



**TEMA:**

***Análisis numérico-experimental de las capacidades de  
mezclado de un medio poroso en régimen turbulento***

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:**

***INGENIERO MECANICO.***

**PRESENTA:**

***Pasillas Gilbert Carla Yudith***

**Director de tesis:**

***Dr. Oscar Adrián Morales Contreras.***

**Co-Director de tesis:**

***Dr. Alejandro Alonzo García.***

***Enero de 2023***

# ÍNDICE

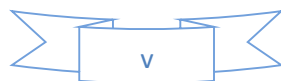
<b>Introducción.</b>	<b>viii</b>
<b>Objetivo</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo I: Estado del arte.</b>	<b>2</b>
<b>Capítulo II: Metodología numérica.</b>	<b>25</b>
<b>Capítulo III: Metodología experimental.</b>	<b>31</b>
<b>Capítulo IV: Resultados numéricos y experimentales.</b>	<b>38</b>
<b>Conclusiones.</b>	<b>54</b>
<b>Referencias.</b>	<b>55</b>
<b>Anexos: Tutorial secuencia numérica.</b>	<b>58</b>

# Índice de Figuras y Tabla

Figura 1.- Modelo físico: a) arreglo medio poroso, b) dominio computacional [11].	4
Figura 2.- Arreglos 3D: a) cubo SC-C, b) esfera SC-S, c) elipse SC-E, d) esfera BC-S [11].	5
Figura 3.- Validación de caída de presión comparado con Kuwahara [11].	5
Figura 4.- Distribución líneas de corrientes en arreglos SC con $\emptyset=0.7$ y $Re_p=10^5$ para (a) cubo SC-C, (b) esfera SC-S y (c) elipse SC-E [11].	6
Figura 5.- a) Mapas de velocidad y b) vorticidad en medios porosos [12].	8
Figura 6.- Mapas de vorticidad en medio poroso extendido [12].	9
Figura 7.- Representación de medios porosos: (a) arreglo periódico de cilindros cuadrados, y (b) volumen elemental representativo [13].	10
Figura 8.- Líneas de corriente para medios de baja porosidad [13].	11
Figura 9.- Líneas de corriente para medios de alta porosidad [13].	12
Figura 10.- Diseño de medio poroso [16].	13
Figura 11.- Modelo experimental [16].	14
Figura 12.- Resultados obtenidos con PIV [16].	15
Figura 13.- Vista lateral de Túnel de viento de la FAU/UFRJ [17].	16
Figura 14.- Vista frontal de Túnel de viento (izq) y obstáculos generadores de turbulencia.	17
Figura 15.- Maquetas de Copacabana (Izq) e Ipanema (der) [17].	17
Figura 16.- Visualización en forma de U (a), retirada de bloque (b) y rotación de bloque lateral (c) [17].	18
Figura 17.- Trayectorias de flujo de viento sobre las maquetas [17].	20
Figura 18.- Permeámetros de carga constante [17].	21
Figura 19.- Esquema de medio poroso con variación de la DR.	26
Figura 20.- Medio poroso con DR 0.6 y a) $\emptyset=0.3$ y b) $\emptyset=0.6$ . Note que $H_2>H_1$ .	27
Figura 21.- Representación geométrica del medio poroso y posicionamiento de trazadores y puntos de muestreo, adaptada de la Ref. [18].	30
Figura 22.- Impresión de prototipo de medio poroso.	32
Figura 23.- Ensamble de modelo poroso.	33

Figura 24.- Especificaciones geometricas para medio poroso con $\varnothing=0.8$ y $DR=0.6$ .	33
Figura 25.- Instalacion experimental en tunel de viento de la FCITEC.	35
Figura 26.- Estructura de caja de luz.	35
Figura 27.- Manufactura de caja de luz.	36
Figura 28.- Caja de luz instalada en el túnel de viento de la FCITEC.	36
Figura 29.- Generador de humo AEROTECH®.	37
Figura 30.- Prototipo de modelo poroso e inyector de humo instalados en zona de pruebas.	38
Figura 31.- Tiempo de mezclado para caso con $\varnothing=0.3$ .	39
Figura 32.- Tiempo de mezclado para caso con $\varnothing=0.4$ .	40
Figura 33.- Tiempo de mezclado para caso con $\varnothing=0.5$ .	40
Figura 34.- Tiempo de mezclado para caso con $\varnothing=0.6$ .	41
Figura 35.- Tiempo de mezclado para caso con $\varnothing=0.7$ .	41
Figura 36.- Tiempo de mezclado para caso con $\varnothing=0.8$ .	42
Figura 37.- Vectores de velocidad para $\varnothing=0.6$ y $DR=0.6$ .	43
Figura 38.- Vectores de velocidad para $\varnothing=0.6$ y $DR=0.8$ .	43
Figura 39.- Vectores de velocidad para $\varnothing=0.4$ y $DR=0.8$ .	44
Figura 40.- Concentracion adimensional para $\varnothing=0.8$ .	45
Figura 41.- Ejemplo de linea de muestreo para perfiles de velocidad.	46
Figura 42a).- Perfiles de velocidad para $\varnothing=0.4$ .	47
Figura 42b).- Perfiles de velocidad para $\varnothing=0.8$ .	47
Figura 42c).- Perfiles de velocidad obtenidos por Larsson [16].	48
Figura 43.- Pathlines de velocidad para caso con $DR=0.6$ y $\varnothing=0.8$ .	49
Figura 44.- Visualización de flujo en prototipo con $\varnothing=0.8$ y $DR=0.6$ para $t=1$ .	49
Figura 45.- Visualización de flujo en prototipo con $\varnothing=0.8$ y $DR=0.6$ para $t=2$ .	50
Figura 46.- Visualización de flujo en prototipo con $\varnothing=0.8$ y $DR=0.6$ para $t=3$ .	50
Figura 47.- Visualización de flujo en prototipo con $\varnothing=0.8$ y $DR=0.6$ para $t=4$ .	51
Figura 48.- Visualización de flujo en prototipo con $\varnothing=0.8$ y $DR=0.6$ para $t=5$ .	51
Figura 49.- Visualización de flujo en prototipo con $\varnothing=0.8$ y $DR=0.6$ para $t=6$ .	52
Figura 50.- Visualización de flujo en prototipo con $\varnothing=0.8$ y $DR=0.6$ para $t=7$ .	52
Figura 51.- Visualización de flujo en prototipo con $\varnothing=0.8$ y $DR=0.6$ para $t=8$ .	53
Figura 52.- Visualización de flujo en prototipo con $\varnothing=0.8$ y $DR=0.6$ para $t=9$ .	53

Figura 53.- Visualización de flujo en prototipo con $\varnothing=0.8$ y $DR=0.6$ para $t=10$ .	54
Figura 54.- Visualización de flujo en prototipo con $\varnothing=0.8$ y $DR=0.6$ para $t=11$ .	54
Figura 55.- Visualización de flujo en prototipo con $\varnothing=0.8$ y $DR=0.6$ para $t=12$ .	55
Tabla 1.- Propiedades del trazador.	29



# DEDICATORIA

A mi madre quien con su amor, paciencia y esfuerzo me ha permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A mi esposo e hijo por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional.

A mis hermanos por estar conmigo en todo momento gracias. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

# AGRADECIMIENTOS

En estas líneas quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible esta investigación y que de alguna manera estuvieron conmigo en los momentos difíciles, alegres, y tristes. Estas palabras son para ustedes. A mi familia por todo su amor, comprensión y apoyo, pero sobre todo gracias infinitas por la paciencia que me han tenido. No tengo palabras para agradecerles las incontables veces que me brindaron su apoyo en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida.

De igual forma, agradezco a mi Director de Tesis, Dr. Oscar Adrián Morales Contreras, que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo. A los Profesores que me han visto crecer como persona, y gracias a sus conocimientos hoy puedo sentirme dichosa y contenta.

# Introducción

Para la comprensión del comportamiento del flujo en medios porosos se utiliza la herramienta de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para validar estos análisis se realizan experimentos utilizando técnicas como Velocimetría de imágenes por partículas (PIV) o Laser Doppler, las cuales permiten complementar el análisis cuantitativo y cualitativo del flujo turbulento en el interior de las cavidades de estos modelos, sin embargo, la experimentación generalmente reporta resultados para flujo laminar y pocas configuraciones de medios porosos.

En esta investigación se trata el flujo turbulento en un medio poroso utilizando las técnicas de CFD mediante el software de ANSYS-Fluent® y Visualización de flujo con humo en el túnel de viento de la Facultad de Ciencias de la ingeniería y Tecnología (FCITEC). Las relaciones de diámetros (DR) cubiertas para el análisis numérico fueron 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 a las cuales se les asignó una porosidad ( $\emptyset$ ) de 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 y 0.8, dando un total de 24 casos estudiados con la técnica de CFD. Para el caso del análisis experimental se estudió un solo caso debido a la complejidad de la aplicación de la técnica. El número de Reynolds se determinó en función del diámetro más grande (D) del medio poroso y la velocidad Darciana ( $U_D$ ).

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

Capítulo I se detalla el estado del arte del estudio en medios porosos utilizando técnicas numéricas y experimentales en túnel de viento.

Capítulo II se describe la metodología numérica seguida para el análisis del flujo al interior de los medios porosos utilizando ANSYS-Fluent.

Capítulo III se explica el proceso de visualización de flujo utilizando la técnica de humo en túnel de viento subsónico de la FCITEC.

Capítulo IV se analizan los resultados obtenidos experimental y numéricamente del flujo turbulento en medio poroso.

Anexo en el que se muestra el procedimiento de selección del trazador en el software Fluent®.

## **Objetivo.**

Estudiar numéricamente las capacidades de dispersión de cuatro modelos distintivos de poro en los cuales se varían tanto las porosidades ( $\emptyset$ ) como las relaciones de diámetro (DR), y evaluar experimentalmente el comportamiento del flujo en un medio poroso para un caso específico.

### **Objetivos particulares.**

\*Caracterizar numéricamente los tiempos de mezclado del flujo en medios porosos en función tanto de la porosidad como del arreglo geométrico, utilizando ANSYS-Fluent®.

\*Implementar la metodología experimental de visualización con humo para captar los vórtices de un flujo turbulento en el seno de un medio poroso.

## Capítulo I: Estado del arte

El análisis de los patrones de flujo turbulento es importante en diversos dispositivos de ingeniería. Esto es debido a que potencian los fenómenos de transferencia de calor, mezclado, promueven las reacciones químicas, etc. En relación con la ingeniería ambiental, muchos fenómenos de flujo turbulento ocurren en el seno de un medio poroso. Ejemplos de esto son: catálisis, transporte de contaminantes en suelo, movimiento de contaminantes en medios urbanos, mezcladores estáticos e intercambiadores de calor. Para estudiar el transporte de flujo a través de estos medios porosos se utiliza la dinámica de fluidos computacionales (DFC) y entre las opciones viables que ofrece, la simulación numérica directa resulta la técnica más poderosa para modelar el flujo turbulento. Esta técnica, es capaz de resolver la mayor parte del espectro existente de los modelos turbulentos, tanto espacial como temporalmente. Sin embargo, dado a que las escalas de disipación más pequeñas exigen altas resoluciones espacial y temporal, los estudios de simulación numérica directa se basan en el uso de supercomputadoras y se han centrado en el rango inferior del régimen turbulento ( $Re > 5000$ ) [1].

Una alternativa menos costosa computacionalmente es la Simulación de Grandes Remolinos (LES, por sus siglas en inglés). Esta técnica, resuelve los remolinos más grandes de forma directa, asumiendo que estos poseen la mayor cantidad de la energía cinética de flujo. A su vez, los remolinos más pequeños son modelados mediante cierto modelo a escala de submalla (modelo SGS), usualmente bajo consideraciones de turbulencia isotrópica [2]. Sin embargo, para estudios que involucran múltiples casos, los requerimientos computacionales de la técnica LES siguen siendo altos no solo en tiempo de procesamiento, sino de post-procesado. Por ejemplo, una simulación con una estación de trabajo convencional (Ej. 32 Gb de RAM y un procesador Intel i7 a 2.8 GHz) puede llevar 3 semanas ininterrumpidas y, adicionalmente se requiere un post-procesamiento de las cantidades instantáneas para proporcionar valores promedio. En este sentido los modelos de Navier-Stokes promediados por Reynolds (RANS) se han aplicado en estudios paramétricos de medios porosos y han mostrado concordancia razonable con resultados obtenidos mediante DNS y LES [3–5], pero sin la necesidad de grandes recursos

computacionales. Este enfoque considera los efectos de las fluctuaciones turbulentas de manera promedio mediante la aplicación de ecuaciones de transporte adicionales para la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y otra para su tasa de disipación ( $\varepsilon$ ), los cuales son conocidos como los modelos  $k$ - $\varepsilon$ . Al utilizar este procedimiento de promediado temporal, los términos de velocidad fluctuante son usados para obtener el tensor de esfuerzos de Reynolds, el cual luego es modelado utilizando una formulación de viscosidad de remolino [6]. En medios porosos, comúnmente se espera que estos modelos arrojen resultados insatisfactorios en las regiones cercanas a las paredes debido a que sus formulaciones no consideran la rápida atenuación de la velocidad en las zonas cercanas a la subcapa viscosa [7]. Para remediar esta deficiencia, se corrigen los modelos RANS originales aplicando funciones de amortiguamiento en los términos de producción y destrucción en la ecuación de transporte de  $\varepsilon$ , así como en la viscosidad turbulenta ( $\nu_t$ ). Dichas versiones modificadas son conocidas como modelos de turbulencia de bajo número de Reynolds (LRN por sus siglas en inglés). Para desarrollar modelos de turbulencia macroscópica de medios porosos repetitivos, por practicidad, las ecuaciones son resueltas en elementos representativos de volumen (ERV), discretizados cuidadosamente y asumiendo periodicidad traslacional. La viabilidad de la simulación de la turbulencia al usar este enfoque ya ha sido confirmada en trabajos orientados a estructuras porosas compuestas de arreglos de cilindros cuadrados, fibras, lechos empacados, partículas esféricas, etcétera [8–11]. En estos trabajos, se han reportado diversas correlaciones entre el gradiente macroscópico de presión (MPG),  $k$  y  $\varepsilon$  como funciones de la porosidad ( $\emptyset$ ) y la geometría de las partículas en dominios porosos homogéneos compuestos de partículas de mismo diámetro. Algunas investigaciones recientes que tratan medios porosos se mencionan a continuación.

Yang et. al. [11] investigo un medio poroso bajo consideración que está formado por una matriz ordenada periódicamente de partículas 3D, como se muestra en la figura 1a.

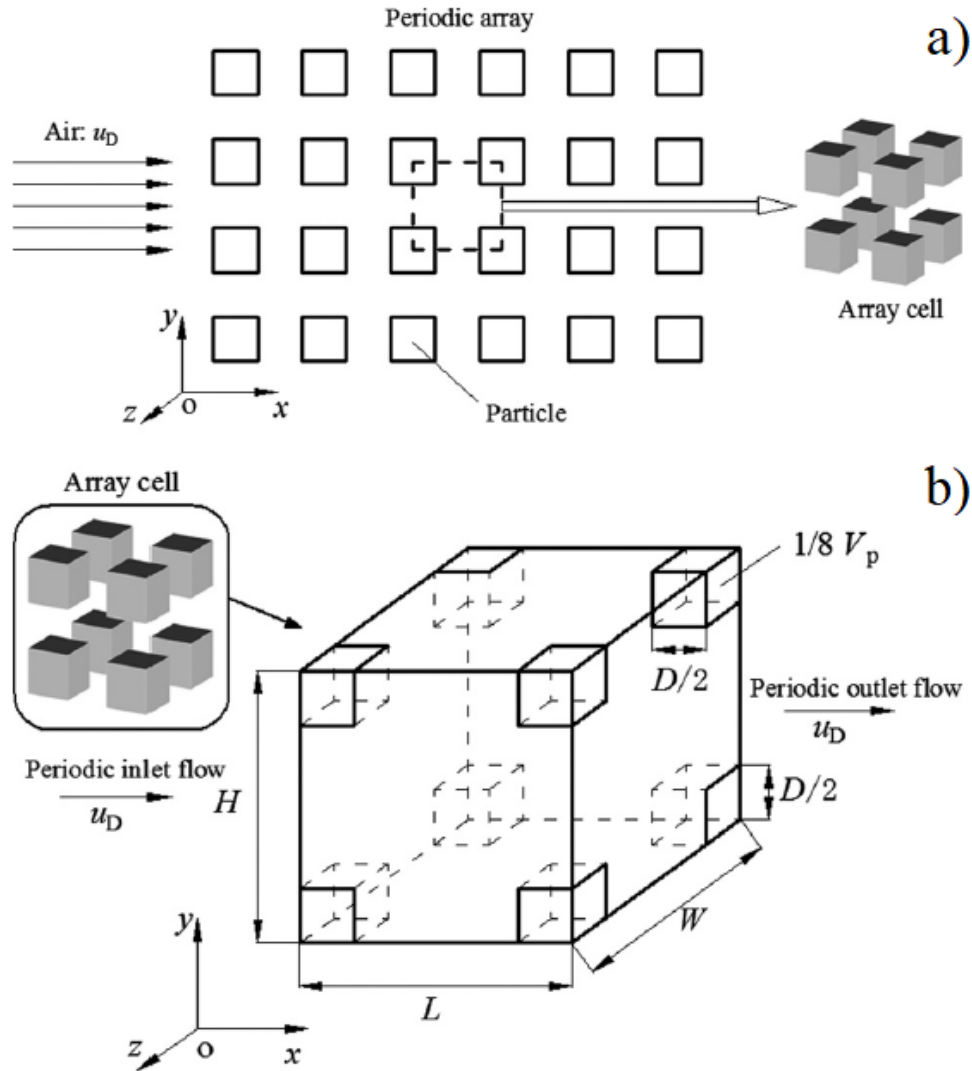


Figura 1.- Modelo físico: a) arreglo medio poroso, b) dominio computacional [11].

Debido a la simetría (en las direcciones  $y$ - $z$ ) y periodicidad (en la dirección  $x$ ) del modelo, solo se elige una celda de matriz estructural con dimensiones de  $L(x) \times H(y) \times W(z)$  como el dominio computacional que se muestra en la figura 1(b), donde se considera flujo turbulento microscópico en el interior completamente desarrollado. Yang investiga dos tipos diferentes de celdas de matriz estructural [cúbica simple (SC) y cúbica centrada en el cuerpo (BC)] y tres tipos de formas de partículas (cúbicas, esféricas y elipsoidales) los cuales se muestran en la figura 2. Los resultados numéricos de la caída de presión se comparan con obtenidos experimentalmente por Kuwahara y se muestran en la figura 3, la diferencia máxima entre ambos casos fue del 7%.

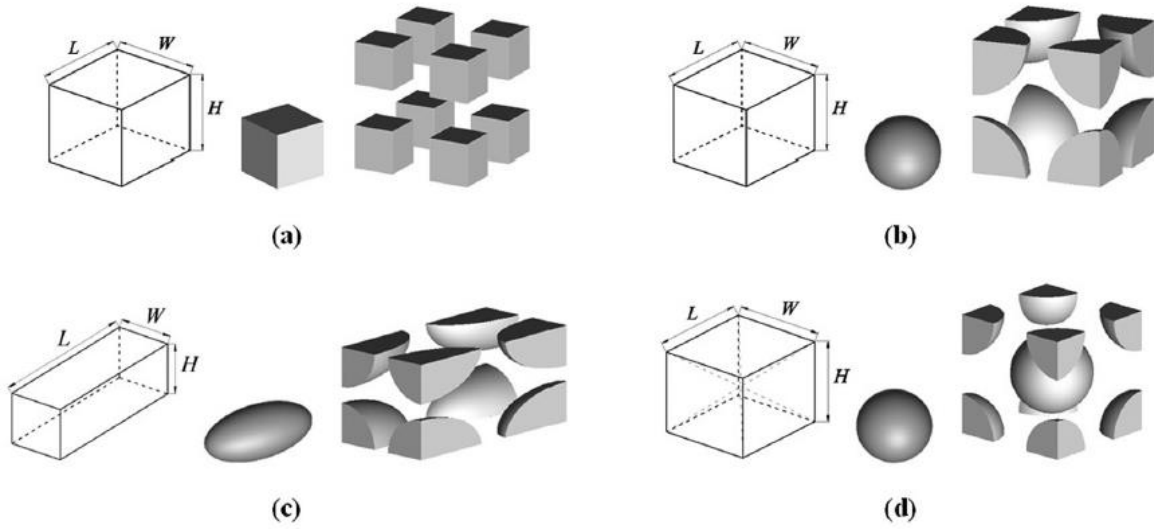


Figura 2.- Arreglos 3D: a) cubo SC-C, b) esfera SC-S, c) elipse SC-E, d) esfera BC-S [11].

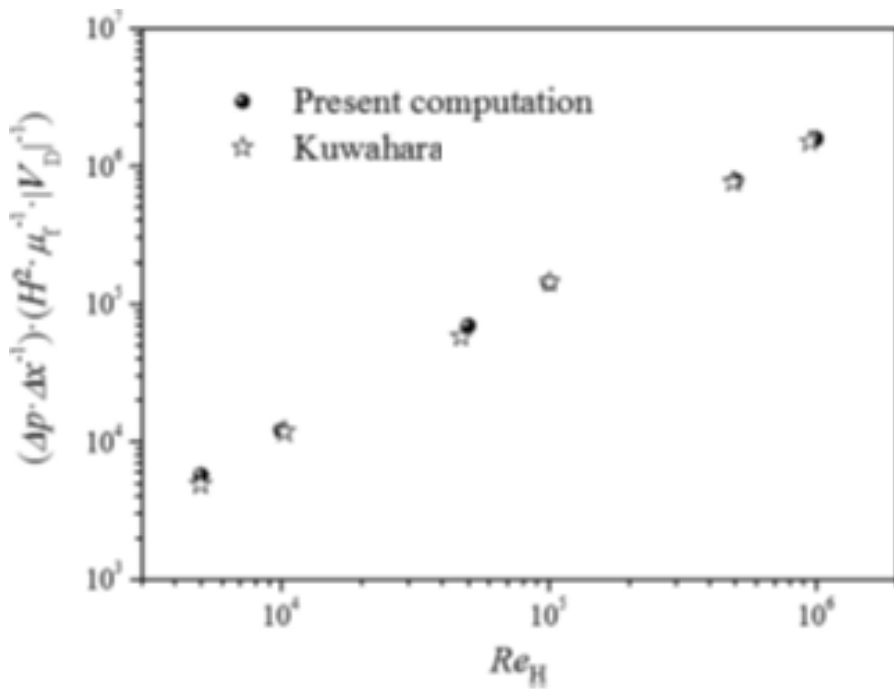


Figura 3.- Validación de caída de presión comparado con Kuwahara [11].

En la figura 4 se muestran las distribuciones típicas de línea de corriente local en diferentes arreglos con  $\phi=0.7$  y  $Re_p=10^5$ . Se aprecia que el flujo se acelera alrededor de las partículas y se separa del lado de aguas abajo, también vórtices 3D y estelas se forman entre las partículas y la forma de los vórtices son diferentes para cada tipo de partículas.

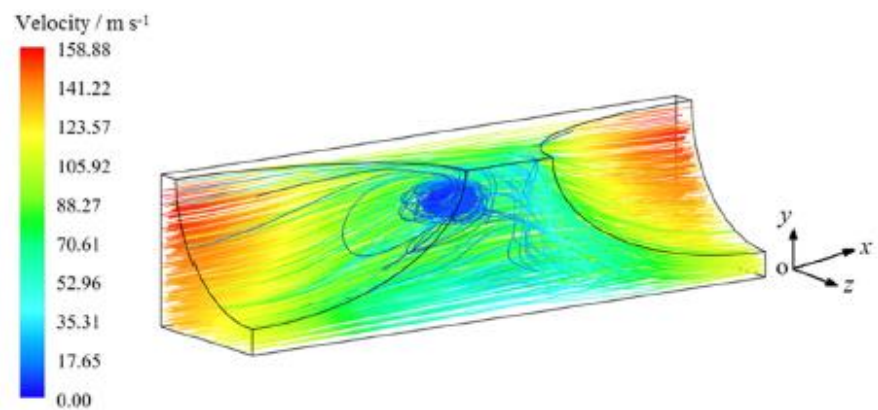
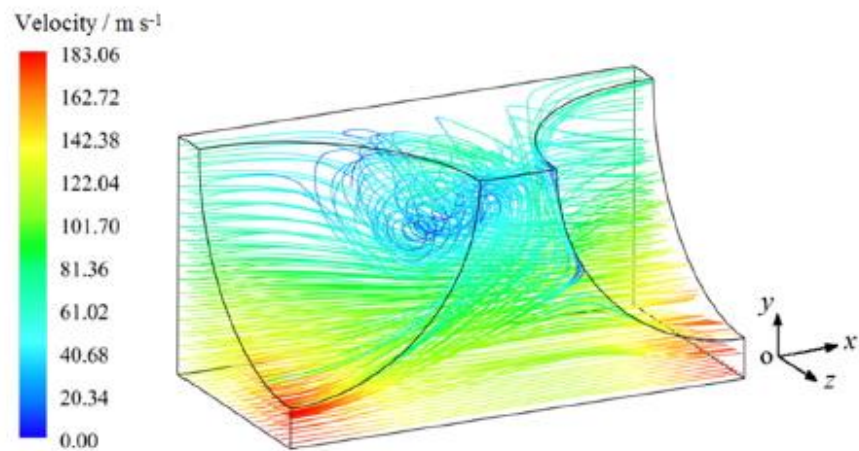
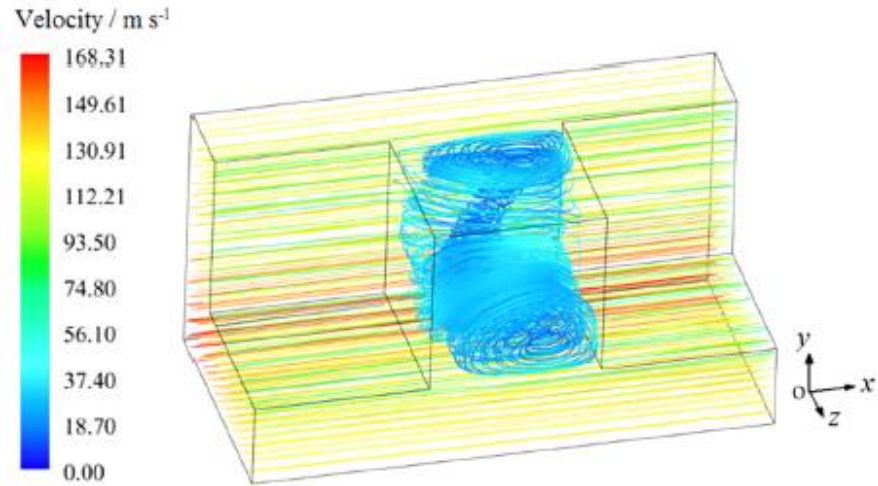


Figura 4.- Distribución líneas de corrientes en arreglos SC con  $\phi=0.7$  y  $Re_p=10^5$  para  
(a) cubo SC-C, (b) esfera SC-S y (c) elipse SC-E [11].

La investigación de Alonzo et. al. [12] presenta un estudio comparativo de los resultados del análisis de flujo turbulento en medios porosos utilizando diferentes modelos de turbulencia de bajo número de Reynolds (LRN) los cuales son: Abe–Kondoh–Nagano (AKN), Lam–Bremhorst, Yang–Shih,  $k-\epsilon$  y  $k-\omega$ . El medio poroso que representa condiciones en el que la trayectoria del flujo cambia rápidamente, se definió como una matriz infinita de cilindros cuadrados para explorar el efecto del tamaño de la partícula en la expansión y contracción de las trayectorias de flujo, la relación de diámetro ( $DR=d/D$ ) de los cilindros cuadrados se varió sistemáticamente de 0.2 a 0.8. El número de Reynolds ( $Re_D$ ) cubría un rango turbulento de 500 a 50000, y la porosidad ( $\phi=1-((D^2+3d^2)/H^2)$ ) varió de 0.27 a 0.8. Los resultados muestran que el modelo AKN produce mejores predicciones de los parámetros de flujo de volumen promedio porque es más adecuado para reproducir zonas de recirculación. Para todos los DR, a una alta  $\phi$  las distancias entre paredes son altas y las velocidades intersticiales son bajas lo que provoca la creación de estelas, y las pérdidas de energía por fricción son moderadas. A medida que el flujo se junta las estelas se suprimen y se interrumpen, por lo que  $k$  y  $\epsilon$  aumentan debido a las interacciones de las capas de corte y las fuerzas de fricción. Patrones distintivos de recirculación de baja velocidad aparecen dentro de los poros dependiendo de la relación de diámetros.

Para investigar las estructuras de flujo dentro de los medios porosos se utilizan mapas de contorno de la velocidad media adimensional y vorticidad obtenidos para diferentes valores de DR para flujo turbulento las cuales se presentan en la figura 5a y 5b respectivamente. En el valor DR más bajo, se aprecian dos corrientes de alta velocidad bien definidas con una velocidad máxima de 2.8 en la parte superior e inferior del cuadrado grande. Para los dominios correspondientes a  $DR=0.6$  y  $0.8$ , la velocidad máxima aumentó por un factor de aproximadamente dos, debido a que el confinamiento del flujo aumenta. En los canales de flujo vertical superior e inferior entre los cilindros pequeños las velocidades de flujo son bajas. Curiosamente, la velocidad exhibió un comportamiento muy diferente en el caso base en comparación con los otros arreglos, porque la corriente de flujo principal incide directamente sobre el cilindro cuadrado de mayor dimensión. Debido a la interacción entre las paredes y el flujo de la corriente principal aparecieron estructuras de vórtices distintivas. Para la configuración  $DR=0.2$ , aparecen dos capas de corte simétricas y bien definidas de

alta vorticidad detrás de los cilindros más pequeños, sin embargo, no hubo puntos importantes de alta vorticidad entre el cilindro principal y los dos más pequeños cuando se tiene  $DR=0.6$  donde esta alcanza las 100 unidades. Con el valor  $DR$  de 0.8 y la porosidad más baja, la vorticidad aumentó hasta 200.

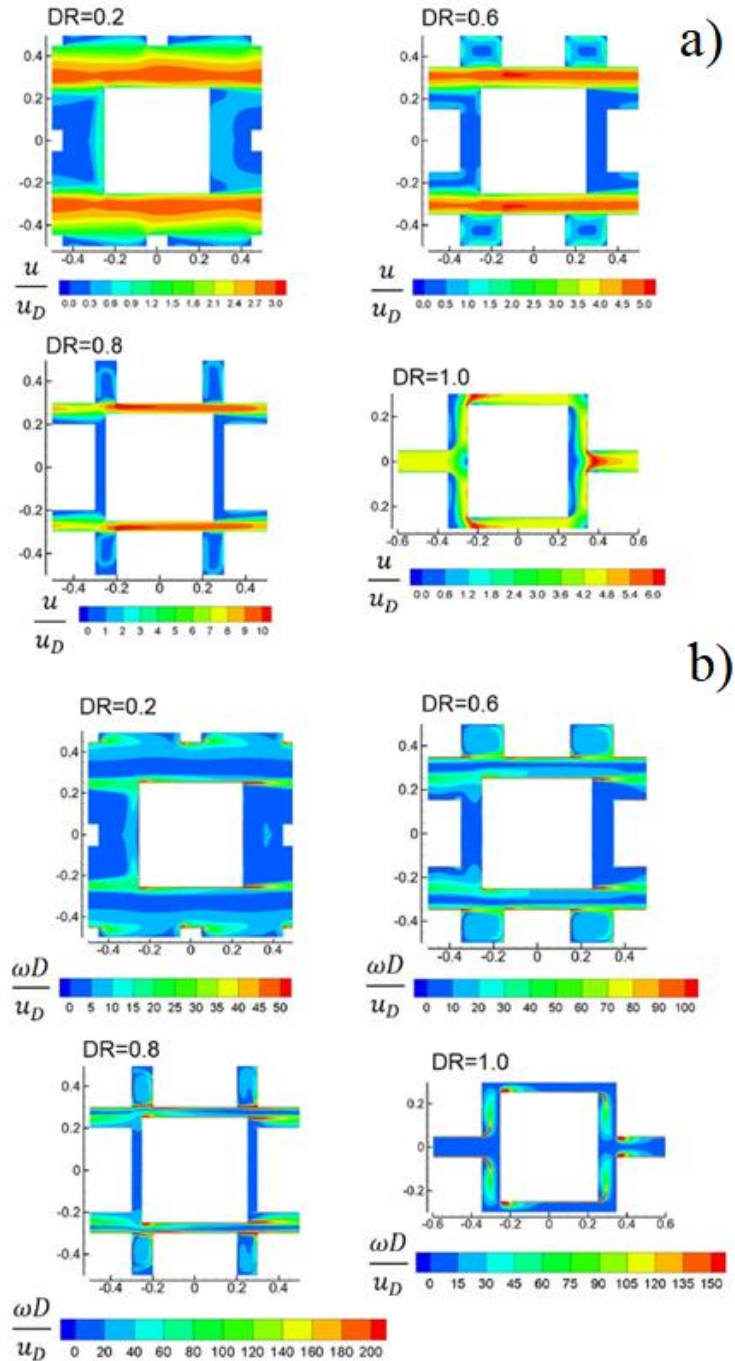


Figura 5.- a) Mapas de velocidad y b) vorticidad en medios porosos [12].

Para verificar la validez de las regiones de vórtices atrapadas dentro de los espacios superior e inferior, se realizó una simulación usando un dominio computacional cuatro veces mayor al que originalmente se realizó para  $DR=0.6$  y  $\text{poro}=0.48$ , el cual se muestra en la figura 6, y se encontró que los resultados son casi idénticos.

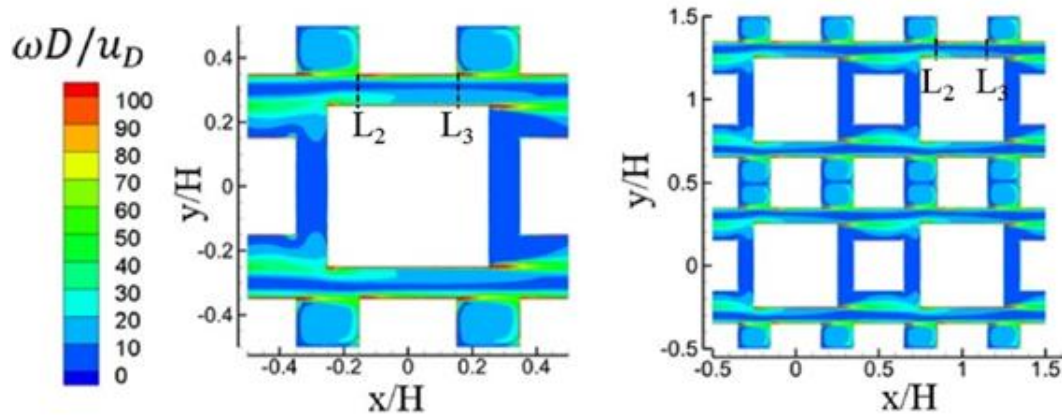


Figura 6.- Mapas de vorticidad en medio poroso extendido [12].

Otra investigación que se enfoca en el flujo en un medio poroso es la realizada por Kundu et al. [13] quien menciona que un medio poroso contiene pequeños espacios abiertos y huecos que se supone están distribuidos por toda una matriz sólida. La estructura de los poros se puede describir por el tamaño, conectividad de los poros y su forma las cuales pueden ser cuadrada, esférica, cúbica, elíptica, etc., aunque los detalles de las estructuras porosas reales generalmente no se conocen. Este hace que el modelado y simulación del comportamiento del flujo poroso sea difícil. En su estudio Kundu presenta un medio poroso formado por un arreglo periódico infinito de cilindros cuadrados, cuyo modelo físico se muestra en la figura 7 que muestra la representación de un cuadrado 2D de un volumen elemental representativo (REV) que consta de una fase sólida saturada con un flujo continuo de un líquido newtoniano.

Los cálculos se realizaron utilizando la ecuación de transporte basadas en el valor absoluto de la velocidad Darciana ( $U_D$ ) y la distancia longitudinal de centro a centro  $2H$  como escala de referencia. El Reynolds se varió desde 100 hasta 40000 utilizando como longitud característica el diámetro del poro. La porosidad del dominio se determinó con la ecuación

$\emptyset = [1 - (D/H)^2]$ , donde H es la distancia vertical de centro a centro de cilindro cuadrado, el valor varío de 0.4 a 0.84, y la porosidad de 0.3 a 0.84.

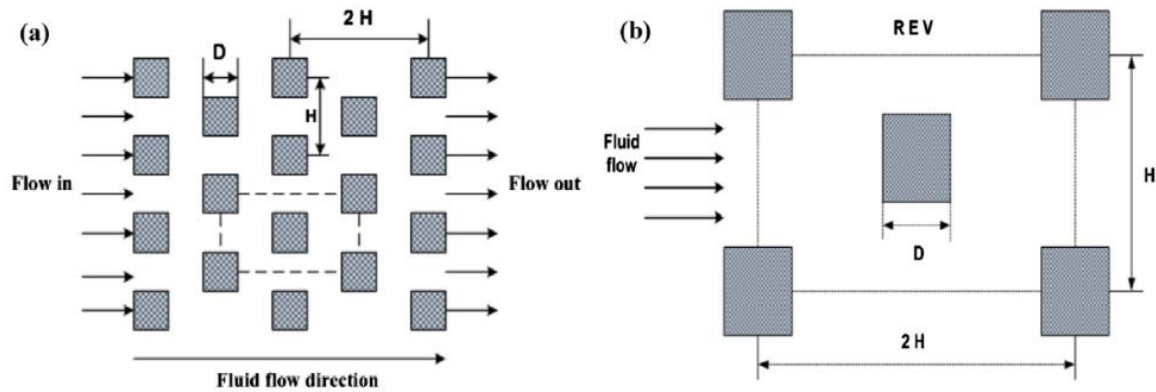


Figura 7.- Representación de medios porosos: (a) arreglo periódico de cilindros cuadrados, y (b) volumen elemental representativo [13].

En esta simulación se impuso la condición límite de velocidad periódica (es decir, la velocidad en un punto dado en la salida es la misma que la velocidad en un punto equivalente en la entrada).

Las líneas de corriente obtenidas para medios de baja y alta porosidad se muestran en las figuras 8 y 9 respectivamente. Kundu encontró la formación de un vórtice que generaba un abultamiento en el lado de la esquina aguas arriba de la corriente principal, y en la cara aguas abajo del poro se produce la separación completa del flujo. El bulto o remolino se hizo más grande y más nítido en su contorno a medida que el Reynolds aumenta y viaja aguas abajo hasta que se disipa. Como era de esperarse se forma una región de estela más grande en la parte delantera del cilindro cuadrado y para  $Re_D = 40000$  se observó una separación completa del flujo en el tramo de aguas abajo y eventualmente se forman vórtices en las esquinas. Para  $Re_D = 100$  la intensidad de formación de estela es baja debido a que el fluido fluye suavemente sobre el cilindro cuadrado.

Para porosidad  $\emptyset = 0.64$  y  $0.84$ , una pequeña zona de recirculación se genera arriba y abajo de la cara del cilindro cuadrado que finalmente se junta con vórtices posteriores al cilindro cuadrado cuando el Reynolds es máximo.

A partir de los contornos aerodinámicos calculados en la vecindad del cilindro cuadrado, se observó que el tamaño del vórtice aguas abajo del cilindro se comprime gradualmente con una disminución de la porosidad, esto se debe a que se estrecha el paso para el flujo.

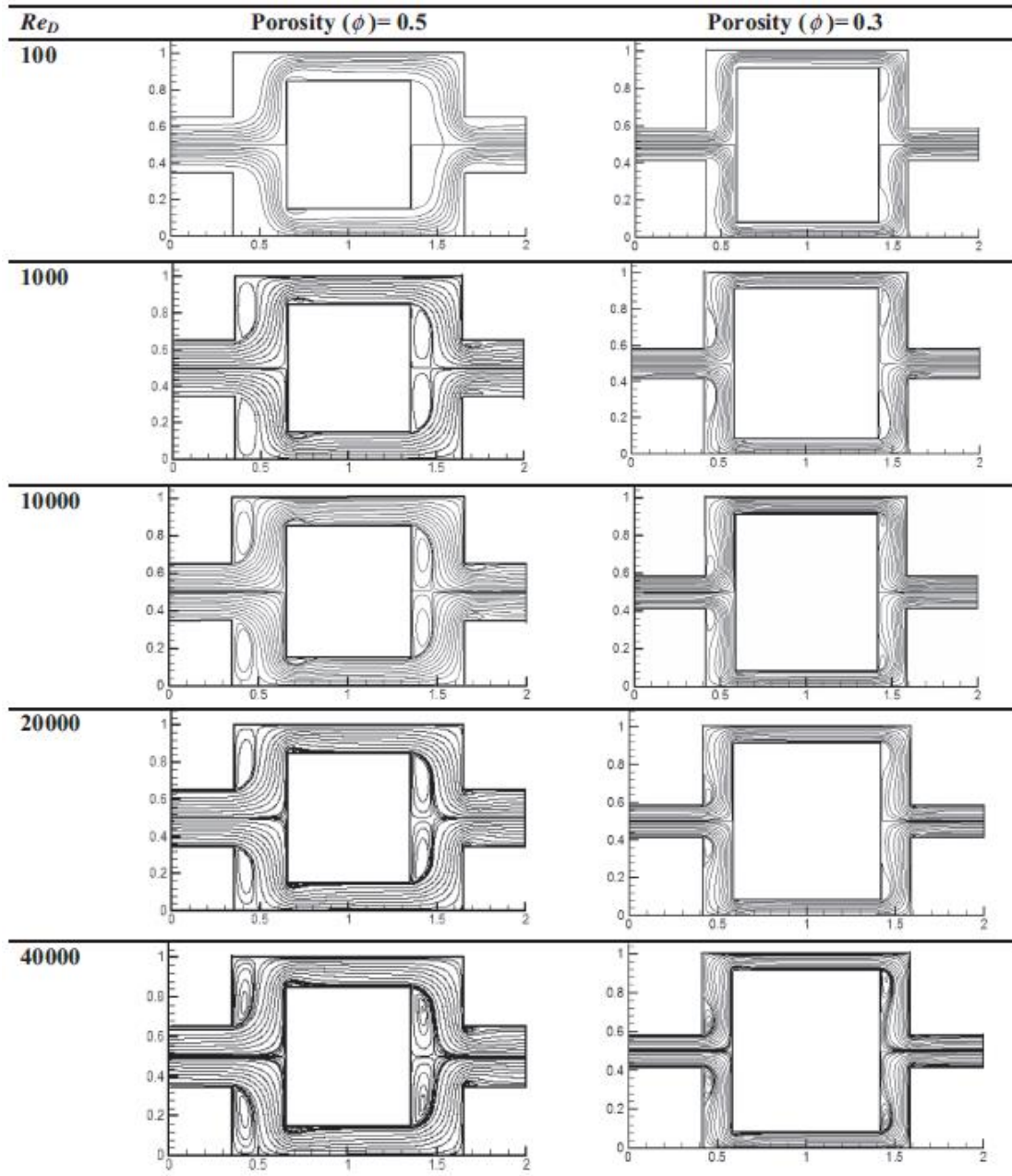


Figura 8.- Líneas de corriente para medios de baja porosidad [13].

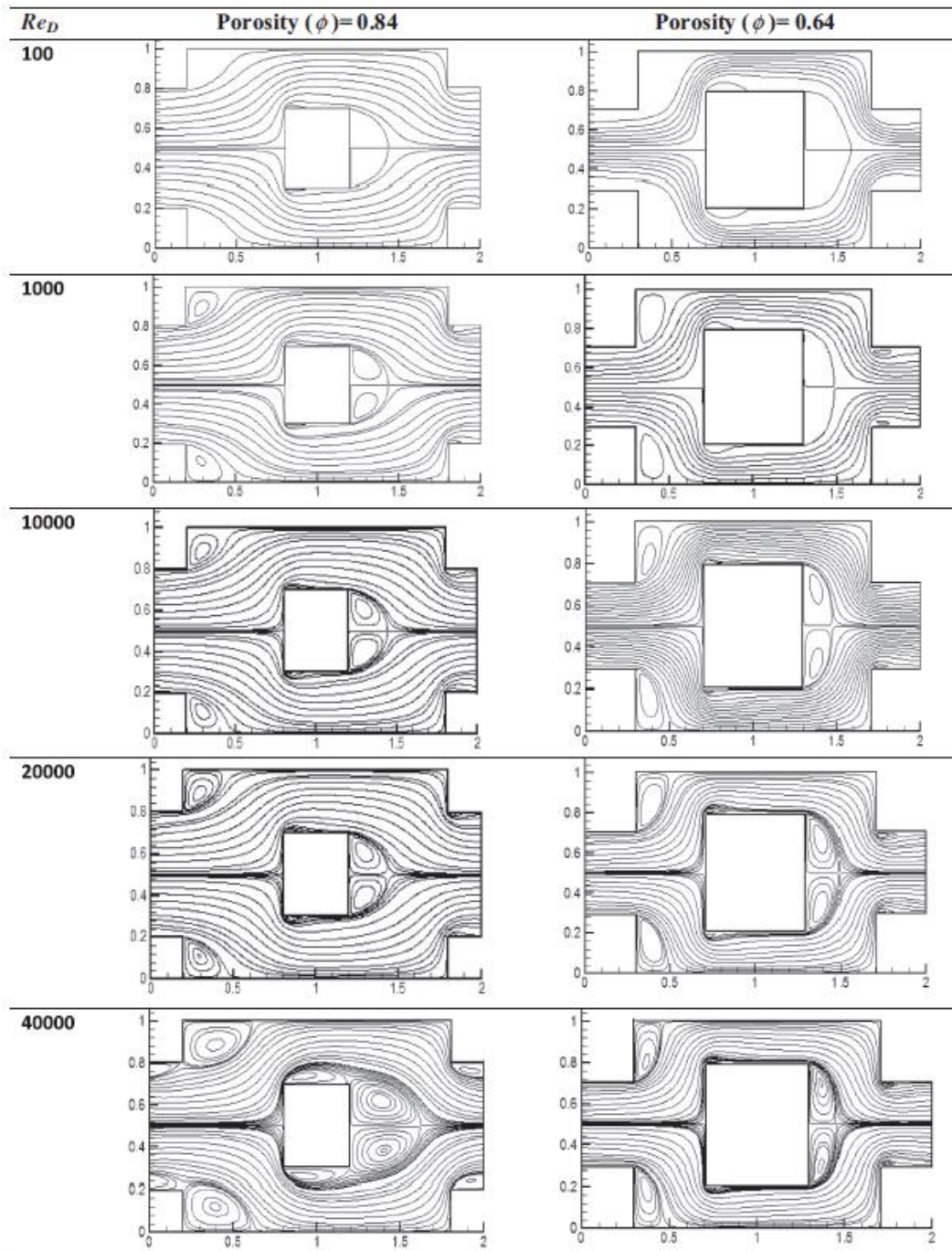


Figura 9.- Líneas de corriente para medios de alta porosidad [13].

También existen estudios experimentales que analizan el flujo laminar en medios porosos utilizando técnicas como la velocimetría de imágenes de partículas, o la velocimetría por láser Doppler, [14-15], sin embargo, pocas investigaciones se han enfocado en atender el comportamiento utilizando técnicas de visualización de flujo en un régimen turbulento.

Esto no resulta ser algo sencillo, dada a las necesidades de un adecuado posicionamiento de las cámaras, de tal manera que permita captar las estructuras de flujo en el medio poroso, y otras complejidades relacionadas con la similitud dinámica en las experimentaciones, y determinación de la cantidad de humo óptima para motivos de visualización, que no abrumen el área de medición.

Un ejemplo de investigación experimental es la realizada por Larsson et. al. [16], quien con la técnica de PIV analizo el flujo laminar en un medio poroso construido con varillas cilíndricas de vidrio de cuarzo con un diámetro de 15 mm y una longitud de 35 mm que se ordenan en un matriz estructurada (cuadrada) de seis a lo ancho y diez a lo largo de la celda experimental, por lo que la porosidad de modelo es 0.8. El banco de pruebas donde se instala el prototipo está construido con polimetacrilato de metilo con dimensiones internas de  $850 \times 200 \times 30 \text{ mm}^3$ , como se muestra en la figura 10. Una bomba impulsa el fluido en el tanque manteniéndolo a una temperatura constante de  $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$  durante los experimentos. La figura 11 muestra la instalación experimental junto a las cámaras del PIV.

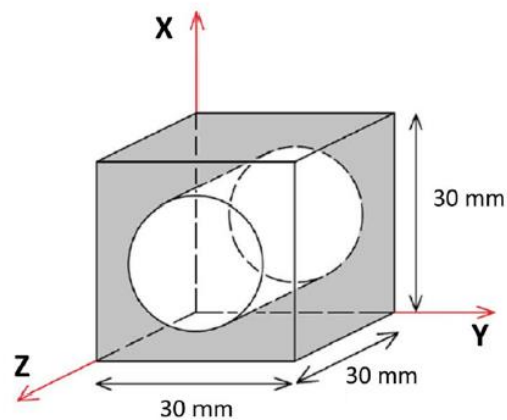
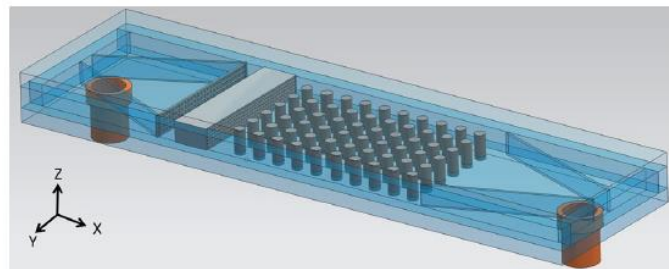


Figura 10.- Diseño de medio poroso [16].

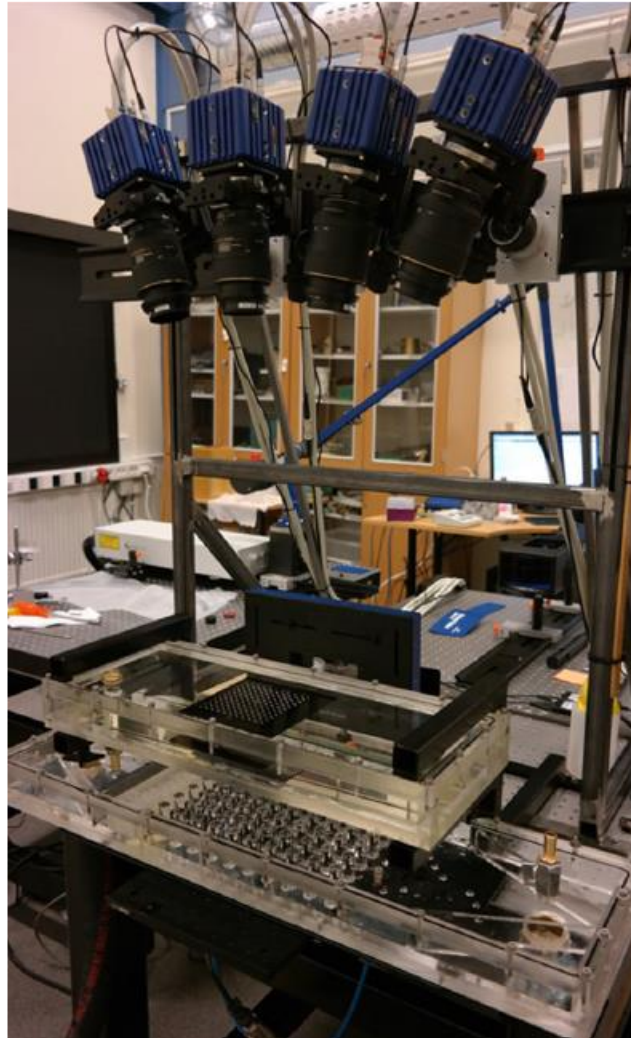


Figura 11.- Modelo experimental [16].

La Figura 12 muestra los resultados promediados en el tiempo de tres diferentes caudales correspondientes a un Reynolds de 45, 465 y 950, respectivamente. Las tasas de flujo representan un flujo cercano al Darciano, flujo de inercia y flujo turbulento. Para  $Re=45$ , las gráficas de velocidad se asemejan a las de un canal rectangular tanto entre los cilindros como en el paso más ancho, pero esto no sucede en los números de Reynolds más altos. Para estos casos, los contornos de velocidad tienen forma de “hueso de perro” y aparecen zonas de velocidades máximas, las cuales se pueden rastrear hasta la separación del flujo en los cilindros. En las imágenes a la derecha se muestran las líneas de corriente de la velocidad en el medio del volumen de medición y se aprecia la formación de estela detrás del cilindro, el campo de flujo cambia considerablemente cuando el Reynolds aumenta.

Las líneas de corriente que comienzan en el plano horizontal tienen un movimiento ondulado que no es visto en los otros casos. Con mayor Reynolds la inercia se vuelve más fuerte, lo que dificulta el movimiento del flujo principal en este espacio y estelas relativamente grandes se empiezan a formar. Para  $Re=465$ , se puede ver que, al acercarse a la pared superior del medio poroso las líneas de corriente de cada vórtice se inclinan hacia el otro lado y ya no son claramente separados como lo son para el caso con  $Re=950$ .

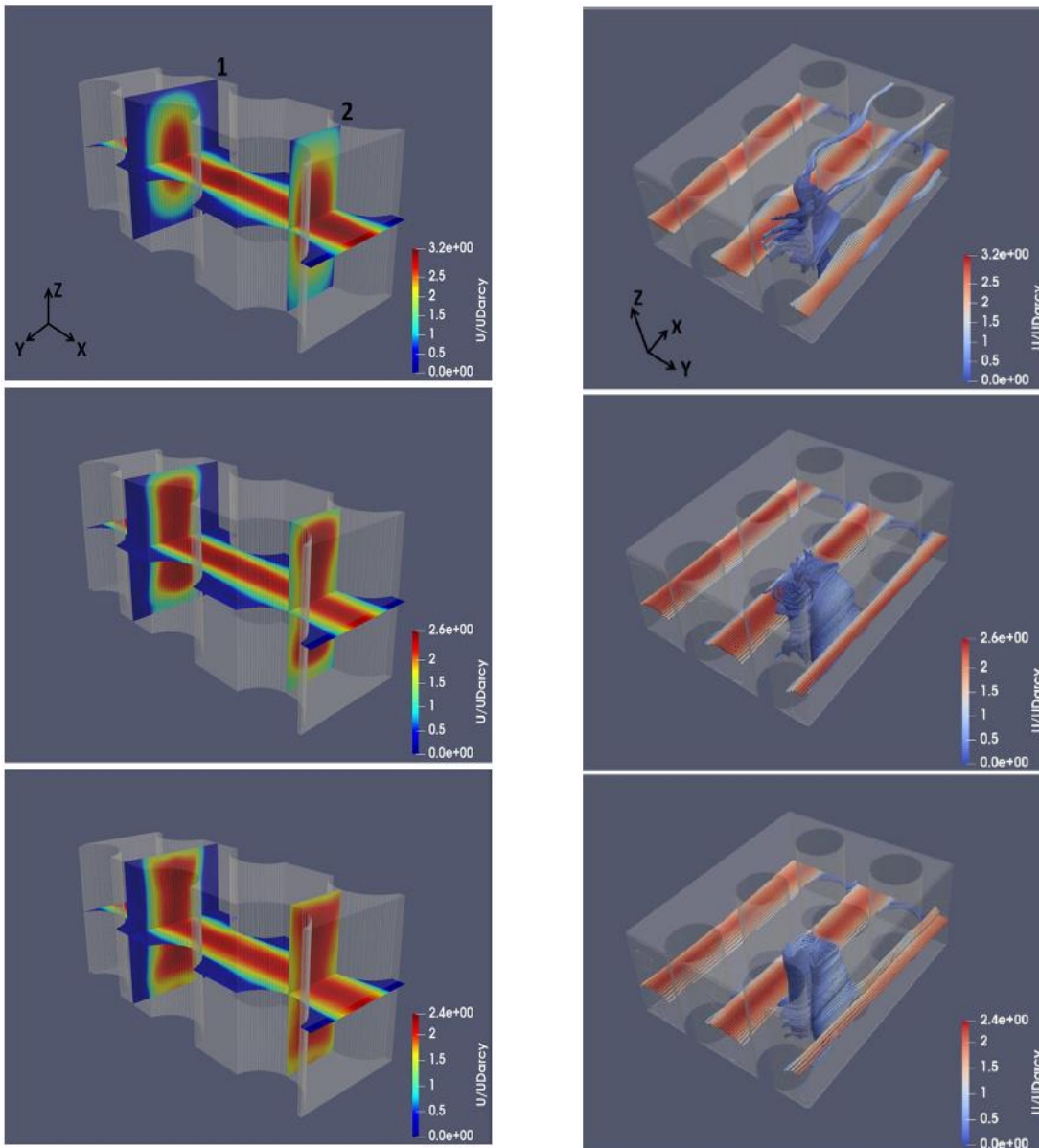


Figura 12.- Resultados obtenidos con PIV [16].

Drach y Corbella [17] utilizaron el Túnel de Viento de la Universidad Federal de Rio de Janeiro, para analizar los efectos del viento en espacios libres y urbanos. Utilizaron la técnica de arrastre de arena en modelos a escala de manzanas específicas de los barrios de Copacabana e Ipanema, barrios de la ciudad de Rio de Janeiro. A partir de las observaciones de la trayectoria del viento, es posible relacionar los resultados obtenidos con la morfología urbana de cada uno de los barrios. El túnel de viento utilizado se muestra en la figura 13, el cual fue diseñado por el laboratorio de Aerodinámica de las Construcciones y fue montado en una sala de 8.80m x 7.60m, es capaz de desarrollar velocidades superiores a 10 m/s, las cuales son apropiadas para la realización de ensayos de erosión eólica. En la figura 14 se presentan imágenes fotográficas de la vista frontal de la zona de pruebas, donde se puede observar la mesa de ensayos, que posee un mecanismo giratorio, permitiendo que los modelos reducidos sean colocados de forma adecuada con relación a la dirección del viento que se desea evaluar. En el proyecto se desea que al menos una parte del flujo se desarrolle sobre cubrimientos mínimos de diferentes tipos de rugosidad. Por eso, el desarrollo del flujo se da a través de una larga superficie rugosa. También se observan los obstáculos llamados “generadores de turbulencia”, con forma de aletas de tiburón y la superficie rugosa sobre la que el flujo se desenvuelve antes de llegar a la mesa de experimentos.

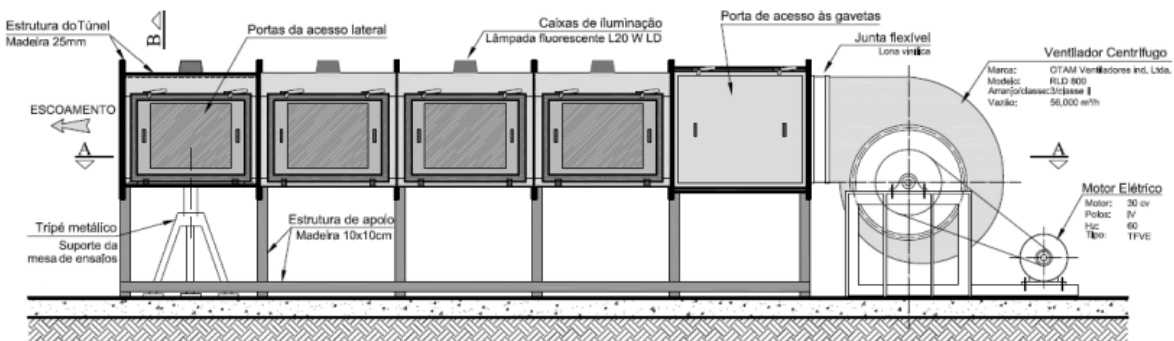


Figura 13.- Vista lateral de Túnel de viento de la FAU/UFRJ [17].



Figura 14.- Vista frontal de Túnel de viento (izq) y obstáculos generadores de turbulencia.

La maqueta se instaló en la mesa de ensayos urbanos considerando que las estructuras más altas debían contar con alrededor de 150mm y las más bajas de 30mm. Para que las maquetas permitieran la visualización clara de los efectos de los vientos, utilizaron color oscuro en la base de la maqueta, arena clara y materiales resistentes a los efectos del viento como se aprecia en la figura 15.

La técnica de visualización utilizada conocida como erosión eólica o de “arrastre de arena” ayuda a entender los caminos que el viento realiza en el medio urbano, como también sus posibles entradas y barreras. A través de esta técnica es posible observar, en el nivel del peatón, zonas ventiladas o estancadas, en función de los vientos dominantes. El estudio de las zonas donde la arena se acumula, combinado con el estudio de la insolación, permite identificar posibles islas de calor, así como zonas con concentración de polución.



Figura 15.- Maquetas de Copacabana (Izq) e Ipanema (der) [17].

La técnica del “arrastre de arena” consiste en aplicar arena seleccionada sobre todas las superficies expuestas de la maqueta y, a continuación, accionar el túnel de viento. En el primer ensayo del túnel de viento con una maqueta urbana utilizaron arena de granulometría 0.03 mm, pero ésta no presentó dislocamientos significativos, ni siquiera con la velocidad más alta. Nuevos ensayos fueron realizados con otros materiales: arcilla (#0.0075mm); arena (#0.0075mm); un nuevo ensayo con arena más gruesa (#0.015mm), talco y cemento. Evaluando las ventajas e inconvenientes de cada material con relación al diseño de las instalaciones del túnel adoptaron la arena de granulometría menor (#0.0075mm), una arena clara y fina obtenida usando tamices.

Como un ejercicio de prueba los investigadores realizaron la visualización del flujo en un arreglo de estructuras como se muestra en la figura 16. En el conjunto que forma una gran “U” (16a), se observa una acumulación de arena en el interior del conjunto, como resultado de la ausencia de viento capaz de promover la ventilación de este local. En la figura 16b, la retirada de uno de los bloques a barlovento permitió el acceso del viento al interior del conjunto, resultando en una nueva configuración de la arena depositada. La figura 16c, con la rotación de uno de los bloques de la pared lateral, muestra una alteración del perfil de distribución de la arena en la base de la estructura. Para los observadores, es posible notar que la dinámica del viento varió apenas con la alteración de la posición de los bloques

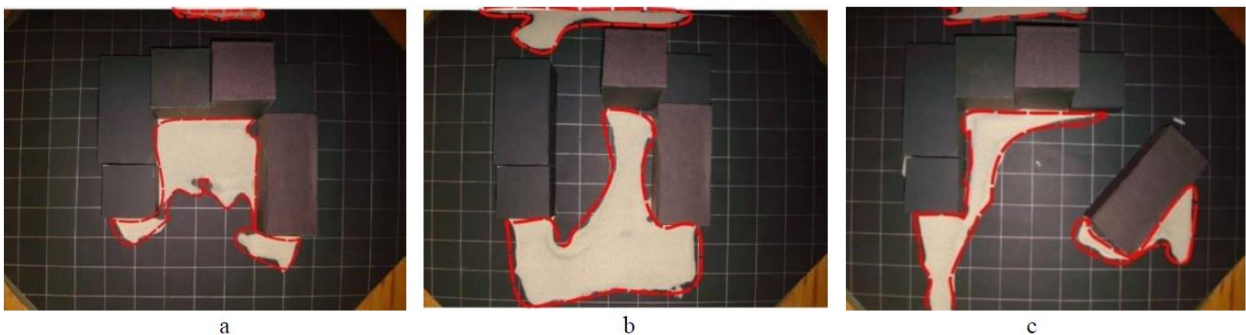


Figura 16.- Visualización en forma de U (a), retirada de bloque (b) y rotación de bloque lateral (c) [17].

De este ejercicio se observa que para el caso de regiones de clima caliente seco, además de ventilar y sombrear se pueden adoptar espejos de agua, fuentes etc. que disminuyen la temperatura a través de la humidificación del aire. Para las regiones de clima frío, las áreas

poco ventiladas son áreas protegidas contra el viento frío, y por tanto pudiendo ser definidas como zonas de posible confort.

En la figura 17 se muestran los resultados de los experimentos y para resaltar los mismos se ilustraron de color naranja. Para todas las incidencias de viento, o sea, sudeste, sur, este, oeste y sudoeste, los resultados de las visualizaciones indicaron una mejor distribución de la ventilación en las manzanas del barrio de Ipanema. El viento fue capaz de penetrar en las calles internas que aparecen en el área de estudio. Se observó una menor incidencia de áreas estancadas, resultando en una menor posibilidad de formación de islas de calor.

En el caso de Copacabana, donde una barrera de edificios con prácticamente la misma altura bloquea significativamente la entrada del viento, existe una reducción de la ventilación en las zonas más internas del barrio. En el caso de que estas áreas escasamente ventiladas estén expuestas a la insolación, pueden presentar un aumento en la temperatura, lo que dificultará también la dispersión de los gases producidos por ómnibus y automóviles.

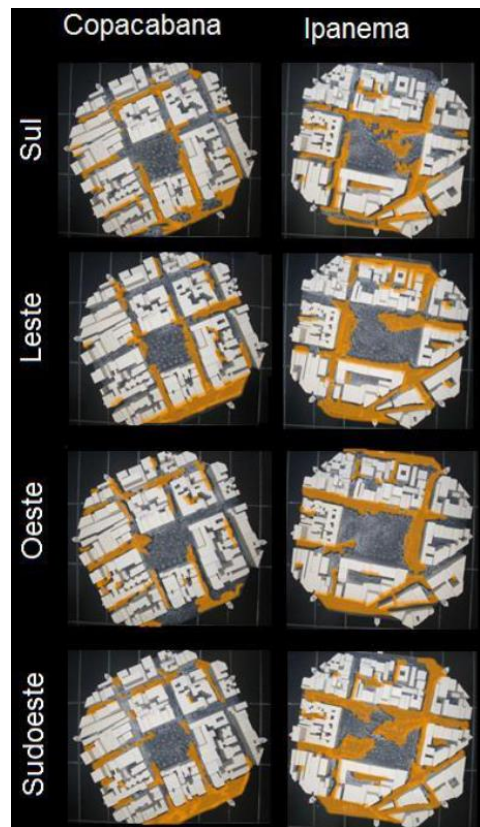


Figura 17.- Trayectorias de flujo de viento sobre las maquetas [17].

Cualitativamente hablando los investigadores concluyen que a partir de los experimentos realizados y de la identificación de eventuales puntos críticos es posible señalar y ensayar intervenciones que ayuden a adecuar la necesidad de confort y de espacio urbano. Las posibles interferencias que pueden ser sugeridas para las áreas estancadas varían de acuerdo con la región climática donde están localizadas. Por ejemplo, en regiones de clima cálido húmedo, se sabe que se debe inducir una mayor ventilación. Así, las alteraciones de la forma y de las posiciones de obstáculos, que permitan el re-direccionamiento del viento, pueden ser estudiadas para inducir un incremento de ventilación, contando también con las sombras para amenizar el problema y evitar la formación de islas de calor.

## **Marco teórico.**

El ingeniero Henry Darcy trabajó muchos años en el abastecimiento de agua a la ciudad francesa de Dijon. Se interesó en el flujo del agua a través de los medios porosos porque se utilizaban filtros de arena para depurar el agua y por la observación de pozos que contribuían al abastecimiento de la ciudad. En 1856 presentó un voluminoso informe sobre el tema, que incluía un pequeño apéndice describiendo sus experimentos y la obtención de la ley. Ese pequeño anexo puede considerarse el nacimiento de la hidrogeología como ciencia, y ha sido la base de todos los estudios físico-matemáticos posteriores sobre el flujo del agua subterránea [18].

En los laboratorios actuales se dispone de aparatos muy similares al que utilizó Darcy, y que se denominan permeámetros de carga constante. Básicamente un permeámetro es un recipiente de sección constante por el que se hace circular agua conectando a uno de sus extremos un depósito elevado de nivel constante como se muestra en la figura 18. En el otro extremo se regula el caudal de salida mediante un grifo que en cada experimento mantiene el caudal también constante y finalmente, se mide la altura de la columna de agua en varios puntos.

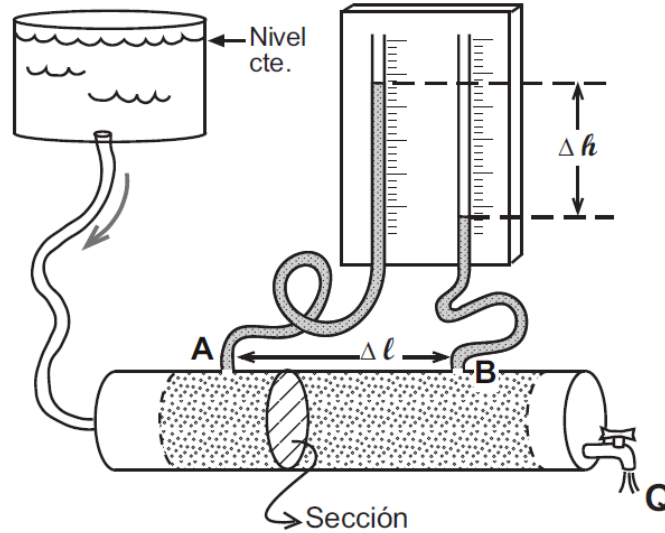


Figura 18.- Permeámetros de carga constante [18].

De la figura se tiene la siguiente nomenclatura:

$Q$  = Caudal.

$\Delta h$  = Diferencia de Potencial entre A y B.

$\Delta l$  = Distancia entre A y B.

Gradiente hidráulico =  $\Delta h / \Delta l$ .

Darcy repitió el experimento de la figura 1 con varios materiales porosos y cambiando las variables, y dedujo que el caudal que atravesaba el permeámetro era linealmente proporcional a la sección y al gradiente hidráulico. Y que la constante de proporcionalidad era característica de cada arena o material que llenaba el permeámetro. Por lo que al variar el caudal con un grifo y/o moviendo el depósito elevado, los niveles del agua en los tubos varían. También se pueden probar permeámetros de distintos diámetros y midiendo la altura de la columna de agua en puntos más o menos próximos (diferentes  $\Delta l$ ). Se encontró que cambiando todas las variables siempre que se utilice la misma arena, se cumple que el caudal de obtiene:

$$Q = k * L^2 * \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad 1)$$

Si se utiliza otra arena (más gruesa o fina, o mezcla de gruesa y fina, etc.) y jugando de nuevo con todas las variables, se vuelve a cumplir la ecuación anterior, pero la constante de

proporcionalidad  $k$  es distinta. Darcy concluyó, por tanto, que esa constante era propia y característica de cada arena y la llamó permeabilidad, aunque su denominación correcta actual es conductividad hidráulica.

$$q = -k * \left( \frac{dh}{dl} \right) \quad 2)$$

dónde:  $q$  = Caudal que circula por  $m^2$  de sección.

$K$  = Conductividad hidráulica.

$dh/dl$  = gradiente hidráulico expresado en incrementos infinitesimales.

El signo menos se debe a que el nivel disminuye en el sentido del flujo; es decir, que  $\Delta h$  o  $dh$  son negativos y el signo menos hace que el caudal sea positivo.

### Flujo turbulento

Se conoce como flujo turbulento o corriente turbulenta al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, o sea aquel flujo el que las partículas del fluido se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos aperiódicos, (no coordinados) como por ejemplo el agua en un canal de gran pendiente. Debido a esto, la trayectoria de una partícula se puede predecir hasta una cierta escala, a partir de la cual la trayectoria de la misma es impredecible, más precisamente caótica [19].

### Número de Reynolds

El número de Reynolds  $NR$  relaciona la densidad ( $\rho$ ), viscosidad ( $\mu$ ), velocidad ( $u$ ) y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos [20]. Dicha cantidad sirve para identificar si un flujo es laminar o turbulento. Para un fluido que circula por el interior de una tubería circular recta de diámetro ( $\emptyset$ ), el número de Reynolds  $NR$  viene dado por:

$$NR = \frac{\rho \phi u}{\mu} \quad 3)$$

Diversos experimentos han demostrado que cuando el número de Reynolds es menor o igual a 2000, el régimen es laminar, mientras que por encima de 3000 el régimen es turbulento. En la zona de transición, entre 2000 y 3000 el régimen es inestable y puede pasar de un tipo a otro.

### Ecuaciones de Navier-Stokes Promediadas de Reynolds (RANS)

El modelo RANS fue propuesto por Reynolds en 1895 y consiste en descomponer las variables de interés (velocidad, presión, etc.) en un valor medio y otro fluctuante. La aplicabilidad del promedio de Reynolds depende implícitamente de la estabilidad de los valores promedio. “En esencia, el promedio de Reynolds es una brutal simplificación donde se pierde mucha información contenida originalmente en las ecuaciones de Navier Stokes” [21]. De este modo las ecuaciones originales de Navier Stokes se reformulan en función de las variables promedio y se obtiene un nuevo grupo de ecuaciones, precisamente las ecuaciones promediadas de Reynolds, que es similar al conjunto original pero con una variable adicional, razón por la cual se requiere un modelo adicional que permita cerrar el modelo RANS. El modelo RANS es de menor complejidad que el modelo LES, o bien, es menos demandante computacionalmente, pues no resuelve de forma directa las ecuaciones originales de Navier Stokes.

Los ingenieros están normalmente interesados en saber sólo unas cuantas propiedades cuantitativas de los procesos turbulentos, lo que evita la necesidad de predecir los efectos de cada remolino en el flujo. Reynolds, en 1895, propuso una aproximación que proporciona información acerca de las propiedades promediadas en el tiempo de un flujo, por ejemplo, las velocidades medias, la presión media, los esfuerzos medios, etc. Esta es la “aproximación promediada de Reynolds”.

En las aproximaciones promediadas de Reynolds de la turbulencia, todas las inestabilidades se promedian fuera, es decir, toda inestabilidad se considera como parte de la turbulencia. En la promediación, la no-linealidad de las ecuaciones de NavierStokes da origen a términos que deben modelarse. La complejidad de la turbulencia hace improbable que

cualquier modelo promediado de Reynolds sencillo sea capaz de representar todos los tipos de flujos, de esta manera los modelos de turbulencia se consideran como aproximaciones en ingeniería más que leyes científicas.

A partir del concepto de la descomposición de Reynolds, se pueden deducir las ecuaciones de Navier-Stokes [22] promediadas en el tiempo por sustituir las expresiones para cada variable y realizar un promedio temporal sobre toda la ecuación.

A continuación se muestran las ecuaciones promediadas en el tiempo en notación tensorial, para flujo incompresible, despreciando la disipación viscosa y en estado permanente:

Masa:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad 4)$$

Momento:

$$\rho_f \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho_f \overline{u'_i u'_j} \right) \quad 5)$$

## Capítulo II: Metodología numérica

Para realizar este estudio numérico el medio poroso es modelado como un conjunto infinito, repetitivo y simétrico de cilindros cuadrados grandes rodeados de cilindros cuadrados más pequeños, la relación de diámetros (DR) estudiada presenta los valores de 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8. Un esquema de la disposición general de las distintas configuraciones es mostrado en la figura 19. También, para cada DR, se analizaron los valores de porosidades ( $\emptyset$ ) de 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 y 0.8, respectivamente, las cuales fueron obtenidas mediante el aumento o disminución de las alturas H, como se muestra en la Figura 20.

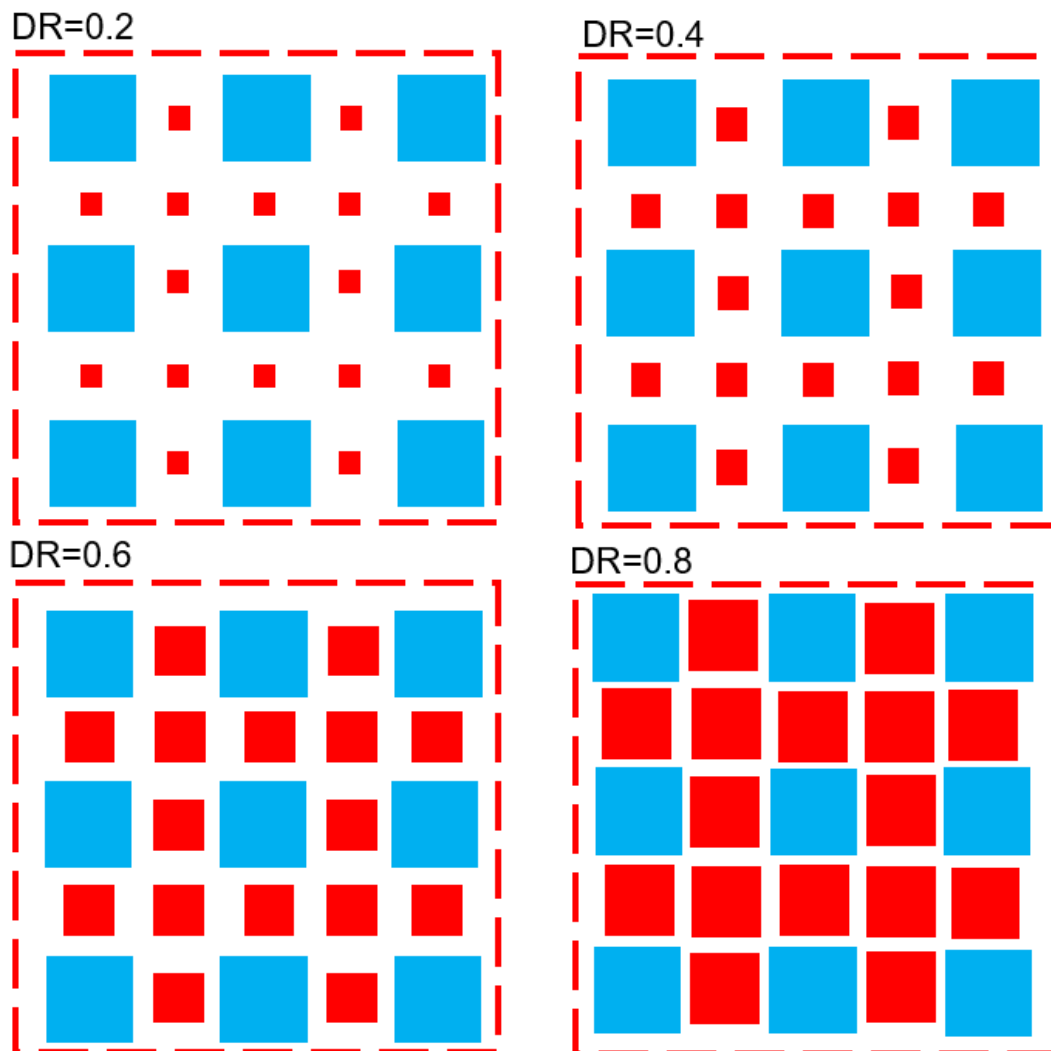


Figura 19.- Esquema de medio poroso con variación de la DR.

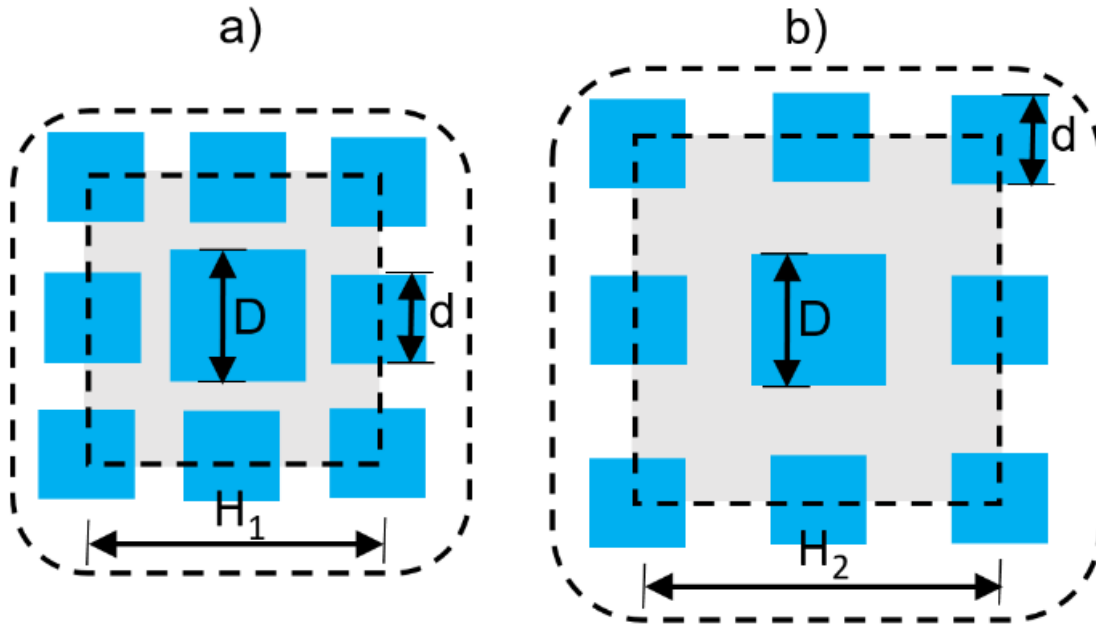


Figura 20.- Medio poroso con DR 0.6 y a)  $\varnothing=0.3$  y b)  $\varnothing=0.6$ . Note que  $H_2 > H_1$ .

Se consideró un flujo newtoniano constante e incompresible dentro de los poros. Las ecuaciones RANS de la masa y el momento son:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\rho_f \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho_f \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (7)$$

El efecto de los esfuerzos de Reynolds en la ecuación de momento toma en cuenta la aproximación de Boussinesq de acuerdo a:

$$-\rho_f \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (8)$$

La viscosidad turbulenta se define como:  $\mu_t = \rho_f f_\mu C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$  (9)

Las ecuaciones de transporte de  $k$  y  $\varepsilon$  están definidas por:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad 10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + f_1 C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left[ \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] - f_2 C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad 11)$$

La condición de frontera establecida en las paredes del dominio computacional fue no deslizamiento:

$$\bar{u}_i = 0; k = 0; \varepsilon = \nu \frac{\partial^2 k}{\partial n^2} \quad 12)$$

Se impuso una condición periódica en  $x=0$  y  $x=H$ :

$$\begin{aligned} \bar{u}|_{x=0} &= \bar{u}|_{x=H}; \bar{v}|_{x=0} = \bar{v}|_{x=H} \\ k|_{x=0} &= k|_{x=H}; \varepsilon|_{x=0} = \varepsilon|_{x=H} \end{aligned} \quad 13)$$

En  $y=0$  e  $y=H$  se impuso una condición de simetría:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0 \quad 14)$$

Las ecuaciones gobernantes fueron resueltas por el método de volúmenes finitos utilizando el software comercial FLUENT®. En todos los casos resueltos, los términos de presión y velocidad fueron acopladas usando el algoritmo SIMPLE. Las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento,  $k$  y  $\varepsilon$  se discretizaron utilizando el esquema de segundo orden hacia al frente. Las soluciones se consideraron convergentes cuando los residuales de todas las variables de flujo fueron menores de  $10^{-5}$ .

Para calcular la mecánica de homogeneización del contaminante, se resolvió la ecuación de transporte de un trazador de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U C) = \nabla \cdot \left( \rho D_m \nabla C - \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla C \right) \quad 15)$$

En esta ecuación  $C$  es la fracción de masa del contaminante,  $U$  es el vector de velocidad promedio,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $D_m$  la difusividad molecular,  $\mu_t$  se refiere a viscosidad turbulenta y  $\sigma_t$  es el número de Schmidt turbulento. Los valores del campo de velocidades locales  $U$ , fueron obtenidas de casos resueltos con anterioridad, descritos en la referencia [12]. Para todos los casos estudiados se tiene un Reynolds ( $\rho u_D / \mu$ ) de  $50 \times 10^3$ , siendo  $u_D$  la velocidad de Darcy del medio poroso. Los valores de las constantes aplicadas en la ecuación de transporte del trazador son las mostradas en la Tabla siguiente:

Tabla 1.- Propiedades del trazador.

Parámetro	Unidades
$\rho$	1.225 kg/m <sup>3</sup>
$D_m$	1.7551e-05 m <sup>2</sup> /s
$\mu$	1.72e-05kg/(m·s)
$\sigma_t$	0.8

Para calcular los tiempos de homogeneización, fue necesario establecer 4 puntos de monitoreo, los cuales fueron colocados partiendo del eje central del dominio, posicionados de forma simétrica e inversa en puntos donde se generan altos gradientes de velocidad y/o presión (esta información se presenta en los anexos).

Con el propósito de simular la dispersión del contaminante, se colocaron dos parches circulares  $T_1$  y  $T_2$  de radio igual a  $0.0125D$  y con una concentración volumétrica igual a 1.0. Estos parches, se posicionaron a  $0.1H$  a partir de la entrada izquierda del dominio (el procedimiento de activación del patch en el software se presenta en los anexos). Un esquema ilustrativo de estos puntos es mostrado en la Figura 21. Las propiedades del contaminante fueron ajustadas de tal manera que se obtuviera un número de Schmidt de 0.8

para todos los casos, el cual es cercano al valor 0.84 reconocido para el monóxido de carbono.

La ecuación diferencial del transporte del trazador (15) es dependiente del tiempo, por lo cual es necesario utilizar un paso temporal ( $\Delta t$ ) óptimo que permita reproducir la evolución temporal del trazador, el número de secuencia temporal  $D_t$  utilizado en todos los casos es de 400, la explicación para esta asignación se describe en la referencia 23.

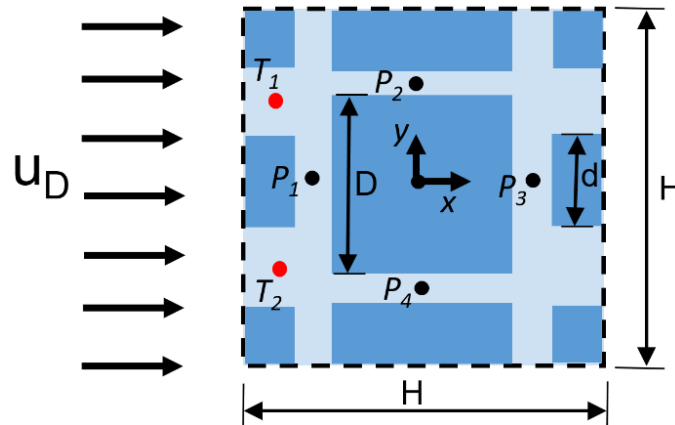


Figura 21.- Representación geométrica del medio poroso y posicionamiento de trazadores y puntos de muestreo, adaptada de la Ref. [23].

Se normalizaron los datos recopilados por cada punto de monitoreo de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$c^*(t) = \frac{w_i(t)}{w_i(t_\infty)} \quad (16)$$

En esta relación,  $c^*(t)$  representa la concentración adimensional en el tiempo  $t$ ,  $w_i(t)$  es la fracción de masa de trazador en función del tiempo, y  $w_i(t_\infty)$  es la fracción de masa del trazador final de la simulación. El cálculo de la uniformidad de dispersión ( $UNI$ ) de los poros fue obtenido con base en la ecuación siguiente:

$$UNI = 1 - \frac{\sigma_c^*(t)}{c^*(t)} \quad (17)$$

Aquí,  $\sigma_c^*(t)$  es la desviación estándar de la curva de concentración promedio normalizada (obtenida de los cuatro puntos) y  $c^*(t)$  es la media de la concentración normalizada de la

misma curva. En base a la uniformidad, el tiempo de homogeneización fue estimado como el tiempo en el cual  $UNI > 0.95$ . Finalmente, el tiempo adimensional presentado en los resultados ( $T^*$ ) se obtiene relacionando el tiempo de mezclado ( $T$ ) con la velocidad  $u_D$  y longitud  $D$  como se indica en la siguiente ecuación:

$$T^* = \frac{(T)^*(u_D)}{D} \quad 18)$$

### Capítulo III: Metodología experimental

Para realizar el análisis cualitativo del flujo turbulento en un medio poroso utilizando la técnica de visualización de flujo con humo se utiliza el túnel de viento subsónico de la FCITEC [24], y para esto se construyó un prototipo con una impresora 3D de la marca Creality CR-X® que utiliza filamentos de PLA (ácido poliláctico) con diámetro de 1.72mm que se muestra en la figura 22. El tiempo de trabajo para la construcción del modelo completo fue de 12 horas, y los diferentes prismas construidos se pegaron a una placa de acrílico con silicón como se muestra en la figura 23.



Figura 22.- Impresión de prototipo de medio poroso.

Las condiciones geométricas del medio poroso construido son  $Y=228$  mm,  $X=336$  mm,  $D=60$  mm,  $d=36$  mm y  $H=192$ mm, la profundidad del modelo ocupa el ancho de la zona de pruebas (0.3m), por lo que se tiene una porosidad de 0.8 y un  $DR=0.6$ , como se especifica en la figura 24.

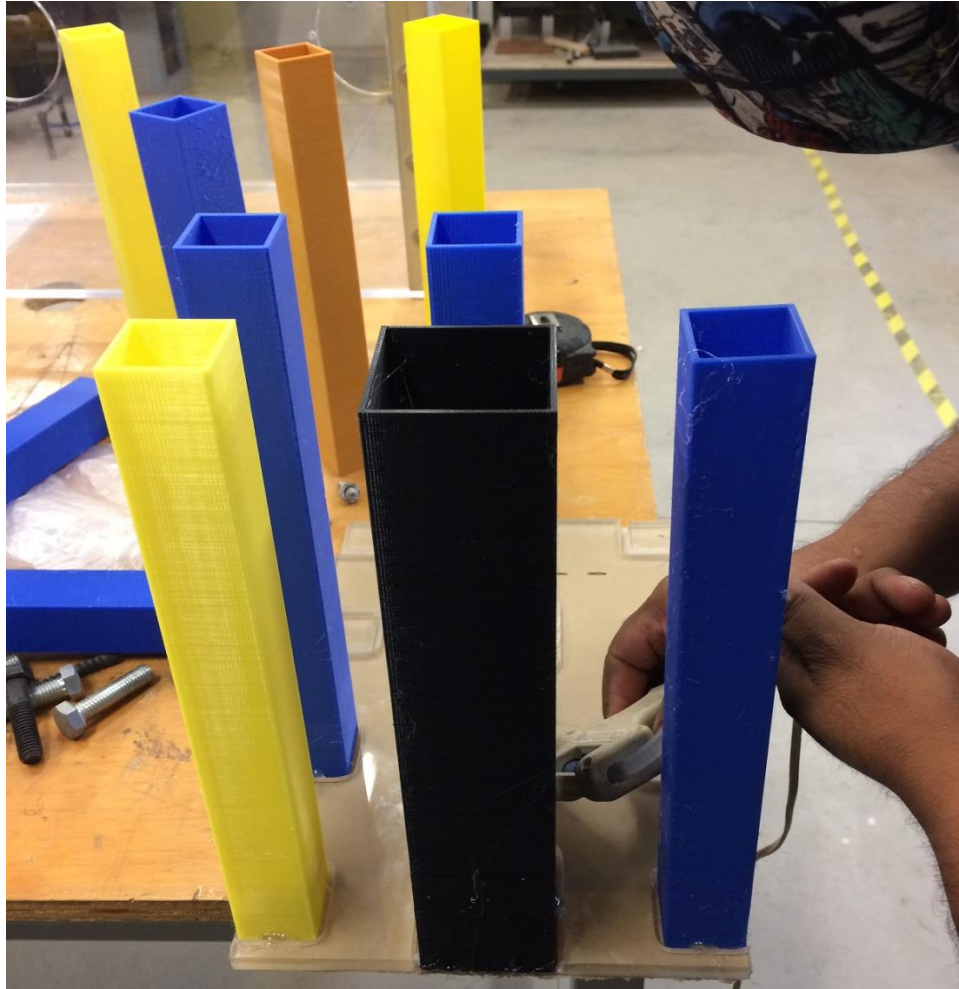


Figura 23.- Ensamble de modelo poroso.

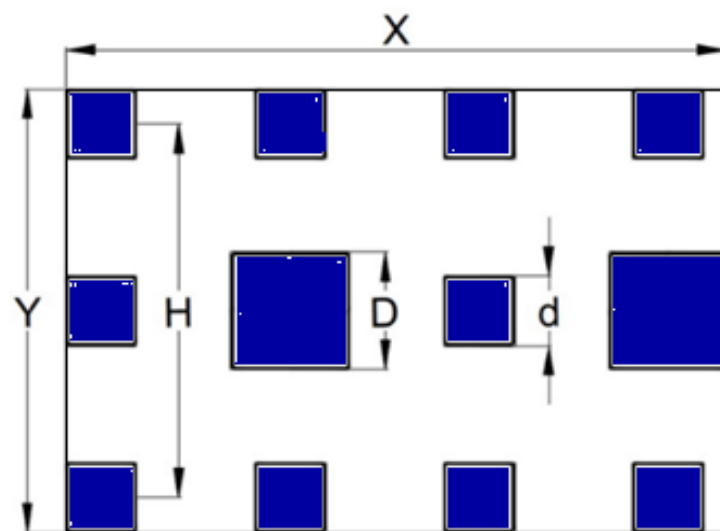


Figura 24.- Especificaciones geometricas para medio poroso con  $\text{Ø}=0.8$  y  $\text{DR}=0.6$ .

Se eligió un modelo con estas características debido a la naturaleza de la prueba, ya que porosidades pequeñas imposibilitan la aplicación de esta técnica de visualización.

En la figura 25 puede apreciarse el montaje del prototipo en la zona de pruebas del túnel de viento, el medio poroso se instala al centro de la zona de pruebas la cual tiene una longitud de 100cm, el dispositivo de adquisición de grabación se coloca a 50cm y las fuentes de iluminación se ubicaron de manera cenital [25] aproximadamente a 15cm. La filmación del flujo del humo a través del medio poroso se realizó con un dispositivo celular de grabación de videos en HD de 1080p, de hasta 30 cuadros por segundo con una resolución de 1136 x 640 pixeles a 326PPI.

El medio poroso se ilumina con fuentes de luz de día con temperatura de color de 6500 K, teniendo un índice de reproducción cromática de 80, así mismo al utilizarse circuitos integrados estabilizados para suministrar la corriente eléctrica, el parpadeo conocido como “Flicker” es prácticamente nulo (inferior al 1.0 % con el método Flicker ciento), dichos circuitos estabilizadores están integrados en la lámpara, el tipo de corriente eléctrica utilizada fue alterna (C.A.) con Voltaje de 127 y potencia de 11 Watts permitiendo un flujo luminoso para cada lámpara de 1,050 lumen. Las imágenes obtenidas se trataron con el software comercial VLC media player®.

El perfil de velocidades en la parte central de la zona de pruebas y la velocidad promedio del aire se obtuvieron tal como se indica en la referencia [26], y para este caso se tiene un perfil de velocidades turbulento desarrollado y una velocidad promedio con valor de 4.8 m/s, lo que representa un  $Re=17136$  tomando como longitud característica el largo del cilindro cuadrado más grande (D).

Para la obtención de imágenes con un mejor enfoque del objeto se utiliza una caja de luz [27] que cubre la zona de pruebas. El material utilizado para la construcción de la misma fue perfil de aluminio estructural 20 x 20 [28] que se muestra en la figura 26, la cual se cubre con tela de lino color negro.

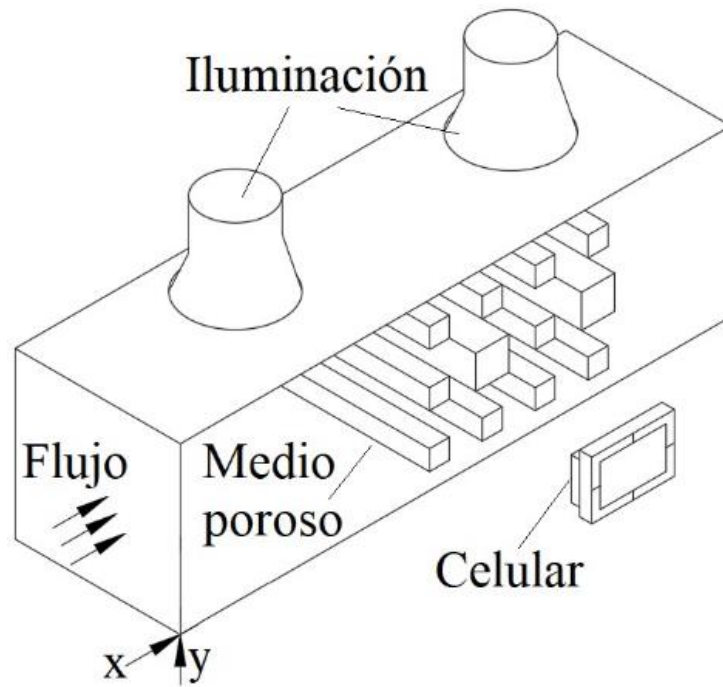


Figura 25.- Instalacion experimental en tunel de viento de la FCITEC.

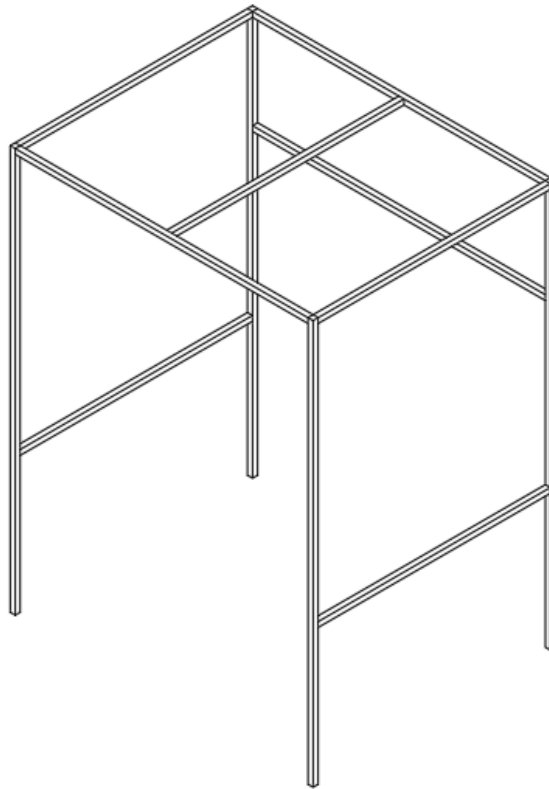


Figura 26.- Estructura de caja de luz.

En el taller de Diseño Industrial de la FCITEC se cortó y unió la tela como se muestra en la figura 27, para finalmente ensamblarla en la estructura y cubrir la zona de pruebas de visualización de flujo como se aprecia en la figura 28.

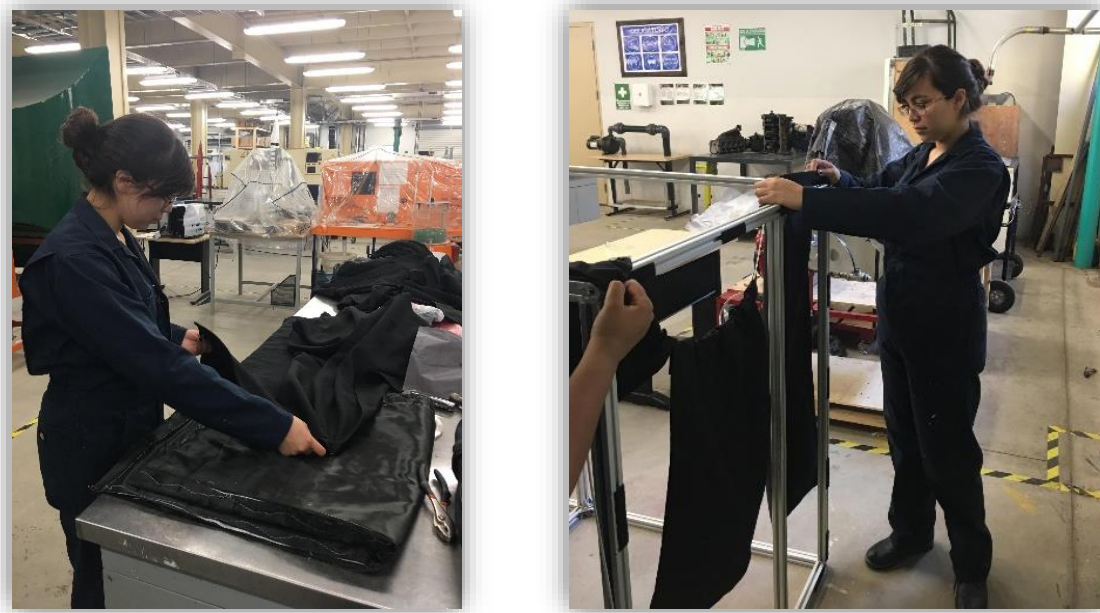


Figura 27.- Manufactura de caja de luz.



Figura 28.- Caja de luz instalada en el túnel de viento de la FCITEC.

El generador de humo utilizado para la visualización de flujo es de la marca Aerotech [29] equipo especializado para realizar este tipo de experimentos y se muestra en la figura 29.



Figura 29.- Generador de humo AEROTECH®.

El generador de humo fue diseñado para facilitar la observación de los movimientos del aire en muchos tipos de situaciones de flujo es ideal para uso en túneles de viento para pruebas aerodinámicas. El generador de humo portátil se transporta fácilmente al sitio de investigación, es conveniente de configurar, fácil de usar y, sobre todo no peligroso para la salud. El humo se produce peristálticamente bombeando una pequeña cantidad de aceite inocuo de color blanco que va desde la unidad de control hasta la punta de la sonda, pasando por una bobina eléctrica de baja tensión que calienta el aceite para producir una nube densa de humo. La sonda está conformada para minimizar la generación de estela que de otro modo invalidaría las observaciones de este modo la emisión del humo en la corriente de aire es suave y constante y se controla fácilmente para adaptarse a las condiciones imperantes. Para la generación de humo se utiliza aceite mineral Shell Ondina® con densidad de  $865 \text{ kg/m}^3$  a  $15^\circ\text{C}$  ( $\rho$  del vapor del aceite  $\approx \rho$  del aire).

Para utilizar de manera correcta la maquina generadora de humo sin correr riesgo que se encienda el aceite en el instrumento, lo que sucede por la acumulación de aceite en la punta del tubo, debe hacerse lo siguiente:

**Paso 1.** Asegurar que al conectar la maquina a la corriente eléctrica esta esté apagada para evitar cualquier accidente, cuando se tenga la seguridad que todo está en las condiciones adecuadas se procede a encender el aparato. También debe verificarse que el nivel de aceite

sea el indicado para poder generar la cantidad necesaria de humo teniendo en cuenta las especificaciones que marca un consumo de aceite de 60mL/hr.

**Paso 2.** El swich que marca como Pump (Bomba) cuenta con 3 opciones OFF (apagado), Drain (Drenar) y Deliver (Proporcionar).

OFF (Apagado): Esta opción mantiene la bomba desactiva no entrega ni extrae el aceite, solo esta neutral.

DRAIN (Drenar): Esta opción que nos entrega el generador de humo es para extraer todo el aceite que se encuentre en la manguera, cuando la opción de drain es seleccionada y se pone a una caudal de 10 tarda 4:04:08 min en extraer todo el aceite y retenerlo en el contenedor de nuevo.

DELIVER (Proporcionar): Una vez que la manguera está completamente vacía y se selecciona esta opción cuando se tiene el caudal a 10 que es lo recomendable para utilizar el equipo tarda exactamente 4:04.08 min en subir el aceite a la punta donde se encuentra la resistencia para empezar a generar el humo.

**Paso 3.** La manera adecuada de trabajar la maquina en el tunel de viento es la siguiente: Caudal en nivel 5 y Voltaje en 25 para trabajar aproximadamente 30 minutos sin problemas de vaciado de contenedor de aceite o combustion del mismo.

En la siguiente imagen se muestra el prototipo de medio poroso instalazado en la zona de pruebas del túnel de viento junto al inyector de humo, ambos sistemas de colocan al centro de la misma. La sonda del generador se sujeta a la pared con la ayuda de un buje y un tornillo diseñados exprofeso para realizar esta función.

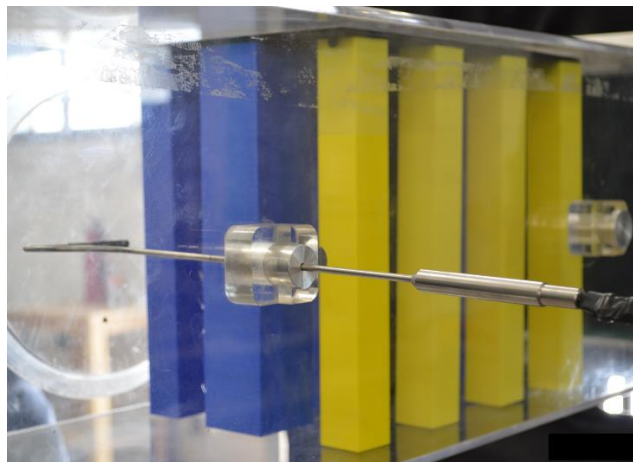


Figura 30.- Prototipo de modelo poroso e inyector de humo instalados en zona de pruebas.

## Capítulo IV: Resultados numéricos y experimentales.

Los tiempos de homogeneización de poro ( $T^*$ ) obtenidos numéricamente para los casos evaluados son mostrados en las figuras 31 a 36, los cuales se organizan para observar la influencia de la variación en la relación de diámetro (DR) para cada una de las 6 porosidades ( $\emptyset$ ) analizadas. Puede apreciarse como en 5 de los 6 casos de porosidad reportados, a medida que se tiene una relación de diámetro más alta se requiere mayor tiempo para lograr un mezclado del flujo en al menos el 95% del medio poroso.

El caso de porosidad 0.6 (figura 34) es especial ya que se requiere mayor tiempo de mezclado cuando se tiene DR=0.6 a diferencia de los otros. Para explicar esta diferencia se utilizan las Figuras 37 y 38, en la primera se muestra el flujo en un medio con  $\emptyset=0.6$  y DR=0.6, y se observa que en la parte superior e inferior del cilindro cuadrado pequeño se forma un vórtice (recuadro rojo), a diferencia del medio con  $\emptyset=0.6$  y DR=0.8, donde no se encuentran regiones de recirculación para la misma sección. La presencia de dichos vórtices, se asocia con una reducción del área efectiva de flujo, la cual afecta el tiempo de mezclado.

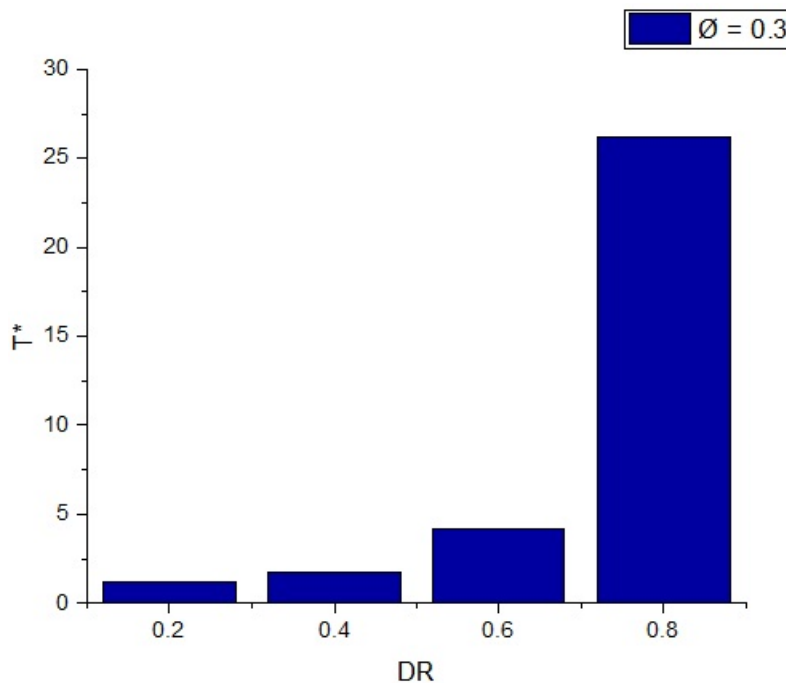


Figura 31.- Tiempo de mezclado para caso con  $\emptyset=0.3$ .

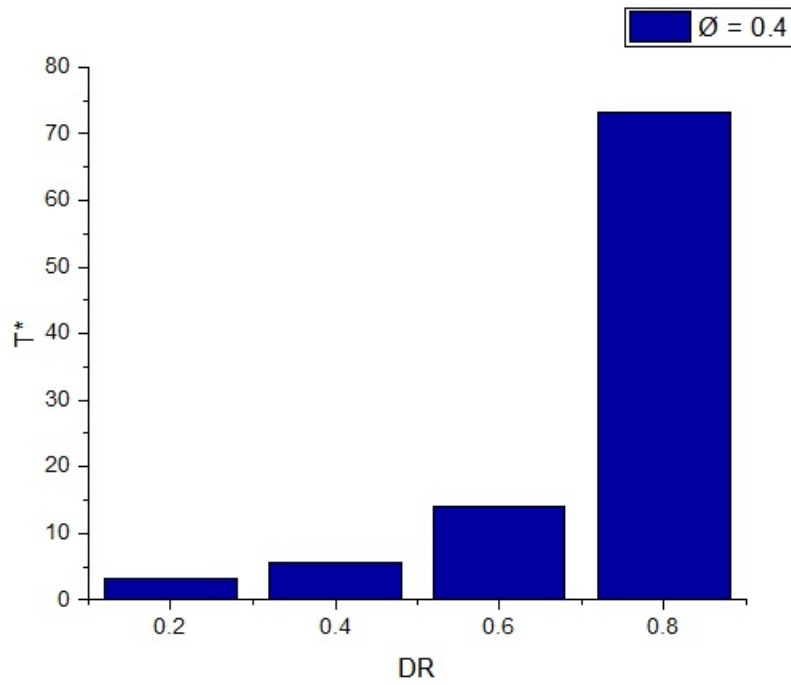


Figura 32.- Tiempo de mezclado para caso con  $\varnothing=0.4$ .

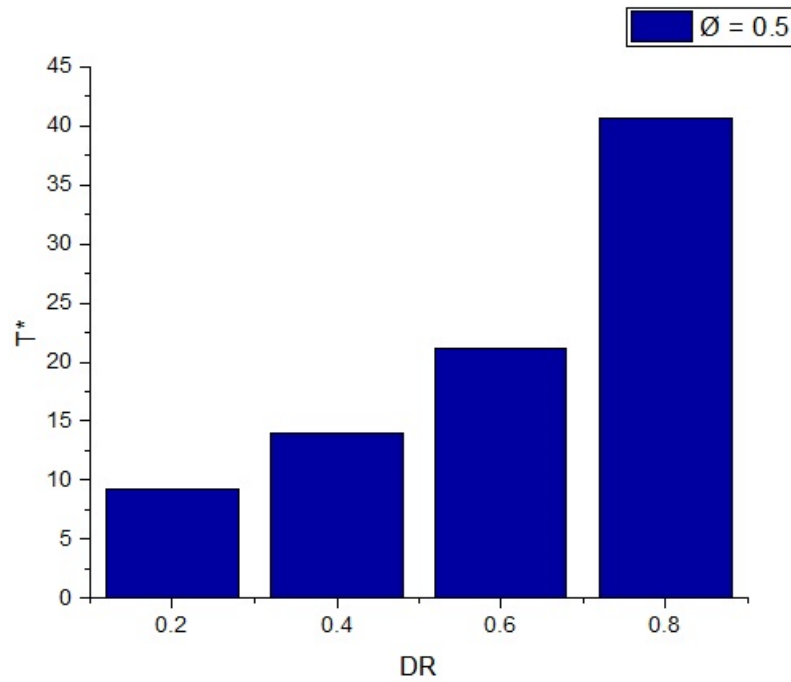


Figura 33.- Tiempo de mezclado para caso con  $\varnothing=0.5$ .

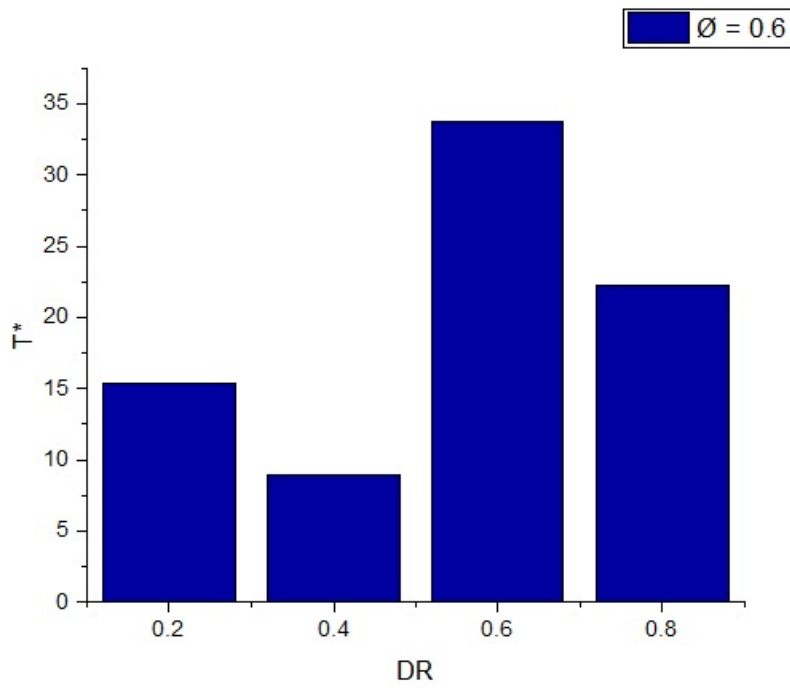


Figura 34.- Tiempo de mezclado para caso con  $\varnothing=0.6$ .

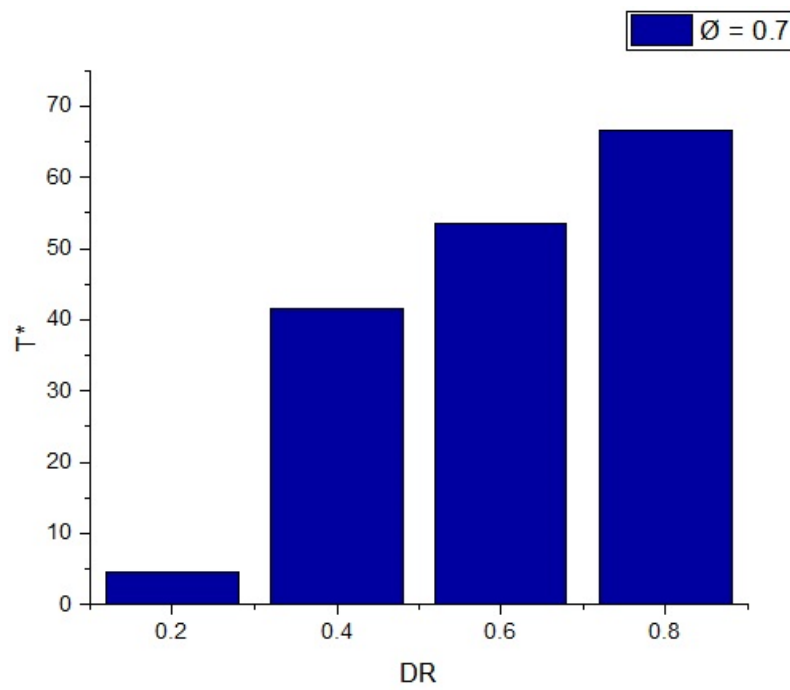


Figura 35.- Tiempo de mezclado para caso con  $\varnothing=0.7$ .

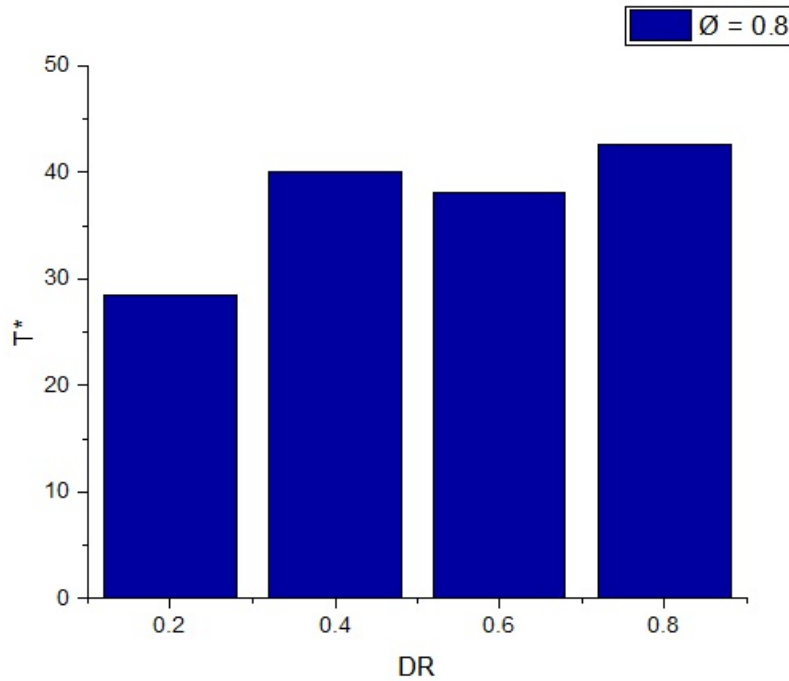


Figura 36.- Tiempo de mezclado para caso con  $\emptyset=0.8$ .

También, se aprecia en el modelo de mayor porosidad, un flujo incidente sobre las aristas que definen la cara frontal, las cuales intensifican el mezclado. Se observa igualmente en ambos modelos corrientes de alta velocidad bien definidas que delimitan zonas de recirculación y de bajas velocidades, donde los vórtices son encapsulados. Para el caso de menor porosidad, esta zona de alta velocidad es mayor que para el modelo de  $\emptyset=0.8$ . Otro caso particular se presenta en el medio poroso con  $\emptyset=0.4$  y  $DR=0.8$ , en el cual se tiene el mayor tiempo de mezclado ( $T^*$ ) de todos los casos analizados. Para explicar esto se encontró que es el único modelo donde se tiene la formación de 4 vórtices en los espacios laterales del cilindro cuadrado grande como se muestra en la figura 39.

Esto provoca que la velocidad en las secciones en color azul sea 10 veces menor que las presentadas en el flujo principal en color rojo. Esto puede entenderse como que el trazador será transportado por las corrientes de altas velocidades, y muy poco mezclado se llevará a cabo en aquellas regiones de flujo ocupadas por los vórtices de baja velocidad.

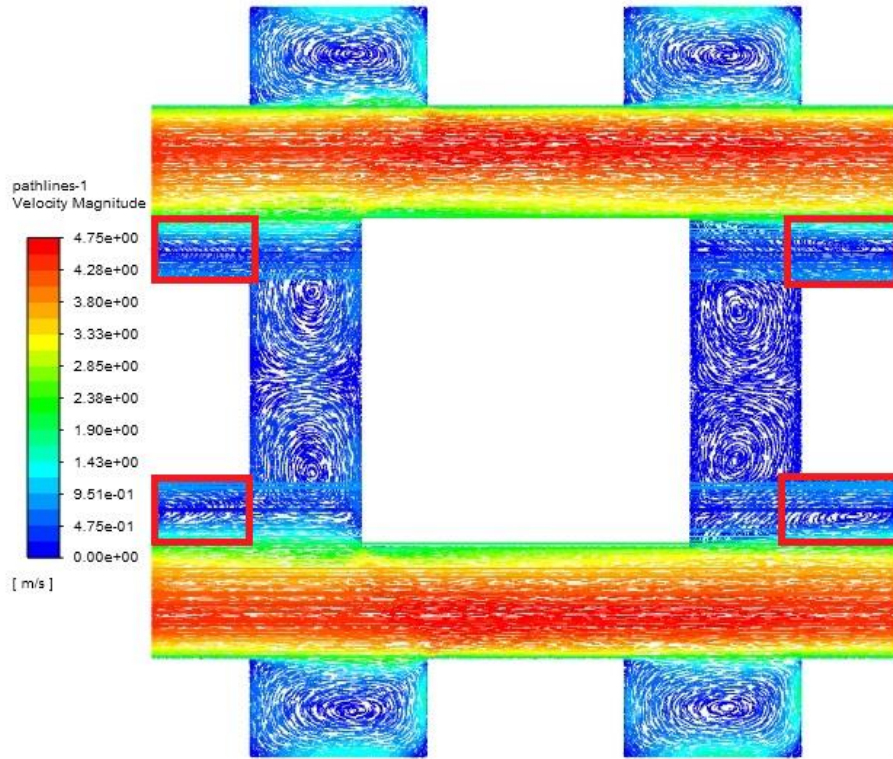


Figura 37.- Vectores de velocidad para  $\varnothing=0.6$  y  $DR=0.6$ .

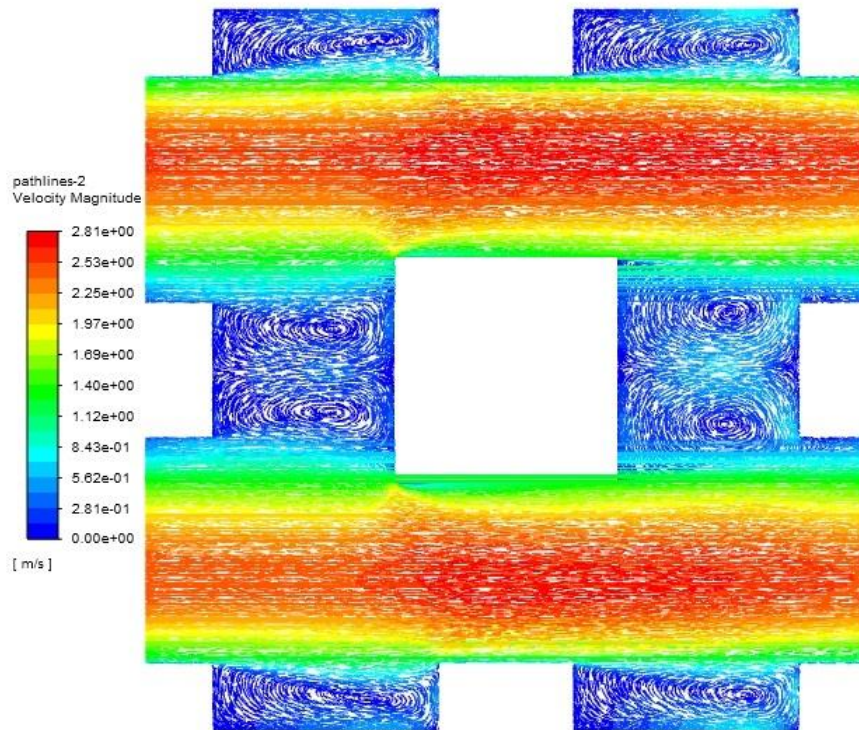


Figura 38.- Vectores de velocidad para  $\varnothing=0.6$  y  $DR=0.8$ .

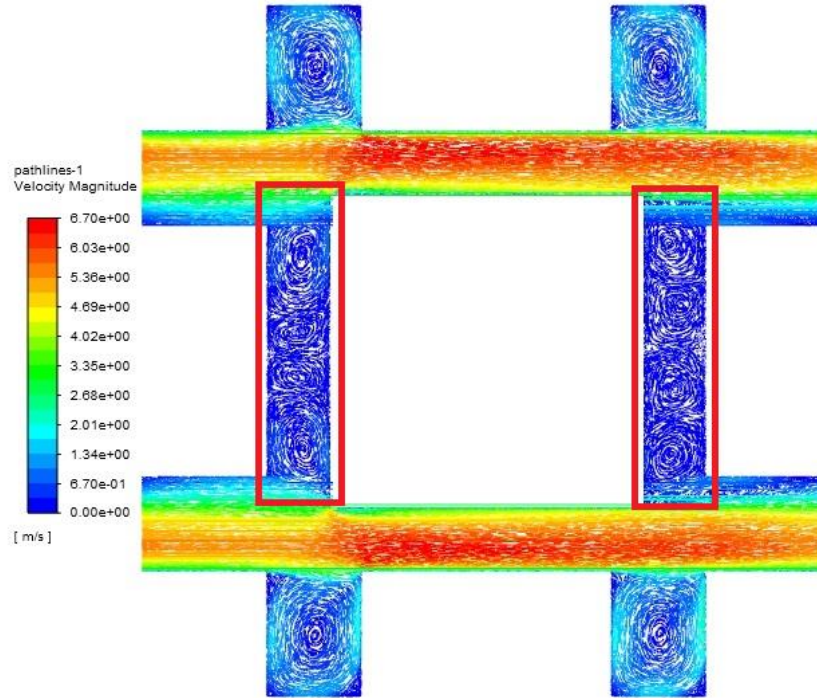


Figura 39.- Vectores de velocidad para  $\varnothing=0.4$  y  $DR=0.8$ .

Por otro lado, de las figuras 31 a 36 se considera que el tiempo de homogeneización para los cuatro casos con  $\varnothing=0.8$  es similar (existiendo una diferencia máxima del 33% entre los medios con  $DR=0.2$  y  $DR=0.8$ ), a comparación con los otros casos de porosidades donde se tienen diferencias de hasta el 96% en el tiempo de mezclado para las diferentes  $DR$ . La razón de este comportamiento es la formación de zonas de recirculación de flujo bien desarrolladas en todos los casos con porosidad de 0.8, descritas en la referencia [12].

En la Figura 40 se muestran los valores para la concentración adimensional para éstos casos, el valor máximo para  $C^*$  es de 13.08 y corresponde a una  $DR=0.8$ , con un tiempo de 0.39 s, el cual se estabiliza al llegar a los 4.8 s. El tiempo a partir del cual se inicia la homogeneización para los demás casos es  $t=1.1$  s para  $DR=0.2$ ,  $t=1.9$  s para  $DR=0.4$  y  $t=2.7$  s para  $DR=0.6$ .

Estos resultados infieren que en casos de transferencia de calor o masa donde se requiera mayor tiempo de residencia del flujo se prefirieran los medios con porosidad y relación de diámetro altos ( $\varnothing=0.7$  y  $0.8$ ,  $DR=0.8$ ), ya que en estos casos se tienen dos o inclusive cuatro zonas de recirculación.

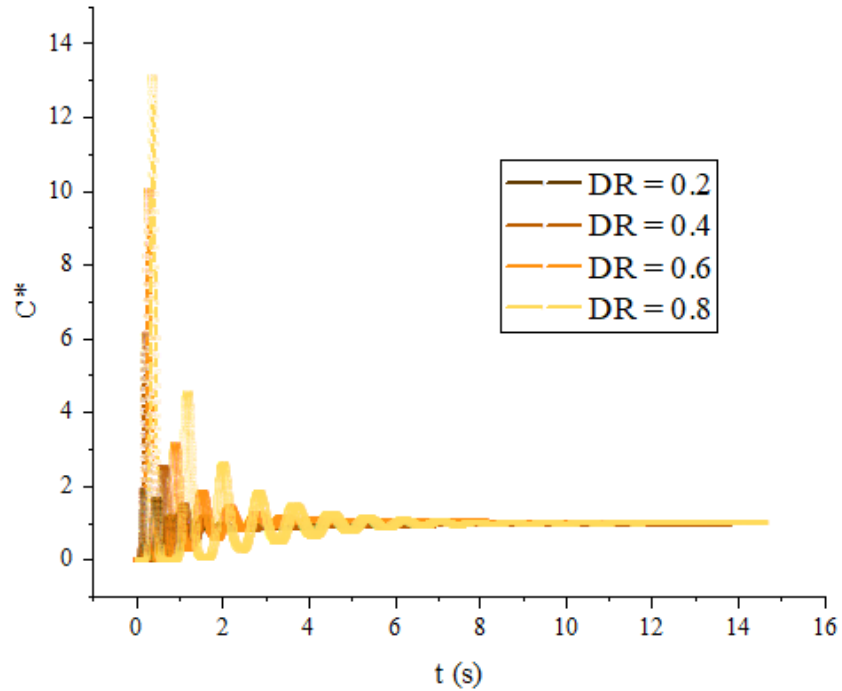


Figura 40.- Concentracion adimensional para  $\emptyset=0.8$ .

Para analizar el comportamiento del flujo se analizan los perfiles de velocidad entre los cilindros cuadrados, considerando los casos con  $\emptyset=0.4$  y  $\emptyset=0.8$ , para esto se trazo una linea de muestreo entre los cilindros cuadrados colocada en la parte intermedia de los mismos, tal como se muestra en la figura 41 que presenta el caso con  $\emptyset=0.8$  y  $DR=0.8$ .

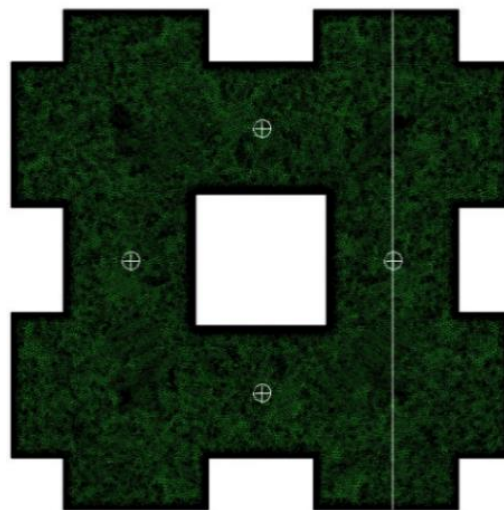


Figura 41.- Ejemplo de linea de muestreo para perfiles de velocidad.

En la figura 42a se aprecian los perfiles de velocidad para un medio con baja porosidad ( $\emptyset=0.4$ ) y se observa que el flujo presenta secciones de baja velocidad que ocupan del 50% al 70% del total de la región central, mientras que en los casos alta porosidad ( $\emptyset=0.8$ ) estas secciones de baja velocidad se presentan solo en el 40% de la región central, como se muestra en la figura 42b. Para los dos casos de porosidad presentados, los valores de mayor velocidad en las regiones libres de flujo se presentan cuando se tiene una relación de diámetros menor ( $DR=0.2$ ), esto se debe a la conservación de momento.

La velocidad en el caso con  $\emptyset=0.4$  y  $DR=0.2$  es 3.5 veces mas alta que para el mismo medio poroso con  $DR=0.8$ , sin embargo, en el caso del medio con alta porosidad ( $\emptyset=0.8$ ) la diferencia de velocidad para los mismos casos de  $DR$  es solo 1.6 veces mayor. En la investigación de Larsson et al. [16], los perfiles de velocidad (figura 42c) presentan un comportamiento de flujo similar al descrito, aunque el estudio experimental analiza un flujo laminar en un medio poroso con cilindros circulares.

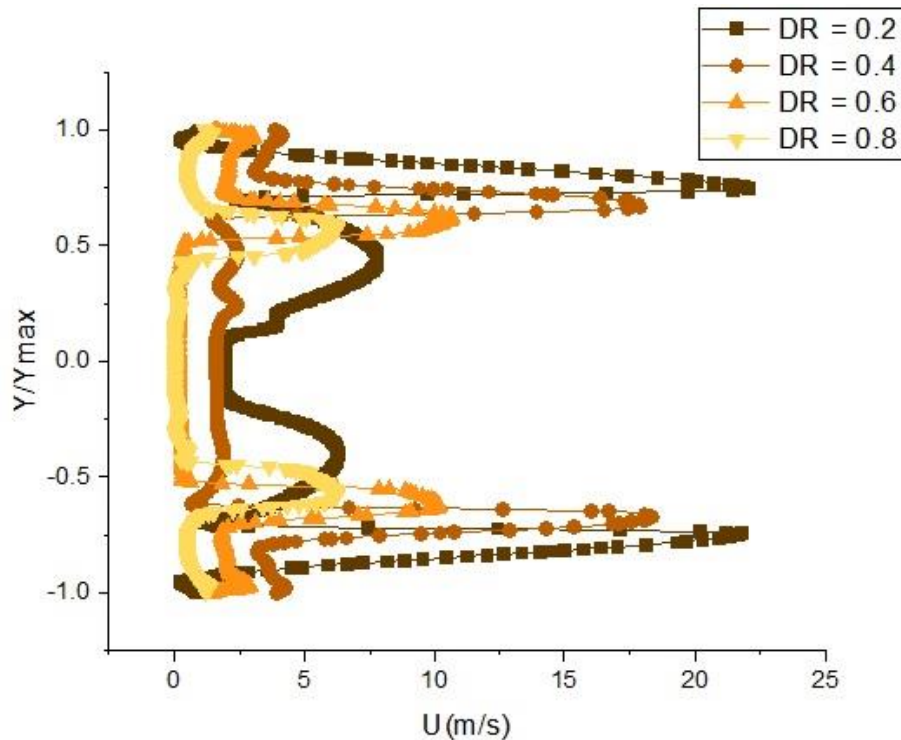


Figura 42a).- Perfiles de velocidad para  $\emptyset=0.4$ .

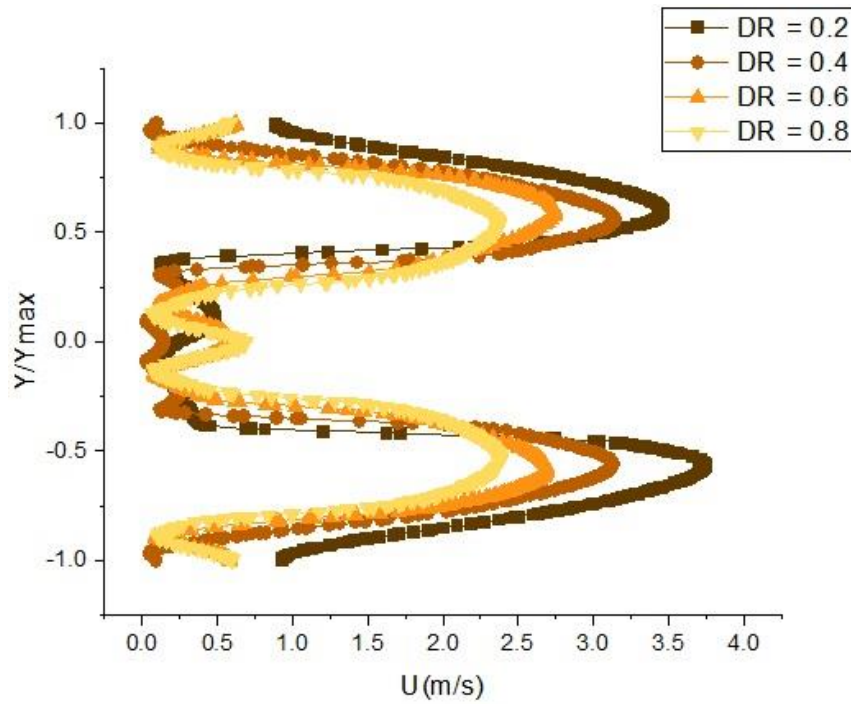


Figura 42b).- Perfiles de velocidad para  $\phi=0.8$ .

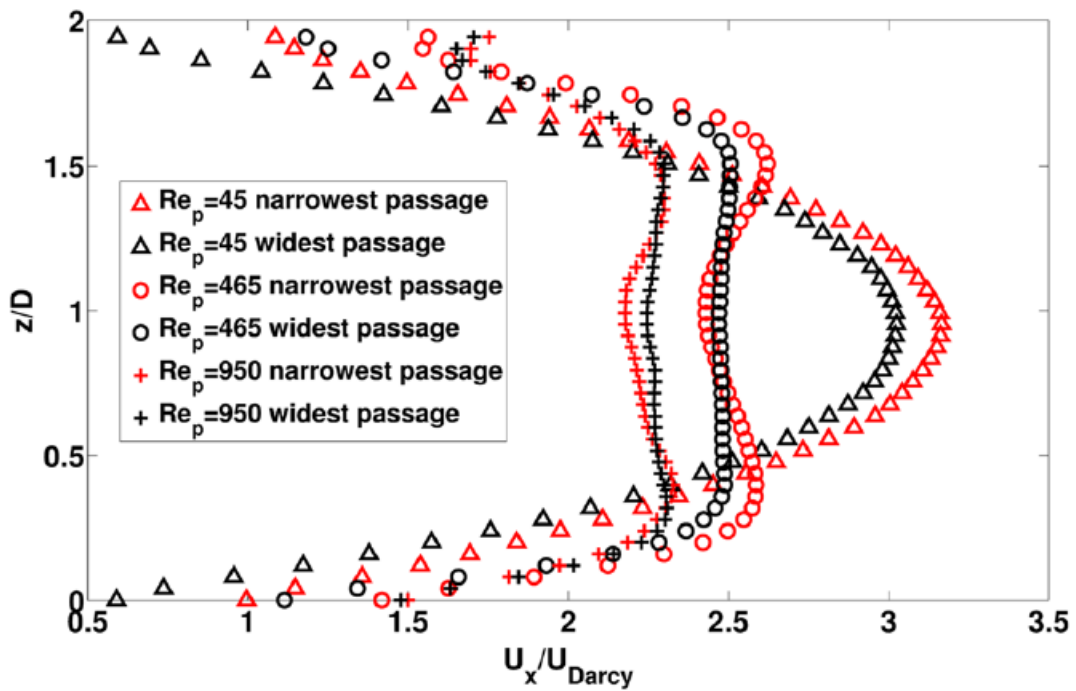


Figura 42c).- Perfiles de velocidad obtenidos por Larsson [16].

En la figura 43 se muestra el flujo en un arreglo de medio poroso obtenido con CFD para las condiciones de  $\text{Ø}=0.8$  y  $\text{DR}=0.6$ . Se aprecia claramente la formación de una zona de recirculación en color azul entre los cilindros cuadrados y el flujo de alta velocidad en color rojo. Esta información se compara/valida con los resultados del experimento realizado en el túnel de viento con el prototipo de medio poroso con las mismas condiciones geométricas de la simulación.

En el experimento también se encontró la formación de regiones de recirculación entre los cilindros cuadrados, tal como se aprecia en las figuras 44 a 55, y entre cada toma se tiene una diferencia de tiempo de 0.062s. De la figura 47 a la 52, se aprecia la formación de vórtices justo en la parte posterior a los cilindros cuadrados colocados al centro del prototipo. En la parte superior de los mismos, se tiene el paso del flujo de alta velocidad, donde se concentra gran parte del humo debido al efecto de la profundidad del medio poroso. En las tomas se observa la evolución de las capas de corte señaladas y la manera en la cual inciden sobre los cilindros laterales causando su distorsión. Este fenómeno como se mencionó con anterioridad, se relaciona con una intensificación del mezclado. En la parte inferior de la figura no se aprecia acumulación de humo debido a que el inyector del mismo se coloca en la parte central de la zona de pruebas.

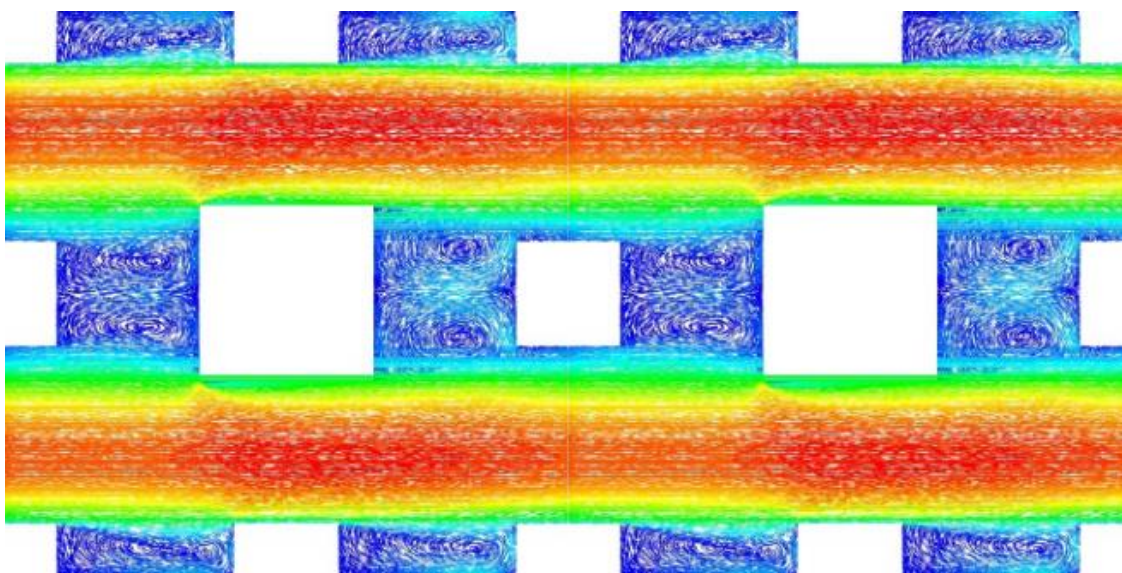


Figura 43.- Pathlines de velocidad para caso con  $\text{DR}=0.6$  y  $\text{Ø}=0.8$ .

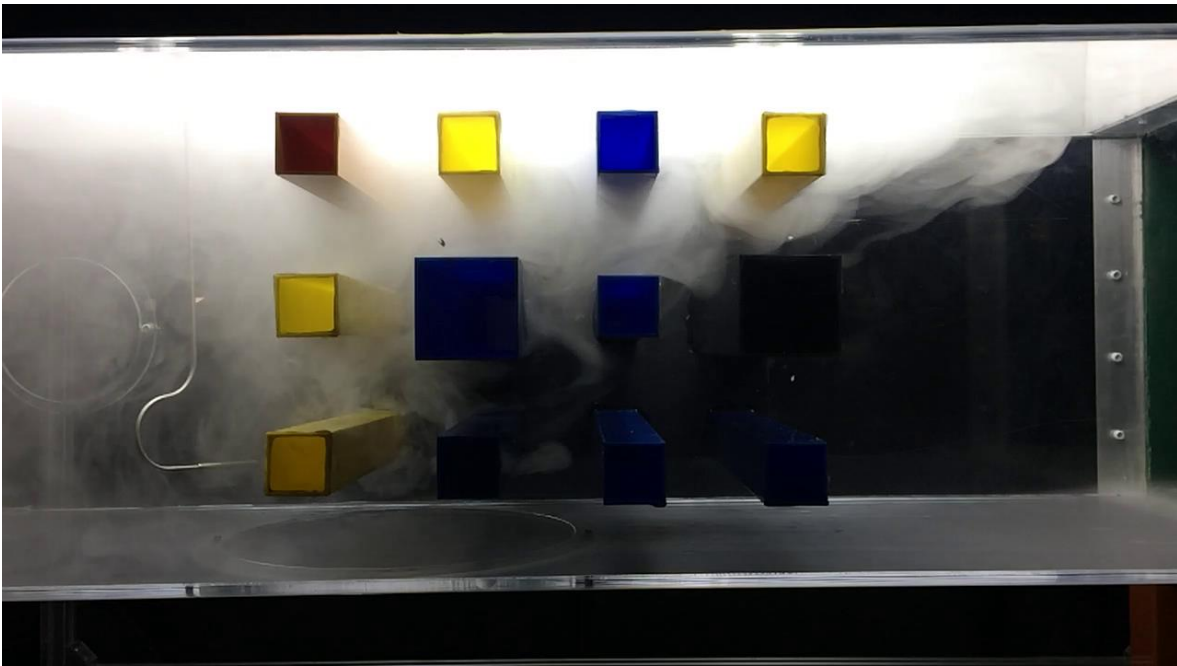


Figura 44.- Visualización de flujo en prototipo con  $\text{Ø}=0.8$  y  $\text{DR}=0.6$  para  $t=1$ .

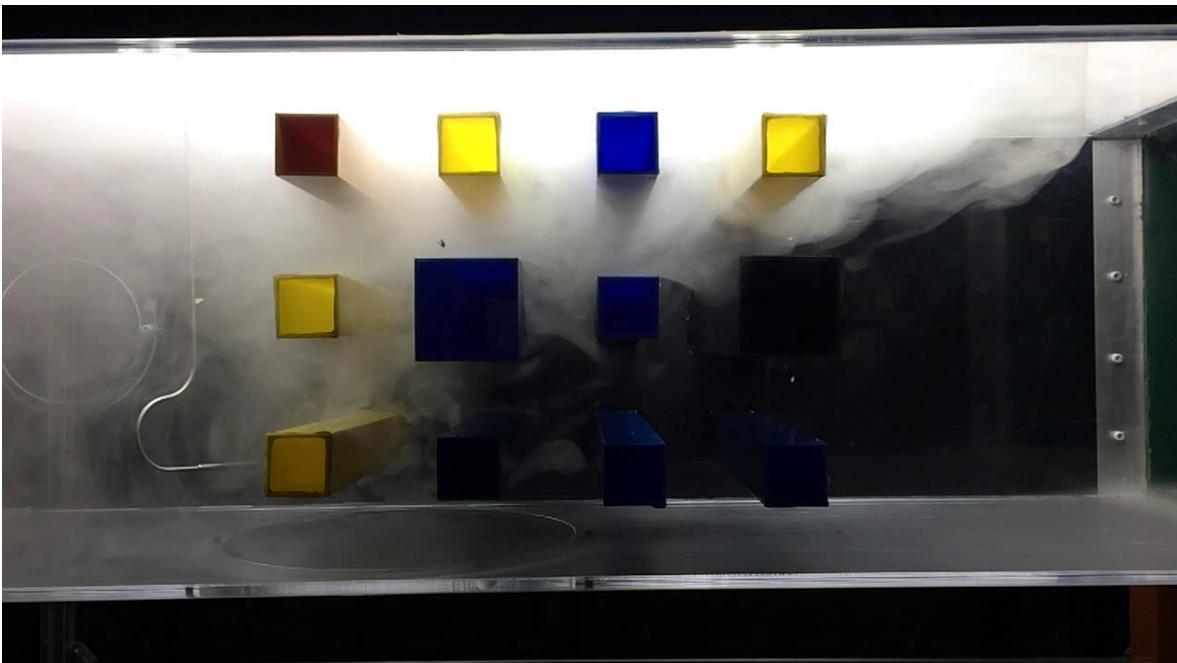


Figura 45.- Visualización de flujo en prototipo con  $\text{Ø}=0.8$  y  $\text{DR}=0.6$  para  $t=2$ .

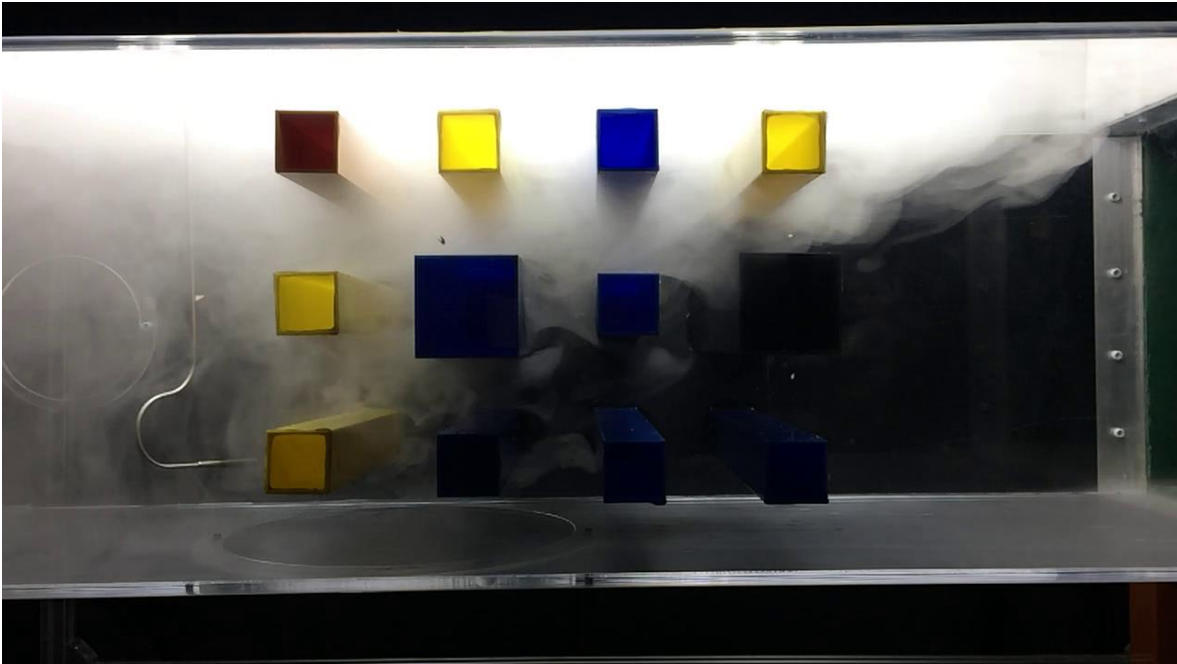


Figura 46.- Visualización de flujo en prototipo con  $\text{Ø}=0.8$  y  $\text{DR}=0.6$  para  $t=3$ .

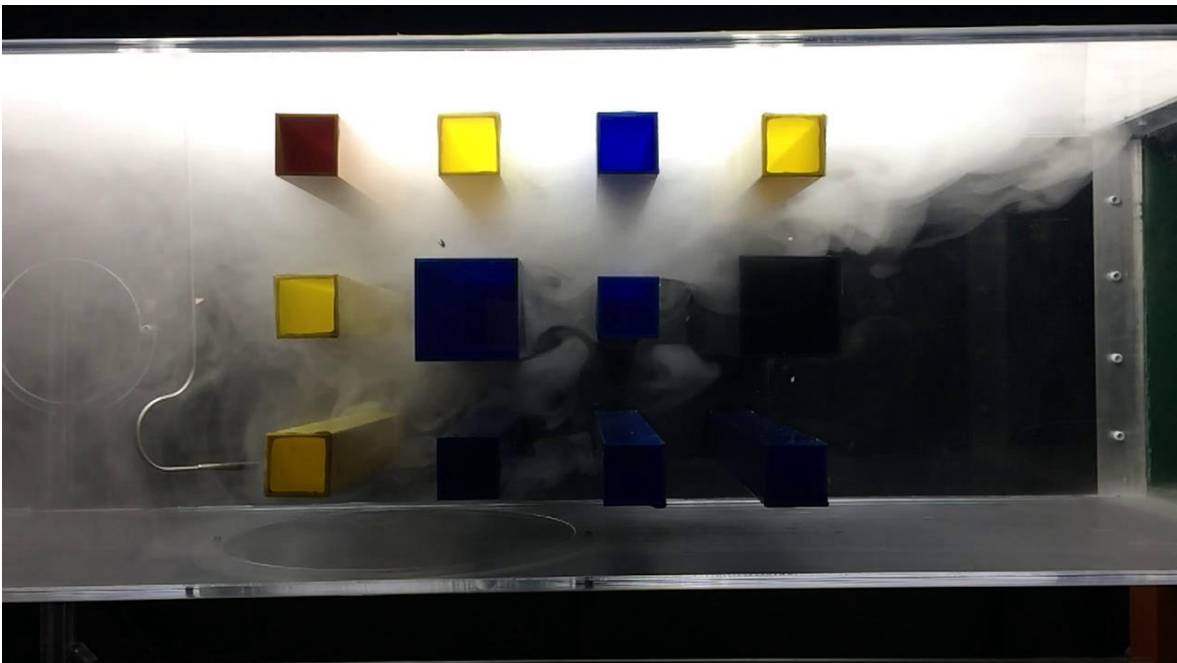


Figura 47.- Visualización de flujo en prototipo con  $\text{Ø}=0.8$  y  $\text{DR}=0.6$  para  $t=4$ .

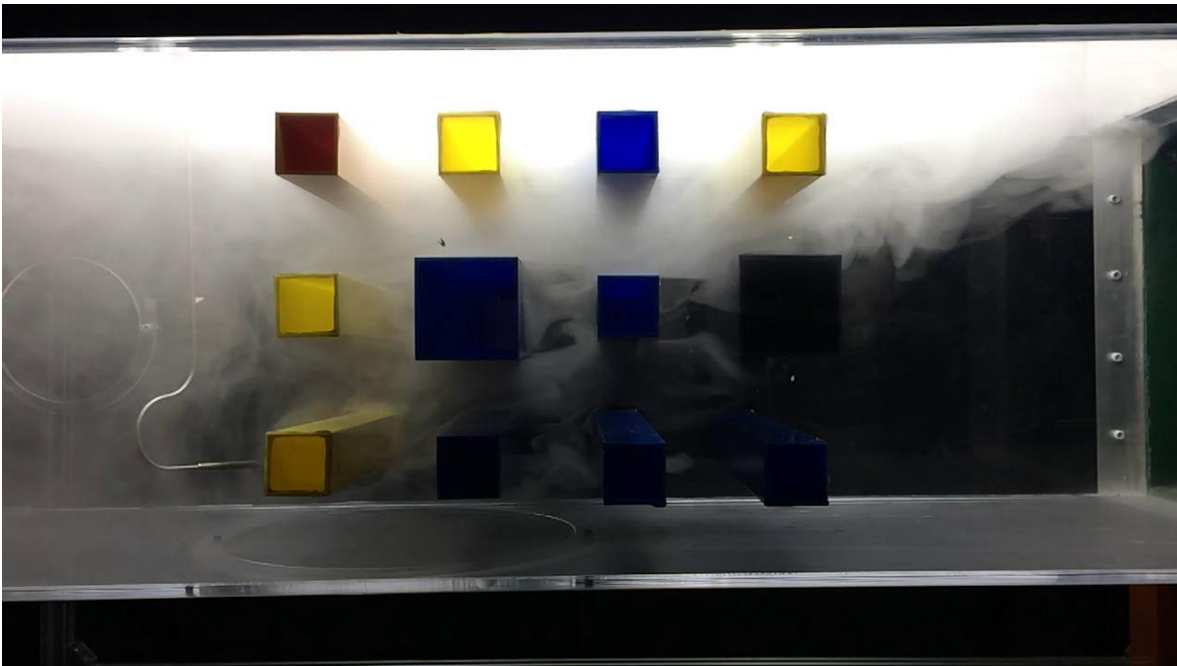


Figura 48.- Visualización de flujo en prototipo con  $\text{Ø}=0.8$  y  $\text{DR}=0.6$  para  $t=5$ .

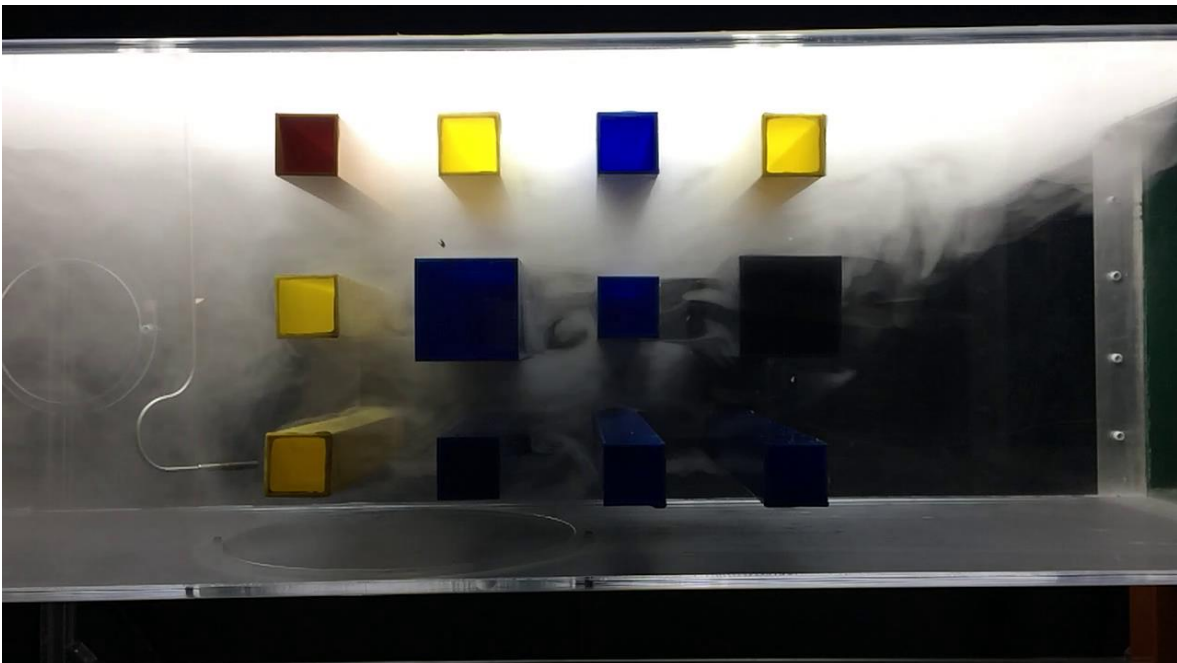


Figura 49.- Visualización de flujo en prototipo con  $\text{Ø}=0.8$  y  $\text{DR}=0.6$  para  $t=6$ .

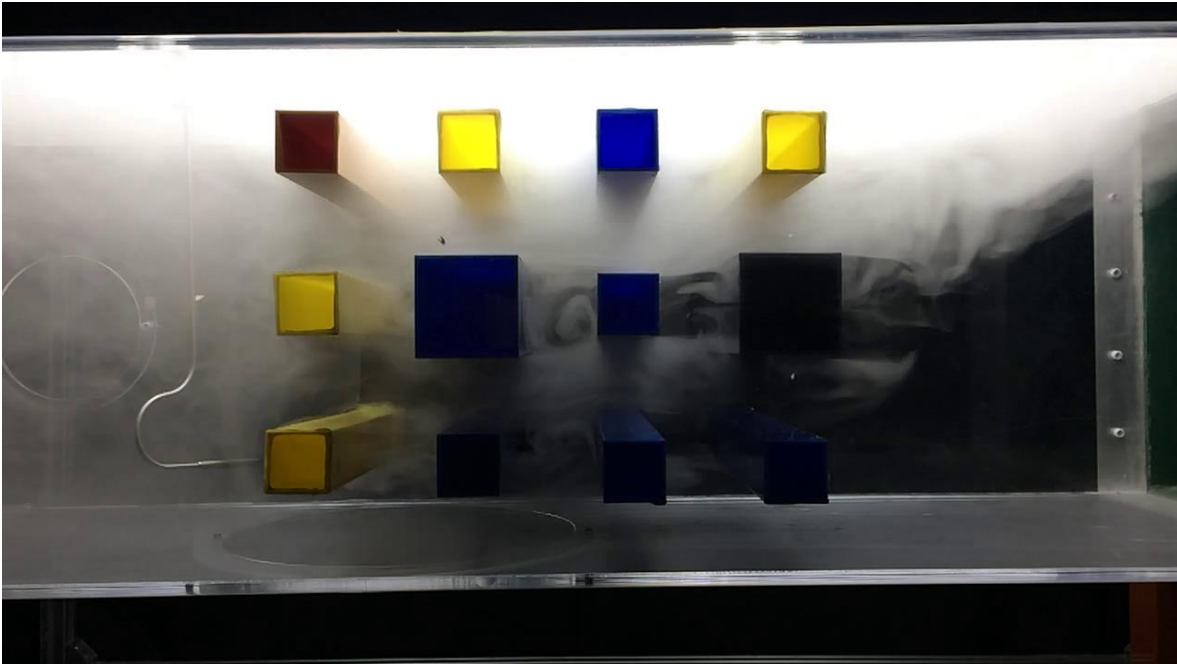


Figura 50.- Visualización de flujo en prototipo con  $\text{Ø}=0.8$  y  $\text{DR}=0.6$  para  $t=7$ .

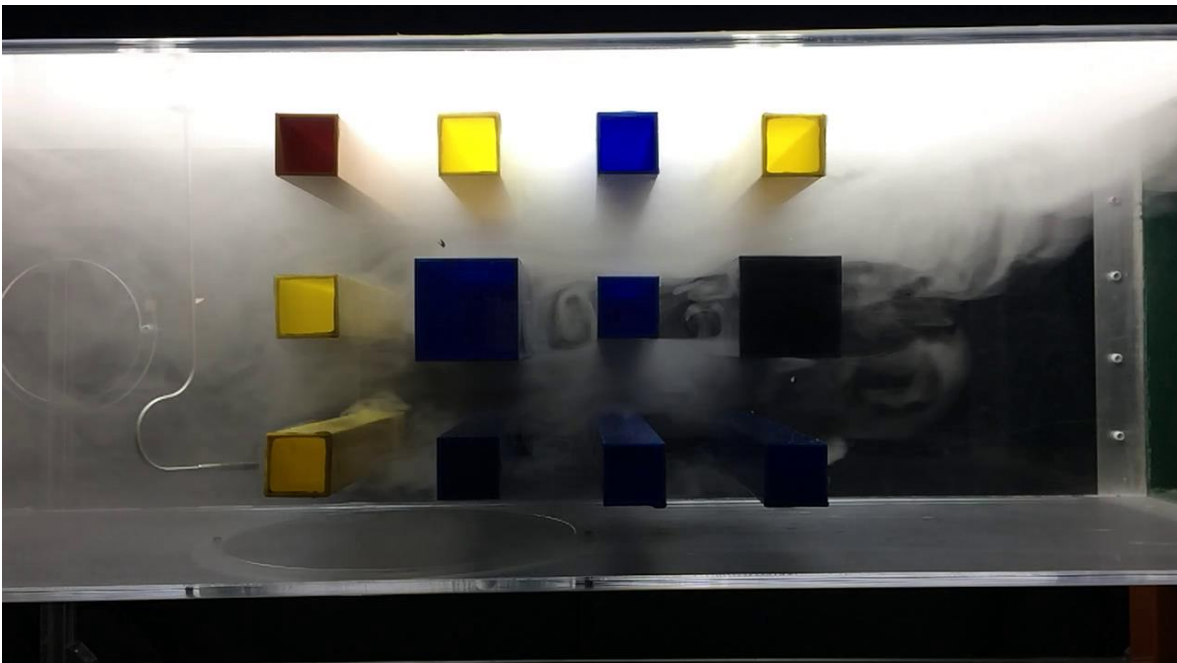


Figura 51.- Visualización de flujo en prototipo con  $\text{Ø}=0.8$  y  $\text{DR}=0.6$  para  $t=8$ .

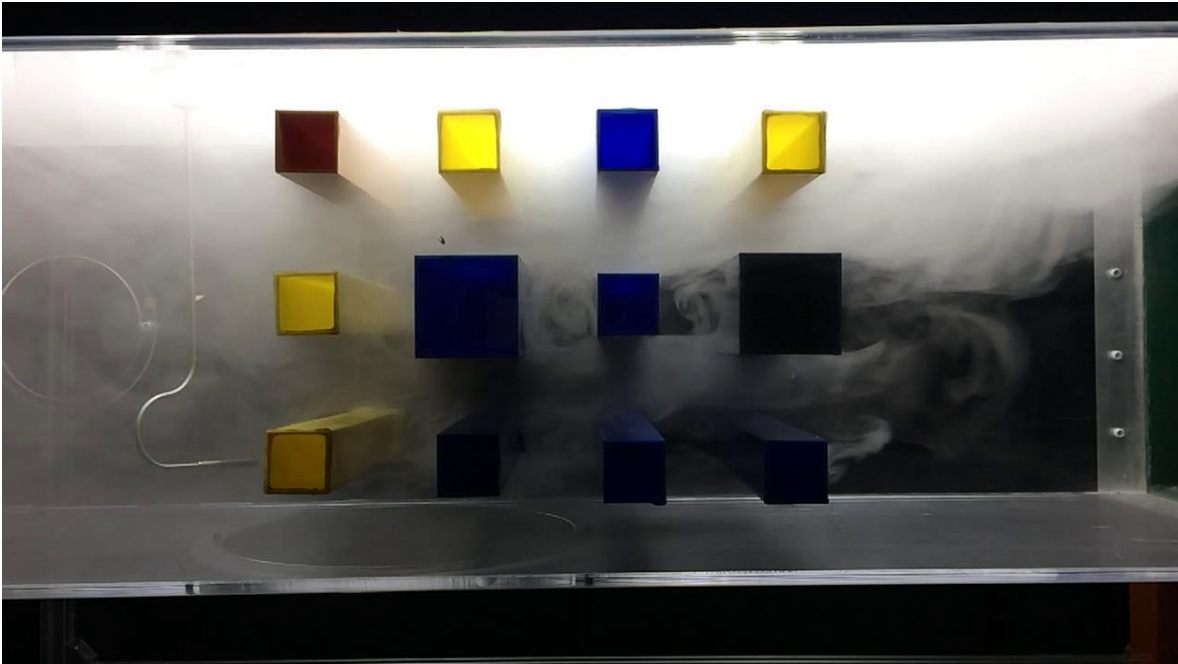


Figura 52.- Visualización de flujo en prototipo con  $\varnothing=0.8$  y  $DR=0.6$  para  $t=9$ .

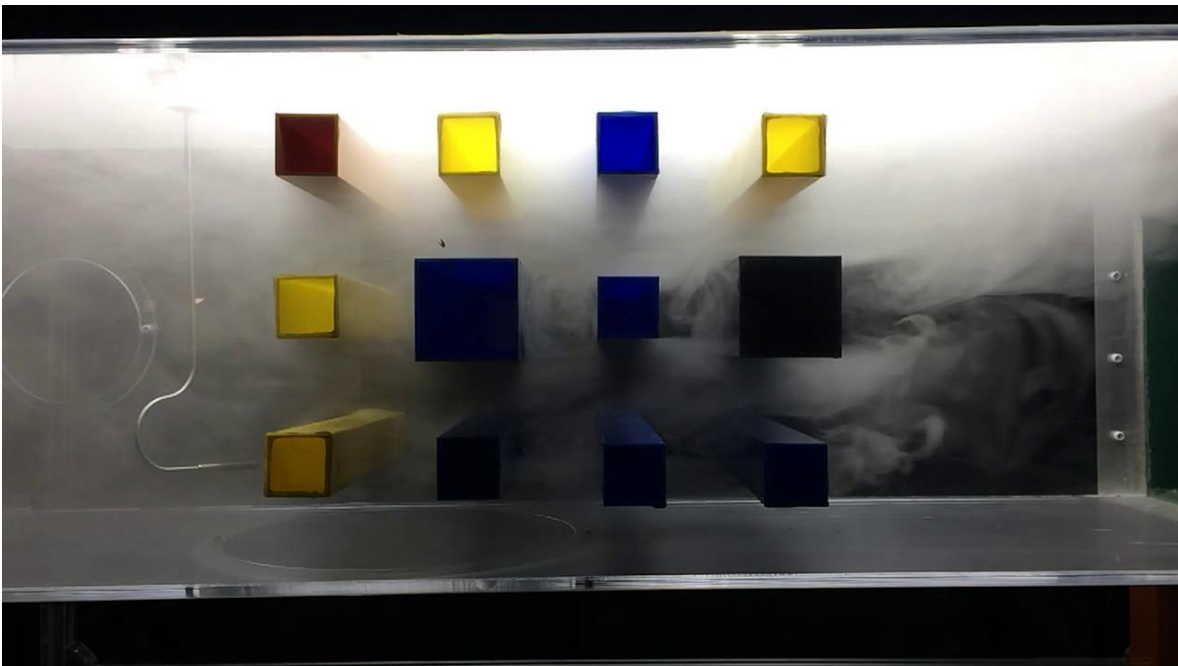


Figura 53.- Visualización de flujo en prototipo con  $\varnothing=0.8$  y  $DR=0.6$  para  $t=10$ .

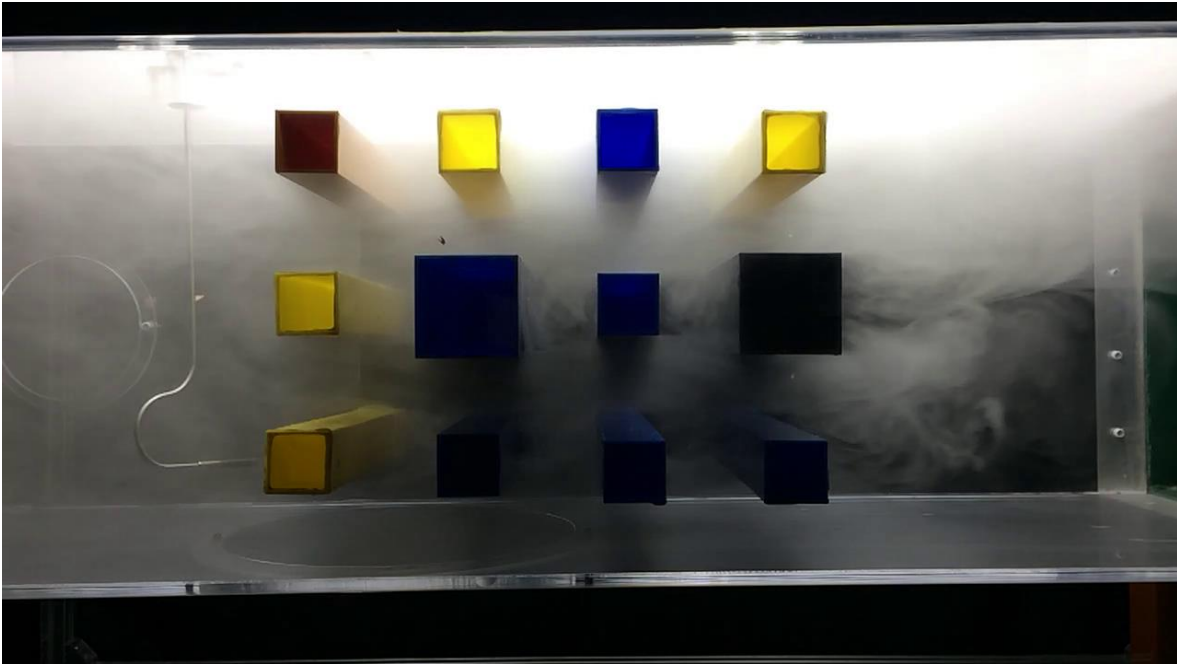


Figura 54.- Visualización de flujo en prototipo con  $\varnothing=0.8$  y  $DR=0.6$  para  $t=11$ .

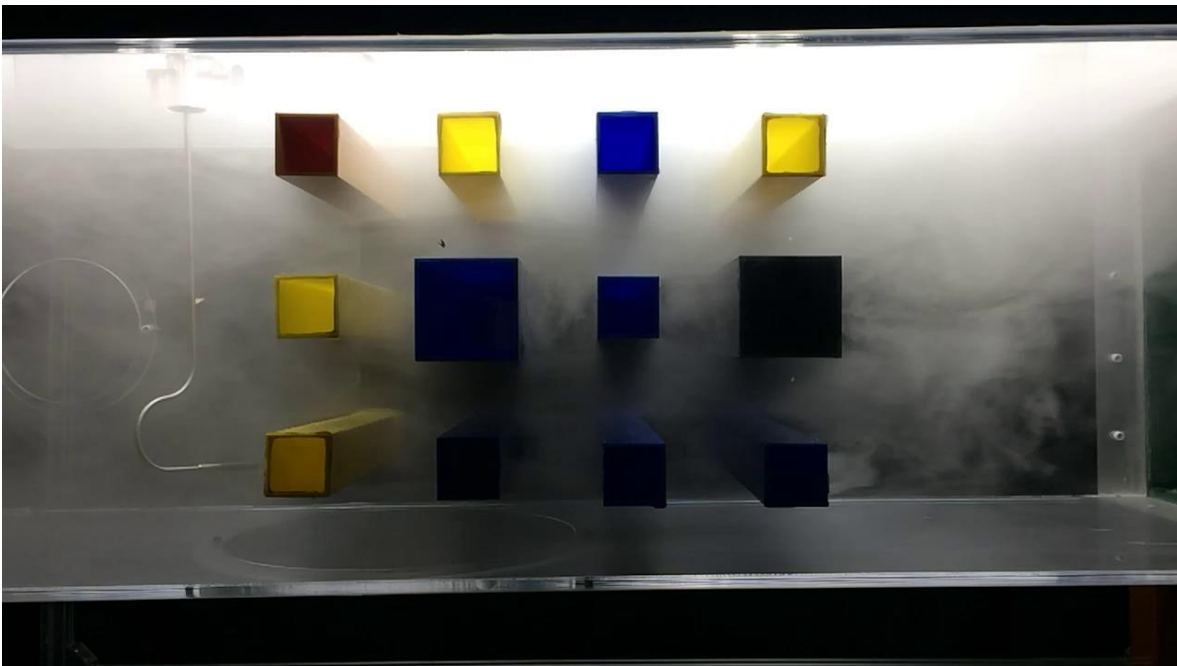


Figura 55.- Visualización de flujo en prototipo con  $\varnothing=0.8$  y  $DR=0.6$  para  $t=12$ .

## Conclusiones

Se realizó el análisis de flujo turbulento en un medio poroso con diferentes relaciones de diámetro y porosidad utilizando las técnicas de CFD y visualización de flujo.

A medida que se tiene una relación de diámetro más alta se requiere mayor tiempo para lograr un mezclado homogéneo del flujo. El mezclado más rápido se obtuvo para un  $DR=0.2$  para la porosidad de 0.3.

Para el caso con  $\emptyset=0.6$  y  $DR=0.6$  se encontró que en la parte superior e inferior del cilindro cuadrado pequeño se forma un vórtice, el cual disminuye el área efectiva de flujo y retarda el mezclado. En un medio poroso con  $\emptyset=0.4$  y  $DR=0.8$  se encontró la formación de 4 vórtices alrededor del cilindro cuadrado grande, en los cuales las velocidades fueron bajas.

Los perfiles de velocidad muestran que para un medio con  $\emptyset=0.4$  el flujo presenta secciones de baja velocidad que ocupan del 50% al 70% del total de la región central, y que para medios con  $\emptyset=0.8$  las secciones de baja velocidad presentan solo el 40%, además en estos modelos las estelas se desarrollan libremente, y el tiempo de mezclado en función de la  $DR$  es similar.

Los resultados experimentales validan la formación de dos vórtices en el medio poroso obtenidas con la técnica de simulación numérica.

## Referencias

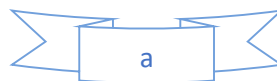
- [1] Y. Jin, M. F. Uth, A. V. Kuznetsov, and H. Herwig, "Numerical investigation of the possibility of macroscopic turbulence in porous media: A direct numerical simulation study," *J. Fluid Mech.*, vol. 766, pp. 76-103, 2015. <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.9>.
- [2] A. Rasam, G. Brethouwer, P. Schlatter, Q. Li, and A. V. Johansson, "Effects of modelling, resolution and anisotropy of subgrid-scales on large eddy simulations of channel flow," *J. Turbul.*, vol. 12, no. December, pp. 1-20, 2011. <https://doi.org/10.1080/14685248.2010.541920>
- [3] C. Hrenya, S. Miller, T. Mallo, and J. Sinclair, "Comparison of low Reynolds number k- $\epsilon$  turbulence models in predicting heat transfer rates for pipe flow," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 41, no. 11, pp. 1543-1547, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(97\)00208-1](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00208-1).
- [4] F. Kuwahara, T. Yamane, and A. Nakayama, "Large eddy simulation of turbulent flow in porous media," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 33, no. 4, pp. 411-418, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.12.011>.
- [5] P. Kundu, V. Kumar, Y. Hoarau, and I. M. Mishra, "Numerical simulation and analysis of fluid flow hydrodynamics through a structured array of circular cylinders forming porous medium," *Appl. Math. Model.*, vol. 40, no. 23-24, pp. 9848-9871, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.06.043>.
- [6] J. Tu, G.-H. Yeoh, and C. Liu, *Computational Fluid Dynamics, A Practical Approach*, Second. Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 2009.
- [7] D. C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, First ed. California: DCW Industries, 1993.
- [8] M. H. J. Pedras and M. J. S. de Lemos, "Macroscopic turbulence modeling for incompressible flow through undeformable porous media," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 44, no. 6, pp. 1081-1093, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00202-7](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00202-7).
- [9] A. Nakayama and F. Kuwahara, "A macroscopic turbulence model for flow in a porous medium," *J. Fluids Eng.*, vol. 121, no. June 1999, pp. 427-433, 1999. <https://doi.org/10.1115/1.2822227>.

- [10] A. Nakayama and F. Kuwahara, "A General Macroscopic Turbulence Model for Flows in Packed Beds, Channels, Pipes, and Rod Bundles," *J. Fluids Eng.*, vol. 130, no. 10, p. 101205, 2008. <https://doi.org/10.1115/1.2969461>.
- [11] J. Yang, M. Zhou, S. Y. Li, S. S. Bu, and Q. W. Wang, "Three-dimensional numerical analysis of turbulent flow in porous media formed by periodic arrays of cubic, spherical, or ellipsoidal particles," *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 136, no. 1, p. 011102, 2014. <https://doi.org/10.1115/1.4025365>.
- [12] A. Alonzo, A. Mendoza, M. Díaz, S. Martínez and E. Martínez, "Assessment of Low-Re turbulence models and analysis of turbulent flow in porous media consisting of square cylinders with different diameter ratios," *J. Fluids Eng.*, vol. 143, no. 1, p. 18, 2020. <https://doi.org/10.1115/1.4048284>.
- [13] P. Kundu, V. Kumar and I. M. Mishra, "Numerical modeling of turbulent flow through isotropic porous media," *Int. Journal of Heat and Mass transfer*, vol. 75, pp. 40-57, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.020>.
- [14] J. S. Weitzman, L. C. Samuel, A. E. Craig, R. B. Zeller, and S. G. Monismith, "On the use of refractive - index - matched hydrogel for fluid velocity measurement within and around geometrically complex solid obstructions," *Exp. Fluids*, vol. 55, no. November, pp. 1-12, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00348-014-1862-x>.
- [15] V. Patil and J. Liburdy, "Turbulent flow characteristics in a randomly packed porous bed based on particle image velocimetry measurements," *Phys. Fluids* vol. 25, 2013. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4802043>.
- [16] I. Larsson, T. Staffan and H. Lycksam, "Tomographic PIV of flow through ordered thin porous media," *Exp. Fluids*, vol. 59, no. 96, pp. 1-7, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00348-018-2548-6>.
- [17] P. Drach y O. Corbella, "Estudios para visualización de experimentos en túnel de viento: barrios de Copacabana e Ipanema" in *Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, agosto de 2016.
- [18] F. Sánchez, "Hidrología Superficial y Subterránea," 2<sup>a</sup> ed. Kindle Direct Publishing, 2022.

- [19] M. Potter & D. Wiggert, “Mecánica de fluidos”, 3ra. Edición, Thomson Learning, México, 2007.
- [20] R. Schaum, J. Evett, & C. Liu, “Mecánica de los fluidos e Hidráulica”, Ed. McGraw–Hill/Interamericana de España, Madrid, 2005.
- [21] D. Wilcox, “Turbulence Modeling for CFD”, Tutorial, 2006.
- [22] Clay Mathematics Institute, “Navier-Stokes Equation” [En línea]. Available: <http://www.claymath.org/millennium-problems/navier%E2%80%93stokes-equation>.
- [23] L. Morales, R. Sanjuan, N. Ramos, O. Morales, A. Mendoza y A. Alonzo, “Análisis numérico de la dispersión de un contaminante a través de un medio poroso simplificado,” Rev. Ciencias Tecnológicas, vol. 4, no. 2, pp. 87-98, 2021. <https://doi.org/10.37636/recit.v428798>.
- [24] O. Morales, A. Gómez, M. Paz, J. Paz y L. Ortega, “Diseño y construcción de túnel de viento subsónico para laboratorio de Aeroespacial de ECITEC-UABC,” Memorias del XXI Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 2015.
- [25] Fotografía tipo de iluminación recuperado el 5 de mayo de 2022 de: <http://iestrayamar.es/files/doc1920/nopresencial/grupos11/tareas11/4Iluminacin-Foto.pdf>.
- [26] O. Morales, J. Paz, M. Paz, E. Sumbarda y J. Arciniega, “Inserción de Honeycomb en túnel de viento de la FCITEC,” Rev. Ciencias Tecnológicas, vol. 4, no. 3, pp. 187-194, 2021. <https://doi.org/10.37636/recit.v43187194>.
- [27] Taller de composición e iluminación de estudio recuperado el 6 de mayo de 2022 de: <https://www.uv.mx/personal/lenunez/files/2013/06/ILUMINACION-PROFESIONAL-EL-ESTUDIO.pdf>.
- [28] Perfil de aluminio estructural, recuperado el 6 de mayo de 2022 de: [https://merkatronix.com/index.php?id\\_product=240&controller=product&id\\_lang=4](https://merkatronix.com/index.php?id_product=240&controller=product&id_lang=4)
- [29] Generador de humo de la marca Aerotech, recuperado el 6 de mayo de 2022 de: <https://www.ate-aerotech.co.uk/capabilities/standard-products/smoke-generator/>

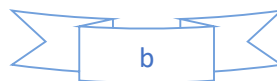
# ANEXOS:

**Tutorial secuencia numérica.**



Para obtener un monitoreo en el medio poroso se asignan 4 puntos de visualización, las coordenadas de estos puntos para todos los casos analizados se muestran en la siguiente tabla A1, la distribución de los puntos para el caso de  $\varnothing=0.8$  y  $DR=0.6$  se observa en la figura A2.

Puntos de visualización										
Caso	DR	Porosidad (Phi)	P1 (x)	P1 (y)	P2 (x)	P2 (y)	P3 (x)	P3 (y)	P4 (x)	P4 (y)
1	0.20	0.30	-0.2581110	0.0000000	0.0000000	0.2581110	0.2581110	0.0000000	0.0000000	-0.2581110
2		0.40	-0.2707800	0.0000000	0.0000000	0.2707800	0.2707800	0.0000000	0.0000000	-0.2707800
3		0.50	-0.2870800	0.0000000	0.0000000	0.2870800	0.2870800	0.0000000	0.0000000	-0.2870800
4		0.60	-0.3091700	0.0000000	0.0000000	0.3091700	0.3091700	0.0000000	0.0000000	-0.3091700
5		0.80	-0.3958000	0.0000000	0.0000000	0.3958000	0.3958000	0.0000000	0.0000000	-0.3958000
Caso	DR	Porosidad (Phi)	P1 (x)	P1 (y)	P2 (x)	P2 (y)	P3 (x)	P3 (y)	P4 (x)	P4 (y)
6	0.40	0.30	-0.256757300	0.000000000	0.000000000	0.256757300	0.256757300	0.000000000	0.000000000	-0.256757300
7		0.40	-0.271257295	0.000000000	0.000000000	0.271257295	0.271257295	0.000000000	0.000000000	-0.271257295
8		0.50	-0.290058132	0.000000000	0.000000000	0.290058132	0.290058132	0.000000000	0.000000000	-0.290058132
9		0.70	-0.352638854	0.000000000	0.000000000	0.352638854	0.352638854	0.000000000	0.000000000	-0.352638854
10		0.80	-0.415036763	0.000000000	0.000000000	0.415036763	0.415036763	0.000000000	0.000000000	-0.415036763
Caso	DR	Porosidad	P1 (x)	P1 (y)	P2 (x)	P2 (y)	P3 (x)	P3 (y)	P4 (x)	P4 (y)
11	0.60	0.30	-0.265472902	0.000000000	0.000000000	0.265472902	0.265472902	0.000000000	0.000000000	-0.265472902
12		0.40	-0.282737334	0.000000000	0.000000000	0.282737334	0.282737334	0.000000000	0.000000000	-0.282737334
13		0.60	-0.335043856	0.000000000	0.000000000	0.335043856	0.335043856	0.000000000	0.000000000	-0.335043856
14		0.70	-0.379140294	0.000000000	0.000000000	0.379140294	0.379140294	0.000000000	0.000000000	-0.379140294
15		0.80	-0.453112888	0.000000000	0.000000000	0.453112888	0.453112888	0.000000000	0.000000000	-0.453112888
Caso	DR	Porosidad	P1 (x)	P1 (y)	P2 (x)	P2 (y)	P3 (x)	P3 (y)	P4 (x)	P4 (y)
16	0.80	0.40	-0.300756535	0.000000000	0.000000000	0.300756535	0.300756535	0.000000000	0.000000000	-0.300756535
17		0.50	-0.327076149	0.000000000	0.000000000	0.327076149	0.327076149	0.000000000	0.000000000	-0.327076149
18		0.60	-0.362731402	0.000000000	0.000000000	0.362731402	0.362731402	0.000000000	0.000000000	-0.362731402
19		0.70	-0.414978632	0.000000000	0.000000000	0.414978632	0.414978632	0.000000000	0.000000000	-0.414978632
20		0.80	-0.502624329	0.000000000	0.000000000	0.502624329	0.502624329	0.000000000	0.000000000	-0.502624329



En el software FLUENT® en la pestaña *Surface* se selecciona la opción **create** (point) y en la ventana que se despliega se colocan las coordenadas donde se indicaran los puntos de monitoreo mostrados en la tabla A1, como se aprecia a continuación:

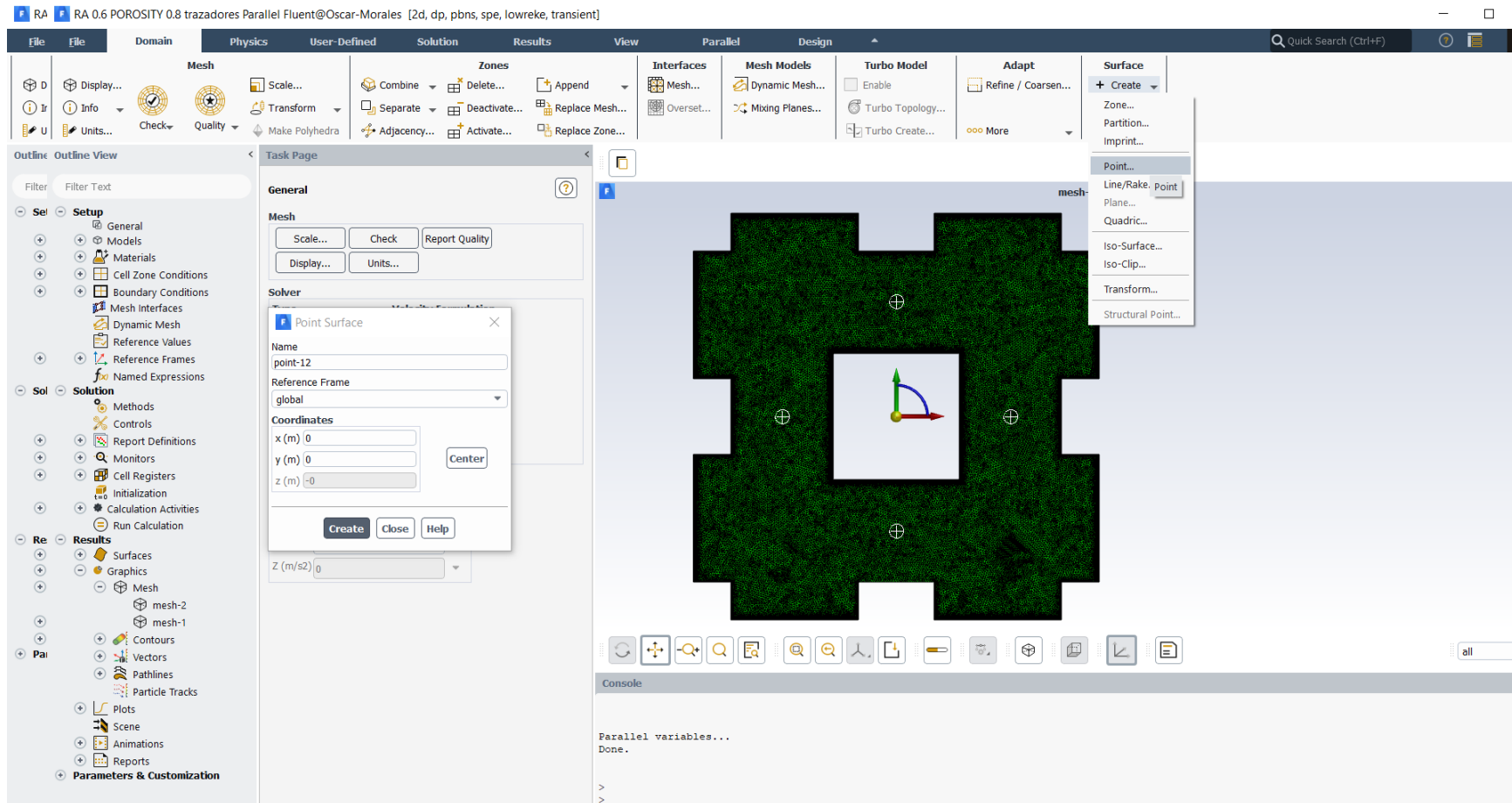


Figura A2: Asignación de puntos de monitoreo.

Para determinar el tiempo de difusión del fluido en el medio poroso deben agregarse trazadores en el dominio computacional, las coordenadas para ingresar los mismos se especifican en la siguiente tabla A3, en la que se muestran todos los casos estudiados.

			Trazadores			
Caso	DR	Porosidad (Phi)	P1 (x)	P1 (y)	P2 (x)	P2 (y)
1	0.20	0.30	-0.28623	0.1581100	-0.28623	-0.1581100
2		0.40	-0.31157	0.1707800	-0.31157	-0.1707800
3		0.50	-0.34417	0.1870800	-0.34417	-0.1870800
4		0.60	-0.38833	0.2091700	-0.38833	-0.2091700
5		0.80	-0.56161	0.2958025	-0.56161	-0.2958025
Caso	DR	Porosidad	P1 (x)	P1 (y)	P2 (x)	P2 (y)
6	0.40	0.30	-0.3335146	0.1817600	-0.3335146	-0.1817600
7		0.40	-0.3625146	0.1962600	-0.3625146	-0.1962600
8		0.50	-0.4001200	0.2150600	-0.4001200	-0.2150600
9		0.70	-0.5252780	0.2776400	-0.5252780	-0.2776400
10		0.80	-0.6500735	0.3400400	-0.6500735	-0.3400400
Caso	DR	Porosidad	P1 (x)	P1 (y)	P2 (x)	P2 (y)
11	0.60	0.30	-0.4009458	0.2154730	-0.4009458	-0.2154730
12		0.40	-0.4354747	0.2327400	-0.4354747	-0.2327400
13		0.60	-0.5400900	0.2850439	-0.5400900	-0.2850439
14		0.70	-0.6282800	0.3291400	-0.6282800	-0.3291400
15		0.80	-0.7762258	0.4031129	-0.7762258	-0.4031129
Caso	DR	Porosidad	P1 (x)	P1 (y)	P2 (x)	P2 (y)
16	0.80	0.40	-0.5215100	0.2757565	-0.5215100	-0.2757565
17		0.50	-0.5741500	0.3020760	-0.5741500	-0.3020760
18		0.60	-0.6454600	0.3377314	-0.6454600	-0.3377314
19		0.70	-0.7499600	0.3899800	-0.7499600	-0.3899800
20		0.80	-0.9252500	0.5023840	-0.9252500	-0.5023840



En la pestaña **Adapt** se selecciona la opción **refine/coarsen** y se despliega una ventana en donde se elige **cell register** → **New** y de la nueva ventana seleccionar **Region**, con esto aparece la ventana de registro (Register) en la cual se colocan las coordenadas de los trazadores mostrados en la tabla A3, como se aprecia a continuación:

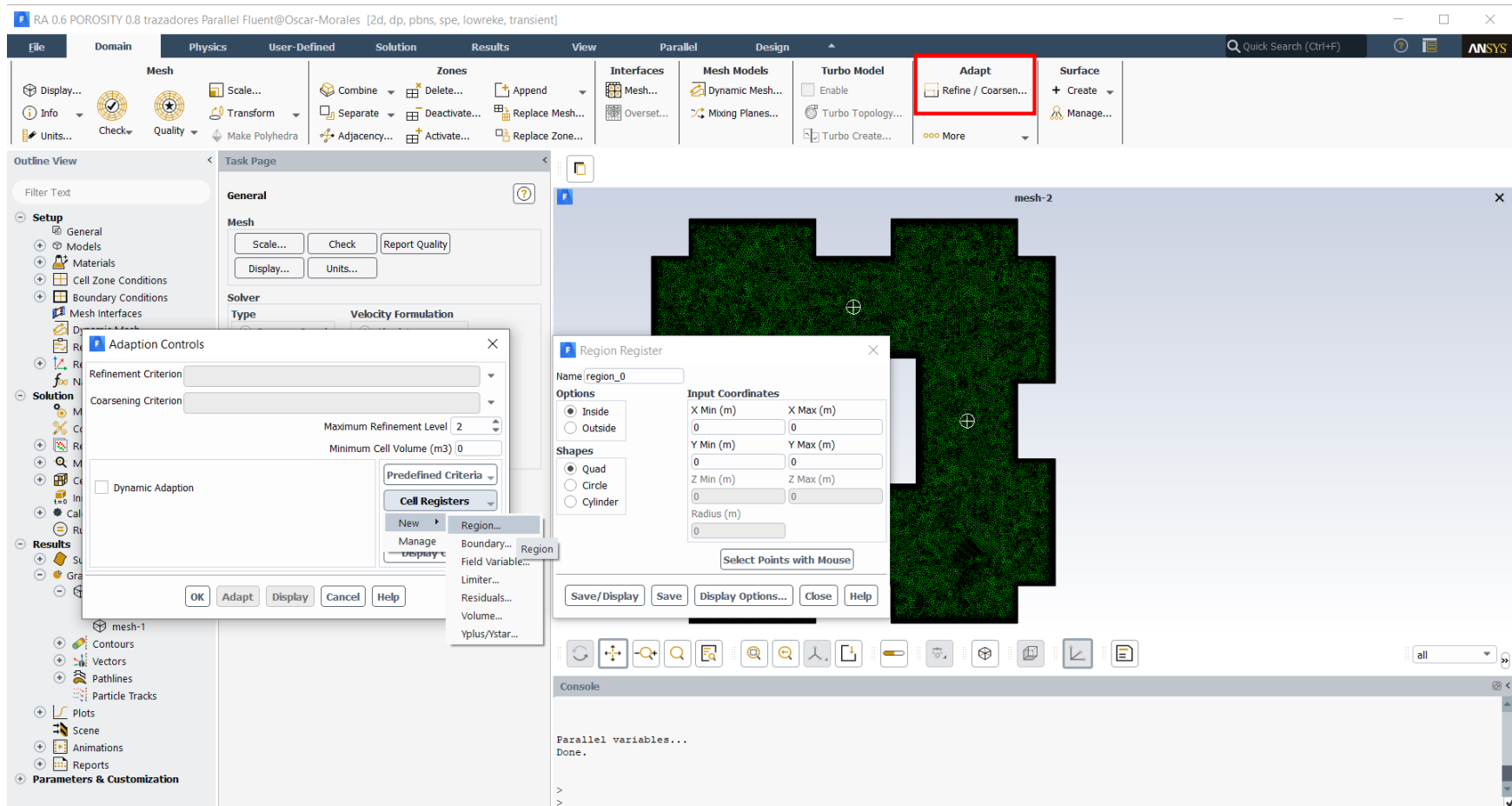


Figura A4: Asignación de Trazadores.

En la ventana de **Region Register** debe seleccionarse **Circle** en la opción de **Shapes**, e identificando cada trazador por un número (1o 2) se colocan sus coordenadas y se asigna el radio de la misma, para este caso se utilizó un valor de 0.0125m que representa el 2.5% de la sección transversal del dominio computacional.

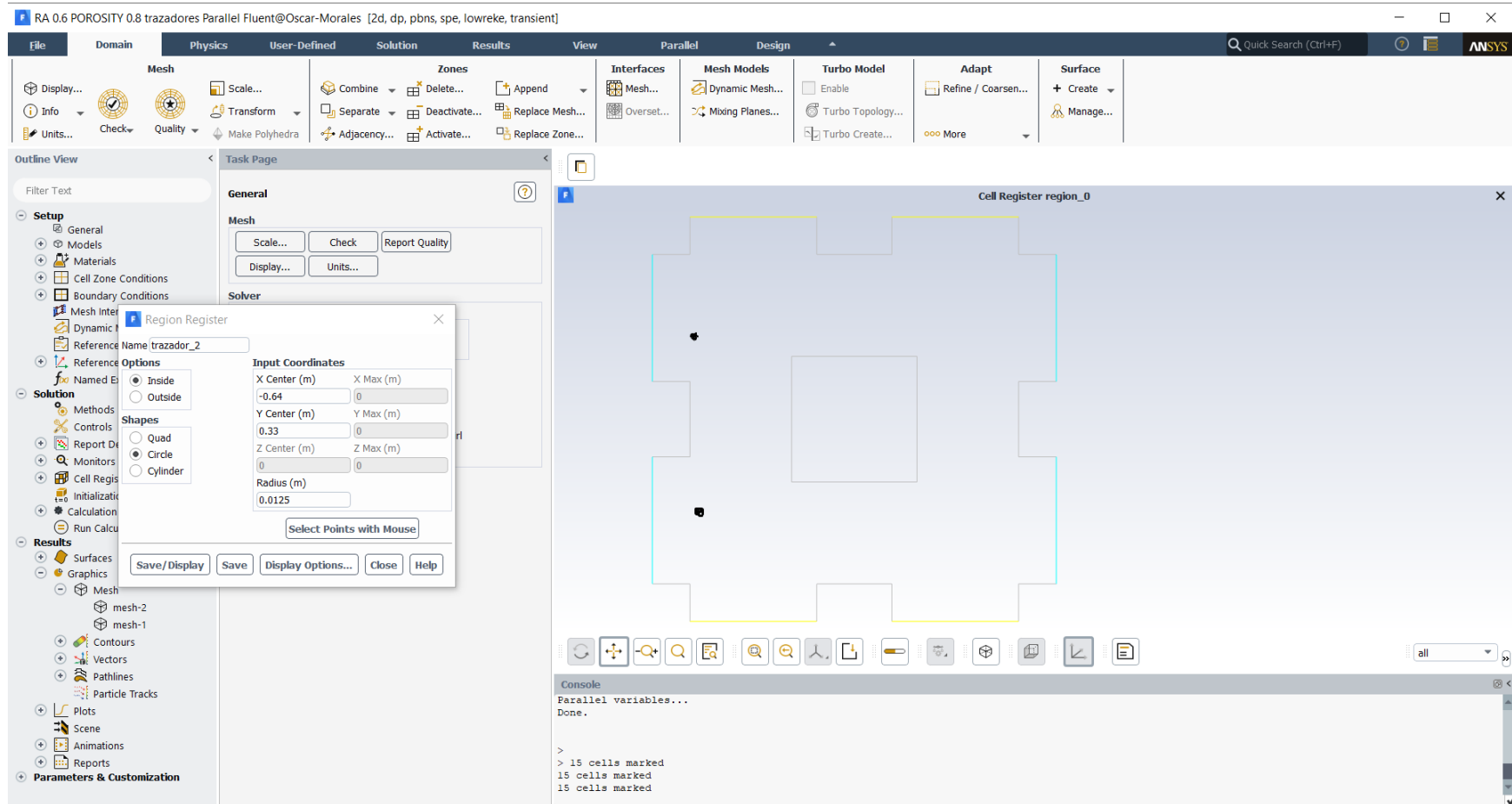


Figura A5: Inserción de trazadores.



Una vez asignados los puntos de monitoreo y trazadores se inicia la solución en el software Fluent® como se describe a continuación:

1.- Establecer que se trabajara con flujo transitorio y habilitar el modelo de transporte de especies.

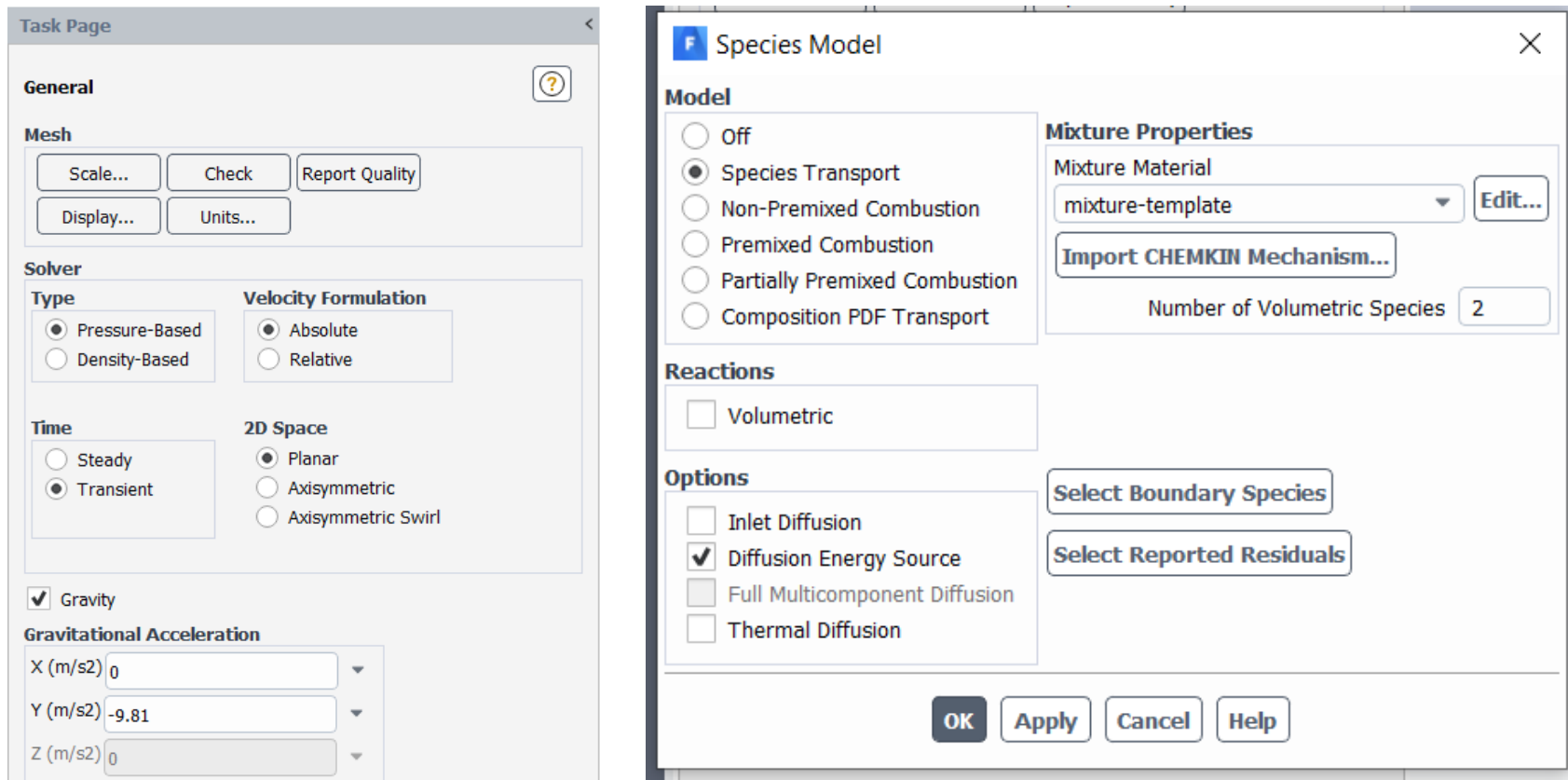


Figura A6.- Ventanas general y del modelo de especies.



2.- En el panel de **materials** seleccionar **air** y en la ventana que se despliega cambiar el nombre por trazador y seleccionar el botón **change/create** e indicar que **No** a la nueva ventana.

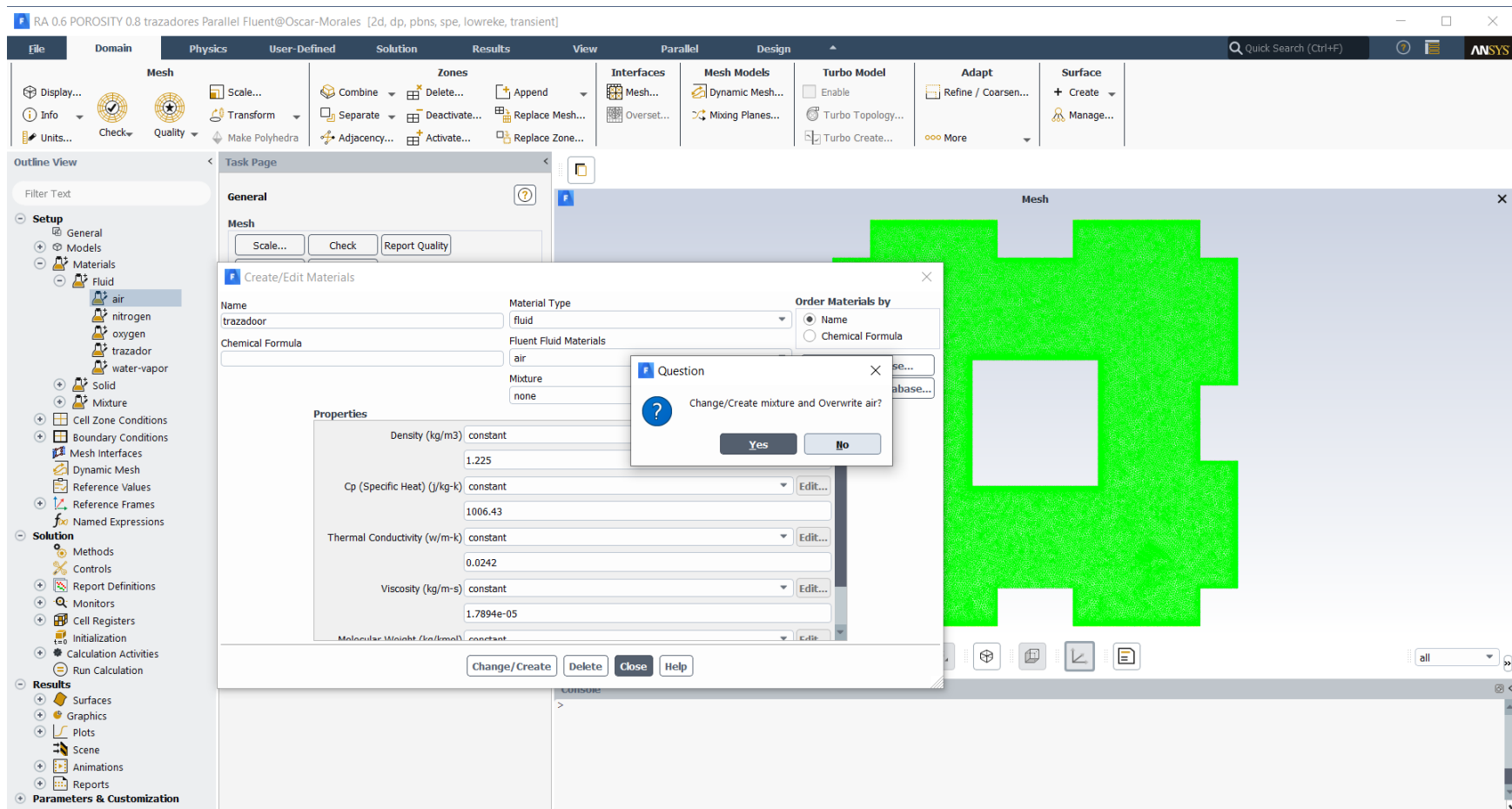


Figura A7.- Crear el material para el trazador.

3.- En el panel de **Mixture** seleccionar **mixture-template** y en la ventana de **Crate/Edit Materials** dar click en el botón de *Edit..* ubicado a la derecha de **Mixture Species** y en la ventana que se abrirá **Species** ubicar el trazador y el air en el cuadro superior derecho denominado **Selected Species**, para ello se utiliza los botones *Add* y *Remove*, como se aprecia en la figura A8. NOTA: dejar seleccionado trazador.

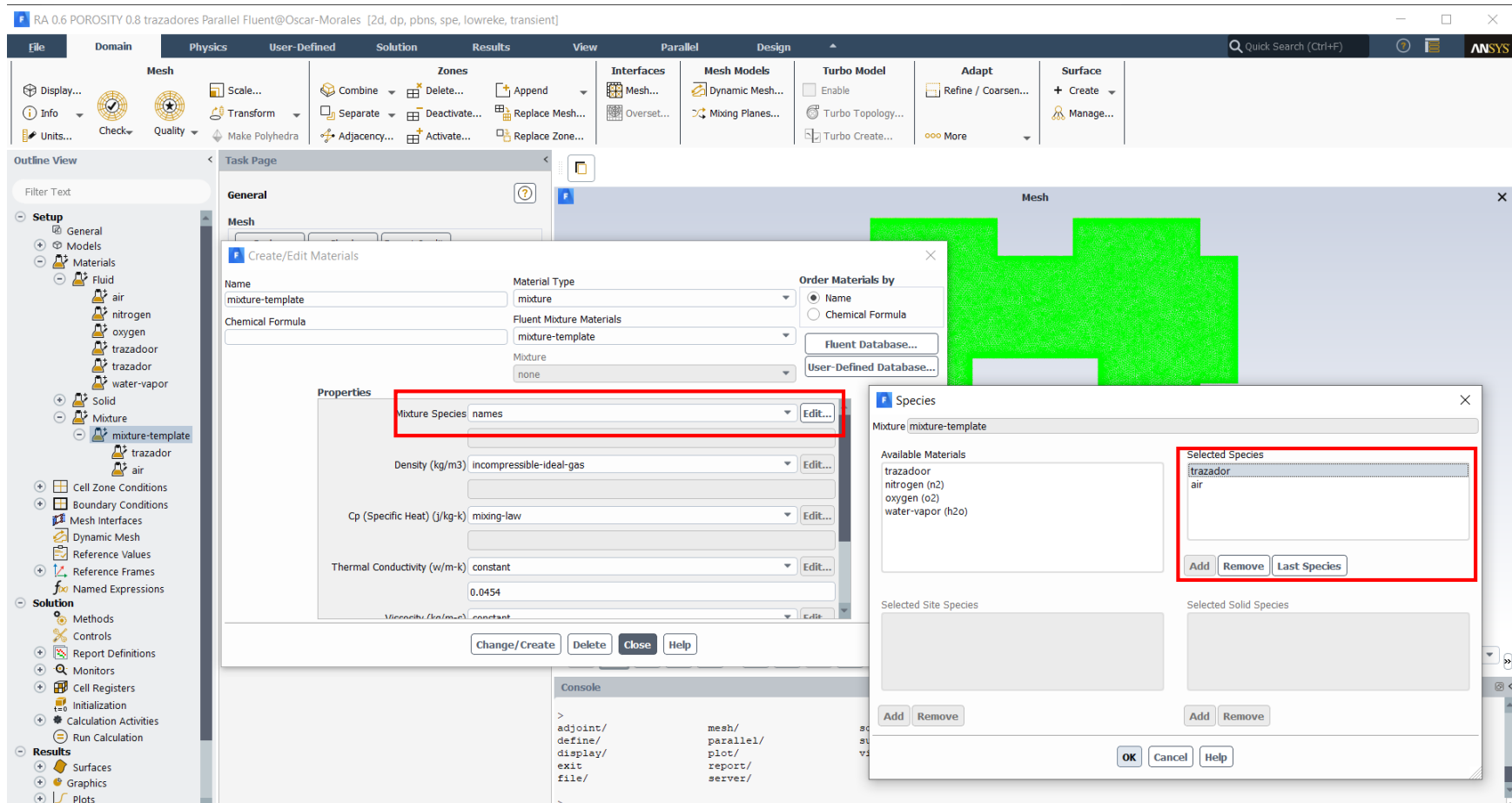
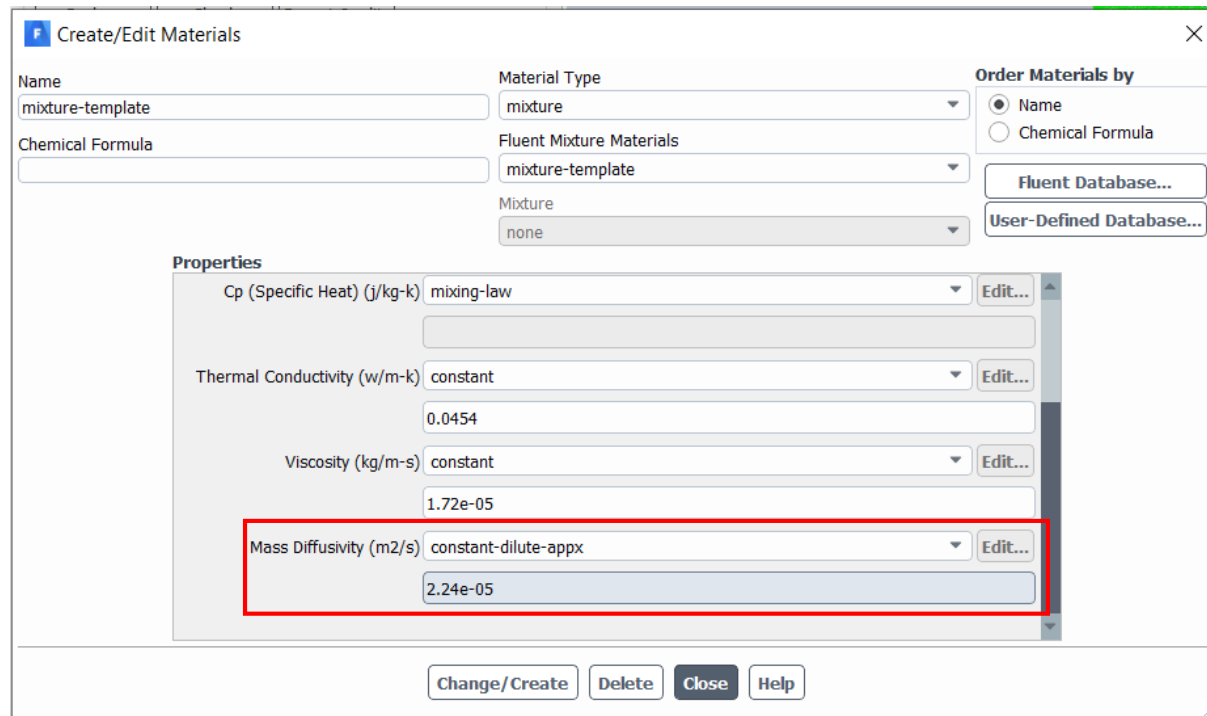


Figura A8.- Seleccionar el trazador como material de la especie.

4.- En la misma ventana de **Create/Edit Materials** se modifica el valor de la **Mass Diffusivity** por el valor indicado en la figura A9, una vez escrito este valor se presiona *change/create*. Esta magnitud corresponde a la **Difusividad de masa (D)**, que se utiliza para determinar el número de Schmidt, que es la relación de la difusividad de momento (viscosidad cinemática) y la difusividad de masa:  $Sc = \frac{\nu}{D}$

Con esta modificación se obtiene un  $Sc = 0.8$ , que es muy cercano al valor del monóxido de carbono ( $Sc = 0.84$ ) a temperatura de 300K que es el material deseado para el trazador. El valor considerado para la **difusión viscosa ( $\nu$ )** es  $1.72e-05$ .



The screenshot shows the 'Create/Edit Materials' dialog box. The 'Name' field is 'mixture-template'. The 'Material Type' is 'mixture'. The 'Fluent Mixture Materials' dropdown is 'mixture-template'. The 'Mixture' dropdown is 'none'. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. The 'Properties' section includes:

- Cp (Specific Heat) (j/kg-k): mixing-law
- Thermal Conductivity (w/m-k): constant, value 0.0454
- Viscosity (kg/m-s): constant, value 1.72e-05
- Mass Diffusivity (m2/s): constant-dilute-appx, value 2.24e-05 (highlighted with a red box)

Buttons at the bottom: Change/Create, Delete, Close, Help.

Figura A9.- Asignación de difusividad de masa.

5.- Para que el software no resuelva una vez más las ecuaciones de momento (2) y turbulencia (5 y 6) y solo trabaje la de trazador (10), indicadas en el capítulo 2, en la ventana de **Solutions** → **Controls** solo debe seleccionarse la ecuación trazador del panel de **Equations** como se muestra en la figura A10.

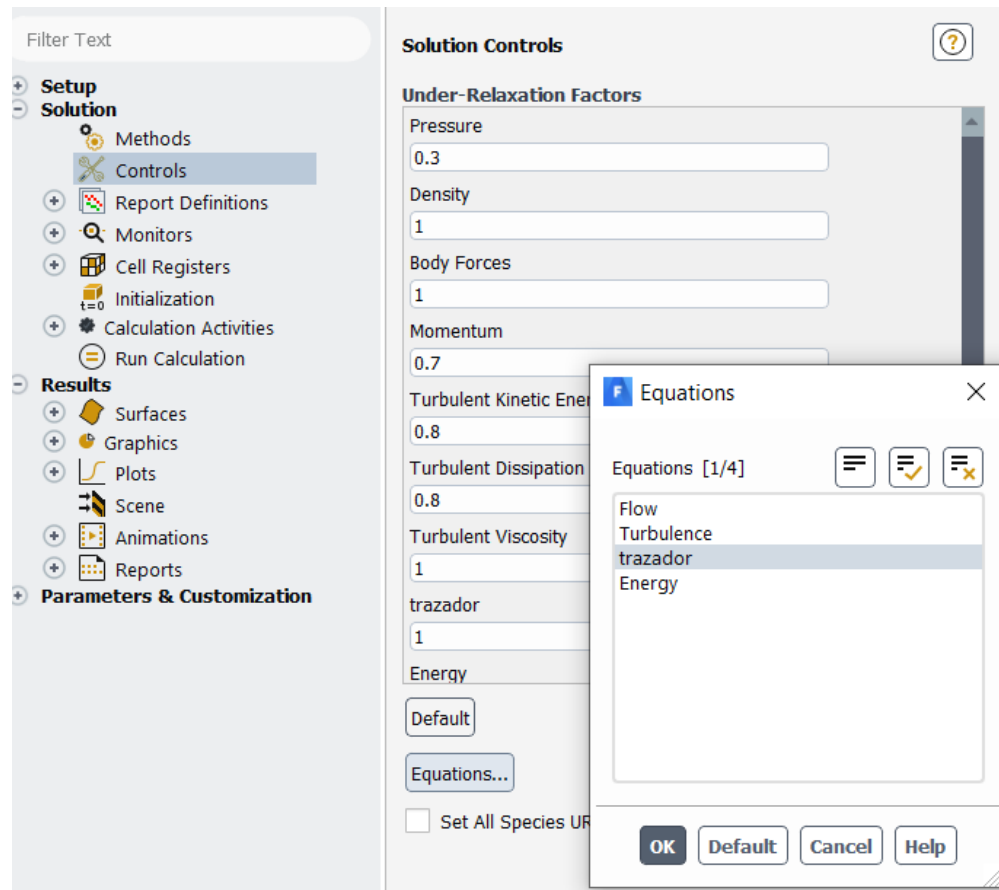


Figura A10.- Ecuación de trazador.



6.- Para obtener una solución numéricamente viable debe cumplirse con un criterio de convergencia estricto, para lograr esto en la ventana de **Monitors** debe seleccionarse **Residuals** para que se active la ventana **Residual Monitors** y para la única ecuación a resolver trazador se asigna el valor de  $1e-05$  y se presiona **OK**.

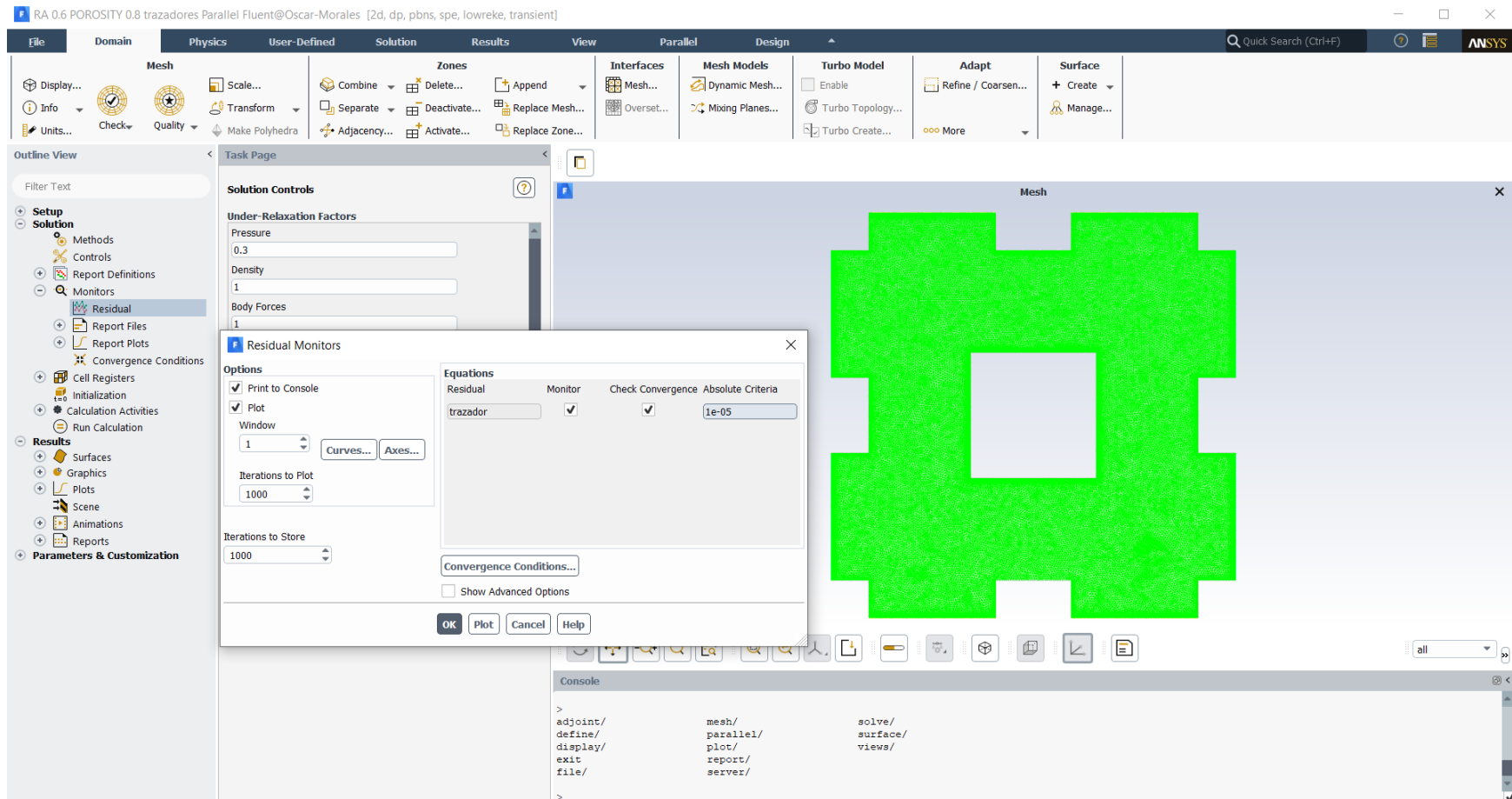


Figura A11.- Criterio de convergencia.



7.- Para supervisar el desarrollo del mezclado se deben monitorear los puntos de visualización, para ello en la ventana de **Monitors** debe seleccionarse **Report Files** y se activa la ventana de **Report File Definitions** en ella debe seleccionarse el botón *New...* en el nuevo menú **New Report file** deberá asignarse el nombre adecuado (en este caso monitor1) tanto en *Name* como en *File Name*.

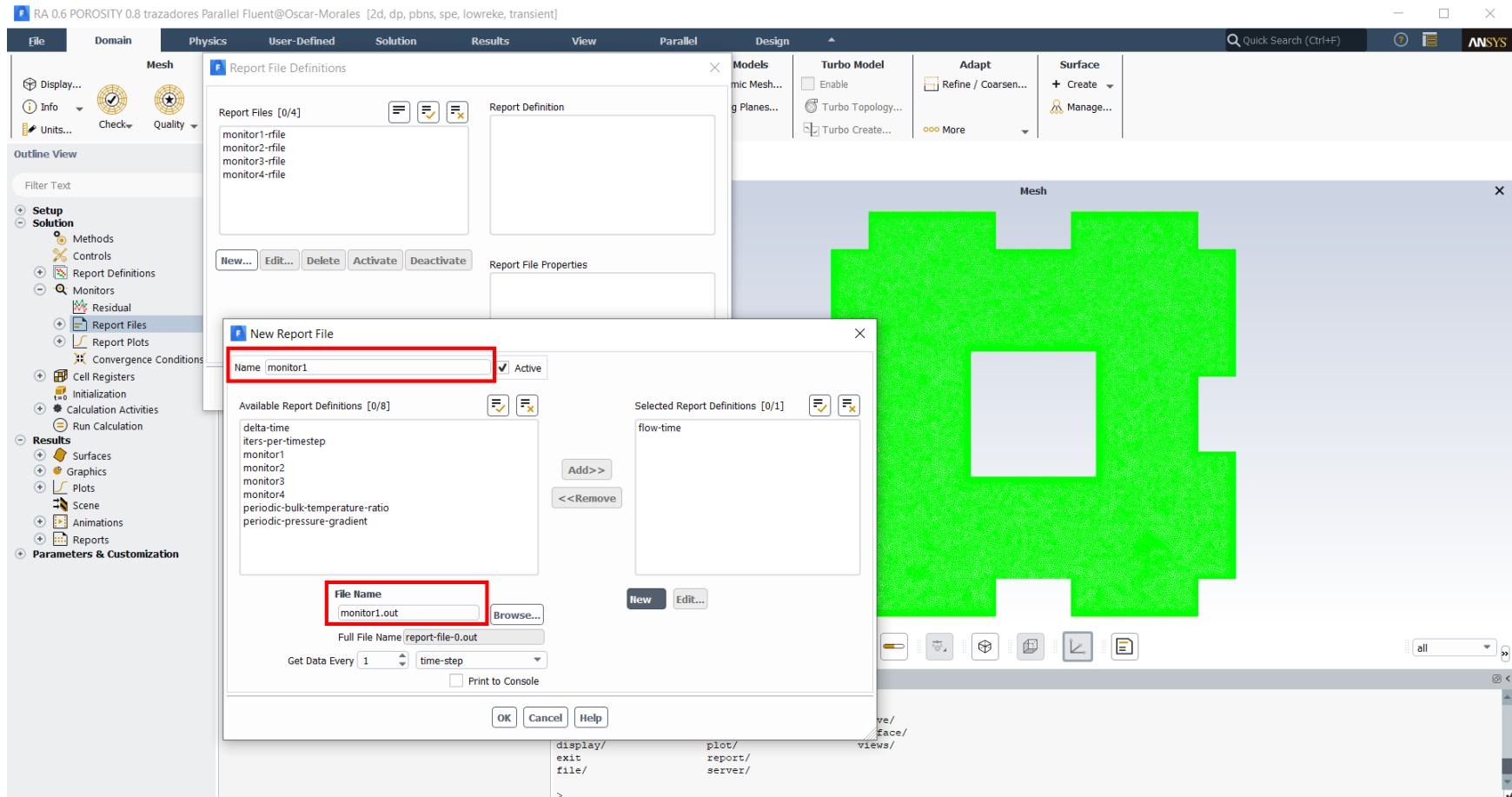
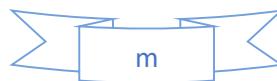


Figura A12.- Nombrar puntos de monitoreo.



8.- Una vez asignado el nombre en la ventana **New Report File** deberá seleccionarse el botón *New...* y seleccionar *Surface Report* del menú que se despliega, ahora debe darse doble clic en *Vertex Average...* como se muestra en la figura A13.

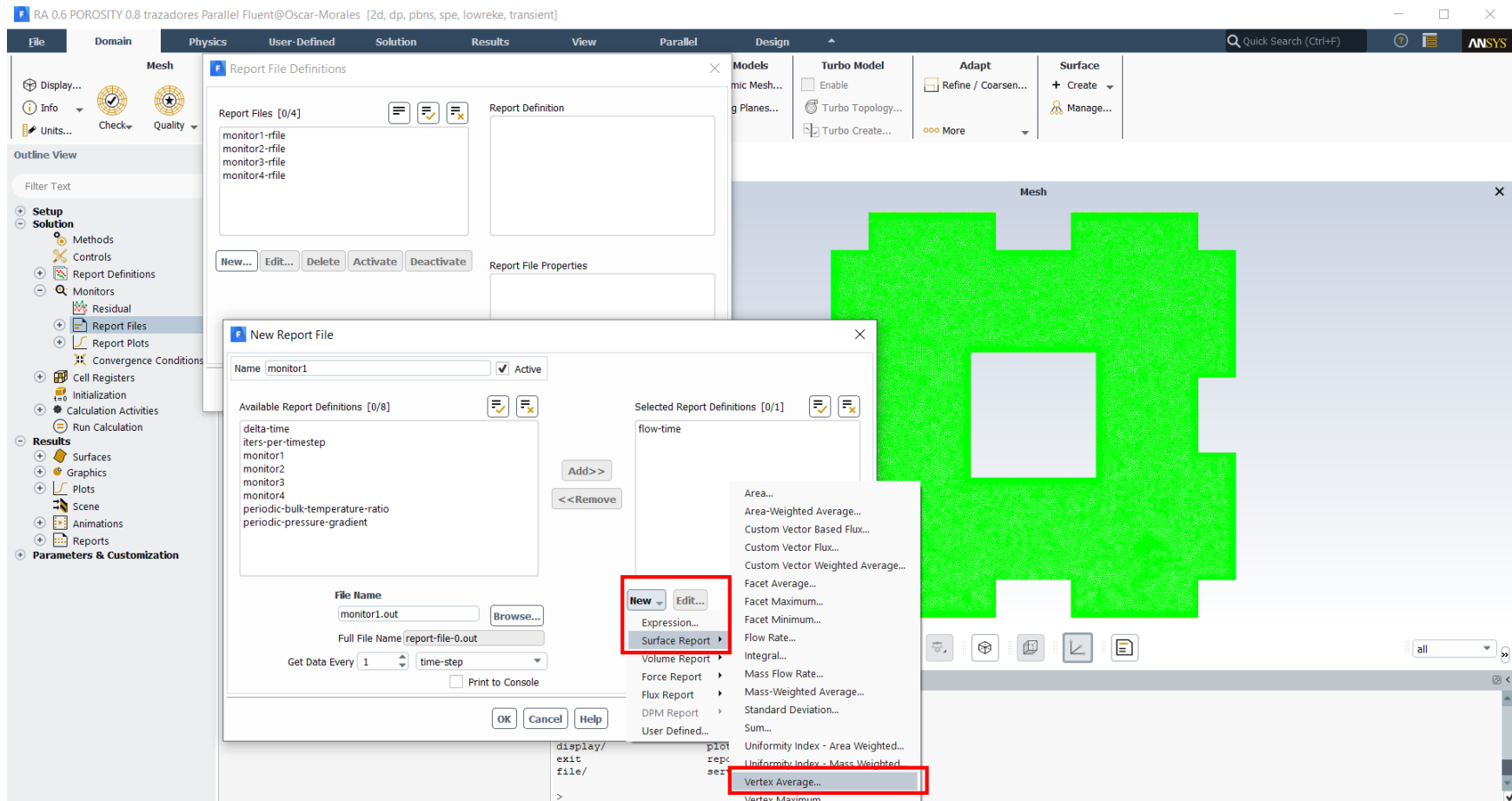


Figura A13.- Seleccionar el método de monitoreo.

9.- Debe desplegarse la ventana **Surface Report Definition** en la que deberá colocarse el nombre de monitor1 en la sección de *Name*, en la sección de *Field Variable* deberá seleccionarse *Species...*, en el cuadro de *Surfaces* debe indicarse el punto de monitoreo en este caso el *point-1* y finalmente en la casilla de *Create* se activan las casillas de **Report File** y **Report Plot** y finalmente seleccionar *ok*. como se observa en la figura A14. Los pasos 7 a 9 deben repetirse para los monitores restantes, considerando cambiar los nombres en cada caso por monitor2, monitor3 y monitor4.

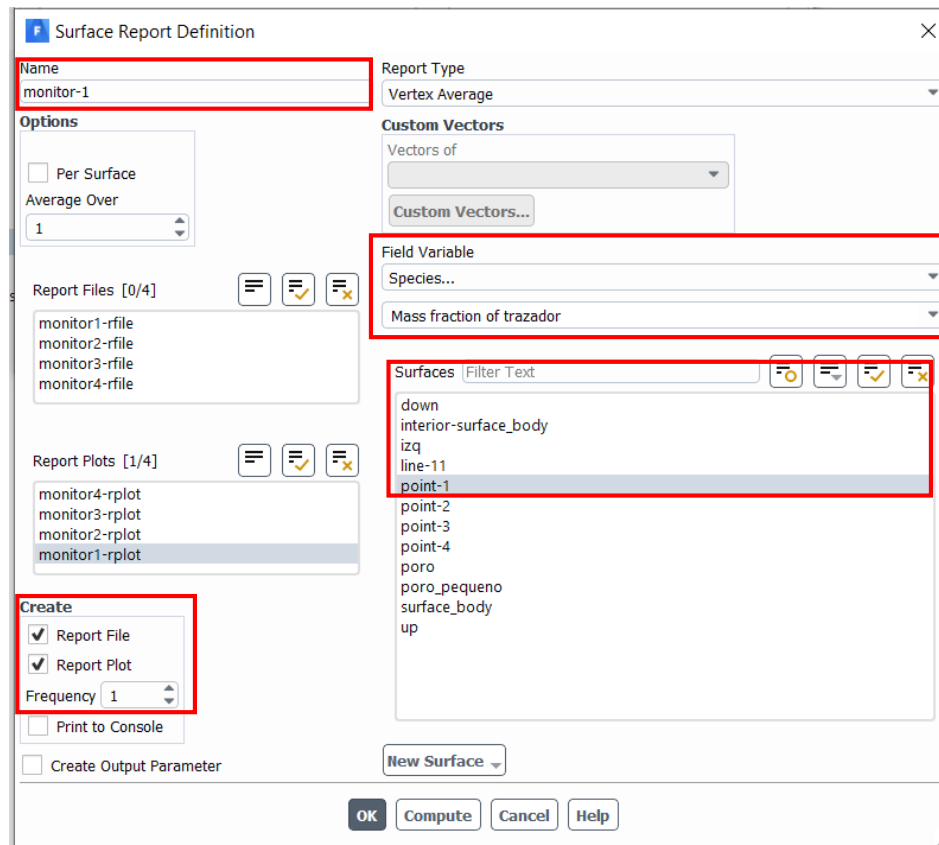


Figura A14.- Habilitar archivos de monitoreo y reportes.



10.- Para activar los trazadores debe seleccionarse de la pestaña **Solution** la opción **Patch** que desplegará una ventana en la que debe seleccionarse *trazador* del menú **Variable**, posteriormente se indica *Surface\_body* del menú **Zones to patch**, una vez seleccionados ambas variables se impondrá el valor de 0 en la sección de **Value** y finalmente se presiona el botón de *Patch*, tal como se indica en la figura A15.

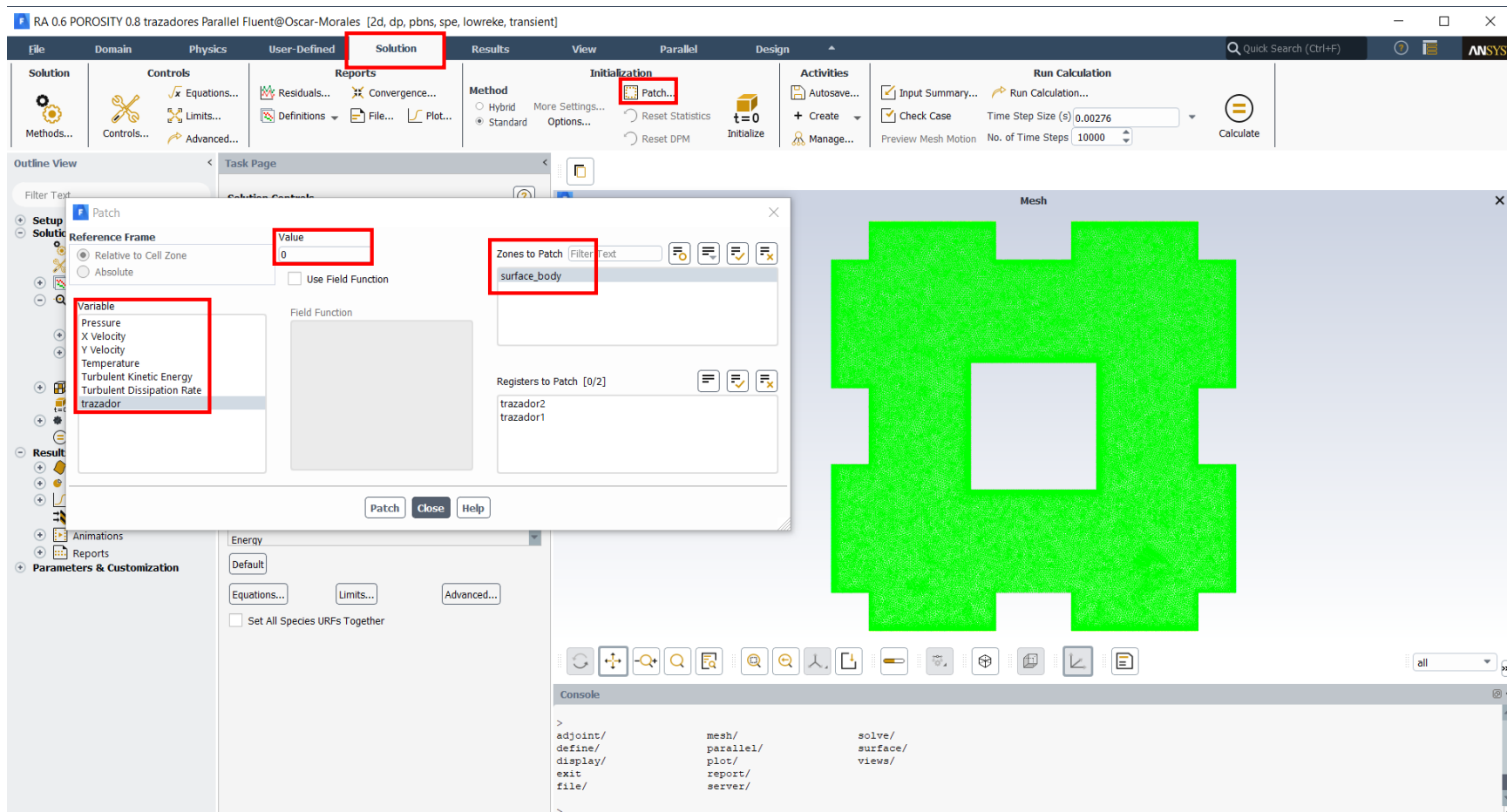


Figura A15.- Asignar fluido en el medio poroso (lleno de aire).

10.- El siguiente paso ahora es seleccionar en esta misma ventana *trazador1* y *trazador2* del menú **Register to Patch** (debe deseleccionarse *Surface\_body* elegido en el paso anterior) una vez seleccionadas ambas variables se impondrá el valor de 1 en la sección de **Value**, tal como se indica en la figura A15, finalmente nuevamente debe seleccionarse el botón *Patch*. Habilitar este “parche” propone que inicialmente el modelo este lleno aire y que posteriormente se inyectara el trazador que en este caso es CO.

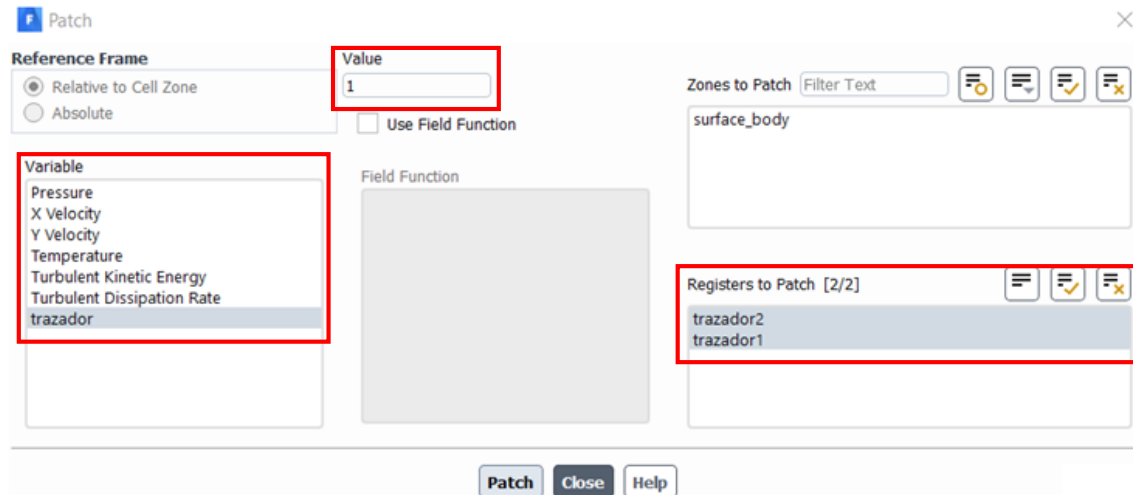
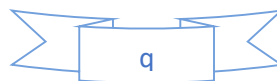


Figura A16.- Asignar trazador en el medio poroso (lleno de CO).

11.- Para resolver el caso en la pestaña de **Solution** debe seleccionarse *Run Calculation* y se habilitara la ventana mostrada en A17, y se solicitan los valores para *Number of Time Steps*, *Time Step Size (s)* y *Max Iterations/Time Steps*. Para el caso del número de pasos se colocan 10000 para asegurar que se alcance la convergencia, el tamaño del intervalo de tiempo se determinó en base a lo establecido en la referencia 18, y en la tabla A18 se muestran los valores para todos los casos estudiados, y finalmente para el máximo número de iteraciones se coloca 30, hecho esto se presiona el botón *Calculate*.



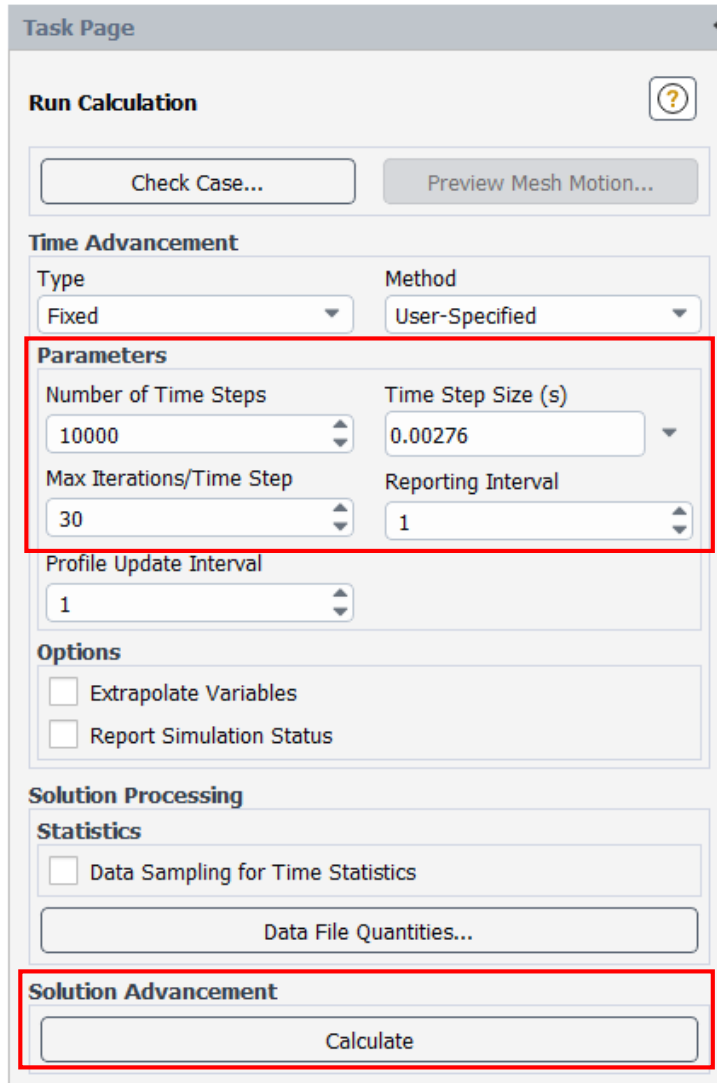


Figura A17.- Iniciar la solución del caso.

			Time step size (s)
Caso	DR	Porosidad	$\Delta t = T / 400$
1	0.20	0.30	0.001082
2		0.40	0.001169
3		0.50	0.001281
4		0.60	0.001432
5		0.80	0.002025
Caso	DR	Porosidad	$\Delta t = T / 400$
6	0.40	0.30	0.001244
7		0.40	0.001344
8		0.50	0.001472
9		0.70	0.001901
10		0.80	0.002328
Caso	DR	Porosidad	$\Delta t = T / 400$
11	0.60	0.30	0.001475
12		0.40	0.001593
13		0.60	0.001951
14		0.70	0.002253
15		0.80	0.002760
Caso	DR	Porosidad	$\Delta t = T / 400$
16	0.80	0.40	0.001888
17		0.50	0.002068
18		0.60	0.002312
19		0.70	0.002670
20		0.80	0.003270

Figura A18.- Time Step Size para todos los casos analizados.

Una vez inicializada la solución se generan 4 graficas que deberán mostrar el comportamiento del trazador en cada uno de los puntos monitoreados, al llegar a la convergencia se guarda el caso y el dato y se analizan los archivos TXT generados.

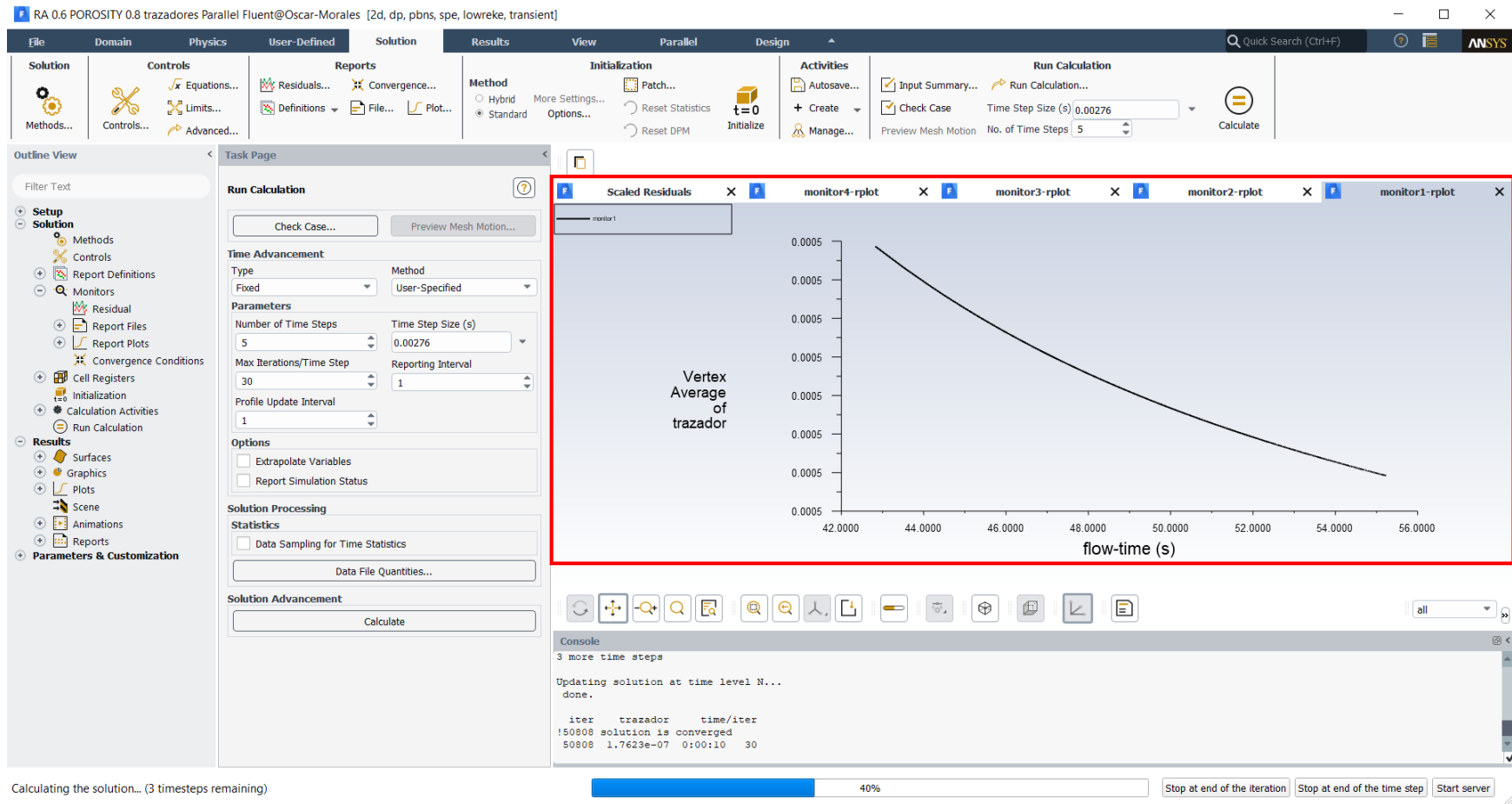


Figura A19.- Calculo de la solución del caso.