

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Estimación del coeficiente de pérdida de carga en filtros de materiales reciclados para el tratamiento de aguas grises domésticas

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Daniel Uziel Absalon Ornelas

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026

PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ESTIMACION DEL COEFICIENTE DE PERDIDA DE CARGA EN FILTROS DE MATERIALES RECICLADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS GRISES DOMESTICAS que presenté para obtener el titulo de INGENIERO CIVIL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

DANIEL UZIEL ABSALON ORNELAS
Número de cuenta: 317212967

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 7

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES 9

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO 12

2.1 TIPOS DE FLUJO 12

2.2 REGÍMENES DE FLUJO 12

2.3 HIPÓTESIS USADAS EN HIDRÁULICA 14

2.4 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD 14

2.5 ECUACIÓN DE TRABAJO Y CANTIDAD DE MOVIMIENTO 15

2.6 ECUACIÓN DE ENERGÍA 17

2.7 DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR FRICCIÓN 20

2.8 DISIPACIÓN DE ENERGÍA LOCAL Y POR ACCESORIOS 24

2.9 DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN (AFORO, CELDAS DE PRESIÓN Y MANÓMETROS) 25

2.10 SOFTWARE EPANET 27

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA 28

3.1 ETAPA EXPERIMENTAL 28

3.1.1 Descripción del modelo físico 28

3.1.2 Descripción de los pasos realizados en los ensayos de laboratorio 32

3.1.3 Procesamiento de datos y metodología de cálculo 34

3.2 ETAPA DE MODELACIÓN NUMÉRICA 36

3.2.1 Descripción del modelo numérico EPANET 36

3.2.2 Descripción de los pasos realizados en la modelación numérica 37

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS 39

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES 39

4.2 RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO 50

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES 52

REFERENCIAS 54

ANEXO 56

GRÁFICAS ADICIONALES 57

FORMATOS DE REGISTRO 58

REGISTROS DEL LABORATORIO 61

REGISTROS DEL MODELO MATEMÁTICO 68

CÁLCULO DEL COEFICIENTE k 74

CÁLCULO DEL COEFICIENTE k, CURVA SUAVIZADA 81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de flujo laminar. Fuente: elaboración propia..... 13
Figura 2. Esquema de flujo laminar considerando los efectos viscosos. Fuente: elaboración propia..... 13
Figura 3. Esquema de flujo en transición. Fuente: elaboración propia..... 14
Figura 4. Esquema de flujo turbulento. Fuente: elaboración propia. 14
Figura 5. Esquema de la ecuación de continuidad en una vena líquida. Fuente: elaboración propia..... 15
Figura 6. Esquema de la ecuación de la energía en una vena líquida. Fuente: elaboración propia..... 18
Figura 7. Esquema ilustrativo de la rugosidad absoluta. Fuente: elaboración propia. 20
Figura 8. Esquema del modelo experimental diseñado en el IIUNAM. Fuente: elaboración propia..... 29
Figura 9. Esquema del modelo hidráulico en EPANET. Fuente: elaboración propia. 37
Figura 10. Gráfica Re vs k, curva experimental completa. Fuente: elaboración propia. 40
Figura 11. Gráfica Re vs k, curva experimental suavizada. Fuente: elaboración propia. 40
Figura 12. Gráfica Q vs hfiltro, curva experimental completa. Fuente: elaboración propia. 42
Figura 13. Gráfica Q vs hfiltro, curva experimental suavizada. Fuente: elaboración propia. 42
Figura 14. Gráfica porcentaje de pérdida de carga debida al filtro respecto a la pérdida de carga total, etiquetas en [m]. Fuente: elaboración propia. 43
Figura 15. Gráfica Re vs k de fibra esponja con regresión potencial. Fuente: elaboración propia..... 46
Figura 16. Gráfica Re vs k de filtro de papel para café con regresión potencial. Fuente: elaboración propia..... 46

Figura 17. Gráfica Re vs k de estropajo (8 g) con regresión potencial. Fuente: elaboración propia. 47
Figura 18. Gráfica Re vs k de estropajo (6 g) con regresión potencial. Fuente: elaboración propia. 47
Figura 19. Gráfica Re vs k de sargazo con regresión potencial. Fuente: elaboración propia. 48
Figura 20. Gráfica Re vs k de núcleo de filtro sin material con regresión potencial. Fuente: elaboración propia. 48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores G y T para la expresión de Colebrook-White modificada. Fuente: (Tzatchkov y otros, 2014). 24
Tabla 2. Dimensiones y coeficientes k por tubería en el modelo matemático. Fuente: elaboración propia. 36
Tabla 3. Pérdida de carga entre las secciones 1 y 2 y energía disipada por el filtro, se despreciaron en el cálculo estadístico los datos de Sargazo 1 (CP), Sargazo (MnD) y Sin material (MnD), por presentar un comportamiento atípico. Fuente: elaboración propia. 44
Tabla 4. Coeficientes k obtenidos durante los ensayos. Fuente: elaboración propia. 45
Tabla 5. Comparación de valores medidos en laboratorio y calculados por EPANET con coeficientes k promedio por material. Fuente: elaboración propia..... 51
Tabla 6. Comparación de valores medidos en laboratorio y calculados por EPANET con coeficientes k calculados con las ecuaciones mostradas en las Figuras 14 a la 19. Fuente: elaboración propia. 51

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, es necesario un enfoque sostenible en el desarrollo de las actividades cotidianas. Por lo que la economía circular debe ser la base de la innovación y el desarrollo tecnológico (PROFECO, 2021). Algunas problemáticas recurrentes en México son la generación excesiva de residuos sólidos urbanos (RSU) (García y otros, 2024) y la dificultad para tratar el agua residual (Hernández & Clemente, 2024); esto se debe a que la infraestructura existente es insuficiente. Considerando que algunos residuos pueden usarse como medio filtrante, se propone el uso de un filtro con núcleo de materiales de reúso en la instalación sanitaria de los hogares. Dando así reutilización a algunos residuos domésticos y un tratamiento básico al agua residual doméstica.

Desde el punto de vista hidráulico, es importante considerar la energía que requiere un sistema para que el agua pase a través de un filtro. Por ello, es necesario determinar el coeficiente de disipación de energía asociado al filtro k, el cual debe ser deducido experimentalmente. Se utilizó un modelo hidráulico diseñado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM), empleado para obtener coeficientes k inherentes a materiales de desecho que se producen en los hogares (fibra esponja de cocina, estropajo común y filtro de papel para café, como se muestra en las Figuras A 1 a A 3 del anexo); y para el aprovechamiento del sargazo que arriba al Caribe mexicano (Figura A 4 del anexo).

En la presente investigación, se llevaron a cabo múltiples ensayos con cada material y con dos dispositivos de medición distintos: manómetros digitales y celdas de presión. Considerando la geometría del modelo y variaciones en el flujo, se llegó a curvas que describen la variabilidad de la disipación de energía en diferentes condiciones de energía potencial y de tipo de flujo del agua. Con lo que se determinaron valores promedio del coeficiente k para cada uno de los materiales ensayados.

La presente tesis tiene el objetivo de comprobar la viabilidad técnica de utilizar materiales reciclados como medio filtrante en las instalaciones sanitarias de hogares mexicanos, al determinar experimentalmente los coeficientes de disipación de energía k debidos a los materiales empleados en el filtro; y corroborarlos al aplicarse en un modelo matemático.

En el primer capítulo se mencionan los textos científicos, investigaciones y estudios relacionados al tema de esta investigación. En el segundo capítulo se describe el marco teórico utilizado para fundamentar el desarrollo de los experimentos realizados y el análisis de los resultados. El capítulo tercero profundiza en la descripción del modelo físico y la metodología empleada en los ensayos y el procesamiento de los datos medidos. Durante el capítulo cuarto se presentan los resultados obtenidos con base en los experimentos realizados y el respectivo análisis de los datos obtenidos. Posteriormente se concluye en el capítulo quinto antes de presentar el material de consulta.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

(Uribe y otros, 2020). El sargazo en el Caribe mexicano, revisión de una historia impensable.	Los autores describen las características biológicas del sargazo que arriba a las costas del Caribe mexicano, explican los motivos por los que se forman las llamadas “balsas de sargazo” y la dinámica oceánica que provoca este arribo.
(CONAHCYT, 2023). Arribazón de sargazo a las costas mexicanas.	Describe la problemática del arribo de sargazo a las costas del Caribe mexicano, su impacto, su peligro y la evolución de la cantidad de sargazo en el mar Caribe y el Océano Atlántico central del 2011 al 2018. Se mencionan los usos potenciales para el sargazo y la necesidad de la investigación científica para desarrollar las tecnologías que permitan su aprovechamiento.
(Santillán, 2022). Nuevo uso al sargazo, de plaga a removedor de contaminantes.	La autora menciona la capacidad de absorción y remoción de contaminantes, debido a la estructura de capas laminares presente en el sargazo. Con lo que se desarrolló un filtro de sargazo capaz de remover fármacos, cationes metálicos, colorantes, herbicidas, entre otros, a escala tanto industrial como doméstica.
(García T., 2024). Estimación del coeficiente de pérdida local atribuído a un filtro de sargazo en un sistema hidráulico para el tratamiento terciario.	Tesis de maestría en la que se utilizó un filtro prototipo de biorremediación y el modelo hidráulico empleado en la presente investigación, para estimar el coeficiente de pérdida local de un filtro de sargazo con el uso de manómetros de carátula analógicos. Concluyendo que el sargazo tiene la capacidad de disipar hasta un 65% de la energía potencial disponible; asimismo, la autora obtuvo una curva normalizada que relaciona el coeficiente k con el número de Reynolds Re para un rango determinado.

(Aranda, 2020). Tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando esponjas cilíndricas colgantes de poliuretano.	El autor usó un reactor de esponjas colgantes de flujo descendente (DHS, por sus siglas en inglés) para el tratamiento aerobio secundario. En cuya prueba con un prototipo se comprobó la eficiencia del sistema en el tratamiento de parámetros físico-químicos (temperatura, pH, turbiedad, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica); en el caso de parámetros microbiológicos obtuvo eficiencias del 98.61% y 99.54% en remoción de coliformes (requiere desinfección posterior al reactor DHS).
(León, 2018). Eficiencia de biodigestores usando PET y esponjas para la remoción de DQO, DBO del agua residual domestica - Tuyu, Marcara - Ancash.	En esta tesis se determinó la eficiencia de un biodigestor usando PET y esponjas. Con una eficiencia de 94.33% con PET y de 69.87% con esponjas en la remoción de sólidos totales en suspensión; de 53.58% con PET y de 55.99% con esponjas en la remoción de DBO5; y de 38.37% con PET y de 51.11% con esponjas en la degradación de DQO. Sin embargo, concluye que la permanencia microbiana es del 100%, es decir, los coliformes fecales o termotolerantes no son removidos con el sistema implementado.
(Hawach Scientific, 2026). 12 Different Usages of Filter Paper.	En el artículo se mencionan las aplicaciones del papel filtro (fibras de celulosa), como eliminación de impurezas en agua potable, eliminación de polvo, polen, entre otros, eliminación de sustancias de líquidos y gases. Según el tipo y tamaño del poro del papel se puede separar precipitados de líquidos, aislar partículas sólidas de líquidos, separar contaminantes y sustancias nocivas de líquidos y gases, e incluso puede remover microorganismos.

(Conde & Espinoza, 2024). Evaluación de dos biofiltros usando estropajo común (*Luffa cylindrica*) y yanchama (*Poulsenia armata*) en el tratamiento de aguas residuales.	El trabajo de investigación referido constó de la fabricación de dos biofiltros compuestos por capas en el siguiente orden: 90 g de algodón hidrófilo, 6350.29 g de arena sílica, 126 gramo de estropajo común o 180 g de yanchama y 2989.52 g de grava. Se compararon las eficiencias en remoción de contaminantes entre ambos filtros; y en el caso del estropajo común, se tuvo 69.3% en DQO, 79.66% en turbidez, 0% en cadmio, 7.5% en cobre, 84.77% en manganeso, 8.57% en níquel, 85.35% en hierro, 34.17% en zinc y 9.77% en plomo.
(Pereira y otros, 2017). Empleo del estropajo común (*Luffa cylindrica*) en la remoción de contaminantes.	En este artículo se menciona que gracias a las características de las fibras del estropajo común, este es capaz de remover por intercambio protónico metales pesados. También puede eliminar tintes y sales del agua, así como inmovilizar microorganismos removiendo sustancias orgánicas y minerales no metálicos. De igual forma, la *Luffa cylindrica* elimina dureza, cloruros, nitrógeno amoniacal y no afecta a la alcalinidad del agua.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 TIPOS DE FLUJO

En hidráulica, el flujo se clasifica por su permanencia, por su uniformidad, por su dimensionalidad, entre otros (Sotelo, 1997). Cuando las características del flujo y sus propiedades mecánicas son constantes o con variaciones muy pequeñas, este es permanente; mientras que si las características y propiedades del flujo cambian, se clasifica como flujo no permanente. Si en una sección el vector velocidad es constante en todos los puntos, el flujo es uniforme; y al fluctuar la velocidad en distintas zonas de la sección, este se clasifica como no uniforme; que de forma idealizada se representa como en la Figura 1. La no uniformidad del flujo suele encontrarse cerca de las paredes del objeto sólido que contiene el flujo, por efecto de la viscosidad del fluido como puede observarse en la Figura 2. Con estas particularidades se definen las cuatro principales clasificaciones de un flujo.

Por su dimensionalidad, puede clasificarse un flujo como tridimensional, bidimensional o unidimensional. Cuando hay variaciones de las características del flujo en las tres direcciones de un espacio, este es tridimensional. Si las particularidades de un flujo son constantes en un conjunto de planos paralelos y no hay componentes perpendiculares a estos planos, o son constantes, el flujo es bidimensional. El flujo es unidimensional cuando las características de este son expresables en función de una coordenada espacial y del tiempo (Sotelo, 1997).

2.2 REGÍMENES DE FLUJO

Además de las clasificaciones mencionadas, el flujo puede caracterizarse conforme al número de Reynolds Re. En 1883, el científico británico Osborne Reynolds demostró que el comportamiento de un flujo puede clasificarse en régimen laminar, régimen de transición y régimen turbulento. La combinación de las variables velocidad y viscosidad cinemática del fluido, así como la geometría del conducto o canal que lo conduzca, son los rasgos que los definen (Canto, 2013).

La ecuación desarrollada por Reynolds relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas y la estabilidad de las líneas de flujo en la trayectoria de este $(Ec.1)$. Cuando el número de Reynolds (adimensional) es menor a 2300 el régimen es laminar, si Re está entre 2300 y 4000 corresponde al régimen de transición y si Re es superior a 4000 el flujo está en régimen turbulento (Canto, 2013).

$$Re = \frac{vD}{\upsilon} \quad (Ec.1)$$

Donde:

Re Número de Reynolds

v Velocidad media $[m/s]$

D Diámetro del conducto $[m]$

υ Viscosidad cinemática $[m^2/s]$

El régimen laminar se caracteriza por presentar líneas de corriente paralelas entre sí, las partículas siguen trayectorias bien definidas y separadas (Figuras 1 y 2); el régimen de transición presenta una combinación del régimen laminar y el régimen turbulento, es decir, las partículas pasan de un régimen a otro constantemente desestabilizando el flujo como se observa en la Figura 3 (Canto, 2013). En el régimen turbulento las partículas siguen trayectorias erráticas y sin un orden definido, existen componentes transversales en los vectores de velocidad de las partículas (Figura 4) (Sotelo, 1997).



Figura 1. Esquema de flujo laminar. Fuente: elaboración propia, adaptado de (Canto, 2013).



Figura 2. Esquema de flujo laminar considerando los efectos viscosos. Fuente: elaboración propia, adaptado de (Canto, 2013).

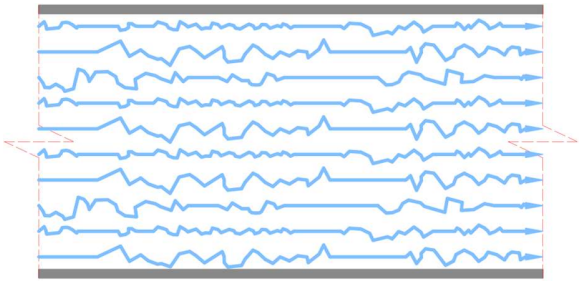


Figura 3. Esquema de flujo en transición. Fuente: elaboración propia, adaptado de (Canto, 2013).

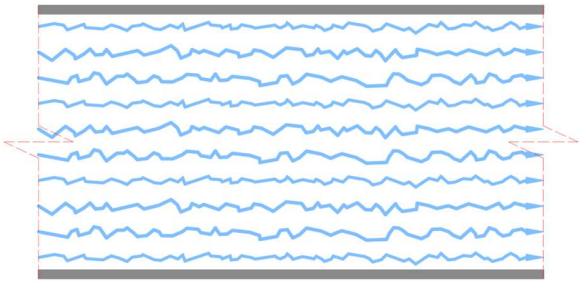


Figura 4. Esquema de flujo turbulento. Fuente: elaboración propia, adaptado de (Canto, 2013).

2.3 HIPÓTESIS USADAS EN HIDRÁULICA

Al realizar análisis hidráulicos para resolver problemáticas en esta materia, suelen aceptarse las siguientes tres hipótesis: el flujo se considera permanente cuando las variaciones en los valores medios de las características de este son razonablemente pequeñas, ya que en la realidad la permanencia de un flujo es la excepción y no la regla; la uniformidad o no uniformidad del flujo se define según la variación de la velocidad media en la dirección principal del flujo; y el flujo puede analizarse como unidimensional al considerar sólo los valores medios de las características del flujo en cada sección de análisis, cabe resaltar que un fluido real no puede ser completamente unidimensional por los efectos viscosos (Sotelo, 1997).

2.4 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

La ecuación de continuidad se basa en el principio de conservación de la materia; el cual estipula que en un volumen de control definido, con forma y magnitud constantes, la masa que entra en él es igual a la masa que sale de él en un intervalo de tiempo específico (Sotelo, 1997).

Esto al aplicarse en una vena líquida de un fluido incompresible y de flujo permanente (Figura 5) donde la velocidad es constante v; en un volumen definido por una superficie exterior que contiene al flujo y dos secciones de control SC_1 y SC_2 a una distancia constante s; y en el que el área que admite la entrada y la salida de

masa de este volumen es constante A. La masa que atraviesa cada sección de la vena líquida es constante (Sotelo, 1997), por lo que matemáticamente se puede expresar como $(Ec. 2)$:

$$Q = vA \ \ (Ec. 2)$$

Donde:

- Q Gasto $[m^3/s]$
- v Velocidad media $[m/s]$
- A Área de la sección $[m^2]$

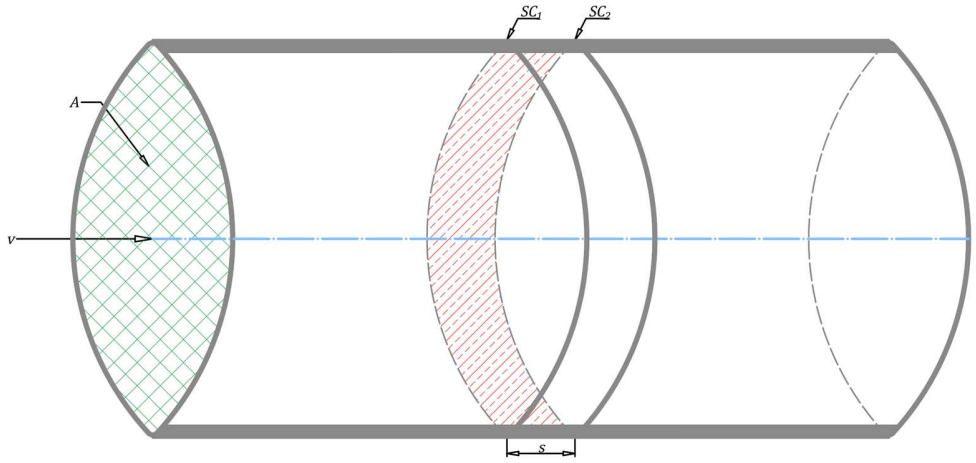


Figura 5. Esquema de la ecuación de continuidad en una vena líquida. Fuente: elaboración propia, adaptado de (Sotelo, 1997).

2.5 ECUACIÓN DE TRABAJO Y CANTIDAD DE MOVIMIENTO

La ecuación de impulso y cantidad de movimiento tiene base en la segunda ley de Newton. Lo que estipula que la sumatoria de fuerzas o la cantidad de movimiento de un volumen de control es su masa multiplicada por su velocidad. Las fuerzas externas que inciden en el flujo son: las fuerzas de superficie, presión sobre la masa F_p; las fuerzas tangenciales, esfuerzo cortante F_τ; y las fuerzas de cuerpo, representadas por el peso propio del volumen de control F_c.

La variación en el tiempo de la cantidad de movimiento aplicado a una porción del volumen de control (una sección de control) en un flujo unidimensional y permanente de un fluido incompresible, y considerando que el vector velocidad es aproximadamente normal a la sección, se representa de la forma $\rho Q \beta v$. Con esto se define la ecuación $(Ec. 3)$ para el total del volumen de control (Sotelo, 1997):

$$F_p + F_\tau + F_c = \rho \sum Q \beta v \quad (Ec. 3)$$

Ecuación que también puede escribirse como $(Ec. 4)$:

$$\sum F = \rho \sum Q \beta v \quad (Ec. 4)$$

Aplicando la ecuación de cantidad de movimiento entre dos secciones se obtiene la $(Ec. 5)$:

$$\sum F = \rho [Q \beta v]_2 - \rho [Q \beta v]_1 \quad (Ec. 5)$$

Donde:

$\sum F$ Sumatoria de las fuerzas F_p, F_τ y F_c en $[kg_f]$

F_p Fuerza resultante de presión en $[kg_f]$

F_τ Fuerza resultante de cortante en $[kg_f]$

F_c Fuerza de cuerpo en $[kg_f]$

ρ Densidad del fluido en $[kg_f * (s^2/m^4)]$

Q Gasto en $[m^3/s]$

β Coeficiente de Boussinesq regularmente igual a 1

v Velocidad media en la sección en $[m/s^2]$

2.6 ECUACIÓN DE ENERGÍA

La ecuación de la energía parte de la derivación de las ecuaciones de movimiento; al no considerar los efectos termodinámicos del flujo ni la impresión o sustracción de energía mecánica, a partir de la segunda ley de Newton. Esta ecuación relaciona el movimiento con las fuerzas que se oponen a él, lo que corresponde al trabajo mecánico equivalente a la energía disipada para vencer estas fuerzas (Sotelo, 1997).

Al aplicar este concepto a una vena líquida idealizada unidimensionalmente, los vectores de los componentes de la ecuación de la energía coinciden con el eje de la línea de corriente como se muestra en la Figura 6. Esta ecuación relaciona la energía potencial, la energía de presión y la energía cinética que tiene un flujo. La energía potencial está dada por la posición del punto en análisis respecto a un plano horizontal de referencia. La energía de presión representa la energía que tiene el fluido por el trabajo mecánico de las partículas debido a la presión. La energía cinética indica el trabajo necesario para acelerar el flujo (Sotelo, 1997).

Dentro de la ecuación de la energía, estos tres componentes se representan como la carga de posición z, la carga de presión $\frac{p}{\gamma}$ y la carga de velocidad $\frac{v^2}{2g}$; cuando se aplica en un volumen de control definido por dos secciones de control, se agrega el término h_r que representa a las pérdidas de carga debidas a la energía que se transforma en formas de energía no aprovechables por el sistema (Sotelo, 1997).

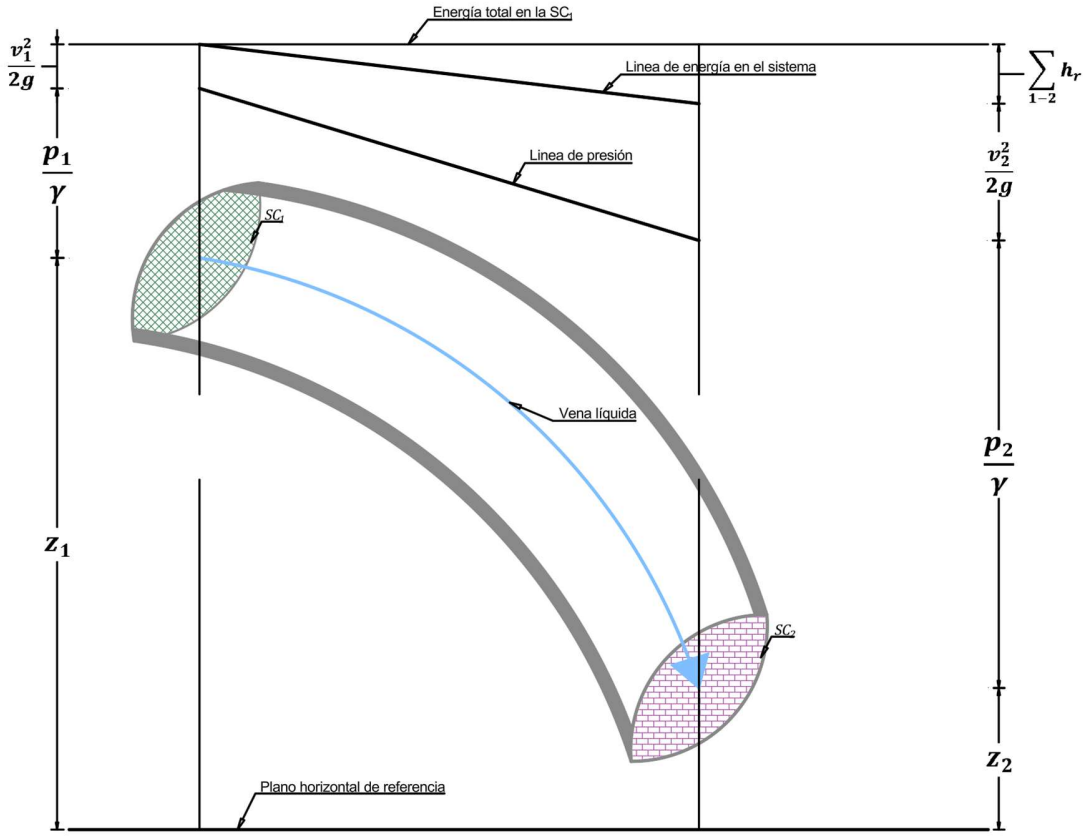


Figura 6. Esquema de la ecuación de la energía en una vena líquida. Fuente: elaboración propia, adaptado de (Sotelo, 1997).

La energía por unidad de peso en una sección se expresa como $(Ec. 6)$:

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (Ec. 6)$$

Donde:

- H Energía específica $[m]$
- z Carga de posición $[m]$
- p Presión $[kg_f/m^2]$
- γ Peso específico $[kg_f/m^3]$
- α Factor de ajuste de velocidad
- v Velocidad media $[m/s]$
- g Aceleración de la gravedad $[m/s^2]$

Donde α es un factor que corrige el error por considerar el valor medio de la velocidad v, que regularmente se considera igual a la unidad.

La energía entre dos secciones se expresa de la forma $(Ec.7)$:

$$H_1 = H_2 + \sum_{1-2} h_r \quad (Ec.7)$$

Donde:

H_1 Energía específica en la sección 1 $[m]$

H_2 Energía específica en la sección 2 $[m]$

$\sum_{1-2} h_r$ Disipación de energía entre las secciones 1 y 2 $[m]$

Sustituyendo la $(Ec.6)$ en la $(Ec.7)$ resulta en la $(Ec.8)$, forma comúnmente aplicada para representar la ecuación de la energía entre dos secciones de control de una vena líquida (volumen de control).

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \sum_{1-2} h_r \quad (Ec.8)$$

2.7 DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR FRICCIÓN

La energía disipada al transformarse en otras formas de energía, también conocida como pérdida de carga total, h_r se divide en dos componentes que se diferencian por la acción que los provoca; por la fricción interna de las partículas debida a los efectos viscosos en las paredes de la superficie que contiene al flujo h_f; y por los cambios de dirección y de la geometría en la sección del flujo, a lo que se le conoce como pérdidas de carga locales o por accesorios h_l.

La disipación de energía debida a la fricción se relaciona con la viscosidad del fluido, por lo que también depende de que las superficies tienen irregularidades. Estas se toman en cuenta como un promedio de la altura de estas protuberancias, a lo que se le conoce como rugosidad absoluta ε. Otro aspecto importante para cuantizar la pérdida de carga por fricción es la rugosidad relativa (Figura 7), que es la relación entre la rugosidad absoluta y el diámetro del conducto ε/D. En canales o conductos que trabajen a presión atmosférica es necesario considerar el radio hidráulico R_h y el perímetro mojado P (Sotelo, 1997).

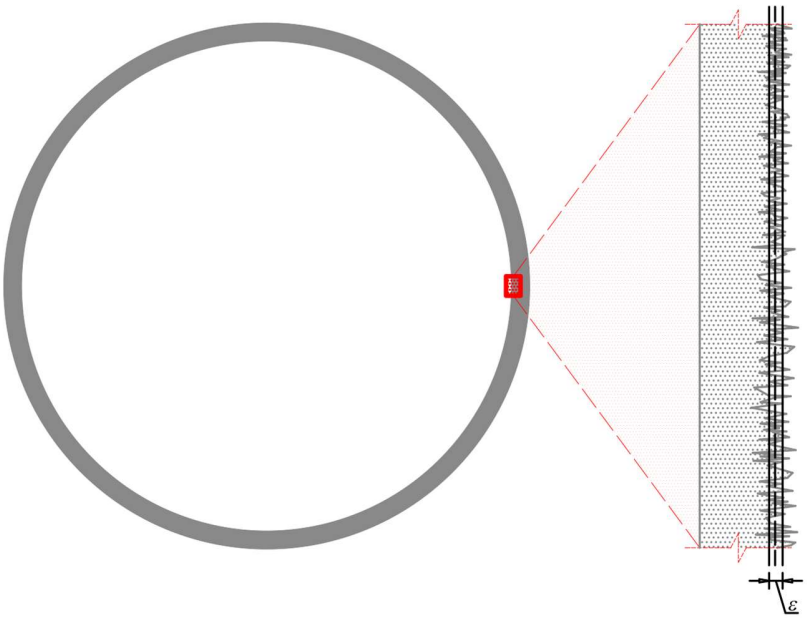


Figura 7. Esquema ilustrativo de la rugosidad absoluta. Fuente: elaboración propia.

En 1850 varios científicos entre los que figuran Darcy y Weisbach dedujeron experimentalmente una expresión válida para tuberías a presión, que relaciona un factor de fricción f, la longitud L y diámetro del conjunto D, y la carga de velocidad del flujo $\frac{v^2}{2g}$ con la pérdida de carga debida a fricción h_f. El factor de fricción es una variable que es función de la rugosidad absoluta y del número de Reynolds $(Ec. 9)$ (Sotelo, 1997).

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{v^2}{2g} \quad (Ec. 9)$$

Donde:

- h_f Disipación de energía por fricción $[m]$
- f Factor de fricción
- L Longitud del conducto $[m]$
- D Diámetro del conducto $[m]$
- v Velocidad media $[m/s]$
- g Aceleración de la gravedad $[m/s^2]$

El primer científico en desarrollar una ecuación para determinar el factor de fricción fue Poiseuille en 1846. Expresión que es válida para tubos lisos o rugosos con flujo en régimen laminar, $Re < 2300$ $(Ec. 10)$ (Canto, 2013).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (Ec. 10)$$

Con datos experimentales recolectados hasta 1913, Blasius concluyó que existen dos tipos de fricción inherentes al flujo turbulento. El primer tipo de fricción se presenta en tubos tan lisos que los efectos viscosos predominan sobre la rugosidad; este efecto depende únicamente del número de Reynolds. El segundo tipo de fricción se asocia a tubos rugosos, donde los efectos de la rugosidad y los

efectos viscosos influyen en el flujo; además de que el factor de fricción depende de la rugosidad relativa y del número de Reynolds (Sotelo, 1997). Con lo que Blasius formuló para tubos lisos la expresión $(Ec. 11)$:

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (Ec. 11)$$

Posteriormente en 1920 el investigador Nikuradse obtuvo resultados de f contra Re en tubos lisos para valores de hasta $Re = 3x10^6$, desarrollando la $(Ec. 12)$. Además, Nikuradse experimentó con conductos de rugosidad ε verificada minuciosamente en laboratorio; con lo que llegó a relacionar valores de la rugosidad relativa ε/D que van de $1/30$ hasta $1/1014$, formulando la $(Ec. 13)$ para tubos rugosos en régimen turbulento (Sotelo, 1997).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log\frac{Re\sqrt{f}}{2.51} \quad (Ec. 12)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log\frac{3.71D}{\varepsilon} \quad (Ec. 13)$$

En investigaciones consecuentes, Colebrook y White retomaron los trabajos de Prantl, von Kármán y Nikuradse. Centrados en el régimen de transición llegaron a la $(Ec. 14)$ aplicable a tubos lisos o rugosos, la que requiere del uso de métodos numéricos para su resolución (Canto, 2013).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{2.51}{Re\sqrt{f}} + \frac{\varepsilon}{3.71D}\right) \quad (Ec. 14)$$

En 1976 Swamee y Jain partieron de los trabajos precedentes para sus propios experimentos, con los que lograron simplificar la ecuación de Colebrook y White llegando a la $(Ec.15)$ que aproxima el valor de f y puede servir como un punto de partida para la $(Ec.14)$ reduciendo las iteraciones necesarias para resolver la ecuación (Canto, 2013).

$$f = \frac{1.325}{\left[In\left(\frac{\varepsilon}{3.71D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2} \ (Ec.15)$$

Después, en 1991 el investigador Dunlop desarrolló una interpolación cúbica que permite calcular el factor de fricción en flujos en régimen de transición $(Ec.16)$, considerando las características del régimen laminar y del régimen turbulento que describen el régimen de transición $2000 \leq Re < 4000$ (Canto, 2013).

$$f = x_1 + RR[x_2 + RR(x_3 + x_4)] \ (Ec.16)$$

Donde los términos se calculan de la forma $(Ecs.17 \text{ a } 25)$:

$$Y_2 = \frac{\varepsilon}{3.71D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \ (Ec.17)$$

$$Y_3 = -2\log\left(\frac{\varepsilon}{3.71D} + \frac{5.74}{4000^{0.9}}\right) \ (Ec.18)$$

$$FA = (Y_3)^{-2} \ (Ec.19)$$

$$FB = FA[2 - 0.00514215(Y_2 Y_3)] \ (Ec.20)$$

$$RR = \frac{Re}{2000} \ (Ec.21)$$

$$x_1 = 7FA - FB \ (Ec.22)$$

$$x_2 = 0.128 - 17FA + 2.5FB \ (Ec.23)$$

$$x_3 = -0.128 + 13FA - 2FB \ (Ec.24)$$

$$x_4 = RR(0.032 - 3FA + 0.5FB) \ (Ec.25)$$

El investigador Guerrero en 1995 propuso una aproximación de la ecuación de Colebrook y White $(Ec. 26)$, expresión conocida como la ecuación de Colebrook y White modificada que es válida para el régimen de flujo turbulento con $Re > 4000$ (Tzatchkov y otros, 2014).

$$f = \frac{0.25}{\left(\log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{G}{Re^T}\right)\right)^2} \quad (Ec. 26)$$

Donde:

Tabla 1. Factores G y T para la expresión de Colebrook-White modificada. Fuente: (Tzatchkov y otros, 2014).

G	T	Re
4.555	0.8764	$4000 \leq Re < 10^5$
6.732	0.9104	$10^5 \leq Re < 3x10^6$
8.982	0.93	$3x10^6 \leq Re \leq 10^8$

2.8 DISIPACIÓN DE ENERGÍA LOCAL Y POR ACCESORIOS

Además de la pérdida de carga por fricción, en un sistema hidráulico se disipa energía por efectos locales h_l. Estos son provocados por alteraciones en el flujo, como ampliaciones, reducciones, cambios de dirección o accesorios. La magnitud de esta pérdida de carga se debe al tipo de alteración a la línea de corriente, a la que se le asocia un coeficiente de pérdida k. El valor de la disipación de energía es producto del coeficiente k y de la carga de velocidad aguas abajo de la alteración $\frac{v^2}{2g}$, se expresa como en la $(Ec. 27)$. El coeficiente k se obtiene de ecuaciones y tablas empíricas que pueden ser proporcionadas por un fabricante; este coeficiente debe obtenerse mediante experimentación en laboratorio (Sotelo, 1997).

$$h_l = k\frac{v^2}{2g} \quad (Ec. 27)$$

Donde:

h_l Pérdida de carga local $[m]$
k Coeficiente de pérdida de carga adimensional
v Velocidad media en la sección $[m/s]$
g Aceleración de la gravedad $[m/s^2]$

2.9 DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN (AFORO, CELDAS DE PRESIÓN Y MANÓMETROS)

En la hidráulica de conductos a presión existen múltiples dispositivos de medición que sirven para cuantizar características específicas del flujo; las principales variables medidas a través de ellos son la presión, la velocidad y el caudal. La interpretación de los registros obtenidos mediante estos dispositivos tiene base en las ecuaciones fundamentales de la hidráulica: la ecuación de continuidad, la ecuación de la energía y la ecuación de impulso y cantidad de movimiento (Sotelo, 1997).

La medición de las características mencionadas tiene el inconveniente de que, al introducir cualquier dispositivo, este genera alteraciones en el flujo. Por esto se requiere minimizar esta alteración con el diseño adecuado de estos instrumentos. En tuberías a presión, unos de los dispositivos de medición más conocidos y simples son la sonda de presión, el tubo de Pitot y el tubo de Prandtl; estos consisten en tubos con un arreglo geométrico específico y, en caso de los últimos dos, mercurio. La sonda de presión y el tubo de Pitot sirven para medir la presión, siendo el segundo la base para los manómetros analógicos. El tubo de Prandtl es una combinación de los otros dos dispositivos y permite medir la carga de velocidad del flujo (Sotelo, 1997).

La medición de presión en tuberías puede clasificarse por el funcionamiento del instrumento y por la presión que registra. Estos dispositivos pueden ser analógicos, que trabajan con un balance hidrostático entre agua y mercurio, o digitales, que usan un transductor que mide variables resistivas, capacitivas o

inductivas para traducir la presión mecánica en una señal eléctrica proporcional (ACCIOMATE, 2025).

Estos instrumentos pueden ser manómetros, que miden la presión relativa positiva; los vacuómetros, que miden la presión relativa negativa; y los manovacuómetros, que combinan las capacidades del manómetro y del vacuómetro logrando medir presiones tanto positivas como negativas con respecto a la presión atmosférica. También existen dispositivos especializados como los sensores piezoeléctricos o los sensores ópticos que se caracterizan por tener una precisión alta (ACCIOMATE, 2025).

Los flujómetros son dispositivos que registran la masa o el volumen de líquidos o gases que pasan a través de ellos. Existen múltiples variantes que tienen un principio de funcionamiento distinto a los otros medidores de flujo, entre los que destacan (Badger Meter, 2020):

- Presión diferencial: funciona generando una caída de presión y midiéndola antes y después de la constricción, donde la caída de presión es relativa al caudal al cuadrado.
- Desplazamiento positivo: mide el volumen que pasa a través de un medidor que recoge el flujo con partes giratorias.
- Ultrasónicos: registran un diferencial de tiempo de las ondas sonoras que se emiten aguas arriba y se detectan aguas abajo a una distancia conocida, también pueden registrar variaciones en la frecuencia de las ondas sonoras reflejadas por burbujas o partículas del flujo.
- Vórtex: emplean el principio del efecto von Kármán colocando una obstrucción que genera vórtices de presión diferencial alterna, lo que provoca la oscilación de un sensor que convierte la oscilación en una señal eléctrica.
- Coriolis: miden el flujo de masa y densidad a través de la inercia con tubos sensores que se retuercen por las fuerzas inducidas por el flujo.
- Electromagnéticos: funcionan con la ley de Faraday al medir los cambios de voltaje en un campo electromagnético producidos por las partículas conductoras del fluido.

- Área variable: constan de un arreglo de pistón, un imán cilíndrico de cerámica y un resorte, y con un indicador externo se mide con precisión la tasa de flujo.
- Turbina: aprovechan la energía del flujo para hacer girar un rotor, la velocidad del rotor es directamente proporcional a la velocidad del flujo.

2.10 SOFTWARE EPANET

El programa computacional EPANET es una aplicación de código abierto diseñada por la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos de América para modelar redes de distribución de agua potable de tuberías presurizadas. Este software tiene las capacidades de: realizar simulaciones a largo plazo del funcionamiento hidráulico y de la calidad del agua de redes sin límite de tamaño, utilizar demandas dependientes de la presión, calcular la pérdida de carga por fricción con las ecuaciones de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach o Chezy-Manning, calcular la disipación de energía por accesorios, modelar bombas de velocidad constante o variable, calcular el uso de energía eléctrica y su costo, modelar válvulas del tipo cierre, retención regulación de presión o control de caudal, modelar tanques de almacenamiento, entre muchas otras capacidades (Environmental Protection Agency, 2025).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 ETAPA EXPERIMENTAL

3.1.1 Descripción del modelo físico

El modelo diseñado en el IIUNAM (Figura 8) consta de un tanque elevado a una distancia de $2.3\ m$ desde el plano horizontal de referencia (PHR) ubicado en la tubería más cercana al piso; el tanque es un tinaco de polietileno con $1100\ l$ de capacidad. Este tanque tiene una salida en su parte inferior con una tubería de policloruro de vinilo (PVC) de $1\ 1/4$" de diámetro con una longitud de $72\ cm$ hasta un codo de $90°$ y que tiene una válvula de control de tipo esfera de $1/4$ de vuelta a la mitad de su longitud. El modelo continúa con una tubería de PVC de $1\ 1/4$" de diámetro y una longitud de $175.5\ cm$ hasta una reducción a $3/4$" para conectarse a un flujómetro digital de tipo turbina. A la salida del flujómetro se tiene una tubería de PVC con diámetro de $3/4$" y longitud de $54.5\ cm$ que conecta a un codo de $90°$ y sigue $105\ cm$ hasta una válvula de control de tipo esfera y $1/4$" de vuelta. El modelo sigue $15\ cm$ hasta una pieza tee que continúa $9\ cm$ hasta un codo a $90°$ y se prolonga $13\ cm$ más; en estos $13\ cm$ se tiene la preparación para conectar los dispositivos para medir presión en ambos lados. Siguiendo el sentido del flujo, el lado izquierdo luego de la pieza tee termina con un tapón y en el lado derecho de instaló el filtro de malla con inclinación de $45°$. El filtro es desmontable a $7\ cm$ del vértice de la inclinación, característica con la que se puede cambiar el medio filtrante; y continúa $19\ cm$ hasta la preparación para el segundo dispositivo de medición. Posteriormente la tubería de PVC de $3/4$" de diámetro continúa $35\ cm$ hasta una tercera válvula de control, igual a la que se instaló antes del filtro. Por último, el modelo tiene $11\ cm$ más de tubería de PVC de $3/4$" de diámetro que descarga libremente a un tanque secundario. Para facilitar la operación del modelo, el tanque secundario a la salida del modelo fue reemplazado posteriormente por un embudo que llevó el agua de regreso al sistema de desagüe; la descarga libre se mantuvo para no afectar las condiciones de frontera del modelo.

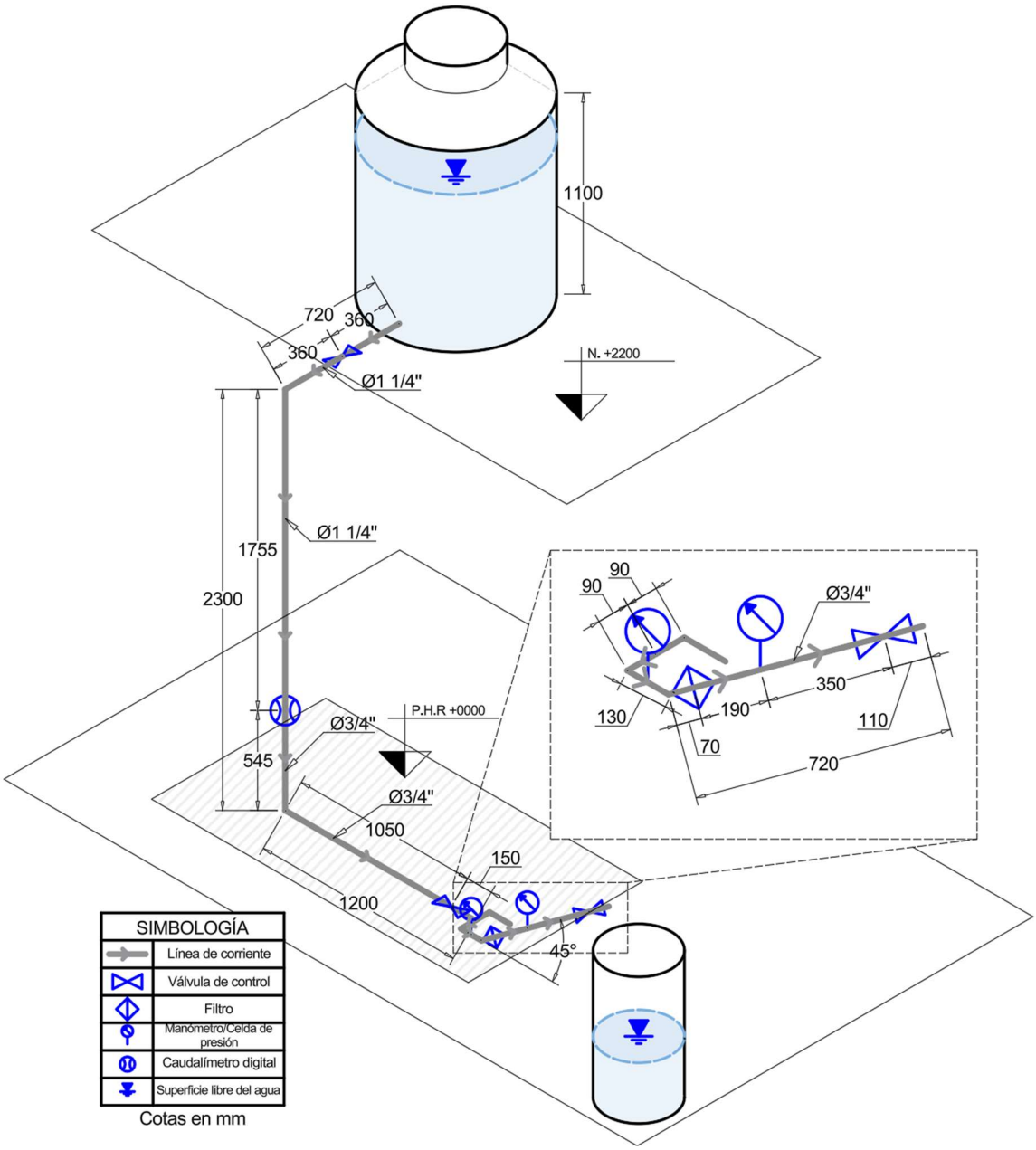


Figura 8. Esquema del modelo experimental diseñado en el IIUNAM. Fuente: elaboración propia.

A diferencia del modelo usado por García Trejo en 2024, el modelo representado anteriormente tiene una válvula esférica de cobre en vez de PVC, ubicada antes de los manómetros, lo que permite una operación de la válvula más precisa. El contraste más representativo son los dispositivos de medición; en la presente investigación se usan manómetros digitales Instrutek D600 que tienen una

resolución de cuatro decimales y tiene una exactitud del 0.4%. También se usan celdas de presión, conjunto de un transmisor de presión Keller y un display Trident series PD765-6R3-1, estas cuentan con una resolución de dos decimales por la configuración dada al display y tienen una exactitud de $\pm 0.25\%$. En la investigación antecedente se utilizaron manómetros analógicos Instrutek de la serie 300 que tienen una resolución de $0.025\ kg_f/cm^2$ con una exactitud de $\pm 2.5\%$, y al ser analógicos su lectura depende del ojo del laboratorista. Las particularidades del modelo utilizado para esta investigación garantizan un mejor control del flujo a través de la válvula de esfera 2 y una precisión entre 6 y 10 veces mayor en contraste con la investigación antecedente.



Figura 9. Fotografía del modelo experimental diseñado en el IIUNAM. Fuente: elaboración propia.



Figura 10. Fotografía del modelo experimental con detalle a las celdas de presión instaladas. Fuente: elaboración propia.



Figura 11. Fotografía del modelo experimental con detalle a los manómetros digitales instalados. Fuente: elaboración propia.

3.1.2 Descripción de los pasos realizados en los ensayos de laboratorio

Se comienza cerrando la válvula 2 y 3 para llenar el tanque elevado con una manguera hasta que el piezómetro marque un nivel de $1.1\ m$. Posteriormente, se coloca el medio filtrante a analizar en el núcleo del filtro de malla: sargazo, fibra esponja de cocina, estropajo común (*Luffa cylindrica*) y filtro de papel para café, también se deja sin medio filtrante (la carcasa del filtro junto con la malla cilíndrica sin material en el núcleo). Una vez instalado el filtro preparado, se abre la válvula 2 y se comprueba visualmente que no existan fugas. A continuación, se purga el aire de las preparaciones para los dispositivos de medición y así garantizar el correcto funcionamiento de estos al instalarlos. Se realiza una segunda verificación visual de fugas luego de instalar los dispositivos de medición y la presión registrada debe estabilizarse; si alguna verificación falla, se desinstalan los dispositivos de medición o el filtro para colocar teflón nuevo y repetir la instalación y verificación de fugas.

El filtro se prepara con el medio filtrante de la siguiente forma: se introducen $10\ g$ de sargazo seco en el núcleo del filtro (malla cilíndrica); se toma una fibra esponja usada para lavarla con agua y jabón, esta se enjuaga y se sumerge en una solución de $60\ ml$ de cloro por cada $1\ l$ de agua durante $10\ min$, una vez seca se cortan dos pastillas cilíndricas para introducir un total de $2\ g$ de fibra esponja en el filtro; se toman dos filtros de papel para café y se doblan para que tomen la forma circular del núcleo del filtro; el estropajo común se corta en tiras delgadas y se compacta para colocar $8\ g$ de este en el filtro.

Con el modelo hidráulico listo y los dispositivos de medición configurados en las mismas unidades de medida $[bar]$. Se hacen tres marcas equidistantes en la segunda válvula, así se garantiza la repetitividad de aperturas del 0, 25, 50, 75 y 100% de la válvula 2. Posteriormente se cierra la segunda válvula y se abre la tercera para dar comienzo al registro de mediciones, la válvula 2 se abre progresivamente hasta llegar al 100% de apertura.

Para hacer el registro de datos, se toman cuatro medidas para cada una de las cinco aperturas. Cada medición se realiza a un Δt establecido al inicio del ensayo y la primera medición después de cambiar la apertura de la válvula se hace $60\ s$ después de haber realizado la modificación al flujo; esto para permitir que éste se estabilice y obtener lecturas representativas. En cada instante de medición se leen los dos dispositivos de medición de presión, el flujómetro y el piezómetro del tanque elevado. La información se registra en las siguientes unidades: $[bar]$ para los manómetros digitales y las celdas de presión, $[l/h]$ para el flujómetro y $[mca]$ para el piezómetro.

Después de realizar cada ensayo se cierran las válvulas 2 y 3 para llenar nuevamente el tanque elevado y reemplazar el medio filtrante; de modo que las condiciones iniciales de cada ensayo sean iguales. Se repite este proceso con todos los medios filtrantes: sargazo, fibra esponja de cocina, estropajo común, filtro de papel para café y sin medio filtrante, así como con ambos dispositivos de medición, celda de presión (CP) y manómetro digital (MnD). Los ensayos se registran con los nombres que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de los ensayos realizados en laboratorio. Fuente: elaboración propia.

Ensayo	Cantidad de material	Dispositivo de medición de presión
Fibra esponja (CP)	2 g	Celdas de presión
Fibra esponja (MnD)	2 g	Manómetros digitales
Filtro de café (CP)	2 piezas	Celdas de presión
Filtro de café (MnD)	2 piezas	Manómetros digitales
Estropajo 1 (CP)	8 g	Celdas de presión
Estropajo 2 (CP)	8 g	Celdas de presión
Estropajo (MnD)	6 g	Manómetros digitales
Sargazo 1 (CP)	10 g	Celdas de presión
Sargazo (MnD)	10 g	Manómetros digitales
Sargazo 2 (CP)	10 g	Celdas de presión
Sargazo 3 (CP)	10 g	Celdas de presión
Sin material (CP)	0 g	Celdas de presión
Sin material (MnD)	0 g	Manómetros digitales

3.1.3 Procesamiento de datos y metodología de cálculo

Los datos se registran en la Tabla A 1 del anexo y posteriormente se introducen en la Tabla A 2 del anexo en una hoja de cálculo. Se hacen conversiones de unidades para mantener uniformidad en éstas, los datos quedan expresados en las siguientes unidades: $[kg/m^2]$ para la presión y $[m^3/s]$ para el caudal. Como datos iniciales se toman la temperatura, la viscosidad cinemática del agua, la densidad del agua, el diámetro de la conducción, la longitud entre las secciones de control, el valor de la aceleración de la gravedad, la elevación de las secciones, la rugosidad absoluta y el coeficiente de pérdida de carga asociado a los accesorios entre las secciones de control.

Para obtener el coeficiente k se partió de las $(Ec.9)$ y $(Ec.27)$ sustituídas en la $(Ec.8)$ para expresar éste de la siguiente forma $(Ec.28)$:

$$k_{filtro} = \frac{z_1 + \frac{p_1}{\gamma} - z_2 - \frac{p_2}{\gamma} - f\frac{L}{D}\frac{v^2}{2g}}{\frac{v^2}{2g}} - k_{acc} \quad (Ec.28)$$

Para calcular el factor de fricción f, recordando el número de Reynolds $(Ec.1)$, se usa la expresión de Poiseuille $(Ec.10)$ para $Re < 2300$, la interpolación cúbica de Dunlop $(Ec.16$ a $Ec.25)$ para $2300 \leq Re < 4000$ y la ecuación de Colebrook y White modificada $(Ec.26)$ para $Re \geq 4000$.

$$Re = \frac{vD}{\upsilon} \quad (Ec.1)$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad (Ec.10) \quad ; \text{para } Re < 2300$$

$$f = x_1 + RR[x_2 + RR(x_3 + x_4)] \quad (Ec.16) \quad ; \text{para } 2300 \leq Re < 4000$$

$$f = \frac{0.25}{\left(\log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{G}{Re^T}\right)\right)^2} \quad (Ec.26) \quad ; \text{para } Re \geq 4000$$

Este cálculo se realiza con la Tabla A 3 del anexo tomando inicialmente el caudal y el área de la sección transversal de la tubería para calcular la velocidad del flujo. Con esto se procede a calcular el Re para conocer el régimen en el que se encuentra el flujo y calcular f. Después se calcula la pérdida de carga por fricción h_f, con lo que se calcula k usando la $(Ec. 28)$.

El proceso anterior se repite promediando los datos medidos en laboratorio por cada una de las aperturas con el fin de obtener una curva suavizada (Tabla A 4 del anexo); esto busca reducir el error debido a la variabilidad en las características del flujo provocado por cambios en la apertura de la válvula de control y por variaciones físicas del medio filtrante (compresión y dilatación por el paso del flujo). Con el objeto de lograr una perspectiva adicional, se calcula la disipación de energía debida al filtro y la pérdida de carga total entre las secciones 1 y 2.

Adicionalmente se hace una regresión potencial relacionando Re con el coeficiente k; dado que describe de la forma más aproximada posible el fenómeno observado. Con lo cual se genera una ecuación de ajuste que busque englobar de manera precisa la nube de puntos registrada en laboratorio.

3.2 ETAPA DE MODELACIÓN NUMÉRICA

3.2.1 Descripción del modelo numérico EPANET

El modelo hidráulico en EPANET es una representación matemática del modelo físico (Figura 12). Este se compone de un tanque, un reservorio, quince tramos de tubería (tres de $1\ 1/4$" y doce de $3/4$"), diecisiete nodos y tres válvulas de regulación TCV (Throttle Control Valve), de las que una es de $1\ 1/4$" y dos de $3/4$". Para trazar el modelo se usa un mapa de fondo basado en la Figura 8. En la Tabla 3 se muestra a detalle las características de las tuberías dibujadas en EPANET. Se coloca un reservorio en vez de un nodo para simular la despresurización del sistema y la descarga libre.

Tabla 3. Dimensiones y coeficientes k por tubería en el modelo matemático. Fuente: elaboración propia.

Tramo	Longitud [m]	Diámetro [mm]	k	Accesorios considerados
1	0.36	31.75	0.5	Entrada brusca al sistema
2	0.36	31.75	0.07	Válvula esférica (bola) de 1 1/4" totalmente abierta
3	1.755	31.75	0.9	Codo a 90°
4	0.545	19.05	10.91	Contracción brusca de 1 1/4" a 3/4" y flujómetro
5	1.05	19.05	0.9	Codo a 90°
6	0.15	19.05	0.08	Válvula esférica (bola) de 3/4 totalmente abierta
7	0.09	19.05	2	Te con flujo derivado
8	0.065	19.05	0.9	Codo a 90°
9	0.065	19.05	0	Mannómetro 1
10	0.14	19.05		Filtro
11	0.12	19.05	0	
12	0.35	19.05	0	Manómetro 2
13	0.11	19.05	1.08	Válvula esférica (bola) de 3/4 totalmente abierta y salida brusca
14	0.09	19.05	0	Tramo cerrado
15	0.13	19.05	0	Tramo cerrado

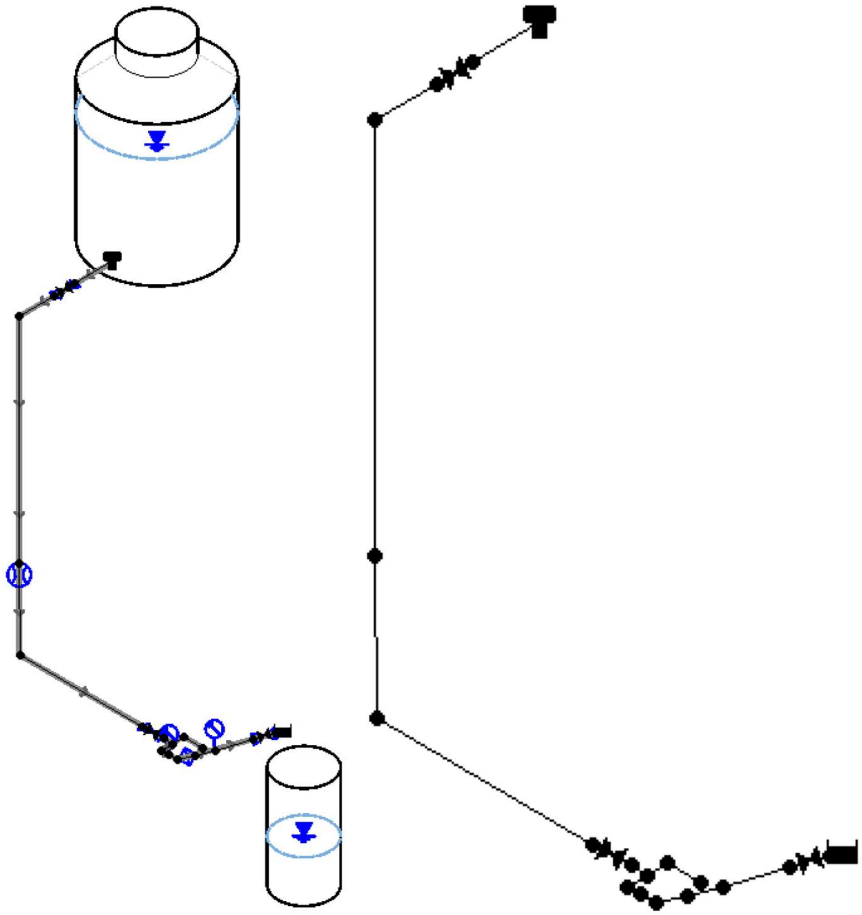


Figura 12. Esquema del modelo hidráulico en EPANET. Fuente: elaboración propia.

3.2.2 Descripción de los pasos realizados en la modelación numérica

En primera instancia para dibujar el modelo en EPANET, se comprueban las unidades que utilizará el software; para la presente investigación se fija el uso del sistema métrico, por lo que las unidades a utilizar son: litros por minuto para el caudal $[LPM]$ (para aumentar la precisión respecto a $[LPS]$), para el diámetro de tuberías, el diámetro de válvulas y la rugosidad absoluta $[mm]$, para cotas, niveles, longitudes y las dimensiones del tanque $[m]$. Posteriormente, se selecciona la ecuación de Darcy-Weisbach para calcular las pérdidas de carga por fricción.

Acto seguido, se definen las dimensiones por default que tomará el software al colocar un elemento nuevo, elevación de nodos, diámetros de tuberías y tanques, rugosidad absoluta, longitud de tuberías y los prefijos de los identificadores; también se configura el tiempo total de simulación y el paso del tiempo. A continuación, se carga el mapa de fondo y se procede a dibujar la red de aguas arriba a aguas abajo.

En consecuencia, se revisa elemento por elemento para que cada uno cuente con las dimensiones correctas y se agregan los coeficientes k como se muestra en la Tabla 3. Por último, los tramos 14 y 15 se configuran como cerrados para simular el tapón a la izquierda de la pieza Tee y se programan las reglas de operación de la válvula 2.

Con el modelo matemático listo, se hacen simulaciones cambiando el coeficiente k del filtro (representado con el tramo 10) según el material evaluado. El valor de k a utilizar se toma como el promedio de los calculados por material y se contrasta al evaluar Re en las ecuaciones de regresión potencial por material.

De cada simulación se toman los datos de p_1 con el nodo 10 que representa la celda de presión o el manómetro 1, p_2 con el nodo 13 y Q con el conducto 4 que simula el flujómetro. Estos datos se registran en el formato de la Tabla A 5 del anexo. Por último, se hacen promedios de los datos medidos en laboratorio y de los obtenidos en EPANET para calcular el error relativo de p_1, p_2, Q, v y h_{filtro}.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Durante la etapa experimental se realizaron un total de trece ensayos: cuatro con sargazo como medio filtrante, dos con fibra esponja de cocina, dos con filtro de papel para café, tres con estropajo común y dos sin material. Se hicieron cinco ensayos midiendo con los manómetros digitales y ocho midiendo con las celdas de presión.

Como datos iniciales se consideró una temperatura de $T = 20°$, una viscosidad cinemática de $\nu = 1.0034\ mm^2/s$, una densidad $\gamma = 991.2\ kg/m^3$, un diámetro de tubería de $D = 19.05\ mm$, una longitud del manómetro 1 al manómetro 2 de $L_{1-2} = 0.325\ m$, la aceleración de la gravedad de $g = 9.81\ m/s^2$, una elevación de la sección 1 de $z_1 = 0\ m$, una elevación de la sección 2 de $z_2 = 0.13\ m$, un coeficiente de pérdida de carga por accesorios de $k_{acc} = 0$ debido que no hay alteraciones al flujo entre las secciones 1 y 2 además del filtro, y una rugosidad absoluta de $\varepsilon = 0.0015\ mm$.

El comportamiento observado al relacionar el número de Reynolds y el coeficiente k sigue una tendencia similar en todos los experimentos realizados; en su conjunto los resultados aproximan una trayectoria común. Se aprecia que en el régimen laminar ($Re < 2000$) la disipación de energía debida al filtro se eleva exponencialmente. Cuando el flujo está en régimen de transición ($2000 \leq Re < 4000$) se presenta mayor variabilidad en los valores de k obtenidos, debido a que el flujo se vuelve inestable y fluctúa entre el régimen laminar y el régimen turbulento. En tanto más aumenta el número de Reynolds por encima de 4000 (régimen turbulento), el valor de k se estabiliza y por tanto la pérdida de carga es menor. Es reconocible una convergencia entre todos los materiales utilizados mientras aumenta el valor de Re, lo que indica independencia entre el coeficiente k y Re, como se observa en las Figuras 13 y 14.

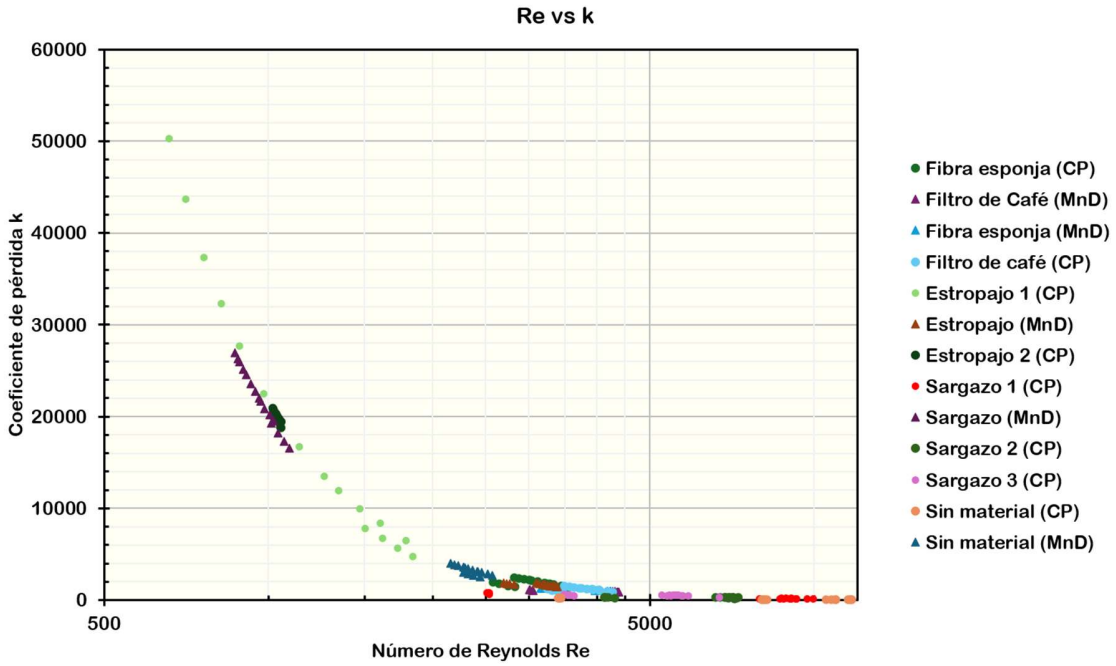


Figura 13. Gráfica $Re\ vs\ k$, curva experimental completa. Fuente: elaboración propia.

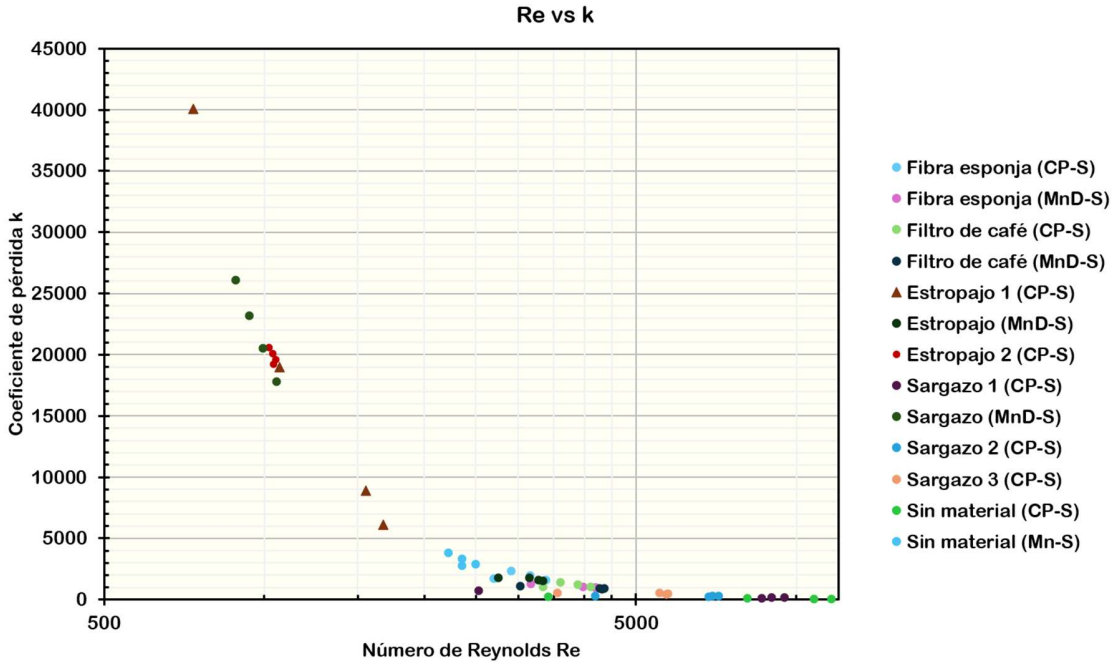


Figura 14. Gráfica $Re\ vs\ k$, curva experimental suavizada. Fuente: elaboración propia.

Relacionando el gasto Q con la pérdida de carga debida al filtro h_{filtro} (Figuras 15 y 16) se observa que la mayor disipación de energía (de $1.5\,m$ a $3\,m$) está en los rangos de caudal de entre $0\,l/h$ y $350\,l/h$. Sin embargo, en todos los experimentos hay poca pérdida de carga debida al filtro al inicio del experimento, cuando el caudal es pequeño por la política de operación de la válvula 2. Esto indica que el filtro disipa más energía mientras se desarrolla el ensayo, momento en el que el filtro obstruye el paso del agua de forma más estable por el fenómeno de colmatación progresiva.

En este punto, la pérdida de carga se relaciona con la estructura interna del material por el que pasa y no depende enteramente de la velocidad del flujo. Esto es mayormente reconocible con la fibra esponja, el filtro de café y el ensayo 2 con estropajo, en los que el caudal es muy parecido al inicio y al final del experimento. En la curva suavizada se reconoce que todos los materiales (exceptuando cuando el filtro no tiene material en su núcleo) presentan un comportamiento análogo en el que h_{filtro} continúa aumentando mientras el caudal disminuye por la reducción de carga potencial.

Cabe destacar que los ensayos Sargazo 1 (CP), Sargazo (MnD) y Sin material (MnD) presentan un comportamiento anómalo. Durante el primero, el modelo tenía una manguera a la salida, en la que se formó una burbuja de aire que provocó registros de presión negativa en la celda de presión 2. Por su parte, los ensayos Sargazo (MnD) y Sin material (MnD) se realizaron después de Estropajo (MnD) y presentan un dramático aumento en pérdida de carga debido a una obstrucción con restos de estropajo. Adicionalmente, en los ensayos Estropajo 1 (CP) y Estropajo 2 (CP) se usaron $8\,g$ de material y para Estropajo (MnD) esta cantidad se redujo a $6\,g$.

El comportamiento al relacionar la pérdida de carga total entre las secciones 1 y 2 h_{1-2} es análogo al observado en las Figuras 15 y 16. Esto es debido a que el filtro representa el mayor obstáculo por vencer para el flujo. La relación entre Q y h se puede observar en las Figuras A 5 y A 6 del anexo.

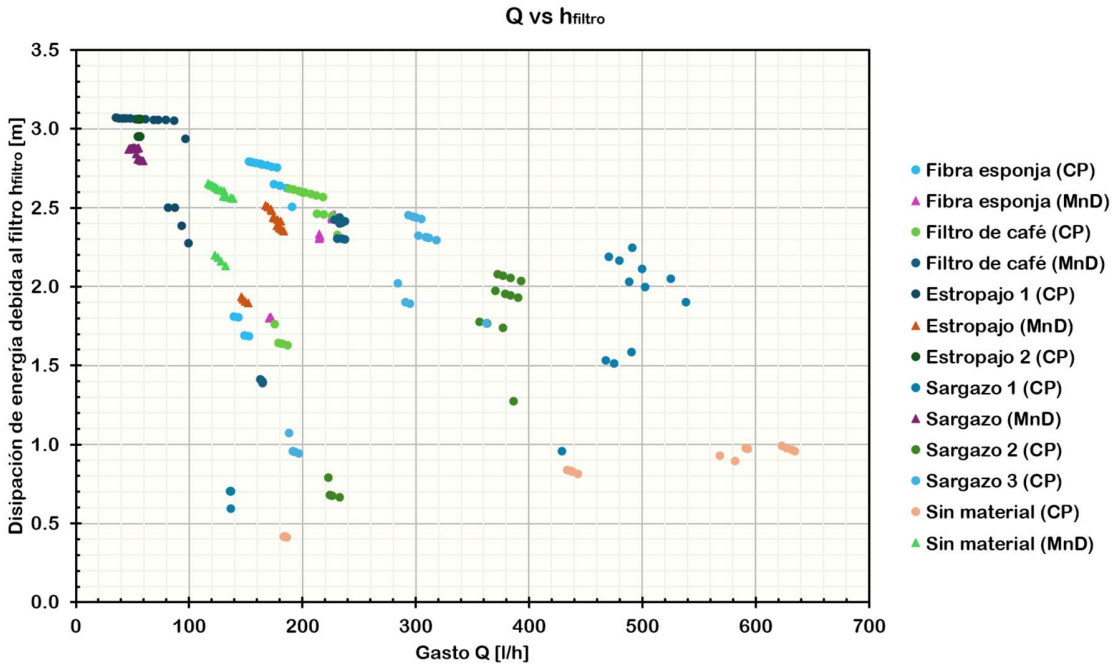


Figura 15. Gráfica $Q\ vs\ h_{filtro}$, curva experimental completa. Fuente: elaboración propia.

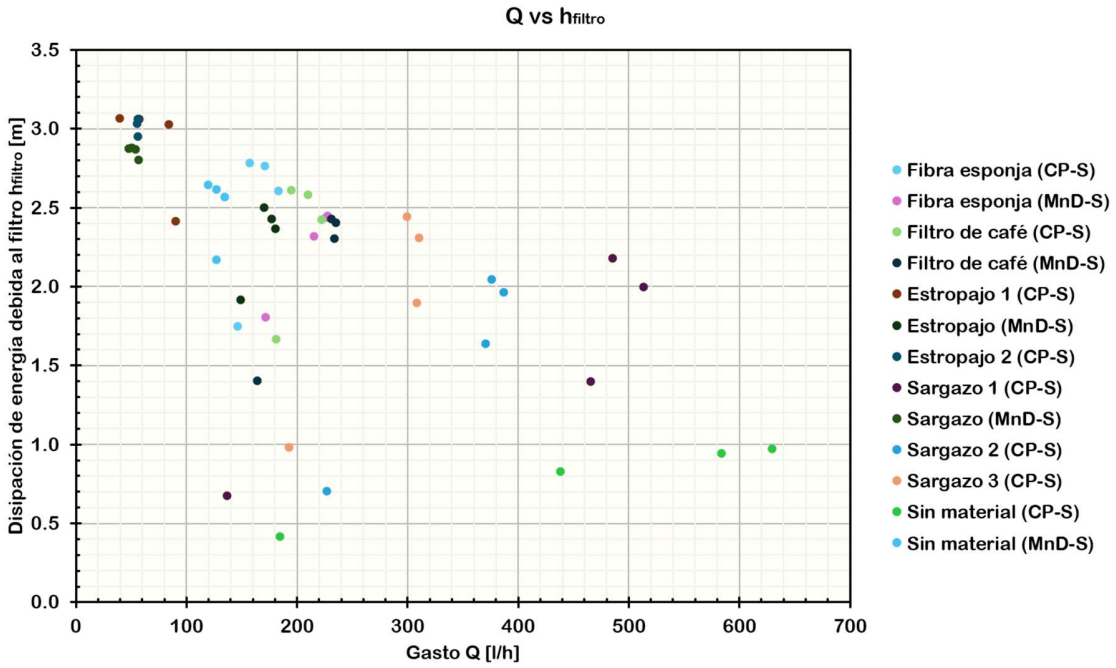


Figura 16. Gráfica $Q\ vs\ h_{filtro}$, curva experimental suavizada. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 17 se presentan columnas que se atribuyen a la energía disipada entre las secciones 1 y 2 en cada experimento, donde la sección verde corresponde al porcentaje de pérdida de carga debida al filtro y la sección azul a la pérdida de carga por fricción. Las etiquetas de cada segmento muestran el valor de la disipación de energía para el respectivo ensayo, expresada en $[m]$.

Adicionalmente se observa que, en promedio, el 91.29% de la disipación de energía en todos los ensayos se atribuye al filtro. La pérdida de carga por fricción adquiere mayor relevancia cuando el filtro no tiene material en su núcleo, disipando el 46.94% de la energía total en el ensayo Sin material (CP). Este comportamiento difiere en Sin material (MnD) debido a que presentó una obstrucción física por restos de estropajo, de modo que tiene un comportamiento similar al de un ensayo con medio filtrante en el núcleo del filtro. Con base en los promedios obtenidos en la Tabla 4 (ver siguiente página), el material más eficiente para disipar energía es el estropajo común (98.26%), seguido por la fibra esponja de cocina (94.94%), el filtro de papel para café (93.24%) y el sargazo (83.83%).

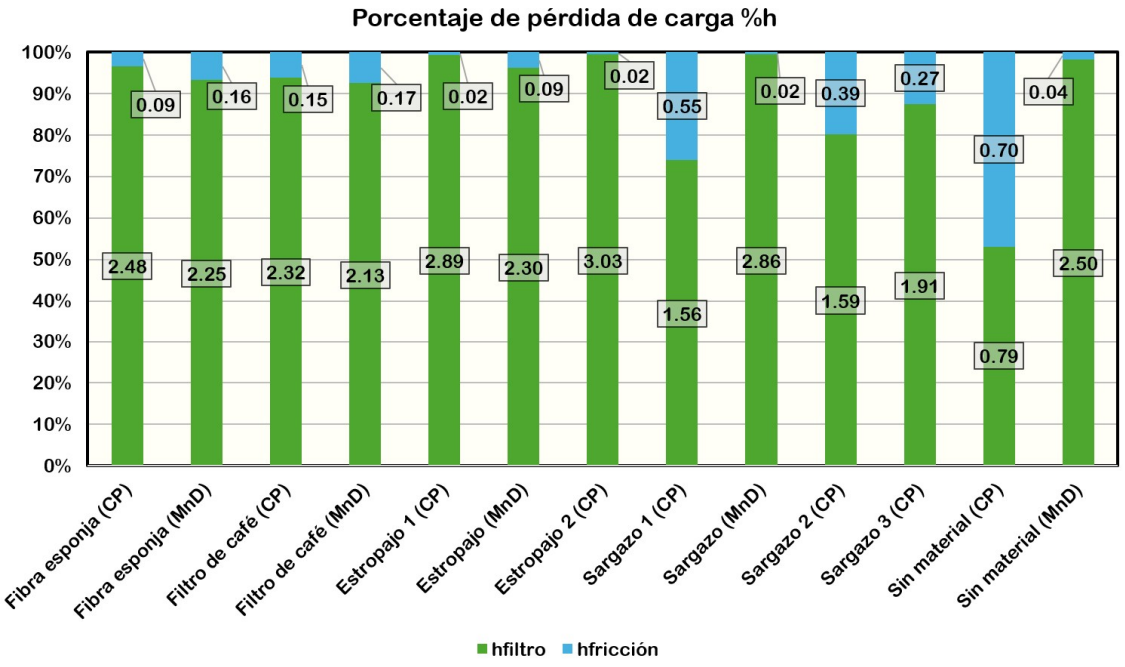


Figura 17. Gráfica porcentaje de pérdida de carga debida al filtro respecto a la pérdida de carga total. Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Pérdida de carga entre las secciones 1 y 2 y energía disipada por el filtro, se despreciaron en el cálculo estadístico los datos de Sargazo 1 (CP), Sargazo (MnD) y Sin material (MnD), por presentar un comportamiento atípico. Fuente: elaboración propia.

Ensayo	h_{filtro} [m]	$h_{fricción}$ [m]	h [m]	% Disipación de energía	Promedio por material
Fibra esponja (CP)	2.48	0.09	2.56	96.65%	**94.94%**
Fibra esponja (MnD)	2.25	0.16	2.42	93.23%	
Filtro de café (CP)	2.32	0.15	2.47	93.91%	**93.24%**
Filtro de café (MnD)	2.13	0.17	2.31	92.56%	
Estropajo 1 (CP)	2.89	0.02	2.91	99.24%	**98.26%**
Estropajo (MnD)	2.30	0.09	2.39	96.12%	
Estropajo 2 (CP)	3.03	0.02	3.05	99.40%	
Sargazo 1 (CP)	1.56	0.55	2.11	73.98%	**83.83%**
Sargazo (MnD)	2.86	0.02	2.87	99.41%	
Sargazo 2 (CP)	1.59	0.39	1.98	80.20%	
Sargazo 3 (CP)	1.91	0.27	2.18	87.46%	
Sin material (CP)	0.79	0.70	1.49	53.06%	**53.06%**
Sin material (MnD)	2.50	0.04	2.54	98.27%	
Promedio =	2.17	0.21	2.38	91.29%	

En la Tabla 5 se muestran los valores de los coeficientes k calculados con base en los datos medidos en laboratorio. En los ensayos donde se usó estropajo como medio filtrante, la pérdida de carga es muy parecida con promedios entre $2.30\ m$ y $3.03\ m$ (ver Figura 17). Sin embargo, los valores del coeficiente k cambian diametralmente y la diferencia está en que se usó un 25% menos de material poroso en el ensayo Estropajo (MnD) en comparación con Estropajo 1 (CP) y Estropajo 2 (CP). Recordando la ecuación de pérdida de carga local $(Ec.27)$ el coeficiente k y el caudal Q, que puede expresarse como función de la velocidad $(Ec.29)$, se relacionan directamente de forma cuadrática. De modo que un coeficiente k muy grande multiplicado por un factor de velocidad muy pequeño resulta muy cercano a cuando se tiene un k pequeño con un factor de velocidad grande. Esto debido a que el modelo regula el caudal por su energía potencial disponible y la resistencia al flujo imprimida por el filtro.

$$h_l = k\frac{v^2}{2g} \quad (Ec.27) \qquad h_l = k\frac{Q^2}{A^2 2g} \quad (Ec.29)$$

Tabla 5. Coeficientes k obtenidos durante los ensayos. Fuente: elaboración propia.

Ensayo		$k_{filtroMin}$	$k_{filtroMax}$	$k_{filtroPromedio}$	Promedio por material
Fibra esponja (CP)		1417.62	2479.67	1900.64	**1483.82**
Fibra esponja (MnD)		968.82	1276.87	1067.01	
Filtro de café (CP)		904.09	1524.32	1178.66	**1062.79**
Filtro de café (MnD)		843.27	1101.20	946.92	
Estropajo 1 (CP)	8 g de material	4742.33	50297.07	19103.87	**19491.27**
Estropajo 2 (CP)		18761.36	20910.98	19878.66	
Estropajo (MnD)	6 g de material	1447.71	1873.69	1666.10	**1666.10**
Sargazo 1 (CP)		107.36	788.89	307.30	**392.24**
Sargazo (MnD)		16544.28	26963.26	18502.50	
Sargazo 2 (CP)		176.75	328.46	275.70	
Sargazo 3 (CP)		278.00	623.39	508.78	
Sin material (CP)		49.17	256.30	112.04	**112.04**
Sin material (MnD)		2522.17	4014.61	3214.41	

En las Figuras 18 a la 23 se muestran gráficas que relacionan Re con el coeficiente k. En ellas se presenta la ecuación y el coeficiente de determinación relativos a la respectiva regresión potencial, la cual se aproxima asintóticamente a los ejes y representa adecuadamente el fenómeno observado. En el caso de Estropajo común ($8\ g$) y Sin material (CP) se tiene un $R^2 = 0.9953$ y un $R^2 = 0.9983$ respectivamente, lo que indica una aproximación que representa casi a la perfección el comportamiento de k como variable dependiente de Re. Por el contrario, para la Fibra esponja, el Filtro de papel para café, el Estropajo ($6\ g$), y el Sargazo (CP), se obtuvieron $R^2 = 0.639$, $R^2 = 0.2355$, $R^2 = 0.5684$ y $R^2 = 0.2449$ respectivamente. Esto se debe a la inestabilidad del flujo inherente al régimen de transición en el que se desarrolló el flujo de estos ensayos, cuyo efecto se acrecentó en los casos del Filtro de papel para café y el Sargazo (CP) por la reconfiguración geométrica de su masa, la cual se adapta según se comprime por el empuje dinámico del agua y la velocidad del flujo.

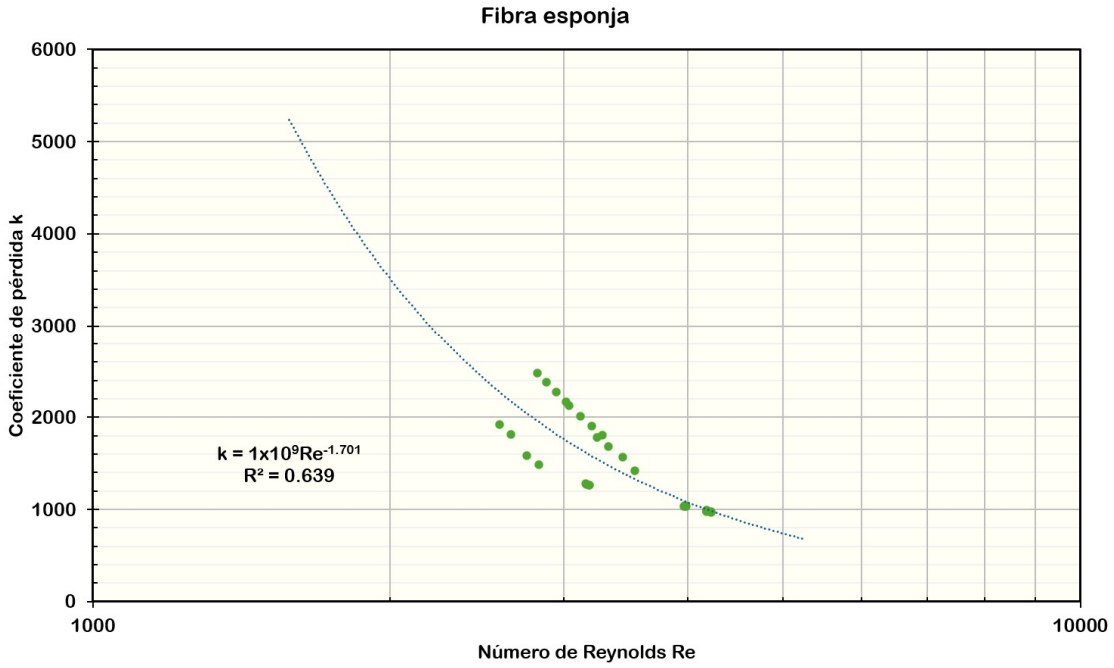


Figura 18. Gráfica $Re\ vs\ k$ de fibra esponja con regresión potencial. Fuente: elaboración propia.

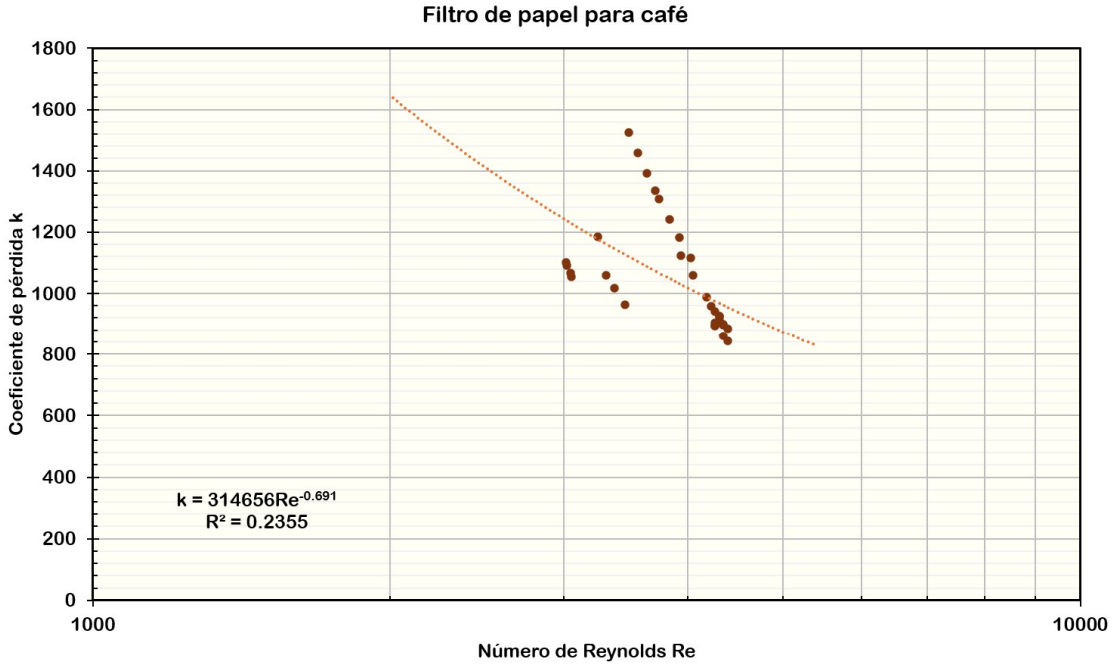


Figura 19. Gráfica $Re\ vs\ k$ de filtro de papel para café con regresión potencial. Fuente: elaboración propia.

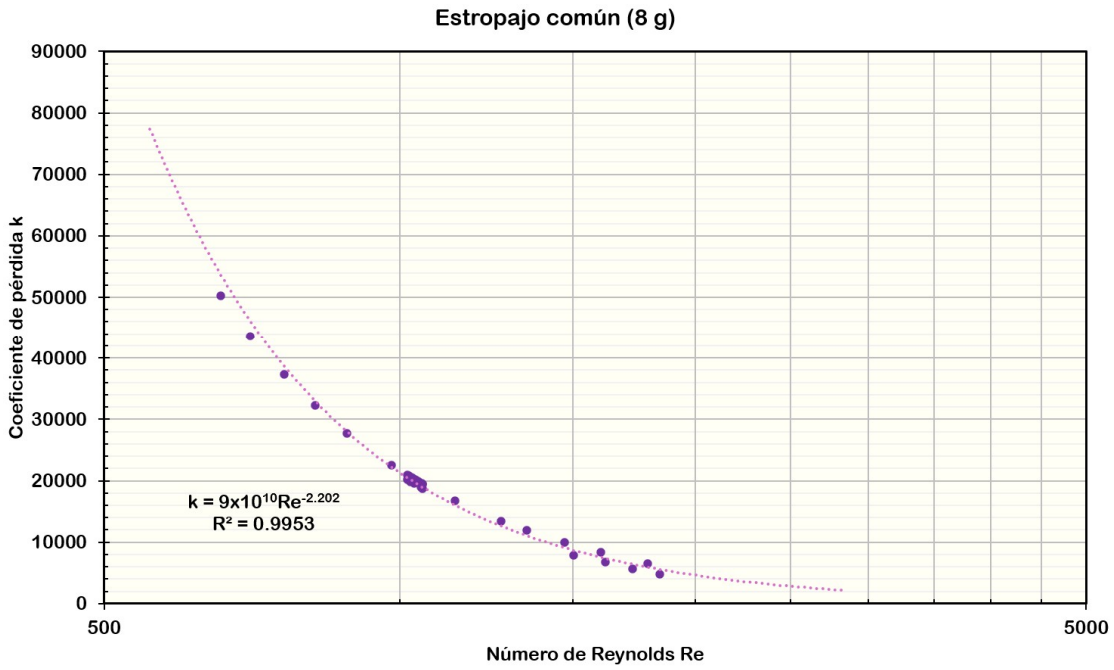


Figura 20. Gráfica $Re\ vs\ k$ de estropajo (8 g) con regresión potencial. Fuente: elaboración propia.

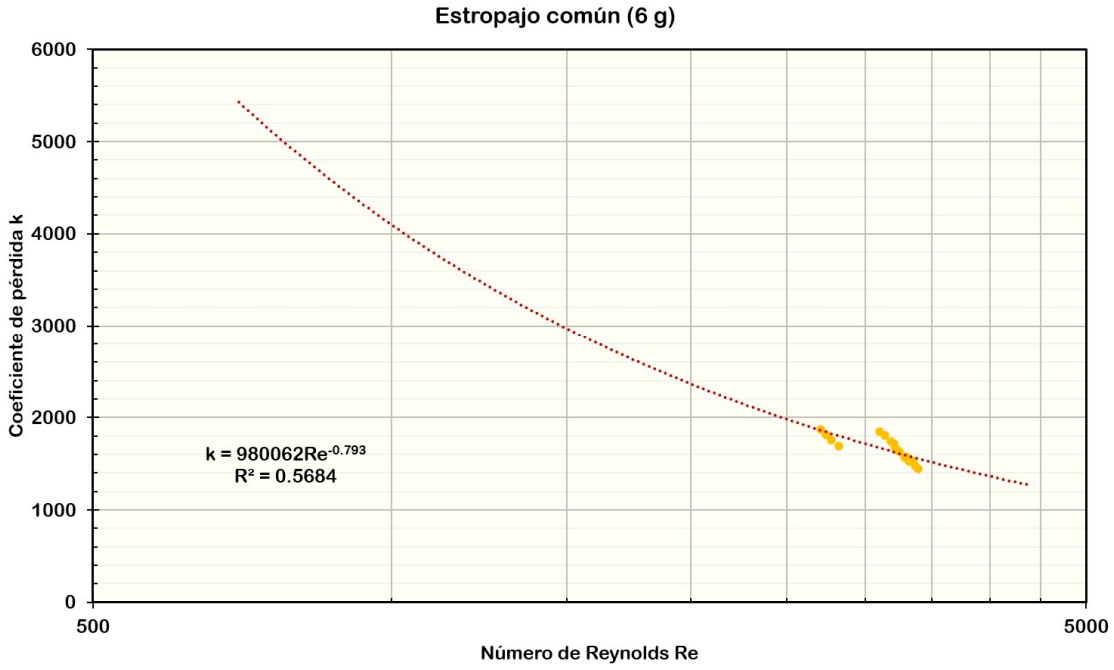


Figura 21. Gráfica $Re\ vs\ k$ de estropajo (6 g) con regresión potencial. Fuente: elaboración propia.

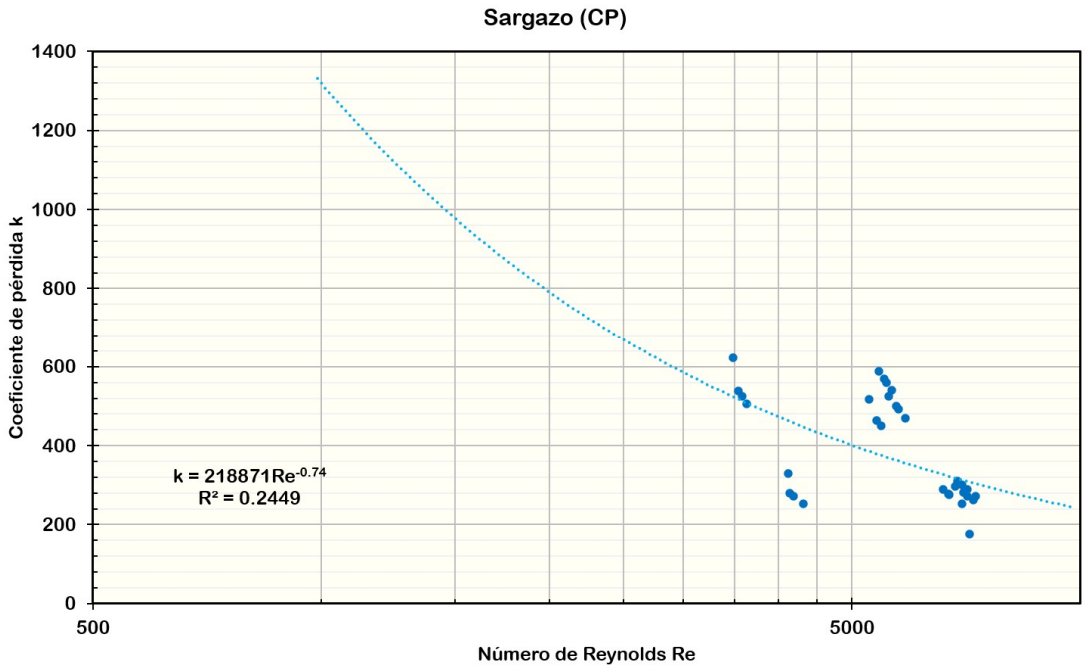


Figura 22. Gráfica $Re\ vs\ k$ de sargazo con regresión potencial. Fuente: elaboración propia.

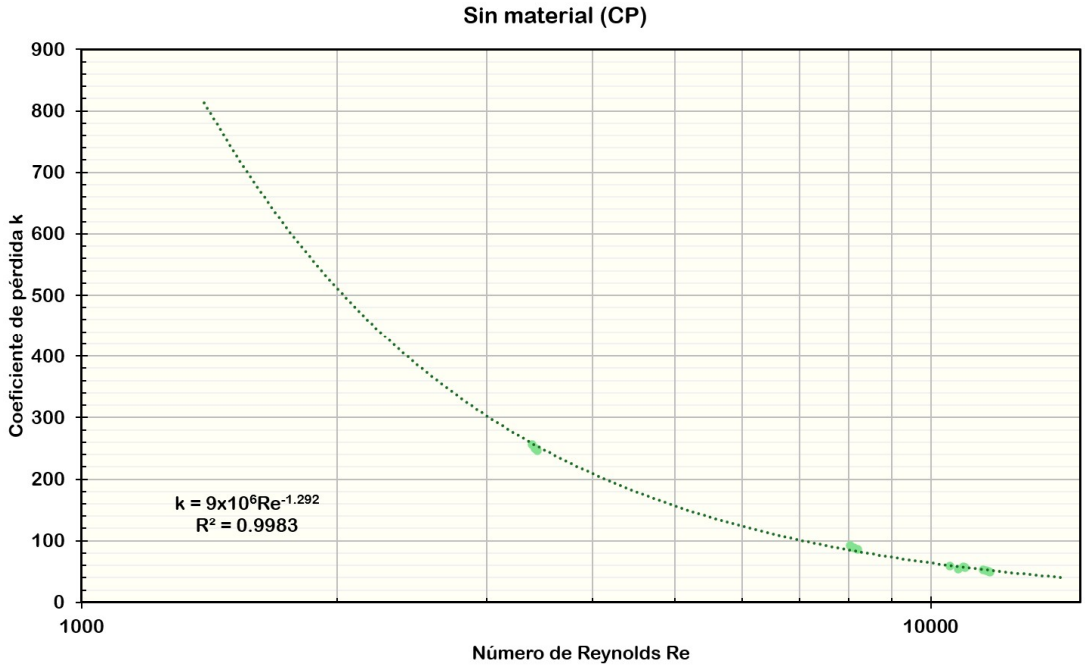


Figura 23. Gráfica $Re\ vs\ k$ de núcleo de filtro sin material con regresión potencial. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Ecuaciones de ajuste para el coeficiente k por material. Fuente: elaboración propia.

Material	Ecuación de ajuste	Coeficiente de determinación
Fibra esponja	$k = 1x10^{9} Re^{-1.701}$	0.639
Filtro para café	$k = 314656Re^{-0.691}$	0.2355
Estropajo 8 g	$k = 9x10^{10} Re^{-2.202}$	0.9953
Estropajo 6 g	$k = 980062Re^{-0.793}$	0.5684
Sargazo	$k = 218871Re^{-0.74}$	0.2449
Sin material	$k = 9x10^{6} Re^{-1.292}$	0.9983

4.2 RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO

Se realizaron un total de doce ensayos en el modelo desarrollado en EPANET. Cada ensayo tuvo una duración de simulación de 34 minutos. Se reprodujo el efecto de la operación de la válvula 2, que permanece cerrada durante los primeros 6 minutos y cambia su apertura 25% hasta llegar al 100% de apertura en intervalos de 7 minutos. Las Tablas 7 y 8 comparan los valores medidos en laboratorio con los valores obtenidos con el modelo matemático en EPANET y reportan su respectivo error relativo. Para los valores obtenidos con los promedios por material del coeficiente k se obtuvo un error promedio del 24.08%. Mientras que en los escenarios con coeficientes k calculados con las ecuaciones de regresión potencial se obtuvo un error promedio del 23.83%, ostentando un error global del 23.96% en su conjunto.

La mayor discrepancia se encuentra en los resultados obtenidos en los ensayos Sin material (carcasa y malla central sin medio filtrante), ya que al ser los casos con mayor caudal se tiene un coeficiente k con mayor variabilidad. Esto se debe a que las pérdidas de carga locales dependen de la velocidad del flujo y el coeficiente k tiene una relación directa con Re. En otras palabras, las características del flujo definen la cantidad de energía que se disipa por efecto de los accesorios instalados en una red presurizada. Con lo cual, realizar una simulación donde el flujo es altamente variable (al igual que en los experimentos efectuados en laboratorio) con valores constantes del coeficiente k, resulta en una simplificación que provoca errores relativos elevados.

En los ensayos donde el caudal es menor, el efecto de falta de dinamismo en el valor del coeficiente k decrece por tener características de flujo más estables. A su vez, esto produce menor dispersión en los datos obtenidos y se minimiza la amplificación generada por la relación cuadrática de k con la velocidad v en la ecuación de pérdida de carga local $(Ec. 27)$, obteniendo un menor error relativo. Los materiales ensayados durante esta investigación son medios deformables que sufren una reconfiguración geométrica en función de la hidrodinámica del flujo que pasa a través de ellos, por lo que un valor único del coeficiente de pérdida de carga no puede reproducir su comportamiento dinámico.

Tabla 7. Comparación de valores medidos en laboratorio y calculados por EPANET con coeficientes k promedio por material. Fuente: elaboración propia.

Variable \ Ensayo		Fibra esponja	Filtro para café	Estropajo 8 g	Estropajo 6 g	Sargazo	Sin material
k	Valor	1483.82	1062.79	19491.27	1666.10	392.24	112.04
p_1 [kg/m^2]	Experimental	2952.98	2860.71	3411.61	2790.18	2585.28	1933.82
	EPANET	3211.88	3188.13	3281.25	3218.75	3073.13	2755.00
	% Error	8.77%	11.45%	3.82%	15.36%	18.87%	42.46%
p_2 [kg/m^2]	Experimental	357.55	364.00	329.16	287.81	394.31	329.16
	EPANET	330.00	330.00	330.00	330.00	340.00	380.00
	% Error	7.71%	9.34%	0.26%	14.66%	13.77%	15.45%
Q [m^3/s]	Experimental	0.00005	0.00006	0.00002	0.00005	0.00008	0.00013
	EPANET	0.00005	0.00006	0.00001	0.00005	0.00010	0.00018
	% Error	3.51%	9.06%	30.21%	8.21%	31.86%	38.21%
v [m/s]	Experimental	0.182	0.204	0.060	0.165	0.270	0.447
	EPANET	0.189	0.222	0.042	0.178	0.357	0.618
	% Error	3.51%	9.06%	30.21%	8.21%	31.86%	38.21%
h_{filtro} [m]	Experimental	2.26	2.23	2.96	2.30	1.75	0.79
	EPANET	2.70	2.67	1.77	2.70	2.54	2.18
	% Error	19.28%	19.78%	40.26%	17.58%	45.32%	176.23%

Tabla 8. Comparación de valores medidos en laboratorio y calculados por EPANET con coeficientes k calculados con las ecuaciones mostradas en la Tabla 6. Fuente: elaboración propia.

Variable \ Ensayo		Fibra esponja	Filtro para café	Estropajo 8 g	Estropajo 6 g	Sargazo	Sin material
k	Valor	953.71	1044.84	16462.77	1656.38	363.19	75.50
p_1 [kg/m^2]	Experimental	2952.98	2860.71	3411.61	2790.18	2585.28	1933.82
	EPANET	3180.00	3186.88	3280.00	3218.13	3060.63	2595.63
	% Error	7.69%	11.40%	3.86%	15.34%	18.39%	34.22%
p_2 [kg/m^2]	Experimental	357.55	364.00	329.16	287.81	394.31	329.16
	EPANET	330.00	330.00	330.00	330.00	346.88	398.13
	% Error	7.71%	9.34%	0.26%	14.66%	12.03%	20.95%
Q [m^3/s]	Experimental	0.00005	0.00006	0.00002	0.00005	0.00008	0.00013
	EPANET	0.00007	0.00006	0.00002	0.00005	0.00011	0.00021
	% Error	28.30%	10.01%	5.08%	8.54%	36.64%	61.19%
v [m/s]	Experimental	0.182	0.204	0.060	0.165	0.270	0.447
	EPANET	0.234	0.224	0.057	0.179	0.370	0.721
	% Error	28.30%	10.01%	5.08%	8.54%	36.64%	61.19%
h_{filtro} [m]	Experimental	2.26	2.23	2.96	2.30	1.75	0.79
	EPANET	2.66	2.67	2.76	2.71	2.53	2.00
	% Error	17.78%	19.82%	6.67%	17.62%	44.49%	153.22%

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

Se observó que el comportamiento del coeficiente k no es lineal o estático, sino que disipa energía dinámicamente según el régimen en el que se encuentre el flujo y la hidrodinámica de este. El valor del coeficiente k responde de forma potencial a las características con las que se desarrolla el mismo. Esto se debe a que los materiales ensayados son deformables y sufren reconfiguraciones geométricas conforme estos se colmatan gradualmente.

En la Tabla 5 se observa que cada material probado en laboratorio presenta un rango inherente de valores del coeficiente k, en las condiciones en las que fueron ensayados. Los valores promedio de k por material variaron entre 392.24 (sargazo) y $19\,491.27$ (estropajo (8 g)), mientras que la carcasa y la malla cilíndrica del filtro tienen un valor promedio de k de 112.04. Este coeficiente puede aproximarse con las ecuaciones mostradas en la Tabla 6. En todos los experimentos realizados, independientemente del núcleo usado en el filtro, se observa el mismo comportamiento del coeficiente k en relación con el número de Reynolds Re, que representa las características principales del flujo.

La precisión y la sensibilidad de los dispositivos de medición empleados a lo largo de los experimentos que nutren esta investigación, permiten observar que hay más dispersión de los datos cuando el flujo se desarrolla en régimen de transición, debido a la inestabilidad de éste. Asimismo, la pérdida de carga debida al filtro es más estable y predecible a caudales pequeños, en los que se presenta un régimen laminar. Adicionalmente, es conveniente un flujo lento que permita aumentar el tiempo de retención del filtro y que permita aprovechar las características de cada material en virtud de mejorar la calidad del agua.

En consecuencia, es recomendable que en los casos de la fibra esponja de cocina, los filtros de papel para café y el sargazo, se prepare un núcleo más compacto o con mayor cantidad de material para obligar a que el sistema trabaje bajo un régimen laminar de flujo. Lo que permitirá aprovechar las características de los medios porosos y aproximar su comportamiento de mejor forma en análisis y diseños teóricos.

En las simulaciones realizadas con el modelo matemático utilizando las ecuaciones deducidas para cada material, se obtuvo un porcentaje de error del 23.83%. No obstante, este resultado evidencia que se debe utilizar una curva de valores del coeficiente k y no un único valor de este, puesto que en los casos donde el caudal es variable en mayor medida, el error relativo a los valores medidos en laboratorio aumenta considerablemente. Asimismo, es más evidente la falta de sensibilidad del modelo ante las reconfiguraciones geométricas de materiales deformables cuya forma de disipar energía no es constante.

Finalmente, los objetivos de la presente investigación se cumplieron satisfactoriamente, dado que con los resultados obtenidos en laboratorio se calcularon los valores del coeficiente de pérdida de carga k para los medios filtrantes ensayados. A su vez, se dedujeron ecuaciones que se ajustan al comportamiento observado para cada material con el que se experimentó. Por tanto, se logró reproducir aproximadamente el fenómeno observado en el laboratorio mediante el empleo del modelo matemático desarrollado con el software EPANET.

REFERENCIAS

ACCIOMATE. (9 de abril de 2025). Medición de presión: tipos y aplicaciones.

Aranda, C. (2020). Tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando esponjas cilíndricas colgantes de poliuretano. *Saber Servir, n.3*(2522-6738).

Badger Meter. (23 de enero de 2020). Medidores de flujo: ¿qué son y cómo funcionan?

Canto, J. (2013). *Modelación hidráulica de un reactor de electrocoagulación.* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México. Repositorio institucional de la UNAM.

CONAHCYT. (2023). *Arribazón de sargazo a las costas mexicanas.* Gobierno de México. https://energia.conahcyt.mx/sargazo/contexto

Conde, R., & Espinoza, M. (2024). *Evaluación de dos biofiltros usando estropajo común (Luffa cylindrica) y yanchama (Poulsenia armata) en el tratamiento de aguas residuales.* [Tesis de licenciatura]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Repositorio institucional de la ESPC.

Environmental Protection Agency. (15 de septiembre de 2025). *EPANET*. https://www.epa.gov/water-research/epanet

García T., D. (2024). *Estimación del coeficiente de pérdida local atribuído a un flitro de sargazo en un sistema hidráulico para el tratamiento terciario.* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México. Repositorio institucional de la UNAM.

García, D., Cervantes, I., Gómez, W., Gallego, I., García, D., & González, G. (2024). Gestión de los residuos sólidos en México: análisis cualitativo de los diagnósticos básicos. *11(30)*, 215-242. https://doi.org/ https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2023.30.81788

Hawach Scientific. (11 de febrero de 2026). *12 Different Usages of Filter Paper*. https://www.hawachfilterpaper.com/news/12-different-usages-of-filter-paper/

Hernández, F., & Clemente, A. (16 de septiembre de 2024). En México el 73% del agua residual no se trata o se trata mal ¿Podemos hacer algo? *EL UNIVERSAL*. https://www.eluniversal.com.mx/opinion/por-mexico-hoy/en-mexico-el-73-del-agua-residual-no-se-trata-o-se-trata-mal-podemos-hacer-algo/

León, K. (2018). *Eficiencia de biodigestores usando PET y esponjas para la remoción de DQO, DBO del agua residual domestica - Tuyu, Marcara - Ancash.* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Repositorio institucional de la UNASAM.

Pereira, R., Muñoz, J., & Peluffo, D. (2017). Empleo del estropajo común (Luffa cylindrica) en la remoción de contaminantes. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, Volumen 8 Número 1*(2145-6097).

PROFECO. (23 de agosto de 2021). *Economía circular*. Gobierno de México: https://www.gob.mx/profeco/es/articulos/economia-circular?idiom=es

Santillán, M. (18 de abril de 2022). Nuevo uso al sargazo, de plaga a removedor de contaminantes. *Ciencia UNAM-DGDC*. https://ciencia.unam.mx/leer/1253/nuevo-uso-al-sargazo-de-plaga-a-removedor-de-contaminantes-

Sotelo, G. (1997). *Hidráulica general. Volumen 1: Fundamentos.* México: LIMUSA.

Tzatchkov, V., Alcocer, V., Bourguett, V., & Arreguín, F. (2014). *Avances en la hidráulica de redes de distribución de agua potable.* México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Uribe, A., Guzmán, A., Arreguín, F., & Cuevas, E. (2020). *El sargazo en el Caribe mexicano, revisión de una historia impensable.* EPOMEX. https://doi.org/10.26359/epomex.0120

ANEXO

FOTOGRAFÍAS DE MATERIALES ENSAYADOS



Figura A 1. Fotografía de fibra esponja de cocina. Fuente: elaboración propia.

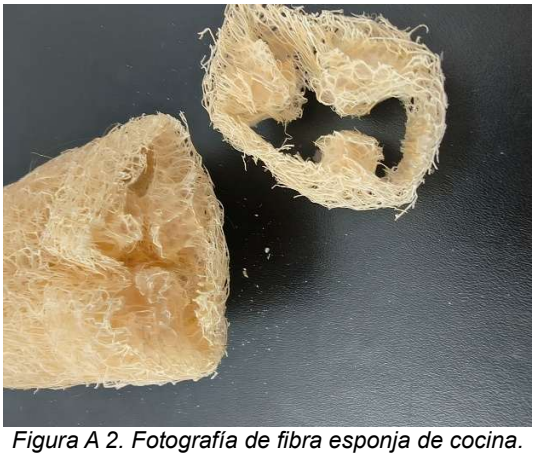


Figura A 2. Fotografía de fibra esponja de cocina. Fuente: elaboración propia.



Figura A 3. Fotografía de fibra esponja de cocina. Fuente: elaboración propia.



Figura A 4. Fotografía de fibra esponja de cocina. Fuente: elaboración propia.

GRÁFICAS ADICIONALES

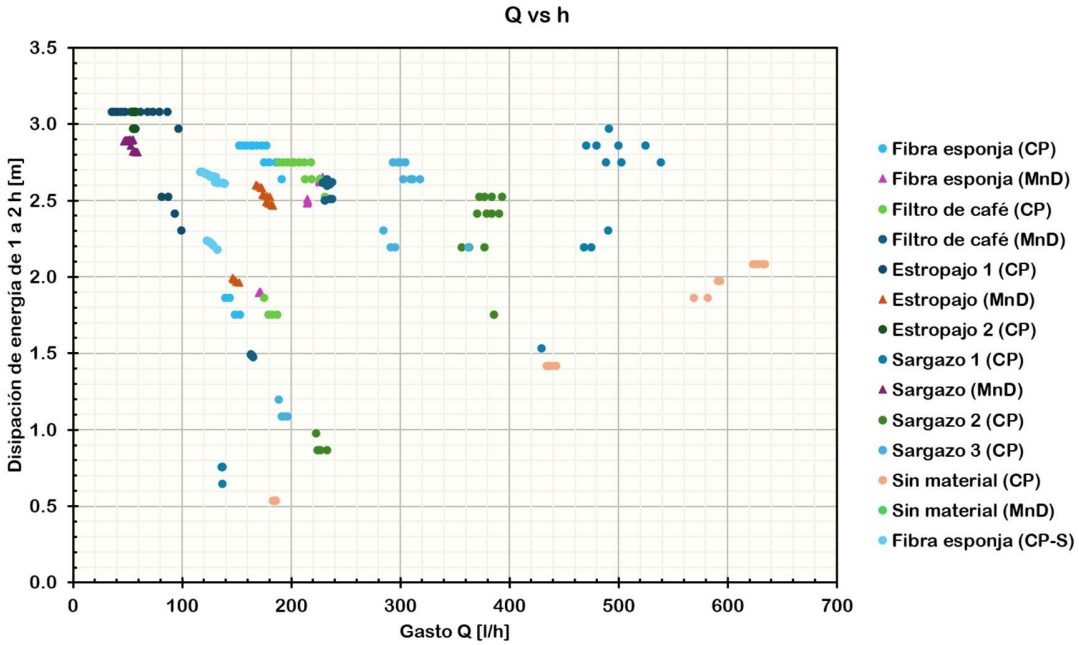


Figura A 5. Gráfica Q vs h, curva experimental completa. Fuente: elaboración propia.

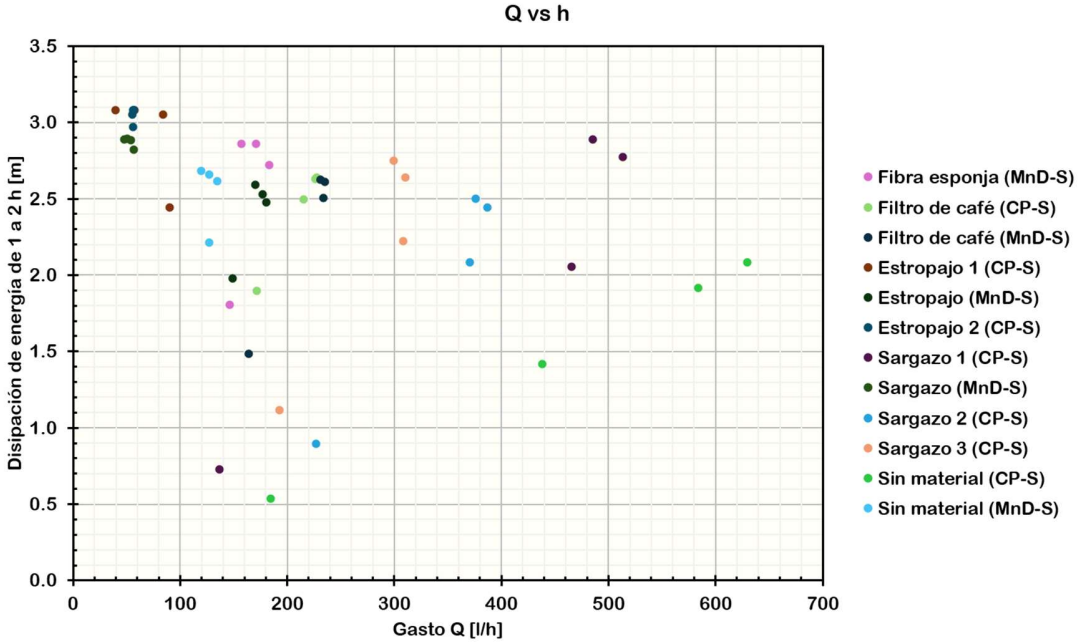


Figura A 6. Gráfica Q vs h, curva experimental suavizada. Fuente: elaboración propia.

FORMATOS DE REGISTRO

Nombre:_____ **No. de ensayo:** ____

Descripción:_____ **Fecha:** _____

_____

_____

Observaciones:_____

_____

_____

$\Delta t =$ _____

i	Apertura de válvula	$t\ [s]$	$p_1\ \left[\frac{kg}{cm^2}\right]$	$p_2\ \left[\frac{kg}{cm^2}\right]$	$Q\ \left[\frac{l}{h}\right]$	$h_t\ [m]$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
33						
34						
35						

Tabla A 1. Formato de registro de datos experimentales. Fuente: elaboración propia.

Material	
Ensayo	
Fecha	
Observaciones	
Δt =	

i	Apertura de válvula	t [s]	p_1 [bar]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [bar]	p_2 [kg/m^2]	Q [l/h]	Q [m^3/s]	h_1 [m]
1	Cerrada								
2	Cerrada								
3	Cerrada								
4	Cerrada								
5	25% abierta								
6	25% abierta								
7	25% abierta								
8	25% abierta								
9	50% abierta								
10	50% abierta								
11	50% abierta								
12	50% abierta								
13	75% abierta								
14	75% abierta								
15	75% abierta								
16	75% abierta								
17	100% abierta								
18	100% abierta								
19	100% abierta								
20	100% abierta								

Tabla A 2. Formato de conversión de unidades para datos obtenidos en laboratorio. Fuente: elaboración propia.

Material	
Ensayo	
Fecha	
Observaciones	
Δt =	

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
5	25%										
6	25%										
7	25%										
8	25%										
9	50%										
10	50%										
11	50%										
12	50%										
13	75%										
14	75%										
15	75%										
16	75%										
17	100%										
18	100%										
19	100%										
20	100%										

Tabla A 3. Formato de cálculo del coeficiente k. Fuente: elaboración propia.

Material	
Ensayo	
Fecha	
Observaciones	
Δt =	

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
1	25%										
2	50%										
3	75%										
4	100%										

Tabla A 4. Formato de cálculo del coeficiente k (curva suavizada). Fuente: elaboración propia.

Ensayo EPANET	
Material	
Descripción	
Coeficiente k	

i	Apertura de válvula	t [min]	p_1 [mca]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [mca]	p_1 [kg/m^2]	Q [l/min]	Q [m^3/s]
1	Cerrada	0						
2	Cerrada	2						
3	Cerrada	4						
4	Cerrada	6						
5	25% abierta	7						
6	25% abierta	9						
7	25% abierta	11						
8	25% abierta	13						
9	50% abierta	14						
10	50% abierta	16						
11	50% abierta	18						
12	50% abierta	20						
13	75% abierta	21						
14	75% abierta	23						
15	75% abierta	25						
16	75% abierta	27						
17	100% abierta	28						
18	100% abierta	30						
19	100% abierta	32						
20	100% abierta	34						

Tabla A 5. Formato de registro de datos medidos en EPANET. Fuente: elaboración propia.

REGISTROS DEL LABORATORIO

Material	**Fibra esponja (CP)**
Ensayo	1
Fecha	26/11/2025
Observaciones	2 g de esponja usados
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	t [s]	p_1 [bar]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [bar]	p_2 [kg/m^2]	Q [l/h]	Q [m^3/s]	h_1 [m]
1	Cerrada	0	**0.06**	658.32	**0.04**	438.88	**0**	0	**1.100**
2	Cerrada	120	**0.06**	658.32	**0.04**	438.88	**0**	0	**1.100**
3	Cerrada	240	**0.06**	658.32	**0.04**	438.88	**0**	0	**1.100**
4	Cerrada	360	**0.06**	658.32	**0.04**	438.88	**0**	0	**1.100**
5	25% abierta	0	**0.21**	2304.12	**0.04**	438.88	**152.90**	0.00004	**1.095**
6	25% abierta	120	**0.21**	2304.12	**0.04**	438.88	**148.60**	0.00004	**1.080**
7	25% abierta	240	**0.22**	2413.84	**0.04**	438.88	**143.30**	0.00004	**1.075**
8	25% abierta	360	**0.22**	2413.84	**0.04**	438.88	**139.50**	0.00004	**1.070**
9	50% abierta	0	**0.29**	3181.88	**0.04**	438.88	**191.10**	0.00005	**1.060**
10	50% abierta	120	**0.30**	3291.60	**0.04**	438.88	**186.00**	0.00005	**1.050**
11	50% abierta	240	**0.30**	3291.60	**0.04**	438.88	**179.90**	0.00005	**1.040**
12	50% abierta	360	**0.30**	3291.60	**0.04**	438.88	**175.13**	0.00005	**1.035**
13	75% abierta	0	**0.31**	3401.32	**0.04**	438.88	**177.30**	0.00005	**1.030**
14	75% abierta	120	**0.31**	3401.32	**0.04**	438.88	**173.10**	0.00005	**1.025**
15	75% abierta	240	**0.31**	3401.32	**0.04**	438.88	**168.60**	0.00005	**1.020**
16	75% abierta	360	**0.31**	3401.32	**0.04**	438.88	**164.10**	0.00005	**1.010**
17	100% abierta	0	**0.31**	3401.32	**0.04**	438.88	**162.80**	0.00005	**1.000**
18	100% abierta	120	**0.31**	3401.32	**0.04**	438.88	**159.10**	0.00004	**0.990**
19	100% abierta	240	**0.31**	3401.32	**0.04**	438.88	**155.50**	0.00004	**0.980**
20	100% abierta	360	**0.31**	3401.32	**0.04**	438.88	**152.50**	0.00004	**0.975**

Tabla A 6. Registro de datos de Fibra esponja (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Fibra esponja (MnD)**
Ensayo	1
Fecha	02/12/2025
Observaciones	2 g de esponja usados
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	t [s]	p_1 [bar]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [bar]	p_2 [kg/m^2]	Q [l/h]	Q [m^3/s]	h_1 [m]
1	Cerrada	0	**0.0350**	384.02	**0.0253**	277.59	**0**	0	**1.100**
2	Cerrada	120	**0.0350**	384.02	**0.0253**	277.59	**0**	0	**1.100**
3	Cerrada	240	**0.0350**	384.02	**0.0253**	277.59	**0**	0	**1.100**
4	Cerrada	360	**0.0350**	384.02	**0.0253**	277.59	**0**	0	**1.100**
5	25% abierta	0	**0.2087**	2289.86	**0.0252**	276.49	**171.70**	0.00005	**1.095**
6	25% abierta	120	**0.2085**	2287.66	**0.0250**	274.30	**172.00**	0.00005	**1.090**
7	25% abierta	240	**0.2080**	2282.18	**0.0250**	274.30	**170.90**	0.00005	**1.070**
8	25% abierta	360	**0.2079**	2281.08	**0.0250**	274.30	**170.70**	0.00005	**1.060**
9	50% abierta	0	**0.2633**	2888.93	**0.0250**	274.30	**215.00**	0.00006	**1.050**
10	50% abierta	120	**0.2625**	2880.15	**0.0251**	275.40	**215.40**	0.00006	**1.040**
11	50% abierta	240	**0.2616**	2870.28	**0.0251**	275.40	**215.00**	0.00006	**1.040**
12	50% abierta	360	**0.2609**	2862.59	**0.0251**	275.40	**214.60**	0.00006	**1.030**
13	75% abierta	0	**0.2759**	3027.17	**0.0252**	276.49	**226.20**	0.00006	**1.025**
14	75% abierta	120	**0.2751**	3018.40	**0.0253**	277.59	**226.20**	0.00006	**1.010**
15	75% abierta	240	**0.2743**	3009.62	**0.0253**	277.59	**226.20**	0.00006	**1.000**
16	75% abierta	360	**0.2736**	3001.94	**0.0253**	277.59	**226.20**	0.00006	**0.980**
17	100% abierta	0	**0.2766**	3034.86	**0.0253**	277.59	**228.50**	0.00006	**0.975**
18	100% abierta	120	**0.2758**	3026.08	**0.0253**	277.59	**228.50**	0.00006	**0.975**
19	100% abierta	240	**0.2752**	3019.49	**0.0253**	277.59	**226.20**	0.00006	**0.970**
20	100% abierta	360	**0.2745**	3011.81	**0.0253**	277.59	**226.20**	0.00006	**0.960**

Tabla A 7. Registro de datos de Fibra esponja (MnD). Fuente: elaboración propia.

Material	Filtro de café (CP)
Ensayo	1
Fecha	26/11/2025
Observaciones	Primer uso del filtro
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	t [s]	p_1 [bar]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [bar]	p_2 [kg/m^2]	Q [l/h]	Q [m^3/s]	h_1 [m]
1	Cerrada	0	0.05	548.60	0.04	438.88	0	0	1.100
2	Cerrada	120	0.05	548.60	0.04	438.88	0	0	1.100
3	Cerrada	240	0.05	548.60	0.04	438.88	0	0	1.100
4	Cerrada	360	0.05	548.60	0.04	438.88	0	0	1.100
5	25% abierta	0	0.21	2304.12	0.04	438.88	186.90	0.00005	1.090
6	25% abierta	120	0.21	2304.12	0.04	438.88	182.30	0.00005	1.080
7	25% abierta	240	0.21	2304.12	0.04	438.88	179.00	0.00005	1.075
8	25% abierta	360	0.22	2413.84	0.04	438.88	175.30	0.00005	1.060
9	50% abierta	0	0.28	3072.16	0.04	438.88	230.70	0.00006	1.050
10	50% abierta	120	0.29	3181.88	0.04	438.88	226.20	0.00006	1.040
11	50% abierta	240	0.29	3181.88	0.04	438.88	218.90	0.00006	1.035
12	50% abierta	360	0.29	3181.88	0.04	438.88	212.90	0.00006	1.025
13	75% abierta	0	0.30	3291.60	0.04	438.88	218.00	0.00006	1.020
14	75% abierta	120	0.30	3291.60	0.04	438.88	212.10	0.00006	1.010
15	75% abierta	240	0.30	3291.60	0.04	438.88	207.30	0.00006	1.000
16	75% abierta	360	0.30	3291.60	0.04	438.88	202.40	0.00006	0.995
17	100% abierta	0	0.30	3291.60	0.04	438.88	200.50	0.00006	0.990
18	100% abierta	120	0.30	3291.60	0.04	438.88	196.60	0.00005	0.985
19	100% abierta	240	0.30	3291.60	0.04	438.88	192.50	0.00005	0.980
20	100% abierta	360	0.30	3291.60	0.04	438.88	188.50	0.00005	0.975

Tabla A 8. Registro de datos de Filtro de café (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	Filtro de café (MnD)
Ensayo	1
Fecha	02/12/2025
Observaciones	Primer uso del filtro
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	t [s]	p_1 [bar]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [bar]	p_2 [kg/m^2]	Q [l/h]	Q [m^3/s]	h_1 [m]
1	Cerrada	0	0.0351	385.12	0.0250	274.30	0	0	1.100
2	Cerrada	120	0.0351	385.12	0.0250	274.30	0	0	1.100
3	Cerrada	240	0.0351	385.12	0.0250	274.30	0	0	1.100
4	Cerrada	360	0.0351	385.12	0.0250	274.30	0	0	1.100
5	25% abierta	0	0.1712	1878.41	0.0262	287.47	165.00	0.00005	1.100
6	25% abierta	120	0.1720	1887.18	0.0262	287.47	164.60	0.00005	1.090
7	25% abierta	240	0.1725	1892.67	0.0262	287.47	163.30	0.00005	1.090
8	25% abierta	360	0.1729	1897.06	0.0262	287.47	162.80	0.00005	1.085
9	50% abierta	0	0.2647	2904.29	0.0264	289.66	237.40	0.00007	1.060
10	50% abierta	120	0.2647	2904.29	0.0264	289.66	235.20	0.00007	1.050
11	50% abierta	240	0.2642	2898.80	0.0264	289.66	230.70	0.00006	1.040
12	50% abierta	360	0.2639	2895.51	0.0264	289.66	230.70	0.00006	1.035
13	75% abierta	0	0.2748	3015.11	0.0264	289.66	237.40	0.00007	1.025
14	75% abierta	120	0.2741	3007.43	0.0264	289.66	235.20	0.00007	1.020
15	75% abierta	240	0.2736	3001.94	0.0264	289.66	235.20	0.00007	1.010
16	75% abierta	360	0.2729	2994.26	0.0264	289.66	233.00	0.00006	1.000
17	100% abierta	0	0.2764	3032.66	0.0264	289.66	233.00	0.00006	0.980
18	100% abierta	120	0.2757	3024.98	0.0264	289.66	233.00	0.00006	0.975
19	100% abierta	240	0.2751	3018.40	0.0264	289.66	230.70	0.00006	0.975
20	100% abierta	360	0.2746	3012.91	0.0264	289.66	228.50	0.00006	0.970

Tabla A 9. Registro de datos de Filtro de café (MnD). Fuente: elaboración propia.

Material	Estropajo (CP)
Ensayo	1
Fecha	21/11/2025
Observaciones	8 g de estropajo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	t [s]	p_1 [bar]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [bar]	p_2 [kg/m^2]	Q [l/h]	Q [m^3/s]	h_1 [m]
1	Cerrada	0	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
2	Cerrada	120	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
3	Cerrada	240	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
4	Cerrada	360	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
5	25% abierta	0	0.25	2743.00	0.03	329.16	99.50	0.00003	1.100
6	25% abierta	120	0.26	2852.72	0.03	329.16	93.40	0.00003	1.095
7	25% abierta	240	0.27	2962.44	0.03	329.16	87.50	0.00002	1.090
8	25% abierta	360	0.27	2962.44	0.03	329.16	81.30	0.00002	1.085
9	50% abierta	0	0.31	3401.32	0.03	329.16	96.70	0.00003	1.080
10	50% abierta	120	0.32	3511.04	0.03	329.16	86.70	0.00002	1.078
11	50% abierta	240	0.32	3511.04	0.03	329.16	79.50	0.00002	1.075
12	50% abierta	360	0.32	3511.04	0.03	329.16	72.80	0.00002	1.070
13	75% abierta	0	0.32	3511.04	0.03	329.16	68.50	0.00002	1.060
14	75% abierta	120	0.32	3511.04	0.03	329.16	61.50	0.00002	1.050
15	75% abierta	240	0.32	3511.04	0.03	329.16	53.00	0.00001	1.050
16	75% abierta	360	0.32	3511.04	0.03	329.16	47.80	0.00001	1.045
17	100% abierta	0	0.32	3511.04	0.03	329.16	44.30	0.00001	1.045
18	100% abierta	120	0.32	3511.04	0.03	329.16	41.20	0.00001	1.045
19	100% abierta	240	0.32	3511.04	0.03	329.16	38.10	0.00001	1.040
20	100% abierta	360	0.32	3511.04	0.03	329.16	35.50	0.00001	1.040

Tabla A 10. Registro de datos de Estropajo 1 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	Estropajo (CP)
Ensayo	2
Fecha	24/11/2025
Observaciones	8 g de estropajo
Δt =	180 [s]

i	Apertura de válvula	t [s]	p_1 [bar]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [bar]	p_2 [kg/m^2]	Q [l/h]	Q [m^3/s]	h_1 [m]
1	Cerrada	0	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
2	Cerrada	180	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
3	Cerrada	360	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
4	Cerrada	540	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
5	25% abierta	0	0.31	3401.32	0.03	329.16	57.00	0.00002	1.100
6	25% abierta	180	0.31	3401.32	0.03	329.16	56.80	0.00002	1.095
7	25% abierta	360	0.31	3401.32	0.03	329.16	55.90	0.00002	1.090
8	25% abierta	540	0.31	3401.32	0.03	329.16	55.40	0.00002	1.085
9	50% abierta	0	0.32	3511.04	0.03	329.16	57.00	0.00002	1.085
10	50% abierta	180	0.32	3511.04	0.03	329.16	57.00	0.00002	1.080
11	50% abierta	360	0.32	3511.04	0.03	329.16	56.90	0.00002	1.080
12	50% abierta	540	0.32	3511.04	0.03	329.16	56.50	0.00002	1.075
13	75% abierta	0	0.32	3511.04	0.03	329.16	56.50	0.00002	1.075
14	75% abierta	180	0.32	3511.04	0.03	329.16	56.20	0.00002	1.070
15	75% abierta	360	0.32	3511.04	0.03	329.16	56.00	0.00002	1.060
16	75% abierta	540	0.32	3511.04	0.03	329.16	55.70	0.00002	1.050
17	100% abierta	0	0.32	3511.04	0.03	329.16	55.50	0.00002	1.050
18	100% abierta	180	0.32	3511.04	0.03	329.16	55.20	0.00002	1.050
19	100% abierta	360	0.32	3511.04	0.03	329.16	55.00	0.00002	1.045
20	100% abierta	540	0.31	3401.32	0.03	329.16	55.00	0.00002	1.040

Tabla A 11. Registro de datos de Estropajo 2 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Estropajo (MnD)**
Ensayo	1
Fecha	04/12/2025
Observaciones	6 g de estropajo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	t [s]	p_1 [bar]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [bar]	p_2 [kg/m^2]	Q [l/h]	Q [m^3/s]	h_1 [m]
1	Cerrada	0	**0.0391**	429.01	**0.0253**	277.59	**0**	0	**1.100**
2	Cerrada	120	**0.0391**	429.01	**0.0253**	277.59	**0**	0	**1.100**
3	Cerrada	240	**0.0391**	429.01	**0.0253**	277.59	**0**	0	**1.100**
4	Cerrada	360	**0.0391**	429.01	**0.0253**	277.59	**0**	0	**1.100**
5	25% abierta	0	**0.2150**	2358.98	**0.0259**	284.17	**152.30**	0.00004	**1.100**
6	25% abierta	120	**0.2160**	2369.95	**0.0262**	287.47	**149.80**	0.00004	**1.070**
7	25% abierta	240	**0.2169**	2379.83	**0.0262**	287.47	**147.80**	0.00004	**1.060**
8	25% abierta	360	**0.2180**	2391.90	**0.0262**	287.47	**146.00**	0.00004	**1.050**
9	50% abierta	0	**0.2610**	2863.69	**0.0263**	288.56	**183.20**	0.00005	**1.050**
10	50% abierta	120	**0.2615**	2869.18	**0.0263**	288.56	**181.70**	0.00005	**1.040**
11	50% abierta	240	**0.2622**	2876.86	**0.0263**	288.56	**179.30**	0.00005	**1.030**
12	50% abierta	360	**0.2630**	2885.64	**0.0263**	288.56	**177.30**	0.00005	**1.025**
13	75% abierta	0	**0.2661**	2919.65	**0.0263**	288.56	**180.80**	0.00005	**1.020**
14	75% abierta	120	**0.2665**	2924.04	**0.0263**	288.56	**178.10**	0.00005	**1.010**
15	75% abierta	240	**0.2670**	2929.52	**0.0263**	288.56	**175.30**	0.00005	**0.980**
16	75% abierta	360	**0.2673**	2932.82	**0.0263**	288.56	**173.90**	0.00005	**0.980**
17	100% abierta	0	**0.2710**	2973.41	**0.0262**	287.47	**173.10**	0.00005	**0.975**
18	100% abierta	120	**0.2717**	2981.09	**0.0262**	287.47	**172.00**	0.00005	**0.975**
19	100% abierta	240	**0.2725**	2989.87	**0.0262**	287.47	**169.40**	0.00005	**0.980**
20	100% abierta	360	**0.2731**	2996.45	**0.0262**	287.47	**167.60**	0.00005	**0.980**

Tabla A 12. Registro de datos de Estropajo (MnD). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sargazo (CP)**
Ensayo	1
Fecha	12/11/2025
Observaciones	10 g de sargazo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	t [s]	p_1 [bar]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [bar]	p_2 [kg/m^2]	Q [l/h]	Q [m^3/s]	h_1 [m]
1	Cerrada	0	**0.03**	329.16	**0.01**	109.72	**0**	0	**1.100**
2	Cerrada	120	**0.03**	329.16	**0.01**	109.72	**0**	0	**1.100**
3	Cerrada	240	**0.03**	329.16	**0.01**	109.72	**0**	0	**1.100**
4	Cerrada	360	**0.03**	329.16	**0.01**	109.72	**0**	0	**1.100**
5	25% abierta	0	**0.11**	1206.92	**0.03**	329.16	**135.90**	0.00004	**1.100**
6	25% abierta	120	**0.11**	1206.92	**0.03**	329.16	**136.60**	0.00004	**1.100**
7	25% abierta	240	**0.11**	1206.92	**0.03**	329.16	**137.10**	0.00004	**1.080**
8	25% abierta	360	**0.11**	1206.92	**0.04**	438.88	**137.10**	0.00004	**1.060**
9	50% abierta	0	**0.19**	2084.68	**0.04**	438.88	**429.40**	0.00012	**1.060**
10	50% abierta	120	**0.18**	1974.96	**-0.04**	-438.88	**490.40**	0.00014	**1.040**
11	50% abierta	240	**0.18**	1974.96	**-0.03**	-329.16	**474.90**	0.00013	**1.020**
12	50% abierta	360	**0.18**	1974.96	**-0.03**	-329.16	**468.00**	0.00013	**1.010**
13	75% abierta	0	**0.24**	2633.28	**-0.02**	-219.44	**538.70**	0.00015	**1.010**
14	75% abierta	120	**0.24**	2633.28	**-0.03**	-329.16	**525.00**	0.00015	**1.000**
15	75% abierta	240	**0.24**	2633.28	**-0.02**	-219.44	**502.30**	0.00014	**0.990**
16	75% abierta	360	**0.24**	2633.28	**-0.02**	-219.44	**488.60**	0.00014	**0.980**
17	100% abierta	0	**0.25**	2743.00	**-0.02**	-219.44	**500.00**	0.00014	**0.980**
18	100% abierta	120	**0.26**	2852.72	**-0.02**	-219.44	**490.90**	0.00014	**0.970**
19	100% abierta	240	**0.26**	2852.72	**-0.01**	-109.72	**479.50**	0.00013	**0.960**
20	100% abierta	360	**0.26**	2852.72	**-0.01**	-109.72	**470.40**	0.00013	**0.950**

Tabla A 13. Registro de datos de Sargazo 1 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sargazo (CP)**
Ensayo	2
Fecha	12/11/2025
Observaciones	10 g de sargazo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	t [s]	p_1 [bar]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [bar]	p_2 [kg/m^2]	Q [l/h]	Q [m^3/s]	h_1 [m]
1	Cerrada	0	0.05	548.60	0.04	438.88	0	0	1.100
2	Cerrada	120	0.05	548.60	0.04	438.88	0	0	1.100
3	Cerrada	240	0.05	548.60	0.04	438.88	0	0	1.100
4	Cerrada	360	0.05	548.60	0.04	438.88	0	0	1.100
5	25% abierta	0	0.13	1426.36	0.04	438.88	233.00	0.00006	1.100
6	25% abierta	120	0.13	1426.36	0.04	438.88	226.50	0.00006	1.080
7	25% abierta	240	0.13	1426.36	0.04	438.88	224.00	0.00006	1.075
8	25% abierta	360	0.14	1536.08	0.04	438.88	223.00	0.00006	1.060
9	50% abierta	0	0.21	2304.12	0.04	438.88	386.10	0.00011	1.060
10	50% abierta	120	0.24	2633.28	0.03	329.16	377.00	0.00010	1.050
11	50% abierta	240	0.24	2633.28	0.03	329.16	363.30	0.00010	1.040
12	50% abierta	360	0.24	2633.28	0.03	329.16	356.50	0.00010	1.020
13	75% abierta	0	0.27	2962.44	0.03	329.16	392.90	0.00011	1.020
14	75% abierta	120	0.27	2962.44	0.04	438.88	390.60	0.00011	1.000
15	75% abierta	240	0.27	2962.44	0.04	438.88	383.80	0.00011	1.000
16	75% abierta	360	0.27	2962.44	0.04	438.88	379.20	0.00011	0.985
17	100% abierta	0	0.28	3072.16	0.04	438.88	383.80	0.00011	0.970
18	100% abierta	120	0.28	3072.16	0.04	438.88	377.00	0.00010	0.960
19	100% abierta	240	0.28	3072.16	0.04	438.88	372.40	0.00010	0.960
20	100% abierta	360	0.27	2962.44	0.04	438.88	370.10	0.00010	0.950

Tabla A 14. Registro de datos de Sargazo 2 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sargazo (CP)**
Ensayo	3
Fecha	21/11/2025
Observaciones	10 g de sargazo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	t [s]	p_1 [bar]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [bar]	p_2 [kg/m^2]	Q [l/h]	Q [m^3/s]	h_1 [m]
1	Cerrada	0	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
2	Cerrada	120	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
3	Cerrada	240	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
4	Cerrada	360	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
5	25% abierta	0	0.15	1645.80	0.04	438.88	196.60	0.00005	1.100
6	25% abierta	120	0.15	1645.80	0.04	438.88	193.50	0.00005	1.090
7	25% abierta	240	0.15	1645.80	0.04	438.88	191.50	0.00005	1.085
8	25% abierta	360	0.16	1755.52	0.04	438.88	188.50	0.00005	1.060
9	50% abierta	0	0.25	2743.00	0.04	438.88	362.40	0.00010	1.050
10	50% abierta	120	0.25	2743.00	0.04	438.88	295.10	0.00008	1.040
11	50% abierta	240	0.25	2743.00	0.04	438.88	291.20	0.00008	1.030
12	50% abierta	360	0.25	2743.00	0.03	329.16	284.50	0.00008	1.020
13	75% abierta	0	0.28	3072.16	0.03	329.16	318.10	0.00009	1.000
14	75% abierta	120	0.28	3072.16	0.03	329.16	311.40	0.00009	0.985
15	75% abierta	240	0.28	3072.16	0.03	329.16	309.10	0.00009	0.970
16	75% abierta	360	0.28	3072.16	0.03	329.16	302.40	0.00008	0.960
17	100% abierta	0	0.29	3181.88	0.03	329.16	304.70	0.00008	0.950
18	100% abierta	120	0.29	3181.88	0.03	329.16	300.20	0.00008	0.940
19	100% abierta	240	0.29	3181.88	0.03	329.16	297.90	0.00008	0.935
20	100% abierta	360	0.29	3181.88	0.03	329.16	293.50	0.00008	0.930

Tabla A 15. Registro de datos de Sargazo 3 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	Sargazo (MnD)
Ensayo	1
Fecha	02/12/2025
Observaciones	10 g de sargazo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	t [s]	p_1 [bar]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [bar]	p_2 [kg/m^2]	Q [l/h]	Q [m^3/s]	h_1 [m]
1	Cerrada	0	0.0350	384.02	0.0245	268.81	0	0	1.100
2	Cerrada	120	0.0350	384.02	0.0245	268.81	0	0	1.100
3	Cerrada	240	0.0350	384.02	0.0245	268.81	0	0	1.100
4	Cerrada	360	0.0350	384.02	0.0245	268.81	0	0	1.100
5	25% abierta	0	0.2915	3198.34	0.0253	277.59	59.10	0.00002	1.100
6	25% abierta	120	0.2916	3199.44	0.0253	277.59	57.80	0.00002	1.100
7	25% abierta	240	0.2918	3201.63	0.0252	276.49	56.40	0.00002	1.100
8	25% abierta	360	0.2921	3204.92	0.0253	277.59	54.80	0.00002	1.095
9	50% abierta	0	0.2986	3276.24	0.0252	276.49	55.20	0.00002	1.095
10	50% abierta	120	0.2984	3274.04	0.0252	276.49	54.30	0.00002	1.090
11	50% abierta	240	0.2953	3240.03	0.0252	276.49	53.10	0.00001	1.085
12	50% abierta	360	0.2982	3271.85	0.0252	276.49	52.40	0.00001	1.080
13	75% abierta	0	0.2987	3277.34	0.0252	276.49	52.00	0.00001	1.080
14	75% abierta	120	0.2985	3275.14	0.0252	276.49	51.10	0.00001	1.080
15	75% abierta	240	0.2983	3272.95	0.0252	276.49	50.20	0.00001	1.075
16	75% abierta	360	0.2982	3271.85	0.0252	276.49	49.20	0.00001	1.075
17	100% abierta	0	0.2982	3271.85	0.0252	276.49	48.60	0.00001	1.070
18	100% abierta	120	0.2981	3270.75	0.0252	276.49	47.80	0.00001	1.060
19	100% abierta	240	0.2978	3267.46	0.0252	276.49	47.50	0.00001	1.060
20	100% abierta	360	0.2977	3266.36	0.0252	276.49	46.90	0.00001	1.055

Tabla A 16. Registro de datos de Sargazo (MnD). Fuente: elaboración propia.

Material	Sin material (CP)
Ensayo	1
Fecha	24/11/2025
Observaciones	Filtro sin núcleo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	t [s]	p_1 [bar]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [bar]	p_2 [kg/m^2]	Q [l/h]	Q [m^3/s]	h_1 [m]
1	Cerrada	0	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
2	Cerrada	120	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
3	Cerrada	240	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
4	Cerrada	360	0.05	548.60	0.03	329.16	0	0	1.100
5	25% abierta	0	0.09	987.48	0.03	329.16	186.00	0.00005	1.095
6	25% abierta	120	0.09	987.48	0.03	329.16	185.00	0.00005	1.080
7	25% abierta	240	0.09	987.48	0.03	329.16	185.00	0.00005	1.075
8	25% abierta	360	0.09	987.48	0.03	329.16	183.50	0.00005	1.060
9	50% abierta	0	0.17	1865.24	0.03	329.16	443.00	0.00012	1.050
10	50% abierta	120	0.17	1865.24	0.03	329.16	438.50	0.00012	1.040
11	50% abierta	240	0.17	1865.24	0.03	329.16	436.20	0.00012	1.020
12	50% abierta	360	0.17	1865.24	0.03	329.16	433.90	0.00012	1.000
13	75% abierta	0	0.22	2413.84	0.03	329.16	593.40	0.00016	1.000
14	75% abierta	120	0.22	2413.84	0.03	329.16	591.10	0.00016	0.970
15	75% abierta	240	0.21	2304.12	0.03	329.16	568.80	0.00016	0.940
16	75% abierta	360	0.21	2304.12	0.03	329.16	582.00	0.00016	0.925
17	100% abierta	0	0.23	2523.56	0.03	329.16	634.40	0.00018	0.900
18	100% abierta	120	0.23	2523.56	0.03	329.16	632.10	0.00018	0.880
19	100% abierta	240	0.23	2523.56	0.03	329.16	627.50	0.00017	0.870
20	100% abierta	360	0.23	2523.56	0.03	329.16	623.00	0.00017	0.840

Tabla A 17. Registro de datos de Sin material (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sin material (MnD)**
Ensayo	1
Fecha	04/12/2025
Observaciones	Filtro sin núcleo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	t [s]	p_1 [bar]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [bar]	p_2 [kg/m^2]	Q [l/h]	Q [m^3/s]	h_1 [m]
1	Cerrada	0	**0.0552**	605.65	**0.0253**	277.59	**0**	0	**1.100**
2	Cerrada	120	**0.0552**	605.65	**0.0253**	277.59	**0**	0	**1.100**
3	Cerrada	240	**0.0552**	605.65	**0.0253**	277.59	**0**	0	**1.100**
4	Cerrada	360	**0.0552**	605.65	**0.0253**	277.59	**0**	0	**1.100**
5	25% abierta	0	**0.2344**	2571.84	**0.0259**	284.17	**132.10**	0.00004	**1.100**
6	25% abierta	120	**0.2370**	2600.36	**0.0259**	284.17	**128.30**	0.00004	**1.090**
7	25% abierta	240	**0.2386**	2617.92	**0.0258**	283.08	**125.40**	0.00003	**1.075**
8	25% abierta	360	**0.2398**	2631.09	**0.0258**	283.08	**123.00**	0.00003	**1.060**
9	50% abierta	0	**0.2735**	3000.84	**0.0259**	284.17	**139.00**	0.00004	**1.060**
10	50% abierta	120	**0.2737**	3003.04	**0.0259**	284.17	**136.60**	0.00004	**1.050**
11	50% abierta	240	**0.2740**	3006.33	**0.0259**	284.17	**133.00**	0.00004	**1.040**
12	50% abierta	360	**0.2744**	3010.72	**0.0259**	284.17	**130.40**	0.00004	**1.040**
13	75% abierta	0	**0.2772**	3041.44	**0.0259**	284.17	**130.70**	0.00004	**1.035**
14	75% abierta	120	**0.2776**	3045.83	**0.0259**	284.17	**128.00**	0.00004	**1.030**
15	75% abierta	240	**0.2780**	3050.22	**0.0259**	284.17	**125.70**	0.00003	**1.025**
16	75% abierta	360	**0.2785**	3055.70	**0.0259**	284.17	**124.00**	0.00003	**1.025**
17	100% abierta	0	**0.2790**	3061.19	**0.0259**	284.17	**123.10**	0.00003	**1.020**
18	100% abierta	120	**0.2795**	3066.67	**0.0259**	284.17	**120.60**	0.00003	**1.010**
19	100% abierta	240	**0.2802**	3074.35	**0.0259**	284.17	**118.60**	0.00003	**1.010**
20	100% abierta	360	**0.2806**	3078.74	**0.0259**	284.17	**116.80**	0.00003	**1.000**

Tabla A 18. Registro de datos de Sin material (MnD). Fuente: elaboración propia.

REGISTROS DEL MODELO MATEMÁTICO

Ensayo EPANET	
Material	**Fibra esponja**
Descripción	Promedio por material
Coeficiente k	**1483.82**

i	Apertura de válvula	t [min]	p_1 [mca]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [mca]	p_1 [kg/m^2]	Q [l/min]	Q [m^3/s]
1	Cerrada	0	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
2	Cerrada	2	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
3	Cerrada	4	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
4	Cerrada	6	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
5	25% abierta	7	3.26	3260.00	0.33	330.00	3.26	0.00005
6	25% abierta	9	3.25	3250.00	0.33	330.00	3.25	0.00005
7	25% abierta	11	3.24	3240.00	0.33	330.00	3.25	0.00005
8	25% abierta	13	3.24	3240.00	0.33	330.00	3.24	0.00005
9	50% abierta	14	3.23	3230.00	0.33	330.00	3.24	0.00005
10	50% abierta	16	3.23	3230.00	0.33	330.00	3.24	0.00005
11	50% abierta	18	3.22	3220.00	0.33	330.00	3.23	0.00005
12	50% abierta	20	3.21	3210.00	0.33	330.00	3.23	0.00005
13	75% abierta	21	3.21	3210.00	0.33	330.00	3.23	0.00005
14	75% abierta	23	3.20	3200.00	0.33	330.00	3.22	0.00005
15	75% abierta	25	3.20	3200.00	0.33	330.00	3.22	0.00005
16	75% abierta	27	3.19	3190.00	0.33	330.00	3.22	0.00005
17	100% abierta	28	3.19	3190.00	0.33	330.00	3.21	0.00005
18	100% abierta	30	3.18	3180.00	0.33	330.00	3.21	0.00005
19	100% abierta	32	3.17	3170.00	0.33	330.00	3.21	0.00005
20	100% abierta	34	3.17	3170.00	0.33	330.00	3.20	0.00005

Tabla A 19. Registro de datos de Fibra esponja, promedio por material. Fuente: elaboración propia.

Ensayo EPANET	
Material	**Fibra esponja**
Descripción	Regresión potencial
Coeficiente k	**953.71**

i	Apertura de válvula	t [min]	p_1 [mca]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [mca]	p_1 [kg/m^2]	Q [l/min]	Q [m^3/s]
1	Cerrada	0	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
2	Cerrada	2	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
3	Cerrada	4	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
4	Cerrada	6	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
5	25% abierta	7	3.24	3240.00	0.33	330.00	4.04	0.00007
6	25% abierta	9	3.23	3230.00	0.33	330.00	4.04	0.00007
7	25% abierta	11	3.22	3220.00	0.33	330.00	4.03	0.00007
8	25% abierta	13	3.21	3210.00	0.33	330.00	4.03	0.00007
9	50% abierta	14	3.21	3210.00	0.33	330.00	4.02	0.00007
10	50% abierta	16	3.20	3200.00	0.33	330.00	4.02	0.00007
11	50% abierta	18	3.19	3190.00	0.33	330.00	4.01	0.00007
12	50% abierta	20	3.18	3180.00	0.33	330.00	4.00	0.00007
13	75% abierta	21	3.18	3180.00	0.33	330.00	4.00	0.00007
14	75% abierta	23	3.17	3170.00	0.33	330.00	3.99	0.00007
15	75% abierta	25	3.16	3160.00	0.33	330.00	3.99	0.00007
16	75% abierta	27	3.15	3150.00	0.33	330.00	3.98	0.00007
17	100% abierta	28	3.15	3150.00	0.33	330.00	3.98	0.00007
18	100% abierta	30	3.14	3140.00	0.33	330.00	3.97	0.00007
19	100% abierta	32	3.13	3130.00	0.33	330.00	3.97	0.00007
20	100% abierta	34	3.12	3120.00	0.33	330.00	3.96	0.00007

Tabla A 20. Registro de datos de Fibra esponja, regresión potencial. Fuente: elaboración propia.

Ensayo EPANET	
Material	**Filtro para café**
Descripción	Promedio por material
Coeficiente k	**1062.79**

i	Apertura de válvula	t [min]	p_1 [mca]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [mca]	p_1 [kg/m^2]	Q [l/min]	Q [m^3/s]
1	Cerrada	0	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
2	Cerrada	2	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
3	Cerrada	4	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
4	Cerrada	6	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
5	25% abierta	7	**3.24**	3240.00	**0.33**	330.00	**3.84**	0.00006
6	25% abierta	9	**3.23**	3230.00	**0.33**	330.00	**3.83**	0.00006
7	25% abierta	11	**3.23**	3230.00	**0.33**	330.00	**3.82**	0.00006
8	25% abierta	13	**3.22**	3220.00	**0.33**	330.00	**3.82**	0.00006
9	50% abierta	14	**3.21**	3210.00	**0.33**	330.00	**3.82**	0.00006
10	50% abierta	16	**3.21**	3210.00	**0.33**	330.00	**3.81**	0.00006
11	50% abierta	18	**3.20**	3200.00	**0.33**	330.00	**3.80**	0.00006
12	50% abierta	20	**3.19**	3190.00	**0.33**	330.00	**3.80**	0.00006
13	75% abierta	21	**3.19**	3190.00	**0.33**	330.00	**3.80**	0.00006
14	75% abierta	23	**3.18**	3180.00	**0.33**	330.00	**3.79**	0.00006
15	75% abierta	25	**3.17**	3170.00	**0.33**	330.00	**3.78**	0.00006
16	75% abierta	27	**3.16**	3160.00	**0.33**	330.00	**3.78**	0.00006
17	100% abierta	28	**3.16**	3160.00	**0.33**	330.00	**3.78**	0.00006
18	100% abierta	30	**3.15**	3150.00	**0.33**	330.00	**3.77**	0.00006
19	100% abierta	32	**3.14**	3140.00	**0.33**	330.00	**3.76**	0.00006
20	100% abierta	34	**3.13**	3130.00	**0.33**	330.00	**3.76**	0.00006

Tabla A 21. Registro de datos de Filtro para café, promedio por material. Fuente: elaboración propia.

Ensayo EPANET	
Material	**Filtro para café**
Descripción	Regresión potencial
Coeficiente k	**1044.84**

i	Apertura de válvula	t [min]	p_1 [mca]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [mca]	p_1 [kg/m^2]	Q [l/min]	Q [m^3/s]
1	Cerrada	0	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
2	Cerrada	2	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
3	Cerrada	4	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
4	Cerrada	6	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
5	25% abierta	7	**3.24**	3240.00	**0.33**	330.00	**3.87**	0.00006
6	25% abierta	9	**3.23**	3230.00	**0.33**	330.00	**3.86**	0.00006
7	25% abierta	11	**3.23**	3230.00	**0.33**	330.00	**3.86**	0.00006
8	25% abierta	13	**3.22**	3220.00	**0.33**	330.00	**3.85**	0.00006
9	50% abierta	14	**3.21**	3210.00	**0.33**	330.00	**3.85**	0.00006
10	50% abierta	16	**3.20**	3200.00	**0.33**	330.00	**3.84**	0.00006
11	50% abierta	18	**3.20**	3200.00	**0.33**	330.00	**3.84**	0.00006
12	50% abierta	20	**3.19**	3190.00	**0.33**	330.00	**3.83**	0.00006
13	75% abierta	21	**3.18**	3180.00	**0.33**	330.00	**3.83**	0.00006
14	75% abierta	23	**3.18**	3180.00	**0.33**	330.00	**3.83**	0.00006
15	75% abierta	25	**3.17**	3170.00	**0.33**	330.00	**3.82**	0.00006
16	75% abierta	27	**3.16**	3160.00	**0.33**	330.00	**3.81**	0.00006
17	100% abierta	28	**3.16**	3160.00	**0.33**	330.00	**3.81**	0.00006
18	100% abierta	30	**3.15**	3150.00	**0.33**	330.00	**3.80**	0.00006
19	100% abierta	32	**3.14**	3140.00	**0.33**	330.00	**3.80**	0.00006
20	100% abierta	34	**3.13**	3130.00	**0.33**	330.00	**3.79**	0.00006

Tabla A 22. Registro de datos de Filtro para café, regresión potencial. Fuente: elaboración propia.

Ensayo EPANET	
Material	**Estropajo 8 g**
Descripción	Promedio por material
Coeficiente k	**19491.27**

i	Apertura de válvula	t [min]	p_1 [mca]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [mca]	p_1 [kg/m^2]	Q [l/min]	Q [m^3/s]
1	Cerrada	0	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
2	Cerrada	2	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
3	Cerrada	4	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
4	Cerrada	6	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
5	25% abierta	7	3.29	3290.00	0.33	330.00	0.91	0.00002
6	25% abierta	9	3.29	3290.00	0.33	330.00	0.91	0.00002
7	25% abierta	11	3.29	3290.00	0.33	330.00	0.91	0.00002
8	25% abierta	13	3.29	3290.00	0.33	330.00	0.90	0.00002
9	50% abierta	14	3.29	3290.00	0.33	330.00	0.90	0.00002
10	50% abierta	16	3.29	3290.00	0.33	330.00	0.90	0.00002
11	50% abierta	18	3.28	3280.00	0.33	330.00	0.90	0.00002
12	50% abierta	20	3.28	3280.00	0.33	330.00	0.90	0.00002
13	75% abierta	21	3.28	3280.00	0.33	330.00	0.90	0.00002
14	75% abierta	23	3.28	3280.00	0.33	330.00	0.90	0.00002
15	75% abierta	25	3.28	3280.00	0.33	330.00	0.90	0.00002
16	75% abierta	27	3.28	3280.00	0.33	330.00	0.90	0.00002
17	100% abierta	28	3.27	3270.00	0.33	330.00	0.90	0.00002
18	100% abierta	30	3.27	3270.00	0.33	330.00	0.90	0.00002
19	100% abierta	32	3.27	3270.00	0.33	330.00	0.90	0.00002
20	100% abierta	34	3.27	3270.00	0.33	330.00	0.90	0.00002

Tabla A 23. Registro de datos de Estropajo 8 g, promedio por material. Fuente: elaboración propia.

Ensayo EPANET	
Material	**Estropajo 8 g**
Descripción	Regresión potencial
Coeficiente k	**16462.77**

i	Apertura de válvula	t [min]	p_1 [mca]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [mca]	p_1 [kg/m^2]	Q [l/min]	Q [m^3/s]
1	Cerrada	0	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
2	Cerrada	2	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
3	Cerrada	4	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
4	Cerrada	6	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
5	25% abierta	7	3.29	3290.00	0.33	330.00	0.99	0.00002
6	25% abierta	9	3.29	3290.00	0.33	330.00	0.99	0.00002
7	25% abierta	11	3.29	3290.00	0.33	330.00	0.98	0.00002
8	25% abierta	13	3.29	3290.00	0.33	330.00	0.98	0.00002
9	50% abierta	14	3.29	3290.00	0.33	330.00	0.98	0.00002
10	50% abierta	16	3.28	3280.00	0.33	330.00	0.98	0.00002
11	50% abierta	18	3.28	3280.00	0.33	330.00	0.98	0.00002
12	50% abierta	20	3.28	3280.00	0.33	330.00	0.98	0.00002
13	75% abierta	21	3.28	3280.00	0.33	330.00	0.98	0.00002
14	75% abierta	23	3.28	3280.00	0.33	330.00	0.98	0.00002
15	75% abierta	25	3.28	3280.00	0.33	330.00	0.98	0.00002
16	75% abierta	27	3.27	3270.00	0.33	330.00	0.98	0.00002
17	100% abierta	28	3.27	3270.00	0.33	330.00	0.98	0.00002
18	100% abierta	30	3.27	3270.00	0.33	330.00	0.98	0.00002
19	100% abierta	32	3.27	3270.00	0.33	330.00	0.98	0.00002
20	100% abierta	34	3.27	3270.00	0.33	330.00	0.98	0.00002

Tabla A 24. Registro de datos de Estropajo 8 g, regresión potencial. Fuente: elaboración propia.

Ensayo EPANET	
Material	**Estropajo 6 g**
Descripción	Promedio por material
Coeficiente k	**1666.10**

i	Apertura de válvula	t [min]	p_1 [mca]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [mca]	p_1 [kg/m^2]	Q [l/min]	Q [m^3/s]
1	Cerrada	0	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
2	Cerrada	2	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
3	Cerrada	4	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
4	Cerrada	6	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
5	25% abierta	7	**3.26**	3260.00	**0.33**	330.00	**3.08**	0.00005
6	25% abierta	9	**3.26**	3260.00	**0.33**	330.00	**3.07**	0.00005
7	25% abierta	11	**3.25**	3250.00	**0.33**	330.00	**3.07**	0.00005
8	25% abierta	13	**3.24**	3240.00	**0.33**	330.00	**3.07**	0.00005
9	50% abierta	14	**3.24**	3240.00	**0.33**	330.00	**3.06**	0.00005
10	50% abierta	16	**3.23**	3230.00	**0.33**	330.00	**3.06**	0.00005
11	50% abierta	18	**3.23**	3230.00	**0.33**	330.00	**3.06**	0.00005
12	50% abierta	20	**3.22**	3220.00	**0.33**	330.00	**3.05**	0.00005
13	75% abierta	21	**3.22**	3220.00	**0.33**	330.00	**3.05**	0.00005
14	75% abierta	23	**3.21**	3210.00	**0.33**	330.00	**3.05**	0.00005
15	75% abierta	25	**3.20**	3200.00	**0.33**	330.00	**3.04**	0.00005
16	75% abierta	27	**3.20**	3200.00	**0.33**	330.00	**3.04**	0.00005
17	100% abierta	28	**3.19**	3190.00	**0.33**	330.00	**3.04**	0.00005
18	100% abierta	30	**3.19**	3190.00	**0.33**	330.00	**3.03**	0.00005
19	100% abierta	32	**3.18**	3180.00	**0.33**	330.00	**3.03**	0.00005
20	100% abierta	34	**3.18**	3180.00	**0.33**	330.00	**3.03**	0.00005

Tabla A 25. Registro de datos de Estropajo 6 g, promedio por material. Fuente: elaboración propia.

Ensayo EPANET	
Material	**Estropajo 6 g**
Descripción	Regresión potencial
Coeficiente k	**1656.38**

i	Apertura de válvula	t [min]	p_1 [mca]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [mca]	p_1 [kg/m^2]	Q [l/min]	Q [m^3/s]
1	Cerrada	0	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
2	Cerrada	2	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
3	Cerrada	4	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
4	Cerrada	6	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
5	25% abierta	7	**3.26**	3260.00	**0.33**	330.00	**3.09**	0.00005
6	25% abierta	9	**3.26**	3260.00	**0.33**	330.00	**3.08**	0.00005
7	25% abierta	11	**3.25**	3250.00	**0.33**	330.00	**3.08**	0.00005
8	25% abierta	13	**3.24**	3240.00	**0.33**	330.00	**3.07**	0.00005
9	50% abierta	14	**3.24**	3240.00	**0.33**	330.00	**3.07**	0.00005
10	50% abierta	16	**3.23**	3230.00	**0.33**	330.00	**3.07**	0.00005
11	50% abierta	18	**3.23**	3230.00	**0.33**	330.00	**3.07**	0.00005
12	50% abierta	20	**3.22**	3220.00	**0.33**	330.00	**3.06**	0.00005
13	75% abierta	21	**3.22**	3220.00	**0.33**	330.00	**3.06**	0.00005
14	75% abierta	23	**3.21**	3210.00	**0.33**	330.00	**3.06**	0.00005
15	75% abierta	25	**3.20**	3200.00	**0.33**	330.00	**3.05**	0.00005
16	75% abierta	27	**3.20**	3200.00	**0.33**	330.00	**3.05**	0.00005
17	100% abierta	28	**3.19**	3190.00	**0.33**	330.00	**3.05**	0.00005
18	100% abierta	30	**3.19**	3190.00	**0.33**	330.00	**3.04**	0.00005
19	100% abierta	32	**3.18**	3180.00	**0.33**	330.00	**3.04**	0.00005
20	100% abierta	34	**3.17**	3170.00	**0.33**	330.00	**3.04**	0.00005

Tabla A 26. Registro de datos de Estropajo 6 g, regresión potencial. Fuente: elaboración propia.

Ensayo EPANET	
Material	**Sargazo**
Descripción	Promedio por material
Coeficiente k	**392.24**

i	Apertura de válvula	t [min]	p_1 [mca]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [mca]	p_1 [kg/m^2]	Q [l/min]	Q [m^3/s]
1	Cerrada	0	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
2	Cerrada	2	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
3	Cerrada	4	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
4	Cerrada	6	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
5	25% abierta	7	**3.16**	3160.00	**0.34**	340.00	**6.20**	0.00010
6	25% abierta	9	**3.15**	3150.00	**0.34**	340.00	**6.19**	0.00010
7	25% abierta	11	**3.13**	3130.00	**0.34**	340.00	**6.17**	0.00010
8	25% abierta	13	**3.12**	3120.00	**0.34**	340.00	**6.16**	0.00010
9	50% abierta	14	**3.11**	3110.00	**0.34**	340.00	**6.15**	0.00010
10	50% abierta	16	**3.10**	3100.00	**0.34**	340.00	**6.13**	0.00010
11	50% abierta	18	**3.09**	3090.00	**0.34**	340.00	**6.12**	0.00010
12	50% abierta	20	**3.08**	3080.00	**0.34**	340.00	**6.10**	0.00010
13	75% abierta	21	**3.07**	3070.00	**0.34**	340.00	**6.09**	0.00010
14	75% abierta	23	**3.06**	3060.00	**0.34**	340.00	**6.08**	0.00010
15	75% abierta	25	**3.04**	3040.00	**0.34**	340.00	**6.07**	0.00010
16	75% abierta	27	**3.03**	3030.00	**0.34**	340.00	**6.05**	0.00010
17	100% abierta	28	**3.03**	3030.00	**0.34**	340.00	**6.04**	0.00010
18	100% abierta	30	**3.01**	3010.00	**0.34**	340.00	**6.03**	0.00010
19	100% abierta	32	**3.00**	3000.00	**0.34**	340.00	**6.01**	0.00010
20	100% abierta	34	**2.99**	2990.00	**0.34**	340.00	**6.00**	0.00010

Tabla A 27. Registro de datos de Sargazo, promedio por material. Fuente: elaboración propia.

Ensayo EPANET	
Material	**Sargazo**
Descripción	Regresión potencial
Coeficiente k	**363.19**

i	Apertura de válvula	t [min]	p_1 [mca]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [mca]	p_1 [kg/m^2]	Q [l/min]	Q [m^3/s]
1	Cerrada	0	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
2	Cerrada	2	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
3	Cerrada	4	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
4	Cerrada	6	**0.51**	510.00	**0.33**	330.00	**0**	0
5	25% abierta	7	**3.15**	3150.00	**0.35**	350.00	**6.43**	0.00011
6	25% abierta	9	**3.14**	3140.00	**0.35**	350.00	**6.41**	0.00011
7	25% abierta	11	**3.12**	3120.00	**0.35**	350.00	**6.40**	0.00011
8	25% abierta	13	**3.11**	3110.00	**0.35**	350.00	**6.38**	0.00011
9	50% abierta	14	**3.10**	3100.00	**0.35**	350.00	**6.37**	0.00011
10	50% abierta	16	**3.09**	3090.00	**0.35**	350.00	**6.36**	0.00011
11	50% abierta	18	**3.08**	3080.00	**0.35**	350.00	**6.34**	0.00011
12	50% abierta	20	**3.06**	3060.00	**0.35**	350.00	**6.33**	0.00011
13	75% abierta	21	**3.06**	3060.00	**0.35**	350.00	**6.32**	0.00011
14	75% abierta	23	**3.04**	3040.00	**0.35**	350.00	**6.30**	0.00011
15	75% abierta	25	**3.03**	3030.00	**0.35**	350.00	**6.28**	0.00010
16	75% abierta	27	**3.02**	3020.00	**0.34**	340.00	**6.27**	0.00010
17	100% abierta	28	**3.01**	3010.00	**0.34**	340.00	**6.26**	0.00010
18	100% abierta	30	**3.00**	3000.00	**0.34**	340.00	**6.24**	0.00010
19	100% abierta	32	**2.99**	2990.00	**0.34**	340.00	**6.23**	0.00010
20	100% abierta	34	**2.97**	2970.00	**0.34**	340.00	**6.21**	0.00010

Tabla A 28. Registro de datos de Sargazo, regresión potencial. Fuente: elaboración propia.

Ensayo EPANET	
Material	**Sin material**
Descripción	Promedio por material
Coeficiente k	**112.04**

i	Apertura de válvula	t [min]	p_1 [mca]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [mca]	p_1 [kg/m^2]	Q [l/min]	Q [m^3/s]
1	Cerrada	0	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
2	Cerrada	2	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
3	Cerrada	4	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
4	Cerrada	6	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
5	25% abierta	7	2.89	2890.00	0.38	380.00	10.89	0.00018
6	25% abierta	9	2.87	2870.00	0.38	380.00	10.85	0.00018
7	25% abierta	11	2.85	2850.00	0.38	380.00	10.80	0.00018
8	25% abierta	13	2.83	2830.00	0.38	380.00	10.76	0.00018
9	50% abierta	14	2.82	2820.00	0.38	380.00	10.72	0.00018
10	50% abierta	16	2.80	2800.00	0.38	380.00	10.68	0.00018
11	50% abierta	18	2.78	2780.00	0.38	380.00	10.63	0.00018
12	50% abierta	20	2.76	2760.00	0.38	380.00	10.59	0.00018
13	75% abierta	21	2.75	2750.00	0.38	380.00	10.56	0.00018
14	75% abierta	23	2.73	2730.00	0.38	380.00	10.51	0.00018
15	75% abierta	25	2.71	2710.00	0.38	380.00	10.46	0.00017
16	75% abierta	27	2.69	2690.00	0.38	380.00	10.42	0.00017
17	100% abierta	28	2.68	2680.00	0.38	380.00	10.39	0.00017
18	100% abierta	30	2.66	2660.00	0.38	380.00	10.34	0.00017
19	100% abierta	32	2.64	2640.00	0.38	380.00	10.30	0.00017
20	100% abierta	34	2.62	2620.00	0.38	380.00	10.25	0.00017

Tabla A 29. Registro de datos de Sin material, promedio por material. Fuente: elaboración propia.

Ensayo EPANET	
Material	**Sin material**
Descripción	Regresión potencial
Coeficiente k	**75.50**

i	Apertura de válvula	t [min]	p_1 [mca]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [mca]	p_1 [kg/m^2]	Q [l/min]	Q [m^3/s]
1	Cerrada	0	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
2	Cerrada	2	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
3	Cerrada	4	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
4	Cerrada	6	0.51	510.00	0.33	330.00	0	0
5	25% abierta	7	2.75	2750.00	0.40	400.00	12.77	0.00021
6	25% abierta	9	2.73	2730.00	0.40	400.00	12.71	0.00021
7	25% abierta	11	2.70	2700.00	0.40	400.00	12.65	0.00021
8	25% abierta	13	2.68	2680.00	0.40	400.00	12.59	0.00021
9	50% abierta	14	2.67	2670.00	0.40	400.00	12.54	0.00021
10	50% abierta	16	2.64	2640.00	0.40	400.00	12.48	0.00021
11	50% abierta	18	2.62	2620.00	0.40	400.00	12.42	0.00021
12	50% abierta	20	2.60	2600.00	0.40	400.00	12.35	0.00021
13	75% abierta	21	2.59	2590.00	0.40	400.00	12.31	0.00021
14	75% abierta	23	2.57	2570.00	0.40	400.00	12.24	0.00020
15	75% abierta	25	2.54	2540.00	0.40	400.00	12.18	0.00020
16	75% abierta	27	2.52	2520.00	0.40	400.00	12.12	0.00020
17	100% abierta	28	2.51	2510.00	0.40	400.00	12.07	0.00020
18	100% abierta	30	2.49	2490.00	0.39	390.00	12.01	0.00020
19	100% abierta	32	2.47	2470.00	0.39	390.00	11.95	0.00020
20	100% abierta	34	2.45	2450.00	0.39	390.00	11.89	0.00020

Tabla A 30. Registro de datos de Sin material, regresión potencial. Fuente: elaboración propia.

CÁLCULO DEL COEFICIENTE k

Material	**Fibra esponja (CP)**
Ensayo	1
Fecha	26/11/2025
Observaciones	2 g de esponja usados
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
5	25%	0.00004	0.1490	2829.09	NA	NA	0.0307	0.0675	2304.12	438.88	1488.20
6	25%	0.00004	0.1448	2749.52	NA	NA	0.0300	0.0625	2304.12	438.88	1580.31
7	25%	0.00004	0.1397	2651.46	NA	NA	0.0294	0.0569	2413.84	438.88	1816.34
8	25%	0.00004	0.1360	2581.15	NA	NA	0.0291	0.0533	2413.84	438.88	1920.45
9	50%	0.00005	0.1862	3535.89	NA	NA	0.0381	0.1311	3181.88	438.88	1417.62
10	50%	0.00005	0.1813	3441.53	NA	NA	0.0372	0.1212	3291.60	438.88	1568.47
11	50%	0.00005	0.1753	3328.66	NA	NA	0.0360	0.1096	3291.60	438.88	1684.00
12	50%	0.00005	0.1707	3240.40	NA	NA	0.0350	0.1010	3291.60	438.88	1782.78
13	75%	0.00005	0.1728	3280.55	NA	NA	0.0354	0.1049	3401.32	438.88	1809.61
14	75%	0.00005	0.1687	3202.84	NA	NA	0.0346	0.0975	3401.32	438.88	1903.59
15	75%	0.00005	0.1643	3119.58	NA	NA	0.0336	0.0900	3401.32	438.88	2012.02
16	75%	0.00005	0.1599	3036.32	NA	NA	0.0327	0.0829	3401.32	438.88	2129.30
17	100%	0.00005	0.1587	3012.26	NA	NA	0.0325	0.0810	3401.32	438.88	2164.96
18	100%	0.00004	0.1551	2943.80	NA	NA	0.0317	0.0757	3401.32	438.88	2271.17
19	100%	0.00004	0.1515	2877.19	NA	NA	0.0311	0.0708	3401.32	438.88	2381.68
20	100%	0.00004	0.1486	2821.68	NA	NA	0.0306	0.0670	3401.32	438.88	2479.67

Tabla A 31. Cálculo del coeficiente k para Fibra esponja (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Fibra esponja (MnD)**
Ensayo	1
Fecha	02/12/2025
Observaciones	2 g de esponja usados
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
5	25%	0.00005	0.1673	3176.94	NA	NA	0.0343	0.0951	2289.86	276.49	1265.52
6	25%	0.00005	0.1676	3182.49	NA	NA	0.0343	0.0956	2287.66	274.30	1260.76
7	25%	0.00005	0.1666	3162.14	NA	NA	0.0341	0.0938	2282.18	274.30	1274.43
8	25%	0.00005	0.1664	3158.44	NA	NA	0.0341	0.0934	2281.08	274.30	1276.87
9	50%	0.00006	0.2095	3978.11	NA	NA	0.0406	0.1769	2888.93	274.30	1041.66
10	50%	0.00006	0.2099	3985.51	NA	NA	0.0406	0.1775	2880.15	275.40	1033.06
11	50%	0.00006	0.2095	3978.11	NA	NA	0.0406	0.1769	2870.28	275.40	1032.75
12	50%	0.00006	0.2091	3970.71	NA	NA	0.0406	0.1762	2862.59	275.40	1033.44
13	75%	0.00006	0.2205	4185.34	4.5550	0.8764	0.0396	0.1908	3027.17	276.49	990.86
14	75%	0.00006	0.2205	4185.34	4.5550	0.8764	0.0396	0.1908	3018.40	277.59	986.83
15	75%	0.00006	0.2205	4185.34	4.5550	0.8764	0.0396	0.1908	3009.62	277.59	983.26
16	75%	0.00006	0.2205	4185.34	4.5550	0.8764	0.0396	0.1908	3001.94	277.59	980.13
17	100%	0.00006	0.2227	4227.90	4.5550	0.8764	0.0395	0.1941	3034.86	277.59	972.33
18	100%	0.00006	0.2227	4227.90	4.5550	0.8764	0.0395	0.1941	3026.08	277.59	968.82
19	100%	0.00006	0.2205	4185.34	4.5550	0.8764	0.0396	0.1908	3019.49	277.59	987.28
20	100%	0.00006	0.2205	4185.34	4.5550	0.8764	0.0396	0.1908	3011.81	277.59	984.15

Tabla A 32. Cálculo del coeficiente k para Fibra esponja (MnD). Fuente: elaboración propia.

Material	**Filtro para café (CP)**
Ensayo	1
Fecha	26/11/2025
Observaciones	Primer uso del filtro
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
5	25%	0.00005	0.1821	3458.18	NA	NA	0.0374	0.1229	2304.12	438.88	963.24
6	25%	0.00005	0.1777	3373.07	NA	NA	0.0365	0.1141	2304.12	438.88	1017.94
7	25%	0.00005	0.1744	3312.01	NA	NA	0.0358	0.1080	2304.12	438.88	1059.77
8	25%	0.00005	0.1708	3243.55	NA	NA	0.0350	0.1013	2413.84	438.88	1183.86
9	50%	0.00006	0.2248	4268.61	4.5550	0.8764	0.0394	0.1973	3072.16	438.88	904.09
10	50%	0.00006	0.2205	4185.34	4.5550	0.8764	0.0396	0.1908	3181.88	438.88	987.73
11	50%	0.00006	0.2133	4050.27	4.5550	0.8764	0.0400	0.1804	3181.88	438.88	1059.16
12	50%	0.00006	0.2075	3939.26	NA	NA	0.0406	0.1732	3181.88	438.88	1122.99
13	75%	0.00006	0.2125	4033.62	4.5550	0.8764	0.0400	0.1792	3291.60	438.88	1116.59
14	75%	0.00006	0.2067	3924.45	NA	NA	0.0406	0.1718	3291.60	438.88	1182.95
15	75%	0.00006	0.2020	3835.64	NA	NA	0.0403	0.1630	3291.60	438.88	1242.62
16	75%	0.00006	0.1973	3744.98	NA	NA	0.0398	0.1535	3291.60	438.88	1308.28
17	100%	0.00006	0.1954	3709.82	NA	NA	0.0396	0.1498	3291.60	438.88	1335.11
18	100%	0.00005	0.1916	3637.66	NA	NA	0.0390	0.1421	3291.60	438.88	1392.74
19	100%	0.00005	0.1876	3561.80	NA	NA	0.0384	0.1339	3291.60	438.88	1457.24
20	100%	0.00005	0.1837	3487.79	NA	NA	0.0377	0.1260	3291.60	438.88	1524.32

Tabla A 33. Cálculo del coeficiente k para Filtro para café (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Filtro para café (MnD)**
Ensayo	1
Fecha	02/12/2025
Observaciones	Primer uso del filtro
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
5	25%	0.00005	0.1608	3052.97	NA	NA	0.0329	0.0843	1878.41	287.47	1055.23
6	25%	0.00005	0.1604	3045.57	NA	NA	0.0328	0.0837	1887.18	287.47	1067.59
7	25%	0.00005	0.1591	3021.51	NA	NA	0.0325	0.0817	1892.67	287.47	1090.46
8	25%	0.00005	0.1587	3012.26	NA	NA	0.0325	0.0810	1897.06	287.47	1101.20
9	50%	0.00007	0.2314	4392.58	4.5550	0.8764	0.0390	0.2071	2904.29	289.66	843.27
10	50%	0.00007	0.2292	4351.87	4.5550	0.8764	0.0391	0.2039	2904.29	289.66	860.34
11	50%	0.00006	0.2248	4268.61	4.5550	0.8764	0.0394	0.1973	2898.80	289.66	894.64
12	50%	0.00006	0.2248	4268.61	4.5550	0.8764	0.0394	0.1973	2895.51	289.66	893.35
13	75%	0.00007	0.2314	4392.58	4.5550	0.8764	0.0390	0.2071	3015.11	289.66	884.25
14	75%	0.00007	0.2292	4351.87	4.5550	0.8764	0.0391	0.2039	3007.43	289.66	899.19
15	75%	0.00007	0.2292	4351.87	4.5550	0.8764	0.0391	0.2039	3001.94	289.66	897.12
16	75%	0.00006	0.2271	4311.16	4.5550	0.8764	0.0392	0.2006	2994.26	289.66	912.43
17	100%	0.00006	0.2271	4311.16	4.5550	0.8764	0.0392	0.2006	3032.66	289.66	927.17
18	100%	0.00006	0.2271	4311.16	4.5550	0.8764	0.0392	0.2006	3024.98	289.66	924.22
19	100%	0.00006	0.2248	4268.61	4.5550	0.8764	0.0394	0.1973	3018.40	289.66	941.46
20	100%	0.00006	0.2227	4227.90	4.5550	0.8764	0.0395	0.1941	3012.91	289.66	958.75

Tabla A 34. Cálculo del coeficiente k para Filtro para café (MnD). Fuente: elaboración propia.

Material	**Estropajo (CP)**
Ensayo	1
Fecha	21/11/2025
Observaciones	8 g de estropajo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
5	25%	0.00003	0.0970	1841.03	NA	NA	0.0348	0.0324	2743.00	329.16	4742.33
6	25%	0.00003	0.0910	1728.17	NA	NA	0.0370	0.0304	2852.72	329.16	5648.82
7	25%	0.00002	0.0853	1619.00	NA	NA	0.0395	0.0285	2962.44	329.16	6740.13
8	25%	0.00002	0.0792	1504.28	NA	NA	0.0425	0.0265	2962.44	329.16	7813.65
9	50%	0.00003	0.0942	1789.23	NA	NA	0.0358	0.0315	3401.32	329.16	6490.14
10	50%	0.00002	0.0845	1604.20	NA	NA	0.0399	0.0282	3511.04	329.16	8386.77
11	50%	0.00002	0.0775	1470.98	NA	NA	0.0435	0.0259	3511.04	329.16	9982.34
12	50%	0.00002	0.0709	1347.01	NA	NA	0.0475	0.0237	3511.04	329.16	11912.80
13	75%	0.00002	0.0668	1267.44	NA	NA	0.0505	0.0223	3511.04	329.16	13461.53
14	75%	0.00002	0.0599	1137.93	NA	NA	0.0562	0.0200	3511.04	329.16	16712.80
15	75%	0.00001	0.0517	980.65	NA	NA	0.0653	0.0173	3511.04	329.16	22523.73
16	75%	0.00001	0.0466	884.44	NA	NA	0.0724	0.0156	3511.04	329.16	27706.16
17	100%	0.00001	0.0432	819.68	NA	NA	0.0781	0.0144	3511.04	329.16	32269.05
18	100%	0.00001	0.0402	762.32	NA	NA	0.0840	0.0134	3511.04	329.16	37320.05
19	100%	0.00001	0.0371	704.96	NA	NA	0.0908	0.0124	3511.04	329.16	43654.56
20	100%	0.00001	0.0346	656.85	NA	NA	0.0974	0.0116	3511.04	329.16	50297.07

Tabla A 35. Cálculo del coeficiente k para Estropajo 1 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Estropajo (CP)**
Ensayo	2
Fecha	24/11/2025
Observaciones	8 g de estropajo
Δt =	180 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
5	25%	0.00002	0.0556	1054.66	NA	NA	0.0607	0.0186	3401.32	329.16	18761.36
6	25%	0.00002	0.0554	1050.96	NA	NA	0.0609	0.0185	3401.32	329.16	18894.13
7	25%	0.00002	0.0545	1034.31	NA	NA	0.0619	0.0182	3401.32	329.16	19509.36
8	25%	0.00002	0.0540	1025.06	NA	NA	0.0624	0.0180	3401.32	329.16	19864.20
9	50%	0.00002	0.0556	1054.66	NA	NA	0.0607	0.0186	3511.04	329.16	19465.14
10	50%	0.00002	0.0556	1054.66	NA	NA	0.0607	0.0186	3511.04	329.16	19465.14
11	50%	0.00002	0.0555	1052.81	NA	NA	0.0608	0.0185	3511.04	329.16	19533.83
12	50%	0.00002	0.0551	1045.41	NA	NA	0.0612	0.0184	3511.04	329.16	19812.24
13	75%	0.00002	0.0551	1045.41	NA	NA	0.0612	0.0184	3511.04	329.16	19812.24
14	75%	0.00002	0.0548	1039.86	NA	NA	0.0615	0.0183	3511.04	329.16	20024.96
15	75%	0.00002	0.0546	1036.16	NA	NA	0.0618	0.0182	3511.04	329.16	20168.68
16	75%	0.00002	0.0543	1030.61	NA	NA	0.0621	0.0181	3511.04	329.16	20387.17
17	100%	0.00002	0.0541	1026.91	NA	NA	0.0623	0.0181	3511.04	329.16	20534.81
18	100%	0.00002	0.0538	1021.36	NA	NA	0.0627	0.0180	3511.04	329.16	20759.28
19	100%	0.00002	0.0536	1017.66	NA	NA	0.0629	0.0179	3511.04	329.16	20910.98
20	100%	0.00002	0.0536	1017.66	NA	NA	0.0629	0.0179	3401.32	329.16	20155.08

Tabla A 36. Cálculo del coeficiente k para Estropajo 2 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Estropajo (MnD)**
Ensayo	1
Fecha	04/12/2025
Observaciones	6 g de estropajo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
5	25%	0.00004	0.1484	2817.98	NA	NA	0.0306	0.0668	2358.98	284.17	1688.89
6	25%	0.00004	0.1460	2771.73	NA	NA	0.0302	0.0638	2369.95	287.47	1755.59
7	25%	0.00004	0.1440	2734.72	NA	NA	0.0299	0.0616	2379.83	287.47	1814.98
8	25%	0.00004	0.1423	2701.42	NA	NA	0.0297	0.0596	2391.90	287.47	1873.69
9	50%	0.00005	0.1785	3389.72	NA	NA	0.0366	0.1158	2863.69	288.56	1447.71
10	50%	0.00005	0.1771	3361.97	NA	NA	0.0363	0.1130	2869.18	288.56	1476.95
11	50%	0.00005	0.1747	3317.56	NA	NA	0.0359	0.1085	2876.86	288.56	1524.59
12	50%	0.00005	0.1728	3280.55	NA	NA	0.0354	0.1049	2885.64	288.56	1567.39
13	75%	0.00005	0.1762	3345.31	NA	NA	0.0362	0.1113	2919.65	288.56	1524.93
14	75%	0.00005	0.1736	3295.36	NA	NA	0.0356	0.1063	2924.04	288.56	1577.63
15	75%	0.00005	0.1708	3243.55	NA	NA	0.0350	0.1013	2929.52	288.56	1635.52
16	75%	0.00005	0.1695	3217.64	NA	NA	0.0347	0.0989	2932.82	288.56	1665.90
17	100%	0.00005	0.1687	3202.84	NA	NA	0.0346	0.0975	2973.41	287.47	1711.28
18	100%	0.00005	0.1676	3182.49	NA	NA	0.0343	0.0956	2981.09	287.47	1739.96
19	100%	0.00005	0.1651	3134.38	NA	NA	0.0338	0.0913	2989.87	287.47	1803.28
20	100%	0.00005	0.1633	3101.08	NA	NA	0.0334	0.0884	2996.45	287.47	1849.25

Tabla A 37. Cálculo del coeficiente k para Estropajo (MnD). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sargazo (CP)**
Ensayo	1
Fecha	12/11/2025
Observaciones	10 g de sargazo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
5	25%	0.00004	0.1324	2514.54	NA	NA	0.0289	0.0502	1206.92	329.16	788.89
6	25%	0.00004	0.1331	2527.49	NA	NA	0.0289	0.0508	1206.92	329.16	780.19
7	25%	0.00004	0.1336	2536.74	NA	NA	0.0289	0.0512	1206.92	329.16	774.06
8	25%	0.00004	0.1336	2536.74	NA	NA	0.0289	0.0512	1206.92	438.88	652.41
9	50%	0.00012	0.4185	7945.12	4.5550	0.8764	0.0330	0.5721	2084.68	438.88	107.36
10	50%	0.00014	0.4779	9073.80	4.5550	0.8764	0.0318	0.7199	1974.96	-438.88	136.18
11	50%	0.00013	0.4628	8787.00	4.5550	0.8764	0.0321	0.6809	1974.96	-329.16	138.64
12	50%	0.00013	0.4561	8659.33	4.5550	0.8764	0.0322	0.6639	1974.96	-329.16	144.36
13	75%	0.00015	0.5250	9967.48	4.5550	0.8764	0.0310	0.8472	2633.28	-219.44	135.30
14	75%	0.00015	0.5117	9713.99	4.5550	0.8764	0.0312	0.8102	2633.28	-329.16	153.53
15	75%	0.00014	0.4895	9293.98	4.5550	0.8764	0.0316	0.7504	2633.28	-219.44	163.55
16	75%	0.00014	0.4762	9040.49	4.5550	0.8764	0.0318	0.7153	2633.28	-219.44	175.89
17	100%	0.00014	0.4873	9251.42	4.5550	0.8764	0.0316	0.7445	2743.00	-219.44	174.70
18	100%	0.00014	0.4784	9083.05	4.5550	0.8764	0.0318	0.7212	2852.72	-219.44	192.72
19	100%	0.00013	0.4673	8872.11	4.5550	0.8764	0.0320	0.6924	2852.72	-109.72	194.63
20	100%	0.00013	0.4584	8703.74	4.5550	0.8764	0.0321	0.6698	2852.72	-109.72	204.34

Tabla A 38. Cálculo del coeficiente k para Sargazo 1 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sargazo (CP)**
Ensayo	2
Fecha	12/11/2025
Observaciones	10 g de sargazo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
5	25%	0.00006	0.2271	4311.16	4.5550	0.8764	0.0392	0.2006	1426.36	438.88	253.27
6	25%	0.00006	0.2207	4190.89	4.5550	0.8764	0.0396	0.1912	1426.36	438.88	271.80
7	25%	0.00006	0.2183	4144.64	4.5550	0.8764	0.0397	0.1876	1426.36	438.88	279.38
8	25%	0.00006	0.2173	4126.13	4.5550	0.8764	0.0398	0.1862	1536.08	438.88	328.46
9	50%	0.00011	0.3763	7143.95	4.5550	0.8764	0.0339	0.4763	2304.12	438.88	176.75
10	50%	0.00010	0.3674	6975.57	4.5550	0.8764	0.0342	0.4571	2633.28	329.16	252.52
11	50%	0.00010	0.3541	6722.08	4.5550	0.8764	0.0345	0.4289	2633.28	329.16	276.34
12	50%	0.00010	0.3474	6596.26	4.5550	0.8764	0.0347	0.4152	2633.28	329.16	289.21
13	75%	0.00011	0.3829	7269.77	4.5550	0.8764	0.0338	0.4908	2962.44	329.16	272.42
14	75%	0.00011	0.3807	7227.21	4.5550	0.8764	0.0338	0.4859	2962.44	438.88	261.32
15	75%	0.00011	0.3740	7101.39	4.5550	0.8764	0.0340	0.4714	2962.44	438.88	272.69
16	75%	0.00011	0.3696	7016.28	4.5550	0.8764	0.0341	0.4617	2962.44	438.88	280.74
17	100%	0.00011	0.3740	7101.39	4.5550	0.8764	0.0340	0.4714	3072.16	438.88	288.22
18	100%	0.00010	0.3674	6975.57	4.5550	0.8764	0.0342	0.4571	3072.16	438.88	300.78
19	100%	0.00010	0.3629	6890.46	4.5550	0.8764	0.0343	0.4476	3072.16	438.88	309.69
20	100%	0.00010	0.3607	6847.90	4.5550	0.8764	0.0343	0.4428	2962.44	438.88	297.57

Tabla A 39. Cálculo del coeficiente k para Sargazo 2 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sargazo (CP)**
Ensayo	3
Fecha	21/11/2025
Observaciones	10 g de sargazo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
5	25%	0.00005	0.1916	3637.66	NA	NA	0.0390	0.1421	1645.80	438.88	505.35
6	25%	0.00005	0.1886	3580.30	NA	NA	0.0385	0.1359	1645.80	438.88	525.07
7	25%	0.00005	0.1866	3543.30	NA	NA	0.0382	0.1319	1645.80	438.88	538.33
8	25%	0.00005	0.1837	3487.79	NA	NA	0.0377	0.1260	1755.52	438.88	623.39
9	50%	0.00010	0.3532	6705.43	4.5550	0.8764	0.0345	0.4271	2743.00	438.88	278.00
10	50%	0.00008	0.2876	5460.19	4.5550	0.8764	0.0366	0.3002	2743.00	438.88	449.35
11	50%	0.00008	0.2838	5388.03	4.5550	0.8764	0.0368	0.2935	2743.00	438.88	463.12
12	50%	0.00008	0.2773	5264.06	4.5550	0.8764	0.0370	0.2820	2743.00	329.16	516.36
13	75%	0.00009	0.3100	5885.76	4.5550	0.8764	0.0358	0.3414	3072.16	329.16	468.70
14	75%	0.00009	0.3035	5761.79	4.5550	0.8764	0.0361	0.3292	3072.16	329.16	491.70
15	75%	0.00009	0.3012	5719.23	4.5550	0.8764	0.0361	0.3250	3072.16	329.16	499.94
16	75%	0.00008	0.2947	5595.26	4.5550	0.8764	0.0364	0.3130	3072.16	329.16	525.04
17	100%	0.00008	0.2970	5637.82	4.5550	0.8764	0.0363	0.3171	3181.88	329.16	540.86
18	100%	0.00008	0.2926	5554.55	4.5550	0.8764	0.0364	0.3092	3181.88	329.16	559.03
19	100%	0.00008	0.2903	5512.00	4.5550	0.8764	0.0365	0.3051	3181.88	329.16	568.64
20	100%	0.00008	0.2860	5430.59	4.5550	0.8764	0.0367	0.2974	3181.88	329.16	587.65

Tabla A 40. Cálculo del coeficiente k para Sargazo 3 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sargazo (MnD)**
Ensayo	1
Fecha	02/12/2025
Observaciones	10 g de sargazo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
5	25%	0.00002	0.0576	1093.52	NA	NA	0.0585	0.0192	3198.34	277.59	16544.28
6	25%	0.00002	0.0563	1069.46	NA	NA	0.0598	0.0188	3199.44	277.59	17306.32
7	25%	0.00002	0.0550	1043.56	NA	NA	0.0613	0.0184	3201.63	276.49	18200.69
8	25%	0.00002	0.0534	1013.96	NA	NA	0.0631	0.0178	3204.92	277.59	19297.83
9	50%	0.00002	0.0538	1021.36	NA	NA	0.0627	0.0180	3276.24	276.49	19513.57
10	50%	0.00002	0.0529	1004.70	NA	NA	0.0637	0.0177	3274.04	276.49	20152.33
11	50%	0.00001	0.0518	982.50	NA	NA	0.0651	0.0173	3240.03	276.49	20824.93
12	50%	0.00001	0.0511	969.55	NA	NA	0.0660	0.0171	3271.85	276.49	21628.25
13	75%	0.00001	0.0507	962.15	NA	NA	0.0665	0.0169	3277.34	276.49	22005.55
14	75%	0.00001	0.0498	945.50	NA	NA	0.0677	0.0166	3275.14	276.49	22772.33
15	75%	0.00001	0.0489	928.84	NA	NA	0.0689	0.0163	3272.95	276.49	23580.44
16	75%	0.00001	0.0479	910.34	NA	NA	0.0703	0.0160	3271.85	276.49	24542.07
17	100%	0.00001	0.0474	899.24	NA	NA	0.0712	0.0158	3271.85	276.49	25153.50
18	100%	0.00001	0.0466	884.44	NA	NA	0.0724	0.0156	3270.75	276.49	25994.85
19	100%	0.00001	0.0463	878.89	NA	NA	0.0728	0.0155	3267.46	276.49	26294.73
20	100%	0.00001	0.0457	867.78	NA	NA	0.0738	0.0153	3266.36	276.49	26963.26

Tabla A 41. Cálculo del coeficiente k Sargazo (MnD). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sin material (CP)**
Ensayo	1
Fecha	24/11/2025
Observaciones	Filtro sin núcleo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
5	25%	0.00005	0.1813	3441.53	NA	NA	0.0372	0.1212	987.48	329.16	246.59
6	25%	0.00005	0.1803	3423.03	NA	NA	0.0370	0.1192	987.48	329.16	250.43
7	25%	0.00005	0.1803	3423.03	NA	NA	0.0370	0.1192	987.48	329.16	250.43
8	25%	0.00005	0.1788	3395.27	NA	NA	0.0367	0.1164	987.48	329.16	256.30
9	50%	0.00012	0.4317	8196.76	4.5550	0.8764	0.0327	0.6038	1865.24	329.16	85.88
10	50%	0.00012	0.4274	8113.50	4.5550	0.8764	0.0328	0.5932	1865.24	329.16	88.79
11	50%	0.00012	0.4251	8070.94	4.5550	0.8764	0.0328	0.5879	1865.24	329.16	90.31
12	50%	0.00012	0.4229	8028.39	4.5550	0.8764	0.0329	0.5825	1865.24	329.16	91.86
13	75%	0.00016	0.5783	10979.59	4.5550	0.8764	0.0302	1.0023	2413.84	329.16	56.96
14	75%	0.00016	0.5761	10937.03	4.5550	0.8764	0.0303	0.9955	2413.84	329.16	57.80
15	75%	0.00016	0.5543	10524.42	4.5550	0.8764	0.0306	0.9311	2304.12	329.16	59.46
16	75%	0.00016	0.5672	10768.66	4.5550	0.8764	0.0304	0.9690	2304.12	329.16	54.49
17	100%	0.00018	0.6183	11738.21	4.5550	0.8764	0.0297	1.1259	2523.56	329.16	49.17
18	100%	0.00018	0.6160	11695.65	4.5550	0.8764	0.0297	1.1188	2523.56	329.16	49.90
19	100%	0.00017	0.6115	11610.54	4.5550	0.8764	0.0298	1.1046	2523.56	329.16	51.37
20	100%	0.00017	0.6072	11527.27	4.5550	0.8764	0.0299	1.0909	2523.56	329.16	52.85

Tabla A 42. Cálculo del coeficiente k para Sin material (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sin material (MnD)**
Ensayo	1
Fecha	04/12/2025
Observaciones	Filtro sin núcleo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
5	25%	0.00004	0.1287	2444.23	NA	NA	0.0288	0.0473	2571.84	284.17	2522.17
6	25%	0.00004	0.1250	2373.92	NA	NA	0.0288	0.0447	2600.36	284.17	2713.17
7	25%	0.00003	0.1222	2320.26	NA	NA	0.0290	0.0429	2617.92	283.08	2867.18
8	25%	0.00003	0.1199	2275.85	NA	NA	0.0281	0.0401	2631.09	283.08	3002.19
9	50%	0.00004	0.1355	2571.90	NA	NA	0.0291	0.0528	3000.84	284.17	2734.79
10	50%	0.00004	0.1331	2527.49	NA	NA	0.0289	0.0508	3003.04	284.17	2836.46
11	50%	0.00004	0.1296	2460.88	NA	NA	0.0288	0.0480	3006.33	284.17	2999.27
12	50%	0.00004	0.1271	2412.77	NA	NA	0.0288	0.0461	3010.72	284.17	3127.71
13	75%	0.00004	0.1274	2418.32	NA	NA	0.0288	0.0463	3041.44	284.17	3150.60
14	75%	0.00004	0.1247	2368.36	NA	NA	0.0288	0.0445	3045.83	284.17	3292.77
15	75%	0.00003	0.1225	2325.81	NA	NA	0.0290	0.0431	3050.22	284.17	3422.02
16	75%	0.00003	0.1208	2294.35	NA	NA	0.0279	0.0404	3055.70	284.17	3527.55
17	100%	0.00003	0.1200	2277.70	NA	NA	0.0281	0.0401	3061.19	284.17	3587.27
18	100%	0.00003	0.1175	2231.44	NA	NA	0.0287	0.0393	3066.67	284.17	3746.55
19	100%	0.00003	0.1156	2194.44	NA	NA	0.0292	0.0386	3074.35	284.17	3886.31
20	100%	0.00003	0.1138	2161.13	NA	NA	0.0296	0.0380	3078.74	284.17	4014.61

Tabla A 43. Cálculo del coeficiente k para Sin material (MnD). Fuente: elaboración propia.

CÁLCULO DEL COEFICIENTE k, CURVA SUAVIZADA

Material	**Fibra esponja (CP)**
Ensayo	1
Fecha	26/11/2025
Observaciones	2 g de esponja usados
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
1	25%	0.00004	0.1424	2702.80	NA	NA	0.0297	0.0597	2358.98	438.88	1691.66
2	50%	0.00005	0.1784	3386.62	NA	NA	0.0366	0.1155	3264.17	438.88	1606.18
3	75%	0.00005	0.1664	3159.82	NA	NA	0.0341	0.0936	3401.32	438.88	1958.56
4	100%	0.00004	0.1535	2913.74	NA	NA	0.0315	0.0734	3401.32	438.88	2320.14

Tabla A 44. Cálculo del coeficiente k suavizado para Fibra esponja (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Fibra esponja (MnD)**
Ensayo	1
Fecha	02/12/2025
Observaciones	2 g de esponja usados
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
1	25%	0.00005	0.1670	3170.00	NA	NA	0.0342	0.0945	2285.19	274.85	1269.37
2	50%	0.00006	0.2095	3978.11	NA	NA	0.0406	0.1769	2875.49	275.12	1035.23
3	75%	0.00006	0.2205	4185.34	4.555	0.8764	0.0396	0.1908	3014.28	277.32	985.27
4	100%	0.00006	0.2216	4206.62	4.555	0.8764	0.0395	0.1924	3023.06	277.59	978.10

Tabla A 45. Cálculo del coeficiente k suavizado para Fibra esponja (MnD). Fuente: elaboración propia.

Material	**Filtro para café (CP)**
Ensayo	1
Fecha	26/11/2025
Observaciones	Primer uso del filtro
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
1	25%	0.00005	0.1763	3346.70	NA	NA	0.0362	0.1114	2331.55	438.88	1053.20
2	50%	0.00006	0.2165	4110.87	4.555	0.8764	0.0398	0.1850	3154.45	438.88	1014.66
3	75%	0.00006	0.2046	3884.67	NA	NA	0.0405	0.1679	3291.60	438.88	1209.13
4	100%	0.00005	0.1896	3599.27	NA	NA	0.0387	0.1379	3291.60	438.88	1424.86

Tabla A 46. Cálculo del coeficiente k suavizado para Filtro para café (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Filtro para café (MnD)**
Ensayo	1
Fecha	02/12/2025
Observaciones	Primer uso del filtro
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
1	25%	0.00005	0.1598	3033.08	NA	NA	0.0327	0.0827	1888.83	287.47	1078.46
2	50%	0.00006	0.2276	4320.41	4.555	0.8764	0.0392	0.2014	2900.72	289.66	872.49
3	75%	0.00007	0.2292	4351.87	4.555	0.8764	0.0391	0.2039	3004.68	289.66	898.16
4	100%	0.00006	0.2254	4279.71	4.555	0.8764	0.0393	0.1981	3022.24	289.66	937.75

Tabla A 47. Cálculo del coeficiente k suavizado para Filtro para café (MnD). Fuente: elaboración propia.

Material	**Estropajo (CP)**
Ensayo	1
Fecha	21/11/2025
Observaciones	8 g de estropajo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
1	25%	0.00003	0.0881	1673.12	NA	NA	0.0383	0.0294	2880.15	329.16	6098.99
2	50%	0.00002	0.0818	1552.85	NA	NA	0.0412	0.0273	3483.61	329.16	8872.05
3	75%	0.00002	0.0562	1067.61	NA	NA	0.0599	0.0188	3511.04	329.16	18994.30
4	100%	0.00001	0.0388	735.95	NA	NA	0.0870	0.0130	3511.04	329.16	40048.10

Tabla A 48. Cálculo del coeficiente k suavizado para Estropajo 1 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Estropajo (CP)**
Ensayo	2
Fecha	24/11/2025
Observaciones	8 g de estropajo
Δt =	180 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
1	25%	0.00002	0.0548	1041.25	NA	NA	0.0615	0.0183	3401.32	329.16	19249.42
2	50%	0.00002	0.0554	1051.89	NA	NA	0.0608	0.0185	3511.04	329.16	19568.31
3	75%	0.00002	0.0547	1038.01	NA	NA	0.0617	0.0183	3511.04	329.16	20096.63
4	100%	0.00002	0.0538	1020.89	NA	NA	0.0627	0.0180	3483.61	329.16	20590.37

Tabla A 49. Cálculo del coeficiente k suavizado para Estropajo 2 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Estropajo (MnD)**
Ensayo	1
Fecha	04/12/2025
Observaciones	6 g de estropajo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
1	25%	0.00004	0.1452	2756.46	NA	NA	0.0301	0.0629	2375.16	286.64	1781.63
2	50%	0.00005	0.1758	3337.45	NA	NA	0.0361	0.1105	2873.84	288.56	1503.28
3	75%	0.00005	0.1725	3275.47	NA	NA	0.0354	0.1044	2926.51	288.56	1599.77
4	100%	0.00005	0.1662	3155.20	NA	NA	0.0340	0.0931	2985.21	287.47	1774.90

Tabla A 50. Cálculo del coeficiente k suavizado para Estropajo (MnD). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sargazo (CP)**
Ensayo	1
Fecha	12/11/2025
Observaciones	10 g de sargazo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
1	25%	0.00004	0.1332	2528.88	NA	NA	0.0289	0.0509	1206.92	356.59	748.67
2	50%	0.00013	0.4538	8616.31	4.555	0.8764	0.0322	0.6582	2002.39	-164.58	133.17
3	75%	0.00014	0.5006	9503.99	4.555	0.8764	0.0314	0.7801	2633.28	-246.87	156.25
4	100%	0.00013	0.4729	8977.58	4.555	0.8764	0.0319	0.7067	2825.29	-164.58	191.26

Tabla A 51. Cálculo del coeficiente k suavizado para Sargazo 1 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sargazo (CP)**
Ensayo	2
Fecha	12/11/2025
Observaciones	10 g de sargazo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
1	25%	0.00006	0.2209	4193.21	4.5550	0.8764	0.0396	0.1914	1453.79	438.88	282.56
2	50%	0.00010	0.3613	6859.47	4.555	0.8764	0.0343	0.4441	2550.99	356.59	246.46
3	75%	0.00011	0.3768	7153.66	4.555	0.8764	0.0339	0.4774	2962.44	411.45	271.72
4	100%	0.00010	0.3663	6953.83	4.555	0.8764	0.0342	0.4547	3044.73	438.88	298.98

Tabla A 52. Cálculo del coeficiente k suavizado para Sargazo 2 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sargazo (CP)**
Ensayo	3
Fecha	21/11/2025
Observaciones	10 g de sargazo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
1	25%	0.00005	0.1876	3562.26	NA	NA	0.0384	0.1340	1673.23	438.88	546.91
2	50%	0.00009	0.3005	5704.43	4.555	0.8764	0.0362	0.3236	2743.00	411.45	412.64
3	75%	0.00009	0.3024	5740.51	4.555	0.8764	0.0361	0.3271	3072.16	329.16	495.79
4	100%	0.00008	0.2915	5533.74	4.555	0.8764	0.0365	0.3072	3181.88	329.16	563.70

Tabla A 53. Cálculo del coeficiente k suavizado para Sargazo 3 (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sargazo (MnD)**
Ensayo	1
Fecha	02/12/2025
Observaciones	10 g de sargazo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
1	25%	0.00002	0.0556	1055.12	NA	NA	0.0607	0.0186	3201.08	277.32	17793.83
2	50%	0.00001	0.0524	994.53	NA	NA	0.0644	0.0175	3265.54	276.49	20506.80
3	75%	0.00001	0.0493	936.71	NA	NA	0.0683	0.0165	3274.32	276.49	23196.22
4	100%	0.00001	0.0465	882.59	NA	NA	0.0725	0.0155	3269.11	276.49	26089.18

Tabla A 54. Cálculo del coeficiente k suavizado para Sargazo (MnD). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sin material (CP)**
Ensayo	1
Fecha	24/11/2025
Observaciones	Filtro sin núcleo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
1	25%	0.00005	0.1802	3420.71	NA	NA	0.0370	0.1190	987.48	329.16	250.91
2	50%	0.00012	0.4268	8102.40	4.555	0.8764	0.0328	0.5918	1865.24	329.16	89.18
3	75%	0.00016	0.5690	10802.42	4.555	0.8764	0.0304	0.9743	2358.98	329.16	57.18
4	100%	0.00017	0.6133	11642.92	4.555	0.8764	0.0298	1.1100	2523.56	329.16	50.81

Tabla A 55. Cálculo del coeficiente k suavizado para Sin material (CP). Fuente: elaboración propia.

Material	**Sin material (MnD)**
Ensayo	1
Fecha	04/12/2025
Observaciones	Filtro sin núcleo
Δt =	120 [s]

i	Apertura de válvula	Q [m^3/s]	v [m/s]	Re	G	T	f	h_{f1-2} [m]	p_1 [kg/m^2]	p_2 [kg/m^2]	k_{filtro}
1	25%	0.00004	0.1240	2353.56	NA	NA	0.0289	0.0440	2605.30	283.63	2768.26
2	50%	0.00004	0.1313	2493.26	NA	NA	0.0288	0.0493	3005.23	284.17	2919.09
3	75%	0.00004	0.1239	2351.71	NA	NA	0.0289	0.0439	3048.30	284.17	3343.48
4	100%	0.00003	0.1167	2216.18	NA	NA	0.0289	0.0390	3070.24	284.17	3803.91

Tabla A 56. Cálculo del coeficiente k suavizado para Sin material (MnD). Fuente: elaboración propia.