



Universidad
Politécnica
de Cartagena



E.T.S. de Ingeniería de
Caminos, Canales y Puertos
y de Ingeniería de Minas

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS SISTEMAS DE TAMIZADO ESTÁTICOS DE FONDO TIPO COANDA

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Máster Universitario en Ciencia y Tecnología del Agua y del Terreno

Autora: Katherine Xiomara Guachamín Paladines

Director: Dr. Juan Tomás García Bermejo

Codirector: Dr. José María Carrillo Sánchez

Cartagena, septiembre 2022

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| AGRADECIMIENTOS..... | 1 |
| RESUMEN..... | 2 |
| ABSTRACT..... | 3 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 4 |
| 2. OBJETIVOS..... | 4 |
| 3. ESTADO DEL ARTE..... | 4 |
| 3.1. Efecto Coanda..... | 4 |
| 3.2. Tamices verticales basados en el efecto Coanda..... | 6 |
| 3.2.1. Wahl (1995)..... | 6 |
| 3.2.2. Wahl & Einhellig (2000)..... | 8 |
| 3.2.3. Wahl (2001)..... | 10 |
| 3.2.4. Wahl (2013)..... | 12 |
| 3.2.5. Buer & Selbig (2020)..... | 16 |
| 4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA..... | 19 |
| 4.1. Flujo Espacialmente Variado..... | 19 |
| 4.1.1. Flujo Espacialmente Variado con Caudales Decrecientes..... | 19 |
| 4.1.2. Ecuación dinámica para el Flujo Espacialmente Variado con Caudal Decreciente.... | 20 |
| 5. CRITERIOS DE DISEÑO..... | 22 |
| 5.1. Parámetros de diseño..... | 22 |
| 5.2. Capacidad de la pantalla – conceptos básicos..... | 22 |
| 5.3. Relación entre la inclinación de la pantalla y la altura de caída..... | 23 |
| 5.4. Efectos de los parámetros de diseño..... | 24 |
| 5.4.1. Altura de caída del plato de aceleración..... | 24 |
| 5.4.2. Pendiente de la pantalla..... | 26 |
| 5.4.3. Longitud de la pantalla..... | 26 |
| 5.4.4. Curvatura de la pantalla..... | 27 |
| 5.4.5. Propiedades de la pantalla..... | 28 |
| 5.4.6. Flujo de derivación..... | 29 |
| 6. SOFTWARE DE ANÁLISIS DE PANTALLA DE EFECTO COANDA..... | 30 |

| | | |
|--------|---|----|
| 7. | MATERIALES Y MÉTODOS..... | 32 |
| 7.1. | Modelo físico..... | 32 |
| 7.2. | Campaña experimental..... | 35 |
| 7.2.1. | Perfil del flujo | 36 |
| 7.2.2. | Velocidad del flujo en la pantalla..... | 36 |
| 7.2.3. | Software de análisis de pantalla de efecto Coanda | 37 |
| 8. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 39 |
| 8.1. | Perfiles de flujo | 39 |
| 8.2. | Velocidad del flujo..... | 43 |
| 8.3. | Longitud mojada | 45 |
| 8.4. | Coeficientes de descarga | 46 |
| 9. | CONCLUSIONES | 50 |
| 10. | BIBLIOGRAFÍA..... | 51 |
| | ANEXO | 52 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Representación del efecto Coanda en una pelota | 5 |
| Figura 2: Reja auto limpiante basada en el efecto Coanda..... | 5 |
| Figura 3: Vista a detalle de los parámetros de las barras de una pantalla de efecto Coanda..... | 6 |
| Figura 4: Esquema de la instalación experimental laboratorio de hidráulica de la Bureau of Reclamation en el año 2001 | 11 |
| Figura 5: Instalación experimental laboratorio de hidráulica de la Bureau of Reclamation en el año 2013..... | 12 |
| Figura 6: Resultados para las pantallas A y B ensayadas en tres ubicaciones diferentes, evaluando los resultados del coeficiente de C_{cv} observados y predichos. | 13 |
| Figura 7: Flujo idealizado acercándose a la abertura de una ranura en una pantalla de efecto Coanda | 14 |
| Figura 8: Resultados para las pantallas A y B ensayadas en tres ubicaciones diferentes, evaluando los resultados del coeficiente de C_{cv} observados y predichos. | 14 |
| Figura 9: Comparación de perfiles de flujo en un estructura hipotética utilizando la ecuación antigua de Wahl (2001) y la nueva (2013)..... | 16 |
| Figura 10: Esquema de bóveda de depuración de aguas pluviales con pantalla de efecto Coanda | 17 |
| Figura 11: Distribución geométrica de áreas de fuentes impermeables que drenan a la bóveda de tratamiento de aguas pluviales con una pantalla de efecto Coanda y un sumidero en la cuenca de estudio | 18 |
| Figura 12: Flujo sobre una reja de fondo | 20 |
| Figura 13: Formas de cresta conopial para diferentes caudales de diseño | 23 |
| Figura 14: Parámetros de diseño para platos de aceleración de cresta conopial | 24 |
| Figura 15: Efecto de la altura de caída del plato de aceleración en la descarga a través de la pantalla | 25 |
| Figura 16: Efecto de la pendiente de la pantalla en la descarga a través de la misma | 26 |
| Figura 17: Efecto de la longitud de la pantalla en la descarga a través de la misma | 27 |
| Figura 18: Efecto de la curvatura de la pantalla en la descarga a través de la misma | 28 |
| Figura 19: Efecto del ancho de la ranura entre barras de la pantalla en la descarga a través de la misma | 29 |
| Figura 20: Efecto del flujo de derivación en la descarga a través de la pantalla | 30 |
| Figura 21: Interfaz del Software de análisis de pantalla de efecto Coanda..... | 31 |
| Figura 22: Detalle de las principales características de la instalación experimental | 34 |

| | |
|--|----|
| Figura 23: Detalle de los puntos en los que se realiza la toma de datos | 37 |
| Figura 24: Ingreso de datos en la primera ventana de Estructura de la pantalla | 38 |
| Figura 25: Ingreso de datos característicos del plato de aceleración | 38 |
| Figura 26: Ingreso de datos característicos de la pantalla | 38 |
| Figura 27: Ingreso de datos de las características del flujo | 39 |
| Figura 28: Ingreso de datos de las características del flujo | 39 |
| Figura 29: Perfiles de la lámina de flujo para la reja H1 con los cuatro caudales ensayados | 40 |
| Figura 30: Perfiles de la lámina de flujo para la reja H1 ensayada con el caudal Q1, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda..... | 41 |
| Figura 31: Perfiles de la lámina de flujo para la reja H2 ensayada con el caudal Q2, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda..... | 41 |
| Figura 32: Perfiles de la lámina de flujo para la reja H3 ensayada con el caudal Q3, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda..... | 42 |
| Figura 33: Perfiles de la lámina de flujo para la reja H4 ensayada con el caudal Q4, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda..... | 42 |
| Figura 34: Perfiles de la lámina de flujo para la reja N&D ensayada con el caudal Q4, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda..... | 43 |
| Figura 35: Velocidades para la reja H1 ensayada con el caudal Q4, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda | 44 |
| Figura 36: Velocidades para la reja H3 ensayada con el caudal Q4, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda | 44 |
| Figura 37: Velocidades para la reja N&D ensayada con el caudal Q4, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda | 44 |
| Figura 38: Longitud mojada, resultados experimentales y modelados | 45 |
| Figura 39: Resultados de coeficientes de descarga de las pruebas experimentales en la Reja H1 . | 47 |
| Figura 40: Resultados de coeficientes de descarga de las pruebas experimentales en la Reja H2 . | 47 |
| Figura 41: Resultados de coeficientes de descarga de las pruebas experimentales en la Reja H3 . | 48 |
| Figura 42: Resultados de coeficientes de descarga de las pruebas experimentales en la Reja H4 . | 48 |
| Figura 43: Resultados de coeficientes de descarga de las pruebas experimentales en la Reja N&D | 49 |
| Figura 44: Esquema de los parámetros que influyen en la obtención del coeficiente de descarga de una reja con efecto Coanda | 50 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Configuración de las pantallas ensayadas | 7 |
| Tabla 2: Capacidad de las pantallas con flujo de derivación cero | 8 |
| Tabla 3: Propiedades y características de las pantallas ensayadas | 11 |
| Tabla 4: Propiedades y características de las pantallas ensayadas | 13 |
| Tabla 5: Propiedades y características de las pantallas ensayadas | 15 |
| Tabla 6: Dimensiones de las pantallas tipo Coanda..... | 34 |
| Tabla 7: Plan de pruebas a ejecutarse en la instalación experimental | 36 |
| Tabla 8: Longitud mojada, resultados experimentales y modelados | 45 |

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

| | |
|---|----|
| Fotografía 1: Instalación experimental Laboratorio de Hidráulica UPCT | 33 |
| Fotografía 2: Perfil conopial tipo Ogee de la instalación experimental | 35 |
| Fotografía 3: Ubicación de la reja en la instalación experimental | 35 |
| Fotografía 4: Pantalla H3 con caudal de prueba Q3, delimitación de las fluctuaciones de la longitud mojada | 46 |

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a la Fundación Carolina y a la Universidad Politécnica de Cartagena por confiar en mí y por otorgarme la beca que me ha permitido realizar mis estudios en éste Máster.

En segundo lugar, quiero agradecer a mi director y codirector de Trabajo de Fin de Máster el Dr. Juan Tomás García Bermejo y el Dr. José María Carrillo Sánchez, respectivamente, por su ayuda en la realización de este trabajo. Además, por todas sus enseñanzas como profesionales y como educadores.

Y, por último, pero no menos importante a mi familia, gracias por su amor incondicional, su apoyo y por no dejar de creer en mí.

RESUMEN

Con base a la legislación española y europea, los desbordamientos durante los episodios de escorrentía de la red de alcantarillado combinado deben estar equipados con elementos de tamizado para evitar el vertido de, al menos, sólidos gruesos y flotantes en las aguas receptoras. Es frecuente adoptar la norma de 6 mm de cribado para las zonas sensibles, como las zonas de aseo. Estos requisitos exigen la provisión de numerosos sistemas de tamizado y tratamiento de residuos, a menudo en lugares aislados, sin suministro eléctrico, en servicios con tarifas bajas y con personal de mantenimiento limitado.

Se observan importantes deficiencias en estas estructuras durante el tamizado de las aguas pluviales, sufriendo problemas de obstrucción y quedando inoperativas, debido a un diseño en el que se desconoce la carga de sólidos, la pérdida de carga hidráulica, la periodicidad de limpieza requerida, así como el comportamiento de estos sistemas en general. Además, se requieren dispositivos estáticos y no automáticos en zonas de difícil acceso, aisladas, sin posibilidad de suministro eléctrico y que no requieran de un mantenimiento intensivo para cumplir con la normativa vigente.

En el presente trabajo se trata de caracterizar los tamices de fondo con efecto Coanda para un caso concreto que permita mejorar el conocimiento requerido para reducir los contaminantes emitidos al medio receptor durante los desbordamientos de los sistemas de saneamiento.

ABSTRACT

Based on Spanish and European legislation, the overflows during runoff episodes of the combined sewerage network must be equipped with screening elements to prevent the discharge of, at least, coarse and floating solids into the receiving waters. It is common to adopt the 6 mm screening standard for sensitive areas, such as toilet areas. These requirements call for the provision of numerous waste screening and treatment systems, often in isolated locations, without power supply, at low tariff services and with limited maintenance staff.

Significant deficiencies are observed in these structures during the screening of rainwater, suffering from obstruction problems and becoming inoperative, due to a design in which the load of solids, the loss of hydraulic load, and the periodicity of cleaning required, as well as the behavior of these systems in general. In addition, static and non-automatic devices are required in areas that are difficult to access, isolated, without the possibility of electricity supply and that do not require intensive maintenance to comply with current regulations.

In the present work, the aim is to characterize the bottom sieves with the Coanda effect for a specific case that allows improving the knowledge required to reduce the pollutants emitted to the receiving environment during the overflows of the sanitation systems.

1. INTRODUCCIÓN

Mejorar la calidad de las aguas pluviales provenientes de la escorrentía urbana en áreas pavimentadas es una de las principales preocupaciones establecidas en la directiva de tratamiento de aguas residuales urbanas de la Unión Europea (UE) (91/271/EEC). Entre los principales procesos y principios utilizados para la remoción de contaminantes en aguas pluviales, el cribado es una de las técnicas más adecuadas, siendo el cribado con pantallas de efecto Coanda uno de los que ofrece notables ventajas desde el punto de vista de su baja capacidad de taponamiento y su alto grado de separación de sólidos, alcanzando tamaños de separación de hasta 0,3 mm.

Varias campañas experimentales han estudiado el comportamiento de las pantallas de efecto Coanda en bocatomas, principalmente con agua clara, es decir, sin la influencia de sedimentos (Wahl, 2001, 2013). Esos estudios consideraron diferentes caudales de entrada, pendientes de la pantalla y variación de las características de la pantalla, por ejemplo, perfil de barra, ancho de barra, ángulo de inclinación, separación, entre otros.

La adaptación de las pantallas de efecto Coanda para minimizar el vertido de contaminantes, podría ofrecer una alta eficiencia en cuanto a la retención de sedimentos y contaminantes sin necesidad de piezas móviles ni labores intensivas de mantenimiento. Las cribas finas de tambor rotatorio se utilizan hoy en día con mayor frecuencia para este fin, aunque estos sistemas necesitan partes móviles y suministro eléctrico. El cribado estático basado en Coanda puede resultar en un diseño óptimo considerando sus requerimientos mínimos (una caída de altura moderada), en comparación con otros sistemas que necesitan mayor asistencia y mantenimiento.

Por lo tanto, al ser necesarios más estudios experimentales para una mejor comprensión del comportamiento y optimización de estos sistemas para ayudar a la propagación de su uso por ejemplo en las redes de alcantarillado, reflejan la justificación de realizar el presente estudio.

2. OBJETIVOS

- Estudiar el estado del arte de los tamices verticales basados en el efecto Coanda.
- Enunciar las ecuaciones de Flujo Espacialmente Variado con Caudales Decrecientes que permiten el cálculo de los caudales derivados por dichos tamices.
- Realizar pruebas experimentales en el dispositivo hidráulico existente en el laboratorio de hidráulica de la UPCT.
- Analizar y comparar los resultados de la campaña experimental realizada en el laboratorio, con los recogidos en la hoja de cálculo publicada por Wahl (2001, 2013).

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. Efecto Coanda

El efecto Coanda descubierto en 1910 por Henri Coandă (1885-1972) es un fenómeno físico en el cual un fluido en movimiento tiende a ser atraído por una superficie cercana a su trayectoria. A diferencia

de los sólidos los fluidos tienden a seguir la trayectoria de la superficie con la que entran en contacto como se observa en la **Figura 1**.

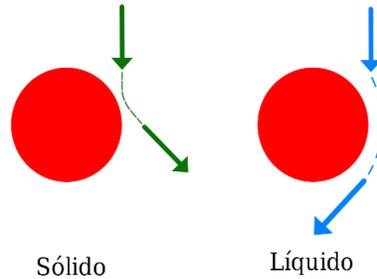


Figura 1: Representación del efecto Coanda en una pelota
Fuente: (https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Coanda, 2022)

A este efecto se le ha dado uso en diversas aplicaciones, entre las que destacan la relacionada al presente trabajo y es que hoy en día varios proyectos hidráulicos plantean el uso de rejillas auto limpiantes basadas en este efecto Coanda, las cuales consisten en la disposición de una rejilla inclinada que cuenta con un grupo de barras laminadas ubicadas transversalmente al flujo de agua y que poseen separaciones milimétricas entre ellas. El agua circula primero por un plato de aceleración y aguas abajo del mismo el agua es succionada por la rejilla, permitiendo que las partículas sólidas que circulan con el agua se queden por encima de ella, filtrando así de cierta manera el flujo (Espinoza Llanos, 2017).

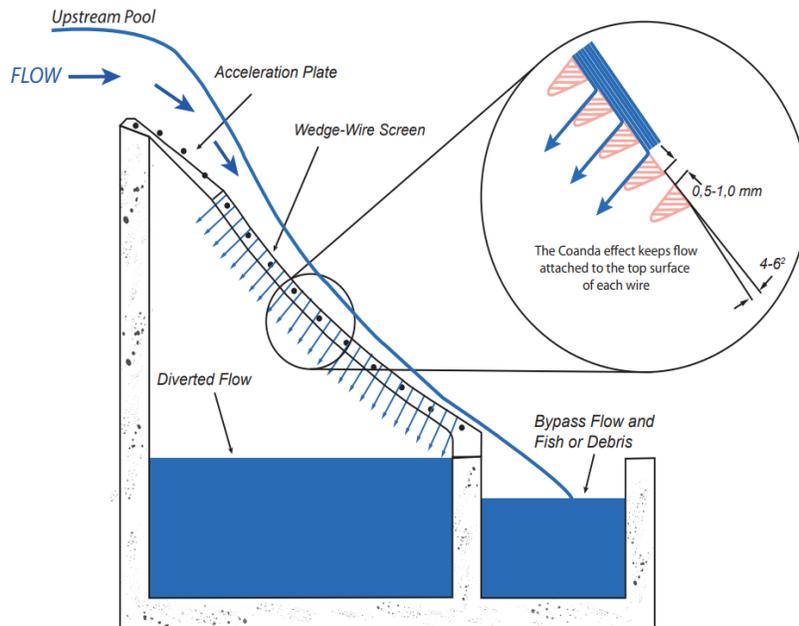


Figura 2: Reja auto limpiante basada en el efecto Coanda
Fuente: (Espinoza Llanos, 2017)

Plan de pruebas:

En las instalaciones del laboratorio, Wahl evaluó en un canal de 30,5 cm de ancho dos pantallas cóncavas fabricadas de acero inoxidable, con 3 diferentes configuraciones, como se indica en la **Tabla 1**. Ambas pantallas se construyeron con un radio de 254 cm, lo que dio como resultado una longitud total de pantalla de 1,11 metros en la dirección de movimiento del flujo.

Tabla 1: Configuración de las pantallas ensayadas

Fuente: (Wahl, Hydraulic Testing of Static Self-Cleaning Inclined Screens, 1995)

| Prueba | Tipo de pantalla | Dimensiones |
|--------|-------------------|---|
| A | Barras inclinadas | Caudal de diseño 0,116 m ³ /s/m |
| | | Altura de caída al inicio de la pantalla 0,366 m |
| B | Barras planas | Ángulo de inclinación con respecto a la horizontal de 60° |
| C | Barras inclinadas | Caudal de diseño 0,372 m ³ /s/m |
| | | Altura de caída al inicio de la pantalla 0,249 m |
| | | Ángulo de inclinación con respecto a la horizontal de 50° |

En todas las configuraciones las barras tenían forma de V, con dimensiones de ancho de 1,52 mm y espacio libre entre barras de 1 mm, en la pantalla A y C las barras poseían un ángulo de inclinación de 5° y las de la pantalla B no tuvieron ángulo de inclinación, esta última configuración se evaluó debido a que se consideraba la posibilidad de que fuera un diseño preferible en cuanto a su uso en aplicaciones relacionadas con el paso de peces, sin embargo, esta pantalla no aprovecha el efecto Coanda.

Resultados:

En un principio todas las pantallas fueron probadas ocupando toda su longitud para permitir el paso del flujo, pero se hizo evidente que en las pantallas A y C tenían mayor capacidad debido a que para el caudal de diseño previsto, era mucho menor la longitud mojada que se necesitaba para captar todo el caudal que circulaba por las mismas. En el caso de la pantalla con configuración A, para el caudal más grande que se probó (ver **Tabla 2**) jamás se logró tener toda la longitud de la pantalla mojada, por lo que mediante extrapolación de los caudales más bajos se sugiere que para una capacidad de aproximadamente 0,37 m³/s/m se llegaría a ocupar prácticamente toda la longitud de la pantalla, es decir, 1,086 metros de largo.

Las pantallas con configuración A y C tienen capacidades mucho mayores en comparación con la que usa la configuración B, siendo la pantalla de configuración A la que tuvo la capacidad más alta, esto debido a que su ángulo de inclinación y la altura de caída a la reja son mayores con respecto a la C.

Tabla 2: Capacidad de las pantallas con flujo de derivación cero
Fuente: (Wahl, Hydraulic Testing of Static Self-Cleaning Inclined Screens, 1995)

| Prueba | Longitud pantalla (m) | Flujo captado con flujo de derivación cero (m ³ /s/m) |
|--------|-----------------------|--|
| A | 0,457 | 0,116 |
| | 0,787 | 0,260 |
| B | 1,086 | 0,048 |
| C | 0,457 | 0,106 |
| | 1,086 | 0,334 |

3.2.2. Wahl & Einhellig (2000)

En este estudio se describe la mecánica del flujo que circula sobre y a través de las pantallas de efecto Coanda y presenta un cálculo numérico que de cierta manera sirve para predecir la capacidad de las mismas. Se presenta a la vez un modelo que evalúa los coeficientes de descarga para pantallas de efecto Coanda con barras inclinadas y demuestra que esos coeficientes son una función única del número de Froude y de la geometría de la pantalla.

Cálculo numérico para estimar la capacidad de la pantalla:

El flujo que circula por la superficie y a través de una pantalla de efecto Coanda se puede obtener utilizando la ecuación de energía para flujo espacialmente variado con descarga decreciente (Chow, 1959). Dado que el flujo es supercrítico, los cálculos comienzan en la parte inicial de la pantalla y continúan en la dirección aguas abajo. El cálculo se simplifica por el hecho de que el flujo sobre una pantalla de efecto Coanda no tiene fricción, ya que la pantalla elimina continuamente la capa límite del fondo de la columna de agua. Se obtuvo que:

El caudal unitario que circula a través de las ranuras de la pantalla se calcula a partir de la relación (Ver **Figura 3:** Vista a detalle de los parámetros de las barras de una pantalla de efecto Coanda):

$$q = C_{d,Total} (t + y_{off}) \sqrt{2gE}$$

$$y_{off} = w \sin \phi \cos \phi + t \sin \phi$$

O aproximadamente para ángulos de inclinación pequeños ($\Phi \leq 8^\circ$):

$$y_{off} = (w + t) \phi$$

Donde:

E: es la energía específica del flujo $E = D \cos \theta + V^2/2g$, D: es la profundidad del flujo (medida perpendicularmente a la superficie de la pantalla), V: es la velocidad del flujo, θ : es el ángulo de inclinación de la pantalla y g: es la aceleración de la gravedad

$C_{d,Total}$: es un coeficiente de descarga para las ranuras de la pantalla

t : es el ancho de la ranura entre barras

y_{off} : es la altura que se crea por la inclinación de la barra

w : es el ancho de la barra

ϕ : es el ángulo de inclinación de la barra

Cálculo numérico para estimar el coeficiente de descarga de la pantalla:

Para la estimación del coeficiente de descarga de la pantalla Wahl realizó varias consideraciones, entre ellas que, si se tiene un flujo altamente supercrítico ($Fr \gg 1$), el agua pasará por las ranuras debido principalmente al corte de las capas delgadas del flujo de la zona inferior. Con lo que la tasa de flujo por unidad de ancho que pasa a través de la pantalla debe ser proporcional a las pérdidas por corte y a la velocidad con la que circula el mismo. Teniendo entonces que:

$$q_{sh} = C_{d,v}(y_{off} \times V)$$

Donde:

$C_{d,v}$: es un coeficiente de descarga que puede variar en función de diversos parámetros con respecto a la geometría de la pantalla.

V : es la velocidad del flujo

Otra consideración que tuvo es que, en el caso de tener un flujo subcrítico ($Fr \ll 1$) el agua circula a través de las ranuras de la pantalla de manera a como si lo hiciera por un orificio. Con lo que obtuvo que la tasa de flujo en este caso es una función de la profundidad del flujo sobre la superficie de la pantalla, el ancho de las ranuras y un coeficiente de descarga.

$$q_o = C_{d,D}(t\sqrt{2gD\cos\theta})$$

En el caso que se tiene un flujo intermedio (Fr muy cercanos a 1), la descarga a través de la pantalla debe ser una combinación de las descargas que surgen por la acción de corte y del comportamiento orificio, obteniendo:

$$q = C_{d,v}(y_{off} V) + C_{d,D}(t\sqrt{2gD\cos\theta})$$

Donde:

D : es la profundidad del flujo (medida perpendicularmente a la superficie de la pantalla)

Para poder formular lo anterior en términos de coeficiente de descarga total se obtuvo la siguiente expresión:

$$C_{d,Total} = \frac{C_{d,D}t\sqrt{\frac{2}{2+Fr^2}} + C_{d,V}y_{off}\sqrt{\frac{2}{2+Fr^2}}}{t + y_{off}}$$

Wahl además evidenció que las diferencias en cuanto al rendimiento de la pantalla con las variaciones de la porosidad eran más notorias con números de Froude bajos. Al contrario de lo que ocurre con números de Froude altos en los que poca o nada afecta el ancho de la barra o de la ranura existente entre ellas, sin embargo, el ángulo de inclinación de las barras en ese caso si tiene un efecto muy importante.

3.2.3. Wahl (2001)

Wahl (2001) presentó un modelo computacional con base teórica que permite predecir la eficiencia hidráulica de las pantallas de efecto Coanda, a fin de que diseñadores de este tipo de estructuras hidráulicas posean una herramienta que permita dimensionar y evaluar diversas alternativas de diseño.

Realizó su investigación en el laboratorio de hidráulica de la Bureau of Reclamation en el cual desarrolló métodos para calcular la eficiencia hidráulica de las pantallas, relacionando la capacidad de la misma con los números de Froude, Reynolds y Weber del flujo. Además, obtuvo una ecuación de descarga para el flujo a través de cada ranura de una pantalla de efecto Coanda.

$$\Delta q = C_{cv} C_{Fr} s' \sqrt{2gE}$$

Donde:

Δq : es la descarga a través de las ranuras por unidad de ancho de la pantalla

C_{Fr} : es un coeficiente en función de la geometría de la pantalla y el número de Froude del flujo

s' : es el ancho de la ranura entre barras

E : es la energía específica del flujo

C_{cv} : es un coeficiente de calibración que tiene en cuenta los efectos de la contracción del flujo a través de las ranuras, la distribución no uniforme de la velocidad y otros efectos reales del flujo.

Plan de pruebas:

Las principales características y propiedades de la instalación de prueba y de las pantallas se indican en la figura y tabla X.

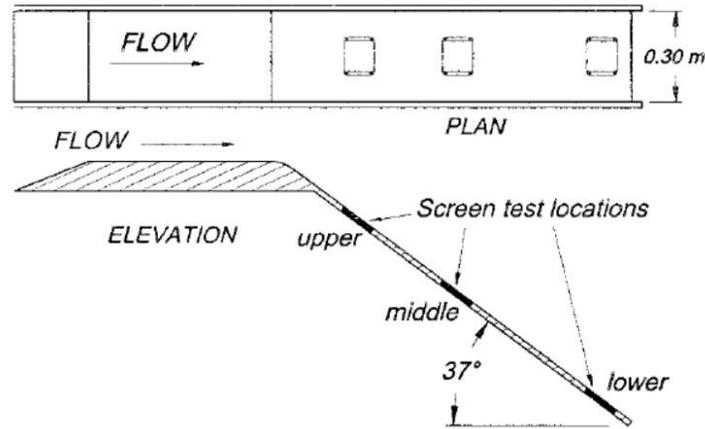


Figura 4: Esquema de la instalación experimental laboratorio de hidráulica de la Bureau of Reclamation en el año 2001

Fuente: (Wahl, Hydraulic Performance of Coanda-Effect Screens, 2001)

Tabla 3: Propiedades y características de las pantallas ensayadas

Fuente: (Wahl, Hydraulic Performance of Coanda-Effect Screens, 2001)

| Pantalla | Descripción | Ancho de la barra | Ancho de la ranura | Ángulo de inclinación | Porosidad |
|----------|------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|-------------|
| | | w (mm) | s (mm) | Φ (°) | s / (s + w) |
| 1 | 7,7 cm x 9,2 cm | 2,390 | 1,021 | 3,82 | 0,299 |
| 2 | 10,4 cm x 7,2 cm | 1,549 | 0,993 | 3,37 | 0,390 |
| 3 | 7,4 cm x 8,7 cm | 1,496 | 0,467 | 6,88 | 0,238 |

Con base a pruebas realizadas en tres pantallas con geometrías de barras diferentes, Wahl desarrolló una ecuación que relaciona el coeficiente de la pantalla C_{cv} con los números de Froude, Reynolds y Weber del flujo.

$$C_{cv} = f(F_r, R_e, W_e)$$

$$C_{cv} = 0,21 + 0,0109 \left(\frac{R_e}{W_e} \right) + 0,00803(F_r)$$

Al implementar las ecuaciones obtenidas en su estudio experimental, Wahl logró desarrollar un modelo en un programa computacional. Éste modelo numérico predice los perfiles de profundidad y velocidad a través de una pantalla de efecto Coanda usando la ecuación para flujo espacialmente variado con descarga decreciente, como se mencionó anteriormente. Además del perfil de flujo, el modelo predice el flujo total a través de la superficie de la pantalla, el desbordamiento de la base de la pantalla y la longitud mojada de la pantalla cuando no hay desbordamiento.

Siendo así posible la obtención de un modelo que proporciona a los diseñadores una herramienta que se puede utilizar para estimar con precisión la capacidad de la pantalla y desarrollar estructuras de pantalla económicas para una variedad de objetivos y condiciones del sitio.

3.2.4. Wahl (2013)

Wahl (2013) estudia en una instalación similar conceptualmente a la utilizada por el en 2001, pero que posee mayor flexibilidad para realizar pruebas en una amplia gama de condiciones de flujo. La **Figura 5** muestra los principales componentes de la instalación de prueba que puede ser evaluada con caudales de hasta 442 l/min y con ángulos de inclinación de la pantalla con respecto a la horizontal de 15 y 30°. Sin embargo, las pruebas realizadas con el ángulo de inclinación de 30° fueron realizadas a modo de calibración.



Figura 5: Instalación experimental laboratorio de hidráulica de la Bureau of Reclamation en el año 2013
Fuente: (Wahl, New Testing of Coanda-Effect Screen Capacities, 2013)

Plan de pruebas:

Wahl evalúa 6 pantallas, sus principales dimensiones y características se indican en la **Tabla 4**. Las pantallas #1 y #3 fueron estudiadas en el 2001, pero se volvieron a probar en esta nueva instalación experimental.

Tabla 4: Propiedades y características de las pantallas ensayadas
Fuente: (Wahl, New Testing of Coanda-Effect Screen Capacities, 2013)

| Pantalla | A-5 | A-8 | B-1 | B-2 | #1 | #2 |
|--|---------|---------|----------|----------|---------|----------|
| Ángulo de alivio, λ (°) | 10 | 10 | 13 | 13 | 17,5 | 11 |
| Ángulo de inclinación (°) | 5,6 | 6,9 | 4,3 | 6,5 | 3,82 | 6,88 |
| Ancho de la abertura, s (mm) | 1,99 | 1,96 | 2,05 | 2,05 | 1,02 | 0,47 |
| Ancho de la barra, w (mm) | 4,72 | 4,74 | 4,60 | 4,62 | 2,39 | 1,50 |
| Ancho (pulg) | 3 | 3 | 3,5 | 3,5 | 3,66 | 3,44 |
| Longitud (pulg) | 3,125 | 3,125 | 3,5 | 3,5 | 3 | 2,875 |
| Espacio entre barras de soporte (pulg) | 2,125 | 2,125 | 2 | 2,0625 | 2,75 | 0,53125 |
| | 3/8" | 3/8" | 1/4" | 1/4" | 3/8" | 1/8" |
| Barras de soporte | Redonda | Redonda | Cuadrada | Cuadrada | Redonda | Cuadrada |

Las pantallas se ensayaron en tres ubicaciones del canal (superior, media e inferior), lo que permitió evaluar diferentes rangos de profundidades, velocidades y números de Froude. En cada ubicación se realizó pruebas para al menos 3 diferentes caudales dependiendo de la capacidad de la bomba que abastecía a la instalación.

Resultados:

Inicialmente los resultados obtenidos en estas pruebas se usaron para calcular los valores de C_{cv} y compararlos con los predichos con Wahl en 2001, de esta manera se puede evaluar la precisión de esa ecuación para predecir el rendimiento de la pantalla.

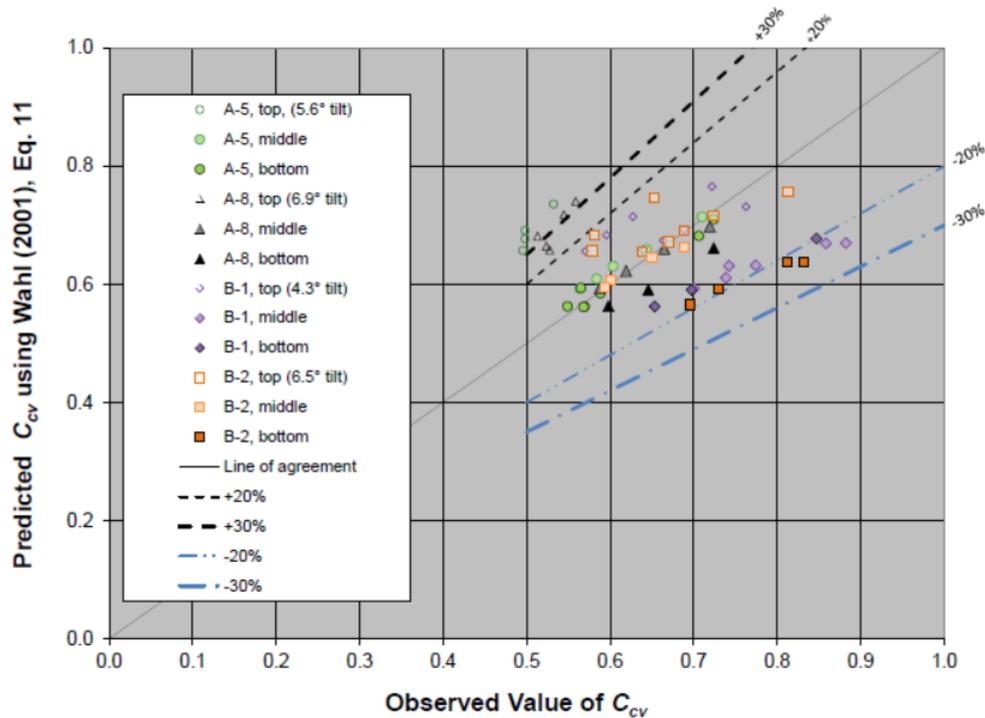


Figura 6: Resultados para las pantallas A y B ensayadas en tres ubicaciones diferentes, evaluando los resultados del coeficiente de C_{cv} observados y predichos.

Fuente: (Wahl, New Testing of Coanda-Effect Screen Capacities, 2013)

En la **Figura 6** se observa que la ecuación de Wahl (2001) se ajusta bastante bien en algunos casos, pero que también conlleva a tener errores de hasta +/- 30% para otras condiciones de flujo, usando la misma pantalla de efecto Coanda. Por lo que, con base a estos resultados Wahl en el 2013 determinó que era necesario un nuevo modelo predictivo para determinar los coeficientes de pantalla C_{cv} pero que en esta ocasión únicamente se relacione con parámetros específicos del flujo o geometría de la pantalla, encontrando que la mejor relación corresponde a el ángulo resultante de $\delta + \psi$ que se indica en la siguiente figura:

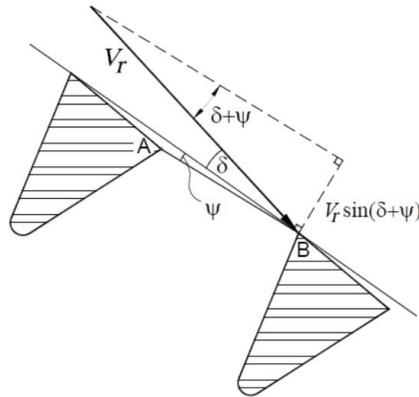


Figura 7: Flujo idealizado acercándose a la abertura de una ranura en una pantalla de efecto Coanda
Fuente: (Wahl, New Testing of Coanda-Effect Screen Capacities, 2013)

Los resultados obtenidos por Wahl (2013) se muestran en la figura y tabla siguientes:

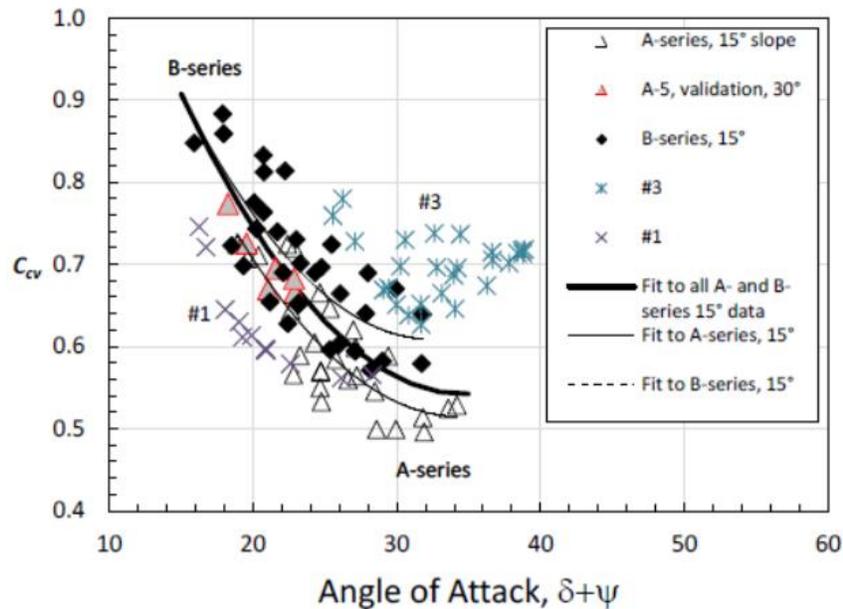


Figura 8: Resultados para las pantallas A y B ensayadas en tres ubicaciones diferentes, evaluando los resultados del coeficiente de C_{cv} observados y predichos.

Fuente: (Wahl, New Testing of Coanda-Effect Screen Capacities, 2013)

Tabla 5: Propiedades y características de las pantallas ensayadas
Fuente: (Wahl, New Testing of Coanda-Effect Screen Capacities, 2013)

| Parameters of $C_{cv}=m_2(\delta+\psi)^2+m_1(\delta+\psi)+b$ | | | | Range of supporting data | | |
|---|----------|---------|-------|--------------------------|------------|-------------|
| Screens | m_2 | m_1 | b | $\delta+\psi$ | Fr | V , m/s |
| A-5 and A-8 | 0.000933 | -0.0641 | 1.615 | 19° – 34° | 12.8 – 4.0 | 1.6 – 2.54 |
| B-1 and B-2 | 0.000990 | -0.0641 | 1.648 | 16° – 32° | 12.3 – 4.1 | 1.56 – 2.55 |
| A-5, A-8, B-1 and B-2 | 0.000945 | -0.0655 | 1.678 | 16° – 34° | 12.8 – 4.0 | 1.56 – 2.55 |
| Validation data set, A-5 on 30° slope, bottom position | | | | 18° – 23° | 14.2 – 7.8 | 2.34 – 2.69 |
| A-5 and A-8, including validation data | 0.000965 | -0.0665 | 1.657 | 18° – 34° | 14.2 – 4.0 | 1.6 – 2.69 |
| All data from A- and B-series screens (including validation data) | 0.000906 | -0.0631 | 1.642 | 16° – 34° | 14.2 – 4.0 | 1.56 – 2.69 |
| #1 | 0.002283 | -0.1148 | 1.995 | 16° – 28° | 10.7 – 4.0 | 1.63 – 2.53 |
| #3 | 0.001493 | -0.0986 | 2.301 | 16° – 34° | 13.8 – 4.1 | 1.57 – 2.53 |

Con estas nuevas relaciones se tiene una amplia gama de condiciones de flujo para una misma pantalla, al tiempo que reconoce que cada tipo de barra puede exhibir una curva de rendimiento única. Con las ecuaciones obtenidas en la **Tabla 5** se ejecutó una nueva versión del software Coanda, que proporciona al usuario la facilidad de que viene con una ecuación para C_{cv} predeterminada basada en ensayos de una variedad de pantallas y también ofrece la opción de ingresar los valores de m_1 , m_2 y b en el caso de evaluar una pantalla con características específicas.

Si se compara el estudio realizado por Wahl en el 2001 con el realizado en el 2013, resulta que la fuente de los errores de la ecuación antigua es la dependencia a los números de Reynolds y Weber, cuya relación está inversamente relacionada con la velocidad ($R_e/W_e = v^{-1}$). Además, de que en ese estudio se cubrió un rango pequeño de los valores de esos parámetros adimensionales y debido a esto se evidenció que la relación existente con R_e y W_e no continúa cuando se amplían los rangos de cada uno. En cambio, en el nuevo estudio se demostró que el rendimiento de la pantalla no era sensible a R_e y W_e , sino que más bien estaba relacionado con el ángulo que forma el flujo con la pantalla ($\delta + \psi$) y éste último resulta ser una función del número de Froude, por lo que la dependencia que tenía la anterior ecuación con el número de Froude si era adecuada.

La manera más práctica de evaluar las diferencias entre el método antiguo y nuevo se muestran en la **Figura 9**, en la cual se comparan los perfiles del flujo obtenidos en los dos estudios. Teniendo como resultado que los perfiles de velocidad son prácticamente idénticos, que en la parte superior de la pantalla las curvas de profundidad y descarga obtenidas en los dos métodos producen resultados similares. Sin embargo, a medida que aumenta la velocidad en la parte inferior de la pantalla, la antigua ecuación predice que la eficiencia de la pantalla disminuye lo que hace que la pendiente de la curva de descarga se aplane; en cambio, con la nueva ecuación se demuestra que la eficacia en la parte inferior de la pantalla sigue siendo casi la misma que la de la parte superior y la descarga a lo largo de la pantalla aumenta casi de forma lineal.

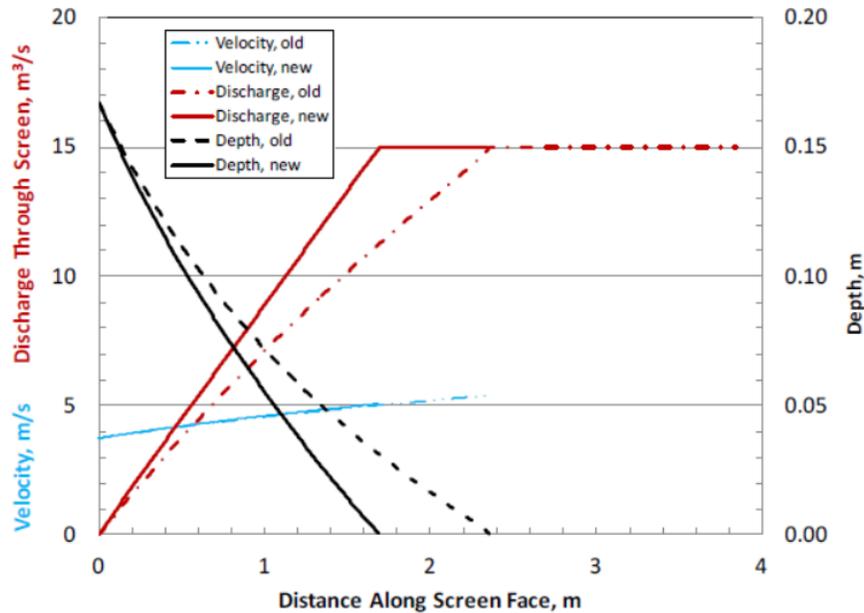


Figura 9: Comparación de perfiles de flujo en un estructura hipotética utilizando la ecuación antigua de Wahl (2001) y la nueva (2013)

Fuente: (Wahl, New Testing of Coanda-Effect Screen Capacities, 2013)

3.2.5. Buer & Selbig (2020)

En la ciudad de Madison, Wisconsin, en el estudio realizado por Buer & Selbig (2020) se modificó los sumideros tradicionales incorporando una pantalla de efecto Coanda de malla fina (1 mm) en el diseño con el objetivo de aumentar la eliminación de sedimentos y materia orgánica de las aguas pluviales (Ver **Figura 10**). En esta investigación se instaló una estación de monitoreo de la calidad del agua en dicho sumidero para cuantificar la reducción de los sólidos suspendidos totales (TSS), los sólidos suspendidos volátiles (VSS), la concentración de sedimentos suspendidos (SSC), fósforo total (TP) y fósforo disuelto (DP) de las aguas pluviales urbanas antes de ingresar al lago Monona.

El agua pluvial que fluía a través de la estructura de control de entrada pasaba sobre una pantalla de efecto Coanda compuesta de barras en forma de V con ranuras de 1 mm entre barras orientadas perpendicularmente al flujo, con ángulo de inclinación de la barra de 5°. Los sedimentos y los desechos de más de 1 mm se retuvieron en la pantalla o se empujaron hacia un sumidero con una profundidad de 1 m. El efluente que transporta escombros de menos de 1 mm pasaría a través de la pantalla hacia una estructura triangular de control del flujo de salida antes de salir de la bóveda a través de una tubería circular con las mismas dimensiones que la tubería influente.

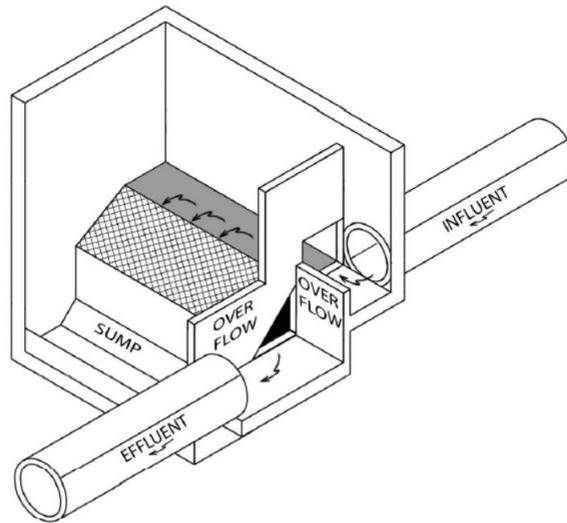


Figura 10: Esquema de bóveda de depuración de aguas pluviales con pantalla de efecto Coanda
Fuente: (Buer & Selbig, 2020)

El área de drenaje fue de 8,5 hectáreas y consistía principalmente en uso de suelo residencial compuesto por viviendas unifamiliares con aportes menores, uso de suelo comercial e industrial ligero en la parte noroeste del área de drenaje (ver **Figura 11**). La mayor parte del área de estudio estaba compuesta por superficies impermeables, siendo los techos la porción más grande, 26 %, seguida de calles y accesos, 14 % y 10 %, respectivamente. El césped, la única superficie permeable, constituía el 41 % del área de estudio.



Figura 11: Distribución geométrica de áreas de fuentes impermeables que drenan a la bóveda de tratamiento de aguas pluviales con una pantalla de efecto Coanda y un sumidero en la cuenca de estudio
Fuente: (Buer & Selbig, 2020)

El uso de sumideros como tratamiento en línea de aguas pluviales en entornos urbanos ha sido bien documentado (Lager et al. 1977; Mayordomo y Karunaratne 1995). Con índices de eliminación de sólidos de hasta el 30 % en sumideros tradicionales (p. ej., Pitt 2004), existe la posibilidad de aumentar la eficacia de la eliminación mediante nuevas innovaciones y modificaciones de las tecnologías actuales. La evaluación de una pantalla de efecto Coanda auto limpiante combinada con un sumidero mostró tasas de eliminación de sólidos de hasta el 50% y eliminación de fósforo total de hasta el 21% bajo ciertas condiciones de acuerdo a esta investigación.

En esta investigación se comparó la carga acumulada de 33 muestras recolectadas durante los veranos de 2016 y 2017 mostró reducciones de 23 % y 45 % en sólidos suspendidos totales y la concentración de sedimentos suspendidos respectivamente. Se observó una reducción menor para fósforo total, 16%, mientras que el fósforo disuelto se mantuvo sin cambios.

En general, la bóveda de tratamiento con rejilla y sumidero de efecto Coanda fue efectiva en la remoción de sólidos y, en menor grado, de fósforo particulado, pero hizo poco para reducir el fósforo disuelto. Con base en estudios previos, la adición de una pantalla de efecto Coanda no parece mejorar la eficiencia de eliminación de los sumideros convencionales cuando se usa sólidos suspendidos

totales como la métrica para sólidos en aguas pluviales; sin embargo, el uso de concentración de sedimentos suspendidos indica una mejora modesta.

Dada la escasez de datos empíricos de evaluaciones previas a nivel de campo de sumideros equipados con una pantalla de efecto Coanda, según Buer & Selbig (2020) se necesita más investigación para validar las eficiencias de eliminación de contaminantes descritas en este estudio e identificar posibles áreas de mejora. Esto podría lograrse mediante el rediseño de la estructura del sumidero y la pantalla de efecto Coanda, el uso tal vez de pantallas adicionales, y/o ajustes del ángulo y espaciado de las barras de la misma.

4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

4.1. Flujo Espacialmente Variado

El flujo espacialmente variado tiene como característica que su caudal no es uniforme en la dirección del movimiento, debido al aumento o disminución de flujo en la dirección de movimiento del mismo. Este aumento o disminución del flujo causa perturbaciones en la energía o momentum, por lo que el análisis del comportamiento hidráulico de este tipo de flujo es más complicado que uno con caudal constante (Chow, 1994).

Existen dos tipos flujo espacialmente variado, con caudal creciente y con caudal decreciente, debido a que el caso de estudio del presente trabajo posee las características de análisis de un canal con flujo espacialmente variado con caudal decreciente será el único caso estudiado.

4.1.1. Flujo Espacialmente Variado con Caudales Decrecientes

Este tipo de flujo considera que la desviación del caudal que se da hacia el exterior y que ocurre durante el movimiento del mismo, no afecta significativamente a su energía específica, por lo que para su análisis es conveniente el uso de la ecuación de energía (Sotelo Ávila, 2002).

La teoría de este tipo de flujo se cree fue usada por primera vez para el diseño de vertederos laterales en canales, en los cuales fueron construidos con el objetivo de eliminar las excedencias en el caudal que conduce. Pero puede aplicarse a casos como en la captación de caudales mediante rejas de fondo, en la siguiente figura se indica un canal que dispone de una reja de fondo cuyo objetivo es derivar parcial o totalmente el caudal que circula por la misma.

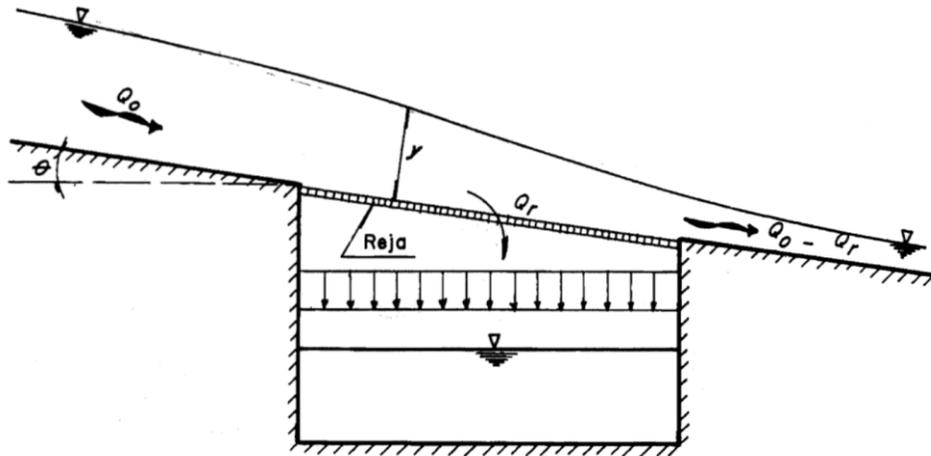


Figura 12: Flujo sobre una reja de fondo
 Fuente: (Sotelo Ávila, Hidráulica de canales, 2002)

Para el análisis de este tipo de flujo se establecen diversas hipótesis, sin embargo, las mismas no son determinativas, ya que de ser el caso pueden reducirse o corregirse algunos de sus efectos cuando las condiciones de análisis lo permitan. A continuación, se indican las principales hipótesis para analizar este tipo de flujo:

- Flujo unidireccional.
- Distribución de velocidades constante y uniforme, cuyos coeficientes α de energía cinética y β de cantidad de movimiento son constantes.
- Presión hidrostática en cada sección del flujo.
- Pendiente relativamente pequeña.
- Perdidas por fricción se evalúan con la ecuación de Manning:
- Arrastre de aire en el movimiento del flujo es insignificante, por lo que no se incluye en el análisis.

4.1.2. Ecuación dinámica para el Flujo Espacialmente Variado con Caudal Decreciente

Para el análisis de este tipo de flujo como se mencionó anteriormente se aplica el principio de energía, por lo que la energía total en una sección de canal, medida desde un nivel de referencia cualquiera es:

$$H = z + y + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2}$$

Donde:

H: es la energía total del flujo en la sección de análisis

z: es la energía potencial del flujo o altura geométrica

y: es la energía del flujo o altura de presión (profundidad del flujo)

$\alpha \frac{Q^2}{2gA^2}$: es la energía cinética del flujo o altura de velocidad

Si derivamos la ecuación anterior con respecto a x, se obtiene:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{dy}{dx} + \frac{\alpha}{2g} \left(\frac{2Q}{A^2} \frac{dQ}{dx} - \frac{2Q^2}{A^3} \frac{dA}{dx} \right)$$

Donde:

$$\frac{dH}{dx} = -S_f: \text{ es la pendiente de fricción}$$

$$\frac{dz}{dx} = -S_o: \text{ es la pendiente del canal}$$

Además, se tiene que:

$$\frac{dA}{dx} = \left(\frac{dA}{dy} \right) \left(\frac{dy}{dx} \right) = T \frac{dy}{dx}$$

Donde:

T: es el ancho de la superficie libre del flujo en la sección de análisis

Ahora, si se sustituye las expresiones anteriores se obtiene:

$$-S_f = -S_o + \frac{dy}{dx} + \frac{\alpha}{2g} \left(\frac{2Q}{A^2} \frac{dQ}{dx} - \frac{2Q^2}{A^3} T \frac{dy}{dx} \right)$$

$$-S_f + S_o = \frac{\alpha 2Q}{2g A^2} \frac{dQ}{dx} + \frac{dy}{dx} \left(1 - \frac{\alpha 2Q^2}{2g A^3} T \right)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-S_f + S_o - \frac{\alpha Q}{g A^2} \frac{dQ}{dx}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g A^3} T}$$

Siendo la ecuación anterior la ecuación dinámica del flujo espacialmente variado con caudal decreciente, la que, entre otras aplicaciones sirve para determinar analíticamente el perfil del flujo.

5. CRITERIOS DE DISEÑO

5.1. Parámetros de diseño

La capacidad de una pantalla de efecto Coanda se ve afectada por una serie de parámetros, algunos de estos parámetros están relacionados principalmente con la estructura de la misma y entre ellos destacan:

- La altura de caída del flujo hasta el inicio de la pantalla (o la altura desde la cresta del vertedero aguas arriba hasta el inicio de la pantalla).
- Pendiente de la pantalla.
- Si la pantalla posee curvatura o no.
- Longitud de la pantalla.
- Ancho de las barras que conforman la pantalla.
- Ancho de la ranura que existe entre barras.
- Ángulo de inclinación de las barras

Sin embargo, también depende de las condiciones hidráulicas de operación, pues estas afectan al flujo que pasa a través de la pantalla.

5.2. Capacidad de la pantalla – conceptos básicos

La capacidad de la pantalla de efecto Coanda se expresa en términos de descarga o caudal (volumen/tiempo) que pasa a través de la superficie de la pantalla por unidad de ancho. Hay tres caudales de interés en el estudio de las mismas: el caudal de entrada a la pantalla (caudal sobre la cresta del plato de aceleración), el caudal que circula a través de la pantalla y el caudal derivado que se tiene al pie de la misma. Cuando las tasas de caudal de entrada son muy bajas, todo el flujo es captado por la pantalla y no existe caudal de derivación, además, por lo general la parte aguas abajo de la pantalla está seca. A medida que el caudal de entrada aumenta, la longitud mojada de la pantalla lo hace también hasta el punto en que la pantalla está completamente mojada y es el momento en el que comienza a tenerse caudal de derivación (Wahl, 2003).

El flujo que pasa a través de la pantalla ocurre por una combinación de dos mecanismos. Primero, la inclinación de las barras corta capas delgadas del flujo que circula en el fondo del canal y las dirigen hacia las ranuras de la pantalla. En segundo lugar, la presión del agua contra la pantalla hace que el flujo pase por las ranuras como si estas fueran simples orificios. Ambos fenómenos actúan simultáneamente en mayor o menor grado, dependiendo de las propiedades de la superficie de la pantalla y de las características del flujo sobre la misma. La acción del corte se relaciona principalmente con la inclinación de las barras y la velocidad con la que pasa el flujo a través de la pantalla; a medida que la velocidad aumenta, la acción de cizallamiento se vuelve más dominante. El comportamiento de orificio está relacionado principalmente con la porosidad o el porcentaje de área abierta de la pantalla, y la presión contra la superficie de la pantalla, que es proporcional a la profundidad del flujo. En el caso de pantallas curvas, la presión es mayor debido a la fuerza radial ejercida sobre el flujo para que este siga la trayectoria curva de la pantalla, esta fuerza radial es proporcional a la profundidad del flujo, al cuadrado de la velocidad y al grado de curvatura (Wahl,

2003). Los parámetros adimensionales que describen la influencia relativa de los componentes de corte y orificio son $F_r^2 / (2 + F_r^2)$ y $2 / (2 + F_r^2)$, respectivamente, donde F_r es el número de Froude del flujo (Wahl, 2001).

5.3. Relación entre la inclinación de la pantalla y la altura de caída

El plato de aceleración permite obtener una transición suave entre la condición de flujo tranquilo que se tiene en el canal aguas arriba de la estructura y el flujo rápido que se genera en la caída del flujo cuando se mueve a lo largo de la pantalla de efecto Coanda, es decir, se busca que el flujo acelere suavemente y llegue tangente a la superficie de la pantalla ya que esto permite un mejor rendimiento de la misma. El perfil ideal del plato de aceleración es de forma conopial (trayectoria de un chorro en caída libre que pasa sobre un vertedero bajo la influencia de la gravedad). La forma conopial se describe mediante una ecuación potencial, de modo que la pendiente del chorro en caída libre aumenta continuamente en la dirección aguas abajo. Si se desea tener un ángulo de inclinación de la pantalla específico se debe determinar el punto a lo largo de la curva de la forma conopial que produce esa pendiente e instalar la pantalla en ese punto de manera que resulte ser tangente a esa forma conopial. Por lo que, para una descarga y un ángulo de pantalla específicos, la altura de caída estará predeterminada por la forma conopial. Y de manera similar si se desea una altura de caída específica, esto determinará la pendiente de la pantalla.

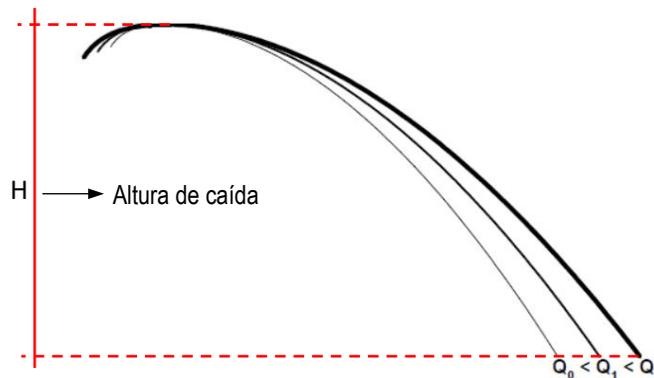


Figura 13: Formas de cresta conopial para diferentes caudales de diseño

Fuente: (Wahl, Design Guidance for Coanda-Effect Screens, 2003)

Para evitar problemas de presiones negativas en la cara de la cresta del perfil conopial o una posible separación del flujo debe diseñarse la estructura para la descarga máxima probable que ocurriría en la misma, debido a que, para todos los valores de caudales inferiores el flujo se apoyará en la cresta y se entregará tangente a la superficie de la pantalla con una presión positiva. Esta es una filosofía de diseño conservadora, debido a que en varias pruebas se ha demostrado que, en casos ideales, la separación del flujo no ocurrirá hasta que la altura real de caída supere la altura de diseño hasta en 6 o 7 veces.

La siguiente figura se puede utilizar para determinar la altura de caída, el ángulo de inclinación de la pantalla o la descarga de diseño de un plato de aceleración de cresta conopial, siempre y cuando se conozcan por lo menos dos de estos tres parámetros.

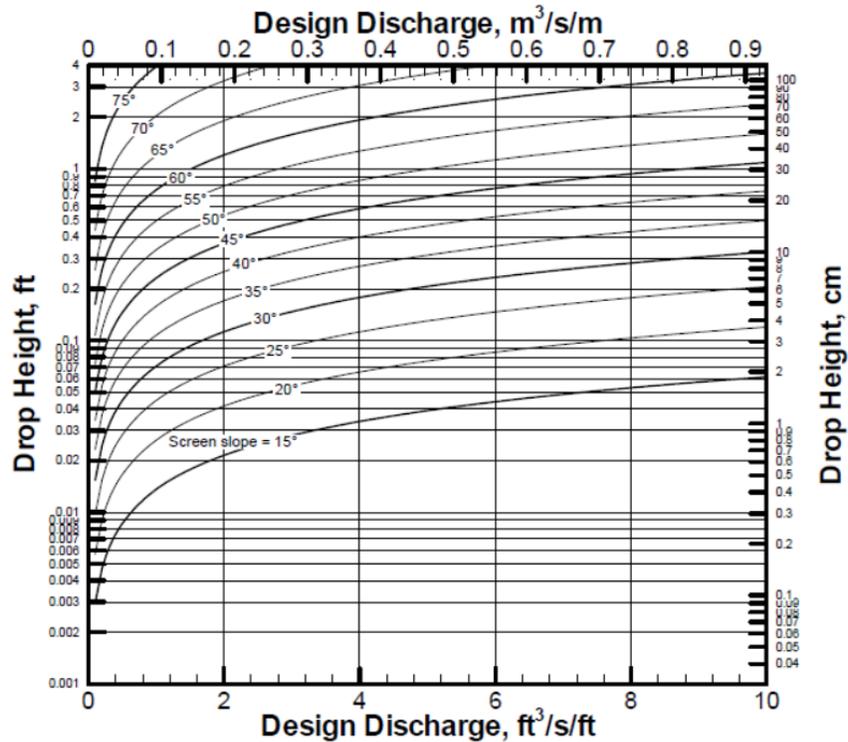


Figura 14: Parámetros de diseño para platos de aceleración de cresta conopial
Fuente: (Wahl, Design Guidance for Coanda-Effect Screens, 2003)

5.4. Efectos de los parámetros de diseño

Saber que parámetros afectan en mayor o menor medida la capacidad de una pantalla permite a los diseñadores considerar de manera eficiente variaciones en el diseño y evitar el análisis de alternativas que no tienen mayor importancia. Sin embargo, para una estimación precisa de la capacidad de un diseño específico es recomendable usar el software Coanda. A continuación, se presentan algunos de los efectos que tienen diversos parámetros de diseño, los mismos fueron estudiados por Wahl (2003) en una pantalla con efecto Coanda que poseía 1 metro de longitud y una altura de caída de la cresta del plato de aceleración de 0,1 m, las barras que conformaban la pantalla eran de 0,060" (1,524mm) de ancho con un ángulo de inclinación Φ de 5°.

5.4.1. Altura de caída del plato de aceleración

Los detalles de la forma del plato de aceleración no son importantes, siempre y cuando ésta entregue el flujo tangente y de manera suave a la parte superior de la pantalla. Pero la altura de caída si toma relevancia, por ejemplo, si se tiene una pantalla con un ángulo de inclinación pequeño (ejem: 10°), su

capacidad aumentará significativamente a medida que la altura de caída del plato de aceleración se reduzca. Todo lo contrario sucede con pantallas que tienen ángulos de inclinación pronunciados (ejem: 60°), debido a que este efecto se reduce haciendo que la capacidad de la pantalla sea menor cuando la altura de caída es pequeña y hace que aumente ligeramente para alturas de caída más altas.

La razón de estas diferencias es que las pantallas más planas tienen un componente más grande de flujo orificio y un componente más pequeño de flujo de corte y para estos casos el flujo del orificio aumenta aún más cuando se reduce la altura de caída del plato de aceleración, ya que esto genera un aumento de la profundidad del flujo que pasa por encima de la pantalla. Por el contrario, para las pantallas con pendiente más pronunciada, el flujo de corte es más dominante y este aumenta cuando aumenta la altura de caída, ya que esto conlleva a su vez a un aumento de la velocidad del flujo que circula a través de la pantalla.

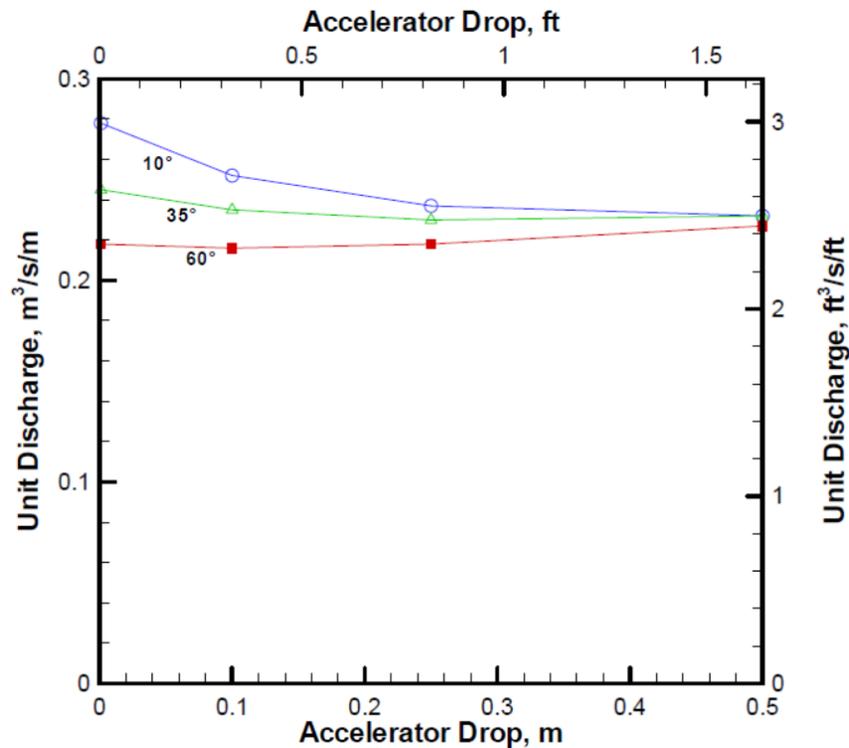


Figura 15: Efecto de la altura de caída del plato de aceleración en la descarga a través de la pantalla
Fuente: (Wahl, Design Guidance for Coanda-Effect Screens, 2003)

Algo que hay que tener en cuenta al seleccionar la altura del plato de aceleración es el efecto que ésta tiene sobre la velocidad en el borde superior de la pantalla. Fontein (1965) sugiere que el número de Reynolds del flujo a través de la superficie de la pantalla debe mantenerse por encima de 1000 ya que de esta manera se garantiza la auto limpieza adecuada del sistema ($R_e = Vs/\nu$, donde: V es la velocidad, s es el ancho de la ranura y ν es la viscosidad cinemática).

5.4.2. Pendiente de la pantalla

La descarga en las pantallas varía linealmente con el cambio de ángulo de las mismas como se puede apreciar en la **Figura 16**. Sin embargo, si se cambia el ángulo de inclinación de las barras que conforman la pantalla esto hace que aumente o disminuya su capacidad (líneas con guion), y esto sobre todo se nota con pendientes de pantalla más altas donde el flujo de corte se vuelve más dominante. Por el contrario, al cambiar la porosidad de la pantalla (líneas de guion y punto) ya sea modificando el ancho de la ranura o el ancho de la barra, se hace más notable este efecto en ángulos de inclinación de pantalla bajos, donde el flujo orificio es más importante que el flujo por corte.

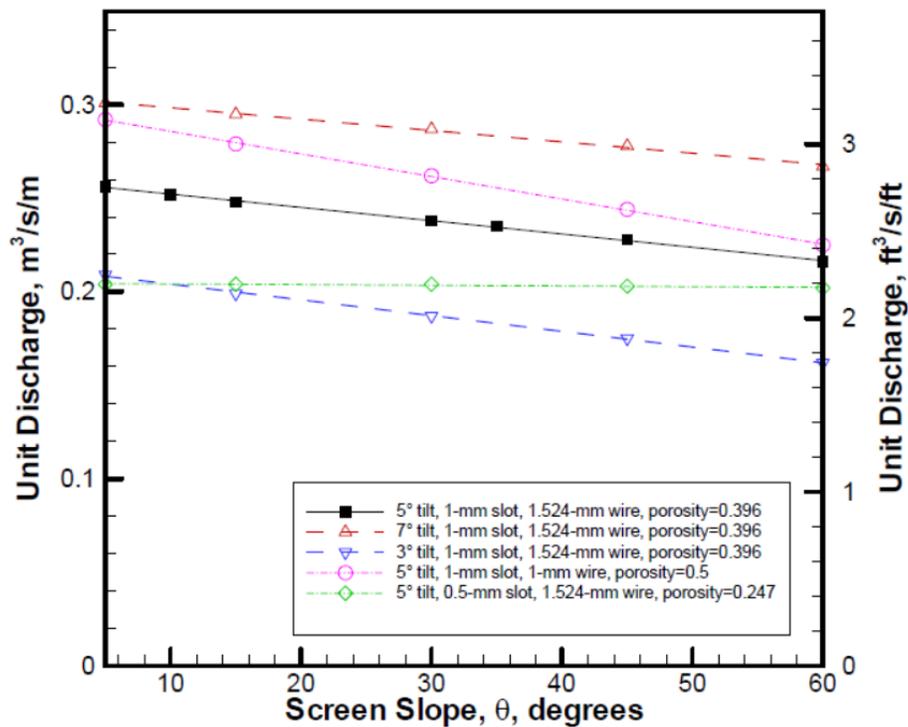


Figura 16: Efecto de la pendiente de la pantalla en la descarga a través de la misma
Fuente: (Wahl, Design Guidance for Coanda-Effect Screens, 2003)

5.4.3. Longitud de la pantalla

Obviamente la longitud de la pantalla tiene una importancia relevante en la capacidad de captación del caudal que circula por la misma. En la **Figura 17** se indica los resultados que se obtuvieron en el estudio de Wahl (2003) en el cual se confirma lo mencionado anteriormente, además que de igual manera se espera que los cambios en las propiedades de la superficie de la pantalla cambiarían estas relaciones hasta cierto punto, pero no significativamente.

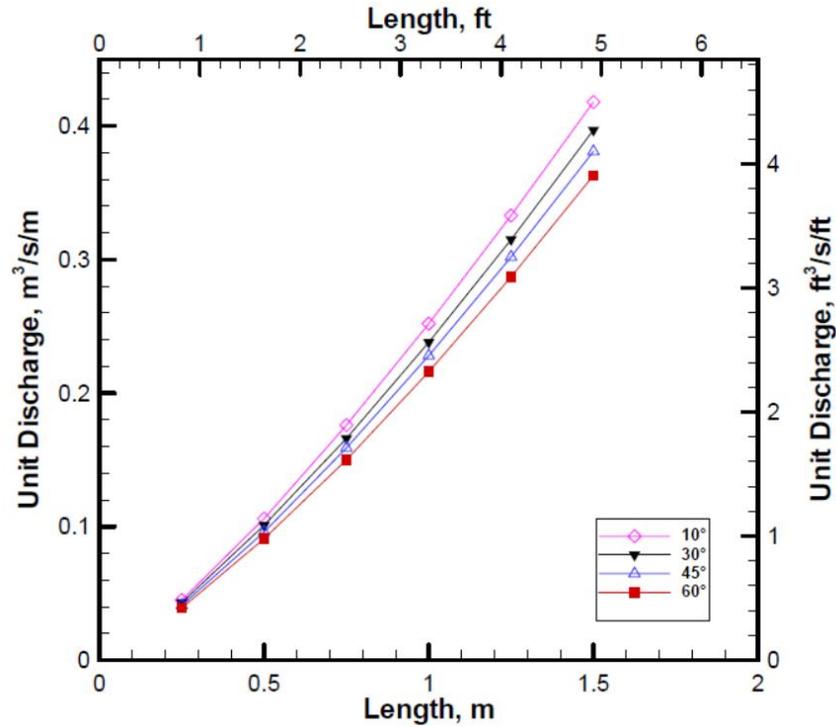


Figura 17: Efecto de la longitud de la pantalla en la descarga a través de la misma
Fuente: (Wahl, Design Guidance for Coanda-Effect Screens, 2003)

5.4.4. Curvatura de la pantalla

Las pantallas comerciales por lo general han sido diseñadas con un panel de pantalla cóncavo, el mismo que permite al inicio tener una pendiente muy pronunciada con una pendiente más plana en la zona aguas abajo. La forma cóncava de la pantalla también permite tener una mayor longitud en comparación con una estructura plana que tenga la misma altura de caída total vertical. Además, que aumenta la presión sobre la cara de la pantalla haciendo que de esta manera también aumente el componente del flujo por orificio. La siguiente figura muestra los efectos que se tienen al cambiar la curvatura de la pantalla (radio del arco). Se observa que a medida que se aumenta la curvatura (reducir el radio del arco), aumenta también la capacidad de la pantalla.

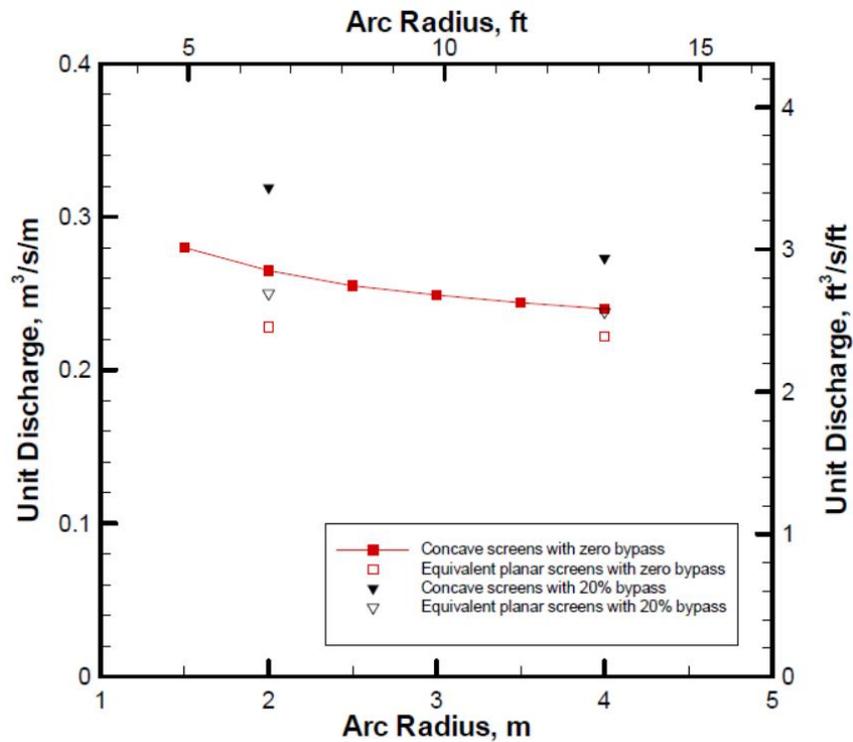


Figura 18: Efecto de la curvatura de la pantalla en la descarga a través de la misma
Fuente: (Wahl, Design Guidance for Coanda-Effect Screens, 2003)

5.4.5. Propiedades de la pantalla

Las propiedades de la pantalla con respecto a el ancho de la ranura, el ancho de la barra y el ángulo de inclinación de la misma pueden afectar significativamente la capacidad de la pantalla. Pues el ancho de la barra y la ranura afectan a la porosidad, lo que afecta la cantidad del componente del flujo por orificio que circula a través de la superficie de la pantalla y ángulo de inclinación de la barra afecta en cambio al componente del flujo por corte. A modo de ejemplo se indica en la siguiente figura el efecto que se tendría con la variación del ancho de la ranura, con tres ángulos de inclinación de pantalla diferentes, se observa que la capacidad de la pantalla se vuelve más sensible al efecto del ancho de la ranura a medida que el ángulo de inclinación de la pantalla se vuelve más plano.

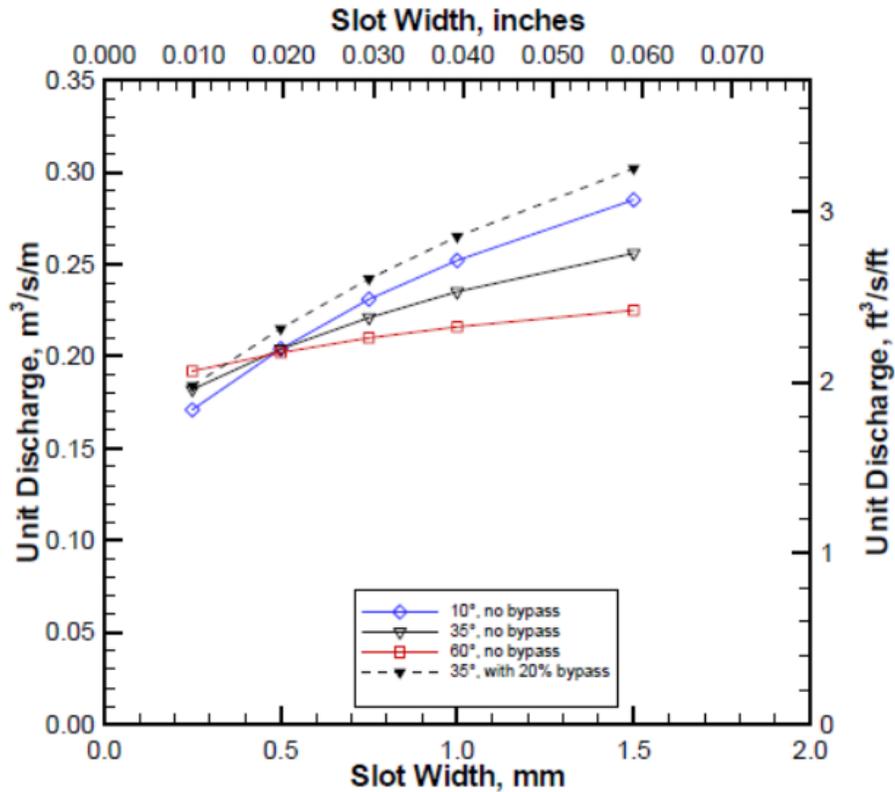


Figura 19: Efecto del ancho de la ranura entre barras de la pantalla en la descarga a través de la misma
Fuente: (Wahl, Design Guidance for Coanda-Effect Screens, 2003)

5.4.6. Flujo de derivación

La presencia del flujo de derivación significa que las profundidades del flujo que circula a través de la pantalla son grandes y esto tiende a aumentar la cantidad del flujo tipo orificio que circula a través de la pantalla y aumenta la sensibilidad del rendimiento de la pantalla con respecto a otras variables que afectan al flujo tipo orificio, como por ejemplo la porosidad. En conclusión, se puede decir que, el efecto del flujo de derivación es más pronunciado para ángulos de inclinación de pantalla más planos, donde el flujo de tipo orificio es dominante sobre el flujo de corte, lo que se evidencia en la siguiente figura:

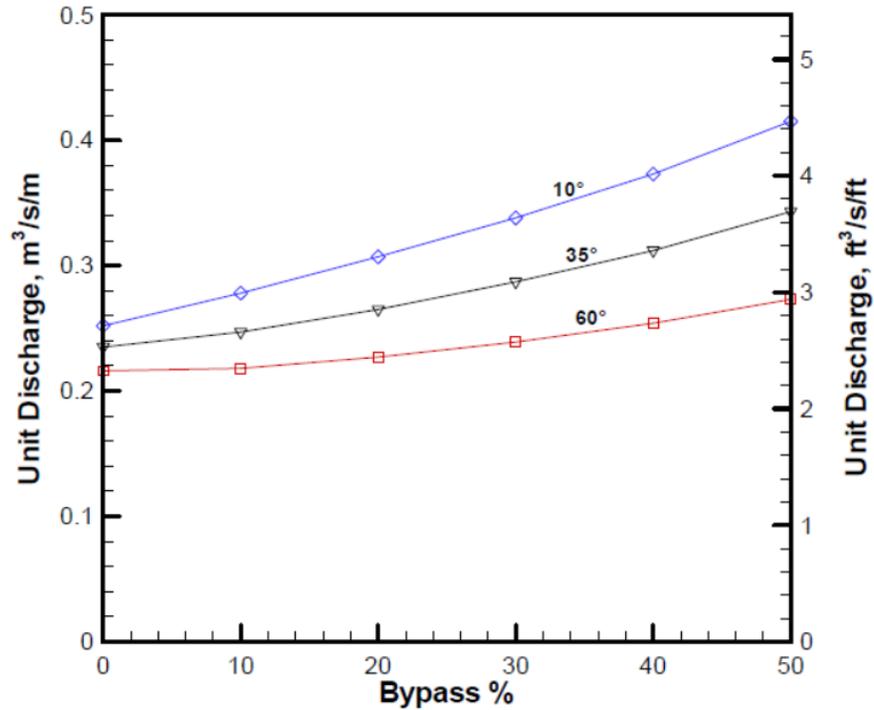


Figura 20: Efecto del flujo de derivación en la descarga a través de la pantalla
Fuente: (Wahl, Design Guidance for Coanda-Effect Screens, 2003)

6. SOFTWARE DE ANÁLISIS DE PANTALLA DE EFECTO COANDA

Es un software basado en Windows que permite el análisis y diseño de pantallas de efecto Coanda. La última versión 0.7.1, se publicó el 6 de julio de 2015 consiste es una aplicación de 32 bits que puede ser usada en Windows 95 y sistemas posteriores. Tanto la versión del software independiente como la versión de hoja de cálculo en Excel pueden ser descargados del sitio oficial de la Bureau of Reclamation.

En la interfaz de entrada del programa, los datos deben proporcionarse en cuatro pestañas separadas como se observa en la **Figura 21** (Structure, Accelerator Plate, Screen and Flow Condition).

En la pestaña de Structure el usuario debe seleccionar si la pantalla a analizar es curva o plana, especificar sus dimensiones básicas (se pueden proporcionar en unidades de pies o metros). Para pantallas curvas, el radio de la pantalla puede ser positivo (la pantalla cóncava habitual), cero (lo mismo que seleccionar una pantalla plana) o negativo (una pantalla convexa).

Figura 21: Interfaz del Software de análisis de pantalla de efecto Coanda

El plato de aceleración puede tener una cresta conopial o una cresta genérica sin forma específica (por ejemplo, un arco circular). Para formas de crestas conopiales, el coeficiente de descarga de la cresta se estimará por separado para cada caudal, utilizando información de Diseño de Pequeñas Presas (Reclamation, 1987), mientras que se supondrá que las crestas no conopiales tienen un coeficiente de descarga constante proporcionado por el usuario.

El usuario debe proporcionar 2 de 3 datos de la información de diseño del plato de aceleración: la caída vertical desde la cresta hasta el inicio de la pantalla, el ángulo de inclinación en el extremo aguas abajo del plato de aceleración y la descarga de diseño. El programa calcula la tercera cantidad dadas las otras dos. Debe enfatizarse que la "Design Discharge" que se muestra en la pestaña "Accelerator Plate" es solo la descarga de diseño para la cresta en sí, no la pantalla como tal. La tasa de flujo real que se utilizará para calcular el perfil de flujo hacia abajo y a través de la pantalla se proporciona en el cuadro de texto "Inflow" en la pestaña "Flow Condition".

Los anchos de las ranuras del panel de pantalla y los tamaños de las barras se pueden especificar en pulgadas o milímetros. El programa calcula el número de ranuras y la altura de compensación de corte para una combinación determinada de ancho de la barra, ancho de ranura y ángulo de inclinación de la barra. Finalmente, en la pestaña de "Flow Condition", el usuario proporciona la descarga de entrada sobre la cresta y el programa calcula la altura de caída total correspondiente desde el canal aguas arriba hasta la parte superior de la pantalla. Este cálculo utiliza el coeficiente de descarga de la cresta

conopial (o el proporcionado por el usuario para formas de cresta genéricas) y la ecuación de vertedero estándar, $Q = CLH^{1.5}$, donde Q es caudal de entrada, C es el coeficiente de descarga, L es la longitud de la cresta, y H es la carga por encima de la cresta del vertedero.

Una vez que se han proporcionado los datos de entrada, hay dos opciones disponibles para ejecutar el análisis. Se puede calcular un solo perfil de flujo para la descarga de entrada dada usando el botón "Compute One Profile". Si el usuario también marca la casilla "Show Profile Details", se mostrará detalladamente la profundidad, la velocidad y el perfil de descarga a lo largo de toda la pantalla.

El segundo método para realizar el análisis es hacer clic en el botón "Compute Multiple Profiles..." en "Rating Curve for Range of Flows" del software. Esto hace que el programa calcule repetidamente los perfiles comenzando con una pequeña descarga de entrada y luego aumentando la entrada hasta que se alcanza una condición de flujo de desvío del 50%.

Después de ingresar los datos de entrada para un diseño de pantalla específico, estos datos se pueden guardar en un archivo con extensión COA para su uso posterior. Estos son archivos de formato de texto documentados internamente. Los diseños guardados se pueden recuperar para su posterior análisis o modificación. Los archivos de datos también se pueden crear y/o modificar con un editor de texto. Las variables de entrada se enumeran una por línea y se debe conservar el orden de las variables.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Modelo físico

En el presente trabajo para los ensayos se utilizó las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT). La instalación experimental usada consiste en un canal de entrada de 5,00 metros de largo, 0,50 metros de ancho y paredes con una altura de 0,30 metros, además cuenta con un canal para recolectar el agua captada por la pantalla de efecto Coanda que se encuentra ubicado justo debajo de la misma.

El canal dispone también un dispositivo móvil que tiene instalados los instrumentos de medida (limnómetro y un tubo Pitot), además, este dispositivo tiene la capacidad de desplazarse longitudinal y transversalmente facilitando la toma de datos en las pruebas respectivas.



Fotografía 1: Instalación experimental Laboratorio de Hidráulica UPCT

En este trabajo, las pantallas tipo Coanda se ubicaron con un ángulo de inclinación de 45° aguas abajo de un perfil tipo conopial de placa de aceleración, que tiene como función suavizar el flujo que ingresa a la pantalla y entregarla con el ángulo correcto. Las pantallas Coanda fueron fabricadas por la empresa Hydroscreen Co. LLC., además fueron fabricadas en Acero Inoxidable (AISI 304), de dimensiones 0,48 metros de ancho por 0,50 metros de largo. Las principales características de las mismas se detallan en la **Figura 22** y en la **Tabla 1**.

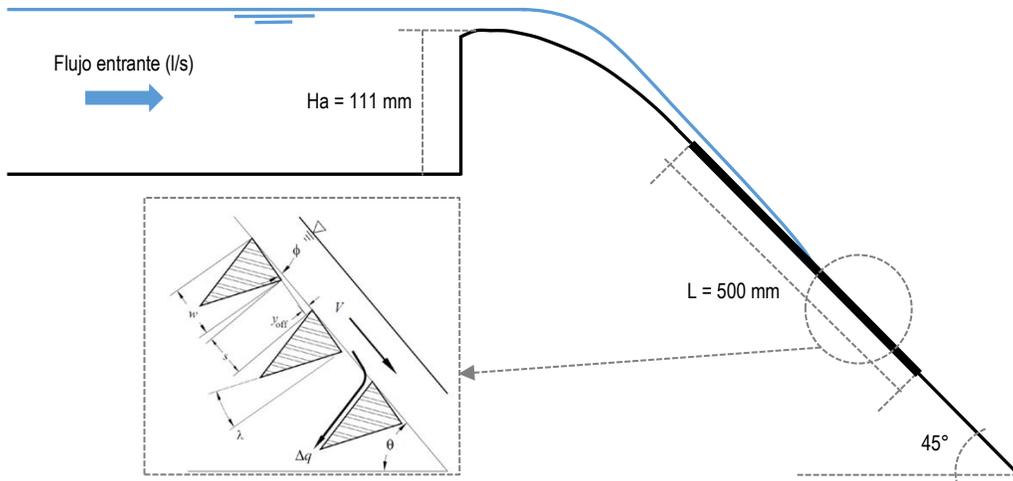


Figura 22: Detalle de las principales características de la instalación experimental

Tabla 6: Dimensiones de las pantallas tipo Coanda

| Reja | L/W (m) | w (mm) | s (m m) | φ (°) | y_{off} (mm) | m (%) | λ (°) | N° de barras |
|------|----------|--------|---------|---------------|----------------|-------|---------------|--------------|
| H1 | 0.5/0.48 | 1.6 | 0.4 | 5 | 0.17 | 0.20 | 10 | 250 |
| H2 | 0.5/0.48 | 1.6 | 0.5 | 5 | 0.18 | 0.24 | 10 | 238 |
| H3 | 0.5/0.48 | 1.6 | 1.5 | 5 | 0.27 | 0.48 | 10 | 161 |
| H4 | 0.5/0.48 | 2.4 | 1 | 5 | 0.30 | 0.29 | 10 | 147 |
| N&D | 0.5/0.48 | 1.5 | 1 | 2.5 | 0.11 | 0.40 | 10 | 200 |

Donde:

L: es la longitud de la pantalla en la dirección del flujo

W: es el ancho de la pantalla

w: es el ancho de las barras en la pantalla

s: es la distancia de la ranura que existe entre cada dos barras

φ : es el ángulo de inclinación de las barras

y_{off} : es el desplazamiento de la barra (la longitud de la proyección del perfil de la barra aguas arriba inclinada en la siguiente barra)

m: es la relación de vacíos calculada como la relación entre el área de vacíos y el área total

λ : es el ángulo de alivio de los lados inferiores del triángulo que forman las barras



Fotografía 2: Perfil conopial tipo Ogee de la instalación experimental



Fotografía 3: Ubicación de la reja en la instalación experimental

7.2. Campaña experimental

La campaña experimental consistió en ejecutar pruebas con transporte de agua clara sobre las 5 pantallas con efecto Coanda, para cuatro diferentes valores de caudales de aproximación: 80 m³/h, 92 m³/h, 110 m³/h y 130 m³/h. A fin de evaluar las características y el comportamiento del flujo en cada una de ellas, entre los cuales se puede destacar:

- Obtención de la lámina del perfil del flujo.
- Determinación de los calados y velocidades en distintos puntos del canal y de la pantalla.
- Estimación de la longitud mojada de cada pantalla.
- Obtención de los coeficientes de descarga.

El caudal de entrada al canal de aproximación se midió con un caudalímetro electromagnético Endress Häuser Promag 53W de 125 mm, con una precisión del 0,5%. Las unidades de medición que emplea el caudalímetro son m³/h.

El plan de pruebas establecido para la campaña experimental se indica en la **Tabla 7**.

Tabla 7: Plan de pruebas a ejecutarse en la instalación experimental

| Pantalla | Plan de pruebas | | | |
|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Q1 (m ³ /s) | Q2 (m ³ /s) | Q3 (m ³ /s) | Q4 (m ³ /s) |
| H1 | 0.0222 | 0.0256 | 0.0306 | 0.0361 |
| H2 | | | | |
| H3 | | | | |
| H4 | | | | |
| N&D | | | | |

7.2.1. Perfil del flujo

A fin de obtener los perfiles del flujo para cada una de las pruebas realizadas durante la campaña experimental se tomaron medidas de los calados verticales que conforman el perfil de la lámina de flujo en el canal de aproximación y en la pantalla de efecto Coanda mediante el uso del limnómetro de precisión 0,5 mm. En los puntos que se indican en la **Figura 23**.

7.2.2. Velocidad del flujo en la pantalla

Durante la campaña experimental se tomó, además, datos mediante el uso de un tubo Pitot ubicado paralelamente a la pantalla Coanda en los puntos que se indican en la **Figura 23**, para de esta manera obtener los valores de velocidad con los cuales circula el flujo por encima de la pantalla.

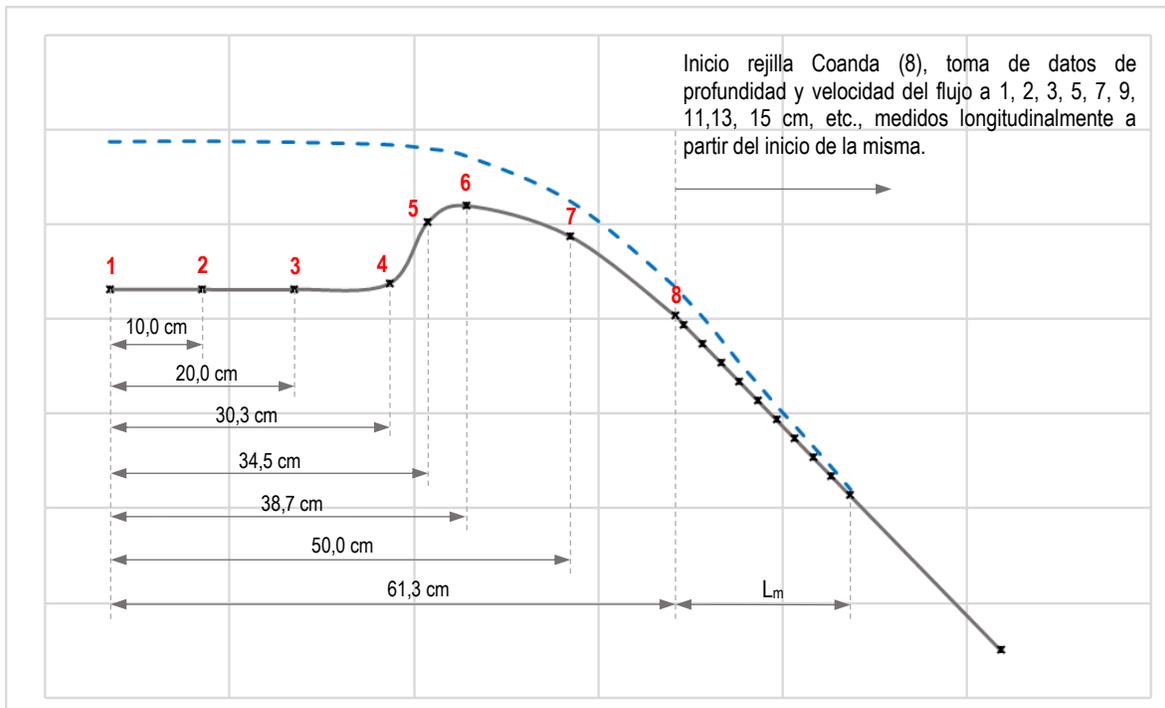


Figura 23: Detalle de los puntos en los que se realiza la toma de datos

Los valores medidos para obtener el perfil de la lámina del flujo y la velocidad con la que circula el mismo por encima de la pantalla, sirven para establecer una comparación con el software Coanda (2001, 2013) ya que éste permite de cierta manera modelar las mismas características de la geometría de la pantalla y las condiciones de flujo con las que se realizó el estudio experimental. Con base a esto podremos determinar si en el caso de ser necesaria una primera estimación o diseño preliminar de este tipo de estructura bastaría realizarlo solo con el uso del software, sin recurrir en primera instancia a modelaciones experimentales lo que permitiría a los proyectos ahorrar tiempo y costo en su ejecución.

7.2.3. Software de análisis de pantalla de efecto Coanda

Como se mencionó anteriormente éste software es una herramienta computacional de uso libre que permite mediante el uso de distintas variables, el análisis y diseño de pantallas con efecto Coanda.

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo con el software Coanda (2001, 2013), para la prueba N°1, presentada en el plan de pruebas, efectuada con la reja H1 y para el caudal Q1:

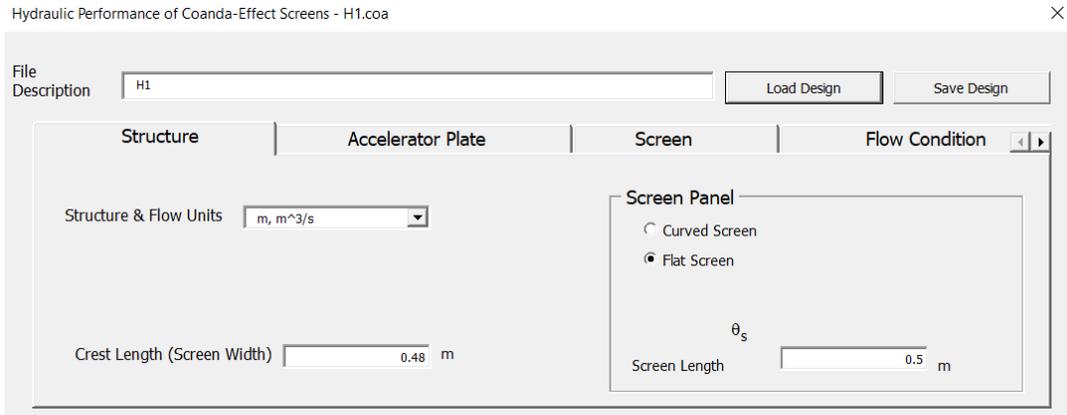


Figura 24: Ingreso de datos en la primera ventana de Estructura de la pantalla

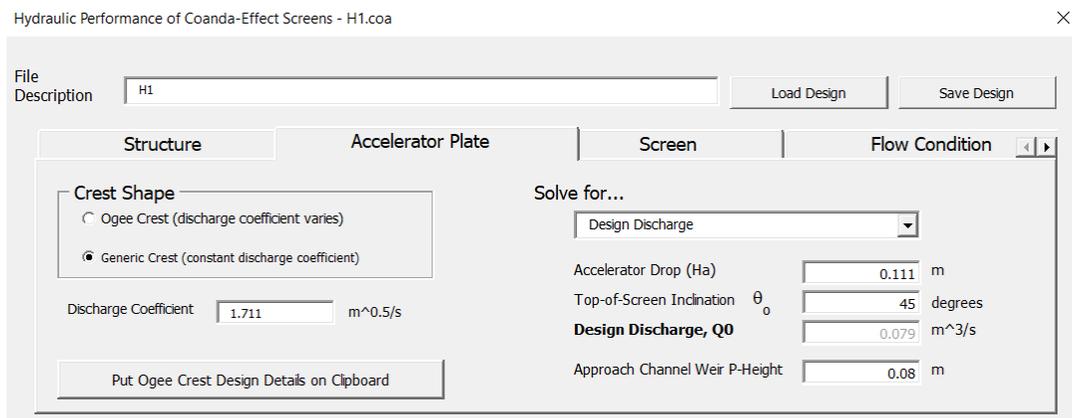


Figura 25: Ingreso de datos característicos del plato de aceleración

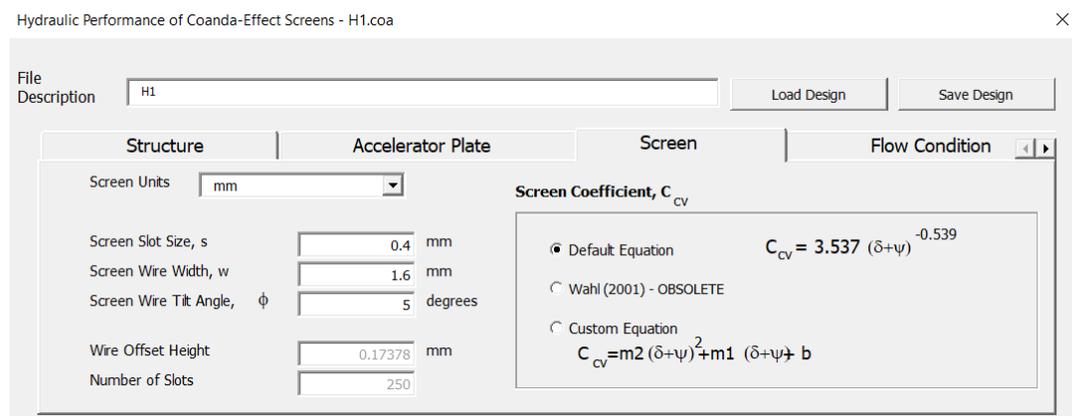


Figura 26: Ingreso de datos característicos de la pantalla

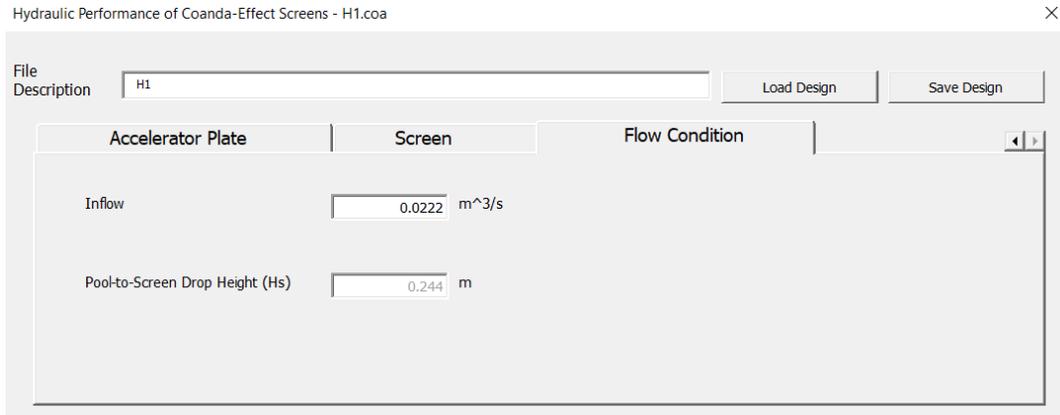


Figura 27: Ingreso de datos de las características del flujo

Una vez ingresados los datos respectivos, seleccionamos en “Single Flow Condition” la opción de “Show Profile Details” y finalmente clic en “Compute One Profile” y se despliega en la ventana los resultados para las condiciones establecidas.

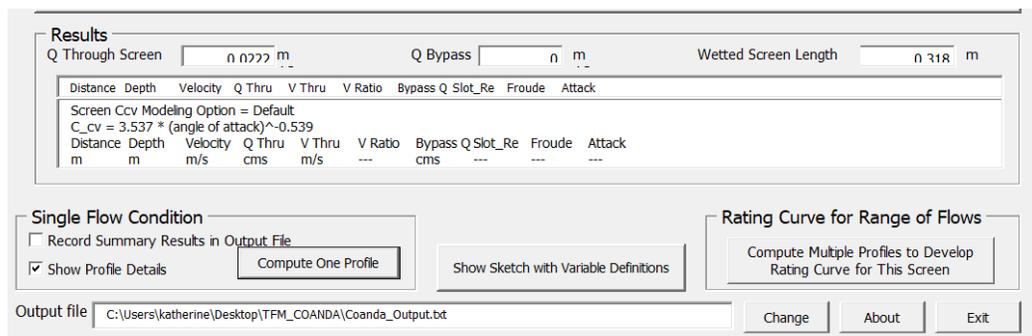


Figura 28: Ingreso de datos de las características del flujo

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Perfiles de flujo

Los perfiles de flujo de las mediciones experimentales fueron realizados en base a la toma de datos del calado de la lámina de agua tanto en el canal de entrada como en la reja mediante el uso del limnómetro y conforme a los puntos de medición que se indicaron en el apartado de “campaña experimental”. A continuación, se presenta los perfiles de flujo obtenidos para la reja H1 para los cuatro caudales ensayados.

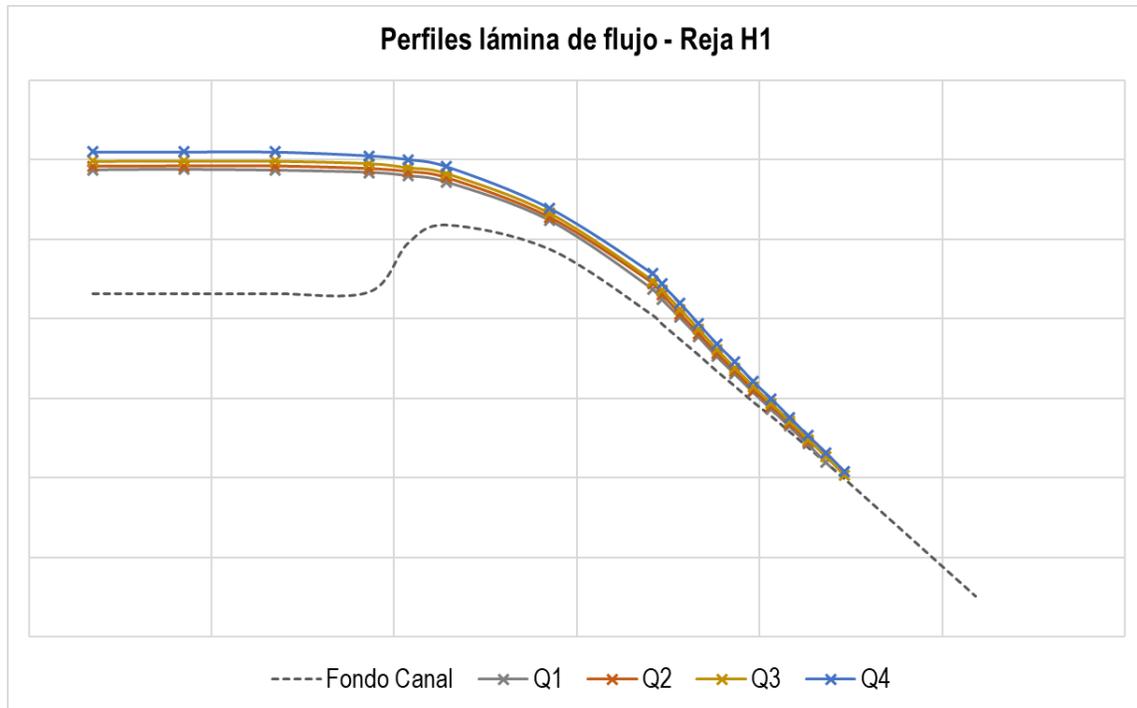


Figura 29: Perfiles de la lámina de flujo para la reja H1 con los cuatro caudales ensayados

A la vez se efectuó en el software Coanda la modelación de las rejillas (pantallas de efecto Coanda), bajo las condiciones geométricas y de flujo que se realizaron en el laboratorio para así poder comparar los resultados obtenidos tanto en la campaña experimental como con el uso del software.

Los resultados obtenidos para diversas se presentan en las siguientes figuras:

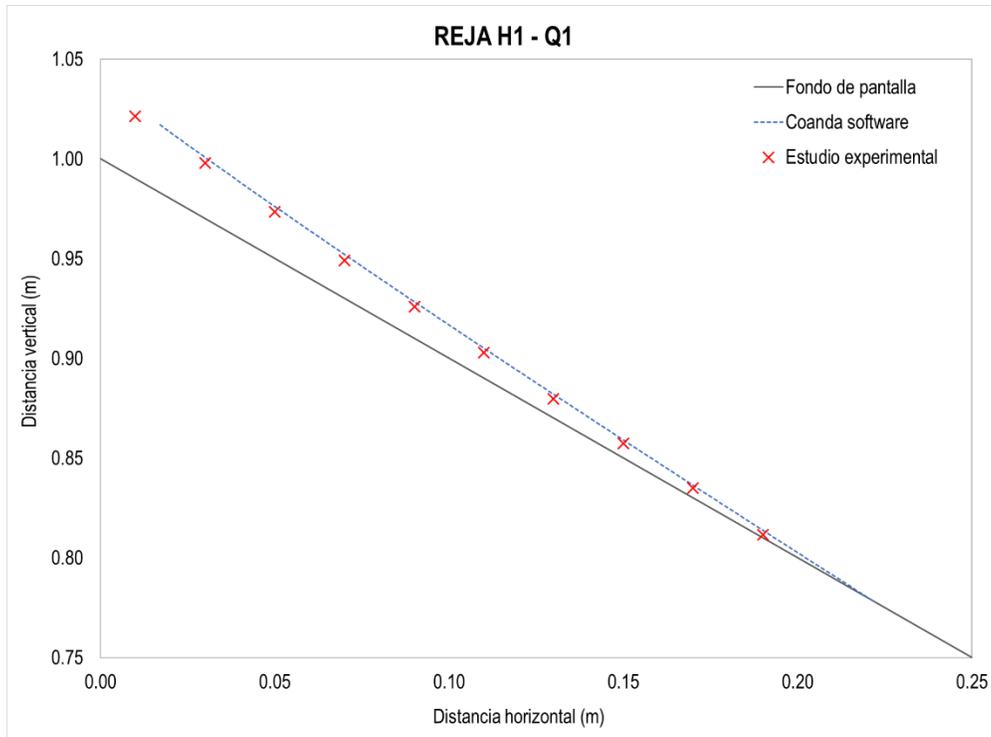


Figura 30: Perfiles de la lámina de flujo para la reja H1 ensayada con el caudal Q1, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda

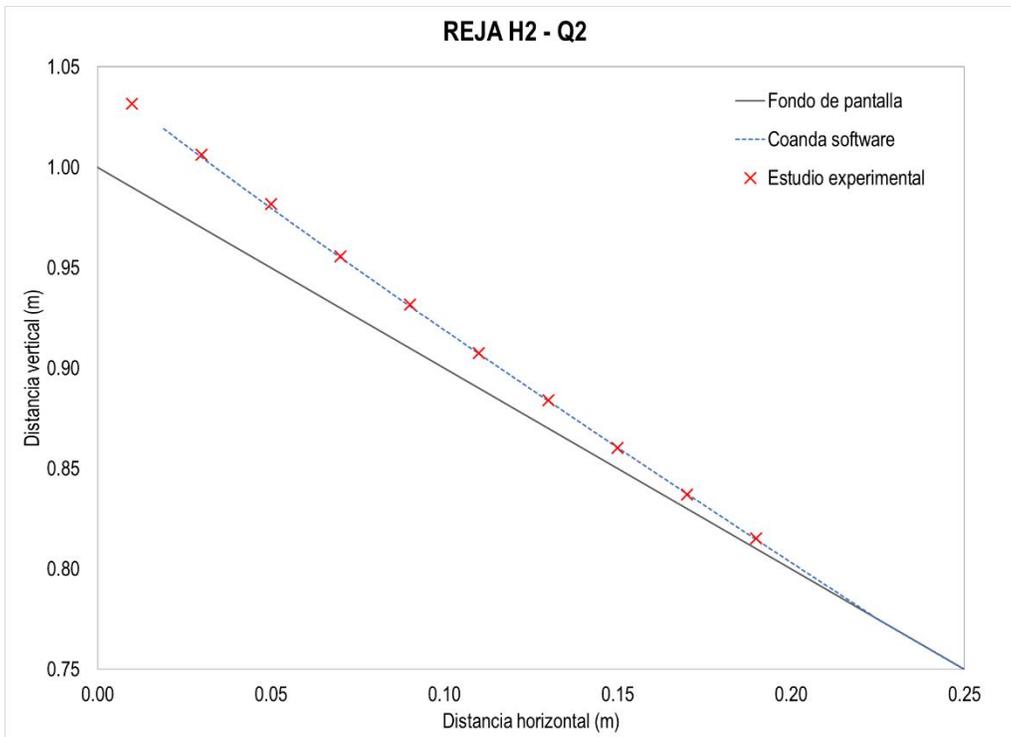


Figura 31: Perfiles de la lámina de flujo para la reja H2 ensayada con el caudal Q2, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda

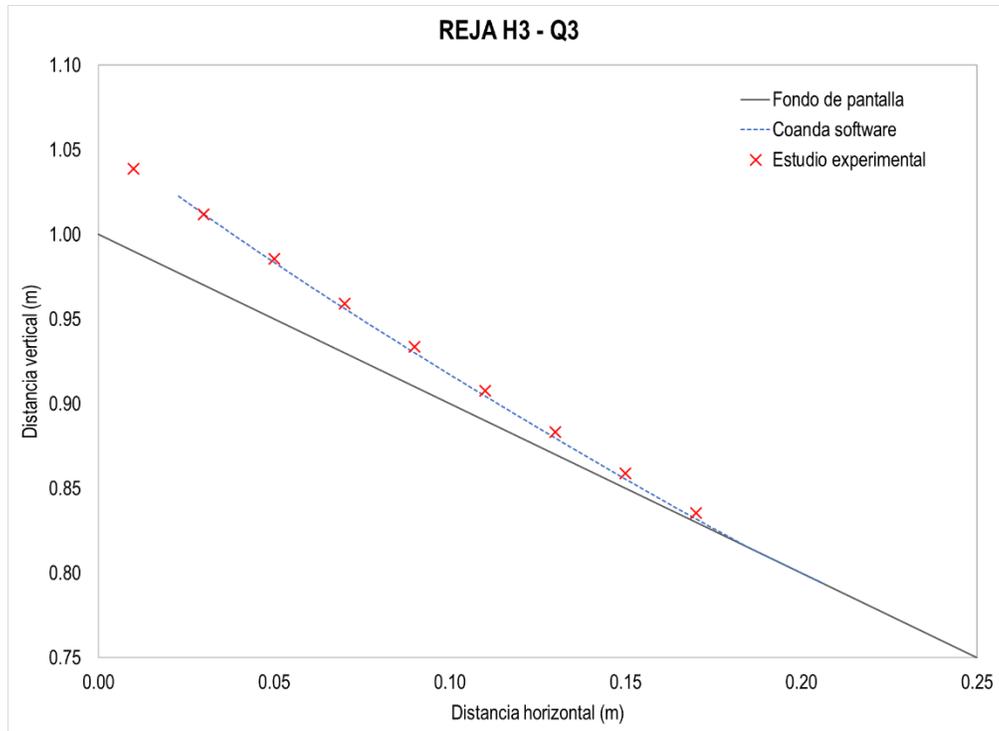


Figura 32: Perfiles de la lámina de flujo para la reja H3 ensayada con el caudal Q3, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda

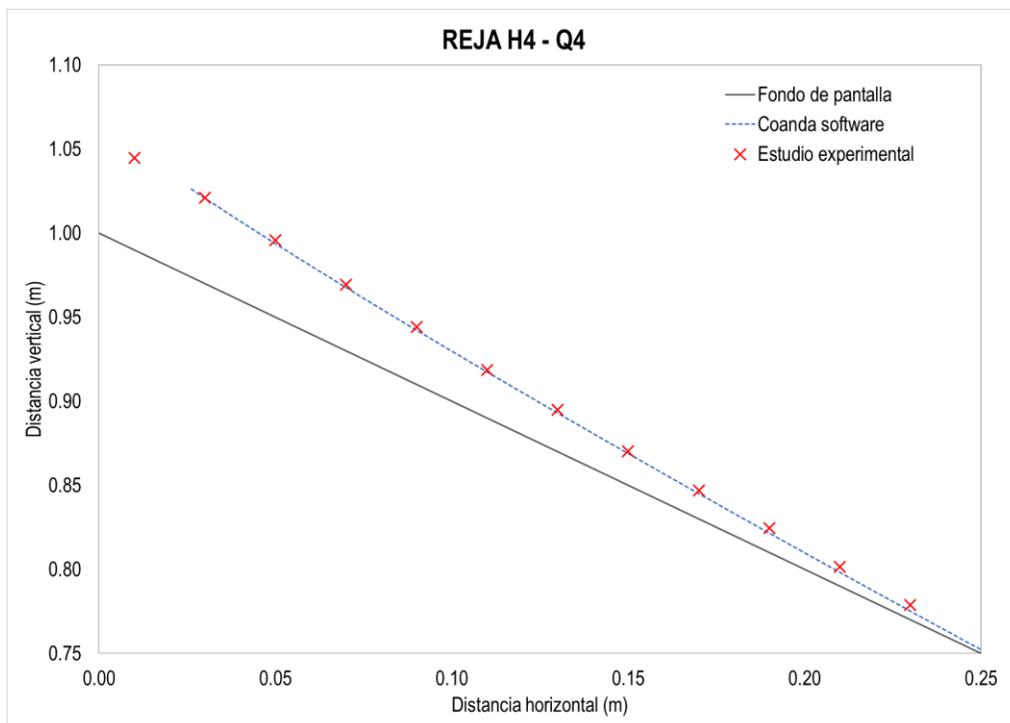


Figura 33: Perfiles de la lámina de flujo para la reja H4 ensayada con el caudal Q4, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda

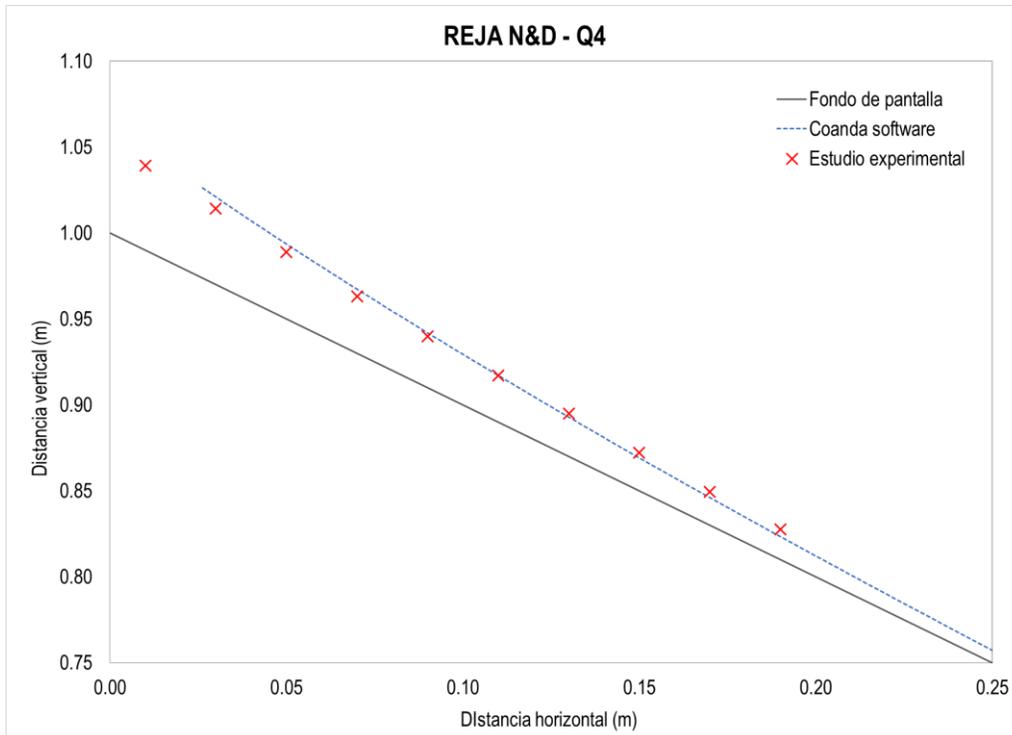


Figura 34: Perfiles de la lámina de flujo para la rejilla N&D ensayada con el caudal Q4, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda

8.2. Velocidad del flujo

Las tomas de datos de las velocidades del flujo en las mediciones experimentales fueron realizadas solamente en la rejilla mediante el uso de un tubo Pitot que poseía el mismo ángulo de inclinación de la pantalla, es decir, se encontraba ubicada paralela a la misma.

Se midió la presión en la punta del tubo Pitot y al colocarlo paralelo a las líneas de corriente ayuda a despreciar la medida del Pitot lateral. Además, se tomaron las mediciones conforme a los puntos que se indicaron en el apartado de “campaña experimental”.

A la vez se efectuó en el software Coanda la modelación de las rejillas (pantallas de efecto Coanda), bajo las condiciones geométricas y de flujo que se realizaron en el laboratorio para así poder comparar los resultados obtenidos tanto en la campaña experimental como con el uso del software.

Los resultados de velocidad obtenidos para cada una de las diferentes rejillas concuerdan con los resultados del perfil de flujo entre software y el estudio experimental, es decir, que en los resultados de velocidad también existe una alta concordancia si se comparan ambos resultados como se puede apreciar en las siguientes figuras:

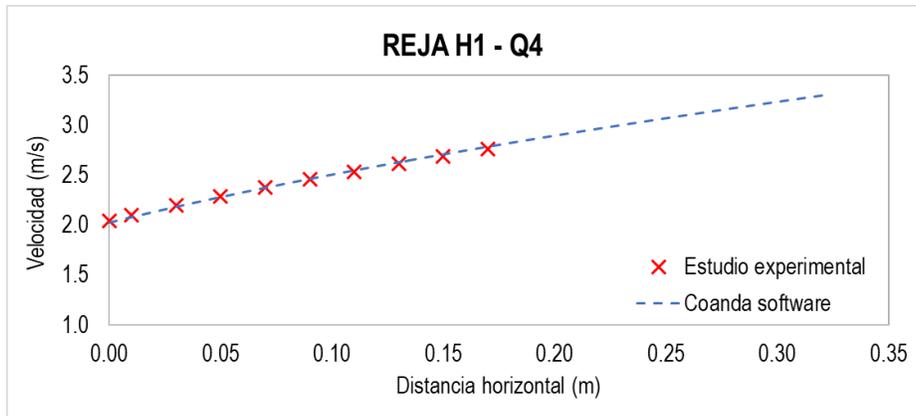


Figura 35: Velocidades para la reja H1 ensayada con el caudal Q4, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda

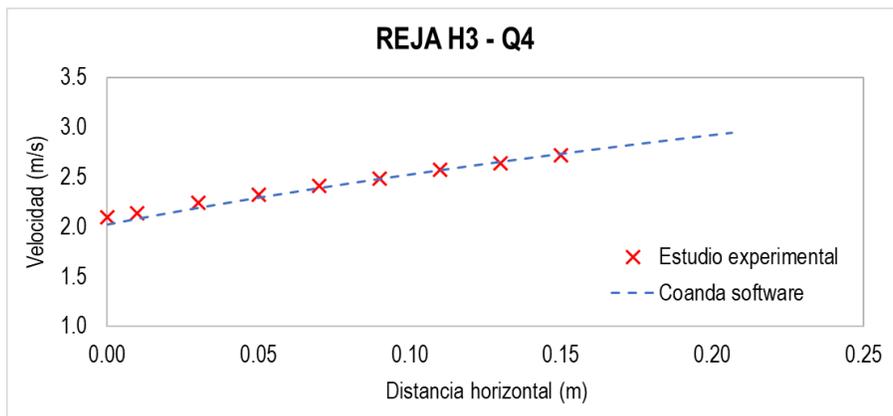


Figura 36: Velocidades para la reja H3 ensayada con el caudal Q4, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda

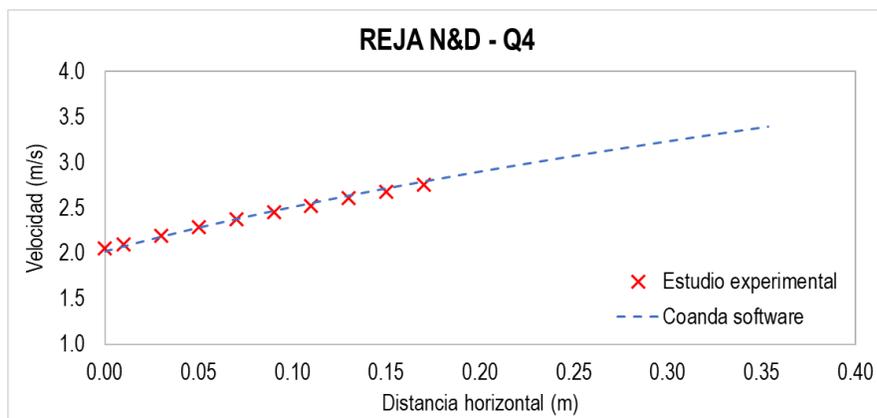


Figura 37: Velocidades para la reja N&D ensayada con el caudal Q4, resultados de medición experimental y calculada con el software Coanda

8.3. Longitud mojada

Los resultados de las mediciones de longitud mojada y los obtenidos con el software de análisis para las pantallas de efecto Coanda se muestran en la tabla y en la figura que se indica a continuación:

Tabla 8: Longitud mojada, resultados experimentales y modelados

| Caudal (m ³ /s) | H1 | | H2 | | H3 | | H4 | |
|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| | L _m experimental (cm) | L _m software (cm) |
| 0.0222 | 30.4 | 31.6 | 29.0 | 28.78 | 23.6 | 20.50 | 25.2 | 25.85 |
| 0.0256 | 32.4 | 34.8 | 32.2 | 31.72 | 26.6 | 22.05 | 27.3 | 28.23 |
| 0.0306 | 35.1 | 39.6 | 35.4 | 36.55 | 31.4 | 26.09 | 34.9 | 32.99 |
| 0.0361 | 40.9 | 45.6 | 39.7 | 42.02 | 36.4 | 29.50 | 40.9 | 37.76 |

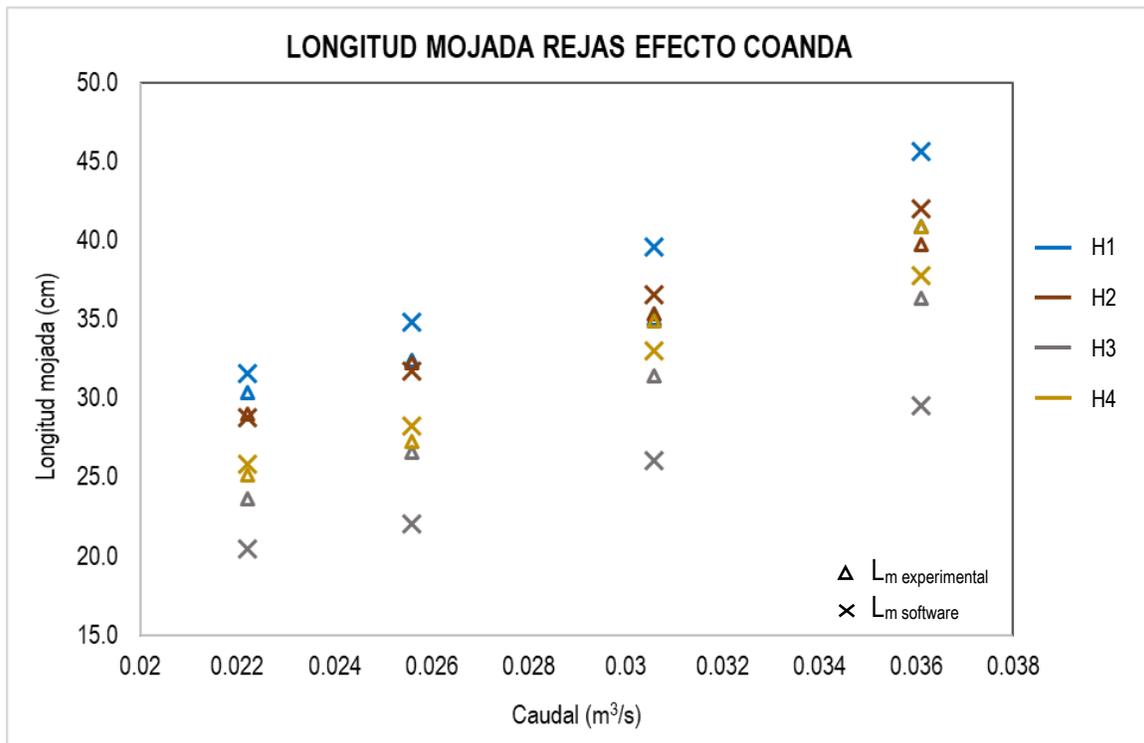


Figura 38: Longitud mojada, resultados experimentales y modelados

Como se observa en los resultados las mediciones tienen en algunos casos una diferencia significativa si comparamos los datos experimentales y modelados, pero esto es debido a que al circular el flujo sobre la pantalla en la zona aguas abajo, cuando prácticamente se capta todo el caudal, el flujo sufre de fluctuaciones significativas que dificultan la medición de este parámetro con los instrumentos de medida que se poseen en el laboratorio. Por lo que dado a que el software Coanda está calibrado y

evaluado para definir los parámetros de diseño de este tipo de pantallas, se debe tomar como determinante el valor de longitud mojada que nos muestra para conocer la longitud mínima que debería tener una pantalla para captar un caudal dado.

A modo de ejemplo se indica una fotografía de la pantalla H3 para el caudal de prueba Q3 en la cual se puede observar las fluctuaciones que tiene el flujo en la zona aguas abajo, siendo esta la principal razón por la cual se dificulta la medición de este parámetro experimental.



Fotografía 4: Pantalla H3 con caudal de prueba Q3, delimitación de las fluctuaciones de la longitud mojada

8.4. Coeficientes de descarga

Para evaluar los coeficientes de descarga en las pantallas de efecto Coanda de la instalación experimental, usamos la expresión que se indica a continuación:

$$C_{q_{1-2}} = \frac{Q_{derivado}}{L_{1-2} B m \sqrt{2g \times \frac{1}{2} (E_1 + E_2)}}$$

Ésta ecuación permite determinar la evolución del coeficiente de descarga a lo largo de la pantalla de efecto Coanda conforme circula el flujo sobre ella. Para facilitar la obtención de los valores de este parámetro y debido a que se tenían ya datos de profundidad y velocidad medidos en la pantalla, se realiza los cálculos de estos coeficientes en los mismos puntos que se habían indicado en el apartado de “campaña experimental” específicamente en la **Figura 23**: Detalle de los puntos en los que se realiza la toma de datos.

A continuación, se indican los resultados obtenidos de los coeficientes de descarga para cada una de las pantallas de efecto Coanda evaluadas en este trabajo experimental:

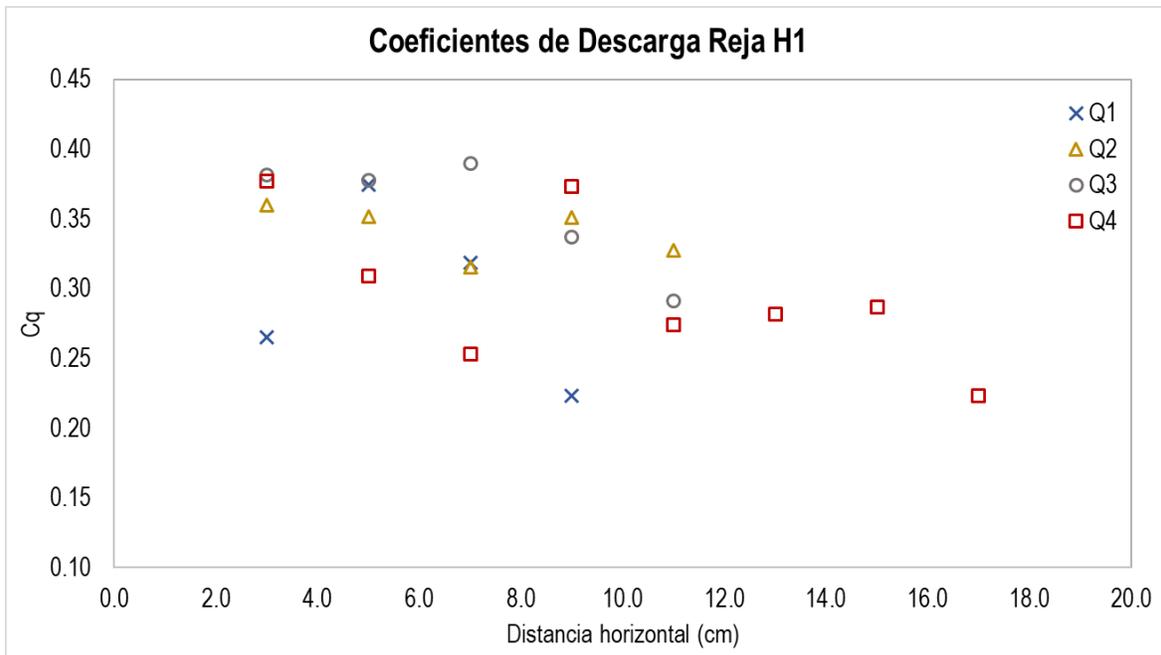


Figura 39: Resultados de coeficientes de descarga de las pruebas experimentales en la Reja H1

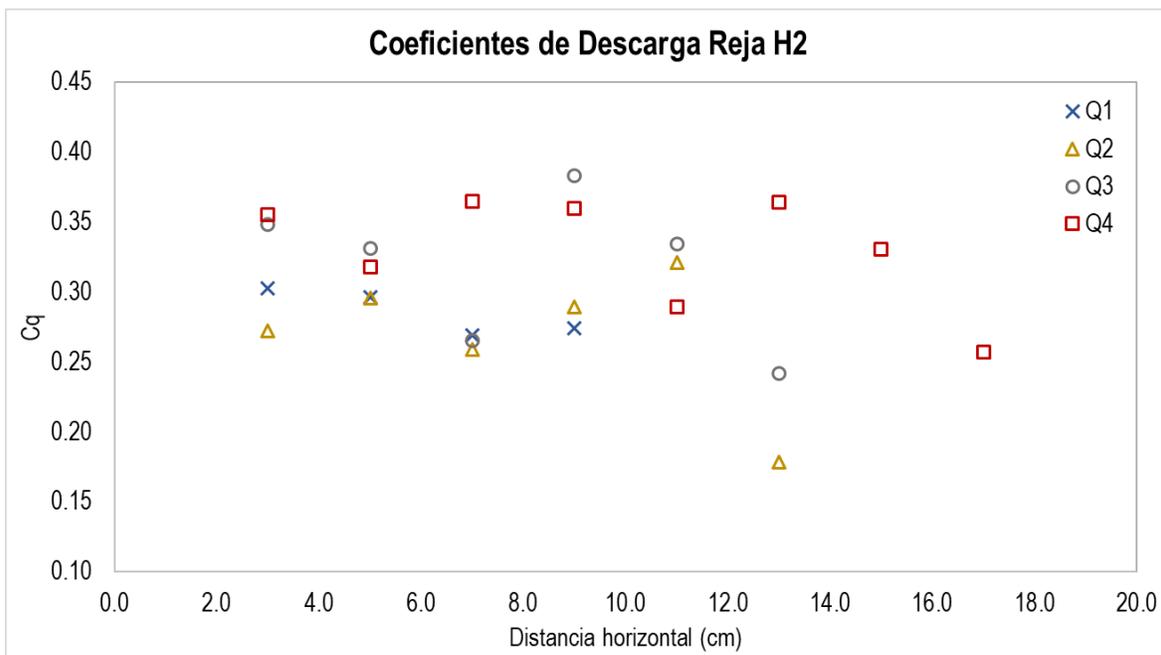


Figura 40: Resultados de coeficientes de descarga de las pruebas experimentales en la Reja H2

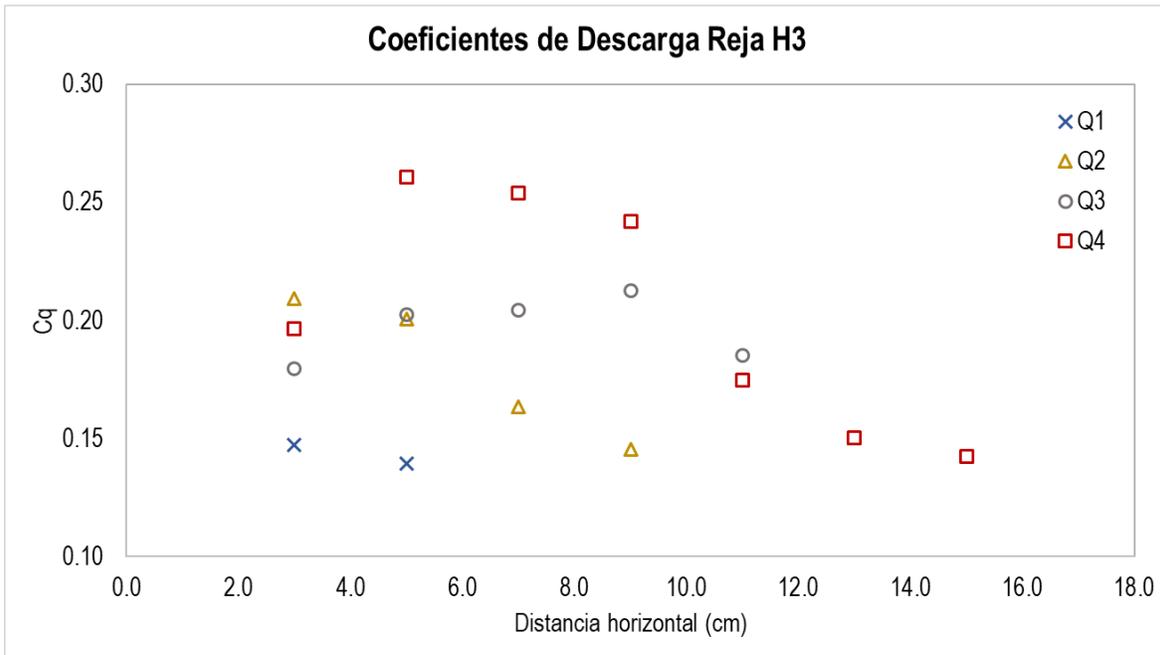


Figura 41: Resultados de coeficientes de descarga de las pruebas experimentales en la Reja H3

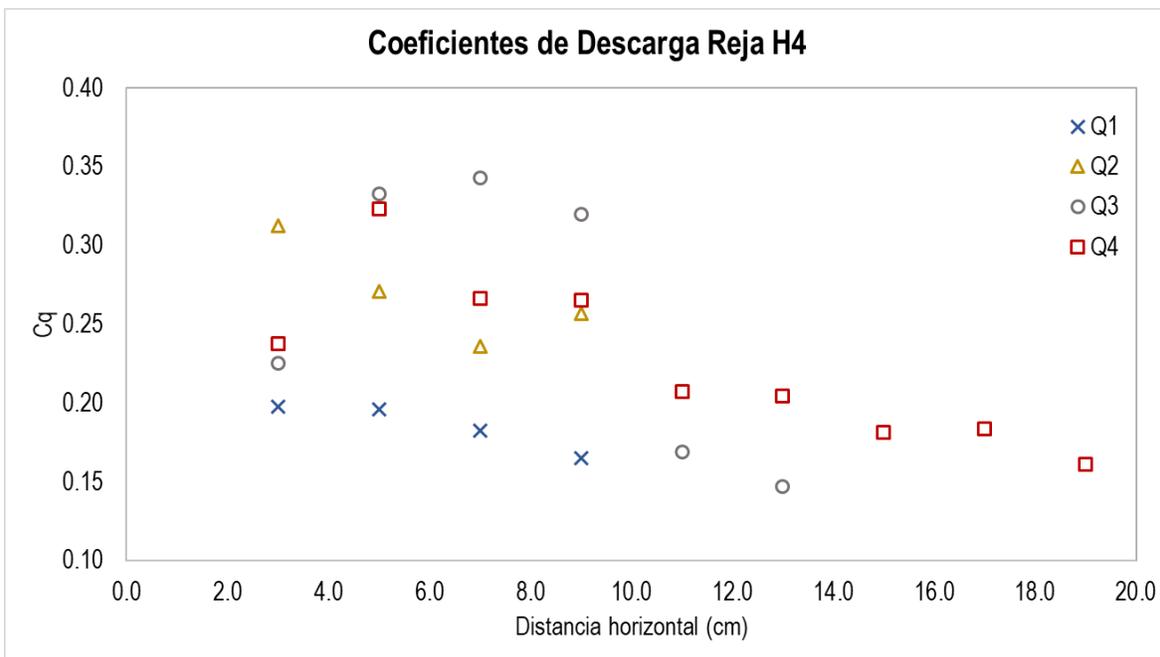


Figura 42: Resultados de coeficientes de descarga de las pruebas experimentales en la Reja H4

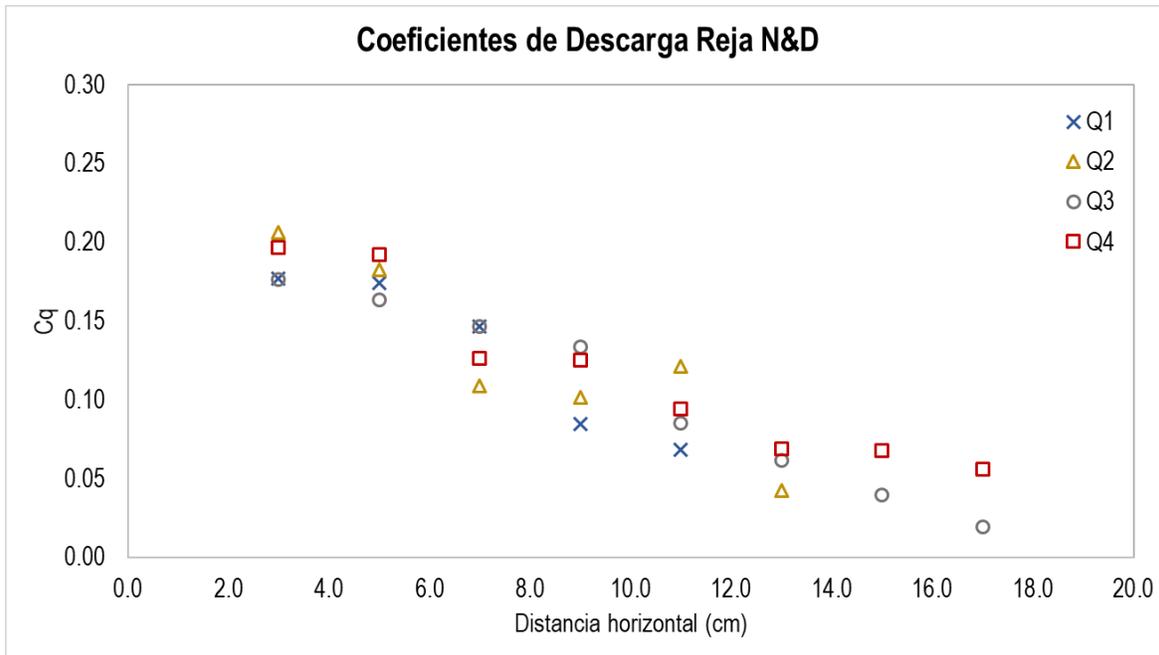


Figura 43: Resultados de coeficientes de descarga de las pruebas experimentales en la Reja N&D

Al observar los resultados nos damos cuenta que en ningún caso tienden a ser los coeficientes de descarga constantes y su tendencia es a disminuir conforme el flujo circula a lo largo de la pantalla de efecto Coanda, pero esto se debe a que como ya se ha mencionado anteriormente a diferencia de otros tipos de rejillas de fondo, en estas rejillas, el flujo captado por la misma y por ende su coeficiente de descarga responde a dos efectos físicos que se mezclan:

- Primero, la diferencia de presión creada por la lámina de agua en la parte superior de la rejilla respecto a la parte inferior hace que el flujo se derive a través de ella. Además, en cuanto menor es el índice de huecos (barras más juntas) se induce una mayor compresión del flujo que se adhiere a las barras y hace que el coeficiente de descarga para menores índices de huecos sea mayor, aunque al final al multiplicar por el índice de huecos el caudal derivado salga superior para rejillas con mayores índices de huecos con valores de coeficiente de descarga menores.
- Segundo, el parámetro y_{off} , que depende del ángulo de inclinación relativo de una barra sobre la siguiente, el ancho de la barra y la ranura entre barras, definen el filete de flujo que por efecto Coanda más esfuerzo cortante será retirado y captado hacia aguas abajo, en esto también influye el ángulo en V que da la forma a la barra.

En conclusión, el coeficiente de descarga a la final es una combinación de estos dos efectos en los que a su vez influyen diversos parámetros físicos y geométricos.

A continuación, se indica el esquema de algunos de los parámetros que influyen de forma combinada en el cálculo del coeficiente de descarga:

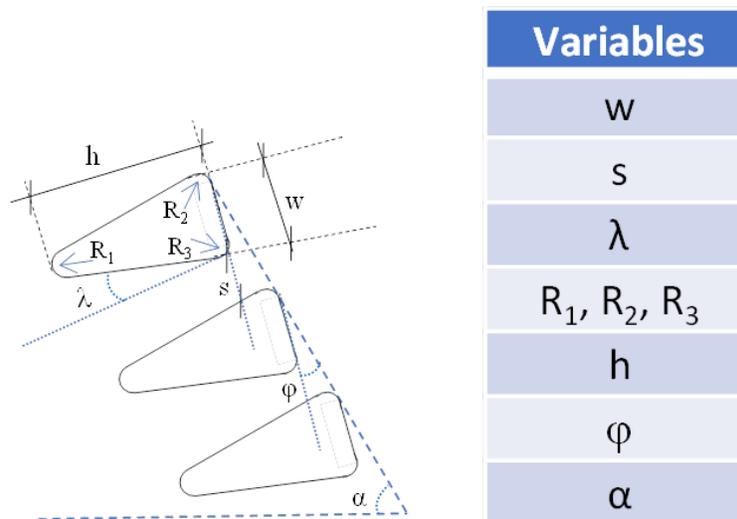


Figura 44: Esquema de los parámetros que influyen en la obtención del coeficiente de descarga de una reja con efecto Coanda

9. CONCLUSIONES

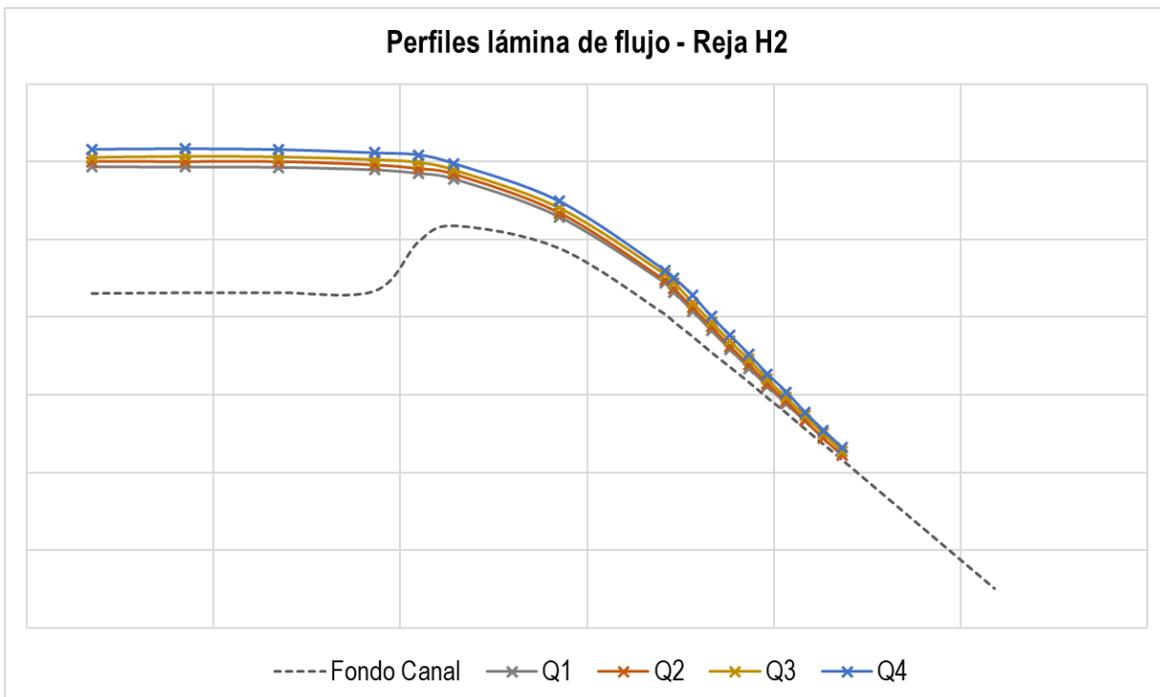
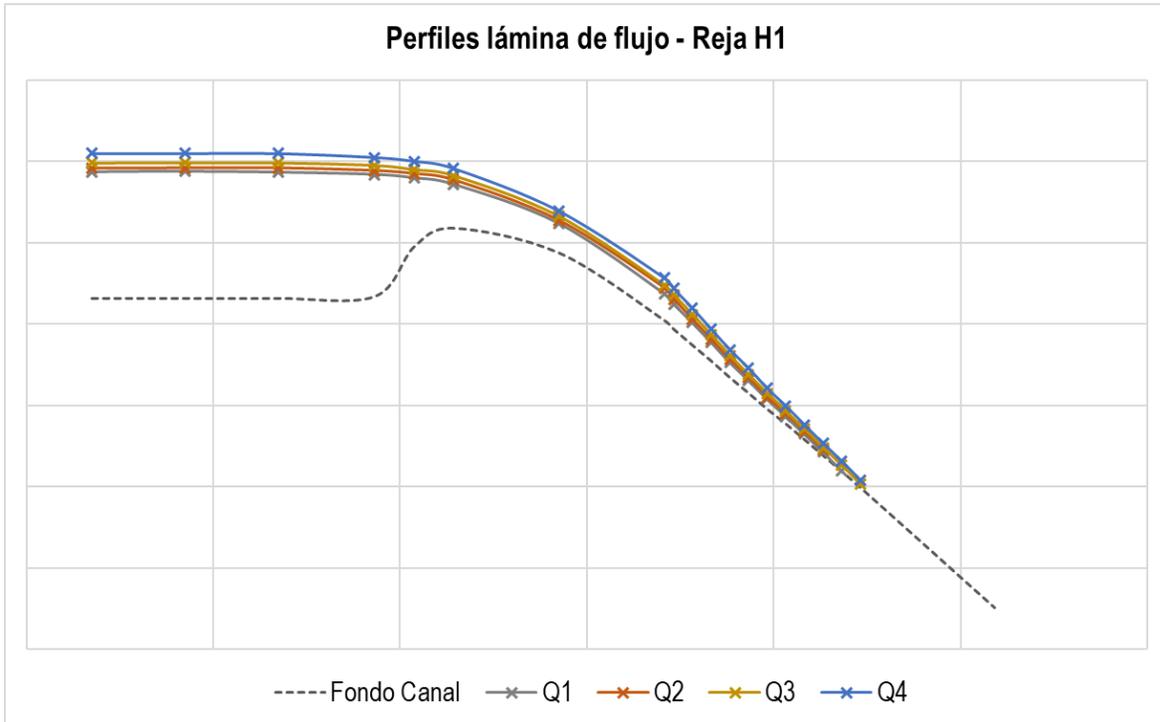
- Se comprueba que los resultados obtenidos tanto en la campaña experimental como con el uso de la herramienta computacional COANDA tienen estrecha semejanza.
- Este estudio nos permite dimensionar geoméricamente la longitud máxima de reja que poseería una pantalla de efecto Coanda para cierto caudal de operación y también cuál de las geometrías de las barras posee mayor capacidad para captar un caudal dado, consiguiendo de esta manera la optimización del tamaño de la estructura hidráulica.
- De todas las pantallas ensayadas la que posee menor capacidad hidráulica es la denominada N&D esto debido a que las barras no poseen ángulo de inclinación lo que afecta que se dé el componente de flujo por corte, existiendo únicamente en la pantalla flujo que circula por la componente de orificio y esto reduce drásticamente la capacidad de la misma, a la vez que genera flujo de derivación lo que no sucede con las pantallas en las que sus barras si tienen ángulo de inclinación.
- En cuanto a las longitudes mojadas que requieren las pantallas para captar cierto caudal dado, se evidencia que la más eficaz es la pantalla H3, esto puede deberse a que esta pantalla posee el ancho de ranura entre barras más grande de todas las pantallas ensayadas lo que a su vez generaría que aumente el flujo por orificio. Esto le permite a esta pantalla en menor longitud captar igual caudal en comparación con las otras, y esto a su vez se traduce en que es la pantalla con mayor capacidad hidráulica.
- Son necesarios futuros experimentos de campo y laboratorio para continuar caracterizando este tipo de pantallas prometedoras en la remoción de contaminantes de las aguas pluviales, sobre todo con el uso de los contaminantes que podrían encontrarse en este tipo de aguas.

10. BIBLIOGRAFÍA

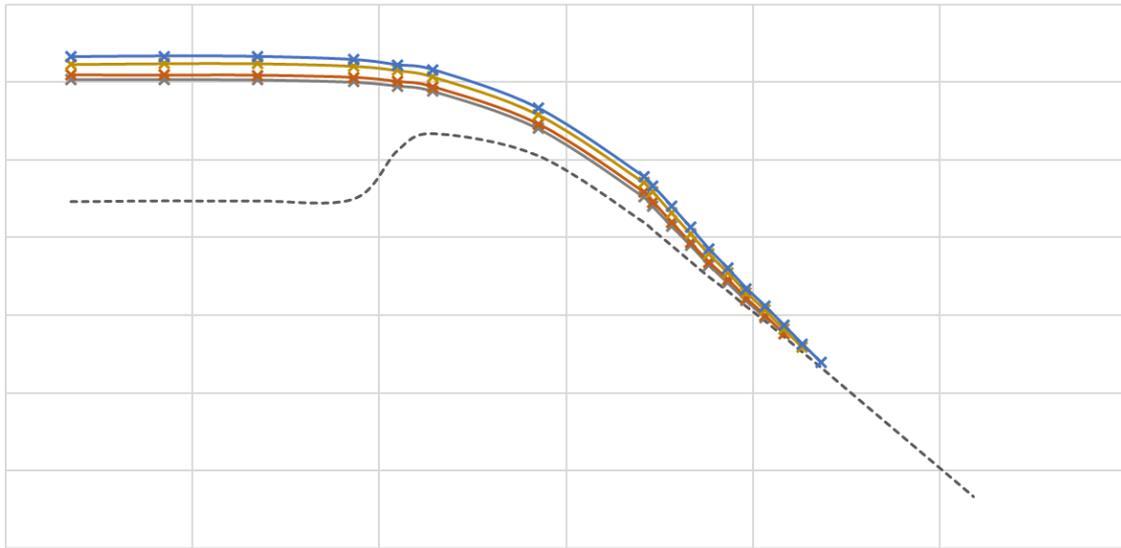
- Buer, N., & Selbig, W. (2020). Evaluation of Stormwater Treatment Vault with Coanda-Effect Screen for Removal of Solids and Phosphorus in Urban Runoff. *Journal of Sustainable Water Built Environ. ASCE*, 10.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Espinoza Llanos, J. (2017). El efecto Coanda. *Revista de Marina* N° 957, 56-59.
- García, J., Castillo, L., & Carrillo, J. (22). Experimental analysis of Coanda-effect bottom screens efficiency with clear water and suspended solids. *IAHR World Congress*, (pág. 8). Granada.
- Miranda Orellana, C., & Vaca Castro, I. (2012). Análisis experimental de la captación "Tipo Coanda" con el uso de materiales locales. Tesis de Fin de Estudios, previo a la obtención del Grado de Ingeniero Civil, Sangolquí.
- Sotelo Ávila, G. (1997). *Hidráulica General (Vols. 1 - Fundamentos)*. México D.F., México: LIMUSA S.A.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales (Primera ed.)*. México, D.F., México: UNAM.
- Wahl, T. (1995). Hydraulic Testing of Static Self-Cleaning Inclined Screens. *The First International Conference on Water Resources Engineering*, (pág. 6). San Antonio, Texas.
- Wahl, T. (2001). Hydraulic Performance of Coanda-Effect Screens. *Journal of Hydraulic Engineering*, 9.
- Wahl, T. (2003). *Design Guidance for Coanda-Effect Screens*. United States Department of the Interior , Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Wahl, T. (2013). New Testing of Coanda-Effect Screen Capacities. *HydroVision International*, 14.
- Wahl, T., & Einhellig, R. (2000). Laboratory Testing and Numerical Modeling of Coanda-Effect Screens. *Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management*, (pág. 10). Minneapolis.

ANEXO
RESULTADOS PRUEBAS EXPERIMENTALES

PERFILES DE FLUJO

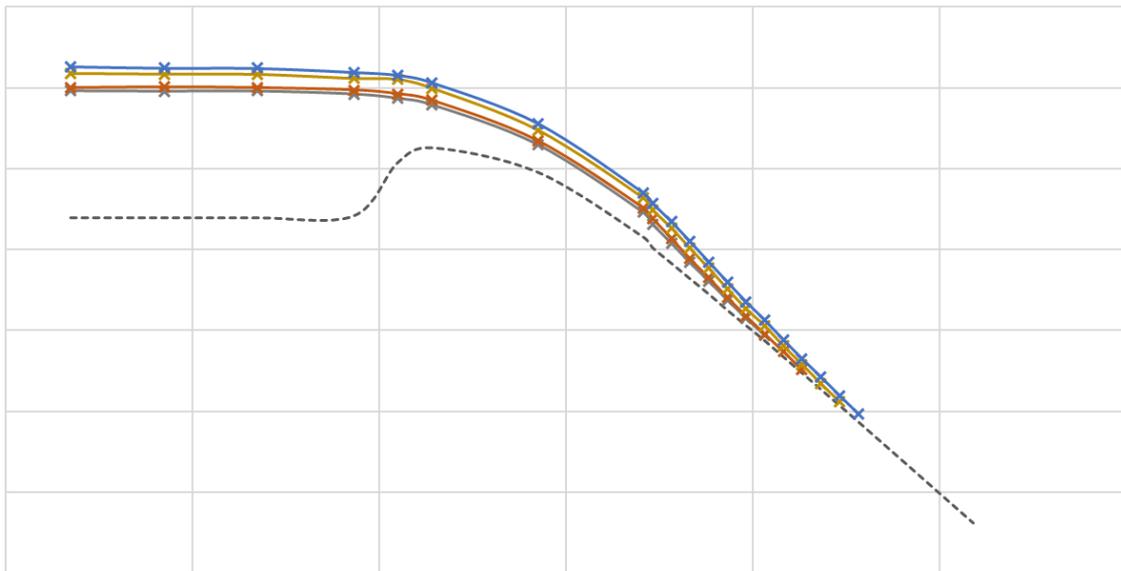


Perfiles lámina de flujo - Reja H3

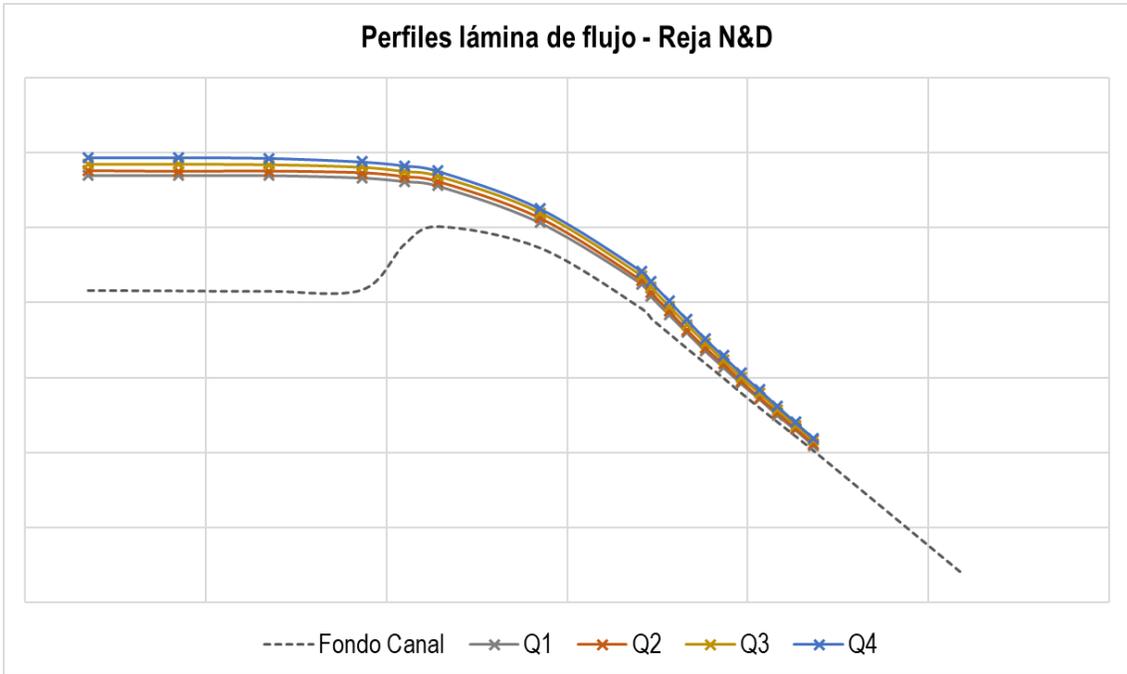


-----Fondo Canal × Q1 × Q2 × Q3 × Q4

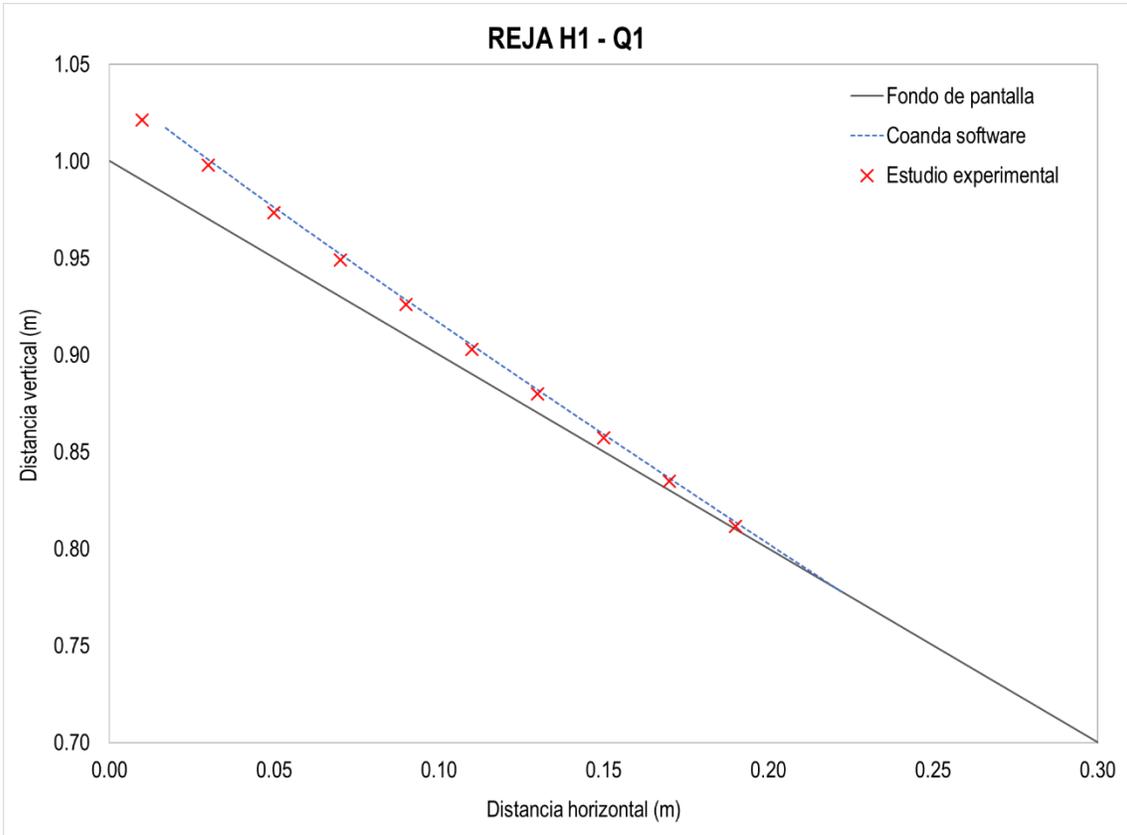
Perfiles lámina de flujo - Reja H4

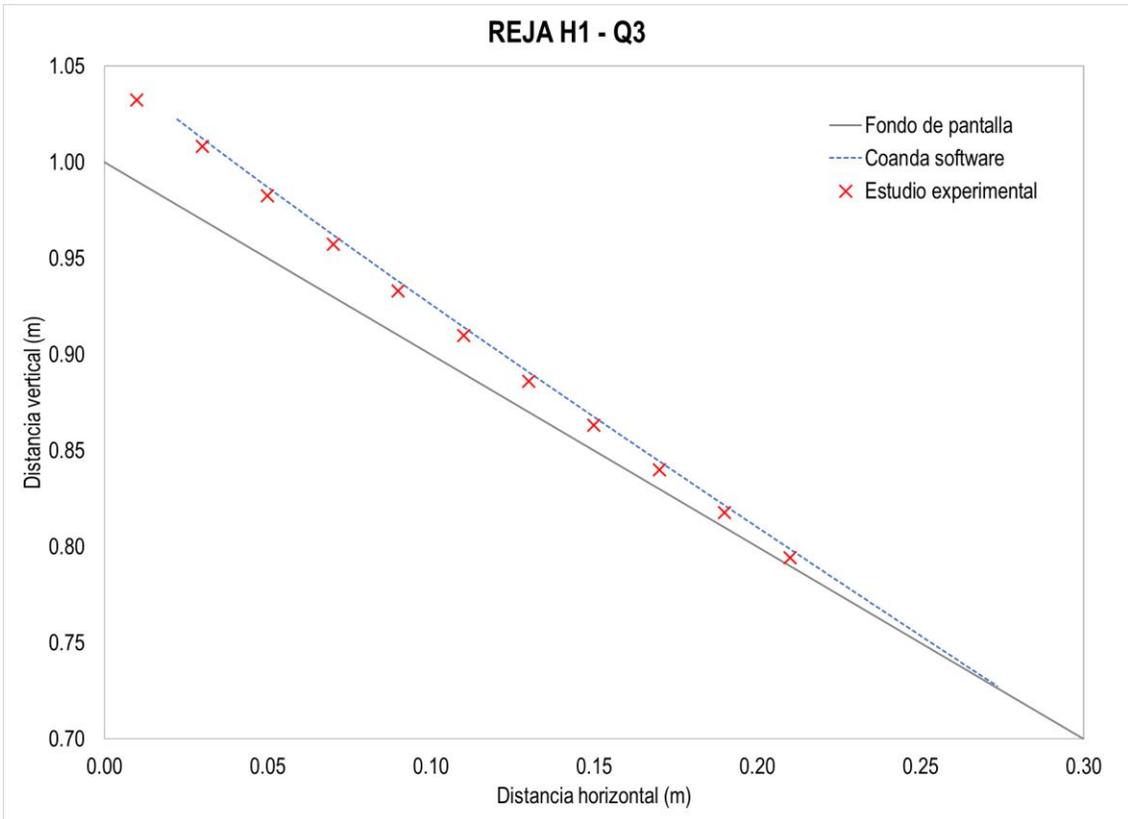
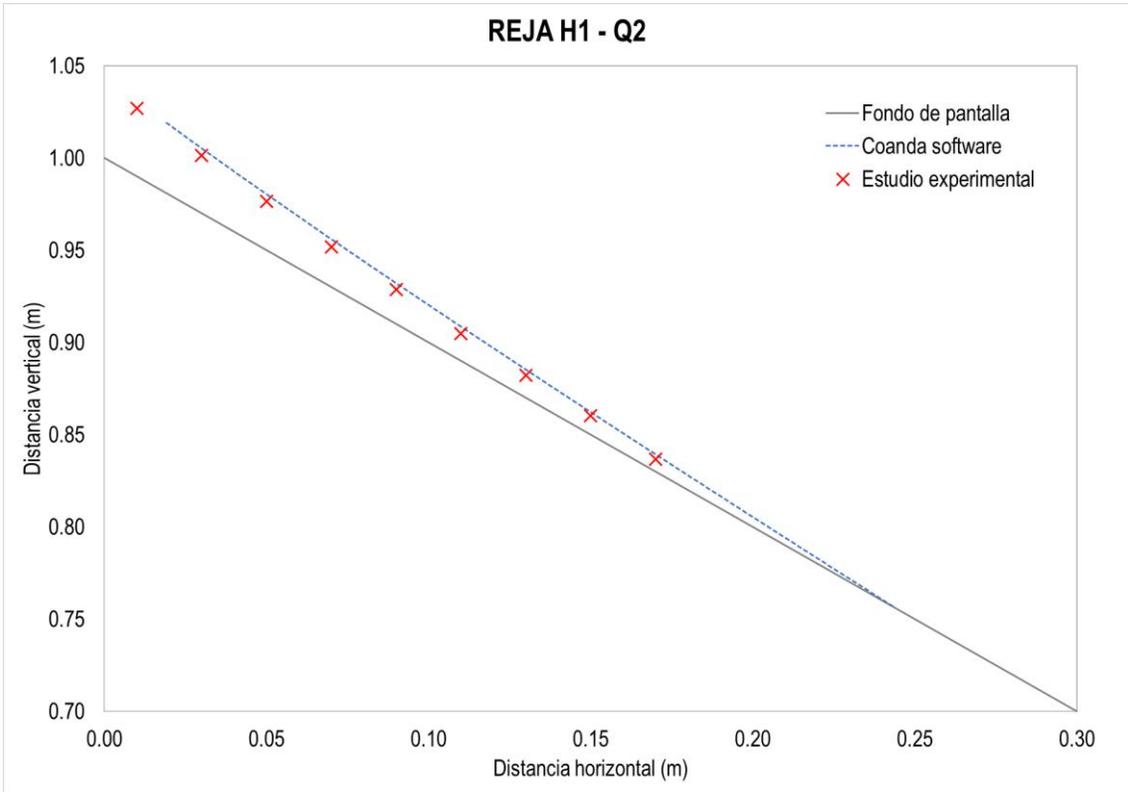


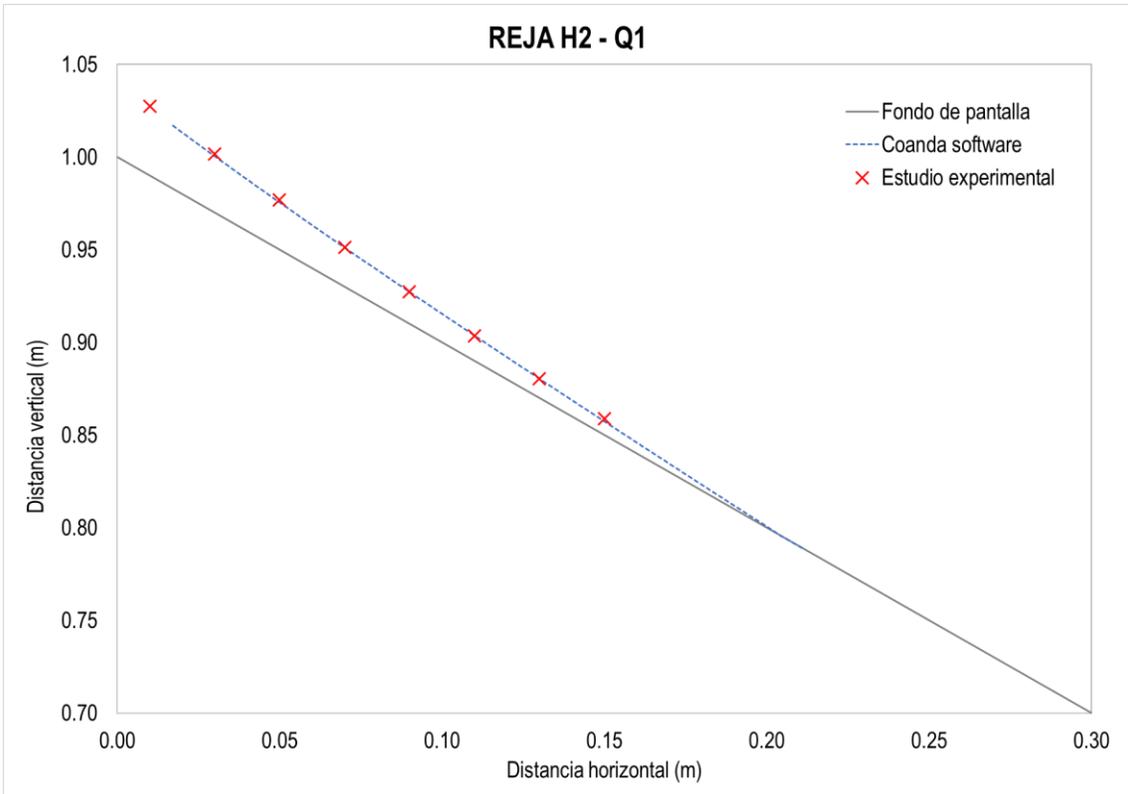
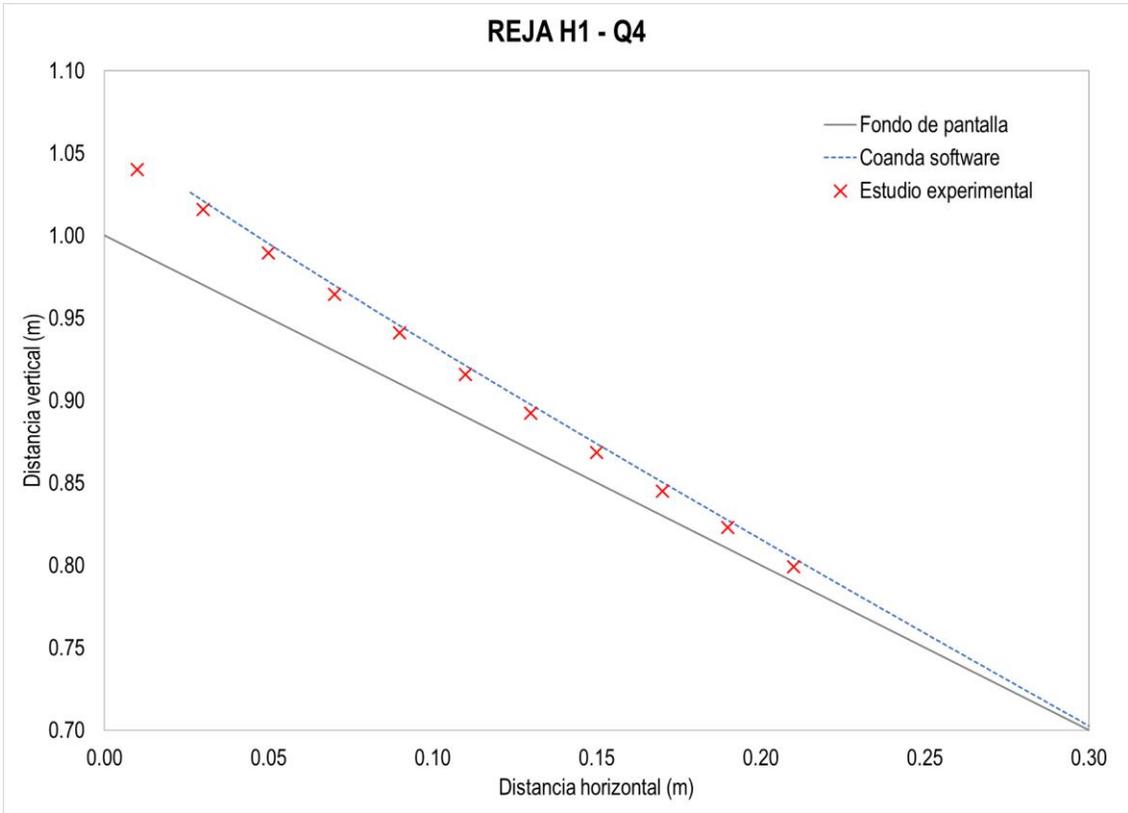
-----Fondo Canal × Q1 × Q2 × Q3 × Q4

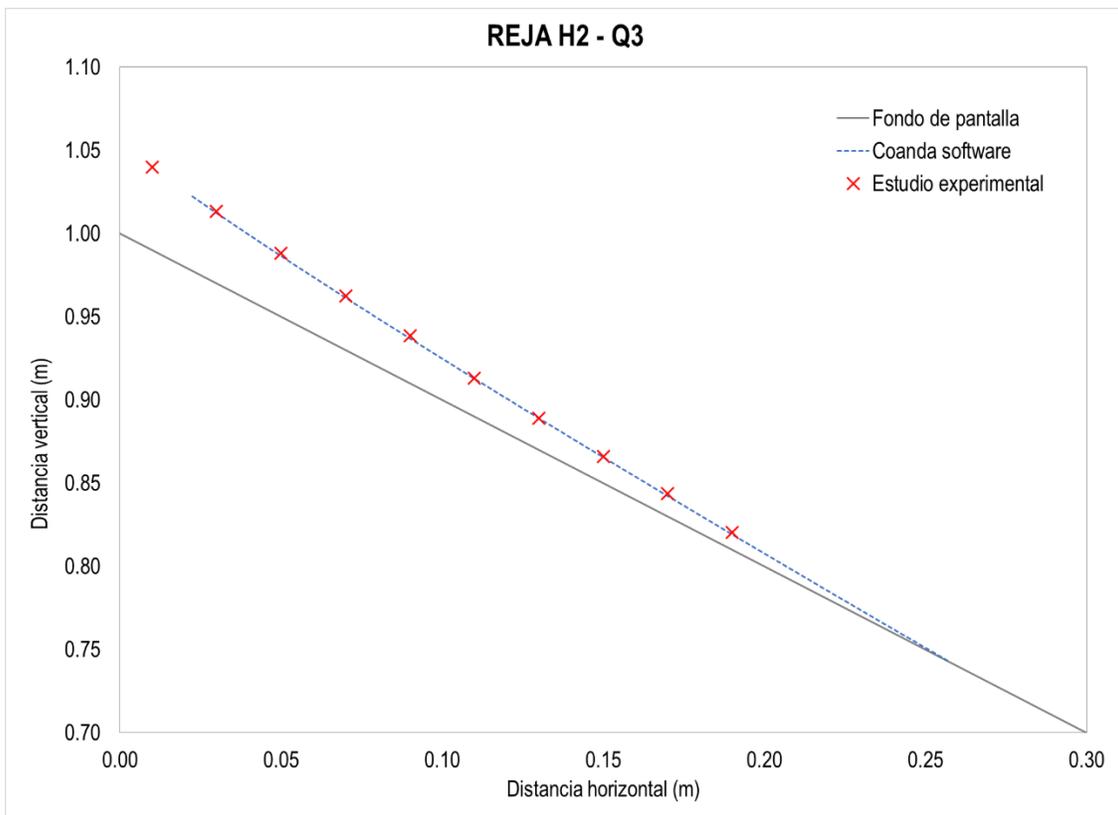
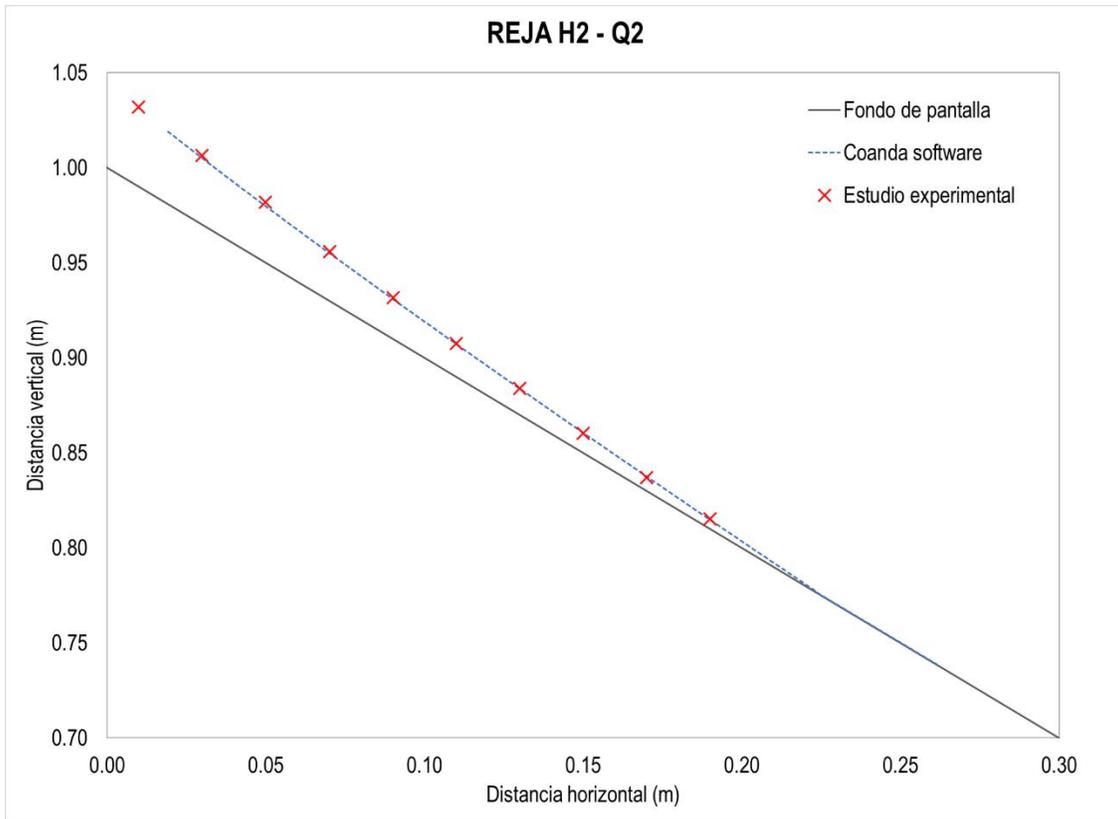


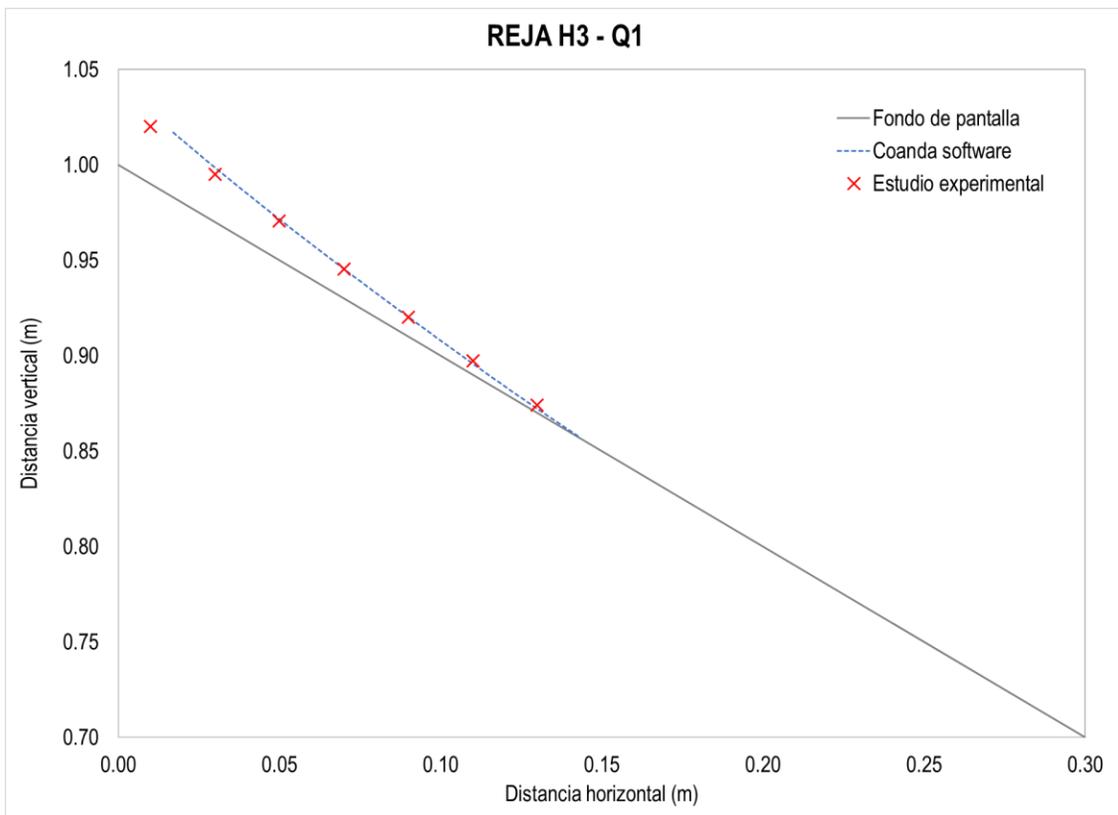
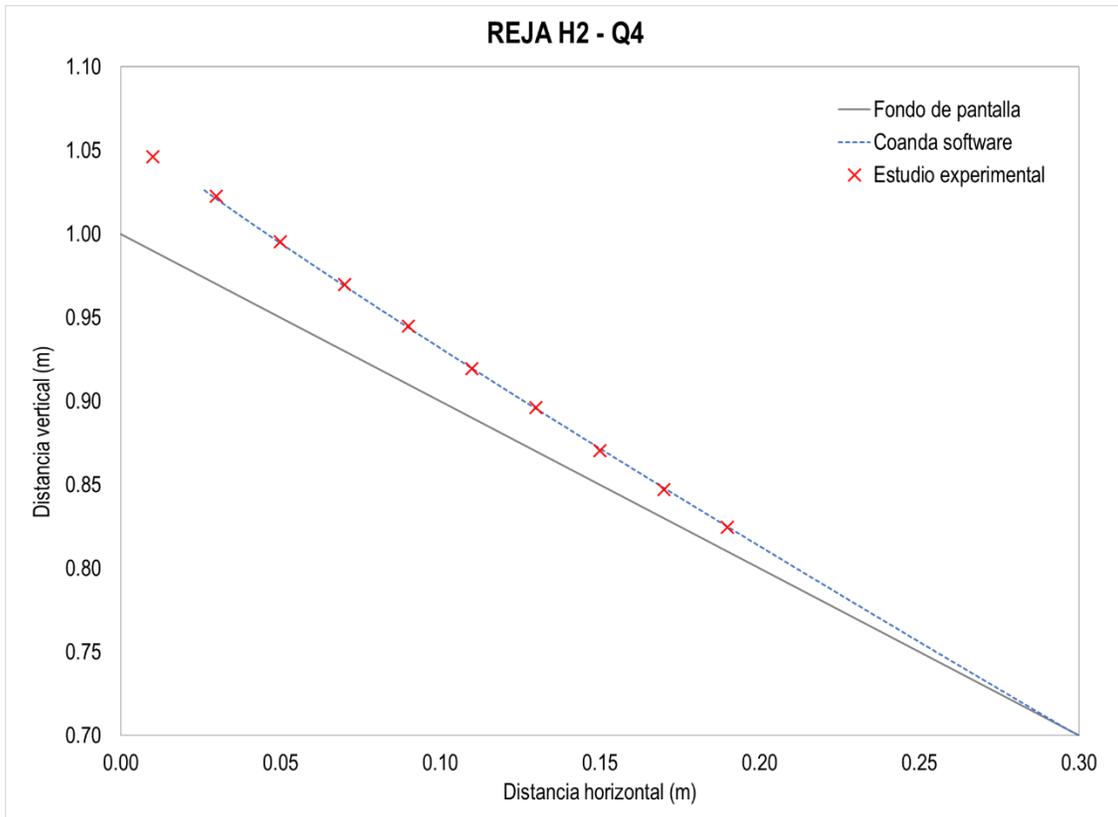
COMPARACIÓN DE PERFILES DE FLUJO

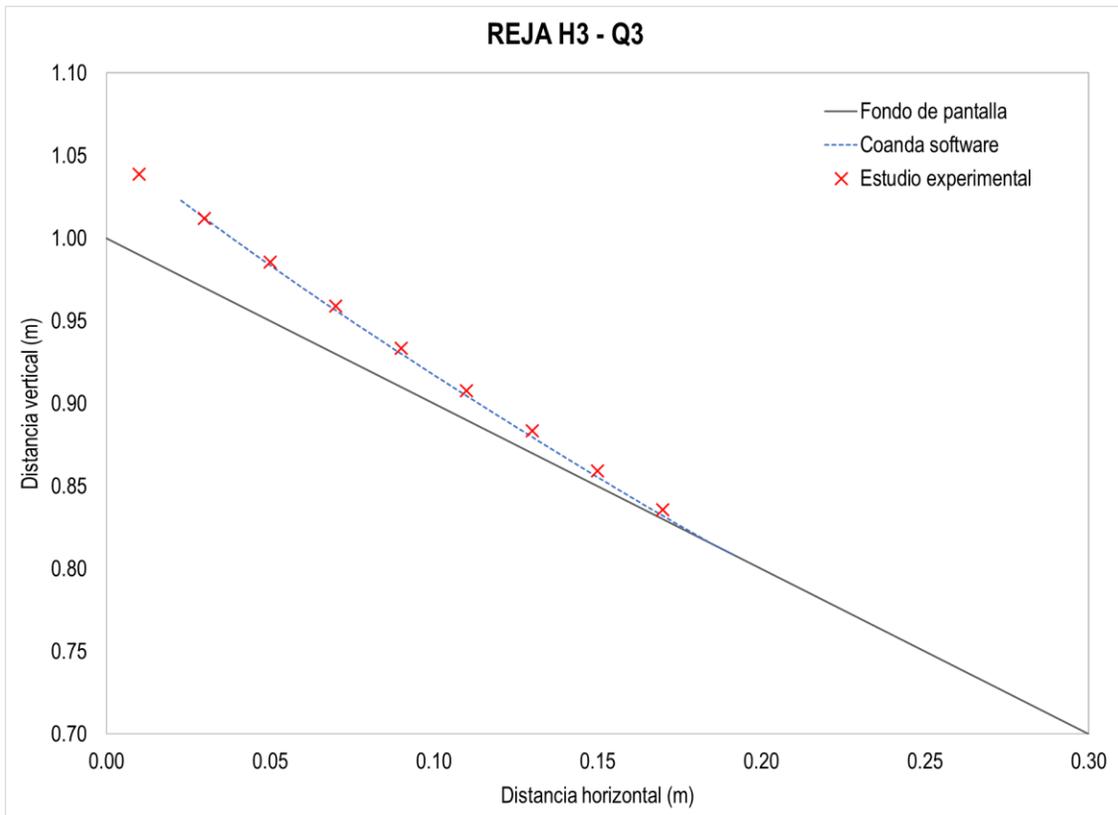
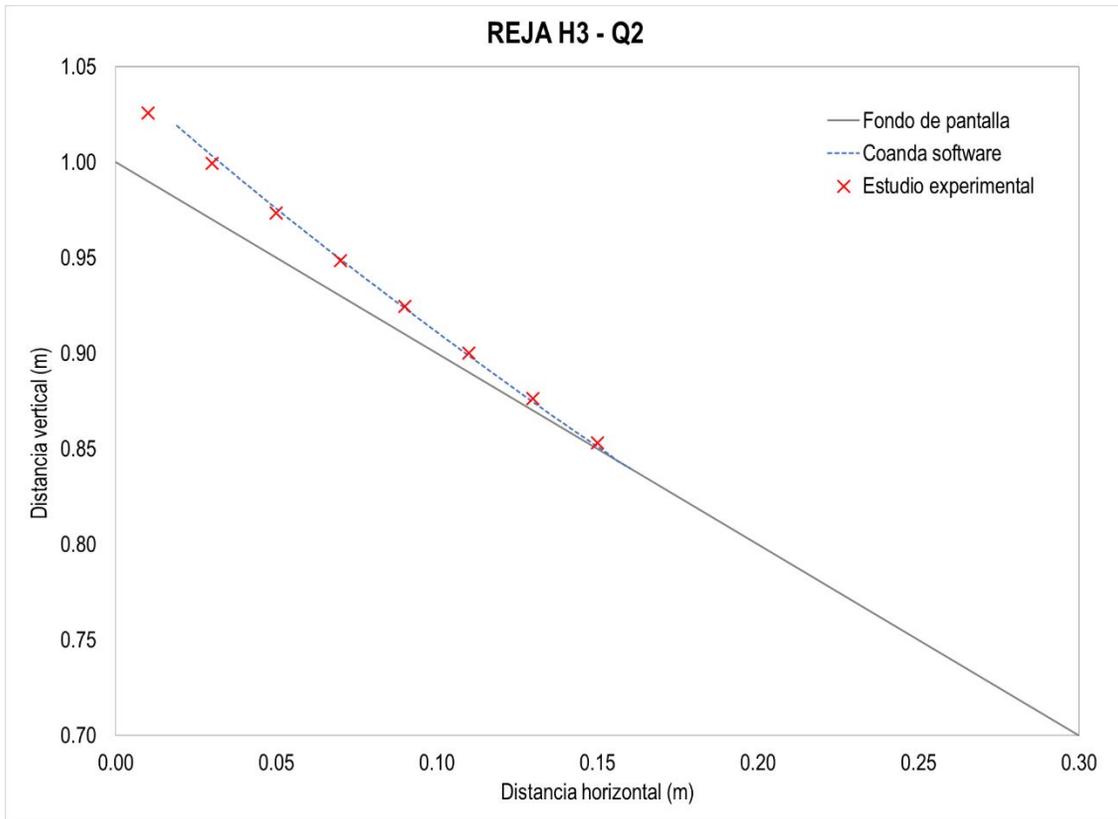


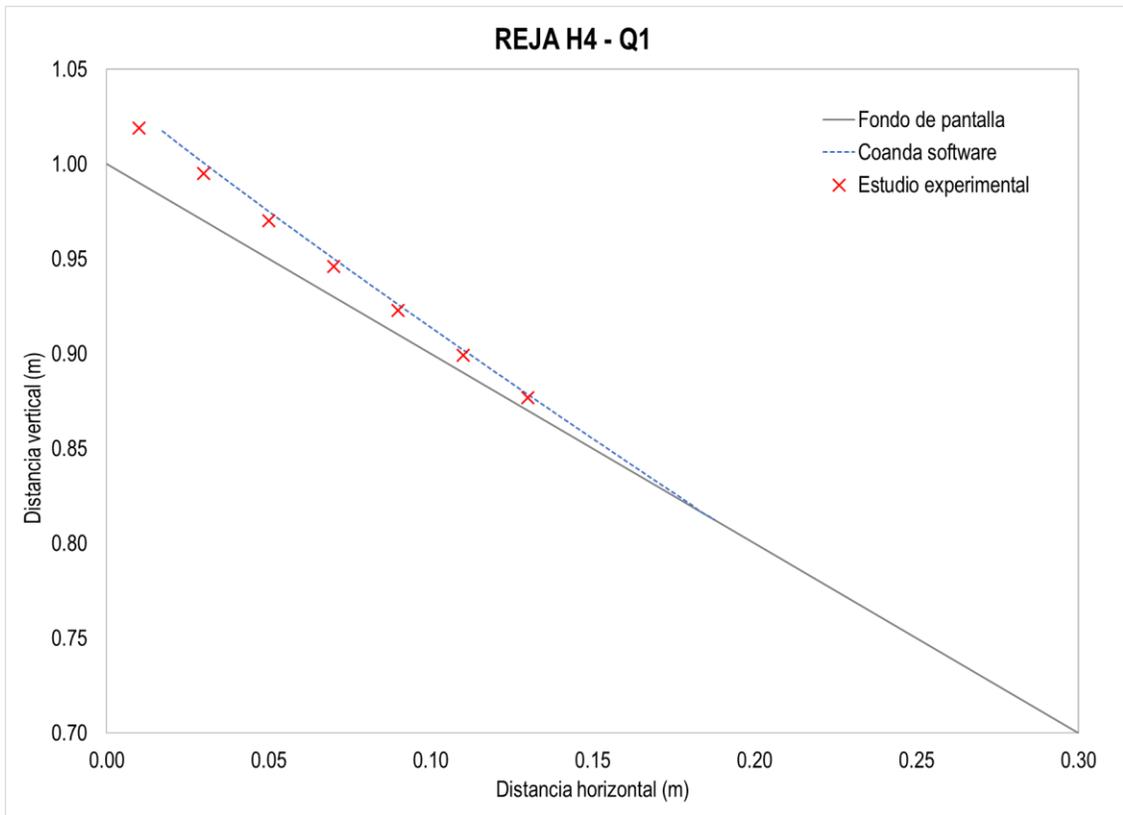
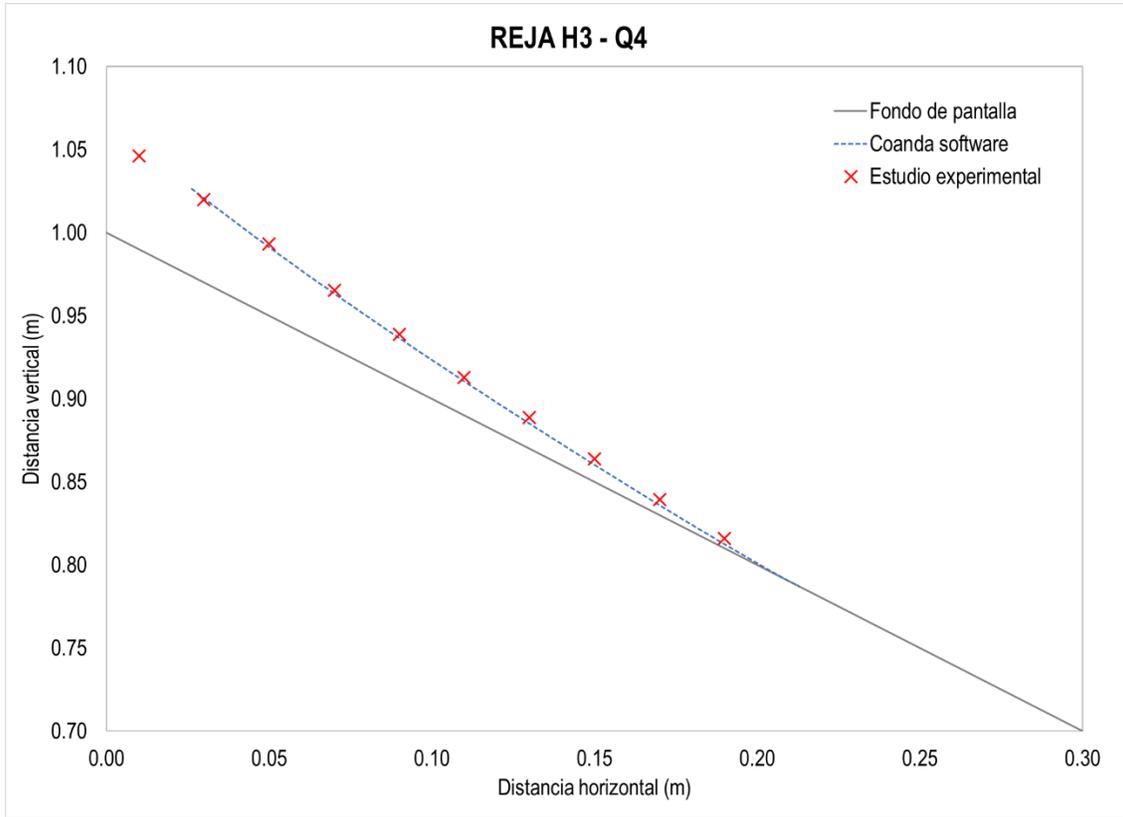


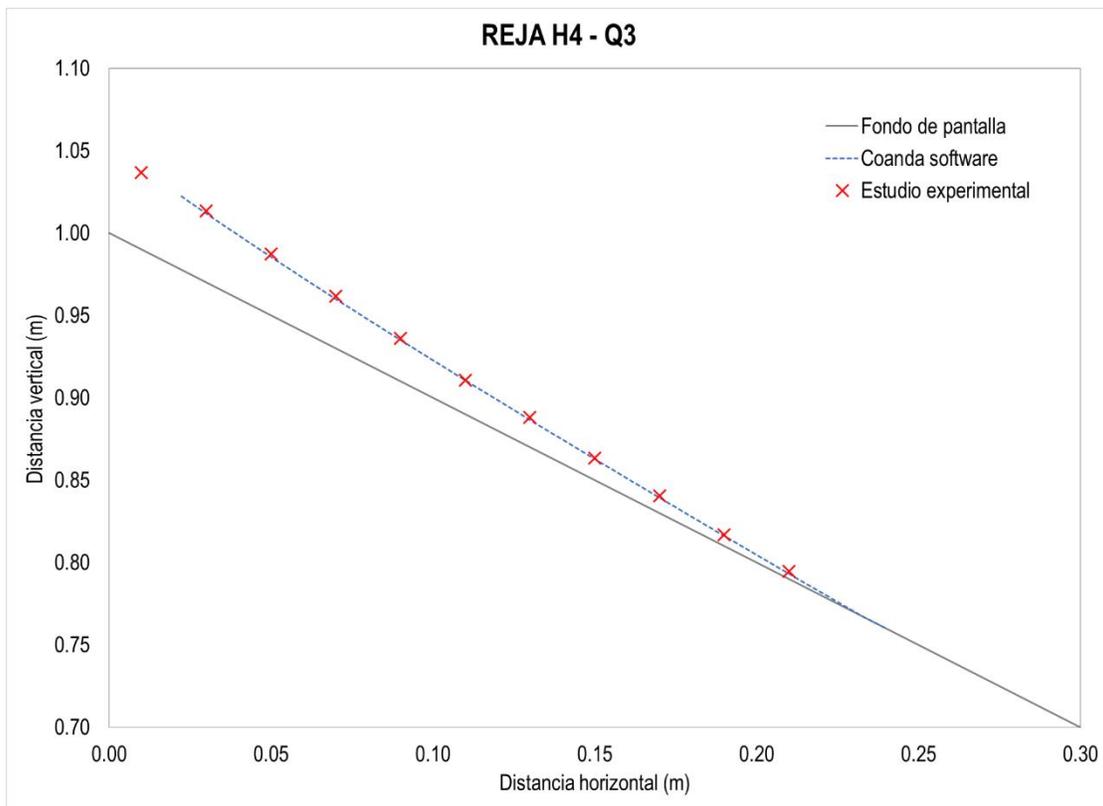
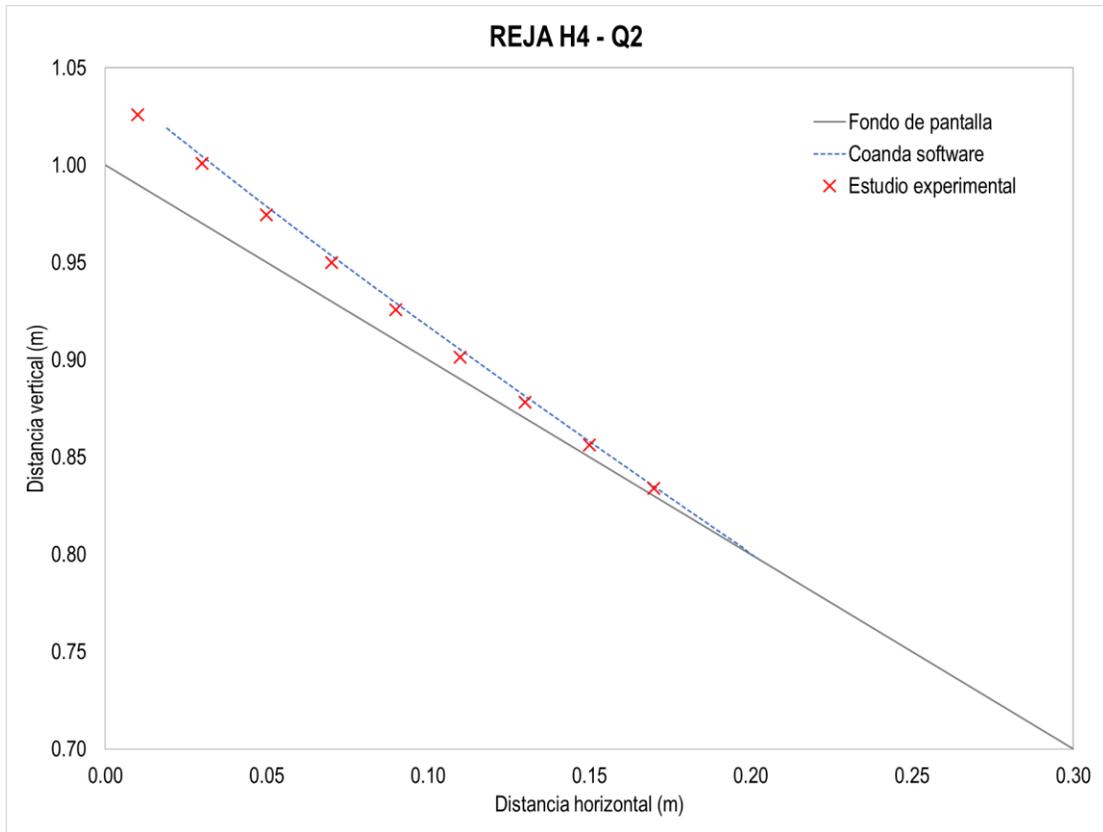


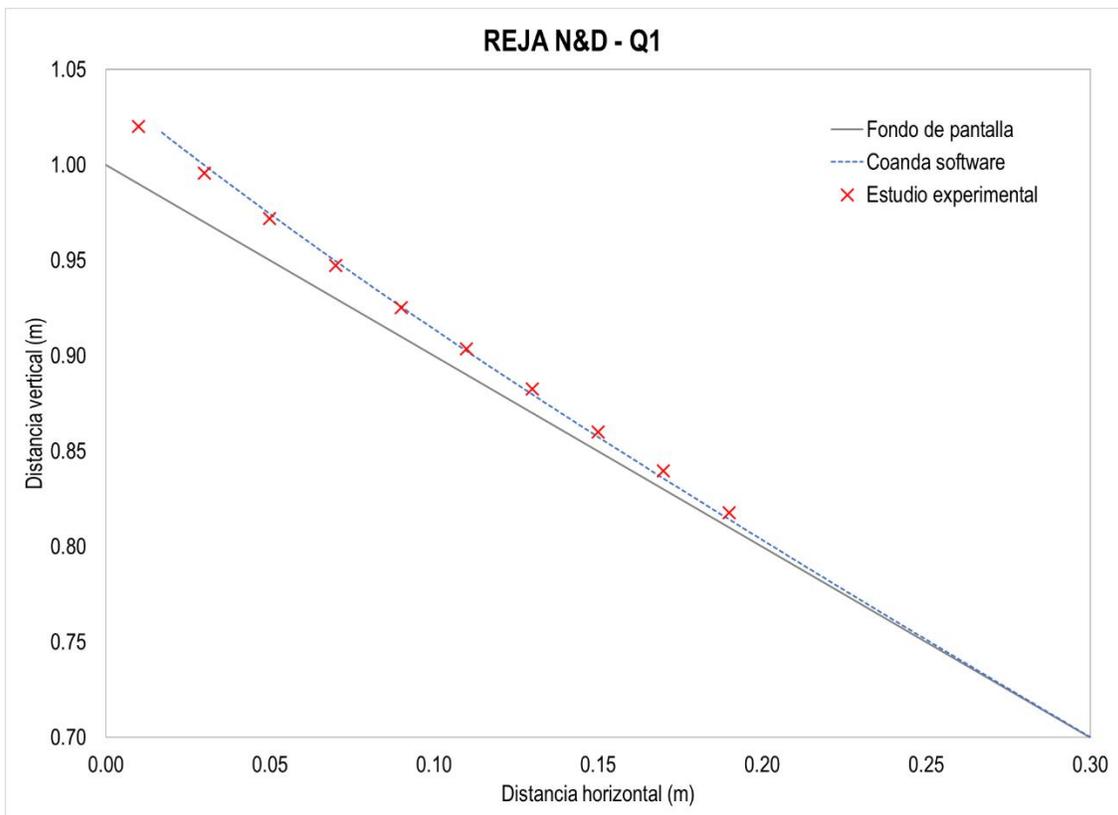
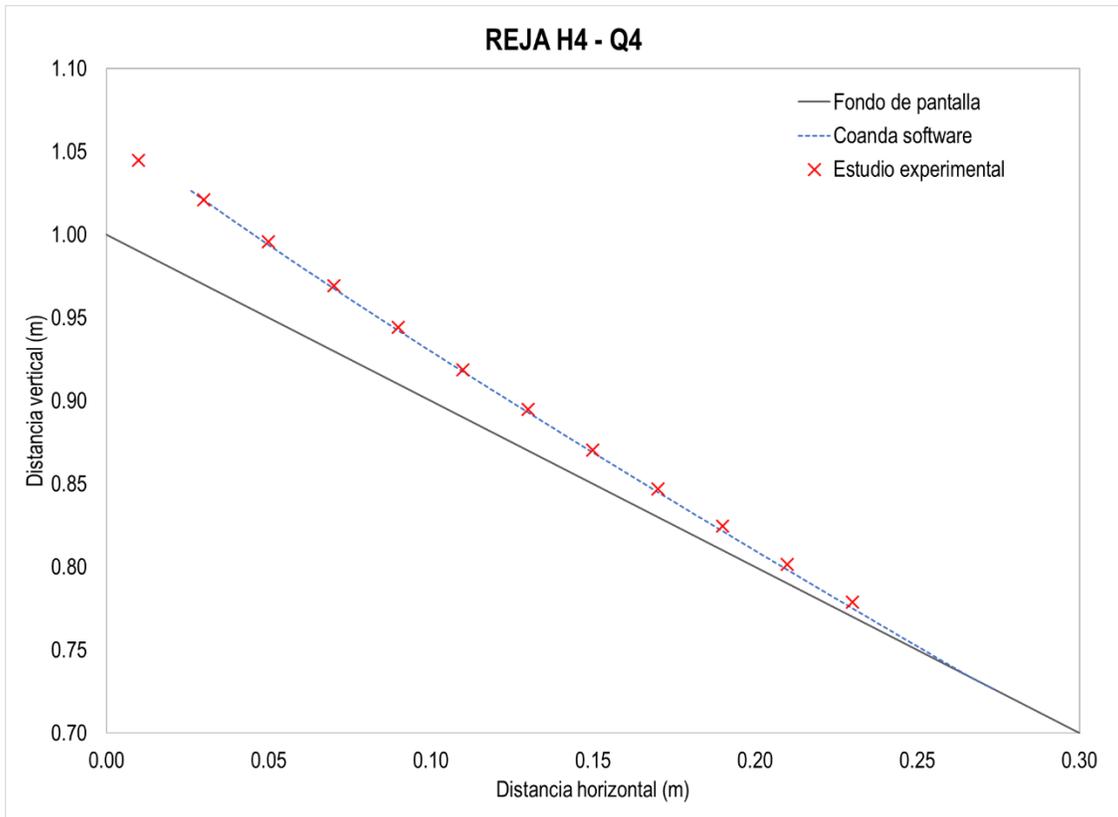


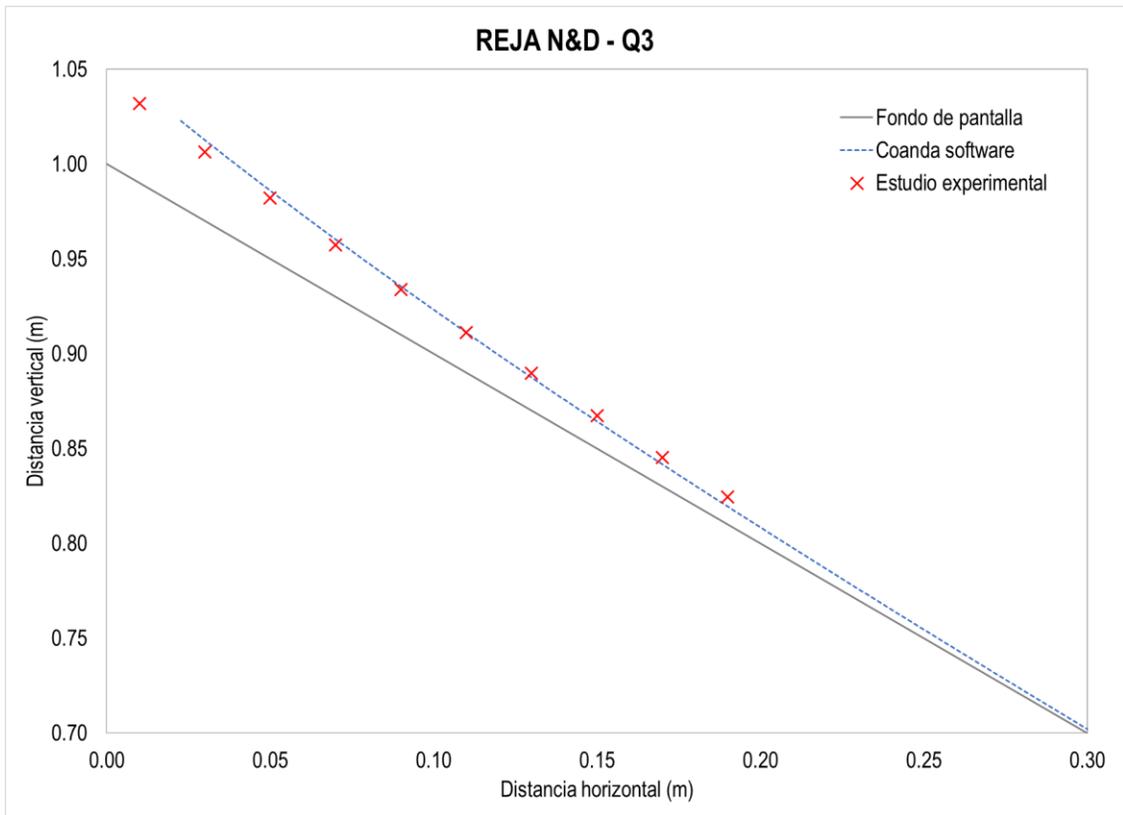
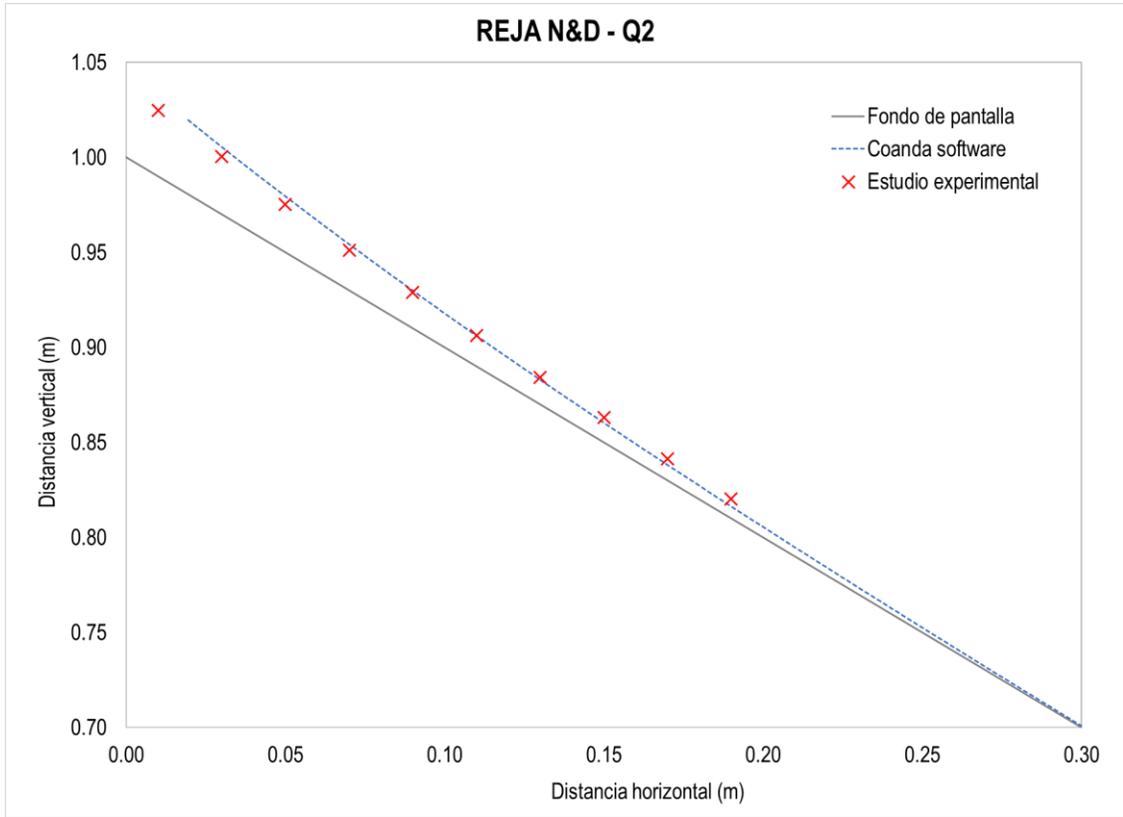


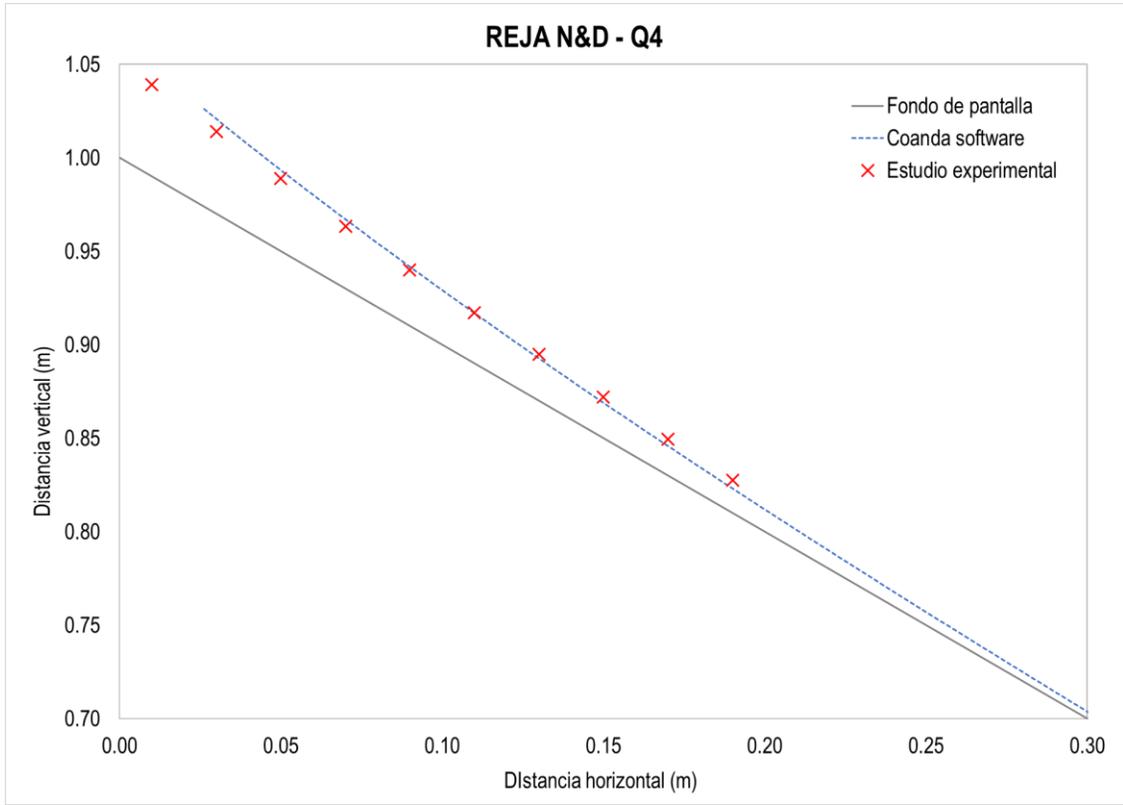












COMPARACIÓN DE PERFILES DE VELOCIDAD

