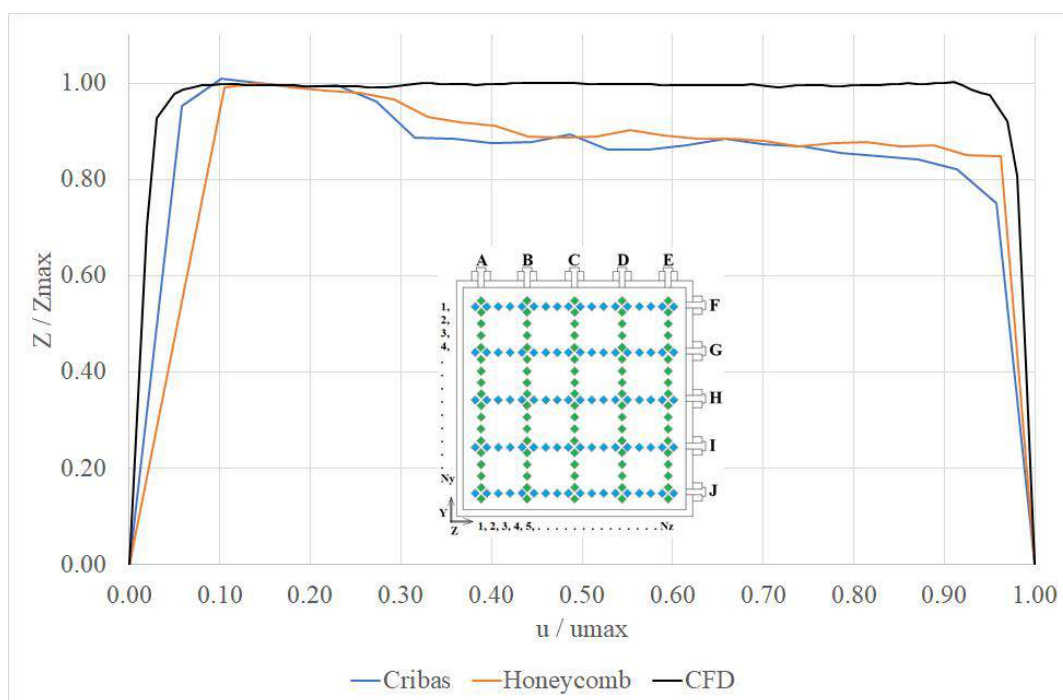


Figura 55. Perfiles de velocidad sección J.

Los perfiles de velocidad obtenidos en el túnel de viento subsónico del Instituto Politécnico Nacional [8] se presentan en la figura 57, y se observa un flujo uniforme y estable ya que se tiene una intensidad de turbulencia promedio menor al 1%, lo que demuestra la importancia de la combinación del honeycomb junto a las cribas en una cámara estabilizadora.

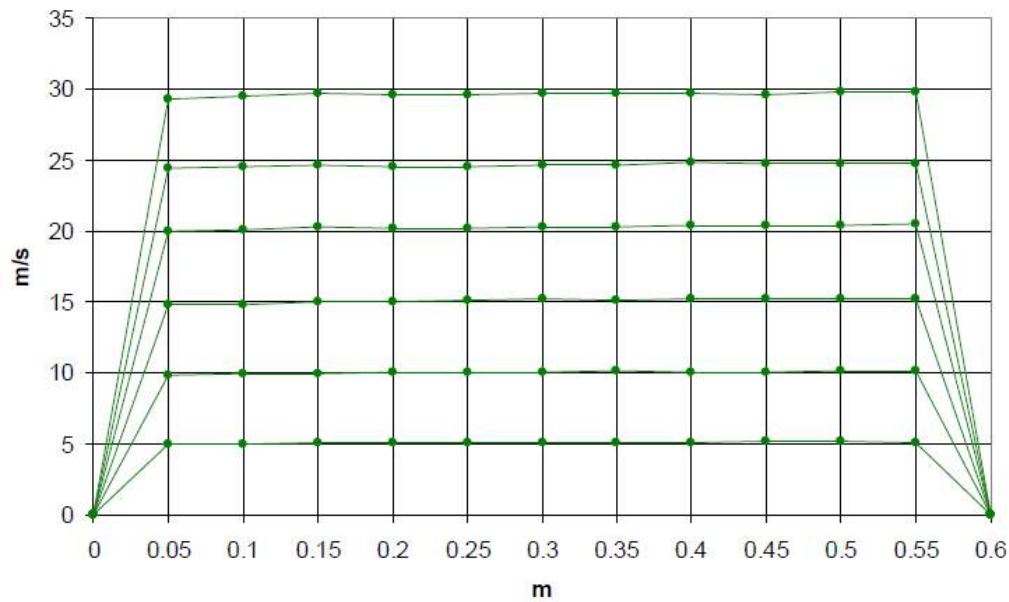


Figura 56. Perfiles de velocidad en túnel de viento del Instituto Politécnico Nacional.

Los perfiles de velocidad obtenidos en el túnel de viento subsónico de la Universidad de Ingeniería y Tecnología de Khulna en Bangladesh, diseñado por Arifuzzman y Mashud [9], se muestra en la figura 56, y presenta un flujo uniforme que abarca el 80% de la zona de pruebas, muy similar al obtenido en nuestra investigación.

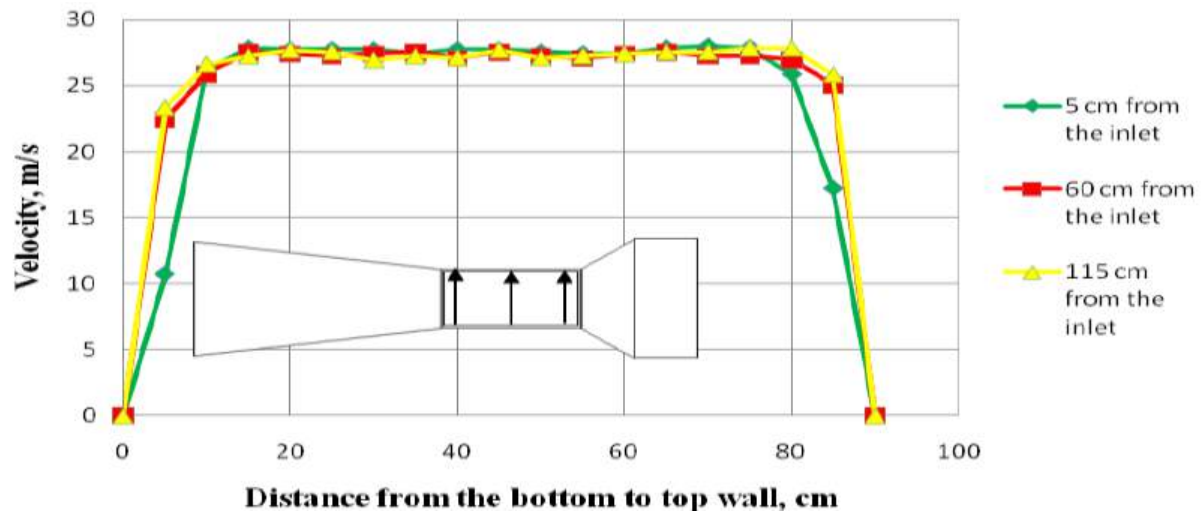


Figura 57. Perfiles de velocidad en túnel de viento de la Universidad de Khulna.

Conclusiones y Recomendaciones

*Se realizó un análisis numérico y experimental de los perfiles de velocidad en la zona de pruebas del túnel de viento de la FCITEC.

*La intensidad de la turbulencia en la zona de pruebas disminuyó en 3 puntos porcentuales en el centro de la zona de pruebas después del rediseño en la cámara estabilizadora para las lecturas en el eje Y.

*El honeycomb mejora las condiciones del flujo comparado con el uso de las mallas estabilizadoras.

*Se insertaron dos honeycomb en la cámara estabilizadora para la reducción de la intensidad de la turbulencia.

*La simulación numérica permite observar la tridimensionalidad del flujo y determinar cualitativa y cuantitativamente el comportamiento de los perfiles de velocidad cerca de las paredes.

**Insertar una sección más de honeycomb en la cámara estabilizadora para analizar su efecto en la determinación de la intensidad de la turbulencia.

**Colocar cuatro cribas posteriores a un solo honeycomb en la cámara estabilizadora para analizar su efecto en la determinación de la intensidad de la turbulencia.

**Sustituir el material de la cámara estabilizadora como acrílico o vidrio para analizar su efecto en el comportamiento del flujo.

*Repetir los experimentos utilizando otros sistemas de medición como hilo caliente o PIV para disminuir la incertidumbre en la medición.

Referencias

- [1] Loehrke R. and Nagib H., Control of free stream turbulence by means of honeycombs: a balance between suppression and generation, *Journal of Fluids Engineering*, pp. 342-351, 1976.
- [2] Chicas F., Diseño y construcción de un túnel de viento, Universidad Centroamericana Jose Simeon Cañas, Antiguo Cuscatlán, El Salvador, 2012.
- [3] Mehta R. and Bradshaw P., Design Rules For Small Low Speed Wind Tunnels, *The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society*, no. 718, pp. 443-449, 1979.
- [4] Lumley, J. and McMahon, J., Reducing Water Tunnel Turbulence by Means of a Honeycomb, *Journal of Basic Engineering*, TRANS. ASME, Series D, Vol. 89, p. 764, 1967.
- [5] Scheiman J., Considerations for the Installation of Honeycomb and Screens to Reduce Wind-Tunnel Turbulence, NASA Technical Memorandum 81868, 1981.
- [6] Schubauer G, Spangenberg W. and Klebanoff P., Aerodynamic Characteristics of Damping Screens. NACA TN 2001, 1950.
- [7] Loehrke R. and Nagib H., Experiments on Management of Free-Stream Turbulence. AGARD-R-598, Sept, 1972.
- [8] Rosas P., Caracterización del túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP, Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2010.
- [9] Arifuzzaman M. and Mashud M., Design Construction and Performance Test of a Low Cost Subsonic Wind Tunnel, *Journal of Engineering*, vol 2, no.1, pp. 83-92, 2012.
- [10] Morales O., Gómez. A., Paz J., Navarro J. y Barbosa J., Caracterización de túnel de viento subsónico de ECITEC-UABC, *Revista Ingenierías*, vol. XXI. no. 80. pp 6-20, 2018.
- [11] Barlow J., Rae W. and Pope A., Low speed wind tunnel testing, Ed. Jonh Wiley & Sons, INC. Third edition. pp. 90-91, 1999.
- [12] Peinado R., Sistema eléctrico y de control de potencia de un Túnel aerodinámico, Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2012.
- [13] The Gill Corporation, (2021), [Online] Available: <https://www.thegillcorp.com/>
- [14] Du Pont Kevlar, (2021), [Online] Available: <https://www.dupont.mx/brands/kevlar.html>
- [15] Dassault Systemes, (2021), [Online] Available: <https://www.solidworks.com/es>
- [16] ANSYS-Fluent, (2021), [Online] Available: <https://www.ansys.com/academic/students>
- [17] Morales O., Gómez A., Paz M., Paz J., y Ortega L., Diseño y construcción de túnel de viento subsónico para laboratorio de Aeroespacial de ECITEC-UABC, *Memorias del XXI congreso internacional anual de la SOMIM*, Veracruz, México, 2015.

- [18] Morales O., Estudio numérico experimental tridimensional del flujo laminar en un conducto rectangular con cambio de sección, Tesis de doctorado, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2011.
- [19] García J., Simulación Numérica de la dinámica del flujo alrededor de un tubo con aletas inclinadas a distintos ángulos, Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2006.
- [20] F. White, Viscous Fluid Flow, 2ª Edición, Ed. McGraw Hill, U.S.A., 1991.
- [21] Figliola S. y Beasley D., Mediciones Mecánicas Teoría y Diseño, 3ª Edición, Ed. Alfaomega, México, pp. 131-146, 2003.
- [22] Becerra S. y Guardado G., Estimación de la Incertidumbre en la Determinación de la Densidad del Aire, Centro Nacional de Metrología, Querétaro, pp. 1-23, 2003.
- [23] Davis, (2021), [Online] Available: www.davisnet.com
- [24] Extech, (2019), [Online] Available: www.extech.com

ANEXO

**PRODUCT DATA SHEET**

Gillcore® HK Honeycomb

DESCRIPTION

Gillcore® HK is a Kelvar® aramid fiber reinforced honeycomb which is coated with heat resistant phenolic resin. Kevlar® honeycomb cores exhibit enhanced performance characteristics over Nomex® honeycomb core in the areas of weight, strength, stiffness and fatigue. Gillcore® HK provides a wide range of honeycomb types, including different cell sizes, cell geometries, paper thicknesses and densities, for commercial, military, aerospace and defense applications.

APPLICATIONS

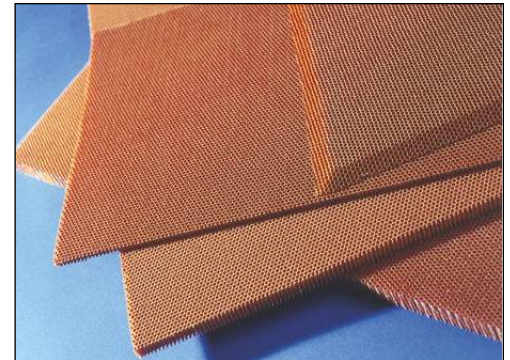
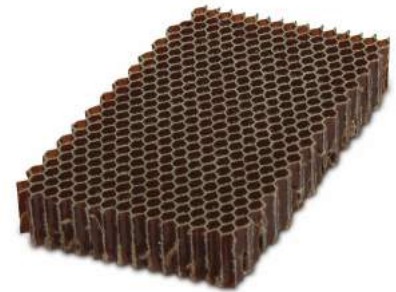
Interior aircraft panels including flooring, sidewalls, ceilings, galleys and lavatories.

Exterior aircraft panels including trailing and leading edges, flaps, ailerons, radomes, fairings, helicopter blades, access panels and doors.

Sports and leisure industry such as surfboards, dividing berthing areas, staterooms and hulls for high-performance boats and ships.

Ceilings, walls and floors of portable structures.

Heat formability for complex and contour components.

**FEATURES**

- Extremely high strength to weight ratio
- High toughness, shear strength and shear modulus
- Corrosion resistance
- Fire resistant (self-extinguishing)
- Excellent thermal stability
- Good formability for curve forming

AVAILABILITY

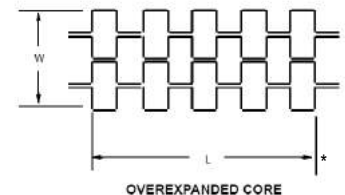
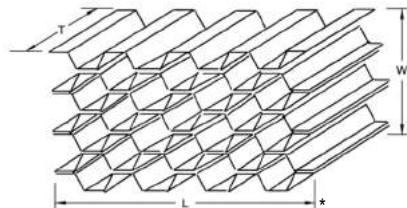
Hexagonal Shaped Core

L = Ribbon Dimension

W = Dimension normal to ribbon

T = Thickness dimension

* Per BMS 8-124 specification



Available in sheet form or block form

Direction/Configuration	Hexagonal Core	Hexagonal Core	Overexpanded Core
	Ribbon dimension as block width	Ribbon dimension as block length	
L (Ribbon dimension)	Typical 48 inch (1,219 mm) Maximum 65 inch (1,651 mm)	Maximum 96 inch (2,438 mm)	Maximum 50 inch (1,270 mm)
W (Dimension normal to ribbon)	Typical 96 inch (2,438 mm) Maximum 144 inch (3,658 mm)	Maximum 48 inch (1,219 mm)	Maximum 144 inch (3,658 mm)
Thickness	0.200 inch (5.08 mm) - 34 inch (864 mm)		

CONSTRUCTION

Reinforcement: Para-Aramid Kevlar® paper

Resin: Phenolic



SPECIFICATIONS

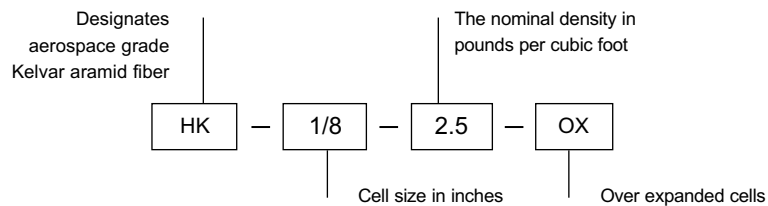
- Gillcore® Kevlar® honeycomb core is qualified to the following specifications:
 - Boeing BMS 8-124, Class 6, Type V, Grades 2.5, 3.0, 4.0, 6.0; and Type VI, Grade 2.5.
 - Airbus Industrie: AIMS 11-01-004 Grades D,F,P,T,W (ABS5341-A3,A5,C1,C5,C8).
 - Bell Helicopter: 299-947-386: Type 1, Grade A, Classes 2.0, 3.0, 4.5, and 6.0.
 - Northrop-Grumman: ACS-MRS-5301, Class 1, 1/8" cell, 6 pcf density.
 - Lockheed-Martin: 5PTMDL17-D
- Meets flammability requirements of FAR 25.853 for cabin interiors and FAR 25.855 for cargo interiors.

HEALTH PRECAUTIONS

This product is safe to use and apply when recommended precautions are followed. Before using this product, read and understand the Safety Data Sheet (SDS), which provides information on health, physical and environmental hazards, handling precautions and first aid recommendations. A SDS is available at <https://www.thegillcorp.com/msds.php>.

For industrial use only. Keep away from children. Additional information can be found at: www.thegillcorp.com. For sales and ordering information call 1-626-443-6094.

PERFORMANCE PROPERTIES, TYPICAL



The following tests are run in accordance with BMS 8-124 specification requirements.

Gillcore® HK Honeycomb Description	Gillcore® HK Honeycomb Configuration	Compressive				Plate Shear					
		Bare		Stabilized		L Direction			W Direction		
		Strength		Strength		Strength		Modulus	Strength		Modulus
		TYP	MIN	TYP	MIN	TYP	MIN	TYP	TYP	MIN	TYP
		psi	psi	psi	psi	psi	psi	ksi	psi	psi	ksi
HK-1/8-2.5	HK1061	288	240	321	297	272	248	16.7	156	147	7.9
HK-1/8-3.0	HK131	390	341	422	352	281	247	17.8	146	126	8.2
HK-1/8-3.0*	HK132	378	345	403	374	304	276	22.2	164	151	10.5
HK-1/8-4.0	HK141	578	480	628	589	362	337	21.0	206	196	9.7
HK-1/8-4.5	HK1033	744	693	764	711	555	527	30.9	305	289	13.4
HK-1/8-6.0	HK162	1,131	1,006	1,190	1,062	524	496	27.0	362	338	14.6
HK-1/8-6.0*	HK163	1,187	1,100	1,246	1,170	621	575	37.2	417	391	16.8
HK-5/32-2.5	HK2061	282	260	310	285	232	204	13.8	135	118	8.3
HK-5/32-6.0	HK262	1060	995	1163	1082	517	502	25.7	394	378	14.0
HK-3/16-2.0	HK322	323	290	356	336	322	290	18.9	169	155	8.9
HK-3/16-2.5-OX	HK3061O	208	179	217	186	152	138	7.4	148	130	11.5

*Made using thicker Kevlar® paper than the similar item above.



Gillcore® HK Honeycomb Description	Gillcore® HK Honeycomb Configuration	Cell Size	Density	Compressive				Plate Shear					
				Bare		Stabilized		L Direction			W Direction		
				Strength		Strength		Strength		Modulus	Strength		Modulus
				TYP	MIN	TYP	MIN	TYP	MIN	TYP	TYP	MIN	TYP
		mm	kg/m ³	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Gpa	Mpa	Mpa	Gpa
HK-1/8-2.5	HK1061	3.2	40	1.98	1.65	2.21	2.05	1.87	1.71	0.12	1.07	1.01	0.05
HK-1/8-3.0	HK131	3.2	48	2.69	2.35	2.91	2.43	1.94	1.70	0.12	1.01	0.87	0.06
HK-1/8-3.0*	HK132	3.2	48	2.60	2.38	2.78	2.58	2.09	1.90	0.15	1.13	1.04	0.07
HK-1/8-4.0	HK141	3.2	64	3.98	3.30	4.33	4.06	2.49	2.32	0.14	1.42	1.35	0.07
HK-1/8-4.5	HK1033	3.2	72	5.13	4.77	5.26	4.90	3.82	3.63	0.21	2.10	1.99	0.09
HK-1/8-6.0	HK162	3.2	96	7.79	6.93	8.20	7.32	3.61	3.42	0.19	2.49	2.33	0.10
HK-1/8-6.0*	HK163	3.2	96	8.18	7.58	8.58	8.06	4.28	3.96	0.26	2.87	2.69	0.12
HK-5/32-2.5	HK2061	4.0	40	1.94	1.79	2.14	1.97	1.60	1.41	0.10	0.93	0.81	0.06
HK-5/32-6.0	HK262	4.0	96	7.30	6.86	8.01	7.45	3.56	3.46	0.18	2.71	2.60	0.10
HK-3/16-2.0	HK322	4.8	32	2.23	2.00	2.45	2.32	2.22	2.00	0.13	1.16	1.07	0.06
HK-3/16-2.5-OX	HK3061O	4.8	40	1.44	1.23	1.50	1.28	1.05	0.95	0.05	1.02	0.90	0.08

*Made using thicker Kevlar® paper than the similar item above.

Flammability: Gillcore® HK honeycomb meets the flammability requirements of BMS 8-124.

Water migration: Gillcore® HK honeycomb does not exceed 1 cell migration in 24 hours when tested per BMS 8-124.

Figures shown reflect typical values and should not be used as design specifications.

All recommendations, statements, values and technical data herein are based on tests The Gill Corporation believes to be reliable and correct, but accuracy and completeness of said tests are not guaranteed and are not to be construed as a warranty, either expressed or implied. Users shall rely on their own information and tests to determine suitability of the product for the intended use and assume all risks and liability resulting from their use of the product. The Gill Corporation's sole responsibility shall be to replace that portion of the product that proves to be defective. The Gill Corporation will not be liable to the buyer or any third person for any injury, loss or damage directly or indirectly resulting from use of, or inability to use, the product. Recommendations or statements not contained in a written agreement signed by an officer of The Gill Corporation shall not be binding upon The Gill Corporation.

Gillcore® is a registered trademark of The Gill Corporation.