

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**Comportamiento del coeficiente de pérdida de carga en las cámaras de
entrada y salida en sifones invertidos, Chiclayo, 2023**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

AUTOR

Nelson Joel Adrianzen Rivera

ASESOR

Wilmer Moises Zelada Zamora

<https://orcid.org/0000-0002-6064-7506>

Chiclayo, 2026

**Comportamiento del coeficiente de pérdida de carga en las cámaras
de entrada y salida en sifones invertidos, Chiclayo, 2023**

PRESENTADA POR

Nelson Joel Adrianzen Rivera

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO CIVIL

APROBADA POR

Luis Alberto Vidal Meza

PRESIDENTE

Pablo Adolfo Humberto Valdivia Chacon

SECRETARIO

Wilmer Moises Zelada Zamora

VOCAL

Dedicatoria

A mis padres y a mi hermana, por su amor incondicional y su inquebrantable apoyo a lo largo de este camino. Sus sabios consejos y valiosas enseñanzas me han guiado hasta este momento, y sin ustedes, este logro no habría sido posible. A mis amigos, quienes me han acompañado y alentado en cada paso de mi etapa universitaria. A ustedes, les dedico esta tesis con profunda gratitud, y desde el fondo de mi corazón, gracias por estar siempre a mi lado. Y a mí mismo, por no rendirme nunca, por superar cada desafío y seguir adelante con determinación.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres y a mi hermana, quienes, con su apoyo incondicional y sacrificios constantes, han sido el pilar que me ha permitido alcanzar este importante hito en mi formación profesional. Su dedicación y confianza han sido esenciales en cada etapa de este camino.

A la Universidad Santo Toribio de Mogrovejo por proporcionarme los recursos y el entorno necesarios para llevar a cabo esta investigación.

Finalmente, extiendo mi sincero agradecimiento al ingeniero Wilmer Moises Zelada Zamora, mi asesor de tesis, por su valiosa orientación y apoyo constante a lo largo del proceso.

Comportamiento del coeficiente de pérdida de cargas en la cámara de entrada y salida en sifones invertidos, 2023.pdf

INFORME DE ORIGINALIDAD

17 %	16 %	3 %	5 %
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	es.scribd.com Fuente de Internet	2 %
2	idoc.pub Fuente de Internet	2 %
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	2 %
4	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	1 %
5	www.coursehero.com Fuente de Internet	1 %
6	www.dhi-es.com Fuente de Internet	1 %
7	vdocumento.com Fuente de Internet	<1 %
8	vsip.info Fuente de Internet	<1 %

Índice

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
Revisión de la literatura	13
Materiales y métodos	42
Resultados	79
Discusión	100
Conclusiones	104
Recomendaciones	105
Referencias	106
Anexos	108
Planos	108

Lista de figuras

Fig. 1. Sifón de ramas oblicuas según [10].....	16
Fig. 2. Perfil de sifón de ramas oblicuas según [10]	16
Fig. 3. Sifón de pozo vertical según [10].....	17
Fig. 4. Perfil de sifón de pozo vertical según [10]	17
Fig. 5. Sifón de pozo vertical según [10].....	17
Fig. 6. Perfil de sifón de pozo vertical según [10]	18
Fig. 7. Sifón con cámaras de limpieza según [10]	18
Fig. 8. Perfil del sifón con cámaras de limpieza según [10].....	18
Fig. 9. Elementos del sifón invertido según [11]	19
Fig. 10. Pérdidas de carga en el sifón invertido según [12].....	20
Fig. 11. Pérdida de carga en la cámara de entrada del sifón invertido según [12].....	22
Fig. 14. Plano de perfil del modelo del sifón invertido	50
Fig. 15. Vista en planta de la cámara de entrada.....	50
Fig. 16. Vista en planta de la cámara de salida	50
Fig. 17. Vista en perfil de la cámara de salida	51
Fig. 18. Vista en perfil de la cámara de entrada	51
Fig. 19. Vista posterior de la cámara de salida	51
Fig. 20. Vista en elevación de la cámara de entrada	52
Fig. 21. Modelo en 3D de la cámara de Entrada.....	52
Fig. 22. Vista en 3D de la cámara de salida.....	53
Fig. 23. Vista en 3D del modelo de sifón invertido.....	53
Fig. 24. Vista en planta de la cámara de entrada.....	54
Fig. 25. Vista en perfil de la cámara de entrada.....	54
Fig. 26. Vista frontal de la cámara de entrada.....	54
Fig. 27. Vista en planta de la cámara de salida	55
Fig. 28. Vista en perfil de la cámara de salida	55
Fig. 29. Vista frontal de la cámara de salida.....	55
Fig. 30. Ubicación de los puntos de pérdida de carga	56
Fig. 31. Modelo hidráulico ensamblado	56
Fig. 32. Cámara de entrada del modelo hidráulico	56
Fig. 33. Cámara de salida del modelo hidráulico.....	57
Fig. 34. Tubos piezométricos de medición para las pérdidas de carga.....	57
Fig. 35. Altura del tirante en la cámara de entrada.....	64
Fig. 36. Área mojada en las cámaras.....	65
Fig. 37. Variación de carga hidráulica en la entrada y punto de control	75
Fig. 38. Variación de carga hidráulica en la carga de salida y punto de control	76
Fig. 39. Pérdidas de carga en la cámara de entrada con revestimiento de fibra de vidrio (Caudal vs ke)	85
Fig. 40. Pérdidas de carga en la cámara de salida con revestimiento de fibra de vidrio (Caudal vs ks).....	85
Fig. 41. Pérdidas de carga en la cámara de entrada con revestimiento de PVC (Caudal vs ke)	86
Fig. 42. Pérdidas de carga en la cámara de salida con revestimiento de PVC (Caudal vs ks) .	86
Fig. 43. Pérdidas de carga en la cámara de entrada con revestimiento de concreto (Caudal vs ke).....	87

Fig. 44. Pérdidas de carga en la cámara de salida con revestimiento de concreto (Caudal vs ks)	87
Fig. 45. Plano en perfil	108
Fig. 46. Plano en planta	108
Fig. 47. Plano en perfil prototipo	109
Fig. 48. Plano en planta prototipo	109
Fig. 49. Plano de modelo hidráulico	109

Lista de tablas

TABLA I	23
TABLA II	30
TABLA III	44
TABLA IV	44
TABLA V	58
TABLA VI	59
TABLA VII	61
TABLA VIII	62
TABLA IX	63
TABLA X	63
TABLA XI	65
TABLA XII	66
TABLA XIII	66
TABLA XIV	67
TABLA XV	68
TABLA XVI	68
TABLA XVII	69
TABLA XVIII	70
TABLA XIX	70
TABLA XX	71
TABLA XXI	72
TABLA XXII	72
TABLA XXIII	73
TABLA XXIV	74
TABLA XXV	75
TABLA XXVI	76
TABLA XXVII	77
TABLA XXVIII	78
TABLA XXIX	79
TABLA XXX	80
TABLA XXXI	81
TABLA XXXII	82
TABLA XXXIII	82
TABLA XXXIV	83
TABLA XXXV	84

TABLA XXXVI	88
TABLA XXXVII.....	89
TABLA XXXVIII.....	90
TABLA XXXIX	90
TABLA XL	91
TABLA XLI	91
TABLA XLII.....	92
TABLA XLIII.....	93
TABLA XLIV	95
TABLA XLV.....	97

Resumen

Esta investigación aborda una de las deficiencias del diseño hidráulico en el país: la falta de información técnica sobre el origen y la determinación de los coeficientes de pérdida de carga en las cámaras de entrada y salida en sifones invertidos, lo que ocasiona diseños hidráulicos ineficientes. El objetivo es determinar el comportamiento de los coeficientes de pérdida de carga en las cámaras de entrada y salida en sifones invertidos, para mejorar la precisión en los cálculos y optimizar los diseños. Se realizó una investigación experimental utilizando un modelo hidráulico que cumple los principios de la semejanza hidráulica para simular un sifón real. Las cámaras se construyeron con bases revestidas de fibra de vidrio, PVC y concreto, con el fin de evaluar el efecto de los materiales en los coeficientes de pérdida. Los resultados demostraron que la rugosidad superficial de los materiales tiene una influencia directa sobre los coeficientes, incrementando su valor a medida que aumenta la rugosidad. Sin embargo, se encontró que la variación del caudal no afecta el valor de los coeficientes de pérdida de carga. Estos hallazgos sugieren que la eficiencia hidráulica en los sifones invertidos puede mejorarse principalmente mediante la selección adecuada de materiales, independientemente de la variación del flujo, aportando criterios útiles para el diseño futuro de sifones invertidos más eficientes.

Palabras clave — sifón invertido, pérdidas de carga, modelo hidráulico, semejanza hidráulica, diseño

Abstract

This research addresses one of the shortcomings of hydraulic design in the country: the lack of technical information on the origin and determination of pressure loss coefficients, which results in the construction of inefficient inverted siphons. The objective is to determine the behavior of the pressure loss coefficients in the inlet and outlet chambers in inverted siphons, to improve calculation accuracy and optimize design efficiency. An experimental research was carried out using a hydraulic model that complies with the principles of hydraulic similarity to simulate a real siphon. The chambers were built with bases coated with fiberglass, PVC, and concrete, in order to evaluate the effect of the materials on the loss coefficients. The results showed that the surface roughness of the materials has a direct influence on the coefficients, increasing their value as the roughness increases. However, the flow rate variation did not significantly affect the pressure loss coefficients. These findings suggest that hydraulic efficiency in inverted siphons can be improved primarily by proper material selection, regardless of flow variation, providing valuable tools for more efficient and accurate designs in the future.

Keywords — inverted siphon, pressure drops, hydraulic model, hydraulic similarity, design

Introducción

En el vasto panorama de la ingeniería hidráulica, el diseño y funcionamiento eficiente de las estructuras de transporte de agua representan un desafío de vital importancia. Dentro de este contexto, los sifones invertidos emergen como piezas fundamentales. Sin embargo, su rendimiento y durabilidad se ven amenazados por un factor crítico: las pérdidas de carga.

La problemática que se plantea en la presente investigación es el poco interés en calcular las pérdidas de carga en las cámaras de entrada y salida de los sifones invertidos, lo que puede generar un colapso parcial o total de la estructura. Tal como lo evidencian datos empíricos provenientes del proyecto Trasvase de Agua Sur-Norte, en el cual se evaluaron 143 estructuras de las cuales 40 presentaban pérdidas de carga excesivas, incluyendo 31 sifones invertidos, un porcentaje significativo de estas estructuras presentó pérdidas de carga excesivas, lo que ocasionó deterioro prematuro, sedimentación y otros efectos negativos que comprometen su eficacia operativa y la seguridad de las comunidades circundantes [1].

Ante esto, se propone el análisis del comportamiento de las pérdidas de carga en las cámaras de entrada y salida, de tal manera que se pueda emplear en el diseño de una forma óptima y con criterio, debido a que diversos autores han establecido distintos valores de los coeficientes, sin embargo, no se especifica el parámetro o criterio de selección. La determinación de las pérdidas de carga a lo largo del sifón invertido es la principal consideración de diseño [2].

Esta investigación tiene como objetivo general determinar el comportamiento del coeficiente de pérdida de carga en las cámaras de entrada y salida en sifones invertidos. Asimismo, se tendrán que cumplir los siguientes objetivos específicos: determinar los elementos que influyen en la variabilidad del coeficiente de pérdida de carga (K) en las cámaras de entrada y salida de los sifones; identificar el material más óptimo para la cámara de entrada y salida entre fibra de vidrio, concreto y PVC utilizado en la investigación, con el propósito de diseñar un sifón invertido eficiente; elaborar modelos de sifones invertidos que logren una semejanza hidráulica que cumpla la semejanza cinemática, geométrica y dinámica para garantizar un diseño óptimo y funcional; realizar pruebas hidráulicas en los modelos para ver el comportamiento del coeficiente de pérdida de carga; elaborar modelos de sifones invertidos tomando como referencia un sifón invertido que forma parte de un canal ubicado en el departamento de Lambayeque; y elaborar una guía para el diseño de sifones invertidos basado en los resultados de las pruebas hidráulicas y la revisión bibliográfica.

El alcance de esta investigación no se limita únicamente al ámbito técnico, sino que trasciende hacia componentes de suma importancia, tales como los aspectos sociales, económicos y ambientales. La implementación de una guía de diseño fundamentada en evidencia empírica no solo optimizará la eficiencia y seguridad de las infraestructuras hídricas, sino que también promoverá una mejor gestión del agua, reduciendo así el riesgo de inundaciones y mejorando la resiliencia de las comunidades frente a eventos climáticos extremos. Por otro lado, en la actualidad, la preservación y salvaguarda del medio ambiente es fundamental en cualquier proyecto de construcción. En las situaciones que involucran los sifones invertidos, su uso se da especialmente en la agricultura dado que permite la extracción de agua del canal de riego terciario sin causar daños a la estructura del canal. En ese contexto, los sifones invertidos contribuyen de manera positiva al aprovechamiento eficiente del agua y a la disminución de la erosión del suelo provocada por el exceso de flujo hídrico. Más aún, la planificación del sifón debe ajustarse a los límites de velocidad establecidos, tanto la mínima como la máxima; puesto que, si la velocidad es elevada produce vibraciones en las tuberías que afectaría el entorno ambiental en el que se encuentra.

Revisión de la literatura

Antecedentes

D. Poblet [3] señala que uno de los criterios empleados en el diseño del sifón invertido (SI) es la diferencia de energía obtenida mediante la ecuación de Bernoulli. Es decir, la diferencia de energía debe compensar todas las pérdidas ocasionadas en el sifón, esto incluye una capacidad hidráulica de por medio. En su investigación, toma por consideración que la velocidad de diseño en sifones de gran magnitud un valor relacionado de 2.5 m/s a 3.5 m/s. Por añadidura, los sifones de menor tamaño presentan un valor de 1.6 m/s. De igual modo, se considera que un sifón es considerado de dimensión de gran magnitud cuando su longitud es mayor que 500 veces el diámetro. Como resultado de su análisis, el autor verifica que los métodos de cálculo de pérdidas de carga mediante Bernoulli y el modelamiento respetan los lineamientos que establecen la conservación de las pérdidas de carga. Ahora bien, el autor recalca que se debe asumir una presión de salida igual a cero o un tirante definido, además que durante el modelamiento se debe cumplir con el uso de la velocidad existente antes del ingreso al sifón, y la geometría puesto que esta garantiza la estabilidad del flujo en las transiciones en el modelado.

G. Galvão [4] menciona que la dinámica del SI consiste en enterrar la tubería y después superar el obstáculo, lo cual se realiza considerando la inclinación de las tuberías. En la investigación resalta que los criterios de diseño más resaltantes vienen a ser: la pérdida de carga y la obstrucción dentro de la sección de conductos del sifón invertido. Para realizar el cálculo de pérdidas de presión localizada el autor utilizó la siguiente expresión $\Delta hL = kL * \frac{V^2}{2g}$, donde los valores de los coeficientes en la cámara de entrada y salida son: 0.50 y 1.00. Por otro lado, el autor menciona que para un correcto funcionamiento las pérdidas de carga calculadas, localizadas y distribuidas no deben superar la diferencia de altura entre la cámara ubicada en la dirección de flujo ascendente y la situada en la dirección de flujo descendente. Para finalizar, en su etapa de funcionamiento recomienda incluir en el diseño los aliviaderos pese a considerarse un obstáculo sumergido que provoca mayor pérdida de presión, esto con la finalidad de prever un aumento del caudal. En esa misma línea, para el mantenimiento se puede realizar mediante un sistema de chorro a presión o un “*Bucket Machine*” para desatascar y limpiar.

E. Fari [5] en su investigación busca calcular las pérdidas de carga generadas en un SI, para ello usa la siguiente fórmula para la carga hidráulica: $\Delta H = E_1 - E_2 = \left(z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right)$. De igual manera, utilizará para el cálculo de pérdidas por entrada $h_{ef} = k_e * \frac{vn^2}{2g}$, en el cual para la entrada presenta un valor k_e de 0.5 para ángulo recto, 0.23 para arista levemente redondeada. Además, también contempla un margen de seguridad del 10 % para las pérdidas de carga generadas por el sifón, esto debido a las pérdidas insignificantes que pueden ocurrir en las válvulas de purga y/o limpieza. El autor establece que la cámara de entrada es fundamental para garantizar el funcionamiento, puesto que posibilitará establecer las condiciones hidráulicas necesarias para el ahogamiento en la entrada del sifón. Entre sus recomendaciones establece que es preferible realizar el trazo de un SI en lugares con poca pendiente, para evitar desbordes, además, previene alteraciones abruptas en la orientación del conducto, ya que estas provocan un incremento en las pérdidas de carga.

Wei Cui et al. [1] realizaron en conjunto una evaluación de 31 sifones invertidos, en el cual, en su etapa de funcionamiento, registraron una pérdida excesiva de carga al cruzar obstáculos. Para realizar el cálculo de pérdida se utilizó el coeficiente combinado y observaciones de prototipos. Entre los factores de pérdida detectados en su investigación, se incluyeron los siguientes: envejecimiento natural, la unión de algas, y mejillones de agua dulce, sedimentos y los regímenes de flujo indeseables. Asimismo, el autor emplea la siguiente fórmula para calcular la pérdida de carga en la cámara de la compuerta: $h_j = \zeta g * \frac{vg^2}{2g}$, donde vg es la velocidad de flujo promedio de la sección, ζg es el coeficiente de pérdida de carga. Para concluir, como una prevención de riesgo por capacidad de funcionamiento, menciona que determinar las pérdidas de carga es fundamental, así como el considerar un factor de riesgo, además de que en el caso de encontrar fallas en sifones existentes se pueden realizar mediciones en los puntos críticos del sifón como una referencia de cálculo para contraponer medidas que garanticen la seguridad del suministro de agua.

J. Zulfan [6] en su investigación busca reemplazar los sifones dañados en Rambatan en Indramayu, esto debido a que presentaron daños estructurales debido al lecho del río y su función hidráulica se perdió completamente. En esa misma línea, para resolver este problema, se hizo uso de modelos escalados para el nuevo diseño del sifón invertido, empleando el número de Froude bajo una escala de 1/10. Durante el estudio, señalan que es fundamental cumplir con los parámetros hidráulicos, siendo el más importante la velocidad de flujo, sin embargo, se han

utilizado los siguientes: longitud, altura, descarga, y volumen. Por otro lado, se busca equiparar el modelo con Froude. Además, para el diseño de las cámaras de entrada y salida se hizo con hormigón liso. En la realización del modelo físico, se realizaron cuatro parámetros hidráulicos: capacidad de descarga, patrón de flujo, sedimentación y la altura de presión. Como resultado final, se obtuvo que para mejorar el rendimiento se pueden realizar modificaciones en la geometría, ya sea usar de una forma trapezoidal a redonda y extender la pared superior de la cámara de salida para mantener la velocidad del agua.

J. Zhang [7] menciona que los sifones invertidos son estructuras fundamentales en la ingeniería hidráulica utilizadas para el transporte eficiente del agua, destacándose por su capacidad para superar cambios significativos en la elevación del terreno. Consisten en conductos cerrados que permiten el paso del agua por gravedad, aprovechando la presión generada por la diferencia de altura entre sus extremos. Esta característica los hace ideales para conducir agua sobre obstáculos naturales o artificiales, como colinas o carreteras, minimizando la necesidad de bombas adicionales y optimizando el flujo hídrico en sistemas de distribución y redes de abastecimiento. No obstante, asegura que es esencial evitar las burbujas de aire en los tubos del sifón invertido para salvaguardar la operación y la toma de resultados. En esa misma línea, se realizó una investigación acerca de la disipación de energía, para esto realizó una prueba de modelo hidráulico en un sifón invertido, mediante el uso de la escala de Froude de 1:30. Se tiene en cuenta diferentes patrones de flujo durante la realización del experimento, especialmente la velocidad. Además, se menciona que en descargas pequeñas no existe problema con el manejo de la velocidad, debido a que no reflejan influencias debido al cambio de rugosidad.

A. Bart [8] detalla en su investigación que el uso de un modelo físico de un sistema de transporte, es esencial para evitar efectos de incrustaciones por la presencia de mezclas de aire y agua. Mediante la replicación física en escala reducida, el modelo permite observar y comprender fenómenos de flujo complejos que ocurren en condiciones reales. Los resultados obtenidos de estas investigaciones se utilizan para validar las condiciones de flujo en sistemas reales, proporcionando conocimientos significativos, que a su vez son fundamentales para el diseño y la operación eficiente de sistemas de transporte de líquidos

Marco teórico

Concepto

El sifón invertido es una estructura de uso limitado en proyectos de transferencia de agua a nivel global, lo que representa un desafío importante para la gestión ante situaciones de emergencia, dado el rápido cambio en las condiciones hidráulicas del flujo bajo presión [9].

Ramas oblicuas

Se utiliza en situaciones donde se necesite superar obstáculos y se disponga de espacio adecuado, y en terrenos que no sean especialmente difíciles de atravesar [10].



Fig. 1. Sifón de ramas oblicuas según [10]

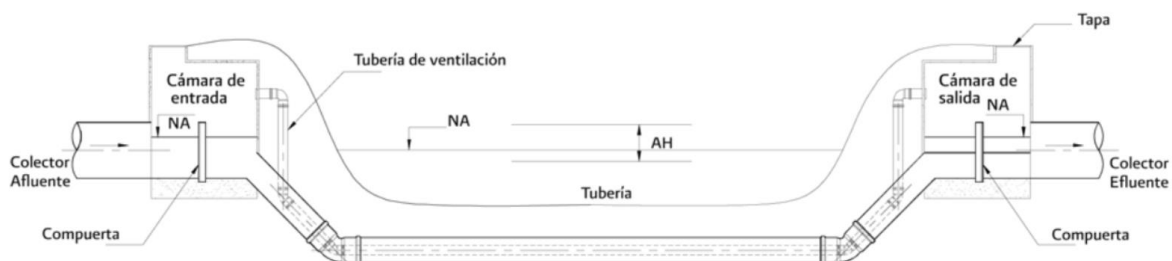


Fig. 2. Perfil de sifón de ramas oblicuas según [10]

Pozo vertical

Son la opción favorita para ubicaciones con un nivel de infraestructura limitado o cuando se enfrentan desafíos significativos en términos de construcción [10].



Fig. 3. Sifón de pozo vertical según [10]

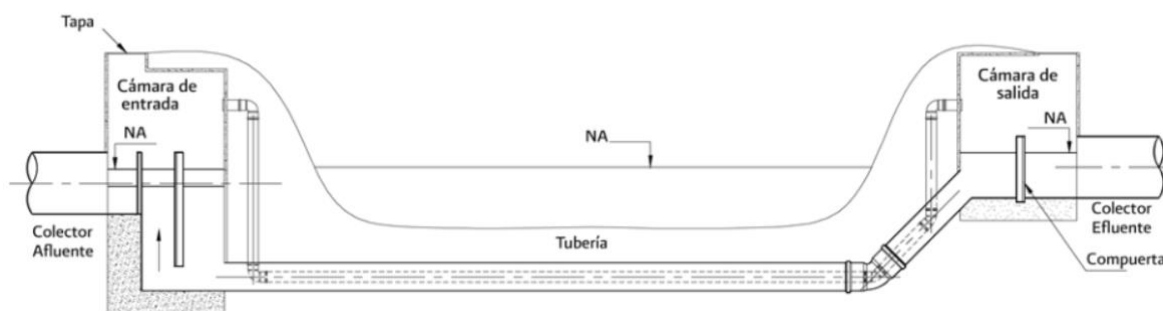


Fig. 4. Perfil de sifón de pozo vertical según [10]

Ramas verticales

Con dos brazos, estos sifones son la elección principal para lugares con infraestructura limitada o en situaciones de construcción complicadas. Su facilidad de limpieza y su diseño compacto los hacen altamente recomendables [10].



Fig. 5. Sifón de pozo vertical según [10]

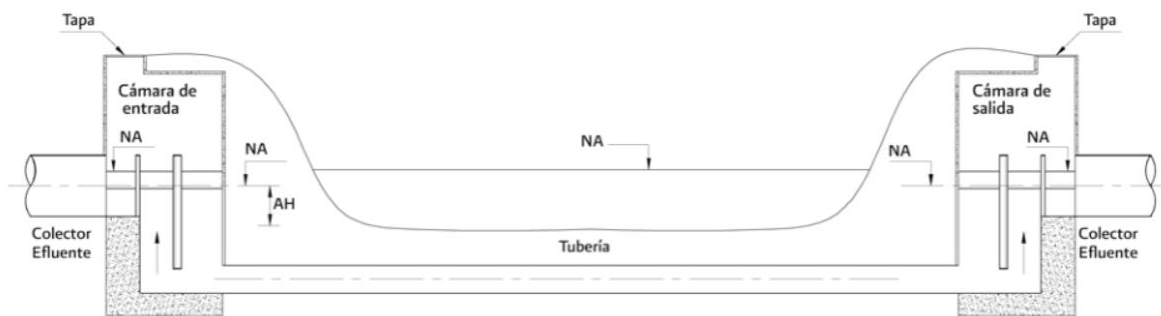


Fig. 6. Perfil de sifón de pozo vertical según [10]

Con cámaras de limpieza

Con la inclusión de cámaras de limpieza, se utiliza en proyectos que implican el cruce de vías subterráneas [10].



Fig. 7. Sifón con cámaras de limpieza según [10]

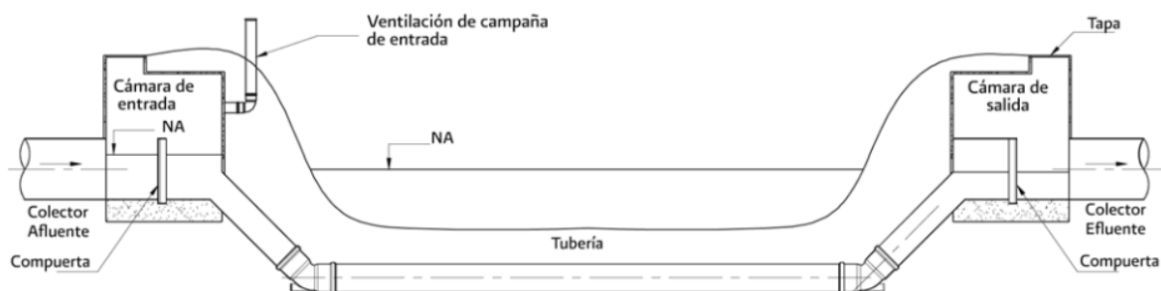


Fig. 8. Perfil del sifón con cámaras de limpieza según [10]

Partes del sifón invertido

Los elementos del sifón invertido constituyen el conjunto de componentes que permiten su funcionamiento. Estos elementos pueden variar según el diseño específico del sifón invertido. En la siguiente imagen se muestra una ubicación de algunos elementos.

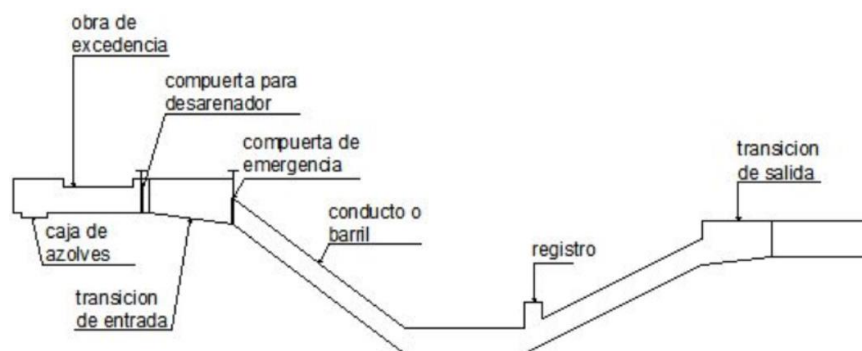


Fig. 9. Elementos del sifón invertido según [11]

Cámara de entrada

La cámara de entrada de un sifón invertido es una estructura que se encuentra al inicio del sistema de drenaje y que sirve para recibir el flujo de líquido que será drenado por el sifón. Esta cámara puede tener varias funciones, como la regulación del flujo, la eliminación de sólidos o sedimentos presentes en el líquido, y la protección del sifón contra daños o obstrucciones [11].

Cámara de salida

La cámara de salida en un sifón invertido es la estructura ubicada al final del sistema de drenaje, donde el líquido drenado por el sifón emerge y es descargado hacia su destino final. Esta cámara puede tener diferentes propósitos, como la regulación del flujo, la filtración de sólidos residuales o la conexión con otros sistemas de alcantarillado [11].

La cámara de salida es importante para garantizar que el líquido drenado por el sifón se dirija de manera eficiente y segura hacia su destino final, evitando posibles obstrucciones o problemas de flujo. Además, puede ser un punto de acceso para inspecciones y mantenimiento del sistema de drenaje [11].

Conducto

La integridad de esta estructura es vital para el sistema, ya que su función principal es transportar agua bajo presión de un punto a otro. Es fundamental que el conducto esté bien asegurado para resistir los efectos de la erosión y mantenerse estable en cada cambio de dirección, previniendo daños causados por la fuerza del agua. Además, para prevenir la flotación y desplazamiento de tubos más ligeros, se aconseja revestirlos con cemento protector [11].

Hidráulica del sifón invertido

El sifón invertido consiste en un conducto en forma de U que conecta la cámara de carga con la cámara de descarga, permitiendo el paso del flujo bajo presión, facilitando su paso mediante la acción combinada de la gravedad y la presión hidráulica. Este sistema se activa

únicamente cuando el nivel piezométrico en la cámara de carga es superior al de la cámara de descarga. Para que el flujo se mantenga de manera eficiente, es indispensable que la energía disponible sea suficiente para compensar todas las pérdidas de carga que se generen a lo largo del recorrido en el sifón. [11].

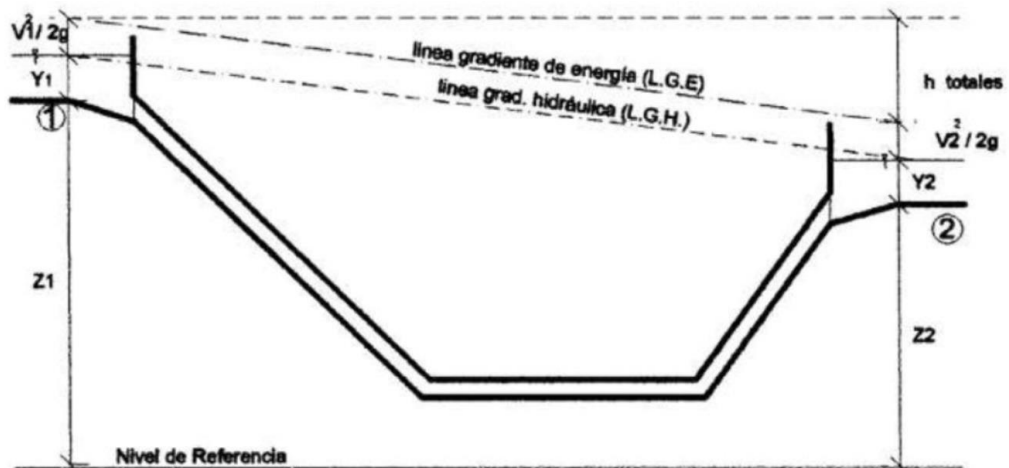


Fig. 10. Pérdidas de carga en el sifón invertido según [12]

Para que el conducto opere eficazmente bajo presión (tubo completamente lleno), se requiere que tanto la entrada como la salida del conducto estén diseñadas de manera que haya una altura mínima de agua en ambos puntos para evitar el ingreso de aire al sistema. Este requisito de altura mínima, conocido como "ahogamiento", asegura que el conducto permanezca lleno en todo momento, lo que permite que el flujo de agua se mantenga constante y sin interrupciones, maximizando así la eficiencia del sistema hidráulico. La presencia de agua continua en el conducto también ayuda a mantener la presión hidrostática necesaria para el funcionamiento adecuado de dispositivos como bombas, válvulas y sifones invertidos [11].

Criterios de diseño

Los principales criterios de diseño que se deben tomar en cuenta son:

- Las medidas del conducto son establecidas al cumplir con las demandas específicas de protección externa, la inclinación del conducto, los ángulos de las curvas, y la profundidad de la entrada y salida del fluido [13].
- En sifones que cruzan carreteras principales o están bajo drenajes, se necesita al menos 0.90 m de recubrimiento. Mientras tanto, cuando atraviesan caminos rurales o canales de riego sin revestimiento, 0.60 m es adecuado. Si el sifón cruza un canal revestido, se considera suficiente un recubrimiento de 0.30 m [13].

- La inclinación de los tubos curvados no debe exceder la proporción de 2 a 1, y la pendiente mínima para un tramo horizontal del conducto debe ser del 5 %. Se sugiere emplear transiciones de concreto en los puntos de entrada y salida cuando el sifón cruce carreteras principales, especialmente para sifones con un diámetro igual o mayor a 36 pulgadas y velocidades en el conducto superiores a 1 metro por segundo [13].
- Para prevenir desbordamientos en la parte superior del sifón causados por caudales inesperados que superen los parámetros de diseño, se recomienda incrementar el nivel del agua en el canal en un 50 % o hasta un máximo de 0.30 metros, manteniendo esta elevación a lo largo de 15 metros desde la estructura del sifón [6].
- Para calcular el diámetro del tubo en sifones relativamente cortos con transiciones de tierra en ambos extremos, se puede emplear una velocidad de flujo de 1 m/s. En sifones cortos con transiciones de concreto, se puede utilizar una velocidad de 1.5 m/s, mientras que en sifones largos con transiciones de concreto, ya sea con o sin control en la entrada, se recomienda una velocidad entre 2.5 m/s y 3 m/s [13].
- Las pérdidas de carga asociadas con las transiciones de entrada y salida en configuraciones de tipo "cubierta partida" pueden determinarse utilizando coeficientes de $0.4 hv$ para la entrada y $0.65 hv$ para la salida, donde hv representa la carga de velocidad en metros de columna de fluido, respectivamente [13].
- Para el diseño de la transición de entrada, se recomienda que la parte superior de la abertura del sifón se sitúe ligeramente por debajo de la superficie normal del agua, generando así una profundidad de sumergencia conocida como sello de agua. En el diseño, se considera emplear como mínimo 1.5 veces la carga de velocidad del sifón para garantizar un adecuado funcionamiento hidráulico, 1.1 veces la carga de velocidad o una profundidad mínima de 3 pulgadas [13].
- En sifones de gran longitud, se proyectan estructuras de desahogo que permiten drenar el tubo, facilitando así su inspección y mantenimiento [13].
- En sifones de gran longitud, bajo ciertas condiciones, la entrada puede no sellarse, ya sea que el flujo en el sifón se mantenga parcial o completamente lleno. Este fenómeno ocurre cuando el coeficiente de fricción real es menor al estimado en el diseño, lo que impide que el sello hidráulico en la entrada se mantenga de manera efectiva. Por ello, se recomienda emplear un coeficiente de fricción $n=0.008$ al calcular las pérdidas de energía [13].

- Con el propósito de prevenir la cavitación, a menudo se colocan ventanas de aireación en áreas donde el aire podría acumularse [13].
- En relación con las pérdidas de carga totales, se sugiere que estas no excedan los 0.30 metros [13].
- Cuando un sifón atraviesa por debajo de una quebrada, es crucial tener información sobre el caudal máximo durante las crecidas [13].
- Se sugiere utilizar anchos específicos de tablas en el cruce de sifones o alcantarillas, adaptados a las características del camino correspondiente [13].

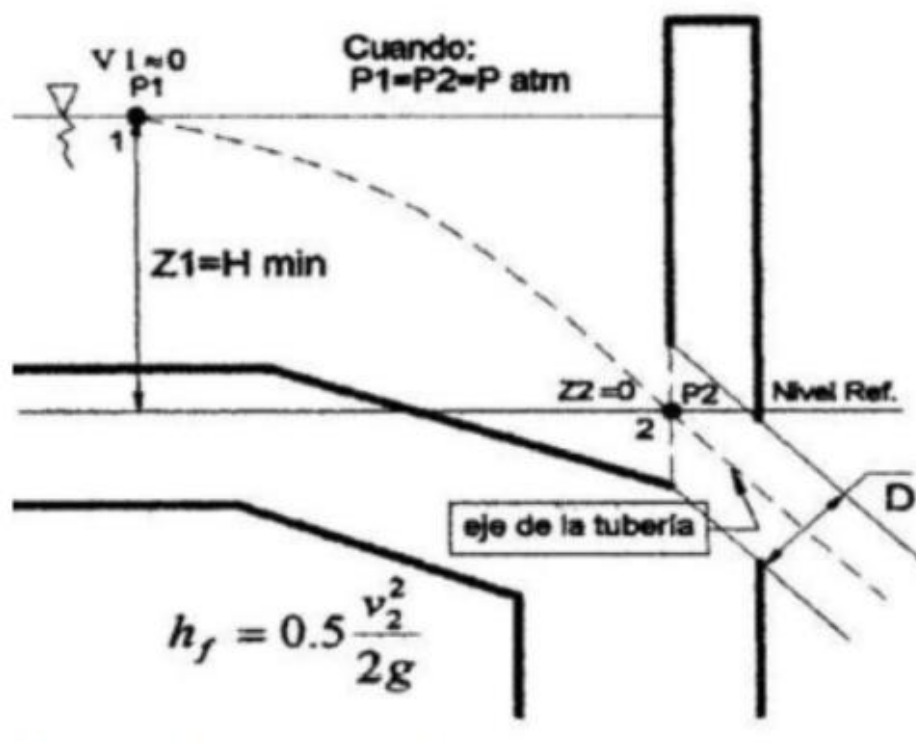


Fig. 11. Pérdida de carga en la cámara de entrada del sifón invertido según [12]

Para el cálculo de la energía entre el punto 1 y 2, se utilizará la fórmula de la energía:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (1)$$

Si se quiere calcular H_{min} se tendrá que emplear los siguientes criterios, $P_1 = P_2$ y que $z_2 = 0$.

$$H_{min} = \frac{3}{2} * \frac{V_t^2}{2g} \quad (2)$$

Por otro lado, para el análisis del H_{min} se tendrá que emplear las siguientes fórmulas para realizar las comparaciones y en todas tendrá que cumplir:

$$H_{min} = 0.3 * v_t * \sqrt{D} \quad (3)$$

$$H_{min} = 0.5 * D * \left(\frac{v_t}{\sqrt{D}}\right)^{0.55} \quad (4)$$

De las siguientes expresiones, el H_{min} es la altura mínima de ahogamiento, v_t es la velocidad en la tubería, y D es el diámetro de esta [12].

Procedimiento de diseño del sifón invertido

Requerimientos del sistema

Un requisito esencial en el diseño de un sifón invertido implica establecer criterios específicos que describan las características y operaciones necesarias para asegurar el correcto funcionamiento del dispositivo. Esto incluye aspectos como la capacidad de mantener un flujo constante, la resistencia a la obstrucción y la capacidad para trabajar eficientemente bajo diversas condiciones de presión y flujo de líquido. Estos requisitos son fundamentales para garantizar la fiabilidad y efectividad del sifón invertido en su aplicación prevista.

Especificaciones de la tubería y el flujo

Entre los materiales empleados para la tubería, se emplea la ICONTEC puesto que considera las características especiales y cargas externas actuantes, asimismo la condición de suelos especiales y demás condiciones [14].

TABLA I

NORMA TÉCNICA DE LA TUBERÍA [14]

Tipo de tubería	Norma ICONTEC	Norma Internacional
Concreto reforzado	NTC 401	ANSI/ASTM C 76
	NTC 1328	ANSI/ASTM C 361
	NTC 3789	ANSI/ASTM C 443
		ANSI/ASTM C 506
		ANSI/ASTM C 507
		ANSI/ASTM C 655
Concreto simple		ANSI/ASTM C 877
	NTC 1022	ANSI/ASTM C 14
	NTC 1328	

TABLA I

(CONTINUACIÓN) NORMA TÉCNICA DE LA TUBERÍA [14]

Asbesto – Cemento	NTC 44	ASTM C 428
	NTC 239	ASTM C 644C
	NTC 268	ISO R 881
	NTC 384	
	NTC 487	
Arcilla vitrificada (gres)	NTC 511	ASTM C 12
	NTC 3526	ANSI/ASTM C 700
	NTC 4089	ASTM C 425
		ANSI/ASTM C 301
Hierro fundido	NTC 3359	ASTM A 74-72
		ANSI A 21.6
		(AWWA C 106)
		ASTM C 644
Fibra de vidrio (resina termoestable reforzada)	NTC 3870	ASTM D 3262
		ASTM D 3681
Hierro dúctil	NTC 2346	ISO 2531
	NTC 2587	ISO 4633
	NTC 2629	ISO 5208
	NTC 3359	ISO 5210
		ISO 5752 serie 14
		ISO 5752
		ISO 7005-2
		ISO 7259
		ANSI A 21.4
		(AWWA C 104)
		ANSI A 21.5
	(AWWA C 105)	
	ANSI/AWWA C 110	

TABLA I
(CONTINUACIÓN) NORMA TÉCNICA DE LA TUBERÍA [14]

Acero	NTC 2091	ASTM A 475
		ASTM A 760
		ASTM A 762
		AASHTO M-36
		AASHTO M-245
Poliétileno	NTC 1747	ASTM D 2239
	NTC 3409	ASTM D 3035
	NTC 3410	ASTM D 3261
	NTC 3664	
	NTC 3694	
Poliétileno de alta densidad		ASTM D 1248
		ASTM D 2412
		ASTM D 3035
		ASTM F 714
		ASTM F 894
Policloruro de vinilo (PVC)	NTC 1087	ANSI/ASTM D
	NTC 1341	2564 ANSI/ASTM
	NTC 1748	D 2680
	NTC 2534	ANSI/ASTM D
	NTC 2697	3033 ANSI/ASTM
	NTC 3640	D 3034
	NTC 3721	ANSI/ASTM D
	NTC 3722	3212 ANSI/ASTM F
	NTC 4764 (PARTES 1 y2)	477 ASTM F 545 ASTM F 679 ASTM F 949
Fibra de vidrio (Resina termoestable reforzada, RTR)	NTC 2836	ASTM D 2996
		ANSI/ASTM D 2997

Evaluación del estado de la estructura y acciones recomendadas

En el caso de presentar estructuras hidráulicas construidas o en proceso de proyecto, se hace mención que la parte sumergida de la estructura puede operarse sin reparaciones significativas, pero las partes externas muestran una corrosión avanzada que requiere reparaciones completas y protección. Se recomienda realizar mejoras o remplazos si el diseño lo requiere en las paredes de las láminas de acero [15].

Durabilidad del concreto

Es fundamental asegurar que el concreto utilizado cumpla con los requisitos de durabilidad especificados en los criterios de diseño. Esto requiere seleccionar de manera adecuada la resistencia del concreto, la calidad de los materiales y los métodos de colocación, con el fin de garantizar una mayor durabilidad de la estructura [15].

Protección contra la corrosión

Dado que se observa una corrosión significativa en la estructura, es crucial implementar medidas de protección contra la corrosión de manera efectiva. Esto puede incluir el uso de recubrimientos protectores, sistemas de drenaje adecuados para evitar la acumulación de agua y la aplicación de técnicas de reparación que aborden la corrosión existente y prevengan su recurrencia [15].

Compatibilidad de materiales

Al realizar reparaciones en la estructura, es esencial garantizar la compatibilidad de los nuevos materiales con los existentes. Los materiales de reparación deben ser seleccionados cuidadosamente para que se integren de manera efectiva con el concreto existente y los refuerzos de acero, evitando problemas de adherencia y durabilidad a largo plazo [15].

Mantenimiento preventivo

Además de las reparaciones necesarias, se deben establecer programas de mantenimiento preventivo para monitorear continuamente el estado de la estructura y abordar cualquier problema emergente de manera oportuna. Esto puede incluir inspecciones regulares, pruebas de laboratorio en muestras de concreto y acero, y la implementación de medidas correctivas según sea necesario [15].

Temperatura del ambiente

En un proyecto de construcción de una estructura hidráulica, se debe tener en consideración diferentes aspectos que involucren o afecten el diseño. En tal caso, se tiene que resaltar la importancia crítica de la operación segura de los sifones invertidos durante períodos de hielo para garantizar la eficiencia del proyecto de derivación de agua en su conjunto. Lo que considera que la temperatura del ambiente, y del flujo es relevante a fin de garantizar un funcionamiento idóneo del sifón invertido [16]. Asimismo, en la época de los periodos de hielo, según los análisis de los diferentes caudales se recomienda usar como caudal el 60 % del caudal de diseño, siendo esta la opción más segura y eficiente para los sifones invertidos [16].

Pérdidas de carga en el sifón invertido

Las pérdidas de carga en un sifón invertido se refieren a la disminución de energía del flujo de líquido a medida que atraviesa el sistema [17]. Estas pérdidas ocurren debido a la resistencia que enfrenta el fluido mientras fluye a través del tubo del sifón [17]. Hay varios factores que contribuyen a estas pérdidas:

Rozamiento

El fluido experimenta fricción contra las paredes internas del tubo a medida que fluye a través de él. Esta fricción transforma una parte de la energía cinética del fluido en calor, lo que provoca una disminución de energía [18].

Curvatura del flujo

Cuando el flujo de líquido se desplaza a través de curvas en el tubo, se generan vórtices y turbulencias, lo que aumenta la resistencia al flujo y causa pérdidas de energía [18].

Cambio en la sección transversal

Si el diámetro del tubo del sifón cambia a lo largo de su longitud, como en el caso de una reducción o ampliación de la sección transversal, se producen pérdidas adicionales debido a cambios en la velocidad del flujo [18].

Altura de la cresta

La altura de la cresta del sifón sobre el nivel del líquido en el depósito de salida afecta la energía potencial del fluido en el sistema. Una mayor altura de la cresta resulta en una mayor pérdida de energía potencial a medida que el líquido fluye desde un nivel elevado a uno más bajo [18].

Es esencial tener en cuenta estas pérdidas de carga al diseñar y operar un sifón invertido para garantizar un funcionamiento eficiente y predecible del sistema [17].

Pérdidas de carga por transición de entrada

Las pérdidas de carga por transición de entrada son un fenómeno común en el flujo de fluidos a través de tuberías, especialmente cuando el fluido entra en la tubería desde una entrada más grande, como un tanque o una canalización [19]. Este tipo de pérdidas ocurren debido a la transición gradual del flujo desde un área más grande a una más pequeña, lo que provoca cambios en la velocidad y la distribución del flujo [20].

Cuando el fluido pasa de una entrada grande a una tubería más estrecha, como en una tubería de sección transversal circular, se produce una reducción en la velocidad del flujo en las capas externas del fluido debido al aumento en la fricción con las paredes de la tubería. Sin embargo, en el centro del flujo, la velocidad puede seguir siendo alta [20].

Esto crea un perfil de velocidad en el que la velocidad máxima se encuentra en el centro del flujo y disminuye gradualmente hacia las paredes de la tubería. Como resultado, se generan vórtices y turbulencia en la zona de transición de entrada, lo que conduce a pérdidas de energía debido a la fricción adicional y la disipación de energía en forma de calor [20].

Las pérdidas de carga por transición de entrada pueden calcularse utilizando diferentes métodos, como las correlaciones empíricas basadas en experimentos de laboratorio o mediante modelos matemáticos más complejos que tienen en cuenta factores como el número de Reynolds y la geometría de la entrada de la tubería [20].

Para minimizar estas pérdidas de carga, los diseñadores de sistemas de tuberías pueden usar técnicas como el uso de difusores o ensanchamientos gradualmente inclinados en la entrada de la tubería para suavizar la transición del flujo y reducir la turbulencia [19]. Esto ayuda a mejorar la eficiencia del sistema y a reducir el consumo de energía [19]. A continuación, se mostrará la fórmula para el cálculo de las pérdidas de carga por transición en la cámara de entrada:

$$h_{te} = K_{te} \left(\frac{v_t^2 - v_{ce}^2}{2g} \right) \quad (5)$$

Pérdidas de carga por transición de salida

Las pérdidas de carga por transición de salida se presentan cuando el flujo de líquido sale del tubo del sifón hacia el depósito receptor. Estas pérdidas son el resultado de la transición del

flujo desde una sección más estrecha (el tubo del sifón) hacia una sección más amplia (el depósito receptor) [20].

Cuando el flujo sale del tubo del sifón hacia el depósito, se produce una expansión del flujo que puede generar turbulencia y vórtices en la zona de transición de salida. Esto provoca pérdidas de energía debido a la fricción adicional y la disipación de energía en forma de calor [21].

La altura de la cresta del sifón y la velocidad del flujo también influyen en las pérdidas de carga por transición de salida en un sifón invertido [19], [20]. Una cresta más alta o una velocidad de flujo más alta pueden aumentar estas pérdidas al aumentar la energía cinética del flujo que se disipa durante la transición de salida [21].

Para minimizar estas pérdidas de carga, los diseñadores de sifones invertidos pueden emplear técnicas de diseño que suavicen la transición del flujo hacia el depósito receptor, como el uso de difusores o ensanchamientos gradualmente inclinados en la salida del sifón. Estas técnicas ayudan a reducir la turbulencia y mejorar la eficiencia del sistema al minimizar las pérdidas de energía durante el flujo de salida del sifón hacia el depósito receptor [24], [25]. A continuación, se mostrará la fórmula para el cálculo de las pérdidas de carga por transición en la cámara de salida:

$$h_{ts} = K_{ts} \left(\frac{v_t^2 - v_{cs}^2}{2g} \right) \quad (6)$$

Para las ecuaciones del cálculo de pérdidas de pérdidas de carga en la entrada y salida, se tiene que:

v_t = Velocidad del agua en el conducto.

v_{cs} = Velocidad en el canal de salida.

K_{te} = Coeficiente de pérdida para transición de entrada.

K_{ts} = Coeficiente de pérdida para transición de salida.

g = Aceleración de la gravedad ($9.81 \frac{m}{s^2}$).

TABLA II
VALORES DEL COEFICIENTE “K” [11]

Tipo de transición	K_{te}	K_{ts}
Curvado	0.10	0.20
Cuadrante cilíndrico	0.15	0.25
Simplificado en línea recta	0.20	0.30
Línea recta	0.30	0.50
Extremos cuadrados	0.30	0.75

Pérdidas por rejillas h_r

Las pérdidas por rejillas en los sifones invertidos son un fenómeno relevante en el diseño y operación de sistemas de drenaje y alcantarillado. Un sifón invertido es una estructura utilizada para transportar líquidos de un punto a otro a través de un perfil topográfico irregular, como una colina o un valle. Las rejillas se utilizan comúnmente en la entrada y salida de los sifones invertidos para evitar la entrada de desechos sólidos y para regular el flujo de líquido [23].

Las pérdidas por rejillas se producen debido a la obstrucción parcial del flujo causada por la presencia de la rejilla. Cuando el líquido fluye a través de la rejilla, parte de la energía cinética del flujo se disipa debido a la resistencia que ofrece la rejilla al paso del líquido. Esta pérdida de energía se traduce en una reducción de la velocidad del flujo y, por lo tanto, en una pérdida de carga en el sistema [24].

La magnitud de las pérdidas por rejillas en los sifones invertidos depende de varios factores, incluyendo el diseño y la geometría de la rejilla, la velocidad del flujo, la viscosidad del líquido y la presencia de sedimentos o desechos sólidos que puedan obstruir la rejilla. Los ingenieros suelen calcular estas pérdidas utilizando ecuaciones empíricas o modelos computacionales basados en la geometría y las características del flujo [17], [21].

Para minimizar las pérdidas por rejillas en los sifones invertidos, es importante seleccionar adecuadamente el diseño de la rejilla y mantenerla limpia y libre de obstrucciones. Además, el diseño del sifón invertido debe optimizarse para minimizar la resistencia al flujo y reducir las pérdidas de carga en todo el sistema. Esto garantiza un funcionamiento eficiente y confiable del sistema de drenaje y alcantarillado [17], [21].

Se utilizará la siguiente ecuación, para calcular las pérdidas generadas por rejillas:

$$h_r = K_r \left(\frac{v_n^2}{2g} \right) \quad (7)$$

Se calculará el valor del K_r con la siguiente ecuación:

$$K_r = K1 - K2 \left(\frac{A_n}{A_g} \right) - \left(\frac{A_n}{A_g} \right)^2 \quad (8)$$

En las siguientes expresiones, se tiene que:

v_t = Velocidad del agua en el conducto.

$K1$ = Coeficiente de pérdida.

$K2$ = Coeficiente de pérdida.

K_r = Coeficiente de pérdidas en la rejilla.

A_n = Área neta de paso entre rejillas.

A_g = Área bruta de la rejilla.

Pérdidas por fricción en el conducto " hf "

Las pérdidas por fricción en el conducto de un sifón invertido son parte del análisis de la mecánica de fluidos y son importantes para comprender cómo se comporta el flujo de líquido en este tipo de estructuras [24].

Cuando un fluido fluye a través del conducto de un sifón invertido, como un tubo o una canalización, se encuentra con resistencia a causa de la resistencia por fricción generada en el contacto entre el flujo y las superficies del conducto. Estas pérdidas por fricción generan una disminución en la energía del fluido a medida que se desplaza a lo largo del sifón [24].

La magnitud de las pérdidas por fricción depende de varios factores, incluyendo la velocidad del flujo, el diámetro y la rugosidad de las paredes del conducto, y la viscosidad del fluido. Para calcular estas pérdidas, se pueden utilizar diferentes ecuaciones empíricas o modelos teóricos, tanto la ecuación de Darcy-Weisbach como la de Colebrook-White incluyen factores de fricción y rugosidad de las paredes del conducto, lo que permite calcular de manera precisa las pérdidas de energía generadas por la fricción en el flujo [24], [25], [26].

Es importante tener en cuenta las pérdidas por fricción al diseñar y operar un sifón invertido, ya que afectan la eficiencia del sistema y pueden influir en la presión y el flujo del líquido a lo

largo del conducto. Un análisis adecuado de estas pérdidas ayuda a garantizar un funcionamiento óptimo y seguro del sifón invertido [24].

Para determinar las pérdidas de energía debido a la fricción, se aplicarán las siguientes ecuaciones hidráulicas: Hazen-Williams **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Darcy Weisbach **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, y Manning **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$h_{ef} = \left(\frac{v_t}{0.8508 * C * R^{0.62}} \right)^{1.8518} * L \quad (9)$$

$$hf = f \frac{L}{D} \left(\frac{v_t^2}{2g} \right) \quad (10)$$

$$hf = f \frac{L}{D} \left(\frac{v_t * n}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2 * L \quad (11)$$

De las expresiones mencionadas anteriormente, los valores asignados son los siguientes:

v_t = Velocidad del agua en el conducto.

C = Coeficiente de rugosidad de Hazen y Williams

R = Radio de la tubería

L = Longitud de la tubería

D = Diámetro de la tubería

f = Factor de rugosidad de Darcy Weisbach

g = Aceleración de la gravedad ($9.81 \frac{m}{s^2}$).

Pérdidas por cambio de dirección o codos " h_c "

$$h_c = K_c \sqrt{\frac{\Delta}{90^\circ}} \left(\frac{v_t^2}{2g} \right) \quad (12)$$

Donde:

Δ = Ángulo de deflexión

K_c = Coeficiente para codos comunes = 0.25

Pérdidas por válvulas de limpieza

Las pérdidas por fricción en conductos se refieren a la energía perdida debido a la resistencia que el fluido encuentra al fluir a través de un conducto, como una tubería o un canal. Esta resistencia es consecuencia principalmente de la fricción entre el fluido y las superficies internas del conducto, además de otros factores como las alteraciones en la dirección y velocidad del flujo, y la formación de turbulencias [24].

La cantidad de pérdida de energía debido a la fricción depende de varios factores, incluyendo la velocidad del flujo, la viscosidad del fluido, el diámetro y la rugosidad de las paredes del conducto. Cuanto mayor sea la velocidad del flujo y la rugosidad de las paredes del conducto, mayores serán las pérdidas por fricción [24].

Existen varios métodos para calcular las pérdidas por fricción en conductos, las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams. La ecuación de Darcy-Weisbach ofrece mayor precisión al integrar la longitud y diámetro de la tubería, la velocidad del flujo y el coeficiente de fricción, aplicándose a diversos tipos de flujo. Hazen-Williams, más empírica, se enfoca en sistemas de agua potable con flujo turbulento, utilizando un coeficiente que refleja la rugosidad del conducto. Ambas ecuaciones ayudan a modelar los efectos de la fricción en la eficiencia del sistema según el contexto. [28], [29].

Reducir las pérdidas por fricción en los conductos es importante para mejorar la eficiencia y la economía de los sistemas de flujo de fluidos. Esto se puede lograr mediante la selección adecuada del material del conducto para minimizar la rugosidad, el uso de secciones de conducto de diámetro adecuado para evitar velocidades excesivas, y el diseño de rutas de flujo que minimicen los cambios bruscos de dirección y la formación de turbulencias. La comprensión y el control de las pérdidas por fricción son esenciales para garantizar el funcionamiento eficiente y rentable de los sistemas de tuberías en una variedad de aplicaciones industriales, comerciales y de infraestructura. [28], [29].

Pérdidas por ampliación

Cuando no es posible instalar una transición de salida en un sistema de tuberías, es común recurrir a una descarga en una caja como solución alternativa. Sin embargo, esta solución puede generar pérdidas de carga adicionales debido a la ampliación brusca en la sección del conducto. Estas pérdidas de carga pueden calcularse utilizando diferentes fórmulas y métodos [28], [29].

Una de las fórmulas comúnmente utilizadas para calcular las pérdidas de carga debido a la ampliación brusca en la sección del conducto es la ecuación de la pérdida de carga localizada de Kirschmer, que está basada en la conservación de la energía y tiene en cuenta factores como la velocidad del flujo, el cambio en el área de la sección transversal y la forma de la ampliación [27].

Otra fórmula que se puede aplicar es la ecuación de la pérdida de carga localizada de la Asociación Alemana de Ingenieros de Aguas Residuales (DWA), que también tiene en cuenta la velocidad del flujo y el cambio en el área de la sección transversal, así como el coeficiente de pérdida de carga específico para diferentes tipos de ampliaciones bruscas [27].

Además de estas fórmulas específicas, existen otras metodologías para estimar las pérdidas de carga en ampliaciones bruscas, como el método de los coeficientes de pérdida de carga, que utiliza valores empíricos para diferentes configuraciones de ampliación brusca y se basa en datos experimentales y pruebas de campo [27], [28].

Es importante tener en cuenta que las pérdidas de carga debido a la ampliación brusca en la sección del conducto pueden ser significativas y deben ser consideradas en el diseño y análisis de sistemas de tuberías. La selección de la fórmula o método adecuado para calcular estas pérdidas dependerá de la precisión requerida y de la disponibilidad de datos y recursos para realizar los cálculos [27], [28].

Para las pérdidas de carga por ampliación brusca, se utilizará la siguiente fórmula:

$$h_s = \frac{(v_t - v_c)^2}{2g} \quad (13)$$

Donde:

h_s = Pérdida de carga por ampliación brusca.

v_t = Velocidad en el conducto.

v_c = Velocidad aproximada en la caja.

L = Longitud de la tubería

g = Aceleración de la gravedad ($9.81 \frac{m}{s^2}$).

Finalmente, para el cálculo de las pérdidas de carga por ampliación brusca de forma resumida, se utilizará la siguiente expresión:

$$h_s = 0.997 \frac{(v_t - v_c)^{1.919}}{2g} \quad (14)$$

Se tendrá la siguiente igualdad:

$$h_s = 2h_e$$

Donde:

h_s = Pérdida en la salida

h_e = Pérdida en la entrada

Bases teóricas

Marco obtenido del ministerio del agua

Cámara de entrada al sifón

Debe dirigir el flujo hacia las tuberías que componen el sifón. invertido [27]. La pérdida de carga en este punto será dada por:

$$H_e = 0.5 \frac{V^2}{2 * g} \quad (15)$$

Cámara de salida al sifón:

Deberá permitir la revisión, el aislamiento y la higienización en cualquier tramo de las conducciones en el interior del SI [27]. La pérdida de carga en este punto será dada por:

$$H_s = 1.00 * \frac{V^2}{2 * g} \quad (16)$$

Marco obtenido de los elementos de diseño para acuerdos de Ricardo López Cualla

Los parámetros de diseño empleados por Ricardo López Cualla son los siguientes:

- 1) Velocidad de diseño: La velocidad mínima establecida será de 1.0 m/s [28].
- 2) Cámara de entrada: El valor del coeficiente de pérdida establecido para la cámara de entrada es 0.5 [28], [29].
- 3) Cámara de salida: El valor del coeficiente de pérdida establecido para la cámara de salida es 1.0 [28], [29]
- 4) Codos: Se considera un mismo coeficiente de pérdida para los codos con un ángulo de deflexión menor a 90°. El valor del coeficiente de pérdida establecido para los codos es 0.2 [28], [29] .

Marco obtenido de tratado elemental de hidráulica

- 1) Modelos hidráulicos: Establece que, para considerar una semejanza hidráulica o semejanza de Froude en un prototipo a escala reducida, se tienen que dar las mismas condiciones de flujo para ambos. Para esto se usará el número de Froude [30].
- 2) Criterios de escala: El número de Froude establece que su constancia será determinada por la velocidad y el diámetro [30].

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * d}} \quad (17)$$

Marco obtenido de mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería

- 1) Semejanza y análisis dimensional: Las leyes de semejanza permiten realizar experimentos con un fluido, lo cual hace posible predecir características funcionales en un diseño de prototipo [31].
- 2) Criterios de Semejanza: Establece que para que se cumpla una semejanza hidráulica, se deben cumplir 3 semejanzas: geométrica, cinemática y dinámica [31].
- 3) Semejanza geométrica: Serán idénticos en medidas, solo se diferencia el tamaño, pero sigue una relación de escala lineal [31].
- 4) Semejanza cinemática: La relación de las velocidades será igual a los puntos establecidos entre los flujos [31].
- 5) Semejanza dinámica: Se debe guardar una relación de las fuerzas, siendo esta constante.

Marco obtenido de obras hidráulicas

- 1) Velocidad: Dependiendo de las características del fluido, la velocidad máxima es de 3 m/s, y la mínima de 1.5 m/s [32].
- 2) Criterios de selección de materiales: Las tuberías de presión más usadas son la de concreto prefabricado y monolítica en secciones circulares, soportan cargas de 40 a 50m. Para cargas mayores a las mencionadas, se usarán tuberías de placa de acero [32].
- 3) Criterios de diseño: Los criterios de pérdidas de carga se incluyen por transición, convergencia en la cámara de entrada y salida; y pérdidas por codos [32]. Se aconseja considerar un factor de seguridad en el valor final de las pérdidas de carga del 10 % [32].

Marco normativo

NTP-ISO 8772 - Sistema de tuberías plásticas para drenaje y alcantarillado

Se emplea esta normativa como requisitos mínimos que tienen que tener las tuberías, conexiones y sistemas de tuberías PE que se usan para drenaje de agua superficial [33]. Dentro de esta normativa, se considerarán los diferentes tipos de uniones del tipo: uniones con anillo de sello elastomérico, con fusión a tope, con electro fusión y mecánicas [33].

NTP-ISO 16422 - Tuberías de conducción de agua presión PVC O

Este tipo de tuberías se utilizan comúnmente en sistemas de distribución de agua potable y redes de riego debido a su durabilidad, resistencia y bajo costo. La norma establece especificaciones detalladas para estas tuberías, asegurando que cumplan con los estándares de calidad y seguridad necesarios para su uso en aplicaciones de conducción de agua a presión. Estas especificaciones pueden incluir aspectos como dimensiones, propiedades físicas y mecánicas, métodos de fabricación, marcado y pruebas de calidad [33].

NTP ISO 3126:1997 - Tubos plásticos - Medición de dimensiones

Se centra en los tubos plásticos y aborda específicamente la medición de dimensiones. Esta norma establece métodos y procedimientos para realizar mediciones precisas de diversas dimensiones de los tubos plásticos. La medición precisa de dimensiones es fundamental para garantizar la calidad y la compatibilidad de los tubos plásticos en una variedad de aplicaciones, como sistemas de tuberías para agua, gas, saneamiento, entre otros [33].

NTP-ISO 1167: 2004 - Tubos termoplásticos para el transporte de fluidos

Método de ensayo, se enfoca en los tubos termoplásticos utilizados para el transporte de fluidos, específicamente proporciona un método de ensayo para evaluar la resistencia a la presión interna de estos tubos [33].

NTP-ISO 2505:2008 - Tubos termoplásticos reversión longitudinal

La norma establece procedimientos de ensayo estandarizados que permiten detectar y cuantificar la reversión longitudinal en los tubos termoplásticos. Estos métodos de ensayo pueden incluir técnicas de análisis visual, mediciones de dimensiones, pruebas de resistencia mecánica u otros ensayos específicos diseñados para evaluar la presencia y la magnitud de la reversión longitudinal [33].

ASTM D6041-18 - Especificación estándar para tuberías y accesorios de "fibra de vidrio" moldeados por contacto

Establece las especificaciones estándar para tuberías y accesorios fabricados mediante el proceso de moldeo por contacto utilizando materiales compuestos de fibra de vidrio (también conocidos como FRP, por sus siglas en inglés). Este estándar proporciona pautas detalladas para la fabricación, las propiedades físicas, mecánicas y químicas, así como los requisitos de calidad y las pruebas de estos productos [34], [35]. Esta norma proporciona una guía detallada para la

fabricación de tuberías y accesorios de fibra de vidrio moldeados por contacto, lo que garantiza que cumplan con los estándares de calidad y rendimiento requeridos para su aplicación específica. Además, establece procedimientos de prueba y métodos de evaluación para verificar que los productos cumplan con los requisitos de resistencia, estanqueidad y durabilidad establecidos por la norma [34], [35].

INEI

En la elaboración del diseño del sifón invertido, se considera el área de influencia poblacional. Esto permite plantear estrategias de acceso mayoritario a la información del proyecto, además de calcular la población beneficiada [36].

ANA

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) es el organismo encargado en Perú de la gestión integral y sostenible de los recursos hídricos, y tiene como principales funciones la elaboración de políticas y normativas, la otorgación y supervisión de derechos de uso de agua, el monitoreo de la calidad y cantidad de los recursos hídricos, la promoción de la conservación de fuentes de agua, la coordinación interinstitucional para una gestión integrada, y la promoción de la participación ciudadana en decisiones relacionadas con el agua, asegurando así su uso equitativo y sostenible para el beneficio de la población y el desarrollo del país.[37]

Marco conceptual

- 1) **Borde libre:** Es la diferencia de altura entre la parte superior de la corona y el nivel del agua [12].
- 2) **Coefficiente de pérdida:** Es un valor adimensional que indica cuánta presión se pierde en cierto tramo de la estructura hidráulica. Sirven para dimensionar [38].
- 3) **Coefficiente de rugosidad:** Es un factor que refleja la influencia friccional del contorno del conducto en el flujo, variando según el material utilizado [39].
- 4) **Conducción por gravedad:** Es el transporte de un fluido por medio de un sistema sin la necesidad de una fuente de energía externa, tales como: bomba y motor [40].
- 5) **Conducto:** Obra hidráulica utilizada para el transporte de agua [39].
- 6) **Diámetro nominal:** Valor derivado de las especificaciones comerciales de las tuberías, que comúnmente no concuerda con el valor real [39].
- 7) **Diámetro real:** Medida proveniente de una tubería proveniente de una medición [39].
- 8) **Flujo uniforme:** La velocidad de un fluido es constante en todas las secciones de un conducto, no presente aceleraciones ni desaceleraciones significativas [39].
- 9) **Modelo hidráulico:** Un modelo hidráulico es una representación física o matemática de un sistema hidráulico, que puede incluir componentes como tuberías, canales, bombas, válvulas y estructuras relacionadas con el agua. Estos modelos se utilizan para simular y estudiar el comportamiento de flujos de agua y fenómenos hidráulicos en condiciones controladas y reproducibles [30].
- 10) **Pérdida:** Representa la textura superficial de una superficie o material, cuantifica la irregularidad en la elevación de una superficie [41].
- 11) **Regímenes de flujo:** Es la forma en las que se mueve el fluido, es determinado por la velocidad y la distribución del fluido en relación con el tiempo y posición dentro del conducto [42].
- 12) **Sedimentación:** Es el método mediante el cual las partículas sólidas suspendidas en el agua se asientan debido a la influencia de la fuerza gravitacional [39].
- 13) **Sello de agua:** Es la barrera líquida utilizada para controlar el paso del aire por el conducto [39].
- 14) **Sifón invertido:** Se trata de una disposición compuesta por una o varias conducciones que operan bajo presión y se utiliza para atravesar tuberías por debajo de impedimentos, tales como: puentes, carreteras, entre otros [39].

- 15) **Tuberías de presión:** Son conductos que llevan agua a través de presión. En ocasiones se usan bloques de anclaje para que sean estables [12].
- 16) **Tubos o tubería:** Es un conducto prefabricado en su mayoría de concreto, hierro fundido, PVC y otros. Su sección por lo general es circular [39].
- 17) **Válvula de purga de agua y lodos:** Son elementos que permiten evacuar el agua almacenada en el conducto. Se ubican en la parte más baja del sifón [12].
- 18) **Velocidad máxima permisible:** Es la velocidad máxima para la cual se diseña, es el valor en el cual se considera segura y aceptable. Su valor es estimado en la mayoría de casos por juicio del ingeniero [12].
- 19) **Velocidad mínima permisible:** Se refiere a aquella que tiene como objetivo prevenir la sedimentación en las conducciones de agua [12].

Simbología de cálculo

- 1) **A:** Área m^2 [21].
- 2) **B:** luz de la sección cajón m [22].
- 3) **D:** Diámetro m [21].
- 4) **g:** Gravedad $\frac{m^2}{s}$ [21].
- 5) **hf:** Pérdidas de carga totales que equivalen a la diferencia entre el nivel del agua aguas arriba y aguas abajo m [22].
- 6) **KE:** Coeficiente de entrada [22].
- 7) **KS:** Coeficiente de salida [22].
- 8) **L:** Longitud del sifón invertido m [22].
- 9) **Q:** Caudal $\frac{m^3}{s}$ [21].
- 10) **R:** Número de Reynols [21].
- 11) **R1:** Profundidad de la socavación bajo el nivel del agua m [22].
- 12) **S:** Pendiente m/m [21].
- 13) **U:** velocidad característica del flujo, después de tomar la velocidad promedio del flujo [21].
- 14) **v:** Velocidad m/s [21].
- 15) **Y:** elevación del agua m [22].

Materiales y métodos

Tipo de investigación

La investigación seguirá un enfoque experimental, utilizando datos empíricos obtenidos mediante pruebas con un modelo hidráulico. A través de la manipulación controlada de la variable independiente, se busca estimar con precisión las pérdidas de carga en las cámaras de entrada y salida.

El nivel de investigación es de tipo aplicada, puesto que se propone una mejora en el criterio para definir los valores de los coeficientes de las pérdidas de carga en las cámaras de entrada y salida en los sifones invertidos.

Diseño de investigación

El diseño de investigación es experimental puro, del tipo preprueba–postprueba con grupo de control, porque será necesario realizar un modelo hidráulico a escala en base a un sifón real,

calculando la varianza del coeficiente de pérdida bajo circunstancias predisuestas, lo que permitirá identificar el valor del coeficiente de pérdida en la cámara de entrada y salida.

Formulación del problema

¿Cómo es el comportamiento del coeficiente de pérdida de carga en las cámaras de entrada y salida en sifones invertidos?

Hipótesis

El aumento o disminución en el valor del coeficiente de pérdida de carga en la cámara de entrada y salida tendrá un impacto significativo en la modificación del diseño de los sifones invertidos.

Población

La población de estudio será finita y estará conformada por los sifones invertidos ubicados en el departamento de Lambayeque. Asimismo, para seleccionar el sifón que se usará en la semejanza hidráulica, se requiere contar con información básica sobre sus características para el cálculo de las pérdidas de carga y el diseño.

Muestra

La muestra de estudio será únicamente el sifón invertido ubicado en el sector Pacherras en el distrito de Pucalá, Provincia de Chiclayo es una estructura empleada para cruzar el canal Pampa Grande por debajo del cauce de la quebrada Pacherras - Caballo Blanco y viceversa. Se tiene que para el diseño se ha empleado un caudal de 8 m³/s, una longitud de 48m de largo, un ancho aproximado de 5.8m en la transición final y de 3.7m en la transición inicial. Asimismo, en el proyecto de construcción se empleó una tubería de 60 pulgadas. Se considerarán los datos establecidos en el proyecto para la elaboración del modelo hidráulico.

Muestreo

El tipo de muestreo será “Probabilístico”, puesto que se puede contar con cualquier sifón invertido para la elaboración del modelo hidráulico. Sin embargo, se debe tener la información del proyecto.

Operacionalización de variables

- **Variable Independiente:** Comportamiento del coeficiente de pérdida
- **Variable Dependiente:** Pérdida de carga en las cámaras de entrada y salida

TABLA III

TABLA DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLE INDEPENDIENTE

Variable Independiente:	Definición conceptual	Unidad de Medida	Frecuencia y momento de medición	Método de medición	Tipo de medición	Materiales	Sección del sifón invertido	Herramientas
Comportamiento del coeficiente de pérdida	Es un valor adimensional que indica cuánta presión se pierde en cierto tramo de la estructura hidráulica. Sirven para dimensionar	Coeficientes adimensionales	Medición única	Pérdidas localizadas	Cuantitativo experimental	PVC	Cámara de entrada	Manual de ANA
				Pérdidas distribuidas		Concreto	Cámara de salida	
						Fibra de vidrio		

TABLA IV

TABLA DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLE DEPENDIENTE

Variable Dependiente	Valor obtenido	Frecuencia de medición	Parámetros	Unidad de Medida	Herramientas
Pérdida de carga en las cámaras de entrada y salida	Cuantitativo adimensional	Antes de aplicar la condición experimental	Densidad del fluido	kg/m ³	Manual de ANA
			Velocidad	m/s	
			Temperatura	°C	
		Después de aplicar la condición experimental			

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se utilizará el método de semejanza hidráulica, basado en el número de Froude, para el cálculo de las pérdidas de carga. El método de semejanza hidráulica es una técnica comúnmente utilizada en ingeniería hidráulica para estimar pérdidas de carga y otros parámetros en sistemas hidráulicos. Este método se basa en la idea de que dos sistemas hidráulicos diferentes, pero geoméricamente similares, tendrán comportamientos hidráulicos comparables, siempre y cuando ciertas condiciones sean satisfechas. Asimismo, el número de Froude es aquel que va a verificar que mi diseño sea el correcto.

Materiales

Se tendrá como punto de partida fundamental, el uso de información de un prototipo de sifón invertido. Se contará con el expediente técnico de un proyecto denominado “Instalación del servicio de protección en la quebrada Pacherras, sector Pacherras – Caballo Blanco, distrito de Pucalá, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque”.

La base informativa para el modelado hidráulico de un sifón invertido incluye una serie de parámetros clave que son fundamentales para realizar un análisis preciso y completo del

sistema. Entre estos parámetros se encuentran las dimensiones de los canales en las transiciones de entrada y salida al sifón invertido, las cuales son esenciales para garantizar un flujo uniforme y sin perturbaciones en la entrada y salida de la tubería. Además, el caudal es un dato esencial que determina la capacidad de transporte del sifón invertido y permite evaluar su rendimiento hidráulico bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

Los tirantes hidráulicos, que representan la profundidad del agua en el canal, son otra variable importante para considerar, ya que influyen en la capacidad de transporte y la eficiencia del sistema. Los tirantes hidráulicos son el punto de partida del cual se aprecia si se genera o no una pérdida de carga entre y punto y otro. Asimismo, el diámetro de la tubería empleada es esencial en el factor de escala física del modelo hidráulico. Además, se debe considerar la cantidad de tuberías utilizadas en el sifón, pues influyen en la capacidad de transporte y distribución del flujo, ya que esto puede afectar la capacidad total de transporte y la distribución del flujo dentro del sistema.

Otros parámetros de diseño necesarios incluyen la topografía del terreno, la elevación del agua aguas arriba y aguas abajo del sifón invertido, la rugosidad de las paredes de la tubería, las condiciones de operación previstas (como el régimen de flujo y las variaciones de caudal), entre otros. Todos estos datos son fundamentales para realizar un análisis hidráulico completo y preciso del sifón invertido, lo que permite evaluar su viabilidad, rendimiento y seguridad en diferentes escenarios y condiciones de funcionamiento.

Diseño del modelo hidráulico

Se usará la técnica de semejanza hidráulica, la cual implica la comparación entre un prototipo real y un modelo en escala reducida del sistema. En este caso, el prototipo real sería el sifón invertido ubicado en el sector Pacherres – Caballo Blanco, distrito de Pucalá, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque, y el modelo sería una representación en escala de este. La idea es que las pérdidas de carga en el modelo a escala sean proporcionales a las pérdidas de carga en el prototipo real, siempre y cuando se mantengan ciertas similitudes geométricas y dinámicas entre ambos sistemas [43].

Una vez establecido el diseño del modelo hidráulico, se utilizará el método de semejanza hidráulica para comparar las pérdidas de carga entre el prototipo real y el modelo a escala. Esto implicaría ajustar los coeficientes de pérdida de carga en la cámara de entrada y salida del sifón para que el modelo reproduzca de manera precisa el comportamiento hidráulico del prototipo. Para realizar este análisis, se guiará de una hoja de cálculo de Excel basada en el manual de la

Autoridad Nacional del Agua (ANA), lo que me permitiría realizar análisis detallados y optimizar el diseño del sifón.

Durante este proceso de optimización, se busca desarrollar un diseño de sifón invertido eficiente que represente de manera más precisa las pérdidas de carga, permitiendo comprender mejor el comportamiento de los coeficientes de pérdida de carga y, a su vez, mejorar el rendimiento del sistema, de tal manera que se puedan corroborar que estas pérdidas de carga sean menores que la carga disponible en sifón invertido; esto mejorará la eficiencia del sistema mediante ajustes en la geometría del sifón, el material de revestimiento en la base de la cámara de entrada y salida, y otros parámetros hidráulicos relevantes.

Además, se corroborará mediante el número de Froude que exista una semejanza hidráulica entre el modelo hidráulico y el prototipo, esto ayudará a validar los resultados, siendo un indicador clave de que el sistema funciona según lo previsto en condiciones reales. Este enfoque integral, que combina modelado hidráulico, métodos de semejanza, y pruebas experimentales, lo que permitiría diseñar y optimizar sifones invertidos que cumplan con los requerimientos de transporte de líquidos sobre obstáculos de manera confiable y eficiente.

La semejanza hidráulica partirá cumpliendo con el número de Froude, lo que indicará que se dan las mismas condiciones de flujo, esto es esencial para dar precisión al cálculo de las pérdidas de carga, ya que tienen que ser iguales tanto en el modelo hidráulico como en el sifón invertido [44]. Los experimentos de laboratorio y los trabajos de campo desempeñan un papel crucial en el desarrollo y diseño de diferentes procesos hidráulicos, particularmente la modelación física permite analizar y simular diferentes procesos en entornos controlados bajo condiciones cercanas a la realidad. Además, permite examinar las metodologías empleadas para el cálculo de las pérdidas de carga por fricción [45].

A continuación, se describirá el proceso realizado para obtener la semejanza hidráulica:

- 1) En primera instancia, se escogerá un factor de escala, para la realización del modelo se escogió un valor de 1/30. Con el cual se tendrá valores comerciales en cuestiones de tuberías, codos y otros accesorios.
- 2) Una vez asumido el factor de escala, se aplicará el factor de escala a todas las dimensiones: diámetro de tubería, longitud de las tuberías, elevaciones, ángulos de inclinación. Para ello se realizará el siguiente procedimiento:

Semejanza Hidráulica

Se empleará el número de Froude para lograr una semejanza hidráulica entre el prototipo y el modelo hidráulico.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * d}} \quad (18)$$

Se tiene que cumplir la siguiente condición para mencionar que realmente existe una semejanza.

$$Frm = Frp$$

Se tienen los siguientes datos del prototipo con los cuales se realizará la escala:

- Qp: 4.00 m³/s
- Velocidad (v): 1.64 m²/s
- Escala: 1/30
- Longitud del Prototipo (Lp): 48.00 m
- Longitud del modelo (Lm): 1.60 m
- ge: 1.00 m²/s
- Tirante hidráulico del prototipo: 1.47 m

Se calculará la longitud escalada con la siguiente expresión:

$$Le = \frac{Lp}{Lm} \quad (19)$$

Donde:

- Lp: Longitud del prototipo
- Lm: Longitud del modelo

$$Le = 30$$

Se calculará el caudal escalado con la siguiente expresión:

$$Qe = g_e^{\frac{1}{2}} Le^{\frac{5}{2}} \quad (20)$$

Donde:

- ge: Aceleración de la gravedad

- Le: Escala de la longitud
- Qe: Escala de del caudal = 4929.503018

A continuación, se presenta la siguiente igualdad para calcular el caudal en el modelo:

$$Q_e = \frac{Q_p}{Q_m} \quad (181)$$

Donde:

- Qp: Caudal del prototipo = 4.00 m³/s
- Le: 30
- Qe: Escala de del caudal = 4929.503018
- Qm: Caudal del modelo

De la relación antes mencionada se obtiene el valor de Qm

$$Q_m: 0.0008 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_m: 48.69 \text{ Lt}/\text{min}$$

$$Q_m: 0.81 \text{ Lt}/\text{s}$$

Para calcular la velocidad escalada. se empleará la siguiente relación:

$$v_e = L_e^{\frac{1}{2}} \quad (192)$$

Donde:

- Le: Longitud escalada
- ve: Escala de velocidad: 5.48

Se tiene la siguiente igualdad para calcular la velocidad en el modelo:

$$V_e = \frac{v_p}{v_m} \quad (23)$$

Donde:

- vp: Velocidad del prototipo
- vm: Velocidad del modelo

De la relación antes mencionada se obtiene el valor de Vm

$$V_m: 0.30 \text{ m/s}$$

Se calculará el número de Froude en el prototipo, para ello se empleará la siguiente ecuación:

$$Fr_p = \frac{V_p}{\sqrt{g * y_1}} \quad (24)$$

Donde:

- v_p : Velocidad del prototipo
- g : Aceleración de la gravedad
- y_1 : Tirante hidráulico del prototipo

$$Fr(p): 0.408$$

Se calculará el número de Froude en el modelo, para ello se empleará la siguiente ecuación:

$$Fr = \frac{V_m}{\sqrt{g * y_m}} \quad (25)$$

Donde:

- V_m : velocidad del modelo
- g : Aceleración de la gravedad
- y_m : Tirante hidráulico del modelo

$$y(m): 0.05 \text{ m} = 4.90 \text{ cm}$$

$$Fr(m): 0.408$$

Se verificará el número de Froude, este tiene que ser el mismo tanto en el modelo hidráulico, como en el prototipo. Esto me dirá que realmente existe una semejanza entre ambos.

$$Fr_p = Fr_m$$

$$408 = 408$$

Se puede constatar que sí cumple.

3) Al aplicar el factor de escala, se obtienen los siguientes planos:

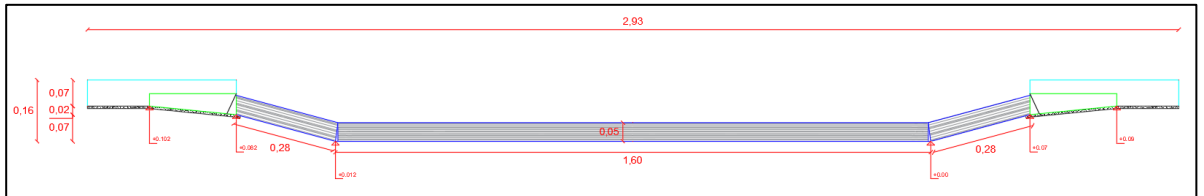


Fig. 12. Plano de perfil del modelo del sifón invertido

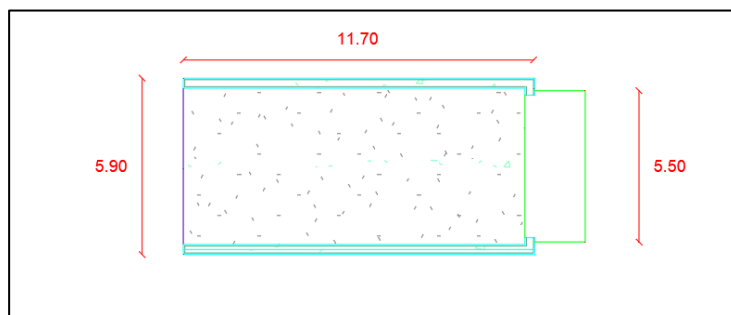


Fig. 13. Vista en planta de la cámara de entrada

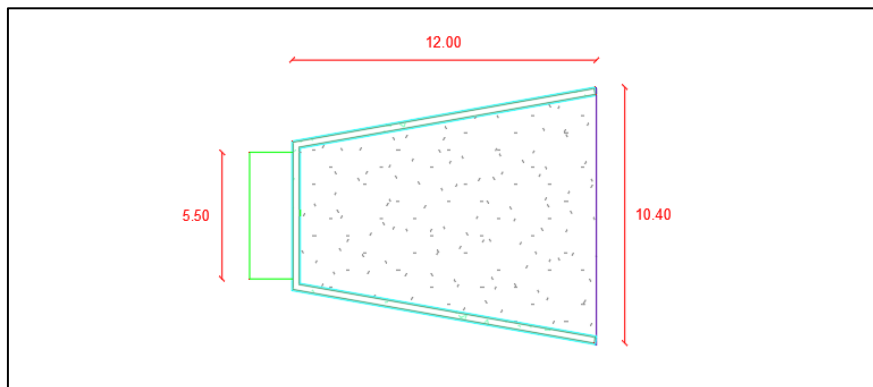


Fig. 14. Vista en planta de la cámara de salida

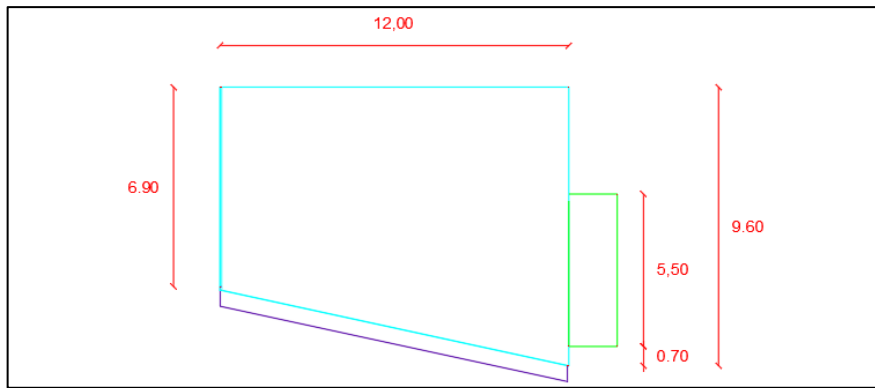


Fig. 15. Vista en perfil de la cámara de salida

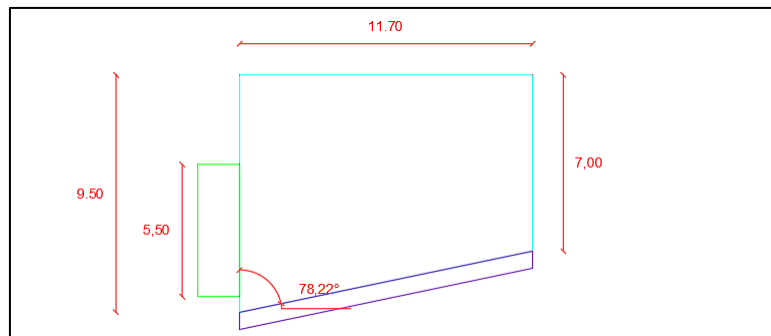


Fig. 16. Vista en perfil de la cámara de entrada

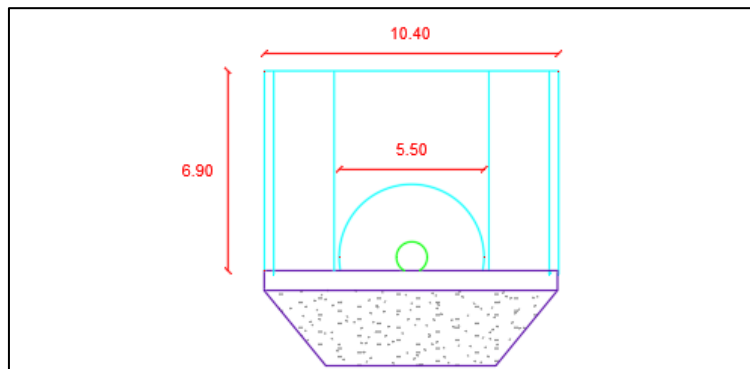


Fig. 17. Vista posterior de la cámara de salida

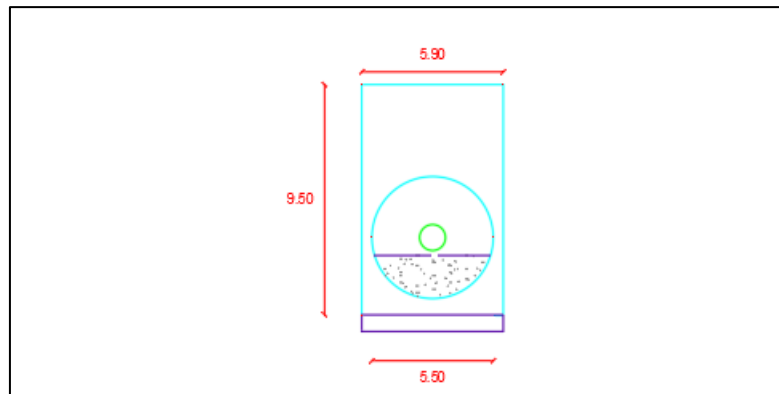


Fig. 18. Vista en elevación de la cámara de entrada

4) Asimismo, se realizó el diseño de las cámaras en 3D en el programa Autodesk AutoCAD, todo en base a las medidas diseñadas para el modelo hidráulico.

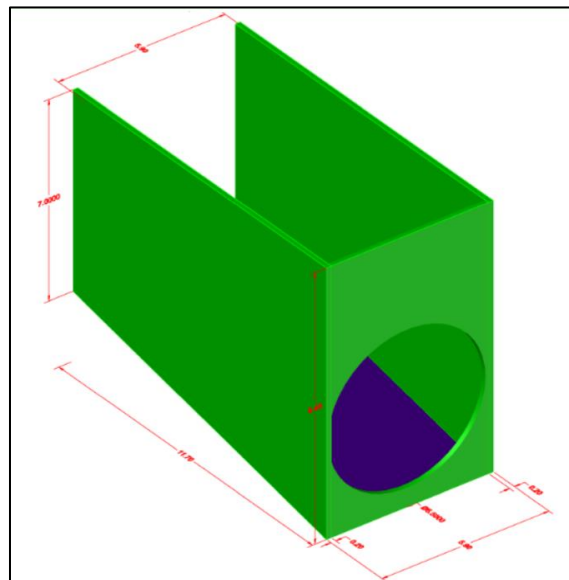


Fig. 19. Modelo en 3D de la cámara de Entrada

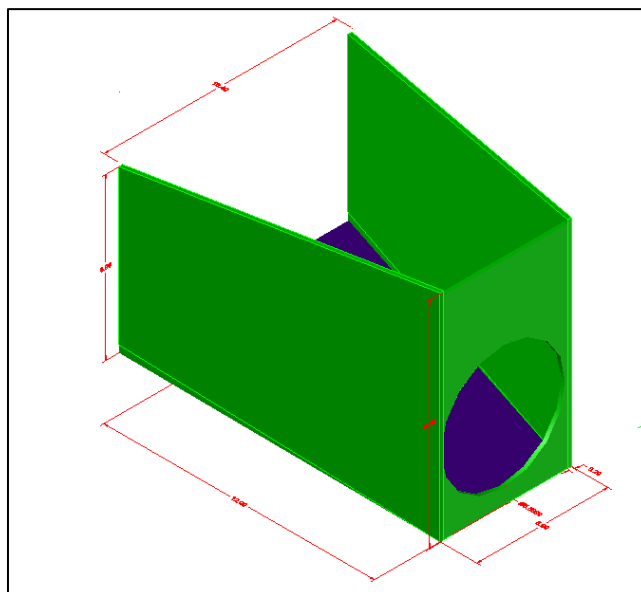


Fig. 20. Vista en 3D de la cámara de salida

5) A continuación, se realizó el modelado del modelo hidráulico, de esa manera se visualizará una proyección de cómo quedará el modelo. Se realizó en el programa Autodesk Revit.

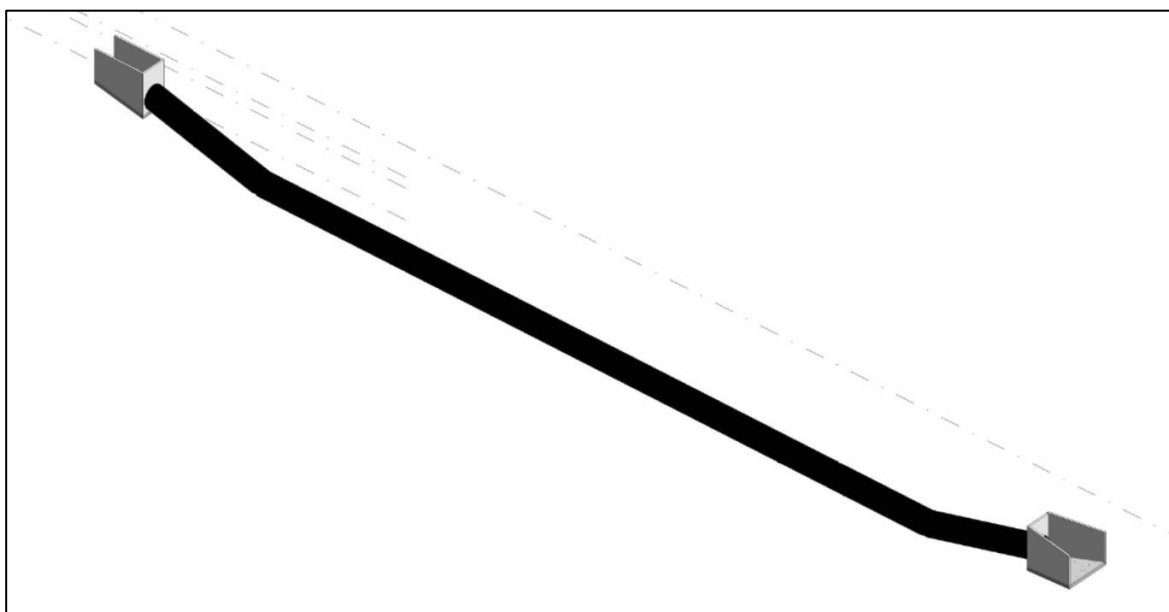


Fig. 21. Vista en 3D del modelo de sifón invertido

6) Una vez diseñada los elementos de la estructura hidráulica y el modelado, procederá a construirse. En primera instancia, se consideró diseñar con base en madera, pero debido a que la estructura estará en constante exposición al agua, se consideró

utilizar la fibra de vidrio, puesto de esta manera se garantiza tener un flujo constante sin que el agua se filtre.



Fig. 22. Vista en planta de la cámara de entrada



Fig. 23. Vista en perfil de la cámara de entrada

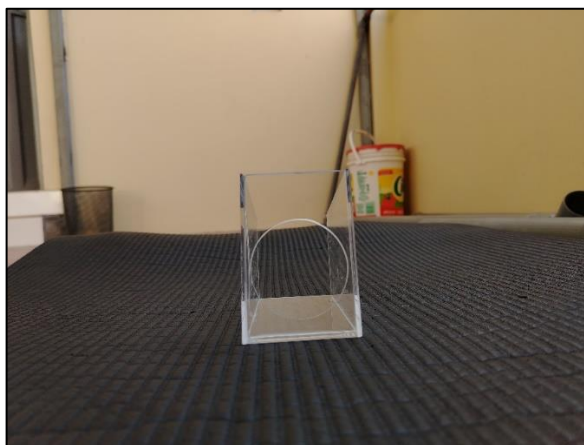


Fig. 24. Vista frontal de la cámara de entrada



Fig. 25. Vista en planta de la cámara de salida

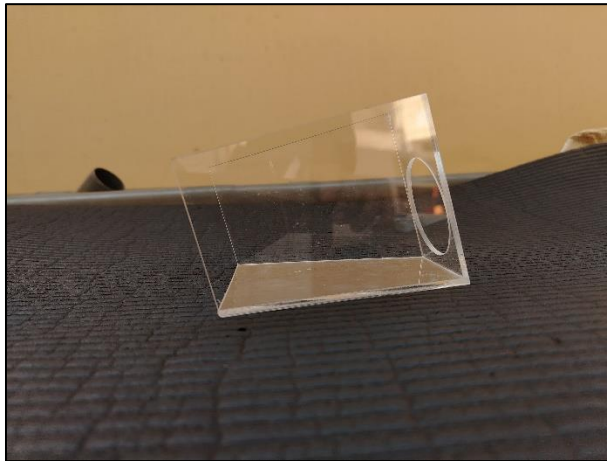


Fig. 26. Vista en perfil de la cámara de salida

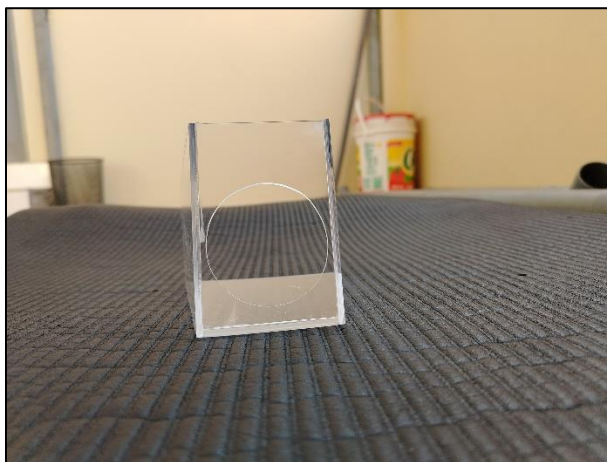


Fig. 27. Vista frontal de la cámara de salida

7) Para calcular las pérdidas de carga en las cámaras de entrada y salida, se añadirán puntos de control al modelo hidráulico. En total, se incluirán 6 puntos de control: uno en la cámara de entrada, otro en la cámara de salida, y dos adicionales para cada dirección del flujo. Estos puntos estarán distribuidos de la siguiente manera:

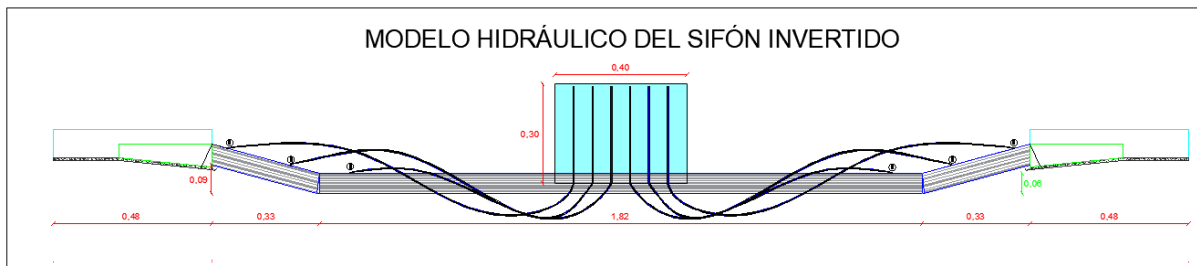


Fig. 28. Ubicación de los puntos de pérdida de carga

8) Se ensamblará el modelo hidráulico.



Fig. 29. Modelo hidráulico ensamblado



Fig. 30. Cámara de entrada del modelo hidráulico



Fig. 31. Cámara de salida del modelo hidráulico

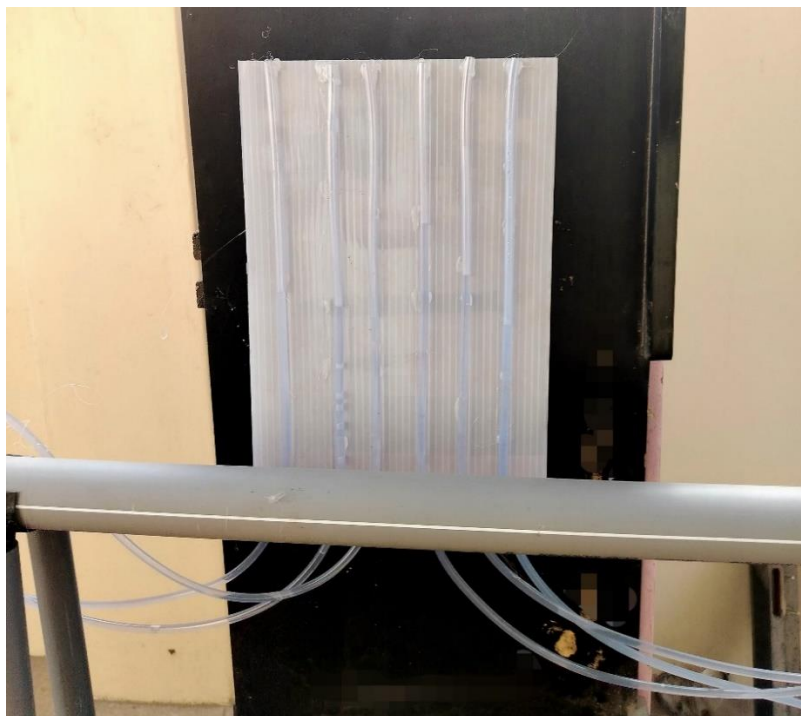


Fig. 32. Tubos piezométricos de medición para las pérdidas de carga

9) En la toma de resultados, se analizará bajo varios caudales. Esto ayudará a ver la variabilidad de los coeficientes de pérdida de carga. Para ello se calculará el caudal con el incremento de la fuerza de la bomba, y se tomarán los tiempos respectivos. Se tomarán un total de 12 pruebas, dentro de las cuales por cada prueba se tomarán 3 volúmenes: 2 lt, 1.5 lt y 1 lt. Asimismo, se promediarán los caudales y se harán los cálculos respectivos en base a eso.

TABLA V
CAUDAL PROMEDIO CON REVESTIMIENTO EN LA BASE DE FIBRA DE VIDRIO

Prueba	Volumen (lt)	Tiempo (s)	Caudal (lt/s)	Caudal Promedio (lt/s)
1	2.00	1.559	1.283	1.290
	1.50	1.165	1.288	
	1.00	0.770	1.299	
2	2.00	1.551	1.289	1.289
	1.50	1.164	1.289	
	1.00	0.775	1.290	
3	2.00	1.556	1.285	1.287
	1.50	1.162	1.291	
	1.00	0.778	1.285	
4	2.00	1.561	1.281	1.283
	1.50	1.166	1.286	
	1.00	0.781	1.280	
5	2.00	1.554	1.287	1.294
	1.50	1.16	1.293	
	1.00	0.768	1.302	
6	2.00	1.553	1.288	1.293
	1.50	1.16	1.293	
	1.00	0.771	1.297	
7	2.00	1.557	1.285	1.291
	1.50	1.162	1.291	
	1.00	0.77	1.299	
8	2.00	1.562	1.280	1.286
	1.50	1.165	1.288	
	1.00	0.775	1.290	
9	2.00	1.555	1.286	1.289
	1.50	1.163	1.290	
	1.00	0.775	1.290	
10	2.00	1.558	1.284	1.293

(CONTINUACIÓN) TABLA V
CAUDAL PROMEDIO CON REVESTIMIENTO EN LA BASE DE FIBRA DE
VIDRIO

	1.50	1.161	1.292	
	1.00	0.768	1.302	
11	2.00	1.559	1.283	1.291
	1.50	1.159	1.294	
	1.00	0.772	1.295	
12	2.00	1.557	1.285	1.290
	1.50	1.163	1.290	
	1.00	0.771	1.297	

TABLA VI
CAUDAL PROMEDIO CON REVESTIMIENTO EN LA BASE DE PVC

Prueba	Volumen (lt)	Tiempo (s)	Caudal (lt/s)	Caudal Promedio (lt/s)
1	2.00	1.551	1.289	1.300
	1.50	1.158	1.295	
	1.00	0.761	1.314	
2	2.00	1.557	1.285	1.297
	1.50	1.157	1.296	
	1.00	0.763	1.311	
3	2.00	1.556	1.285	1.298
	1.50	1.162	1.291	
	1.00	0.759	1.318	
4	2.00	1.561	1.281	1.294
	1.50	1.166	1.286	
	1.00	0.761	1.314	
5	2.00	1.554	1.287	1.297
	1.50	1.16	1.293	

(CONTINUACIÓN) TABLA VI
 CAUDAL PROMEDIO CON REVESTIMIENTO EN LA BASE DE
 PVC

	1.00	0.763	1.311	
6	2.00	1.553	1.288	1.299
	1.50	1.16	1.293	
	1.00	0.759	1.318	
7	2.00	1.557	1.285	1.298
	1.50	1.162	1.291	
	1.00	0.759	1.318	
8	2.00	1.562	1.280	1.295
	1.50	1.165	1.288	
	1.00	0.76	1.316	
9	2.00	1.555	1.286	1.296
	1.50	1.163	1.290	
	1.00	0.762	1.312	
10	2.00	1.558	1.284	1.297
	1.50	1.161	1.292	
	1.00	0.761	1.314	
11	2.00	1.559	1.283	1.297
	1.50	1.159	1.294	
	1.00	0.761	1.314	
12	2.00	1.557	1.285	1.295
	1.50	1.163	1.290	
	1.00	0.763	1.311	

TABLA VII

CAUDAL PROMEDIO CON REVESTIMIENTO EN LA BASE DE CONCRETO

Prueba	Volumen (lt)	Tiempo (s)	Caudal (lt/s)	Caudal Promedio (lt/s)
1	2.00	1.629	1.228	1.236
	1.50	1.218	1.232	
	1.00	0.801	1.248	
2	2.00	1.630	1.227	1.236
	1.50	1.216	1.234	
	1.00	0.802	1.247	
3	2.00	1.629	1.228	1.232
	1.50	1.220	1.230	
	1.00	0.808	1.238	
4	2.00	1.626	1.230	1.237
	1.50	1.221	1.229	
	1.00	0.799	1.252	
5	2.00	1.622	1.233	1.237
	1.50	1.219	1.231	
	1.00	0.801	1.248	
6	2.00	1.628	1.229	1.235
	1.50	1.219	1.231	
	1.00	0.803	1.245	
7	2.00	1.625	1.231	1.236
	1.50	1.217	1.233	
	1.00	0.803	1.245	
8	2.00	1.627	1.229	1.234
	1.50	1.221	1.229	
	1.00	0.804	1.244	
9	2.00	1.627	1.229	1.233
	1.50	1.221	1.229	
	1.00	0.805	1.242	
10	2.00	1.628	1.229	1.234

(CONTINUACIÓN) TABLA VII
CAUDAL PROMEDIO CON REVESTIMIENTO EN LA BASE DE
CONCRETO

	1.50	1.218	1.232	
	1.00	0.805	1.242	
11	2.00	1.628	1.229	1.235
	1.50	1.217	1.233	
	1.00	0.803	1.245	
12	2.00	1.627	1.229	1.236
	1.50	1.220	1.230	
	1.00	0.801	1.248	

Se corroborará que la variación porcentual sea menor al 1 % entre los caudales promedios obtenidos. Esto con la finalidad de reducir el error. A continuación, se calculará la desviación porcentual.

TABLA VIII
DESVIACIÓN PORCENTUAL DEL CAUDAL CON REVESTIMIENTO DE FIBRA DE
VIDRIO EN LA BASE

Caudal promedio	Caudal (lt/s)	Porcentaje (%)	Desviación porcentual (%)
Máximo	1.294	100	0.88
Mínimo	1.282	99.12	

TABLA IX

DESVIACIÓN PORCENTUAL DEL CAUDAL CON REVESTIMIENTO DE PVC EN LA
BASE

Caudal promedio	Caudal (lt/s)	Porcentaje (%)	Desviación porcentual (%)
Máximo	1.300	100	0.44
Mínimo	1.294	99.56	

TABLA X

DESVIACIÓN PORCENTUAL DEL CAUDAL CON REVESTIMIENTO DE PVC EN LA
BASE

Caudal promedio	Caudal (lt/s)	Porcentaje (%)	Desviación porcentual (%)
Máximo	1.24	100	0.46
Mínimo	1.232	99.54	

La desviación porcentual en las pruebas es menor al 1 %, por lo tanto, sí son aceptables.

A continuación, se realizarán los siguientes cálculos:

La tabla presentada incluye una serie de mediciones de parámetros hidráulicos, destacando los siguientes:

- **Área hidráulica (m²):** Se mantiene constante en todas las filas con un valor de 0.0025 m², lo que indica que la sección del flujo en la tubería no varía.
- **Velocidad dentro de la tubería (m/s):** Muestra variaciones ligeras en el rango de 0.5208 m/s a 0.5249 m/s, lo que refleja pequeñas fluctuaciones en la velocidad del flujo a través de la tubería.
- **Altura de tirante en la entrada (cm):** Alterna entre dos valores, 5.7500 cm y 5.8000 cm, representando la altura del flujo a la entrada del sistema.
- **Ancho del canal de entrada (cm):** Es constante en 5.5000 cm para todas las mediciones, indicando una uniformidad en las dimensiones del canal.

- **Área mojada (m²):** Se mantiene en 0.0032 m², lo que sugiere una superficie de contacto constante entre el agua y las paredes de la tubería.

9) Además, se calcularán los parámetros hidráulicos en el modelo: área hidráulica, velocidad dentro de la tubería, área mojada y la altura de tirante entrada. Para el cálculo del área hidráulica, se calculará el área dentro de la tubería.

Para calcular el área hidráulica, se utilizará la siguiente fórmula:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (26)$$

Donde “D” viene a ser el diámetro interno de la tubería, en este caso es 0.056m.

Además, para calcular la velocidad dentro de la tubería se empleará lo siguiente:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (27)$$

Donde “Q” será el caudal promedio calculado de la prueba, y el “A” el área hidráulica.

Asimismo, para calcular la altura de tirante en la entrada, se empleará lo siguiente:

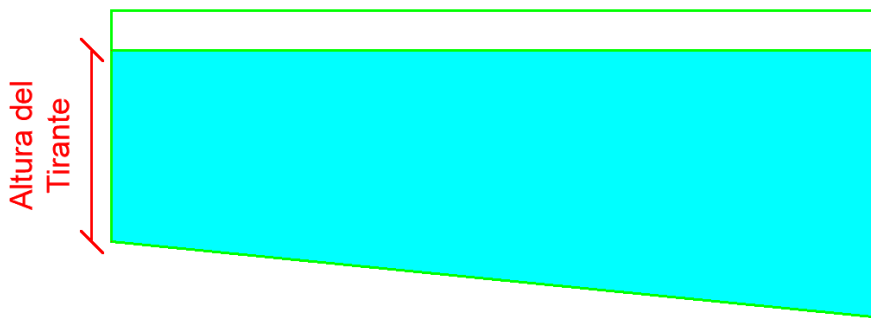


Fig. 33. Altura del tirante en la cámara de entrada

El área mojada viene a ser la altura del tirante, multiplicada por el ancho del canal. Donde el ancho es un valor establecido de diseño.

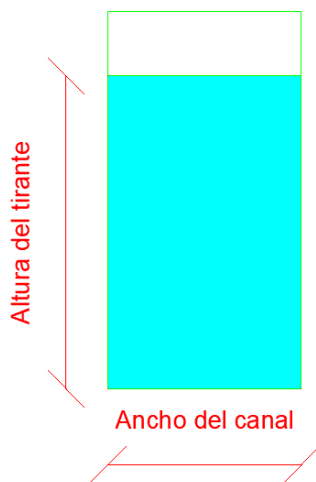


Fig. 34. Área mojada en las cámaras

Se realizará este cálculo para todas las pruebas realizadas, considerando el material de revestimiento de la base en las cámaras de entrada y salida.

TABLA XI

PARÁMETROS HIDRÁULICOS EN TUBERÍA Y CANAL EN LA ENTRADA CON
REVESTIMIENTO EN LA BASE DE FIBRA DE VIDRIO

Prueba	Área hidráulica (m ²)	Velocidad dentro de la tubería (m/s)	Altura de tirante entrada (cm)	Ancho Canal de entrada (cm)	Área Mojada (m ²)
1	0.0025	0.5236	5.7500	5.5000	0.0032
2	0.0025	0.5235	5.8000	5.5000	0.0032
3	0.0025	0.5226	5.8000	5.5000	0.0032
4	0.0025	0.5208	5.8000	5.5000	0.0032
5	0.0025	0.5254	5.8000	5.5000	0.0032
6	0.0025	0.5248	5.7500	5.5000	0.0032
7	0.0025	0.5243	5.7500	5.5000	0.0032
8	0.0025	0.5222	5.8000	5.5000	0.0032
9	0.0025	0.5232	5.8000	5.5000	0.0032
10	0.0025	0.5248	5.7500	5.5000	0.0032
11	0.0025	0.5241	5.8000	5.5000	0.0032
12	0.0025	0.5239	5.8000	5.5000	0.0032

TABLA XII

PARÁMETROS HIDRÁULICOS EN TUBERÍA Y CANAL EN LA ENTRADA CON
REVESTIMIENTO EN LA BASE DE PVC

Prueba	Área hidráulica (m ²)	Velocidad dentro de la tubería (m/s)	Altura de tirante entrada (cm)	Ancho Canal de entrada (cm)	Área Mojada (m ²)
1	0.0025	0.5277	5.7000	5.5000	0.0031
2	0.0025	0.5267	5.8000	5.5000	0.0032
3	0.0025	0.5270	5.7000	5.5000	0.0031
4	0.0025	0.5253	5.8000	5.5000	0.0032
5	0.0025	0.5266	5.8000	5.5000	0.0032
6	0.0025	0.5276	5.8000	5.5000	0.0032
7	0.0025	0.5269	5.8000	5.5000	0.0032
8	0.0025	0.5256	5.7000	5.5000	0.0031
9	0.0025	0.5262	5.8000	5.5000	0.0032
10	0.0025	0.5264	5.8000	5.5000	0.0032
11	0.0025	0.5266	5.8000	5.5000	0.0032
12	0.0025	0.5258	5.8000	5.5000	0.0032

TABLA XIII

PARÁMETROS HIDRÁULICOS EN TUBERÍA Y CANAL EN LA ENTRADA CON
REVESTIMIENTO EN LA BASE DE CONCRETO

Prueba	Área hidráulica (m ²)	Velocidad dentro de la tubería (m/s)	Altura de tirante entrada (cm)	Ancho Canal de entrada (cm)	Área Mojada (m ²)
1	0.0025	0.5018	5.6000	5.5000	0.0031
2	0.0025	0.5017	5.6000	5.5000	0.0031
3	0.0025	0.5000	5.6000	5.5000	0.0031
4	0.0025	0.5021	5.6000	5.5000	0.0031
5	0.0025	0.5024	5.6000	5.5000	0.0031
6	0.0025	0.5013	5.6000	5.5000	0.0031

(CONTINUACIÓN) TABLA XIII
 PARÁMETROS HIDRÁULICOS EN TUBERÍA Y CANAL EN LA ENTRADA CON
 REVESTIMIENTO EN LA BASE DE CONCRETO

7	0.0025	0.5019	5.6000	5.5000	0.0031
8	0.0025	0.5010	5.6000	5.5000	0.0031
9	0.0025	0.5007	5.6000	5.5000	0.0031
10	0.0025	0.5010	5.6000	5.5000	0.0031
11	0.0025	0.5016	5.6000	5.5000	0.0031
12	0.0025	0.5017	5.6000	5.5000	0.0031

TABLA XIV
 PARÁMETROS HIDRÁULICOS CANAL EN LA SALIDA CON REVESTIMIENTO EN
 LA BASE DE PVC

Prueba	Altura de tirante salida (cm)	Ancho Canal de salida (cm)	Área Mojada (m ²)
1	4.3000	10.5000	0.0045
2	4.3000	10.5000	0.0045
3	4.3000	10.5000	0.0045
4	4.3000	10.5000	0.0045
5	4.2500	10.5000	0.0045
6	4.3000	10.5000	0.0045
7	4.3000	10.5000	0.0045
8	4.3000	10.5000	0.0045
9	4.3000	10.5000	0.0045
10	4.3000	10.5000	0.0045
11	4.2500	10.5000	0.0045
12	4.3000	10.5000	0.0045

TABLA XV

PARÁMETROS HIDRÁULICOS CANAL EN LA SALIDA CON REVESTIMIENTO EN
LA BASE DE FIBRA DE VIDRIO

Prueba	Altura de tirante salida (cm)	Ancho Canal de salida (cm)	Área Mojada (m ²)
1	4.4000	10.5000	0.0046
2	4.4000	10.5000	0.0046
3	4.4000	10.5000	0.0046
4	4.4000	10.5000	0.0046
5	4.4000	10.5000	0.0046
6	4.4000	10.5000	0.0046
7	4.4000	10.5000	0.0046
8	4.4000	10.5000	0.0046
9	4.4000	10.5000	0.0046
10	4.4000	10.5000	0.0046
11	4.4000	10.5000	0.0046
12	4.4000	10.5000	0.0046

TABLA XVI

PARÁMETROS HIDRÁULICOS CANAL EN LA SALIDA CON REVESTIMIENTO EN
LA BASE DE CONCRETO

Prueba	Altura de tirante salida (cm)	Ancho Canal de salida (cm)	Área Mojada (m ²)
1	4.2000	10.5000	0.0044
2	4.2000	10.5000	0.0044
3	4.2000	10.5000	0.0044
4	4.2000	10.5000	0.0044
5	4.3000	10.5000	0.0045
6	4.2000	10.5000	0.0044
7	4.2000	10.5000	0.0044
8	4.2000	10.5000	0.0044

(CONTINUACIÓN) TABLA XVI
 PARÁMETROS HIDRÁULICOS CANAL EN LA SALIDA CON REVESTIMIENTO EN
 LA BASE DE CONCRETO

9	4.3000	10.5000	0.0045
10	4.2000	10.5000	0.0044
11	4.2000	10.5000	0.0044
12	4.3000	10.5000	0.0045

Luego, se realizará el cálculo de velocidades en los canales, tanto de entrada como de salida. Para ello, se va a utilizar la siguiente expresión:

$$ve = \frac{Q}{A_m} \quad (20)$$

Donde “Q” es el caudal promedio, y el “Am” viene a ser el área mojada.

Este procedimiento se realizará para todas las pruebas antes calculadas.

TABLA XVII
 VELOCIDADES EN LOS CANALES DE ENTRADA Y SALIDA CON REVESTIMIENTO
 EN LA BASE DE FIBRA DE VIDRIO

Prueba	Velocidad en el canal entrada (m/s)	Velocidad en el canal salida (m/s)
1	0.4057	0.2792
2	0.4042	0.2791
3	0.4029	0.2786
4	0.4016	0.2776
5	0.4034	0.2801
6	0.4072	0.2798
7	0.4062	0.2795
8	0.4014	0.2784
9	0.4032	0.2790
10	0.4059	0.2798
11	0.4022	0.2794
12	0.4027	0.2793

TABLA XVIII

VELOCIDADES EN LOS CANALES DE ENTRADA Y SALIDA CON REVESTIMIENTO
EN LA BASE DE PVC

Prueba	Velocidad en el canal entrada (m/s)	Velocidad en el canal salida (m/s)
1	0.4113	0.2878
2	0.4027	0.2873
3	0.4100	0.2875
4	0.4016	0.2866
5	0.4034	0.2906
6	0.4037	0.2878
7	0.4027	0.2874
8	0.4084	0.2867
9	0.4032	0.2871
10	0.4024	0.2872
11	0.4022	0.2907
12	0.4027	0.2868

TABLA XIX

VELOCIDADES EN LOS CANALES DE ENTRADA Y SALIDA CON REVESTIMIENTO
EN LA BASE DE CONCRETO

Prueba	Velocidad en el canal entrada (m/s)	Velocidad en el canal salida (m/s)
1	0.3986	0.2803
2	0.3984	0.2802
3	0.3986	0.2793
4	0.3994	0.2804
5	0.4003	0.2740
6	0.3989	0.2800
7	0.3996	0.2803
8	0.3991	0.2798

(CONTINUACIÓN) TABLA XIX
 VELOCIDADES EN LOS CANALES DE ENTRADA Y SALIDA
 CON REVESTIMIENTO EN LA BASE DE CONCRETO

9	0.3991	0.2732
10	0.3989	0.2798
11	0.3989	0.2801
12	0.3991	0.2737

TABLA XX
 MEDICIONES DE ALTURA EN LAS CÁMARAS DE ENTRADA Y SALIDA CON
 REVESTIMIENTO DE FIBRA DE VIDRIO EN LA BASE

Prueba	Altura en la cámara de entrada (cm)	Altura en la cámara de salida (cm)
1	11.9500	8.0000
2	12.0000	8.0000
3	12.0000	8.0000
4	12.0000	8.0000
5	12.0000	8.0000
6	11.9500	8.0000
7	11.9500	8.0000
8	12.0000	8.0000
9	12.0000	8.0000
10	11.9500	8.0000
11	12.0000	8.0000
12	12.0000	8.0000

TABLA XXI

MEDICIONES DE ALTURA EN LAS CÁMARAS DE ENTRADA Y SALIDA CON
REVESTIMIENTO DE PVC EN LA BASE

Prueba	Altura en la cámara de entrada (cm)	Altura en la cámara de salida (cm)
1	11.9000	7.8500
2	12.0000	7.9000
3	11.9000	7.9000
4	12.0000	7.9000
5	12.0000	7.8500
6	12.0000	7.9000
7	12.0000	7.9000
8	11.9000	7.8500
9	12.0000	7.8500
10	12.0000	7.9000
11	12.0000	7.8500
12	12.0000	7.9000

TABLA XXII

MEDICIONES DE ALTURA EN LAS CÁMARAS DE ENTRADA Y SALIDA CON
REVESTIMIENTO DE CONCRETO EN LA BASE

Prueba	Altura en la cámara de entrada (cm)	Altura en la cámara de salida (cm)
1	11.85	7.9
2	11.85	7.9
3	11.85	7.9
4	11.85	7.9
5	11.85	8
6	11.85	7.9
7	11.85	7.9
8	11.85	7.9

(CONTINUACIÓN) TABLA XXII
 MEDICIONES DE ALTURA EN LAS CÁMARAS DE
 ENTRADA Y SALIDA CON REVESTIMIENTO DE
 CONCRETO EN LA BASE

9	11.85	8
10	11.85	7.9
11	11.85	7.9
12	11.85	8

A continuación, se realizarán las mediciones del tirante, medido desde la base de la estructura. El cual se restará con la medida del eje de la tubería al piso. La medida de la base de la cámara de entrada al piso es de 90.4 cm en el modelo hidráulico. Esta es establecida para todas las mediciones. La medida del piso, a la base de la cámara de salida en el modelo es de 88.50 cm.

TABLA XXIII
 MEDICIONES DE LA ALTURA DEL TIRANTE CON REVESTIMIENTO DE FIBRA DE
 VIDRIO

Prueba	Altura del piso al tirante en la cámara de entrada (cm)	Altura del piso al tirante en la cámara de salida (cm)	Altura del eje al tirante en la cámara de entrada
1	96.1500	92.9000	12.2500
2	96.2000	92.9000	12.3000
3	96.2000	92.9000	12.3000
4	96.2000	92.9000	12.3000
5	96.2000	92.9000	12.3000
6	96.1500	92.9000	12.2500
7	96.1500	92.9000	12.2500
8	96.2000	92.9000	12.3000
9	96.2000	92.9000	12.3000
10	96.1500	92.9000	12.2500

(CONTINUACIÓN) TABLA XXIII
 MEDICIONES DE LA ALTURA DEL TIRANTE CON REVESTIMIENTO DE
 FIBRA DE VIDRIO

11	96.2000	92.9000	12.3000
12	96.2000	92.9000	12.3000

TABLA XXIV

MEDICIONES DE LA ALTURA DEL TIRANTE CON REVESTIMIENTO DE PVC

Prueba	Altura del piso al tirante en la cámara de entrada (cm)	Altura del piso al tirante en la cámara de entrada (cm)	Altura del eje al tirante en la cámara de entrada
1	96.1000	92.8000	12.2000
2	96.2000	92.8000	12.3000
3	96.1000	92.8000	12.2000
4	96.2000	92.8000	12.3000
5	96.2000	92.7500	12.3000
6	96.2000	92.8000	12.3000
7	96.2000	92.8000	12.3000
8	96.1000	92.8000	12.2000
9	96.2000	92.8000	12.3000
10	96.2000	92.8000	12.3000
11	96.2000	92.7500	12.3000
12	96.2000	92.8000	12.3000

TABLA XXV
MEDICIONES DE LA ALTURA DEL TIRANTE CON REVESTIMIENTO DE
CONCRETO

Prueba	Altura del piso al tirante en la cámara de entrada (cm)	Altura del piso al tirante en la cámara de entrada (cm)	Altura del eje al tirante en la cámara de entrada
1	96.0000	92.7000	12.1000
2	96.0000	92.7000	12.1000
3	96.0000	92.7000	12.1000
4	96.0000	92.7000	12.1000
5	96.0000	92.8000	12.1000
6	96.0000	92.7000	12.1000
7	96.0000	92.7000	12.1000
8	96.0000	92.7000	12.1000
9	96.0000	92.8000	12.1000
10	96.0000	92.7000	12.1000
11	96.0000	92.7000	12.1000
12	96.0000	92.8000	12.1000

10) Finalmente, se obtendrán las pérdidas de carga restando el valor de la carga entre los puntos establecidos. Para calcular la pérdida generada en la cámara de entrada, se restará el valor de la carga de la entrada, menos el valor del punto que hemos obtenido.

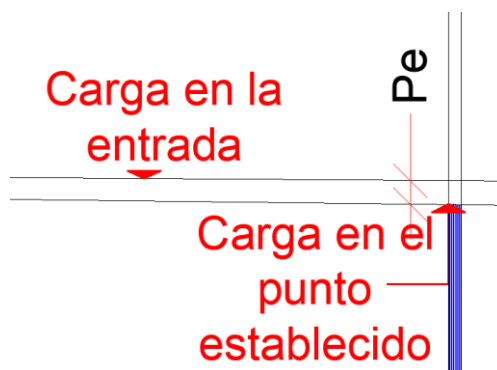


Fig. 35. Variación de carga hidráulica en la entrada y punto de control

Para calcular la pérdida de carga en la cámara de salida, se restará la carga en la salida y la carga en el punto ubicado en la cámara de salida.

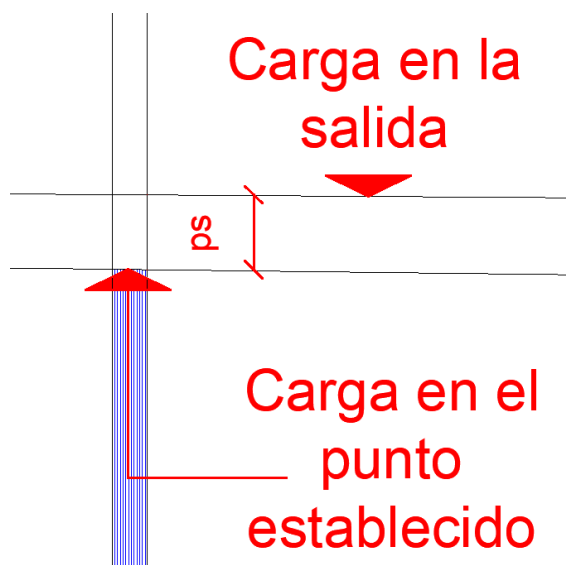


Fig. 36. Variación de carga hidráulica en la carga de salida y punto de control

TABLA XXVI

PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS CON REVESTIMIENTO DE FIBRA DE VIDRIO EN LA BASE

Prueba	Pérdida en la cámara de entrada (cm)	Pérdida en la cámara de salida (cm)
1	0.3000	1.0000
2	0.3000	1.0000
3	0.3000	1.0000
4	0.3000	1.0000
5	0.3000	1.0000
6	0.3000	1.0000
7	0.3000	1.0000
8	0.3000	1.0000
9	0.3000	1.0000

(CONTINUACIÓN) TABLA XXVI
PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS CON
REVESTIMIENTO DE FIBRA DE VIDRIO EN LA
BASE

10	0.3000	1.0000
11	0.3000	1.0000
12	0.3000	1.0000

TABLA XXVII
PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS CON REVESTIMIENTO DE PVC EN LA
BASE

Prueba	Pérdida en la cámara de entrada (cm)	Pérdida en la cámara de salida (cm)
1	0.3000	1.0500
2	0.3000	1.0000
3	0.3000	1.0000
4	0.3000	1.0000
5	0.3000	1.0000
6	0.3000	1.0000
7	0.3000	1.0000
8	0.3000	1.0500
9	0.3000	1.0500
10	0.3000	1.0000
11	0.3000	1.0000
12	0.3000	1.0000

TABLA XXVIII

PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS CON REVESTIMIENTO DE CONCRETO
EN LA BASE

Prueba	Pérdida en la cámara de entrada (cm)	Pérdida en la cámara de salida (cm)
1	0.2500	0.9000
2	0.2500	0.9000
3	0.2500	0.9000
4	0.2500	0.9000
5	0.2500	0.9000
6	0.2500	0.9000
7	0.2500	0.9000
8	0.2500	0.9000
9	0.2500	0.9000
10	0.2500	0.9000
11	0.2500	0.9000
12	0.2500	0.9000

Resultados

Para calcular las pérdidas de carga, se empleará la fórmula siguiente:

$$h_{ts} = K_{ts} \left(\frac{v_t^2 - v_{cs}^2}{2g} \right) \quad (21)$$

Donde se despejará K_{ts} , puesto que h_{ts} que es la pérdida de carga ya se calculó previamente en el modelo hidráulico. Por otro lado, también se han calculado las velocidades.

El resultado de las pérdidas de carga es el siguiente:

TABLA XXIX

VALOR DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS CON REVESTIMIENTO DE FIBRA DE VIDRIO EN LA BASE

Prueba	Coef. pérdida de carga en la cámara de entrada (ke)	Coef. pérdida de carga en la cámara de salida (ks)
1	0.5369	0.9997
2	0.5317	1.0000
3	0.5314	1.0036
4	0.5356	1.0107
5	0.5196	0.9930
6	0.5370	0.9951
7	0.5355	0.9971
8	0.5277	1.0053
9	0.5292	1.0012
10	0.5319	0.9952
11	0.5212	0.9980
12	0.5239	0.9986

TABLA XXX

VALOR DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS CON
REVESTIMIENTO DE PVC EN LA BASE

Prueba	Coef. pérdida de carga en la cámara de entrada (ke)	Coef. pérdida de carga en la cámara de salida (ks)
1	0.5388	1.0534
2	0.5108	1.0070
3	0.5371	1.0059
4	0.5133	1.0121
5	0.5141	1.0177
6	0.5101	1.0035
7	0.5099	1.0063
8	0.5377	1.0616
9	0.5147	1.0591
10	0.5110	1.0080
11	0.5092	1.0174
12	0.5150	1.0105

TABLA XXXI

VALOR DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS CON
REVESTIMIENTO DE CONCRETO EN LA BASE

Prueba	Coef. pérdida de carga en la cámara de entrada (ke)	Coef. pérdida de carga en la cámara de salida (ks)
1	0.5280	1.0192
2	0.5271	1.0194
3	0.5381	1.0263
4	0.5295	1.0179
5	0.5326	0.9961
6	0.5318	1.0211
7	0.5318	1.0187
8	0.5351	1.0226
9	0.5363	1.0026
10	0.5334	1.0222
11	0.5302	1.0200
12	0.5307	0.9987

A continuación, se presentará una tabla resumen de los resultados del modelo hidráulico.

TABLA XXXII

RESUMEN DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS DE ENTRADA

Prueba	Coef. pérdida de carga en la cámara de entrada (ke)		
	R. de fibra de vidrio en la base	R. de PVC en la base	R. de concreto en la base
1	0.537	0.539	0.528
2	0.532	0.511	0.527
3	0.531	0.537	0.538
4	0.536	0.513	0.530
5	0.520	0.514	0.533
6	0.537	0.510	0.532
7	0.535	0.510	0.532
8	0.528	0.538	0.535
9	0.529	0.515	0.536
10	0.532	0.511	0.533
11	0.521	0.509	0.530
12	0.524	0.515	0.531

TABLA XXXIII

RESUMEN DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS DE SALIDA

Prueba	Coef. pérdida de carga en la cámara de salida (ks)		
	R. de fibra de vidrio en la base	R. de PVC en la base	R. de concreto en la base
1	1.000	1.053	1.019
2	1.000	1.007	1.019

(CONTINUACIÓN) TABLA XXXIII
RESUMEN DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE CARGA EN
LAS CÁMARAS DE SALIDA

3	1.004	1.006	1.026
4	1.011	1.012	1.018
5	0.993	1.018	0.996
6	0.995	1.003	1.021
7	0.997	1.006	1.019
8	1.005	1.062	1.023
9	1.001	1.059	1.003
10	0.995	1.008	1.022
11	0.998	1.017	1.020
12	0.999	1.010	0.999

TABLA XXXIV

PROMEDIO DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS
DE ENTRADA Y SALIDA

Coef. de pérdida de carga	Material de revestimiento en la base		
	Fibra de vidrio	PVC	Concreto
En la cámara de entrada	0.530	0.518	0.532
En la cámara de Salida	1.000	1.022	1.015

11) Además, se obtuvo un valor promedio de los coeficientes de pérdida de carga en las cámaras, el cual es 0.53 para la cámara de entrada y 1.00 para la cámara de salida cuyo material de base es de fibra de vidrio. Dentro de los valores de los coeficientes de pérdida de carga establecidos en el reglamento técnico de diseño de sifones del Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, son 0.50 para la cámara de entrada y 1.00 para la cámara de salida. Asimismo, estos valores coinciden con los asignados con el manual de diseño del ANA.

Para los materiales de base, como el PVC, se registraron valores de 0.518 en la cámara de entrada y 1.02 en la salida. En el caso del concreto, los valores fueron de 0.532 en la entrada y 1.01 en la salida.

12) A continuación, para comprender mejor el comportamiento de las pérdidas de carga, se presentarán tablas las cuales visualizan los caudales promedios calculados, y los coeficientes de pérdida de carga obtenidos.

TABLA XXXV

COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS DE ENTRADA Y SALIDA SEGÚN EL MATERIAL DE REVESTIMIENTO Y EL CAUDAL PROMEDIO

Caudal promedio (lt/s)	Coef. de pérdida de carga					
	Transición de entrada (ke)			Transición de salida (ks)		
	Fibra de vidrio	PVC	Concreto	Fibra de vidrio	PVC	Concreto
1.290	0.5369	0.5388	0.5280	0.9997	1.0534	1.0192
1.289	0.5317	0.5108	0.5271	1.0000	1.0070	1.0194
1.287	0.5314	0.5371	0.5381	1.0036	1.0059	1.0263
1.283	0.5356	0.5133	0.5295	1.0107	1.0121	1.0179
1.294	0.5196	0.5141	0.5326	0.9930	1.0177	0.9961
1.293	0.5370	0.5101	0.5318	0.9951	1.0035	1.0211
1.291	0.5355	0.5099	0.5318	0.9971	1.0063	1.0187
1.286	0.5277	0.5377	0.5351	1.0053	1.0616	1.0226
1.289	0.5292	0.5147	0.5363	1.0012	1.0591	1.0026
1.293	0.5319	0.5110	0.5334	0.9952	1.0080	1.0222
1.291	0.5212	0.5092	0.5302	0.9980	1.0174	1.0200
1.290	0.5239	0.5150	0.5307	0.9986	1.0105	0.9987

A partir de los resultados presentados en la tabla XXXI, se elaborará una serie de gráficos para analizar el comportamiento de los coeficientes de pérdida de carga en función de los caudales.

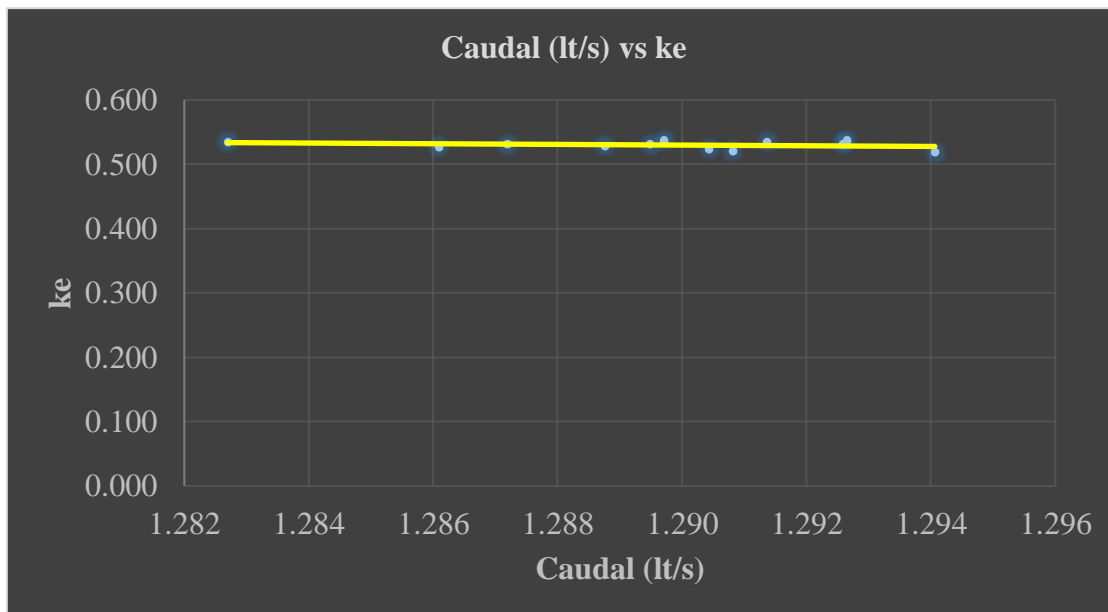


Fig. 37. Pérdidas de carga en la cámara de entrada con revestimiento de fibra de vidrio (Caudal vs k_e)

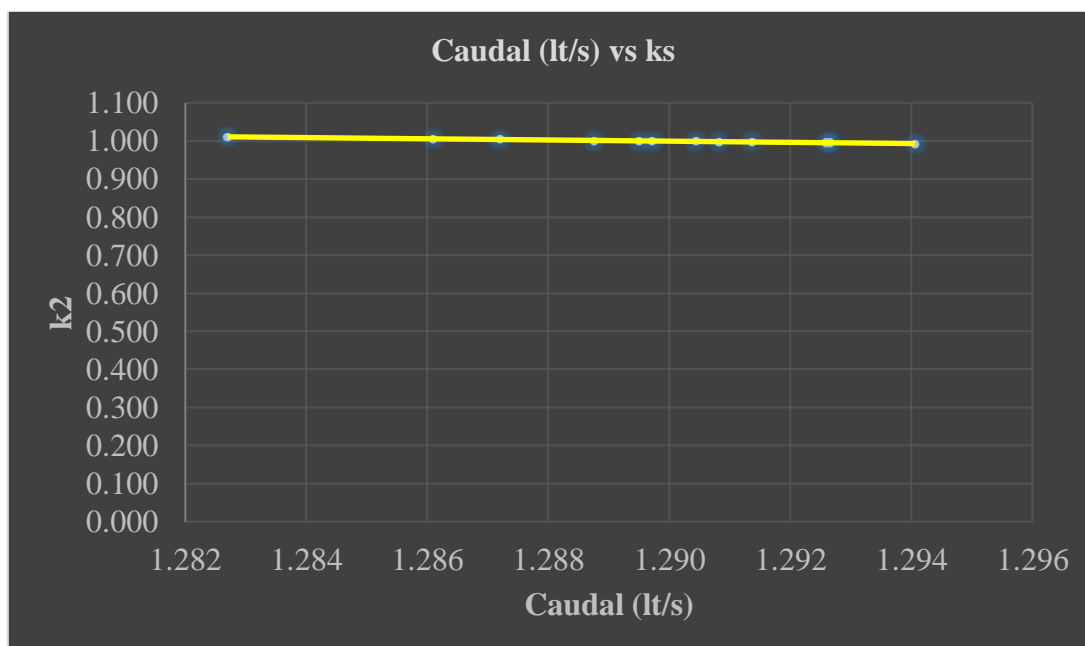


Fig. 38. Pérdidas de carga en la cámara de salida con revestimiento de fibra de vidrio (Caudal vs k_s)

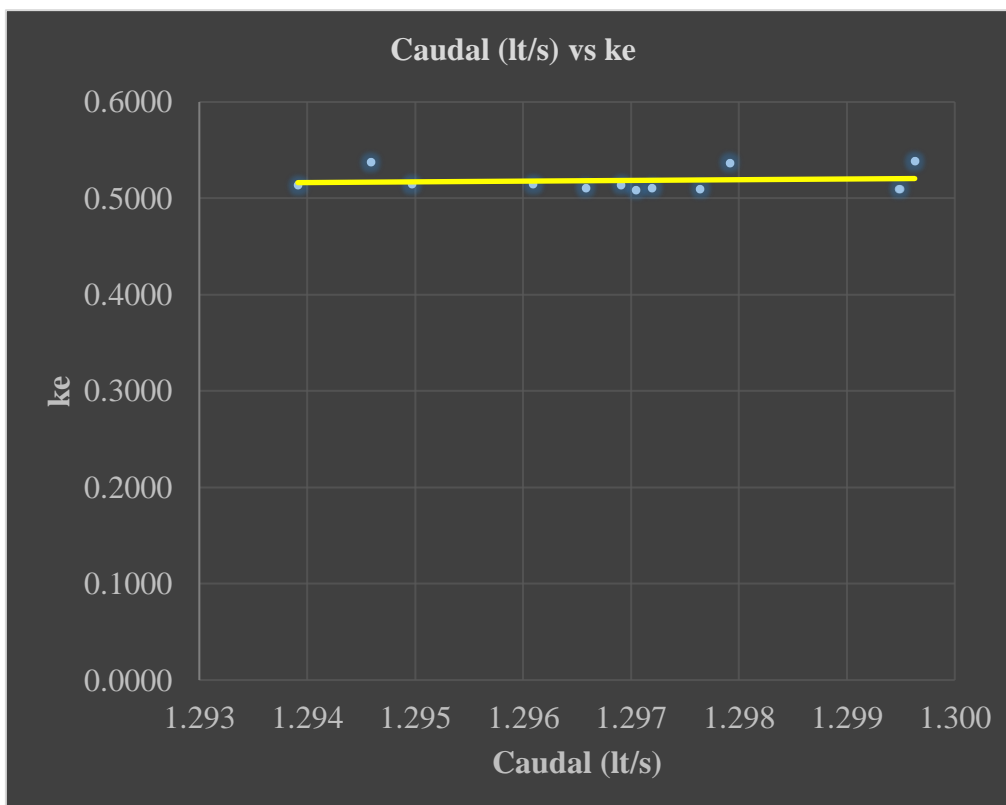


Fig. 39. Pérdidas de carga en la cámara de entrada con revestimiento de PVC (Caudal vs ke)

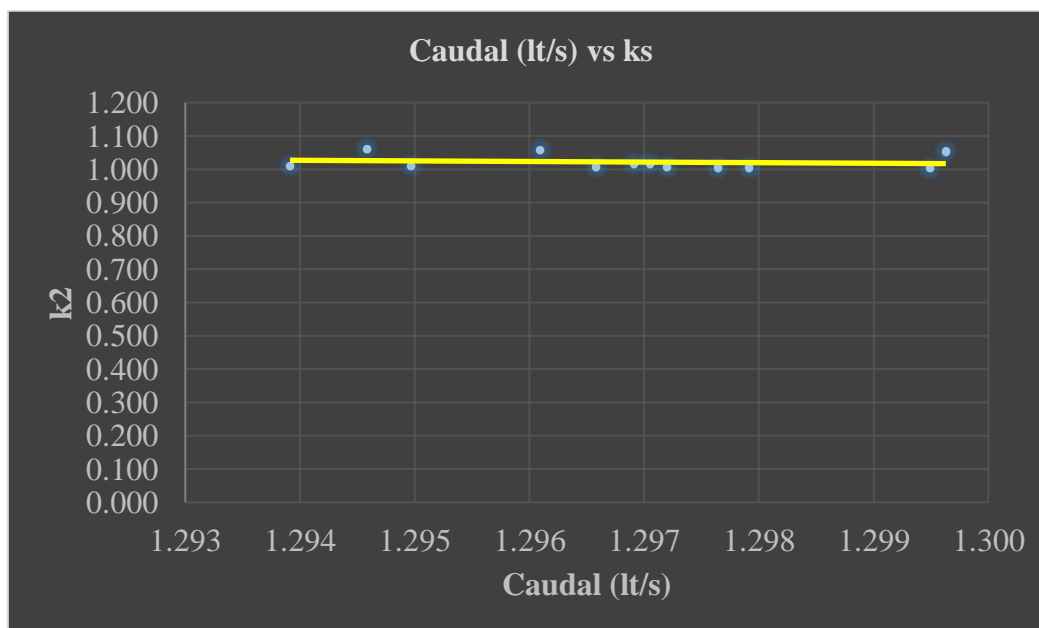


Fig. 40. Pérdidas de carga en la cámara de salida con revestimiento de PVC (Caudal vs ks)

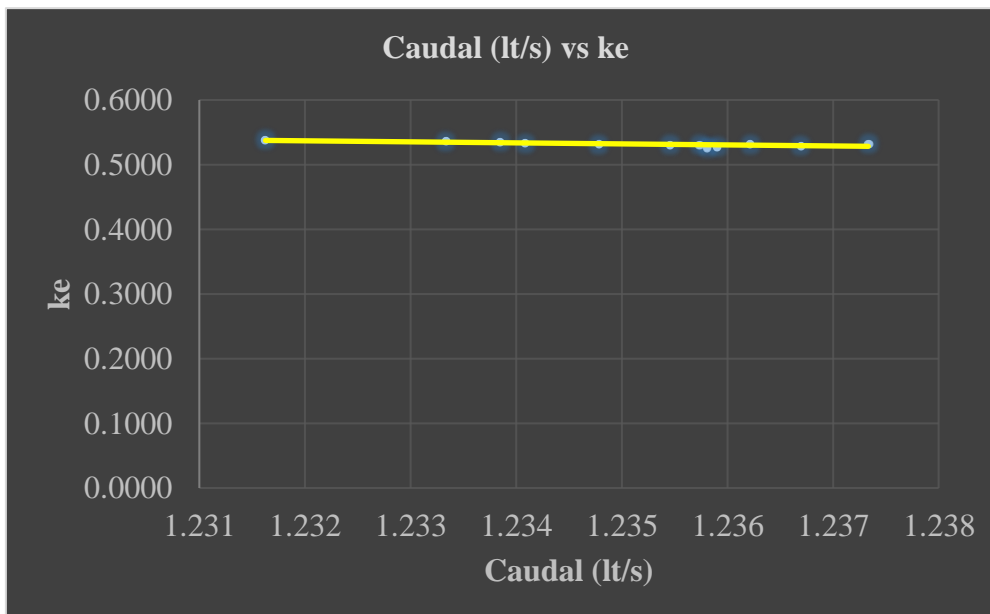


Fig. 41. Pérdidas de carga en la cámara de entrada con revestimiento de concreto (Caudal vs k_e)

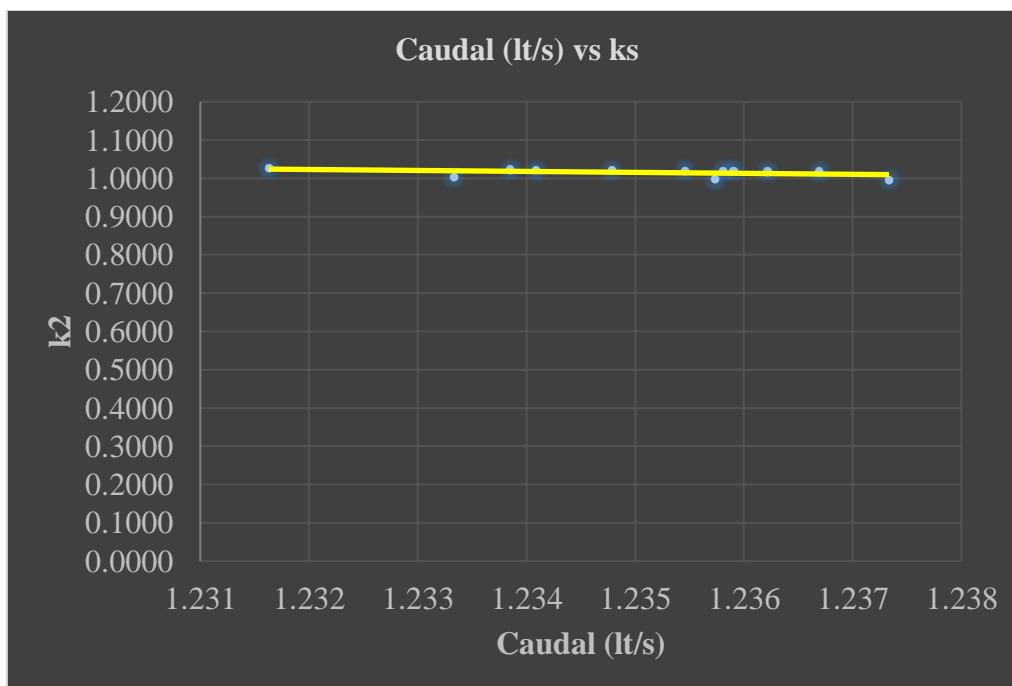


Fig. 42. Pérdidas de carga en la cámara de salida con revestimiento de concreto (Caudal vs k_s)

13) Por último, para calcular las pérdidas de carga en el modelo, en base a los datos obtenidos del prototipo, se empleará el principio de la semejanza hidráulica.

Se realizará el mismo procedimiento antes detallado, para el cálculo de las pérdidas de carga en las cámaras de entrada y salida. Se tienen los siguientes resultados:

TABLA XXXVI

CAUDALES PROMEDIOS EN EL MODELO HIDRÁULICO

Prueba	Volumen (lt)	Tiempo (s)	Caudal (lt/s)	Caudal Promedio (lt/s)
1	2.00	2.452	0.816	0.815
	1.50	1.840	0.815	
	1.00	1.230	0.813	
2	2.00	2.442	0.819	0.818
	1.50	1.832	0.819	
	1.00	1.227	0.815	
3	2.00	2.46	0.813	0.813
	1.50	1.851	0.810	
	1.00	1.225	0.816	
4	2.00	2.456	0.814	0.815
	1.50	1.842	0.814	
	1.00	1.226	0.816	
5	2.00	2.443	0.819	0.816
	1.50	1.846	0.813	
	1.00	1.224	0.817	
6	2.00	2.44	0.820	0.816
	1.50	1.841	0.815	
	1.00	1.231	0.812	
7	2.00	2.452	0.816	0.810
	1.50	1.852	0.810	
	1.00	1.241	0.806	
8	2.00	2.461	0.813	0.814
	1.50	1.844	0.813	
	1.00	1.225	0.816	

9	2.00	2.454	0.815	0.813
(CONTINUACIÓN) TABLA XXXVI				
CAUDALES PROMEDIOS EN EL MODELO HIDRÁULICO				
	1.50	1.851	0.810	
	1.00	1.231	0.812	
	2.00	2.463	0.812	
10	1.50	1.846	0.813	0.813
	1.00	1.226	0.816	
	2.00	2.452	0.816	
11	1.50	1.835	0.817	0.814
	1.00	1.238	0.808	
	2.00	2.462	0.812	
12	1.50	1.844	0.813	0.812
	1.00	1.232	0.812	

TABLA XXXVII

PARÁMETROS HIDRÁULICOS EN TUBERÍA Y CANAL EN LA ENTRADA

Prueba	Área hidráulica (m ²)	Velocidad dentro de la tubería (m/s)	Altura de tirante entrada (cm)	Ancho Canal de entrada (cm)	Área Mojada (m ²)
1	0.0025	0.3307	4.9000	5.5000	0.0027
2	0.0025	0.3319	4.9000	5.5000	0.0027
3	0.0025	0.3302	4.9000	5.5000	0.0027
4	0.0025	0.3308	4.9000	5.5000	0.0027
5	0.0025	0.3313	4.9000	5.5000	0.0027
6	0.0025	0.3311	4.9000	5.5000	0.0027
7	0.0025	0.3291	4.9000	5.5000	0.0027
8	0.0025	0.3306	4.9000	5.5000	0.0027
9	0.0025	0.3299	4.9000	5.5000	0.0027
10	0.0025	0.3303	4.9000	5.5000	0.0027
11	0.0025	0.3303	4.9000	5.5000	0.0027
12	0.0025	0.3299	4.9000	5.5000	0.0027

TABLA XXXVIII

PARÁMETROS HIDRÁULICOS CANAL EN LA SALIDA

Prueba	Altura de tirante salida (cm)	Ancho Canal de salida (cm)	Área Mojada (m ²)
1	4.0000	10.5000	0.0042
2	4.0000	10.5000	0.0042
3	4.0000	10.5000	0.0042
4	4.0000	10.5000	0.0042
5	4.0000	10.5000	0.0042
6	4.0000	10.5000	0.0042
7	4.0000	10.5000	0.0042
8	4.0000	10.5000	0.0042
9	4.0000	10.5000	0.0042
10	4.0000	10.5000	0.0042
11	4.0000	10.5000	0.0042
12	4.0000	10.5000	0.0042

TABLA XXXIX

VELOCIDADES EN LOS CANALES DE ENTRADA Y SALIDA

Prueba	Velocidad en el canal entrada (m/s)	Velocidad en el canal salida (m/s)
1	0.3023	0.1940
2	0.3034	0.1947
3	0.3018	0.1936
4	0.3023	0.1940
5	0.3028	0.1943
6	0.3026	0.1942
7	0.3007	0.1930
8	0.3021	0.1938
9	0.3015	0.1935

(CONTINUACIÓN) TABLA XXXIX

VELOCIDADES EN LOS CANALES DE ENTRADA Y SALIDA

10	0.3018	0.1937
11	0.3019	0.1937
12	0.3015	0.1935

TABLA XL

MEDICIONES DE ALTURA EN LAS CÁMARAS DE ENTRADA Y SALIDA

Prueba	Altura del piso al tirante en la cámara de entrada (cm)	Altura del piso al tirante en la cámara de salida (cm)	Altura del eje al tirante en la cámara de entrada
1	95.3000	92.5000	11.4000
2	95.3000	92.5000	11.4000
3	95.3000	92.5000	11.4000
4	95.3000	92.5000	11.4000
5	95.3000	92.5000	11.4000
6	95.3000	92.5000	11.4000
7	95.3000	92.5000	11.4000
8	95.3000	92.5000	11.4000
9	95.3000	92.5000	11.4000
10	95.3000	92.5000	11.4000
11	95.3000	92.5000	11.4000
12	95.3000	92.5000	11.4000

TABLA XLI

PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS DE ENTRADA Y SALIDA

Prueba	Pérdida en la cámara de entrada	Pérdida en la cámara de salida
1	0.0500	0.4000

(CONTINUACIÓN) TABLA XLI
PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS DE
ENTRADA Y SALIDA

2	0.0500	0.4000
3	0.0500	0.4000
4	0.0500	0.4000
5	0.0500	0.4000
6	0.0500	0.4000
7	0.0500	0.4000
8	0.0500	0.4000
9	0.0500	0.4000
10	0.0500	0.4000
11	0.0500	0.4000
12	0.0500	0.4000

TABLA XLII

VALOR DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS

Prueba	Coefficiente de pérdida de carga pérdida de carga en la cámara de entrada	Coefficiente de pérdida de carga pérdida de carga en la cámara de salida
1	0.5443	1.0935
2	0.5404	1.0855
3	0.5462	1.0972
4	0.5441	1.0931
5	0.5424	1.0896
6	0.5430	1.0909
7	0.5499	1.1047
8	0.5449	1.0947
9	0.5471	1.0990
10	0.5459	1.0967

(CONTINUACIÓN) TABLA XLII
 VALOR DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE CARGA EN
 LAS CÁMARAS

11	0.5457	1.0962
12	0.5472	1.0992

TABLA XLIII
 RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO HIDRÁULICO

Resultados			
Prueba	Caudal (lt/s)	Valor ke	Valor ks
1	0.815	0.544	1.093
2	0.818	0.540	1.085
3	0.813	0.546	1.097
4	0.815	0.544	1.093
5	0.816	0.542	1.089
6	0.816	0.543	1.090
7	0.810	0.549	1.104
8	0.814	0.5449	1.094
9	0.813	0.5471	1.099
10	0.813	0.5459	1.096
11	0.814	0.5457	1.092
12	0.812	0.5472	1.099

Elaboración de la guía de diseño

Manual de diseño en base a la investigación realizada

Las cámaras de entrada y salida en los sifones invertidos son componentes clave en la transición del flujo hacia y desde el sifón, y los materiales y el diseño de estas cámaras afectan significativamente la eficiencia hidráulica del sistema. El material con el que se construye el sifón tiene un impacto significativo en las pérdidas de carga por fricción y en el comportamiento hidráulico general.

Propósito

El propósito de esta guía es definir y estandarizar la selección y aplicación de los coeficientes de pérdida de carga en las cámaras de entrada y salida de sifones invertidos. Estos coeficientes son fundamentales para el diseño hidráulico eficiente y garantizan el funcionamiento óptimo del sistema, minimizando pérdidas de energía y asegurando que el flujo de agua se mantenga dentro de los parámetros deseados.

Alcance

Esta guía abarca la aplicación de coeficientes de pérdida de carga en las cámaras de entrada y salida de sifones invertidos utilizados en sistemas hidráulicos. Está dirigida a ingenieros y diseñadores especializados en infraestructura hidráulica y se enfoca en los siguientes aspectos: tipos de materiales de revestimiento, comportamiento de los coeficientes de pérdida de carga y metodología para el cálculo de los coeficientes de pérdidas de carga.

Tipos de materiales de revestimiento en la base de las cámaras

En primer lugar, se analizarán las fuentes bibliográficas obtenidas de diversas fuentes bibliográficas, y con esto clasificaremos mediante una tabla los criterios de tres materiales que se pueden emplear en el revestimiento de las cámaras de entrada y salida. El concreto permite resistir esfuerzos, lo cual a su vez minimiza la penetración de agua en las fisuras, lo que podría ser relevante para aplicaciones en sifones donde la resistencia al agua es crítica [46]. Asimismo, se menciona que el costo inicial es más bajo en el PVC, por otro lado se menciona que la fibra de vidrio presenta mayor resistencia a la corrosión, sin embargo se resalta que en cuestiones de durabilidad, el concreto es superior para soportar cargas y mantener la integridad de la estructura [6].

TABLA XLIV
COMPARACIÓN DE MATERIALES (CONCRETO, FIBRA DE VIDRIO Y PVC) SEGÚN
CRITERIOS TÉCNICOS

Criterio	Concreto	Fibra de vidrio	PVC
Durabilidad	Alta resistencia a la compresión y excelente desempeño en condiciones ambientales severas.	Resistente a la corrosión y adecuado para ambientes agresivos (humedad o salinidad).	Resistente al impacto moderado, pero susceptible a deformaciones a altas temperaturas.
Mantenimiento	Requiere revisiones periódicas para evitar agrietamiento y problemas estructurales por exposición a sulfatos.	Bajo mantenimiento, aunque puede requerir reparaciones en caso de roturas por impacto.	Fácil de mantener, pero más susceptible a deformaciones y fisuras.
Resistencia química	Moderada; puede ser afectado por sulfatos si no se usan aditivos protectores.	Excelente resistencia a la corrosión y productos químicos agresivos.	Resistente a la mayoría de los productos químicos, pero menos frente a algunos solventes orgánicos.

Costo	Relativamente bajo en términos de materiales, pero puede ser más costoso por transporte y mano de obra.	Puede tener un costo inicial mayor, pero reduce costos de mantenimiento a largo plazo.	Económico para dimensiones pequeñas, pero su costo se incrementa con mayores dimensiones.
Instalación	Mayor tiempo y costo de instalación debido al peso y proceso de curado.	Instalación rápida, pero requiere personal capacitado.	Instalación fácil y rápida, ideal para estructuras más ligeras.

Rangos de aplicación de los coeficientes:

Pérdidas locales asociadas a la entrada y salida del flujo

Los coeficientes de pérdida de carga presentan un valor uniforme cuando se compara con el caudal. Es decir, sin importar la variación del caudal, el coeficiente tiende a mantenerse uniforme, constante.

Este comportamiento se puede apreciar en la siguiente tabla, en la cual se puede corroborar que no presenta un cambio considerable:

TABLA XLV

COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARAS DE ENTRADA Y SALIDA SEGÚN EL MATERIAL DE REVESTIMIENTO Y EL CAUDAL PROMEDIO

Caudal promedio (lt/s)	Coeficiente de pérdida de carga					
	Cámara de entrada			Cámara de salida		
	Fibra de vidrio	PVC	Concreto	Fibra de vidrio	PVC	Concreto
1.290	0.5369	0.5388	0.5280	0.9997	1.0534	1.0192
1.289	0.5317	0.5108	0.5271	1.0000	1.0070	1.0194
1.287	0.5314	0.5371	0.5381	1.0036	1.0059	1.0263
1.283	0.5356	0.5133	0.5295	1.0107	1.0121	1.0179
1.294	0.5196	0.5141	0.5326	0.9930	1.0177	0.9961
1.293	0.5370	0.5101	0.5318	0.9951	1.0035	1.0211
1.291	0.5355	0.5099	0.5318	0.9971	1.0063	1.0187
1.286	0.5277	0.5377	0.5351	1.0053	1.0616	1.0226
1.289	0.5292	0.5147	0.5363	1.0012	1.0591	1.0026
1.293	0.5319	0.5110	0.5334	0.9952	1.0080	1.0222
1.291	0.5212	0.5092	0.5302	0.9980	1.0174	1.0200
1.290	0.5239	0.5150	0.5307	0.9986	1.0105	0.9987

Selección de coeficientes:

Para la selección de los coeficientes utilizados en el cálculo de las pérdidas de carga en un sistema de sifón invertido, se ha considerado principalmente la recomendación establecida en el manual de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). De acuerdo con este manual, los coeficientes de pérdida local para las cámaras del sifón invertido son de 0.50 en la cámara de

entrada y de 1.00 en la cámara de salida. Estos valores reflejan las características típicas de los flujos y las pérdidas por fricción y turbulencia en las transiciones entre el flujo abierto y el conducto cerrado, especialmente considerando la energía cinética.

El coeficiente de 0.50 en la cámara de entrada está asociado con las condiciones de contracción del flujo al ingresar al sifón, donde una parte de la energía del flujo se disipa debido a la turbulencia generada en la transición. Por otro lado, el coeficiente de 1.00 en la cámara de salida corresponde a las pérdidas más significativas que ocurren cuando el flujo vuelve a expandirse al salir del sifón, generando un aumento en las turbulencias y la disipación de energía.

Estos coeficientes han sido analizados y validados en el modelo hidráulico, lo que ha permitido corroborar su precisión y consistencia con el comportamiento real del flujo en las condiciones de diseño específicas del sifón invertido.

Limitaciones y suposiciones:

- Condiciones bajo las cuales los coeficientes recomendados son válidos.
- Suposiciones sobre la rugosidad del material y velocidad del flujo.

Criterios de diseño

- En sifones que pasan por carreteras principales o debajo de drenajes, se requiere una cobertura mínima de 0.90 m. En cambio, para aquellos que atraviesan caminos rurales o canales de riego sin revestimiento, una cobertura de 0.60 m es suficiente. Si el sifón cruza un canal revestido, se considera adecuada una cobertura de 0.30 m [13].

- La inclinación de los tubos curvados no debe exceder la proporción de 2 a 1, y la pendiente mínima para un tramo horizontal del conducto debe ser del 5 %. Se sugiere emplear transiciones de concreto en los puntos de entrada y salida cuando el sifón cruce carreteras principales, especialmente para sifones con un diámetro igual o mayor a 36 pulgadas y velocidades en el conducto superiores a 1 metro por segundo [13].

- Para evitar desbordamientos aguas arriba del sifón debido a caudales imprevistos que excedan el diseño, se sugiere aumentar el nivel del agua en el canal en un 50 % o hasta un máximo de 0.30 m, extendiendo esta elevación mínima de 15 m desde la estructura del sifón [6].

- Para calcular el diámetro del tubo en sifones relativamente cortos con transiciones de tierra en ambos extremos, se puede emplear una velocidad de flujo de 1 m/s. En sifones cortos

con transiciones de concreto, se puede utilizar una velocidad de 1.5 m/s, mientras que en sifones largos con transiciones de concreto, ya sea con o sin control en la entrada, se recomienda una velocidad entre 2.5 m/s y 3 m/s [13].

- En el diseño de la transición de entrada, se recomienda que la parte superior de la abertura del sifón esté un poco por debajo de la superficie normal del agua. Esta distancia sumergida se denomina sello de agua. Para el diseño, se sugiere considerar al menos 1.5 veces la carga de velocidad del sifón, o alternativamente, 1.1 veces la carga de velocidad, o una profundidad mínima de 3 pulgadas [13].
- En sifones de longitud considerable, se planifican estructuras de alivio para facilitar el drenaje del tubo, lo que permite su inspección y mantenimiento [13].
- En sifones largos, bajo ciertas condiciones, la entrada puede no sellarse, independientemente de si el sifón opera con flujo parcial o flujo completo, cuando el coeficiente de fricción es menor de lo previsto en el diseño. Por esta razón, se sugiere utilizar un coeficiente de fricción $n=0.008$ al calcular las pérdidas de energía [13].
- Cuando un sifón atraviesa por debajo de una quebrada, es crucial tener información sobre el caudal máximo durante las crecidas [13].

Recomendaciones

- Cuando se diseña un sifón invertido de gran tamaño, es imprescindible considerar la realización de un modelamiento hidráulico detallado. Esto se debe a que las pérdidas de carga en este tipo de estructuras varían en función de múltiples factores, como la geometría del conducto, el régimen de flujo (laminar o turbulento), las condiciones de entrada y salida, y la rugosidad interna del material. En ausencia de un análisis exhaustivo mediante un modelo hidráulico, las imprecisiones en el cálculo de estas pérdidas pueden llevar a un sobredimensionamiento o un dimensionamiento insuficiente del sifón invertido, comprometiendo tanto la eficiencia hidráulica como la viabilidad económica del proyecto.
- Un modelamiento hidráulico permite no solo mejorar la precisión en el cálculo de las pérdidas de carga, sino también prever posibles problemas relacionados con el flujo bifásico, cavitación o golpes de ariete, que pueden comprometer la integridad del sifón si no son correctamente abordados durante el diseño.
- Aunque la implementación de un modelamiento hidráulico puede incrementar los costos iniciales del proyecto, este costo adicional se justifica en términos de la eficiencia operativa y la reducción de riesgos a largo plazo. Un diseño que no contemple adecuadamente las pérdidas de carga y los comportamientos de flujo podría generar sobredimensionamientos innecesarios,

lo que aumentaría los costos de construcción. Por el contrario, un dimensionamiento insuficiente conlleva a presentar fallas estructurales o ineficiencia energética, requiriendo costosas reparaciones o modificaciones futuras.

- En sifones que requieren alta eficiencia y bajos costos de mantenimiento, se recomienda el uso de PVC o fibra de vidrio debido a sus bajos coeficientes de pérdida de carga. El concreto debe usarse preferentemente en situaciones donde la durabilidad estructural sea más importante que la eficiencia hidráulica.

- Para proyectos que priorizan la eficiencia hidráulica, las cámaras de entrada y salida construidas con PVC o fibra de vidrio son las opciones más recomendadas debido a sus bajos coeficientes de pérdida de carga. Estos materiales minimizan las turbulencias y garantizan un flujo más uniforme, lo que reduce las pérdidas de energía en todo el sistema.

- Optimización del diseño: Los resultados sugieren que el diseño de las cámaras de entrada y salida debe enfocarse en minimizar las transiciones abruptas y la turbulencia del flujo. Las curvas suaves y los materiales con baja rugosidad (como el PVC) son esenciales para reducir las pérdidas de carga.

- Para proyectos estructurales o de alta presión, el concreto puede ser necesario, aunque se deben considerar las mayores pérdidas de carga en las cámaras de entrada y salida. En estos casos, se recomienda utilizar transiciones lo más suaves posibles y realizar un mantenimiento regular para minimizar el impacto de la rugosidad del material.

Discusión

1) Según el objetivo específico determinar los elementos que influyen en la variabilidad del coeficiente de pérdida de carga (K) en las secciones de entrada y salida de los sifones invertidos, de la investigación se buscó determinar los factores que influyen en la variabilidad del comportamiento de los coeficientes de pérdida de carga. Para ello, se centró en el análisis de los materiales utilizados en el revestimiento de las bases de las cámaras de entrada y salida, así como en la influencia de diferentes caudales y velocidades de flujo.

Se analizó el comportamiento de los coeficientes de pérdida de carga bajo distintos caudales, con el objetivo de evaluar si el cambio de caudal influía en los valores obtenidos. De las gráficas 39,40,41,42,43 y 44, tal como se puede apreciar, la línea del caudal se mantiene constante ante el cambio del caudal, es decir, que independientemente del caudal aplicado, los coeficientes de pérdida de carga se mantienen relativamente constante para cada tipo de material.

A lo largo de las pruebas, los coeficientes de pérdida de carga para cada tipo de material (fibra de vidrio, PVC y concreto) no presentan variaciones significativas a medida que varían los caudales. Esto es un indicio importante de que, en este caso, el caudal no tiene un impacto directo en el valor del coeficiente de pérdida de carga. Esto puede explicarse en función del régimen de flujo y la naturaleza del diseño de la cámara de entrada.

- **Fibra de vidrio:** Los coeficientes de pérdida de carga para este material se mantienen en un rango estrecho entre 0.520 y 0.537, independientemente de las pruebas o del caudal específico utilizado. Este comportamiento refleja que el caudal no genera una variación en el coeficiente, lo que indica que la resistencia al flujo dentro de la cámara de entrada está dominada por la rugosidad del material más que por la cantidad de flujo que atraviesa el sistema.

- **PVC:** Para el PVC, los valores fluctúan ligeramente entre 0.509 y 0.539, pero sin una tendencia clara que indique un aumento o disminución sistemática relacionada con el cambio de caudal. Esto demuestra que el material tiene una respuesta constante ante distintos niveles de caudal, confirmando que el coeficiente de pérdida de carga no depende de la magnitud del flujo en este caso.

- **Concreto:** En el caso del concreto, los coeficientes varían entre 0.527 y 0.538, nuevamente sin mostrar una correlación directa con el caudal aplicado. A pesar de la mayor rugosidad de este material, los resultados indican que las pérdidas de carga se mantienen constantes a lo largo de todas las pruebas, lo cual sugiere que el diseño geométrico de la cámara y las características hidráulicas dominan sobre el efecto del caudal.

Los resultados de esta investigación respaldan la conclusión de que el caudal no afecta de manera significativa el valor del coeficiente de pérdida de carga en las cámaras de entrada de los sifones invertidos estudiados. En lugar de esto, el coeficiente está más influenciado por las propiedades del material y la geometría de la cámara. Este hallazgo es importante para el diseño y la operación de sistemas hidráulicos, ya que permite predecir de manera confiable las pérdidas de carga sin necesidad de ajustar el coeficiente en función del caudal, lo que simplifica el análisis y dimensionamiento del sistema.

2) Según el objetivo identificar el material óptimo para la cámara de entrada y salida entre fibra de vidrio, concreto y PVC utilizado en la investigación, los resultados en las tablas XXVIII y XXIX. Muestran que la fibra de vidrio presenta un menor valor en los coeficientes de pérdida de carga en las cámaras de entrada y salida. Los resultados indican que el material del revestimiento influye directamente en los coeficientes de pérdida de carga, siendo los materiales

más rugosos, como el concreto, los que generan mayores coeficientes. Esto se debe a que la rugosidad de la superficie incrementa la fricción entre el flujo de agua y las paredes de la cámara, creando turbulencias y, por lo tanto, aumentando la resistencia hidráulica.

En contraste, los materiales más lisos como la fibra de vidrio reducen notablemente las pérdidas de carga, ya que presentan una menor rugosidad y, en consecuencia, menos fricción y resistencia al paso del flujo. Esto se refleja en coeficientes de pérdida de carga más bajos, lo que indica una mejor eficiencia hidráulica en términos de disipación de energía.

Los coeficientes de pérdida de cargas en las cámaras de entrada:

- **Fibra de vidrio:** Los coeficientes de pérdida de carga para la fibra de vidrio varían entre 0.520 (prueba 5) y 0.537 (pruebas 1, 6). Estos valores reflejan que la fibra de vidrio es bastante eficiente en términos de minimizar la resistencia al flujo. La variabilidad en los resultados es mínima, lo que indica que el comportamiento de la fibra de vidrio es bastante consistente en diferentes condiciones de flujo y caudal.

- **PVC:** En el caso del PVC, los coeficientes oscilan entre 0.509 (prueba 11) y 0.539 (prueba 1). Los valores son similares a los de la fibra de vidrio en muchas pruebas, pero presentan una ligera mayor variabilidad. Esto puede deberse a la capacidad del PVC para adaptarse mejor a diferentes condiciones de flujo, pero también a la sensibilidad del material a cambios en la velocidad del flujo o turbulencias.

- **Concreto:** El concreto, con coeficientes entre 0.527 (pruebas 2, 1) y 0.538 (prueba 3), presenta un comportamiento interesante. Aunque los valores son en general más altos que los de los otros dos materiales, las diferencias son relativamente pequeñas. Esto sugiere que, si bien el concreto tiene una mayor rugosidad superficial, las pérdidas de carga en las cámaras de entrada no aumentan de manera significativa en comparación con el PVC o la fibra de vidrio.

Los coeficientes de pérdida de cargas en las cámaras de salida:

- **Fibra de vidrio:** Los coeficientes se mantienen cercanos a 1.00 lo que indica que las pérdidas generadas en la cámara de salida son bajas. El menor valor obtenido es 0.993 de la prueba 5 y el más alto es 1.011 (prueba 4), lo que demuestra una variación muy pequeña, siendo menos del 2 %. Esto sugiere que la fibra de vidrio presenta una eficiencia alta y que las pérdidas de carga son casi constantes.

- **PVC:** Los coeficientes varían más en comparación con la fibra de vidrio, con valores entre 1.003 (prueba 6) y 1.062 (prueba 8). La variación es ligeramente mayor, especialmente en la prueba 9 donde el coeficiente llega a 1.059, lo que indica una pérdida de carga algo más

elevada. Esta fluctuación podría estar relacionada con propiedades de rugosidad superficial o con el comportamiento del material bajo distintas condiciones de flujo.

- **Concreto:** Los coeficientes en la base de concreto también muestran variaciones moderadas, con valores que oscilan entre 0.996 (prueba 5) y 1.023 (prueba 8). Aunque los coeficientes son más estables que los del PVC, son más altos que los de la fibra de vidrio, lo que sugiere que el concreto introduce mayores pérdidas de carga, posiblemente debido a su superficie más rugosa en comparación con los otros materiales.

En resumen, la fibra de vidrio se presenta como el material con menor resistencia hidráulica, mientras que el PVC y el concreto ofrecen un comportamiento más variable, siendo el concreto el que, en general, tiene coeficientes de pérdida de carga un poco mayores, pero con menor variabilidad en comparación con el PVC.

3) Según el objetivo, elaborar modelos de sifones invertidos que logren una semejanza hidráulica que cumpla la semejanza cinemática, geométrica y dinámica para garantizar un diseño óptimo y funcional, tal y como se aprecia en figura 31, se realizó el diseño del modelo en físico basado en el sifón real. Asimismo, se cumplió con los requisitos de semejanza hidráulica. Por otra parte, se determinó que los coeficientes obtenidos en la investigación son consistentes con los indicados en el manual de la ANA, que establece valores de 0.50 para las cámaras de entrada y 1.00 para las cámaras de salida. Estos resultados también fueron respaldados por el ingeniero Ricardo López Cualla en su obra Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados, así como por el Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA) en su reglamento técnico de diseño de sifones invertidos en sistemas sanitarios. Los coeficientes obtenidos en este estudio oscilaron entre 0.518 y 0.532 para la cámara de entrada, y entre 1.00 y 1.015 para la cámara de salida, presentando un margen máximo de diferencia del 6.4 % y 1.5 % respectivamente, lo que refleja una alta precisión respecto a los valores de referencia. Estos valores, se asemejan a los empleados en el prototipo del sifón invertido, los cuales han usado los mismos valores del manual de ANA. Esto indica que la metodología es correcta, lo cual valida los cálculos del modelo experimental como la concordancia entre la teoría y los resultados prácticos.

4) Según el objetivo, realizar las pruebas hidráulicas en los modelos para ver el comportamiento del coeficiente de pérdida de carga, los resultados de las pruebas hidráulicas se pueden apreciar en las tablas XLV, V Y VI. En el desarrollo de la investigación, se realizaron un total de 12 pruebas para cada tipo de material de revestimiento utilizado en la base de las

cámaras. Estas pruebas consistieron en simular la circulación del agua en el sifón, replicando su fase de funcionamiento bajo un caudal específico. En cada prueba se emplearon tres volúmenes distintos: 2 lt, 1.5 lt y 11 lt. El caudal correspondiente a cada volumen fue registrado, promediado y utilizado como valor final en los cálculos de la prueba.

5) Según el objetivo, elaborar una guía para el diseño de sifones invertidos basado en los resultados de las pruebas hidráulicas y la revisión bibliográfica. En la investigación, se incluyó la redacción de la guía de diseño basada en los resultados obtenidos. Esto con la finalidad de mejorar la eficiencia de un sifón invertido.

El proceso de elaboración de la guía comenzó con una serie de experimentaciones y simulaciones hidráulicas que permitieron evaluar el comportamiento del flujo en diferentes configuraciones de sifones. Estas pruebas incluyeron variables como las pérdidas de carga generadas en las cámaras de entrada y salida. A partir de los datos obtenidos en estas pruebas, se identificaron patrones de comportamiento y se validaron fórmulas empíricas y modelos teóricos que son esenciales para un diseño eficiente.

Conclusiones

1) Se determinó que el caudal no influye en la variación de los coeficientes de pérdida de carga, lo cual se evidenció gráficamente mediante una línea recta. Por otro lado, los materiales de revestimiento sí tienen un impacto en los coeficientes debido a la rugosidad de cada material; sin embargo, esta variación es mínima.

2) Se identificó que el material más eficiente desde el punto de vista hidráulico es la fibra de vidrio, seguida del PVC. En la cámara de entrada, los coeficientes obtenidos fueron 0.53 para fibra de vidrio, 0.518 para PVC y 0.532 para concreto; mientras que en la cámara de salida se registraron valores de 1.00, 1.022 y 1.015, respectivamente. Asimismo, la comparación entre fibra de vidrio y PVC muestra una variación porcentual de 0.65 %. Al comparar la fibra de vidrio con el concreto, la variación es de 1.11 %, y entre el PVC y el concreto es de 0.45 %. Si bien estas variaciones porcentuales son muy bajas —todas menores al 1.2 %—, se observa que el concreto es el material que presenta los mayores valores de pérdida de carga.

3) Se desarrolló un modelo hidráulico que cumple con los principios de semejanza hidráulica, asegurando que las relaciones entre las variables del flujo (como velocidad, caudal)

sean consistentes entre el modelo y el prototipo real de un sifón invertido. Este modelo permite validar una escala adecuada para replicar de manera precisa el comportamiento hidráulico del sifón invertido en condiciones reales, tomando en cuenta factores como la conservación del número adimensional de Froude, siendo fundamental para garantizar la similitud cinemática entre el modelo y el prototipo.

4) Se llevó a cabo un conjunto de 12 pruebas para cada material, promediando tres series de caudales en cada una de ellas. Los resultados mostraron un error porcentual entre los caudales promedios de menos del 1 %, con valores específicos de 0.88 % para la fibra de vidrio, 0.44 % para el PVC y 0.46 % para el concreto. Estos bajos márgenes de error indican una alta consistencia en las mediciones y la confiabilidad de los datos obtenidos para cada material.

5) Se elaboró una guía de diseño fundamentada en los resultados de esta investigación, con el objetivo de optimizar la eficiencia en el diseño de sifones invertidos. Esta guía aborda los principales aspectos técnicos relacionados con el comportamiento hidráulico y la selección de materiales.

Recomendaciones

1) Se recomienda utilizar materiales con bajas rugosidades en las cámaras de entrada y salida de los sifones invertidos, priorizando aquellos que minimicen las pérdidas de carga, como el PVC y la fibra de vidrio. Esto mejorará la eficiencia en la operación hidráulica, solo en proyectos donde se busque optimizar el flujo. En el caso de que se priorice el comportamiento estructural, se tendrá que demostrar que la fibra de vidrio o el PVC tengan un mejor desempeño que el concreto.

2) Es preferible emplear la fibra de vidrio como material preferido en los sifones invertidos, debido a su superior eficiencia hidráulica respecto al PVC y al concreto. Sin embargo, si la durabilidad estructural es más relevante que la eficiencia hidráulica, el concreto puede ser considerado, aunque con el conocimiento de que aumenta las pérdidas de carga.

3) Se recomienda emplear el modelo hidráulico desarrollado como herramienta para el diseño de sifones invertidos en proyectos reales. Este modelo ofrece la ventaja de asegurar que las condiciones de flujo observadas en el prototipo sean equivalentes a las que se presentarán en el sifón real, gracias a que respeta los principios de semejanza hidráulica. Esto garantiza una

mayor precisión en la predicción del comportamiento hidráulico, optimizando así el diseño y reduciendo riesgos en la construcción y operación de los sifones.

4) Si desarrollan un modelo hidráulico, se recomienda seguir el mismo método de pruebas desarrollado en este estudio para asegurar alta precisión en las mediciones de caudales y pérdida de carga en diferentes materiales. La consistencia de los resultados demuestra la validez de este enfoque, y su aplicación en otros proyectos garantizará datos confiables

5) Se sugiere que, si se busca comprender el comportamiento de las pérdidas de carga, tomar en cuenta la guía de diseño elaborada, ya que está fundamentada en resultados experimentales sólidos. Esto permitirá mejorar la eficiencia y uniformidad en el diseño y construcción de sistemas similares.

Referencias

- [1] Wei Cui, Wenxue Chen, Xiangpeng Mu, X. Qilin Xiong, y Minglong Lu, «Calculation of Head Losses and Analysis of Influencing Factors of Crossing Water-Conveyance Structures of Main Canal of Middle Route of South-to-North Water Diversion Project», 2023, p. 14, doi: <https://doi.org/10.3390/w15050871>.
- [2] P. Shrestha y J. J. DeVries, «Design of inverted siphons program documentation», *Adv. Eng. Softw.*, vol. 14, n.º 3, pp. 205-212, ene. 1992, doi: 10.1016/0965-9978(92)90023-9.
- [3] «Evaluación de las pérdidas de carga en el sifón Samán mediante modelación numérica y contraste de resultados». Accedido: 8 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/5529>
- [4] G. GALVÃO PEREIRA, «SIFÕES INVERTIDOS EM SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO - CONSIDERAÇÕES, DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE CRÍTICA», ago. 2020, [En línea]. Disponible en: <https://tec.uff.br/wp-content/uploads/sites/719/2020/08/Sif%C3%B5es-Invertidos-em-Sistemas-de-Esgotamento-Sanit%C3%A1rio-Considera%C3%A7%C3%B5es-Dimensionamento-e-An%C3%A1lise-Cr%C3%ADtica.pdf>
- [5] E. F. Mendez Inga, «Diseño hidráulico del sifón invertido en la progresiva 6 + 350 KM del Canal Ishinca con fines de irrigación - Distrito de Tarica - Huaraz», 2020, Accedido: 8 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4664>
- [6] J. Zulfan y B. M. Ginting, «Hydraulic Performance of Inverted Siphons for Irrigation Water Supply Using Physical Modeling», *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 14, n.º 9, Art. n.º 9, dic. 2022.
- [7] J. Zhang, Z. Wang, H. Zhang, y S. Hu, «Study on the Hydraulic Characteristics in the Forebay of Inverted Siphon», 2023. doi: 10.3233/ATDE230805.
- [8] Arnaud Bart, «Vortex Siphon – From 1:1 Scale Physical Model to SPH Simulation and Prototype», pp. 795-807, jul. 2020, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-15-5436-0_62.
- [9] Z. Zheli, G. Guanghua, M. Zhonghao, W. Kang, G. Shixiang, y C. Gang, «Application of Model Predictive Control for Large-Scale Inverted Siphon in Water Distribution System in the Case of Emergency Operation», 2020, doi: 0.3390/w12102733.

- [10] N. del A. Comisión, *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. 2009.
- [11] V. B. Máximo, *Diseño de estructuras hidráulicas*.
- [12] ANA, *Manual: Criterios de diseños de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico*. 2010.
- [13] Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, *Manual de diseño estructuras hidráulicas*. 2015.
- [14] M. de D. E. D. de A. P. y S. B. República de Colombia República de Colombia, «REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO RAS - 2000», BOGOTA, p. 97, noviembre de 2000.
- [15] H. Jacek y K. Marta, «TECHNICAL CONDITIONS OF THE UNIQUE STRUCTURE OF INVERTED SIPHON – HISTORY & PRESENT», n.º 3, 2019.
- [16] FU Hui, YANG Kai-lin, GUO Xin-lei, GUO Yong-xin, y WANG Tao, «Safe operation of inverted siphon during ice period», 2013, doi: 10.1016/S1001-6058(15)60473-5.
- [17] C. Andrew y M. John, «Hydraulics in Civil and Environmental Engineering».
- [18] B. Ernest F. y W. King H., «Handbook of Hydraulics».
- [19] W. Frank M., «Fluid Mechanics».
- [20] Ç. Yunus A. y John M., «Fluid Mechanics Fundamentals and Applications».
- [21] I. I. E., «Handbook of Hydraulic Resistance».
- [22] B. R.K., *Fluid Mechanics and Hydraulic Machines*.
- [23] V. R. Ponce y D. B. Simons, *Stormwater Conveyance Modeling and Design*.
- [24] L. Bruce E., *Hydraulics of Pipeline Systems*.
- [25] V. J. Warren, H. Mark J., y P. Elizabeth M., *Water Supply and Pollution Contro*.
- [26] A. Gilberto Sotelo, *HIDRAULICA GENERAL*, vol. 1.
- [27] V. de servicios básicos Ministerios del agua, «Reglamento técnico de diseño de sifones invertidos en sistemas sanitarios», en *Reglamento Nacional NB 688*, Bolivia, 2007.
- [28] R. A. López Cualla, *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*, Segunda. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2003.
- [29] R. A. López Cualla, *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995.
- [30] Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, *Tratado elemental de hidráulica*, Segunda. Mexico.
- [31] J. B. Franzini y E. J. Finnemore, *Mecánica de fluido con aplicaciones en Ingeniería*, Novena. España: Concepción Fernández Madrid, 1999.
- [32] F. Torres Herrera, *Obras hidráulicas*, Segunda. México: Limusa.
- [33] I. Comisión de Normalización y de Fiscalización de Barreras Comerciales No Arancelarias, «NORMA TÉCNICA PERUANA».
- [34] eurolab, «ASTM D6041-18 Especificación estándar para tuberías y accesorios de “fibra de vidrio” moldeados por contacto (resina termoendurecible reforzada con fibra de vidrio) resistentes a la corrosión». Accedido: 15 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eurolab.net/es>
- [35] «Standard Specification for Contact-Molded “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting Resin) Corrosion Resistant Pipe and Fittings». Accedido: 15 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d6041-23.html>
- [36] «Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI». Accedido: 15 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/inei>
- [37] «La Autoridad Nacional del Agua», Drupal. Accedido: 15 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ana.gob.pe/contenido/la-autoridad-nacional-del-agua>
- [38] Universidad de Sevilla, *Manual para el diseño de una red hidráulica de climatización*. [En línea]. Disponible en:

- <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/5091/fichero/5+-+P%C3%89RIDIDAS+DE+CARGA+EN+REDES+HIDR%C3%81ULICAS.pdf>
- [39] E. S. P. Empresas Públicas de Medellín, *Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado de las empresas públicas de Medellín*. E.S.P. Colombia, 2013.
- [40] CARE PERÚ, «Operación y mantenimiento de sistemas por gravedad sin planta de tratamiento». 2001.
- [41] E. Pedraza Gonzáles, *Hidráulica básica*, Primera. México, 2018.
- [42] I. M. R. Salcedo y R. Font, *Mecánica de fluidos - Flujo interno de fluidos incompresibles y compresibles*. Alicante, 2011.
- [43] UDEP, «MODELACIÓN HIDRÁULICA». Accedido: 17 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_123_183_81_1150.pdf
- [44] L. Enzo Levi, *Tratado elemental de hidráulica*. Mexico.
- [45] E. Peña González y J. Anta, «Editorial—Physical Modelling in Hydraulics Engineering», *Water*, vol. 13, p. 2317, ago. 2021, doi: 10.3390/w13172317.
- [46] D. H. K. Ammash, T. R. A.- Hussein, y M. A. A.- Rammahi, «OPTIMUM HYDRAULIC AND STRUCTURAL DESIGN OF INVERTED SIPHON», vol. 2, 2009.

Anexos

Planos

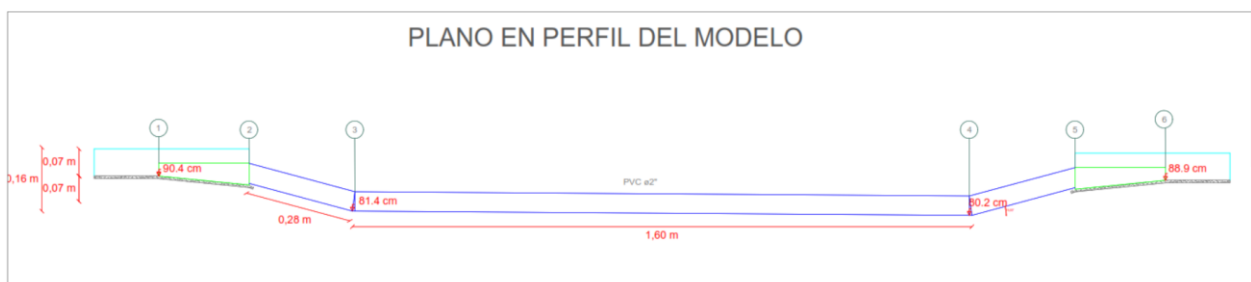


Fig. 43. Plano en perfil



Fig. 44. Plano en planta

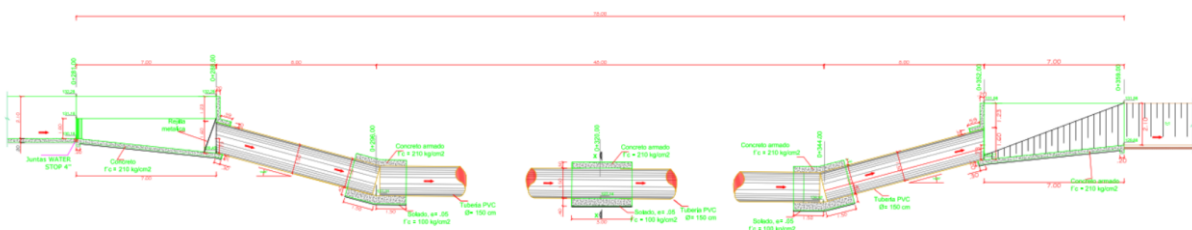


Fig. 45. Plano en perfil prototipo

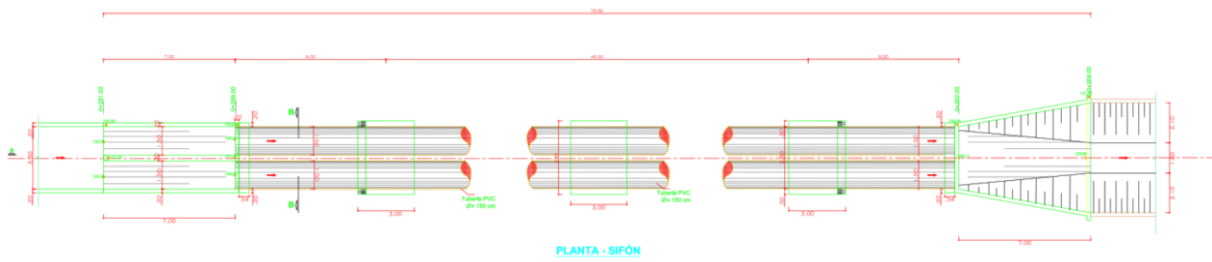


Fig. 46. Plano en planta prototipo

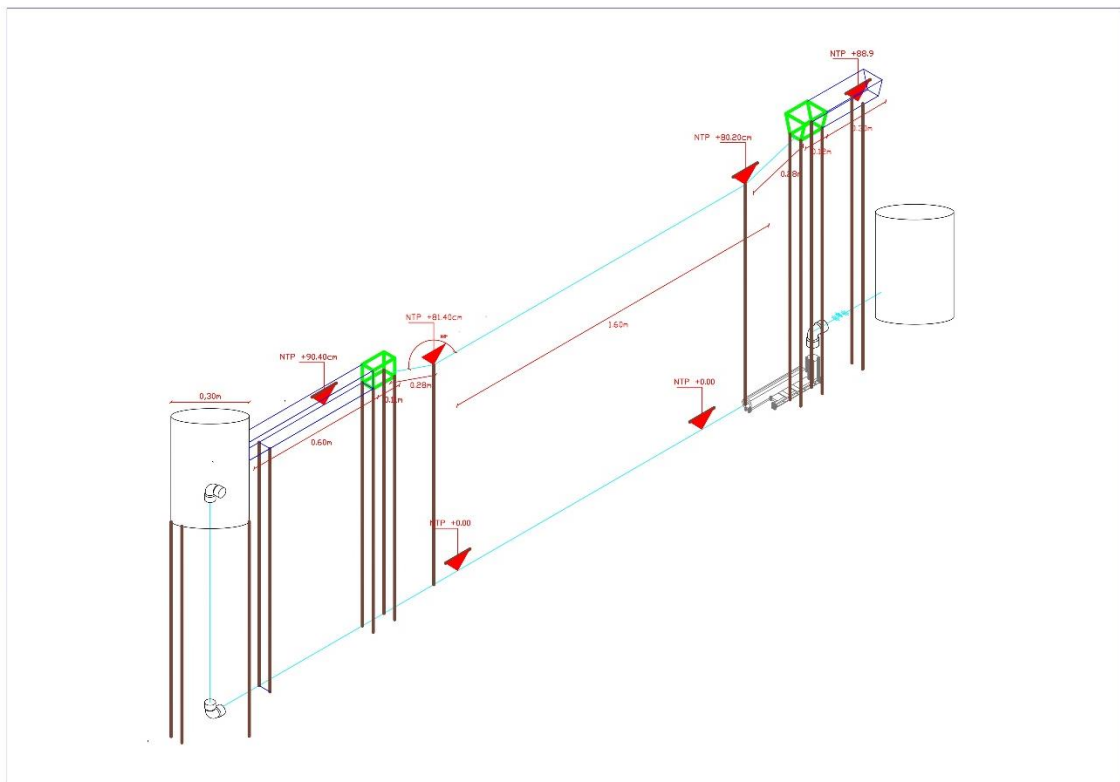


Fig. 47. Plano de modelo hidráulico