

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Modelado y simulación hidráulica de *box culvert* utilizando factores de
escalamiento y *software* hidráulico de uso libre

Trabajo de graduación presentado por Anderson Alexis Santizo Soto para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2024

Modelado y simulación hidráulica de *box culvert* utilizando factores de escalamiento y *software* hidráulico de uso libre

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



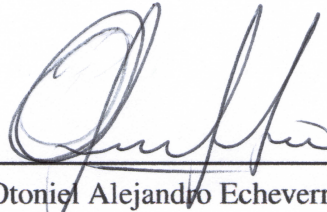
Modelado y simulación hidráulica de *box culvert* utilizando factores de
escalamiento y *software* hidráulico de uso libre

Trabajo de graduación presentado por Anderson Alexis Santizo Soto para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

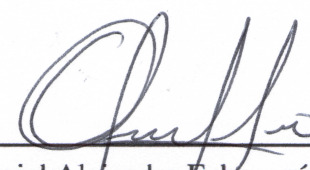
Guatemala,

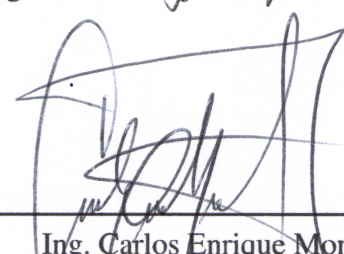
2024

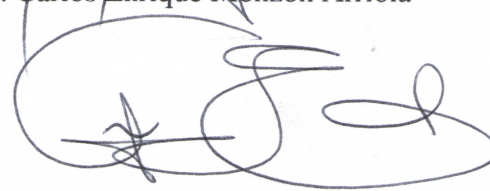
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos

(f) 
Ing. Carlos Enrique Monzon Arriola

(f) 
Ing. Héctor Francisco Espinoza García

Fecha de aprobación: Guatemala, 9 de enero de 2025

PREFACIO

El camino para poder llegar hasta este punto no ha sido fácil, a pesar de ello, he disfrutado cada momento y he aprendido de todas las lecciones que me han llevado hasta aquí. Quisiera utilizar este pequeño espacio para agradecer a aquellas personas que me han acompañado en este trayecto.

En primer lugar, agradecer a Dios, ya que él me ha dado la sabiduría, paciencia y fuerza para superar cualquier obstáculo que he afrontado.

A mi padre, Edwin Santizo por ser un apoyo incondicional, mi inspiración del día a día. Su sabiduría, dedicación y ejemplo me han inspirado a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia, por estar siempre presente y por brindarme las herramientas necesarias para alcanzar mis sueños. Este logro no habría sido posible sin ti.

A mi madre, Indrid Soto, gracias por tu amor incondicional, por tu paciencia infinita y por estar siempre a mi lado, guiándome con tu ejemplo de fortaleza y sabiduría. Has sido mi mayor inspiración, enseñándome a nunca rendirme y a enfrentar los desafíos con valentía y determinación. Tus valores y enseñanzas han forjado lo que soy hoy en día.

A mi hermana Gabriela Santizo, gracias por hacerme reír, apoyarme siempre que lo necesito y estar conmigo en todo momento.

A mi hermano Sebastián Santizo, por ser esa persona que siempre está ahí cuando alguien lo necesita, que es una excelente compañía y gran persona. En este trabajo, específicamente, gracias por tu apoyo en el modelaje e impresión 3D.

A mis amigos, Juan Carlos Lemus, Sergio Galindo, José Gerardo Revolorio, Andrés Romero y Oscar Borrayo, por compartir conmigo estos 5 años de carrera con risas, conocimiento y apoyo incondicional.

A mis compañeros de estudio Héctor Paiz, Álvaro Guillermo, Vinicio López, Paula Custodio, Vivian Arreaza, Diego Torón y Alberto Murga por su amistad y apoyo en la carrera.

Finalmente, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ingeniero Otoniel Echeverría, por su valiosa asesoría durante este trabajo de investigación. Su disposición para compartir su conocimiento y experiencia ha sido fundamental en la realización de este proyecto. Agradezco su paciencia y dedicación, así como el tiempo que invirtió en guiarme en cada etapa del proceso.

CONTENIDO

| | Página |
|--|---------------|
| PREFACIO | IV |
| LISTA DE CUADROS | VIII |
| LISTA DE FIGURAS | XI |
| LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES | XII |
| RESUMEN | XIII |
| ABSTRACT | XIV |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. JUSTIFICACIÓN | 2 |
| III. OBJETIVOS | 3 |
| A Objetivo general | 3 |
| B Objetivos específicos | 3 |
| IV. ALCANCE | 4 |
| V. MARCO TEÓRICO | 5 |
| A Fundamentos de la ingeniería hidráulica | 5 |
| 1 Velocidad, caudal y área transversal | 5 |
| 2 Presión hidrostática | 6 |
| 3 Tipos de flujo | 7 |
| 4 Número de Reynolds | 7 |
| 5 Cabezal de energía | 8 |
| 6 Principio de Bernoulli | 9 |
| B Alcantarillas | 10 |
| 1 Materiales de construcción | 11 |
| 2 Estructuras de entrada en alcantarillas | 11 |
| 3 Formas de alcantarillas | 12 |
| 4 Box Culvert | 13 |
| 5 Comparación de alcantarillas con puentes pequeños | 13 |
| C Hidráulica de alcantarillas | 15 |
| 1 Hidráulica en canales abiertos - Ecuación de Manning | 16 |
| 2 Componentes hidráulicos del flujo de una alcantarilla | 17 |
| 3 Condiciones de flujo | 18 |
| 4 Tipos de flujo en alcantarillas | 19 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 5 | Control por entrada | 20 |
| 6 | Control por salida | 21 |
| 7 | Consideraciones a evaluar en alcantarillas | 22 |
| D | Análisis dimensional y semejanza hidráulica | 23 |
| E | Semejanza geométrica | 23 |
| F | Semejanza cinemática | 24 |
| G | Semejanza dinámica | 25 |
| H | Similitud de Froude | 25 |
| I | Tipos de modelos | 26 |
| J | Selección de escalas | 28 |
| K | Software de simulación hidráulica | 28 |
| 1 | Aplicaciones en la ingeniería | 29 |
| 2 | OpenFOAM | 30 |
| 3 | SimFlow | 30 |
| 4 | Mallado y geometría | 32 |
| 5 | Condiciones de borde | 32 |
| 6 | Resultados | 33 |
| L | Equipo de laboratorio para pruebas hidráulicas | 34 |
| 1 | Equipo Gunt HM 165 | 35 |
| VI. | METODOLOGÍA | 37 |
| A | Fase I: Recopilación | 37 |
| 1 | Fase I.I: Box Culverts | 37 |
| 2 | Fase I.II: Simulación de fluidos | 37 |
| 3 | Fase I.III: Factores de escalamiento | 37 |
| B | Fase II: Creación del modelo de laboratorio | 38 |
| C | Fase III: Factores de escalamiento | 39 |
| D | Fase IV: Pruebas de laboratorio | 40 |
| E | Fase V: Análisis de velocidades y profundidades de entrada y salida | 41 |
| F | Fase VI: Prototipo software | 45 |
| G | Fase VII: Análisis con datos obtenidos | 49 |
| H | Fase VIII: Análisis cualitativo | 49 |
| VII. | ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 50 |
| A | Velocidades y profundidades de entrada y salida obtenidos por pruebas de laboratorio y simulación por software | 50 |
| B | Análisis y verificación con datos obtenidos | 54 |
| C | Análisis cualitativo | 59 |
| VIII. | CONCLUSIONES | 63 |
| IX. | RECOMENDACIONES | 64 |

X. BIBLIOGRAFÍA 65
XI. APÉNDICES 67

LISTA DE CUADROS

| Cuadro | | Página |
|---------------|---|---------------|
| 1 | Factores de escalamiento calculados | 39 |
| 2 | Velocidades y profundidades de entrada y salida, prueba 1, Box Culvert de 1 celda | 44 |
| 3 | Velocidades y profundidades de salida, prueba 1, Box Culvert de 1 celda | 49 |
| 4 | Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y con factores de escalamiento, Box Culvert 1 celda | 50 |
| 5 | Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y con factores de escalamiento, Box Culvert 2 celdas | 50 |
| 6 | Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y con factores de escalamiento, Box Culvert 3 celdas | 51 |
| 7 | Resultados obtenidos en simulación con software, Box Culvert 1 celda | 51 |
| 8 | Resultados obtenidos en simulación con software, Box Culvert 2 celdas | 51 |
| 9 | Resultados obtenidos en simulación con software, Box Culvert 3 celdas | 52 |
| 10 | Caudal y carga total, Box Culvert 1 celda | 54 |
| 11 | Número de Froude, Box Culvert 1 celda | 54 |
| 12 | Caudal y carga total, Box Culvert 2 celdas | 55 |
| 13 | Número de Froude, Box Culvert 2 celdas | 55 |
| 14 | Caudal y carga total, Box Culvert 3 celdas | 56 |
| 15 | Número de Froude, Box Culvert 3 celdas | 56 |
| 16 | Consideraciones para alcantarillas, Box Culvert 1 celda | 57 |
| 17 | Consideraciones para alcantarillas, Box Culvert 2 celdas | 57 |
| 18 | Consideraciones para alcantarillas, Box Culvert 3 celdas | 58 |

LISTA DE FIGURAS

| Ilustración | Página |
|--|--------|
| 1 Velocidad, área y caudal de un flujo en una sección. | 6 |
| 2 Distribución de la presión en una superficie plana sumergida | 6 |
| 3 Distribución de la presión en una superficie vertical sumergida | 7 |
| 4 Flujo laminar y flujo turbulento | 7 |
| 5 Partes de una alcantarilla | 10 |
| 6 Materiales de construcción de alcantarillas | 11 |
| 7 Estructuras de entrada de alcantarillas | 11 |
| 8 Ejemplo de eficiencia por entrada de la alcantarilla | 12 |
| 9 Formas típicas de alcantarillas | 12 |
| 10 Box Culvert de 2 celdas | 13 |
| 11 Comparativa entre box culvert y puente con luz similar | 14 |
| 12 Canales abiertos | 16 |
| 13 Componentes hidráulicos de una alcantarilla | 17 |
| 14 Coeficientes n de Manning | 19 |
| 15 Tipos de flujos en alcantarillas | 20 |
| 16 Ejemplo de alcantarillas bajo control de entrada | 20 |
| 17 Ejemplo de alcantarillas bajo control de salida | 21 |
| 18 Velocidades máximas admisibles de entrada | 22 |
| 19 Velocidades máximas admisibles de salida | 22 |
| 20 Similitud geométrica entre un prototipo y un modelo | 24 |
| 21 Similitud cinemática entre un prototipo y un modelo | 25 |
| 22 Modelo de puerto El Ostión, Veracruz | 27 |
| 23 Escalas lineales comunes en modelos hidráulicos | 28 |
| 24 Simulación del comportamiento de un fluido en un vertedero utilizando CFD | 29 |
| 25 Simulación de la aerodinámica de un avión comercial utilizando CFD | 30 |
| 26 Simulación de un fluido en SimFlow, por medio de OpenFOAM | 31 |
| 27 Diferencia entre aumento de unidades de mallado | 32 |
| 28 Menú de condiciones de borde en SimFlow | 33 |
| 29 Presión medida en una simulación de SimFlow | 34 |
| 30 Equipo HM 165 de la marca GUNT | 35 |
| 31 Partes del equipo HM 165 de la marca GUNT | 36 |
| 32 Modelos fabricados a escala con impresión 3D | 38 |
| 33 Pruebas de laboratorio Box Culvert de 1 celda | 40 |
| 34 Pruebas de laboratorio Box Culvert de 2 celdas | 40 |
| 35 Pruebas de laboratorio Box Culvert de 3 celdas | 41 |
| 36 Referencia utilizada para pruebas de laboratorio | 41 |
| 37 Medición de flotador para determinar la velocidad | 42 |
| 38 Box Culvert de 1 celda, velocidad de entrada, prueba 1 | 42 |

| | | |
|----|---|----|
| 39 | Box Culvert de 1 celda, velocidad de salida, prueba 1 | 43 |
| 40 | Box Culvert de 1 celda, profundidad de entrada, prueba 1 | 43 |
| 41 | Box Culvert de 1 celda, profundidad de salida, prueba 1 | 44 |
| 42 | Mallado y parámetros del espacio de simulación | 45 |
| 43 | Profundidad inicial en masa de agua | 45 |
| 44 | Solver seleccionado | 46 |
| 45 | Condición de borde para la entrada | 47 |
| 46 | Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 1, Box Culvert 1 celda | 48 |
| 47 | Arrastre de sedimentos, Box Culvert 1 celda | 59 |
| 48 | Arrastre de sedimentos, Box Culvert 2 celdas | 59 |
| 49 | Arrastre de sedimentos, Box Culvert 3 celdas | 60 |
| 50 | Comparativa de comportamiento entre Box Culvert de 1 celda de laboratorio y por simulación | 60 |
| 51 | Comparativa de comportamiento entre Box Culvert de 2 celdas de laboratorio y por simulación | 61 |
| 52 | Comparativa de comportamiento entre Box Culvert de 3 celdas de laboratorio y por simulación | 61 |
| 53 | Medidas Box Culvert de 1 celda reales | 67 |
| 54 | Medidas Box Culvert de 1 celda con escala 1:50 | 68 |
| 55 | Medidas Box Culvert de 2 celdas reales | 69 |
| 56 | Medidas Box Culvert de 2 celdas con escala 1:50 | 70 |
| 57 | Medidas Box Culvert de 3 celdas reales | 71 |
| 58 | Medidas Box Culvert de 3 celdas con escala 1:50 | 72 |
| 59 | Cálculo de factores de escalamiento aplicables a este estudio: longitud y área | 73 |
| 60 | Cálculo de factores de escalamiento aplicables a este estudio: velocidad y tiempo | 74 |
| 61 | Cálculo de factores de escalamiento aplicables a este estudio: caudal | 75 |
| 62 | Box Culvert de 1 celda, velocidad de entrada, prueba 2 | 75 |
| 63 | Box Culvert de 1 celda, velocidad de salida, prueba 2 | 76 |
| 64 | Box Culvert de 1 celda, profundidad de entrada, prueba 2 | 76 |
| 65 | Box Culvert de 1 celda, profundidad de salida, prueba 2 | 77 |
| 66 | Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 2, Box Culvert 1 celda | 77 |
| 67 | Box Culvert de 1 celda, velocidad de entrada, prueba 3 | 78 |
| 68 | Box Culvert de 1 celda, velocidad de salida, prueba 3 | 78 |
| 69 | Box Culvert de 1 celda, profundidad de entrada, prueba 3 | 79 |
| 70 | Box Culvert de 1 celda, profundidad de salida, prueba 3 | 79 |
| 71 | Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 3, Box Culvert 1 celda | 80 |
| 72 | Box Culvert de 2 celdas, velocidad de entrada, prueba 1 | 80 |
| 73 | Box Culvert de 2 celdas, velocidad de salida, prueba 1 | 81 |
| 74 | Box Culvert de 2 celdas, profundidad de entrada, prueba 1 | 81 |

| | | |
|-----|---|----|
| 75 | Box Culvert de 2 celdas, profundidad de salida, prueba 1 | 82 |
| 76 | Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 1, Box Culvert 2 celdas | 82 |
| 77 | Box Culvert de 2 celdas, velocidad de entrada, prueba 2 | 83 |
| 78 | Box Culvert de 2 celdas, velocidad de salida, prueba 2 | 83 |
| 79 | Box Culvert de 2 celdas, profundidad de entrada, prueba 2 | 84 |
| 80 | Box Culvert de 2 celdas, profundidad de salida, prueba 2 | 84 |
| 81 | Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 2, Box Culvert 2 celdas | 85 |
| 82 | Box Culvert de 2 celdas, velocidad de entrada, prueba 3 | 85 |
| 83 | Box Culvert de 2 celdas, velocidad de salida, prueba 3 | 86 |
| 84 | Box Culvert de 2 celdas, profundidad de entrada, prueba 3 | 86 |
| 85 | Box Culvert de 2 celdas, profundidad de salida, prueba 3 | 87 |
| 86 | Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 3, Box Culvert 2 celdas | 87 |
| 87 | Box Culvert de 3 celdas, velocidad de entrada, prueba 1 | 88 |
| 88 | Box Culvert de 3 celdas, velocidad de salida, prueba 1 | 88 |
| 89 | Box Culvert de 3 celdas, profundidad de entrada, prueba 1 | 89 |
| 90 | Box Culvert de 3 celdas, profundidad de salida, prueba 1 | 89 |
| 91 | Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 1, Box Culvert 3 celdas | 90 |
| 92 | Box Culvert de 3 celdas, velocidad de entrada, prueba 2 | 90 |
| 93 | Box Culvert de 3 celdas, velocidad de salida, prueba 2 | 91 |
| 94 | Box Culvert de 3 celdas, profundidad de entrada, prueba 2 | 91 |
| 95 | Box Culvert de 3 celdas, profundidad de salida, prueba 2 | 92 |
| 96 | Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 2, Box Culvert 3 celdas | 92 |
| 97 | Box Culvert de 3 celdas, velocidad de entrada, prueba 3 | 93 |
| 98 | Box Culvert de 3 celdas, velocidad de salida, prueba 3 | 93 |
| 99 | Box Culvert de 3 celdas, profundidad de entrada, prueba 3 | 94 |
| 100 | Box Culvert de 3 celdas, profundidad de salida, prueba 3 | 94 |
| 101 | Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 3, Box Culvert 3 celdas | 95 |
| 102 | Carga total, Box Culvert 1 celda, prueba 1 | 95 |
| 103 | Carga total, Box Culvert 1 celda, prueba 2 | 96 |
| 104 | Carga total, Box Culvert 1 celda, prueba 3 | 96 |
| 105 | Carga total, Box Culvert 2 celdas, prueba 1 | 97 |
| 106 | Carga total, Box Culvert 2 celdas, prueba 2 | 97 |
| 107 | Carga total, Box Culvert 2 celdas, prueba 3 | 98 |
| 108 | Carga total, Box Culvert 3 celdas, prueba 1 | 98 |
| 109 | Carga total, Box Culvert 3 celdas, prueba 2 | 99 |
| 110 | Carga total, Box Culvert 3 celdas, prueba 3 | 99 |

LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

- 1) V_{iML} = Velocidad de entrada modelo de laboratorio en m/s
- 2) V_{iPS} = Velocidad de entrada prototipo software en m/s
- 3) V_{fML} = Velocidad de salida modelo de laboratorio en m/s
- 4) V_{fFE} = Velocidad de salida esperada calculada con factores de escalamiento en m/s
- 5) V_{fPS} = Velocidad de salida simulación por software en m/s
- 6) H_{iML} = Profundidad de entrada modelo de laboratorio en m
- 7) H_{iPS} = Profundidad de entrada prototipo software en m
- 8) H_{fML} = Profundidad de salida modelo de laboratorio en m
- 9) H_{fFE} = Profundidad de salida esperada calculada con factores de escalamiento en m
- 10) H_{fPS} = Profundidad de salida simulación por software en m/s
- 11) Q = Caudal de entrada en m^3/s
- 12) H_{wML} = Carga total con modelo de laboratorio en m
- 13) H_{wPS} = Carga total con simulación por software en m
- 14) Fr_{iML} = Número de Froude con velocidad de entrada obtenida de modelo de laboratorio
- 15) Fr_{fML} = Número de Froude con velocidad de salida obtenida de modelo de laboratorio
- 16) Fr_{fPS} = Número de Froude con velocidad de salida obtenida de simulación por software

RESUMEN

El presente estudio analizó el comportamiento hidráulico de tres configuraciones de alcantarillas tipo box culvert (1, 2 y 3 celdas). Para evaluar su desempeño bajo diferentes volúmenes de agua y condiciones de flujo, se realizaron pruebas experimentales en laboratorio y se llevaron a cabo simulaciones hidráulicas utilizando software de uso libre como OpenFOAM y SimFlow. Se aplicaron factores de escalamiento que permitieron extrapolar los resultados obtenidos a escenarios reales, evaluando así la capacidad de estas estructuras para operar bajo distintas condiciones hidrológicas.

Los resultados experimentales y numéricos fueron comparados con el fin de identificar discrepancias y analizar la precisión de las simulaciones respecto a las pruebas de laboratorio. Además, se realizaron ajustes en los modelos de simulación para mejorar la correlación entre ambos métodos. Se concluyó que las simulaciones con software de uso libre fueron viables para replicar con precisión el comportamiento de las alcantarillas tipo box culvert, siempre que se aplicaran adecuadamente los factores de escalamiento y se validaran los resultados con pruebas físicas. Asimismo, se destacó la importancia de seguir una metodología robusta para asegurar que las simulaciones y experimentos puedan ser extrapolados a condiciones reales, contribuyendo así al diseño más eficiente, seguro y económico de estas estructuras en proyectos de drenaje y control de flujos.

ABSTRACT

The present study analyzed the hydraulic behavior of three configurations of box culvert structures (1, 2, and 3 cells). To evaluate their performance under different water volumes and flow conditions, experimental tests were conducted in the laboratory, and hydraulic simulations were carried out using open-source software such as OpenFOAM and SimFlow. Scaling factors were applied to extrapolate the obtained results to real-world scenarios, thus assessing the capacity of these structures to operate under various hydrological conditions.

Experimental and numerical results were compared to identify discrepancies and analyze the accuracy of the simulations with respect to the laboratory tests. Additionally, adjustments were made to the simulation models to improve the correlation between both methods. It was concluded that simulations using open-source software were feasible for accurately replicating the behavior of box culvert structures, provided that scaling factors were properly applied and results were validated with physical tests. Furthermore, the importance of following a robust methodology was highlighted to ensure that simulations and experiments could be extrapolated to real conditions, thus contributing to a more efficient, safe, and cost-effective design of these structures in drainage and flow control projects.

I. INTRODUCCIÓN

Las alcantarillas tipo box culvert son estructuras esenciales en la infraestructura vial, utilizadas para permitir el paso de agua bajo carreteras o caminos, evitando desbordamientos y erosión del terreno. Su diseño debe considerar múltiples factores hidráulicos y estructurales, con el objetivo de garantizar un flujo eficiente y seguro en condiciones diversas. En este contexto, surge la necesidad de optimizar el diseño de estas estructuras para mejorar su rendimiento, especialmente bajo condiciones críticas, como caudales elevados o flujos turbulentos.

Este estudio se enfoca en analizar el comportamiento hidráulico de tres configuraciones diferentes de box culverts (1, 2 y 3 celdas), a través de pruebas en laboratorio y simulaciones por software de dinámica de fluidos. La investigación tiene como finalidad evaluar la capacidad de estas estructuras para manejar diferentes volúmenes de agua y condiciones de flujo, aplicando factores de escalamiento que permitan extrapolar los resultados a escenarios reales.

Para llevar a cabo este análisis, se emplearon herramientas de simulación computacional, como OpenFOAM y SimFlow, complementadas con pruebas físicas en laboratorio. El enfoque metodológico busca comparar los resultados de ambos métodos, identificando posibles discrepancias y ofreciendo recomendaciones para mejorar el diseño de estas estructuras en futuras aplicaciones.

Este estudio busca determinar la viabilidad y precisión de las simulaciones por software libre al replicar el comportamiento hidráulico de los box culverts en comparación con las pruebas de laboratorio. Además, se busca proporcionar una guía para la correcta aplicación de factores de escalamiento, con el fin de trasladar los resultados experimentales a escenarios reales, contribuyendo así al diseño más eficiente y seguro de estas estructuras en proyectos de infraestructura vial.

II. JUSTIFICACIÓN

Guatemala es un país lleno de ríos y riachuelos, debido a esto, es fundamental el conocimiento y construcción de obras estructurales como lo son puentes y drenajes. Se estima que en el país hay más de 1600 puentes de los cuales, anualmente, un 30 % deben ser puestos en mantenimiento debido a daños en la estructura. Dichos daños son consecuencia de fenómenos climáticos como lo son tormentas, inundaciones, crecidas y aumento de caudales.(Felipe, 2016)

Los alcantarillados o mejor conocidos como “culvert” por su traducción al inglés, son obras de drenaje transversal utilizados para dar continuidad a la trayectoria de cauces en obras lineales como lo son carreteras o ferrocarriles. Estructuralmente hablando pueden ser comparados con puentes, aunque estos últimos tienen funciones mucho más complejas. Dentro de los alcantarillados se encuentran los tipos “box culvert” que son cajones generalmente pre fabricados de forma cuadrada utilizados ya sea en serie o de forma única para garantizar el paso de cauces y tránsito ya sea peatonal o vehicular. (“*Analysis and Design of Box Culvert: A Review*, author=Sagar Jamle”, 2019)

En Guatemala la única alternativa para el cruce de ríos o riachuelos son los puentes y para la redirección de cauces siempre se ha utilizado el típico drenaje de sección circular. A pesar de que el uso de estas estructuras resulta efectivo, es importante valorar el uso de otras construcciones. Una “box culvert” es una estructura de canalización que se utiliza para gestionar el flujo de agua en un cruce de carretera o ferrocarril. Consiste en una serie de secciones rectangulares o cajones que están diseñados para permitir que el agua fluya a través de ellos de manera controlada. Además, su tipología permite ser modificados fácilmente y brindar otras ventajas al adicionar celdas. (Philip, 2020)

En cuanto a eficacia, estudios en el ámbito nacional han verificado que parámetros como el caudal disminuyen significativamente al pasar por esta estructura. Esto se traduce en beneficios para otras infraestructuras e incluso comunidades cercanas, ya que no experimentan el impacto directo de las corrientes de agua durante eventos de lluvias intensas. La reducción del caudal que atraviesa la alcantarilla contribuye a la mitigación del riesgo de inundaciones aguas abajo, protegiendo áreas urbanas, carreteras y tierras agrícolas. Además, al regular el flujo de agua, la alcantarilla puede mejorar la estabilidad del terreno circundante y prevenir la erosión. (Zepeda, 2019)

Ya hablando en un ámbito ambiental, los box culvert son capaces de resistir eventos climáticos extremos como lo son inundaciones repentinas y crecidas; los cuales son usuales en Guatemala y se han visto en aumento en los últimos años debido al cambio climático global. Con los box culvert no solo se puede garantizar la continuidad del uso de carreteras y tramos principales, sino que también, en el peor de los casos, pueden ser cambiados fácilmente y en cuestión de semanas. (Parvez, 2015)

Finalmente, su construcción robusta minimiza la necesidad de mantenimiento constante, lo que ahorra costos a largo plazo. Esto es especialmente importante en regiones donde las precipitaciones y los fenómenos climáticos pueden desgastar rápidamente las infraestructuras. (Jamle, 2019)

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Evaluar por medio de un modelo físico y de software las capacidades y el comportamiento de un Box Culvert bajo distintos escenarios hidrológicos.

B. Objetivos específicos

- Examinar la conducta hidrodinámica de un Box Culvert diseñado por medio de software de uso libre.
- Identificar los factores de escalamiento aplicables a las variables de importancia en el análisis hidráulico de box culverts.
- Comparar los resultados hidráulicos y físicos obtenidos por medio de software a los obtenidos en el laboratorio.
- Examinar el comportamiento hidráulico en laboratorio y por software de 3 tipologías distintas de box culvert.

IV. ALCANCE

El alcance de la presente investigación es el siguiente:

- Este trabajo de graduación se centra en la importancia de la simulación a escala en laboratorio y software, en lugar de enfocarse en el diseño de alcantarillado.
- Las medidas de las alcantarillas no estarán sujetas a los requisitos de manuales o normativas, ya que se seleccionarán dimensiones comunes para evaluar su comportamiento en distintas situaciones hidráulicas. Esto permite que el estudio sea más general y aplicable a diferentes contextos, sin necesidad de adaptarse a un proyecto específico
- El trabajo de graduación excluye de manera explícita aspectos como la presión del suelo, la resistencia sísmica, y las características de los materiales de construcción, dado que estos elementos no son relevantes para el objetivo principal del estudio, que es entender el comportamiento del flujo de agua.
- La estructura funcionará como un canal abierto, por lo que nunca alcanzará su capacidad completa y seguirá las leyes del flujo en canales abiertos. Esto se debe a que el objetivo principal es prevenir el desbordamiento.

V. MARCO TEÓRICO

A. Fundamentos de la ingeniería hidráulica

Los fundamentos de la ingeniería hidráulica son esenciales para comprender el comportamiento del agua en diversas aplicaciones, desde sistemas de abastecimiento y drenaje hasta la generación de energía y el control de inundaciones. Esta disciplina se centra en el estudio de los fluidos, particularmente el agua, y cómo interactúan con su entorno a través de principios físicos como la mecánica de fluidos, la hidrostática y la hidrodinámica. La ingeniería hidráulica juega un papel crucial en la planificación, diseño y construcción de infraestructuras que gestionan el recurso hídrico, garantizando su uso eficiente y sostenible en beneficio de la sociedad. (Gribbin, 2014)

1. Velocidad, caudal y área transversal.

- Velocidad (V): La velocidad describe la tasa de cambio de posición de las partículas de agua tal como se define en la mecánica fundamental. Sin embargo, dado que todas las partículas que fluyen en un conducto se mueven a velocidades ligeramente diferentes, la velocidad del flujo es la velocidad promedio de todas las partículas. (Gribbin, 2014)

$$V = d/t \quad (1)$$

Donde:

- d = Distancia
 - t = Tiempo
- Caudal (Q): Describe la cantidad de agua que pasa a través de un plano imaginario por unidad de tiempo en un lugar particular a lo largo del conducto. El parámetro Q se mide como volumen por unidad de tiempo, normalmente pies cúbicos por segundo (cfs) o metros cúbicos por segundo (m³/s). (Gribbin, 2014)

$$Q = A * V \quad (2)$$

Donde:

- A = Área transversal
 - V = Velocidad
- Área transversal: El área transversal es el área de la sección perpendicular al flujo de fluido en un conducto o canal. Esta área es importante porque, junto con la velocidad del fluido, determina el caudal. El área puede tener distintas formas, como circular (en una tubería) o rectangular (en un canal), y se mide en metros cuadrados (m²). (Gribbin, 2014)

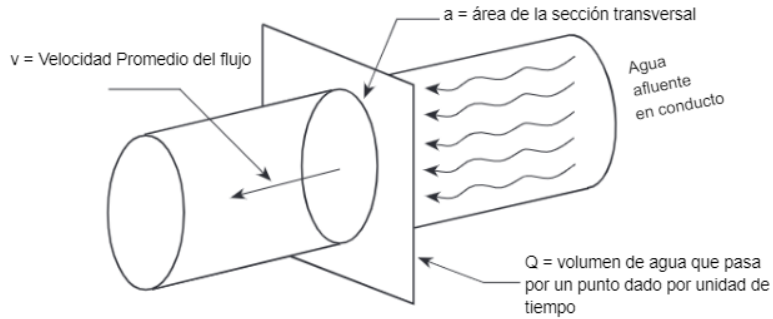


Figura 1. Velocidad, área y caudal de un flujo en una sección.

(Gribbin, 2014)

2. Presión hidrostática. El agua en un recipiente ejerce presión en ángulo recto, o normal, con respecto a las paredes del recipiente o sobre cualquier superficie sumergida. Este fenómeno, que es exclusivo de los fluidos, se debe a la incapacidad de las moléculas de agua para resistir el esfuerzo cortante. (Gribbin, 2014)

- Presión en superficie plana: La presión actúa perpendicular al plano y tiene una magnitud de la gravedad multiplicado por la profundidad a la que se quiere determinar la presión. (Gribbin, 2014)

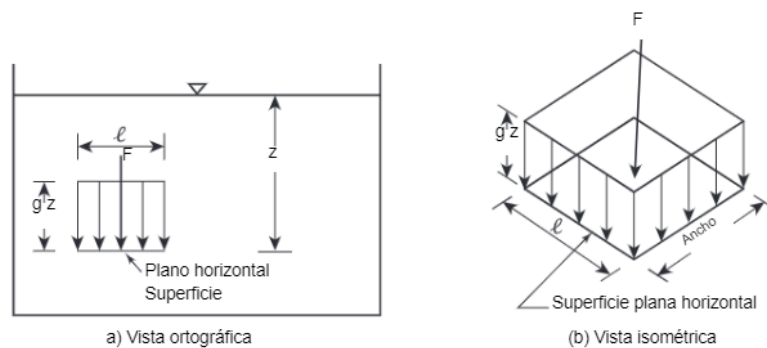


Figura 2. Distribución de la presión en una superficie plana sumergida

(Gribbin, 2014)

- Presión en superficie vertical: En este caso, la magnitud aumenta con la profundidad por debajo de la superficie libre. Si el plano vertical se extiende a la superficie libre, la distribución de presión es triangular. Si comienza a cierta distancia por debajo de la superficie libre, la distribución de la presión es trapezoidal. (Gribbin, 2014)

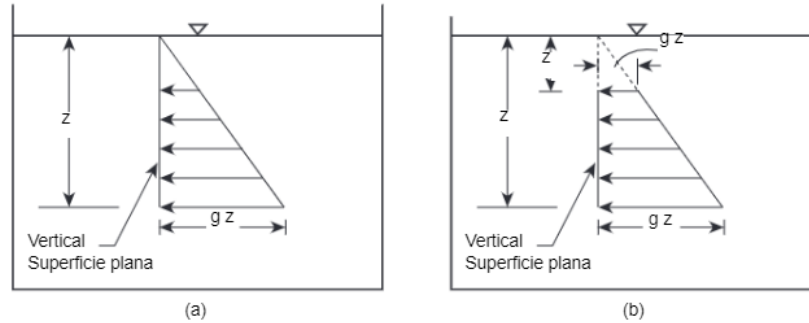


Figura 3. Distribución de la presión en una superficie vertical sumergida

(Gribbin, 2014)

3. Tipos de flujo. En hidráulica, la comprensión de los tipos de flujo es fundamental para el análisis y diseño de estructuras y sistemas que transportan agua. Los flujos de agua se clasifican principalmente en función de sus características y comportamiento, lo que permite predecir cómo interactuarán con las superficies y estructuras a su alrededor. (Gribbin, 2014)

- Flujo laminar: Cuando un líquido fluye en un tubo y su velocidad es baja, fluye en líneas paralelas a lo largo del eje del tubo. (Gribbin, 2014)
- Flujo turbulento: Conforme aumenta la velocidad, el flujo se dispersa hasta que adquiere un movimiento de torbellino en el que se forman corrientes cruzadas y remolinos. (Gribbin, 2014)
- Flujo de transición: Es el intermedio entre flujo turbulento y flujo laminar. (Gribbin, 2014)

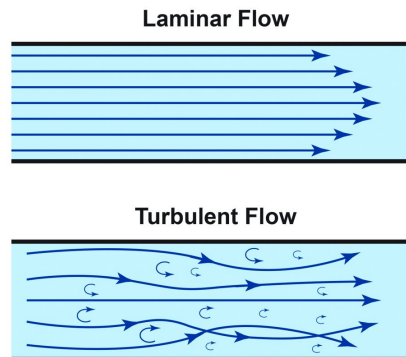


Figura 4. Flujo laminar y flujo turbulento

(Gribbin, 2014)

4. Número de Reynolds. Es un número adimensional que relaciona las propiedades físicas del fluido, su velocidad y la geometría del ducto por el que fluye. Con este valor es posible determinar si un fluido tiene un comportamiento laminar, turbulento o de transición. (Jiménez, 2018)

$$Re = \frac{D * v * \rho}{\mu} = \frac{D * v}{\nu} \quad (3)$$

Donde:

- D = Diámetro equivalente
- v = Velocidad
- ρ = Densidad del líquido
- μ = Viscosidad dinámica del líquido
- ν = Viscosidad cinemática del líquido

El diámetro equivalente esta dado por:

$$Re = \frac{4 * A}{PM} \quad (4)$$

Donde:

- A = Área transversal del fluido
- PM = Perímetro mojado

Valores del número de Reynolds menores a 2200 se consideran como flujo laminar, mayores a 4500 como flujo turbulento y entre 2200 y 4500 como flujo de transición.

5. Cabezal de energía. El concepto de cabezal se utiliza para describir la energía total por unidad de peso de un fluido en un punto específico. Se mide en unidades de longitud, ya que corresponde a una altura.

Las formas más comunes de carga energética son:

- Cabezal de posición: energía potencial por unidad de peso de una masa de agua debido a la altura del agua.
- Cabezal de presión: energía potencial por unidad de peso de una masa de agua debido a la presión ejercida.
- Cabezal de velocidad: energía cinética por unidad de peso de una masa de agua debido a la energía cinética resultante de su movimiento.
- Cabezal de pérdida: pérdida de energía por unidad de peso de una masa de agua debido a la fricción y la turbulencia.

6. Principio de Bernoulli. Para un fluido incompresible sin fricción, la carga de energía total permanece constante a lo largo de la corriente de fluido. (Giles, 2018)

Dado que la energía se pierde del sistema debido a la fricción y otros factores, la energía total, o carga, en la Estación 2 será menor que la energía total, o altura, en la Estación 1 en una cantidad igual a estas pérdidas. (Giles, 2018)

La ecuación de Bernoulli se describe a continuación:

$$h + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \text{constante} \quad (5)$$

Donde:

- h = Distancia vertical desde una cota conocida.
- p = Presión
- γ = Peso específico del fluido
- g = Gravedad
- v = Velocidad del fluido

Las pérdidas de energía tienen lugar al menos de dos maneras:

- Pérdida de entrada: se debe a una pérdida de energía causada por el movimiento turbulento del agua a medida que ingresa desde el depósito más grande a la tubería más restrictiva. (Giles, 2018)
- Pérdida por fricción: se debe a la interrupción del flujo causada por la turbulencia y por el contacto con la superficie interior de la tubería. (Giles, 2018)

Teniendo en cuenta estos factores, la fórmula de Bernoulli se adapta a condiciones más realistas de la siguiente forma, teniendo en cuenta 2 puntos de estudio:

$$h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_e + h_f \quad (6)$$

Donde:

- h = Distancia vertical desde una cota conocida.
- p = Presión
- γ = Peso específico del fluido
- g = Gravedad

- v = Velocidad del fluido
- h_e = Pérdidas por entrada
- h_f = Pérdidas por fricción

B. Alcantarillas

Una alcantarilla es un segmento relativamente corto de conducto que generalmente se usa para transportar agua debajo de una carretera u otro tipo de terraplén de tierra. Su función varía según el caso, aunque generalmente son utilizadas como puentes o conexiones para el paso de peatones, vehículos e inclusive animales, según sea la configuración y anchura de la estructura. (Creamer, 2007)

La alcantarilla en sí consta de una entrada, una salida y un barril, que no es más que la porción de conducto cerrado de la alcantarilla. Las formas comunes de estas estructuras incluyen tuberías circulares, cajas rectangulares, elipses y arcos. Las alcantarillas no circulares generalmente se describen por su tamaño en términos de una elevación de la alcantarilla y un tramo de alcantarilla. El tamaño de una alcantarilla circular generalmente se expresa en términos del diámetro. (Creamer, 2007)

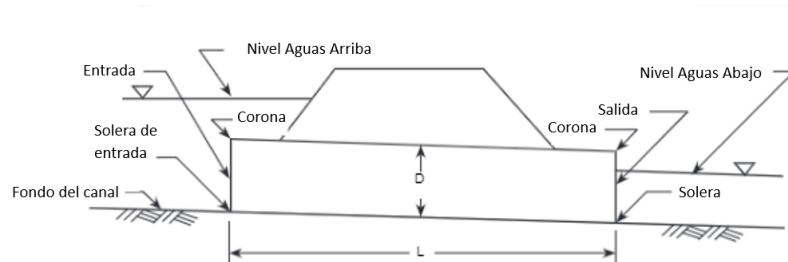


Figura 5. Partes de una alcantarilla

(Creamer, 2007)

1. Materiales de construcción. La selección de un material de alcantarilla puede depender de la resistencia estructural, la rugosidad hidráulica, la durabilidad (resistencia a la corrosión y la abrasión) y la constructibilidad. Los materiales de alcantarilla más utilizados son el hormigón (tanto reforzado como no reforzado), metal corrugado (aluminio o acero) y plástico (polietileno de alta densidad (HDPE) o cloruro de polivinilo (PVC)) (U.S.D.T, 2012)

Los materiales menos utilizados incluyen arcilla, piedra y madera, como se pueden encontrar en estructuras de alcantarillas históricas. Se siguen desarrollando materiales para alcantarillas y en el futuro podrían incluir varios tipos de plásticos, fibra de vidrio y materiales compuestos. Las alcantarillas también pueden revestirse con otros materiales para inhibir la corrosión y la abrasión, o para reducir la resistencia hidráulica. Por ejemplo, las alcantarillas de metal corrugado pueden revestirse con hormigón asfáltico o un material polimérico.(U.S.D.T, 2012)



Figura 6. Materiales de construcción de alcantarillas

(U.S.D.T, 2012)

2. Estructuras de entrada en alcantarillas. En los barriles de alcantarilla se utilizan una multitud de configuraciones de entrada diferentes, estos incluyen instalaciones tanto prefabricadas como construidas in situ. Las configuraciones de entrada comúnmente utilizadas incluyen extensión del barril de alcantarilla, muros de cabecera de concreto moldeados en el lugar, secciones finales prefabricadas y salida adaptada a la pendiente. El rendimiento hidráulico, la estabilidad estructural, la estética, el control de la erosión y la retención de relleno son consideraciones a la hora de seleccionar varias configuraciones de entrada. (U.S.D.T, 2012)



Figura 7. Estructuras de entrada de alcantarillas

(U.S.D.T, 2012)

La capacidad hidráulica de una alcantarilla se puede mejorar mediante la selección adecuada de la entrada. El canal suele ser más ancho que el barril de la alcantarilla, lo que provoca una contracción en la entrada de la alcantarilla que puede ser el control de flujo principal. La provisión de una transición de flujo más gradual reducirá la pérdida de energía y, por lo tanto, creará una condición de entrada hidráulicamente más eficiente. (U.S.D.T, 2012)

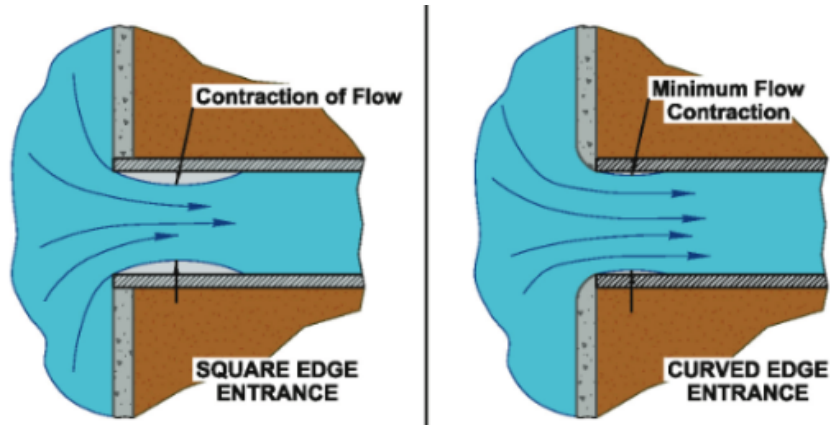


Figura 8. Ejemplo de eficiencia por entrada de la alcantarilla

(U.S.D.T, 2012)

3. Formas de alcantarillas. Las formas de conductos cerrados más comunes son circulares, de caja (rectangulares), elípticas y de arco de tubería. Estas formas típicas de alcantarillas fabricadas tienen el mismo material en todo el perímetro. La selección de la forma se basa en el costo de construcción, la limitación en la elevación de la superficie del agua aguas arriba, la altura del terraplén de la carretera y el rendimiento hidráulico. (U.S.D.T, 2012)

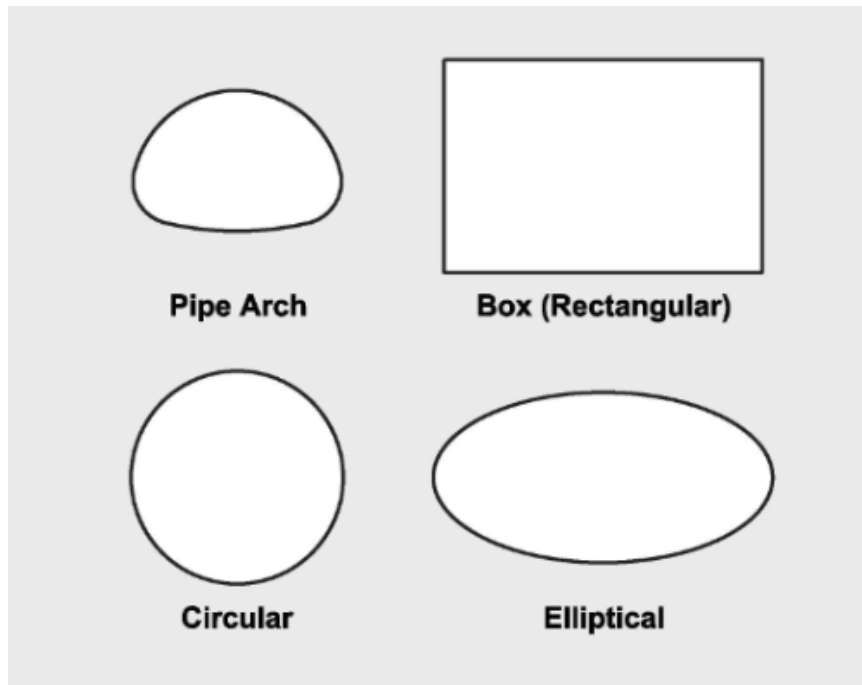


Figura 9. Formas típicas de alcantarillas

(U.S.D.T, 2012)

4. Box Culvert. Las alcantarillas de caja son puentes o estructuras de baja altura que se utilizan para descargar agua en el canal adecuado en el cruce de vías férreas, pasos elevados, carreteras, etcétera, y se utilizan donde la capacidad de carga del suelo es baja. La caja es solo el nombre que se le da por su forma, se puede encontrar en varios tipos de formas y también puede actuar como un puente menor cuando aumenta el número de celdas y abarca más de 6 m de longitud. Su altura depende de la envergadura. Puede controlar toda el agua proveniente del riego, las aguas superficiales, los ríos y los canales, controlan todas las aguas pluviales y las aguas de inundación durante la temporada de lluvias. (Patel, 2019)



Figura 10. Box Culvert de 2 celdas

(Patel, 2019)

5. Comparación de alcantarillas con puentes pequeños. Las alcantarillas, los puentes y los desagües pluviales proporcionan la gestión y el transporte de la escorrentía de aguas pluviales a través de un sistema de carreteras. Para la mayoría de los cruces de carreteras, la elección es entre una alcantarilla y un puente. A veces se requiere un análisis de drenaje pluvial y se analiza al final de esta sección. (U.S.D.T, 2012)

Al comparar alcantarillas con puentes, el diseñador debe determinar qué tipo de estructura es mejor para una ubicación en particular y luego decidir cómo analizar el cruce. Por ejemplo, en muchos aspectos, una alcantarilla de caja grande comienza a parecerse a un pequeño puente de un solo tramo con estribos de pared verticales. (U.S.D.T, 2012)

Las alcantarillas se utilizan:

- Donde los escombros y el potencial de hielo son tolerables.
- Donde sea más económico que un puente (incluyendo barandilla y preocupaciones de seguridad)
- Donde los puentes no son necesarios hidráulicamente.

Los puentes se utilizan:

- Donde las alcantarillas no son prácticas.
- Donde es más económico que una alcantarilla.
- Satisfacer los requisitos de uso y acceso de la tierra.
- Para mitigar las preocupaciones ambientales que no se satisfacen con una alcantarilla.
- Para evitar invasiones de cauces.
- Para acomodar hielo y escombros grandes.

El costo inicial de una alcantarilla suele ser menor que el de un puente, ya que el uso de una mayor cabecera en una instalación de alcantarilla normalmente permite el uso de una abertura más pequeña, en comparación con un puente que normalmente se diseña con franco bordo en la descarga de diseño. Sin embargo, esta ventaja debe equilibrarse con los posibles daños por inundación asociados con el aumento de las aguas principales, especialmente en descargas más altas. (U.S.D.T, 2012)

Los costos de mantenimiento de las alcantarillas pueden resultar de la erosión del canal en la entrada y salida, la sedimentación, la acumulación de hielo y escombros, y la reparación del terraplén en caso de desbordamiento. Sin embargo, el mantenimiento del puente suele ser más costoso, incluyendo aspectos como el mantenimiento del tablero y la superestructura del puente, la erosión alrededor de los pilares y estribos, y la posible acumulación de sedimentos y escombros. (U.S.D.T, 2012)

Según lo establecido en el artículo científico "Comparison of Small Bridges and Box Culverts", el tiempo de construcción de un Box Culvert es 70 % inferior al de un puente (considerando que tienen la misma luz). En términos generales, un box culvert prefabricado puede costar entre un 40 % y un 70 % menos que un puente con las mismas condiciones. Esto significa que si el costo de un puente es de 100 %, el box culvert podría estar en el rango del 30 % al 60 % del costo del puente, dependiendo de las condiciones específicas del proyecto. (Sarsembayeva, 2023)



Figura 11. Comparativa entre box culvert y puente con luz similar
(Sarsembayeva, 2023)

C. Hidráulica de alcantarillas

El diseño hidráulico de una alcantarilla consiste esencialmente en un análisis del rendimiento requerido de la alcantarilla para transportar el flujo de un lado de la carretera (u otro tipo de terraplén, como un ferrocarril) al otro. El diseñador debe seleccionar una frecuencia de inundación de diseño, estimar el caudal de diseño para esa frecuencia y establecer una elevación de cabecera permitida en función de las consideraciones de cabecera e inundación de diseño seleccionadas. El tamaño y el tipo de alcantarilla se pueden seleccionar después de que se haya determinado el caudal de diseño, la pendiente, el caudal de descarga y la velocidad de salida permitida.

El diseño de la alcantarilla debe considerar lo siguiente:

- Impacto de la geometría de la alcantarilla aguas arriba y aguas abajo.
- Alineación y pendiente de la alcantarilla
- Material de la alcantarilla
- Elementos de entrada y salida de la alcantarilla
- Necesidad de medidas para pasos de peces u otros casos especiales.
- Protección contra la abrasión y corrosión.
- Consideraciones estructurales y geotécnicas.

Cuando el flujo de agua en un arroyo o canal se encuentra con una alcantarilla, la reducción en la sección transversal provoca un cambio en la dinámica del flujo. Antes de entrar a la alcantarilla, el flujo se desacelera y la profundidad aumenta debido a la restricción. Esto es conocido como afluencia o retención del agua. (Gribbin, 2014)

Una vez que el flujo entra en la alcantarilla, su velocidad aumenta debido a la reducción en el área de paso, lo que provoca una disminución en la profundidad del agua. Este comportamiento es descrito por la ecuación de continuidad, que indica que el producto del área y la velocidad debe mantenerse constante a lo largo del flujo. (Gribbin, 2014)

Al salir de la alcantarilla, el flujo se expande, lo que puede provocar un nuevo cambio en la velocidad y la profundidad. En general, el patrón típico de flujo en una alcantarilla incluye una desaceleración y aumento de la profundidad antes de la entrada, una aceleración y disminución de la profundidad dentro de la alcantarilla, y posibles ajustes aguas abajo a medida que el flujo se estabiliza nuevamente. (Gribbin, 2014)

1. Hidráulica en canales abiertos - Ecuación de Manning. El flujo en canales abiertos ocurre cuando los líquidos fluyen bajo la influencia de la gravedad y están solo parcialmente rodeados por un contorno sólido. Este tipo de flujo se caracteriza por una superficie libre, sometida únicamente a la presión atmosférica y al peso del líquido. Los canales abiertos se encuentran tanto en la naturaleza (ríos, arroyos) con secciones irregulares, como en estructuras artificiales (canales y acequias) con secciones regulares, como rectangulares, triangulares o trapezoidales. Además, los conductos cerrados, como tuberías, pueden presentar flujo de canal abierto cuando no están completamente llenos. Por ejemplo, los sistemas de alcantarillado suelen diseñarse para flujo de canal abierto. (Cadavid, 2009)

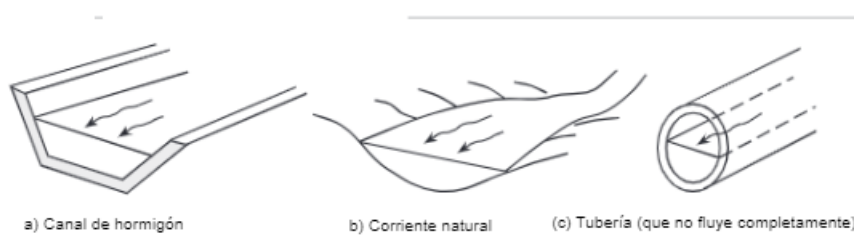


Figura 12. Canales abiertos

(Cadavid, 2009)

La ecuación de Manning es una fórmula empírica utilizada para calcular la velocidad o el caudal en canales abiertos y se expresa de la siguiente forma (considerando unidades del sistema internacional):

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} * S_o^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (7)$$

Donde:

- R = Radio hidráulico
- S_o = Pendiente del canal
- n = Factor de rugosidad

$$Q = \frac{a * R^{\frac{2}{3}} * S_o^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (8)$$

Donde:

- a = Área de sección transversal
- R = Radio hidráulico
- S_o = Pendiente del canal
- n = Factor de rugosidad

2. Componentes hidráulicos del flujo de una alcantarilla. Las alcantarillas cuentan con diversos componentes hidráulicos dependiendo de si su salida esta sumergida o no, estos se presentan a continuación:

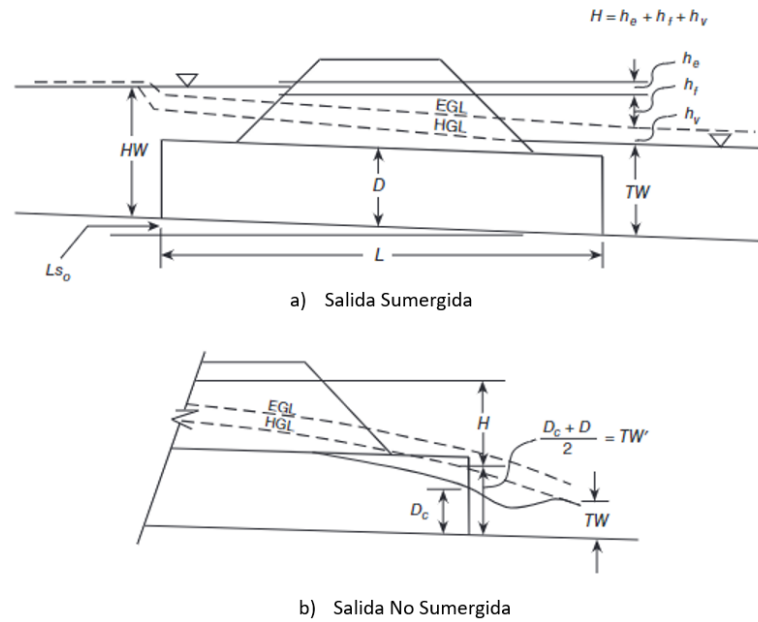


Figura 13. Componentes hidráulicos de una alcantarilla

(Gribbin, 2014)

Donde:

- TW' = Línea de referencia hidráulica en la salida no sumergida
- D_c = Profundidad crítica
- Ls_o = Diferencia de altura desde la entrada hasta la salida de la alcantarilla
- HW = Profundidad aguas arriba
- TW = Profundidad aguas abajo
- L = Largo de la alcantarilla
- H = Carga total
- h_e = Pérdida de entrada
- h_f = Pérdida por fricción
- h_v = Carga de velocidad
- EGL = Línea de gradiente energético
- HGL = Línea de gradiente hidráulico

En el análisis hidráulico de alcantarillas, la profundidad aguas arriba juega un papel crucial, ya que determina la energía potencial disponible para que el agua fluya a través de la estructura. Este parámetro refleja directamente la capacidad de la alcantarilla para evacuar un caudal determinado, siendo su valor afectado por la interacción entre las características geométricas de la estructura y las condiciones del flujo. (Gribbin, 2014)

Por otro lado, la profundidad aguas abajo es determinada por el flujo en el cuerpo de agua receptor, influyendo en la dinámica general del sistema. La diferencia entre estas dos profundidades es clave para identificar el régimen de flujo y para distinguir si el flujo es subcrítico o supercrítico. (Gribbin, 2014)

Además, se deben considerar las condiciones de control del flujo. Si la restricción principal ocurre en la entrada de la alcantarilla, se clasifica como flujo controlado por la entrada, mientras que si la limitación se presenta en la salida, se define como flujo controlado por la salida. Estos dos tipos de control determinan cómo la alcantarilla influye en la distribución de las velocidades y profundidades del agua que la atraviesa. (Gribbin, 2014)

En alcantarillas con múltiples tubos o barriles, el caudal total se distribuye entre ellos, y se pueden analizar bajo la premisa de que cada tubo maneja una porción proporcional del flujo. Esto simplifica el análisis al tratar cada tubo individualmente, lo cual es relevante en estudios experimentales donde se requiere modelar el comportamiento de la estructura en condiciones diversas. (Gribbin, 2014)

3. Condiciones de flujo. La determinación del régimen de flujo apropiado se logra evaluando el número adimensional, F , llamado número de Froude:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * y}} \quad (9)$$

Donde:

- V = Velocidad del flujo
- g = Gravedad
- y = Profundidad hidráulica

El número de Froude indica:

- Cuando $Fr > 1,0$, el flujo es supercrítico y se caracteriza como rápido
- Cuando $Fr < 1,0$, el flujo es subcrítico y se caracteriza como tranquilo.
- Si $Fr = 1,0$, el flujo se define como crítico.

| TIPO DE CANAL Y DESCRIPCIÓN | MINIMO | NORMAL | MÁXIMO |
|--|--------|--------|--------|
| Conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos | | | |
| Metal | | | |
| Acero | | | |
| Estriado soldado | 0.010 | 0.012 | 0.014 |
| Ribeteado y en espiral | 0.013 | 0.016 | 0.017 |
| Hierro fundido | | | |
| Recubierto | 0.010 | 0.013 | 0.014 |
| No recubierto | 0.011 | 0.014 | 0.016 |
| Hierro forjado | | | |
| Negro | 0.012 | 0.014 | 0.015 |
| Galvanizado | 0.013 | 0.016 | 0.017 |
| Metal corrugado | | | |
| Subdrenaje | 0.017 | 0.019 | 0.021 |
| Drenaje de aguas lluvias | 0.021 | 0.024 | 0.030 |
| No metal | | | |
| Cemento | | | |
| Superficie pulida | 0.010 | 0.011 | 0.013 |
| Mortero | 0.011 | 0.013 | 0.015 |
| Concreto | | | |
| Alcantarilla recta y libre de basuras | 0.010 | 0.011 | 0.013 |
| Alcantarilla con curvas, conexiones y algo de basuras | 0.011 | 0.013 | 0.014 |
| Bien terminado | 0.011 | 0.012 | 0.014 |
| Alcantarillas de aguas residuales | 0.013 | 0.015 | 0.017 |

Figura 14. Coeficientes n de Manning

(COMITRAN, 2016)

4. Tipos de flujo en alcantarillas.

- Caudal Tipo A = ocurre cuando la sección transversal de la alcantarilla coincide con los canales aguas arriba y aguas abajo y la alcantarilla actúa como un canal abierto. El perfil de la superficie del agua no cambia a través de la alcantarilla, y la profundidad del agua de cola es igual a la profundidad de la cabecera. Generalmente se puede ver durante condiciones de flujo bajo, pero rara vez durante condiciones de inundación.(Gribbin, 2014)
- Caudal Tipo B = ocurre cuando la profundidad de la cabecera se eleva por encima de la corona de entrada, la profundidad del agua de cola es relativamente baja y el barril de la alcantarilla es relativamente corto. La entrada se sumerge y la alcantarilla actúa como un orificio. Las alcantarillas con flujo tipo B generalmente operan en control de entrada.(Gribbin, 2014)
- Caudal Tipo C = ocurre cuando las condiciones son similares al flujo de tipo B, pero la alcantarilla es relativamente larga o restrictiva para el flujo. El flujo Tipo C no sumerge la entrada, sino que cae en la alcantarilla justo aguas arriba, creando así un efecto similar a un vertedero. Las alcantarillas con flujo tipo C generalmente operan en control de salida.(Gribbin, 2014)
- Caudal Tipo D = ocurre cuando el agua de cola está por encima de la corona de la alcantarilla y el agua de cola es relativamente alta. En este caso, la alcantarilla actúa como una tubería que fluye a pleno rendimiento y el control está en la salida.(Gribbin, 2014)

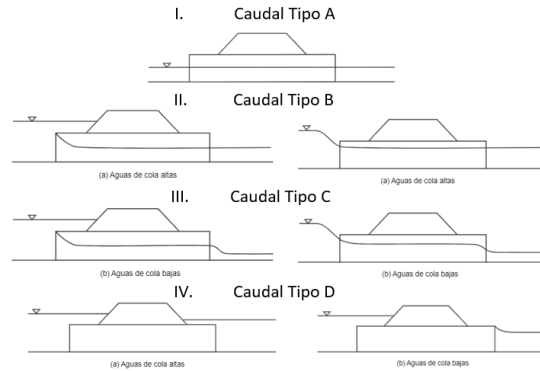


Figura 15. Tipos de flujos en alcantarillas

(Gribbin, 2014)

5. Control por entrada. El control de entrada ocurre cuando es más difícil que el flujo del arroyo pase a través de la entrada de la alcantarilla que fluir a través del resto de la alcantarilla y nuevamente hacia el arroyo. Los factores críticos en el control de entrada son el área de la sección transversal de la entrada y la geometría de la entrada. (Cadavid, 2009)

Para calcular la profundidad de cabecera de una alcantarilla que opera bajo control de entrada, solo se debe tener en cuenta el caudal Q y el tamaño y la forma de la entrada. Todos los demás factores, como la longitud del cañón, la rugosidad, la pendiente y la profundidad del agua de cola, no son importantes. (Cadavid, 2009)

Existen gráficos de diseño se utilizan para determinar el HW con el fin de evitar las matemáticas difíciles involucradas. Para usar los gráficos, debe conocer el flujo de la corriente (también llamada descarga), el tamaño y la forma de la sección transversal de entrada de la alcantarilla y la geometría del extremo de entrada del barril de la misma. (Cadavid, 2009)

A pesar de que parece insignificante, la geometría de entrada tiene un efecto significativo en la capacidad de las alcantarillas que operan bajo control de entrada. La facilidad con la que el agua puede fluir más allá del borde de entrada y hacia la tubería determina la pérdida de carga de entrada. Cuanto menor sea la pérdida de entrada, mayor será la capacidad total. (Cadavid, 2009)

La sección de control de una alcantarilla que opera bajo control de entrada está ubicada justo dentro de la entrada. La profundidad crítica ocurre en o cerca de esta ubicación, y el régimen de flujo inmediatamente aguas abajo es supercrítico. (Cadavid, 2009)

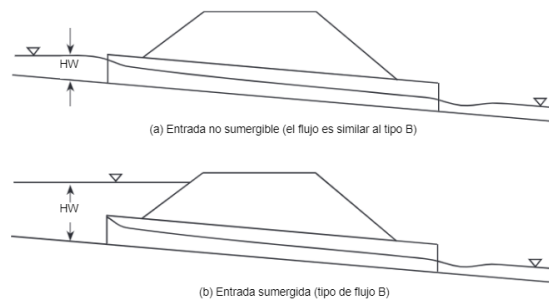


Figura 16. Ejemplo de alcantarillas bajo control de entrada

(Gribbin, 2014)

6. Control por salida. La realización de cálculos relacionados con el control de salidas es un procedimiento diferente y más complejo. El control de salida ocurre cuando es más difícil para el flujo del arroyo sortear la longitud de la alcantarilla que pasar por la entrada en primer lugar. Para calcular la profundidad de la cabecera, se deben conocer el tamaño, la forma, la pendiente y la rugosidad del barril, así como la profundidad del agua de cola. (Cadavid, 2009)

La sección de control para el flujo de control de salida en una alcantarilla está ubicada en la salida del barril o más abajo. En estas condiciones existe flujo subcrítico o de presión en el barril de la alcantarilla. (Cadavid, 2009)

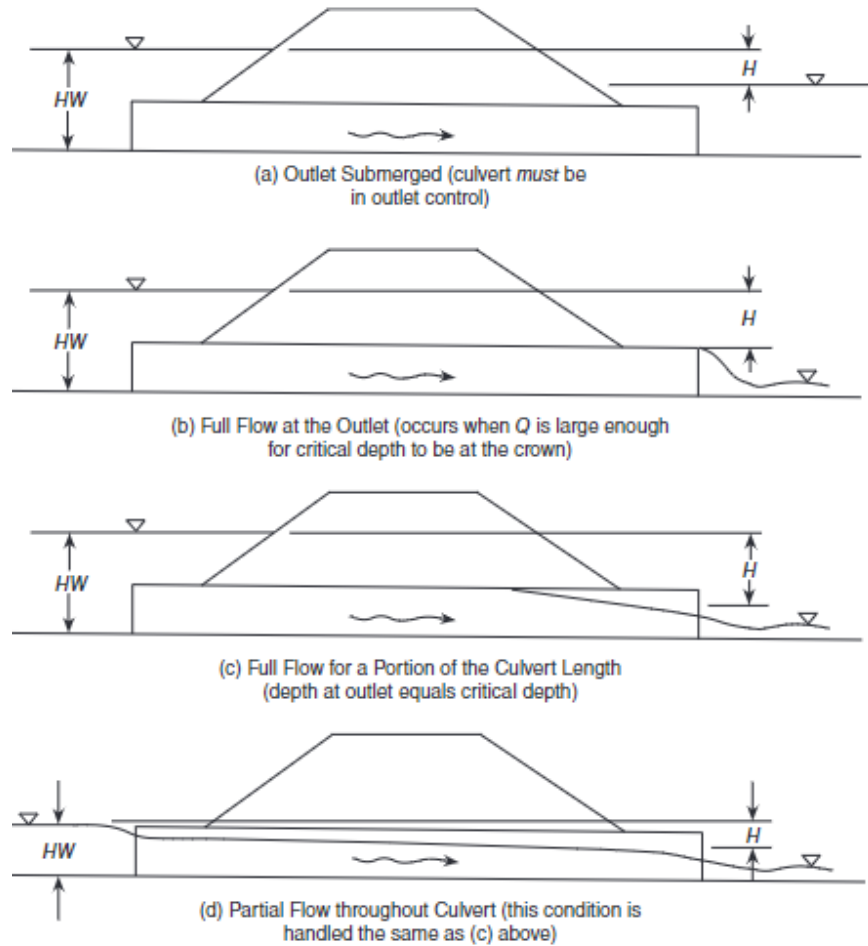


Figura 17. Ejemplo de alcantarillas bajo control de salida

(Gribbin, 2014)

7. Consideraciones a evaluar en alcantarillas.

- Se recomienda que el tirante máximo de la alcantarilla no sobre pase los $2/3$ del diámetro de la alcantarilla, pero este valor puede variar según las especificaciones de cada país, los cuales en la región varía entre $0.8d$ y $0.9d$, donde d es el diámetro de la alcantarilla. (COMITRAN, 2016)
- Verificar que la velocidad del flujo se encuentre dentro ciertos límites debido a que se pueden originar afectaciones en la estructura. (COMITRAN, 2016)

| TIPO DE REVESTIMIENTO | VELOCIDAD (m/s) |
|----------------------------------|-----------------|
| Concreto | 3.0 – 6.0 |
| Ladrillo con concreto | 2.5 – 3.5 |
| Mampostería de piedra y concreto | 2.0 |

Figura 18. Velocidades máximas admisibles de entrada

(COMITRAN, 2016)

- Se deberá verificar que la velocidad mínima del flujo dentro del conducto no produzca sedimentación que pueda incidir en una reducción de su capacidad hidráulica, recomendándose que la velocidad mínima dependerá del tipo de material de la alcantarilla y para evitar efectos de sedimentación se recomienda un valor mínimo de 0.5 m/s. (COMITRAN, 2016)
- Se debe tener muy en cuenta la velocidad de flujo a la salida de la alcantarilla, generalmente esta velocidad es mayor que la velocidad de escurrimiento en el cauce natural y debe limitarse a fin de evitar procesos de socavación aguas abajo de la estructura, y no afecte su estabilidad. (COMITRAN, 2016)

| TIPO DE TERRENO | FLUJO INTERMITENTE | FLUJO PERMANENTE |
|--|--------------------|------------------|
| | (m/s) | (m/s) |
| Arena fina (no coloidal) | 0.75 | 0.75 |
| Arcilla arenosa (no coloidal) | 0.75 | 0.75 |
| Arcilla limosa (no coloidal) | 0.9 | 0.9 |
| Arcilla fina | 1.0 | 1.0 |
| Ceniza volcánica | 1.2 | 1.0 |
| Grava fina | 1.5 | 1.2 |
| Arcilla dura (coloidal) | 1.8 | 1.4 |
| Material graduado (no coloidal) | | |
| Desde arcilla a grava | 2.0 | 1.5 |
| Desde limo a grava | 2.1 | 1.7 |
| Grava | 2.3 | 1.8 |
| Grava gruesa | 2.4 | 2.0 |
| Desde grava a piedras (<15 cm) | 2.7 | 2.1 |
| Desde grava a piedras (> 20 cm) | 3.0 | 2.4 |

Figura 19. Velocidades máximas admisibles de salida

(COMITRAN, 2016)

D. Análisis dimensional y semejanza hidráulica

El análisis dimensional y la semejanza hidráulica son herramientas fundamentales en la ingeniería hidráulica para estudiar y predecir el comportamiento de sistemas complejos, como canales abiertos, tuberías y estructuras de control de flujo, a través de modelos a escala en laboratorio o mediante simulaciones numéricas. Estos principios permiten extrapolar los resultados obtenidos en modelos reducidos a condiciones a escala real, manteniendo la precisión y relevancia de los experimentos. (Giles, 2018)

En general, todas las relaciones físicas pueden reducirse a una relación entre las magnitudes fundamentales, fuerza F, longitud L y tiempo T (o bien la masa M, longitud L y tiempo T). Los modelos hidráulicos, en general, pueden ser o bien modelos verdaderos o modelos distorsionados. Los modelos verdaderos tienen todas las características significativas del prototipo reproducidas a escala (semejanza geométrica) y satisfacen todas las restricciones de diseño (semejanza cinemática y dinámica) (Giles, 2018)

E. Semejanza geométrica

Entre el modelo y el prototipo existe semejanza geométrica cuando las relaciones entre todas las dimensiones correspondientes u homologas en modelo y prototipo son iguales. (Cengel, 2006)

La escala de geometría está definida como:

$$(\lambda_L) = \frac{L_m}{L_p} \quad (10)$$

Donde:

- L_m = Longitud del modelo (Laboratorio)

- L_p = Longitud del prototipo (Realidad)

- λ_L = Escala geométrica

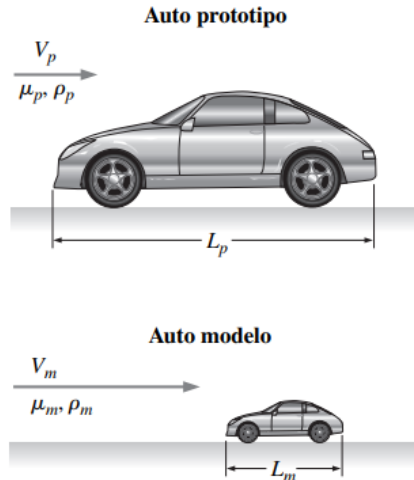


Figura 20. Similitud geométrica entre un prototipo y un modelo

(Cengel, 2006)

F. Semejanza cinemática

Entre modelo y prototipo existe semejanza cinemática si:

- Las trayectorias de las partículas móviles homologas son geoméricamente semejantes. (Cengel, 2006)
- Las relaciones entre las velocidades de las partículas homologas son iguales. (Cengel, 2006)

La escala de velocidad está definida como:

$$(\lambda_V) = \frac{V_m}{V_p} = \frac{\frac{L_m}{T_m}}{\frac{L_p}{T_p}} = \frac{L_m * T_p}{L_p * T_m} = \frac{\lambda_L}{\lambda_T} \quad (11)$$

Donde:

- V_m = Velocidad del modelo (Laboratorio)
- V_p = Velocidad del prototipo (Realidad)
- λ_L = Escala geométrica
- λ_T = Escala de tiempo

La similitud geométrica es un requisito para la similitud cinemática. (Cengel, 2006)

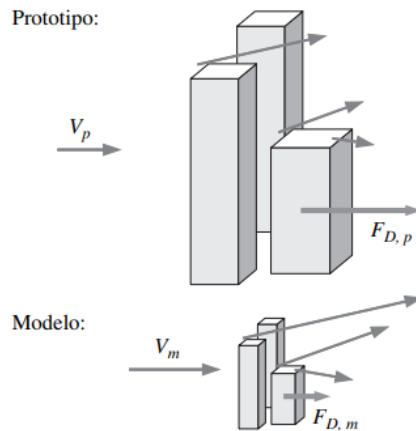


Figura 21. Similitud cinemática entre un prototipo y un modelo

(Cengel, 2006)

G. Semejanza dinámica

Entre dos sistemas semejantes geométrica y cinemáticamente existe semejanza dinámica si las relaciones entre las fuerzas homologas en modelo y prototipo son las mismas. (Cengel, 2006)

La similitud cinemática es una condición necesaria pero insuficiente para similitud dinámica. Por lo tanto, es posible para un flujo de modelo y un flujo de prototipo lograr tanto similitud geométrica como cinemática, pero no similitud dinámica. Para garantizar similitud completa deben existir las tres condiciones de similitud. (Cengel, 2006)

H. Similitud de Froude

Existen diversos métodos para determinar factores de escalamiento como lo puede ser el teorema de Buckingham o la similitud de Reynolds. En este estudio se utilizará la similitud de Froude como base para determinar los factores de escalamiento correspondientes. (Vergara, 2010)

La similitud de Froude es un concepto fundamental en la ingeniería hidráulica y en la dinámica de fluidos, utilizado principalmente en el análisis de modelos a escala. Está relacionado con la ley de semejanza dinámica y es esencial cuando se estudia el comportamiento de fluidos en estructuras o dispositivos, como canales, presas o embarcaciones, para asegurar que un modelo a escala representa correctamente el comportamiento del sistema real. (Vergara, 2010)

La similitud de Froude se refiere a la condición en la que el número de Froude es igual tanto en el modelo a escala como en el sistema real. El número de Froude es un número adimensional que relaciona la fuerza inercial con la fuerza gravitatoria en el flujo de un fluido. Ver ecuación no.9. (Vergara, 2010)

$$Fr_m = Fr_p \quad (12)$$

Donde:

- Fr_m = Número de Froude modelo
- Fr_p = Número de Froude prototipo

Aplicaciones:

- Canales abiertos: donde el flujo está dominado por la gravedad.
- Presas y vertederos: en los cuales las fuerzas gravitacionales y la interacción con el flujo son clave.
- Modelos a escala de barcos: para estudiar las olas generadas por los barcos y su resistencia al avance.

(Vergara, 2010)

I. Tipos de modelos

El modelo de un río, canal, puerto, laguna, etc., puede construirse con fronteras fijas o móviles, más comúnmente llamados: modelos de fondo fijo o modelos de fondo móvil, respectivamente. (Vergara, 2010)

Los modelos de fondo fijo se emplean para reproducir fenómenos en donde la variación de niveles y las velocidades del flujo son parámetros determinantes. Este es el caso de proyectos de control de avenidas, de navegación y de irrigación. Los modelos de fondo móvil se emplean para estudiar los problemas relacionados con la estabilización de cauces de ríos o canales y playas. Por este motivo es importante reproducir las variables del flujo combinadas con las del sedimento y la mecánica del transporte. (Vergara, 2010)

Cuando en un modelo hidráulico las escalas de magnitudes lineales horizontales, verticales e inclinadas son iguales, se dice que el modelo es similarmente geométrico; mientras que, cuando existen por lo menos dos escalas de líneas diferentes, por ejemplo, una para longitudes horizontales y otra para longitudes verticales, el modelo será distorsionado, denominándose a la relación como distorsión geométrica. (Vergara, 2010)

Esta distorsión implica, a su vez, otras distorsiones; por ejemplo, que la escala de aceleraciones locales, o convectivas, del flujo en la dirección horizontal y vertical, sea diferente a la escala de aceleraciones debidas a la gravedad. (Vergara, 2010)

Las causas que ocasionan la distorsión son diferentes, siendo entre otras:

- 1) Rugosidad: Cuando la rugosidad necesaria a representar es tan pequeña que físicamente es imposible de conseguirla.
- 2) Flujo Cuando el tipo de flujo en el modelo no corresponda al prototipo.
- 3) Por razones de espacio: cuando el modelo resulte muy grande con respecto a la superficie disponible, lo que significa aumentar (indirectamente) la escala de líneas, ya que a su vez implica reducir la escala de las magnitudes verticales, haciendo más fuerte la influencia de otros fenómenos, como es el caso de la tensión superficial que en el prototipo no es de consideración.

(Vergara, 2010)



Figura 22. Modelo de puerto El Ostión, Veracruz

(Vergara, 2010)

J. Selección de escalas

Generalmente la selección de escalas lineales, tanto horizontales y verticales, se hace en forma independiente, buscando siempre que el modelo resulte lo más grande posible, siempre y cuando lo permitan el presupuesto, el espacio, el tiempo, la instrumentación, las rugosidades a reproducir así como la alimentación de agua.

En la selección de escalas es recomendable tomar en consideración que, durante la operación del modelo, el efecto de escala sea lo más reducido posible.

| MODELOS DE | ESCALAS LINEALES |
|---|---|
| 1. OBRAS HIDRÁULICAS | |
| 1.1 Vertederos, tanques, amortiguadores, rápidos y túneles. | 1:20 a 1:70 |
| 1.2 Cámaras de bombeo y compuertas. | 1:15 a 1:40 |
| 1.3 Conductos cerrados con flujo a superficie libre. | 1:10 a 1:25 |
| 1.4 Flujo alrededor de estructuras. | 1:10 a 1:25 |
| 2. PENETRACIÓN DE OLEAJE (AGITACIÓN) | |
| 2.1 Con olas de corto periodo (Oleaje). | 1:60 a 1:200 |
| 2.2 Con olas de periodo intermedio y largo. | 1:100 (escala recomendada) de 1:50 a 1:100 |
| 3. ESTABILIDAD DE ESTRUCTURAS BAJO LA ACCIÓN DE OLAS | |
| 3.1 A dos dimensiones. | 1:20 a 1:60 |
| 3.2 A tres dimensiones. | 1:40 a 1:80 |
| 4. MANIOBRAS DE EMBARCACIONES | |
| 4.1 Atracadas y libres (maniobrabilidad). | 1:100 a 1:150 |
| 5. TRANSPORTE LITORAL | 1:60 a 1:50 |
| 6. EROSIÓN LOCAL POR OLEAJE | 1:100 a 1:80 |
| 7. FLUJO EN RÍOS Y CANALES | E _x de 1:250 a 1:1000 y E _y de 1:50 a 1:100 |
| 8. EROSIÓN LOCAL POR CORRIENTES | 1:200 a 1:60 |
| 9. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN RÍOS | E _x de 1:100 a 1:500 y E _y de 1:50 a 1:100 |
| 10. ESTUARIOS | E _x de 1:200 a 1:2000 y E _y de 1:50 a 1:100 |

Figura 23. Escalas lineales comunes en modelos hidráulicos

(Vergara, 2010)

K. Software de simulación hidráulica

El software de simulación hidráulica ha emergido como una herramienta imprescindible en la ingeniería civil y ambiental para la planificación, diseño y análisis de sistemas relacionados con el flujo de agua. A través de estas plataformas, los profesionales pueden recrear de manera virtual el comportamiento del agua en distintos entornos y bajo diversas condiciones, lo que permite prever cómo reaccionarán las infraestructuras hidráulicas en situaciones reales. Estas simulaciones proporcionan una visión detallada de los flujos en canales, ríos, embalses, sistemas de alcantarillado y redes de distribución, entre otros. (Silva, 2020)

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una técnica empleada para analizar el comportamiento de los fluidos en diversas aplicaciones. A través de simulaciones, permite calcular variables como la velocidad, presión y temperatura de un fluido en movimiento. Este proceso se basa en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el flujo de fluidos newtonianos, mediante el método numérico de volúmenes finitos. El CFD integra conocimientos en computación, mecánica de fluidos y cálculo numérico, lo que permite estudiar y resolver problemas complejos de flujo. (Ayres, 2024)

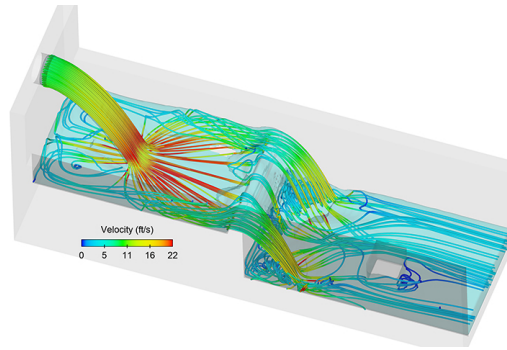


Figura 24. Simulación del comportamiento de un fluido en un vertedero utilizando CFD (Ayes, 2024)

1. Aplicaciones en la ingeniería. La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) tiene un amplio rango de aplicaciones en la ingeniería, abarcando diversos sectores donde el comportamiento de los fluidos es crítico. Gracias a su capacidad para simular flujos complejos en entornos controlados, el CFD permite a los ingenieros estudiar fenómenos difíciles de observar de otra manera y optimizar el diseño de sistemas. A continuación, se describen algunas de las principales aplicaciones del CFD en ingeniería:

- Ingeniería aeroespacial: El CFD es utilizado para modelar el flujo de aire alrededor de aviones y cohetes, permitiendo optimizar la aerodinámica de las aeronaves.
- Ingeniería automotriz: En la industria automotriz, el CFD se emplea para mejorar el rendimiento aerodinámico de los vehículos, optimizar el enfriamiento de los motores, y diseñar sistemas de escape eficientes.
- Ingeniería civil e hidráulica: El CFD se aplica para analizar el comportamiento del agua en sistemas de alcantarillado, presas, canales y redes de distribución de agua potable. También se utiliza en estudios de inundaciones y en la gestión de cuencas hidrográficas, ayudando a predecir y mitigar desastres naturales.
- Industria energética: En el sector de la energía, el CFD juega un papel crucial en el diseño de turbinas eólicas, generadores hidroeléctricos y sistemas de combustión. Ayuda a optimizar el flujo de aire y agua en estos dispositivos, mejorando la eficiencia de generación de energía.
- Procesos industriales El CFD: se usa ampliamente en el diseño y optimización de procesos industriales, como la mezcla de fluidos, la ventilación de espacios industriales, y la transferencia de calor en hornos y reactores químicos.
- Industria médica: En el campo de la medicina, el CFD se ha convertido en una herramienta clave para simular el flujo de fluidos en el cuerpo humano, como la sangre en arterias o el aire en los pulmones.
- Ingeniería naval: El CFD es empleado para mejorar el diseño de barcos y submarinos, analizando la interacción del casco con el agua para minimizar la resistencia y maximizar la eficiencia energética. También se usa para optimizar las hélices y sistemas de propulsión.

(Fluent, 2023)

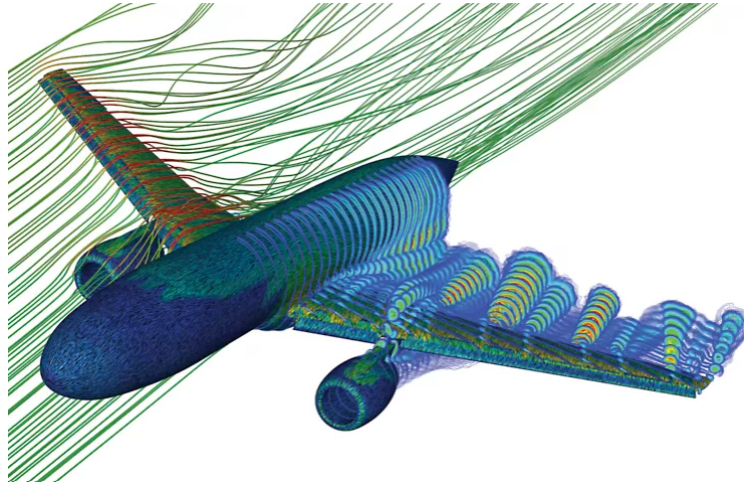


Figura 25. Simulación de la aerodinámica de un avión comercial utilizando CFD (Fluent, 2023)

2. OpenFOAM. OpenFOAM es un software de código abierto y gratuito para simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD), desarrollado desde 2004 por OpenCFD Ltd. Se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en diversas disciplinas de la ingeniería y la ciencia, tanto en instituciones académicas como comerciales. Este software es capaz de resolver problemas complejos que involucran flujos de fluidos con reacciones químicas, turbulencia, transferencia de calor, así como también problemas relacionados con acústica, mecánica de sólidos y electromagnetismo. (OpenFOAM, 2024)

Una de las características más destacadas de OpenFOAM es su flexibilidad para personalizar y adaptar el código a las necesidades específicas de los usuarios, lo que lo convierte en una herramienta ideal para proyectos de investigación avanzada. (OpenFOAM, 2024)

3. SimFlow. SimFlow es un software de simulación CFD de propósito general que utiliza las bibliotecas de código abierto de OpenFOAM, pero a la vez ofrece una interfaz gráfica de usuario (GUI) intuitiva y amigable, lo que lo convierte en una herramienta CFD comercial accesible. (SimFlow, 2024)

Con SimFlow, los usuarios pueden:

- Importar geometrías
- Crear e importar mallas
- Definir condiciones de contorno
- Parametrizar el caso
- Ejecutar simulaciones
- Computar en paralelo con un solo clic
- Postprocesar resultados utilizando ParaView

Como software integral para análisis CFD, SimFlow incluye funcionalidades que permiten abordar fenómenos como:

- Flujos de fluidos compresibles e incompresibles
- Flujos turbulentos
- Transferencia de calor, incluyendo transferencia de calor conjugada (CHT)
- Flujos multifásicos
- Cavitación
- Reacciones químicas

Estas simulaciones pueden realizarse tanto en marcos de referencia estacionarios como rotativos, o utilizando mallas dinámicas. Además, si es necesario, también es posible modelar materiales sólidos como medios porosos. Esto hace de SimFlow una herramienta versátil para una amplia gama de aplicaciones en ingeniería y ciencia. (SimFlow, 2024)

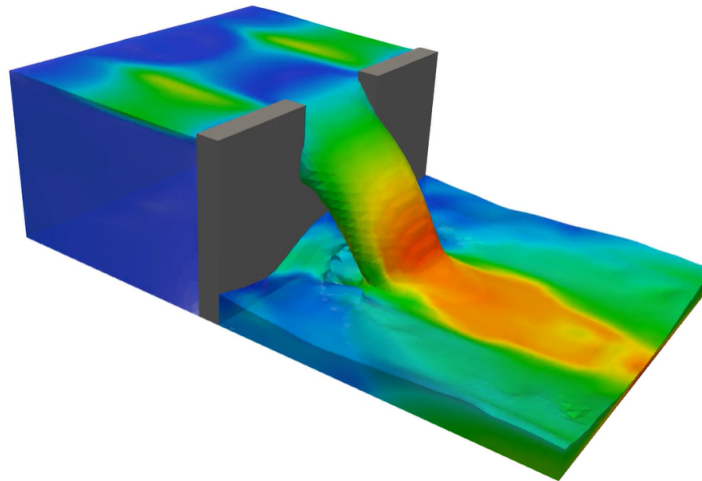


Figura 26. Simulación de un fluido en SimFlow, por medio de OpenFOAM (SimFlow, 2024)

4. Mallado y geometría. La geometría se refiere a la representación tridimensional del dominio o el espacio donde se llevará a cabo la simulación del fluido. Este dominio puede ser el interior de una tubería, el contorno de un ala de avión, un tanque de almacenamiento, o cualquier superficie o volumen de interés en una simulación CFD. (SimFlow, 2024)

El mallado o mesh es el proceso de subdividir la geometría en pequeñas celdas o volúmenes discretos, conocidos como elementos del mallado. Estos elementos son fundamentales porque los cálculos de CFD se realizan en cada uno de ellos, resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes o cualquier otra ecuación de flujo para cada celda. Entre mayor sea el mallado, mayor será la precisión pero también mayor será el tiempo de espera para que la simulación esté lista. (SimFlow, 2024)

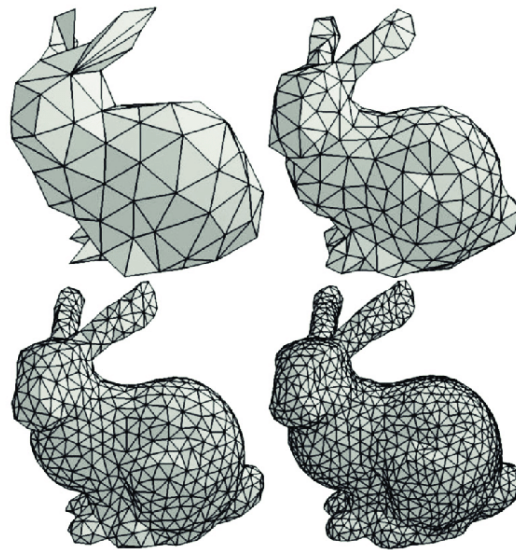


Figura 27. Diferencia entre aumento de unidades de mallado

(Joncic, 2020)

5. Condiciones de borde. Las ecuaciones que gobiernan el movimiento del flujo de fluidos se clasifican como problemas de valor inicial en la frontera, lo que significa que se debe conocer la solución tanto en el tiempo inicial como en los límites del dominio para poder encontrarla. Este problema se resuelve asumiendo valores en las fronteras (condiciones de borde) y en el tiempo inicial (condiciones iniciales), y usando estos valores asumidos para resolver las ecuaciones diferenciales parciales dentro del dominio. Esto implica que la solución del problema está definida principalmente por las condiciones asumidas en las fronteras, lo que hace que sea esencial que estas condiciones sean aproximaciones precisas. (SimFlow, 2024)

Existen variedad de condiciones de borde, estas son unas de las más utilizadas:

- **fixedValue:** Establece un valor fijo para la variable en el borde, que no cambia con el tiempo.
- **zeroGradient:** Establece que el gradiente normal de la variable en el borde sea cero.
- **noSlip:** Define que la velocidad del fluido en el borde es cero, típica en superficies sólidas.
- **slip:** Permite que el fluido se deslice a lo largo de la frontera sin resistencia, eliminando el componente normal de la velocidad.

- inletOutlet: Utilizada en fronteras de flujo, donde se impone una condición de entrada/salida dependiendo de la dirección del flujo.
- calculated: La condición de borde se calcula en función de otras variables o condiciones.
- pressureInletOutletVelocity: Define condiciones para el campo de velocidad en función de las condiciones de presión en límites de entrada o salida.
- totalPressure: Establece una condición de presión total, útil en entradas o superficies con condiciones de flujo controlado.
- fixedFluxPressure: Establece una condición de presión en la que se mantiene constante el flujo a través de la superficie.
- timeVaryingMappedFixedValue: Define un valor de condición de borde que varía con el tiempo y se mapea desde un archivo o una simulación previa.

(SimFlow, 2024)

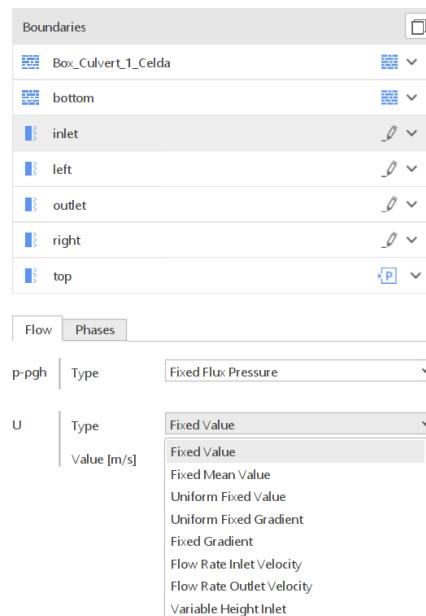


Figura 28. Menú de condiciones de borde en SimFlow

(Elaboración propia)

6. Resultados. En SimFlow y OpenFoam, se pueden obtener diversos resultados que ayudan a evaluar y analizar el comportamiento de los fluidos en la simulación. A continuación se explican algunos de los resultados más comunes y de interés que se pueden obtener:

- Presión: la presión es uno de los resultados fundamentales en cualquier simulación de dinámica de fluidos. Indica la cantidad de fuerza que el fluido ejerce por unidad de área sobre las superficies y el entorno. En SimFlow, se puede visualizar el campo de presión en diferentes regiones del dominio, lo cual es clave para estudiar fenómenos como la cavitación, pérdidas de energía, y distribución de carga hidráulica en sistemas hidráulicos y estructurales. (OpenFOAM, 2024)

- Cabeza hidráulica total: es la suma de las energías potencial, cinética y de presión en un sistema de flujo. Este parámetro es crucial en el análisis de flujos abiertos y presurizados, ya que permite evaluar la conservación de energía en sistemas hidráulicos y estudiar el comportamiento del flujo bajo diferentes condiciones de contorno, como variaciones en la presión o cambios en la geometría del sistema. (OpenFOAM, 2024)
- Velocidad: la velocidad se puede representar como un campo vectorial, lo que significa que para cada punto en el dominio, se puede visualizar tanto la magnitud como la dirección de la velocidad del fluido. Este resultado es fundamental para analizar cómo se mueve el fluido dentro del dominio y para detectar fenómenos como:
 - Flujos rápidos o lentos.
 - Zonas de recirculación o estancamiento.
 - Cizallamiento en las fronteras.
 - Transiciones de flujo laminar a turbulento

(OpenFOAM, 2024)

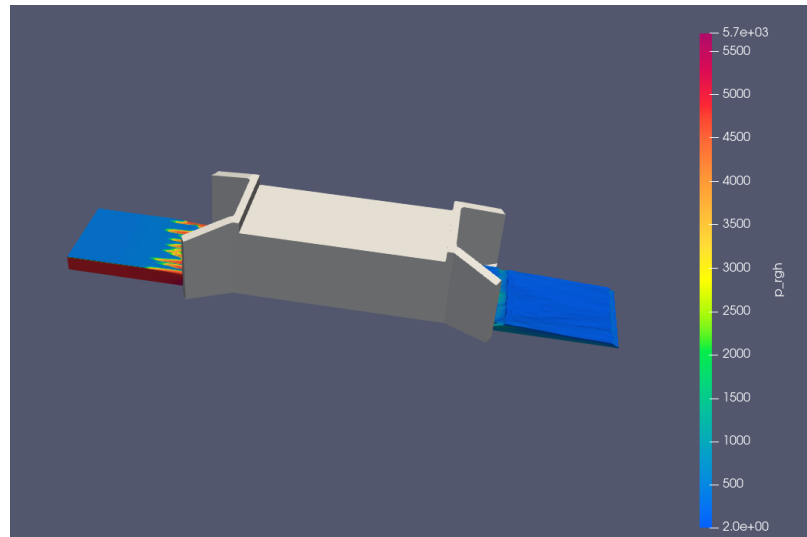


Figura 29. Presión medida en una simulación de SimFlow

(Elaboración propia)

L. Equipo de laboratorio para pruebas hidráulicas

Las pruebas hidráulicas en laboratorio son esenciales para el estudio y análisis del comportamiento del agua en diversas aplicaciones de ingeniería, tales como el diseño de canales, presas, alcantarillas, y otras infraestructuras hidráulicas. Mediante la simulación controlada de flujos, es posible obtener datos precisos que permiten entender mejor fenómenos como la turbulencia, la erosión, la distribución de velocidad y la presión ejercida por el agua sobre diferentes estructuras. (Gunt, 2023)

Para llevar a cabo estas pruebas con precisión, se requiere una variedad de equipos especializados que permiten replicar condiciones reales a escala reducida, lo que facilita la evaluación del desempeño de las estructuras y su adaptación a diferentes escenarios de operación. En este caso, solo se enfocará en el equipo utilizado para esta investigación. (Gunt, 2023)

1. Equipo Gunt HM 165. El equipo HM 165 permite estudiar los flujos de infiltración y subterráneos que ocurren tras las precipitaciones. Gracias a la variabilidad en la densidad y las superficies de precipitación, así como a las diversas opciones para la alimentación y el drenaje del agua subterránea, es posible llevar a cabo una amplia gama de experimentos. (Gunt, 2023)

El equipo cuenta con un circuito cerrado de agua que incluye un depósito de reserva y una bomba. Su componente principal es un depósito de ensayo de acero inoxidable, el cual está lleno de arena y permite ajustar la inclinación. Dispone de un sistema de precipitación para simular lluvias, compuesto por dos grupos de cuatro toberas cada uno. El agua puede ingresar (como agua subterránea) o salir (como drenaje) a través de dos cámaras laterales, que están separadas del depósito por tamices. Además, el equipo cuenta con dos pozos con tubos ranurados para estudiar el descenso del nivel freático. (Gunt, 2023)

Las conexiones de agua y drenaje son ajustables, permitiendo una variedad de condiciones de prueba. En la base del depósito se encuentran conexiones para la medición de niveles de agua subterránea, que se registran en 19 tubos manométricos. El caudal de entrada de agua se controla mediante una válvula y se mide con un caudalímetro, mientras que el drenaje se calcula utilizando un vertedero de aforo. (Gunt, 2023)

Finalmente, este equipo de laboratorio permite no solo el estudio de flujos subterráneos e infiltración, sino también la simulación detallada de cauces de ríos en condiciones controladas. Esta capacidad es fundamental para analizar el comportamiento de diferentes estructuras hidráulicas, como puentes, alcantarillas, diques o presas, bajo una variedad de escenarios de flujo. A través de la simulación de cauces, es posible observar cómo estas estructuras interactúan con el flujo de agua en condiciones normales y extremas, permitiendo evaluar su eficiencia, estabilidad y desempeño ante posibles eventos como inundaciones, erosión o cambios en el régimen de caudal. (Gunt, 2023)



Figura 30. Equipo HM 165 de la marca GUNT

(Gunt, 2023)

Las partes del equipo son descritas a continuación:

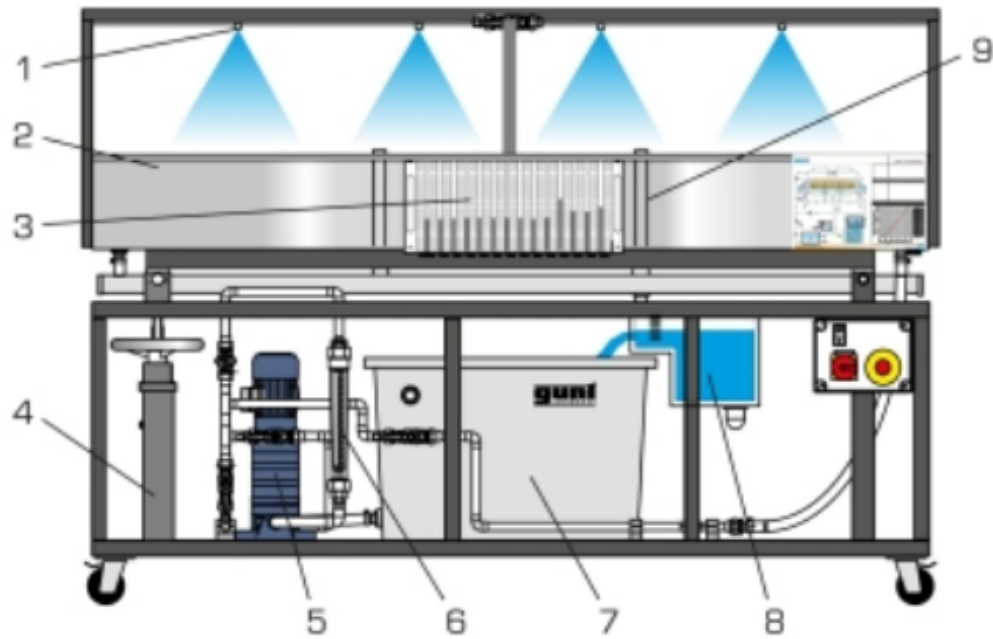


Figura 31. Partes del equipo HM 165 de la marca GUNT

(Gunt, 2023)

- 1) Tobera del dispositivo de precipitación.
- 2) Depósito de ensayo.
- 3) Tubos manométricos.
- 4) Ajuste de la inclinación.
- 5) Bomba.
- 6) Caudalímetro (alimentación).
- 7) Depósito de reserva.
- 8) Depósito de medición (drenaje).
- 9) Pozo.

VI. METODOLOGÍA

A. Fase I: Recopilación

La primera fase, considerada como la más fundamental, consistió en la investigación y documentación de los tres enfoques principales de la tesis: el estudio de alcantarillas tipo box culvert, los factores de escalamiento, y el software de simulación de fluidos. Esta etapa permitió establecer una base teórica sólida para sustentar los experimentos y simulaciones posteriores. La recopilación de información se organizó en las siguientes subfases:

1. Fase I.I: Box Culverts. En esta subfase, se realizó una investigación exhaustiva sobre las características y dimensiones de los box culverts prefabricados, incluyendo los distintos tamaños y configuraciones disponibles en el mercado. Asimismo, se exploraron las tipologías de box culverts más utilizadas en proyectos de infraestructura hidráulica, evaluando cómo las variaciones en diseño y forma afectan su rendimiento y eficiencia en diferentes condiciones hidráulicas y geotécnicas.

2. Fase I.II: Simulación de fluidos. En esta parte, se llevó a cabo un proceso de selección y evaluación de software especializado en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés), con el objetivo de identificar las herramientas más adecuadas para la simulación de los modelos hidráulicos. Se compararon varias alternativas de software, considerando factores como la precisión, la facilidad de uso y la capacidad de adaptación a las condiciones específicas del laboratorio. Después de una evaluación detallada, se seleccionaron OpenFOAM y SimFlow como las herramientas principales, ya que demostraron ser las más alineadas con los objetivos de esta investigación. Estos programas permitieron simular el comportamiento del agua en los box culverts de manera precisa, replicando las condiciones experimentales de laboratorio para validar los resultados y ajustar los parámetros cuando fue necesario. La capacidad de estos programas para modelar diferentes escenarios de flujo y su flexibilidad en la configuración de las mallas de simulación fueron aspectos clave para su elección.

3. Fase I.III: Factores de escalamiento. En esta subfase, se determinaron y analizaron en detalle los factores de escalamiento aplicables a las magnitudes de interés tales como la velocidad del flujo, el tiempo, la longitud, el caudal y el área transversal. Este análisis fue crucial para establecer una relación coherente entre el modelo físico a escala y el modelo simulado en software, garantizando que las simulaciones fueran representativas de la realidad y que los resultados obtenidos pudieran ser extrapolados de manera precisa. Los factores de escalamiento se calcularon basándose en principios de similitud hidráulica y utilizando las ecuaciones de escala correspondientes, permitiendo que las condiciones en el laboratorio y en el software mantuvieran una correspondencia exacta que facilitara las comparaciones y análisis posteriores.

B. Fase II: Creación del modelo de laboratorio

Como se explicó en el alcance, el objetivo de este trabajo de investigación no es diseñar, por lo que se optó por la construcción y un estudio de box culvert con dimensiones de celda de 2m x 2m, esto debido a que se buscaba una escala de 1:50, dando como resultado celdas de 4cm x 4cm. Otro factor que influenció en esta decisión fue que se decidió construir los modelos por medio de impresión 3D, esto por facilidad, rapidez y precisión que brindan dichas herramientas. A pesar de estas ventajas, se tenía una limitante de altura de 10cm y, de largo y ancho, de 22cm.

Una vez se tenían las dimensiones que limitaban la construcción, se utilizó el software de modelado 3D para modelar las 3 distintas tipologías de box culvert, donde lo único que se modificaba era la cantidad de celdas y, por ende, el ancho de la estructura. Cada prototipo tenía 2 versiones, una con dimensiones reales y otra con dimensiones de impresión. Las cotas se visualizan desde las figuras número 53 hasta la 58 del apéndice.

Posterior a ello, se procedió con la impresión 3D de los modelos, se buscó la alternativa de un color transparente para observar con mayor detalle el flujo a través de los prototipo, más dicha opción no estaba disponible. Finalmente se optó por el color negro, para contrastar con el agua y con el flotador, que fue la herramienta utilizada para la medición de velocidad.



Figura 32. Modelos fabricados a escala con impresión 3D
(Elaboración propia)

C. Fase III: Factores de escalamiento

Con base en la teoría presentada en el marco teórico de esta investigación, y dado que se cumplen las siguientes condiciones:

- Existe semejanza geométrica debido a que se generó un modelo de escala 1:50 a partir de un prototipo a escala real.
- Existe semejanza cinemática puesto las trayectorias de las partículas móviles homologas son geoméricamente semejantes y las relaciones entre las velocidades de las partículas homologas son iguales. Esto se demuestra puesto que el flujo se comporta de manera similar (dirección y magnitud) en la realidad (software) y en el laboratorio.
- Existe semejanza dinámica puesto se cumple la semejanza geométrica, semejanza cinemática y el flujo es dominado por la gravedad. Esto se demuestra puesto que, a diferencia de las tuberías cerradas, donde el flujo está contenido completamente por las paredes de la tubería y la presión juega un rol importante, el flujo en canales abiertos está parcialmente expuesto a la atmósfera (superficie libre). Esto significa que la presión a lo largo de la superficie libre es constante (igual a la presión atmosférica), y la principal fuerza que impulsa el movimiento del agua es la gravedad, que actúa en la dirección .

Fue posible utilizar la Similitud de Froude (Ecuación no. 12) y determinar los siguientes factores de escalamiento que fueron útiles para este estudio (Cálculos se muestran en las figuras 59, 60 y 61 del apéndice):

| Factores de Escalamiento | | |
|--------------------------|--|-------------|
| Magnitud | Factor de Escalamiento | Resultado |
| Longitud | $\frac{L_m}{L_p} = \lambda_L$ | 0.02 |
| Área | $\lambda_A = \lambda_L^2$ | 0.0004 |
| Velocidad | $\lambda_V = \sqrt{\lambda_L}$ | 0.141 |
| Tiempo | $\lambda_T = \frac{\lambda_L}{\sqrt{\lambda_L}} = \sqrt{\lambda_L}$ | 0.141 |
| Caudal | $\lambda_Q = \sqrt{\lambda_L} \cdot \lambda_L^2 = \lambda_L^{\frac{5}{2}}$ | 0.000056569 |

Cuadro 1
Factores de escalamiento calculados

(Elaboración propia)

D. Fase IV: Pruebas de laboratorio

Tras la impresión 3D de cada uno de los modelos, se realizaron las pruebas de laboratorio en el equipo GUNT HM165. En las pruebas de cada una de las tipologías de box culvert, se procuró observar distintas profundidades de inundación y velocidades de entrada y salida. Para medir dichas velocidades, se utilizó un flotador, que posteriormente sería medido por un software especializado. En la experimentación se utilizó arena de río de 2mm de diámetro y se minimizó lo máximo posible la salida de agua hacia el inicio del cauce, esto para evitar infiltraciones o llegadas de agua por otras ramas no deseadas. Finalmente, se empleó una pendiente del 5 % en el equipo.



Figura 33. Pruebas de laboratorio Box Culvert de 1 celda

(Elaboración propia)



Figura 34. Pruebas de laboratorio Box Culvert de 2 celdas

(Elaboración propia)



Figura 35. Pruebas de laboratorio Box Culvert de 3 celdas

(Elaboración propia)

E. Fase V: Análisis de velocidades y profundidades de entrada y salida

Se empleó el software de medición y uso libres "Tracker", se utilizó el flotador para la medición de velocidades de entrada y salida. En primera instancia se necesitó de un objeto con distancia conocida, en este caso se utilizó un tablón de 30cm de largo, esto hizo posible que todas las mediciones dentro del vídeo tuvieran la misma longitud que en la vida real.



Figura 36. Referencia utilizada para pruebas de laboratorio

(Elaboración propia)

Posteriormente, se utilizó una herramienta denominada "Trayectoria: Masa Puntual" para colocar puntos específicos en el flotador, los cuales fueron de ayuda para determinar la velocidad tanto de entrada, como de salida de la estructura.



Figura 37. Medición de flotador para determinar la velocidad

(Elaboración propia)

Con estos puntos, el programa generó una gráfica de distancia vs tiempo, se le colocó una regresión lineal, donde la pendiente es la velocidad de interés.

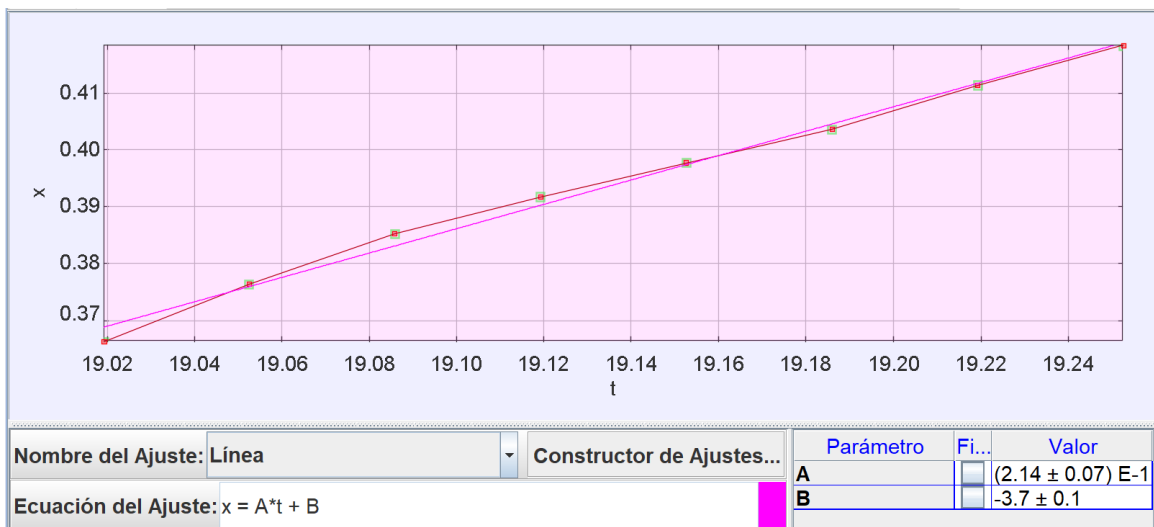


Figura 38. Box Culvert de 1 celda, velocidad de entrada, prueba 1

(Elaboración propia)

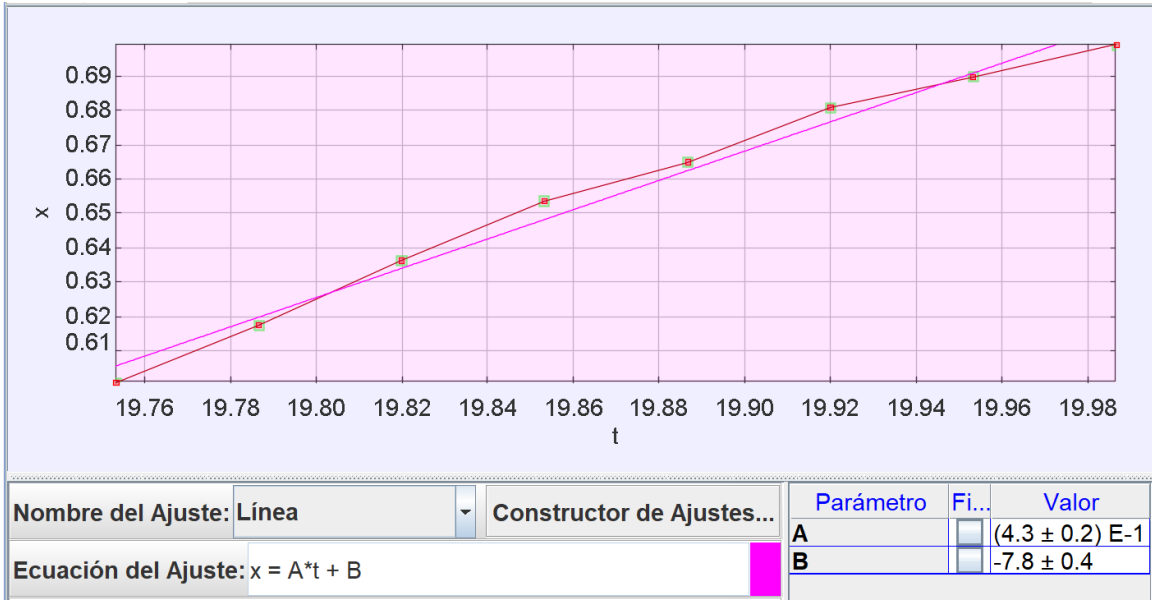


Figura 39. Box Culvert de 1 celda, velocidad de salida, prueba 1

(Elaboración propia)

Además, se midió la profundidad de agua tanto en la entrada como en la salida de los modelos de laboratorio.

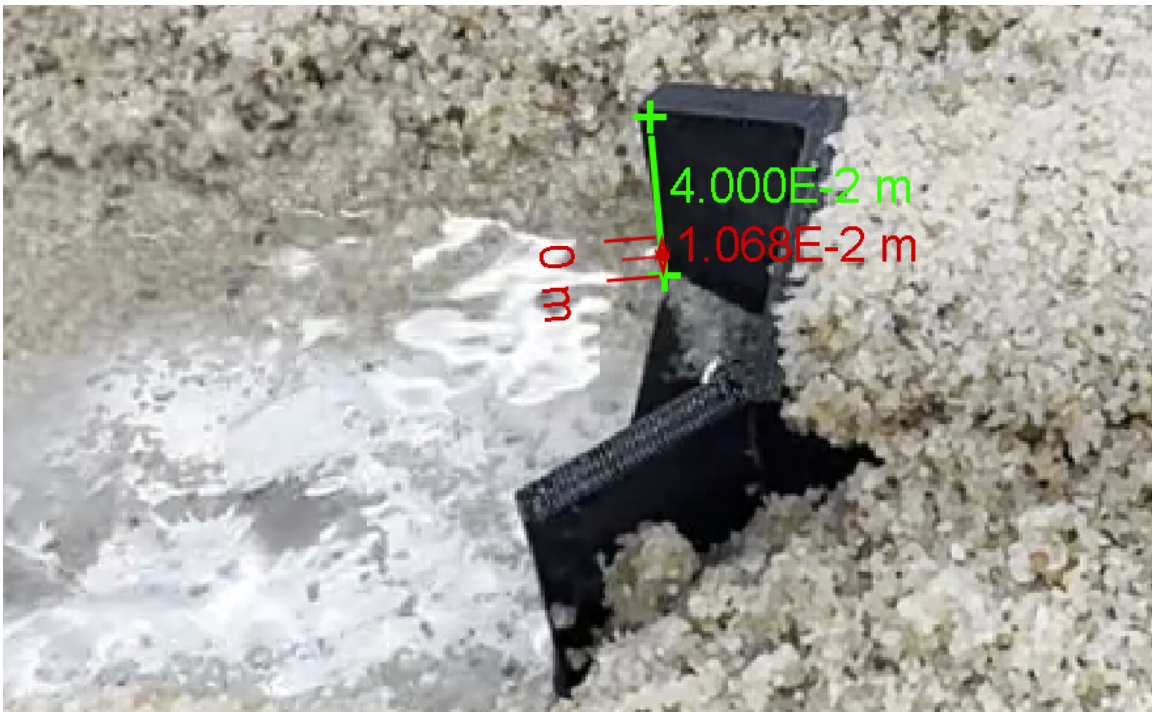


Figura 40. Box Culvert de 1 celda, profundidad de entrada, prueba 1

(Elaboración propia)



Figura 41. Box Culvert de 1 celda, profundidad de salida, prueba 1
(Elaboración propia)

Con estos datos y, al aplicar los respectivos factores de escalamiento determinados en el cuadro 1, se determinó el siguiente cuadro:

| Prueba 1 - Box Culvert 1 Celda | | | |
|--------------------------------|-------|--------------------|-------|
| Vi ML (m/s) | 0.214 | Vi PS (m/s) | 1.513 |
| Vf ML (m/s) | 0.430 | Vf FE (m/s) | 3.041 |
| Hi ML (m) | 0.011 | Hi PS (m) | 0.534 |
| Hf ML (m) | 0.003 | Hf FE (m) | 0.170 |

Cuadro 2
Velocidades y profundidades de entrada y salida, prueba 1, Box Culvert de 1 celda
(Elaboración propia)

Los datos de entrada fueron los que se colocaron en el software y los de salida son los que se compararon en este estudio.

F. Fase VI: Prototipo software

Para el modelado y simulación computacional, se utilizó el software ".openFoam" por medio de la interfaz "SimFlow". Como inicio, se modeló el mallado de interés para el prototipo y se especificó la entrada, salida, el lado derecho y el lado izquierdo del espacio de simulación. Además, se dejó un espacio de 4 metros antes de la entrada y 4 metros después de la salida para observar como se comportó el agua antes y después de entrar en el modelo.

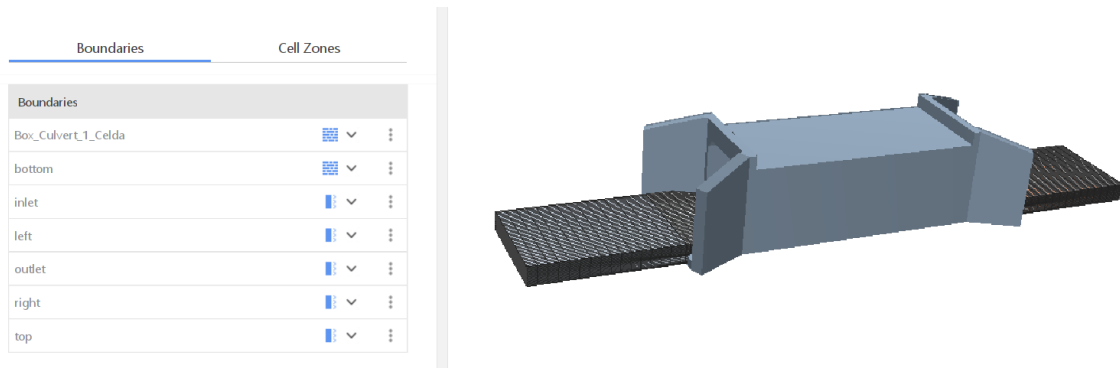


Figura 42. Mallado y parámetros del espacio de simulación

(Elaboración propia)

Posteriormente, se configuró la masa de agua utilizando la profundidad que se obtuvo previamente a través de los ensayos realizados en laboratorio. Esta profundidad sirvió como base para definir el nivel del agua dentro del modelo. Para complementar esta configuración, también se aplicaron los factores de escalamiento correspondientes, los cuales fueron tomados del Cuadro 1.



Figura 43. Profundidad inicial en masa de agua

(Elaboración propia)

En el siguiente paso, se colocó el "solver" adecuado, en este caso se usó "inter", este es utilizado para resolver problemas de flujos multifásicos con una interfaz distinguible entre las fases, como el flujo de agua y aire. Es especialmente útil para simular fenómenos donde hay interacción entre líquidos y gases o entre dos líquidos inmiscibles, como en casos de oleaje, tanques de mezcla o flujos en canales abiertos.

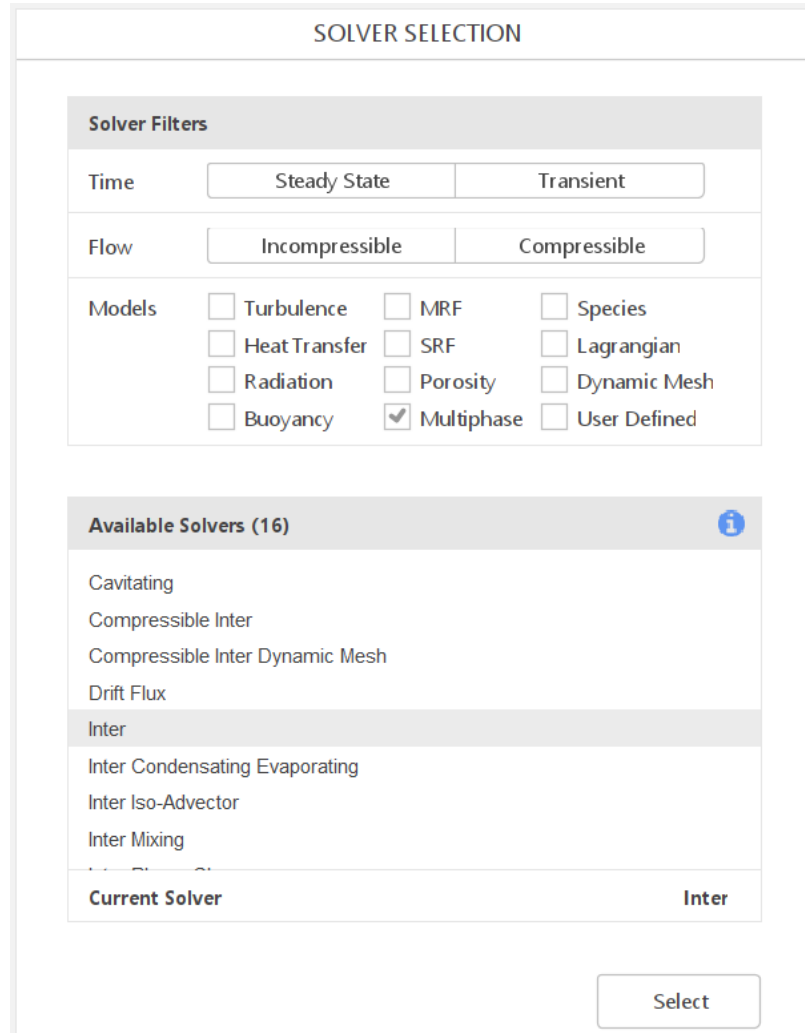
















Figura 44. Solver seleccionado

(Elaboración propia)

Finalmente, uno de los pasos más importantes y decisivos en el proceso fue la aplicación de las condiciones de borde adecuadas, ya que estas resultan fundamentales para asegurar que los resultados obtenidos en la simulación sean lo más realistas y representativos posible del comportamiento esperado. En este caso específico, la condición de borde más crítica correspondió a la entrada del flujo, ya que determina cómo inicia el movimiento del agua dentro del modelo. Para definir esta condición, se utilizó el valor de velocidad que fue previamente determinado mediante ensayos realizados en laboratorio, garantizando que se base en datos experimentales reales. Además, dicho valor fue ajustado aplicando los factores de escala correspondientes, con el fin de adaptar la velocidad a la escala reducida del modelo físico. Todos estos datos y parámetros se encuentran detallados y organizados en el Cuadro 2, el cual sirvió como referencia clave para esta etapa del proceso.

| Boundaries | | |
|---|---------------------|---|
|  | Box_Culvert_1_Celda |  ▼ |
|  | bottom |  ▼ |
|  | inlet |  ▼ |
|  | left |  ▼ |
|  | outlet |  ▼ |
|  | right |  ▼ |
|  | top |  ▼ |

| Flow | Phases |
|-------|-----------------------------|
| p-pgh | Type: Fixed Flux Pressure ▼ |
| U | Type: Fixed Value ▼ |
| | Value [m/s]: 1.51 0 0 |

Figura 45. Condición de borde para la entrada

(Elaboración propia)

Además, a continuación se especifican las condiciones de borde y fases seleccionadas para este estudio:

- Entrada
 - Presión de entrada fija: condición de frontera en OpenFOAM utilizada para definir la presión en una superficie de frontera, asegurando que el flujo de masa a través de esa superficie se mantenga constante en función del flujo convectivo o difusivo.
 - Valor fijo: obliga a la simulación mantener un valor fijo especificado por el usuario.
- Salida
 - Entrada - Salida: la condición de frontera que se utiliza en simulaciones donde el flujo es tanto entrante como saliente a través de una superficie de frontera, dependiendo de las condiciones del flujo en ese punto.

- Izquierda y derecha
 - Deslizar: condición de frontera se emplea frecuentemente en casos donde se desea simplificar la simulación al asumir que la frontera es perfectamente lisa y sin fricción, como en algunos estudios de flujos en canales, flujos atmosféricos o en simulaciones de grandes cuerpos de agua, donde se quiere ignorar el efecto de la viscosidad en las paredes.
- Modelo y fondo
 - Pared: se utiliza para definir superficies sólidas inmóviles en contacto con el fluido, como las paredes de un canal, tuberías o estructuras.
- Fases
 - Gradiente cero: condición de frontera que establece que la derivada de una variable en dirección normal a la frontera es cero, es decir, no hay cambio en la variable a través de la frontera. Esta condición es frecuentemente utilizada para variables como velocidad, presión o temperatura cuando se desea que la cantidad correspondiente se ajuste libremente en la frontera sin que haya un flujo neto hacia adentro o afuera.

Al proceder con la simulación, los datos de interés fueron la velocidad de salida y la profundidad final del agua. Gracias a una herramienta del mismo software de modelado, se estableció de manera específica el valor de la velocidad identificada como la primera coordenada de la magnitud "U" y la profundidad, identificada como la tercera coordenada de la magnitud "coords" Todo en unidades internacionales.

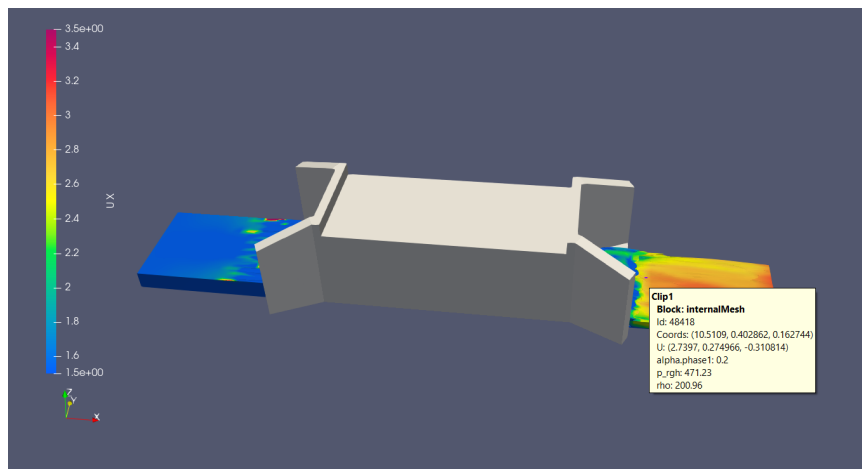


Figura 46. Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 1, Box Culvert 1 celda (Elaboración propia)

A partir de estos resultados, fue posible ordenar los mismos en el siguiente cuadro, donde se observa el porcentaje de diferencia entre el dato obtenido en laboratorio con factores de escalamiento y el dato obtenido a partir de la simulación con software.

| Box Culvert 1 Celda | | | | |
|---------------------|-------|-------------|-------|--------------|
| Laboratorio | | Software | | % Diferencia |
| Vf FE (m/s) | 3.041 | Vf PS (m/s) | 2.740 | 10.98% |
| Hf FE (m) | 0.170 | Hf PS (m) | 0.163 | 4.76% |

Cuadro 3
Velocidades y profundidades de salida, prueba 1, Box Culvert de 1 celda
 (Elaboración propia)

Se realizó el mismo proceso con las 3 tipologías a estudiar y con 3 pruebas distintas, (figuras del apéndice desde la número 62 hasta la número 101), se obtuvieron los cuadros 4, 5, 6, 7, 8 y 9 de la sección de resultados.

G. Fase VII: Análisis con datos obtenidos

Para dar valor e importancia a los datos obtenidos, se calculó el caudal de entrada, la carga total y el número de Froude para determinar si el flujo entrante o saliente era supercrítico o subcrítico. Se utilizaron las ecuaciones número 2 y 9. Con estos resultados, se realizaron los cuadros 10, 11, 12, 13, 14 y 15 de la sección de resultados.

Finalmente, las especificaciones del "Manual de Consideraciones Técnicas Hidrológicas e Hidráulicas" (COMITRAN, 2016), se verificó si los modelos estudiados, en las condiciones brindadas, satisfacían o no con dichos requerimientos. Estos resultados se observan en los cuadros 16, 17 y 18.

H. Fase VIII: Análisis cualitativo

Durante la experimentación y simulación, existieron parámetros que no pudieron ser medidos, más es interesante mencionarlos, ya que forman parte del comportamiento de los modelos. Por otro lado, se mostrará una vista aérea entre el modelo de laboratorio y la simulación en software, para comparar de manera visual la conducta del agua.

Los parámetros analizados de manera cualitativa fueron:

- Vórtices observados durante la experimentación.
- Arrastre de sedimentos.
- Comparativa visual del comportamiento hidráulico entre el modelo de laboratorio y la simulación por software.

Las figuras donde se observa lo descrito son las 47, 48, 49, 50, 51 y 52 de la sección de resultados.

VII. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Velocidades y profundidades de entrada y salida obtenidos por pruebas de laboratorio y simulación por software

| Box Culvert 1 Celda | | | | |
|---------------------|-------------|-------|-------------|-------|
| Prueba 1 | Vi ML (m/s) | 0.214 | Vi PS (m/s) | 1.513 |
| | Vf ML (m/s) | 0.430 | Vf FE (m/s) | 3.041 |
| | Hi ML (m) | 0.011 | Hi PS (m) | 0.534 |
| | Hf ML (m) | 0.003 | Hf FE (m) | 0.170 |
| Prueba 2 | Vi ML (m/s) | 0.154 | Vi PS (m/s) | 1.089 |
| | Vf ML (m/s) | 0.583 | Vf FE (m/s) | 4.122 |
| | Hi ML (m) | 0.018 | Hi PS (m) | 0.905 |
| | Hf ML (m) | 0.005 | Hf FE (m) | 0.246 |
| Prueba 3 | Vi ML (m/s) | 0.168 | Vi PS (m/s) | 1.188 |
| | Vf ML (m/s) | 0.750 | Vf FE (m/s) | 5.303 |
| | Hi ML (m) | 0.027 | Hi PS (m) | 1.350 |
| | Hf ML (m) | 0.005 | Hf FE (m) | 0.255 |

Cuadro 4

Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y con factores de escalamiento, Box Culvert 1 celda (Elaboración propia)

| Box Culvert 2 Celdas | | | | |
|----------------------|-------------|-------|-------------|-------|
| Prueba 1 | Vi ML (m/s) | 0.350 | Vi PS (m/s) | 2.475 |
| | Vf ML (m/s) | 0.490 | Vf FE (m/s) | 3.465 |
| | Hi ML (m) | 0.012 | Hi PS (m) | 0.593 |
| | Hf ML (m) | 0.003 | Hf FE (m) | 0.153 |
| Prueba 2 | Vi ML (m/s) | 0.428 | Vi PS (m/s) | 3.026 |
| | Vf ML (m/s) | 0.600 | Vf FE (m/s) | 4.243 |
| | Hi ML (m) | 0.015 | Hi PS (m) | 0.739 |
| | Hf ML (m) | 0.004 | Hf FE (m) | 0.204 |
| Prueba 3 | Vi ML (m/s) | 0.446 | Vi PS (m/s) | 3.154 |
| | Vf ML (m/s) | 0.570 | Vf FE (m/s) | 4.031 |
| | Hi ML (m) | 0.015 | Hi PS (m) | 0.760 |
| | Hf ML (m) | 0.004 | Hf FE (m) | 0.221 |

Cuadro 5

Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y con factores de escalamiento, Box Culvert 2 celdas (Elaboración propia)

| Box Culvert 3 Celdas | | | | |
|----------------------|-------------|-------|-------------|-------|
| Prueba 1 | Vi ML (m/s) | 0.500 | Vi PS (m/s) | 3.536 |
| | Vf ML (m/s) | 0.508 | Vf FE (m/s) | 3.592 |
| | Hi ML (m) | 0.016 | Hi PS (m) | 0.786 |
| | Hf ML (m) | 0.005 | Hf FE (m) | 0.232 |
| Prueba 2 | Vi ML (m/s) | 0.356 | Vi PS (m/s) | 2.517 |
| | Vf ML (m/s) | 0.490 | Vf FE (m/s) | 3.465 |
| | Hi ML (m) | 0.018 | Hi PS (m) | 0.882 |
| | Hf ML (m) | 0.005 | Hf FE (m) | 0.241 |
| Prueba 3 | Vi ML (m/s) | 0.490 | Vi PS (m/s) | 3.465 |
| | Vf ML (m/s) | 0.610 | Vf FE (m/s) | 4.313 |
| | Hi ML (m) | 0.021 | Hi PS (m) | 1.029 |
| | Hf ML (m) | 0.005 | Hf FE (m) | 0.250 |

Cuadro 6

Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y con factores de escalamiento, Box Culvert 3 celdas (Elaboración propia)

| Box Culvert 1 Celda | | | | | | |
|---------------------|-------------|-------|-------------|-------|--------------|----------------------|
| No. Prueba | Laboratorio | | Software | | % Diferencia | Promedio %Diferencia |
| 1 | Vf FE (m/s) | 3.041 | Vf PS (m/s) | 2.740 | 10.97% | 7.77% |
| | Hf FE (m) | 0.170 | Hf PS (m) | 0.163 | 4.57% | |
| 2 | Vf FE (m/s) | 4.122 | Vf PS (m/s) | 3.597 | 14.62% | 13.61% |
| | Hf FE (m) | 0.246 | Hf PS (m) | 0.219 | 12.60% | |
| 3 | Vf FE (m/s) | 5.303 | Vf PS (m/s) | 4.018 | 31.99% | 29.73% |
| | Hf FE (m) | 0.255 | Hf PS (m) | 0.351 | 27.47% | |

Cuadro 7

Resultados obtenidos en simulación con software, Box Culvert 1 celda (Elaboración propia)

| Box Culvert 2 Celdas | | | | | | |
|----------------------|-------------|-------|-------------|-------|--------------|----------------------|
| No. Prueba | Laboratorio | | Software | | % Diferencia | Promedio %Diferencia |
| 1 | Vf FE (m/s) | 3.465 | Vf PS (m/s) | 2.534 | 36.74% | 21.77% |
| | Hf FE (m) | 0.153 | Hf PS (m) | 0.164 | 6.81% | |
| 2 | Vf FE (m/s) | 4.243 | Vf PS (m/s) | 4.264 | 0.51% | 6.43% |
| | Hf FE (m) | 0.204 | Hf PS (m) | 0.232 | 12.36% | |
| 3 | Vf FE (m/s) | 4.031 | Vf PS (m/s) | 4.174 | 3.44% | 9.59% |
| | Hf FE (m) | 0.221 | Hf PS (m) | 0.262 | 15.74% | |

Cuadro 8

Resultados obtenidos en simulación con software, Box Culvert 2 celdas (Elaboración propia)

| Box Culvert 3 Celdas | | | | | | |
|----------------------|-------------|-------|-------------|-------|--------------|----------------------|
| No. Prueba | Laboratorio | | Software | | % Diferencia | Promedio %Diferencia |
| 1 | Vf FE (m/s) | 3.592 | Vf PS (m/s) | 3.590 | 0.05% | 5.52% |
| | Hf FE (m) | 0.232 | Hf PS (m) | 0.260 | 10.98% | |
| 2 | Vf FE (m/s) | 3.465 | Vf PS (m/s) | 3.406 | 1.72% | 10.03% |
| | Hf FE (m) | 0.241 | Hf PS (m) | 0.295 | 18.34% | |
| 3 | Vf FE (m/s) | 4.313 | Vf PS (m/s) | 4.329 | 0.36% | 2.67% |
| | Hf FE (m) | 0.250 | Hf PS (m) | 0.238 | 4.97% | |

Cuadro 9

Resultados obtenidos en simulación con software, Box Culvert 3 celdas

(Elaboración propia)

En los cuadros 4, 5 y 6, se destacan las profundidades de entrada y salida como los resultados más relevantes. El único modelo ensayado que presentó una variación significativa en la profundidad de entrada fue el de una celda, alcanzando un valor máximo de 1.35 m en la prueba número 3. Este resultado se justifica por la relación directa entre el número de celdas y la capacidad de caudal. A mayor número de celdas, mayor es el área disponible para el flujo, lo que incrementa el caudal transportado, tal como lo establece la ecuación de caudal.

En lo que respecta a las velocidades de entrada, estas variaron entre 1 y 3.5 m/s, observándose las mayores velocidades en el box culvert de 3 celdas, mientras que el modelo de una celda registró las menores. Esta diferencia se explica por la distribución más eficiente del flujo en las estructuras con más celdas, lo que reduce la velocidad por celda individual.

Las velocidades de salida oscilaron entre 1 y 5 m/s, con una mayor variación en el modelo de una celda en comparación con los de 2 y 3 celdas. Esta mayor variación en el modelo de una celda se debe a la menor capacidad para manejar caudales elevados, lo que provoca un aumento considerable en las velocidades al concentrarse el flujo en una única celda.

Un factor clave que afecta las velocidades de salida es la pérdida por fricción. Cuanto mayor sea el número de celdas, mayor es el contacto del agua con la superficie interna de la estructura, lo que incrementa la fricción y, en consecuencia, las pérdidas de energía. Adicionalmente, los dispositivos de entrada y salida desempeñan un papel crucial en la regulación del flujo, ya que su diseño influye directamente en la disipación de energía y en la uniformidad del flujo a la salida de la estructura.

En los cuadros 7, 8 y 9 se presenta uno de los análisis más importantes de este estudio. La comparación entre la simulación por software y la experimentación en laboratorio reveló una discrepancia máxima del 29.73 % en las velocidades y profundidades finales durante la prueba número 3 del box culvert de una celda, y una discrepancia mínima del 2.67 % en la prueba número 3 del box culvert de dos celdas. La diferencia promedio entre las 3 pruebas fue del 11.90 %.

Estos factores de diferencia se explican por las distintas condiciones presentes tanto en el laboratorio como en el software. El primer factor que influyó en la experimentación fueron las condiciones del laboratorio, ya que el equipo utilizado no permitió generar un flujo uniforme en todas las pruebas. Esto se debió a que la arena empleada se desprendía de los bordes del cauce. Además, el equipo distribuía el flujo a lo largo de todo su ancho y, aunque se mitigó este problema en cierta medida, con el transcurso del tiempo el agua se infiltraba en los costados del cauce, alterando las velocidades de entrada y salida de los modelos.

Un segundo factor importante a destacar es la simulación en el software, la cual se realizó bajo condiciones ideales, presentando el cauce como completamente uniforme tanto en el ancho como en la profundidad. Este enfoque idealizado difiere de manera significativa de las condiciones reales observadas en el laboratorio, donde la uniformidad es difícil de replicar. En el software, no existen las variaciones propias del desgaste del material o la infiltración de agua en los bordes, lo que permite que los resultados obtenidos sean más precisos y controlados.

Las velocidades de salida y las profundidades obtenidas en el software muestran un nivel de precisión que, en la práctica y con las herramientas disponibles para este estudio, no fue posible alcanzar. Aunque el método del flotador es bastante confiable para medir velocidades, se utiliza principalmente para calcular un promedio de todo el flujo en lugar de capturar el comportamiento de una partícula individual, como lo hace el software.

Como cuarto y último factor se encuentra la fricción. En el software, esta se calculó tomando en cuenta el concreto como material de construcción, mientras que en el experimento real el material que generaba la fricción era PVC. Aunque esta diferencia en el coeficiente de fricción no generó una variación considerable en los resultados, es relevante mencionarlo, ya que las propiedades de ambos materiales no son completamente equivalentes. El PVC, al ser más liso que el concreto, afecta ligeramente la resistencia al flujo, lo que puede influir en las velocidades y profundidades registradas.

B. Análisis y verificación con datos obtenidos

| Box Culvert 1 Celda | | |
|----------------------------|----------------------------|-------|
| Prueba 1 | Q (m³/s) | 1.616 |
| | Hw ML (m) | 0.364 |
| | Hw PS (m) | 0.371 |
| Prueba 2 | Q (m³/s) | 1.970 |
| | Hw ML (m) | 0.658 |
| | Hw PS (m) | 0.686 |
| Prueba 3 | Q (m³/s) | 3.206 |
| | Hw ML (m) | 1.095 |
| | Hw PS (m) | 0.998 |

Cuadro 10
Caudal y carga total, Box Culvert 1 celda

(Elaboración propia)

Para esquematizar y observar de mejor manera las cargas totales, visualizar las figuras desde la número 102 hasta la número 110 del apéndice, del apéndice.

| Box Culvert 1 Celda | | | |
|----------------------------|---------------|-------|---------------------|
| Prueba 1 | Fri ML | 0.661 | Subcrítico |
| | Frf ML | 2.351 | Supercrítico |
| | Frf PS | 2.167 | Supercrítico |
| Prueba 2 | Fri ML | 0.366 | Subcrítico |
| | Frf ML | 2.653 | Supercrítico |
| | Frf PS | 2.456 | Supercrítico |
| Prueba 3 | Fri ML | 0.326 | Subcrítico |
| | Frf ML | 3.355 | Supercrítico |
| | Frf PS | 2.165 | Supercrítico |

Cuadro 11
Número de Froude, Box Culvert 1 celda

(Elaboración propia)

| Box Culvert 2 Celdas | | |
|-----------------------------|----------------------------|-------|
| Prueba 1 | Q (m³/s) | 5.868 |
| | Hw ML (m) | 0.440 |
| | Hw PS (m) | 0.429 |
| Prueba 2 | Q (m³/s) | 8.942 |
| | Hw ML (m) | 0.535 |
| | Hw PS (m) | 0.506 |
| Prueba 3 | Q (m³/s) | 9.581 |
| | Hw ML (m) | 0.538 |
| | Hw PS (m) | 0.497 |

Cuadro 12

Caudal y carga total, Box Culvert 2 celdas

(Elaboración propia)

| Box Culvert 2 Celdas | | | |
|-----------------------------|---------------|-------|---------------------|
| Prueba 1 | Fri ML | 1.026 | Supercrítico |
| | Frf ML | 2.831 | Supercrítico |
| | Frf PS | 1.999 | Supercrítico |
| Prueba 2 | Fri ML | 1.124 | Supercrítico |
| | Frf ML | 3.002 | Supercrítico |
| | Frf PS | 2.825 | Supercrítico |
| Prueba 3 | Fri ML | 1.155 | Supercrítico |
| | Frf ML | 2.736 | Supercrítico |
| | Frf PS | 2.601 | Supercrítico |

Cuadro 13

Número de Froude, Box Culvert 2 celdas

(Elaboración propia)

| Box Culvert 3 Celdas | | |
|-----------------------------|----------------------------|--------|
| Prueba 1 | Q (m³/s) | 16.674 |
| | Hw ML (m) | 0.554 |
| | Hw PS (m) | 0.526 |
| Prueba 2 | Q (m³/s) | 13.322 |
| | Hw ML (m) | 0.641 |
| | Hw PS (m) | 0.587 |
| Prueba 3 | Q (m³/s) | 21.392 |
| | Hw ML (m) | 0.779 |
| | Hw PS (m) | 0.791 |

Cuadro 14
Caudal y carga total, Box Culvert 3 celdas

(Elaboración propia)

| Box Culvert 3 Celdas | | | |
|-----------------------------|---------------|-------|---------------------|
| Prueba 1 | Fri ML | 1.273 | Supercrítico |
| | Frf ML | 2.383 | Supercrítico |
| | Frf PS | 2.247 | Supercrítico |
| Prueba 2 | Fri ML | 0.856 | Subcrítico |
| | Frf ML | 2.256 | Supercrítico |
| | Frf PS | 2.004 | Supercrítico |
| Prueba 3 | Fri ML | 1.091 | Supercrítico |
| | Frf ML | 2.753 | Supercrítico |
| | Frf PS | 2.831 | Supercrítico |

Cuadro 15
Número de Froude, Box Culvert 3 celdas

(Elaboración propia)

Finalmente, las especificaciones del "Manual de Consideraciones Técnicas Hidrológicas e Hidráulicas" (COMITRAN, 2016), se verificó si los modelos estudiados, las condiciones brindadas, satisfacían o no con dichos requerimientos.

| Box Culvert 1 Celda | | | | | |
|---------------------|-------------|-------|--|--------------------------|----------------------------|
| No. Prueba | Parámetro | Valor | No Sobrepasar el 80% de Capacidad (1.6 m máximo) | Velocidad Máxima (6 m/s) | Velocidad Mínima (0.5 m/s) |
| 1 | Hi ML (m) | 0.534 | Cumple | - | - |
| | Vi ML (m/s) | 1.513 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf ML (m/s) | 3.041 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf PS (m/s) | 2.740 | - | Cumple | Cumple |
| 2 | Hi ML (m) | 0.905 | Cumple | - | - |
| | Vi ML (m/s) | 1.089 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf ML (m/s) | 4.122 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf PS (m/s) | 3.597 | - | Cumple | Cumple |
| 3 | Hi ML (m) | 1.350 | Cumple | - | - |
| | Vi ML (m/s) | 1.188 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf ML (m/s) | 5.303 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf PS (m/s) | 4.018 | - | Cumple | Cumple |

Cuadro 16

Consideraciones para alcantarillas, Box Culvert 1 celda

(Elaboración propia)

| Box Culvert 2 Celdas | | | | | |
|----------------------|-------------|-------|--|--------------------------|----------------------------|
| No. Prueba | Parámetro | Valor | No Sobrepasar el 80% de Capacidad (1.6 m máximo) | Velocidad Máxima (6 m/s) | Velocidad Mínima (0.5 m/s) |
| 1 | Hi ML (m) | 0.593 | Cumple | - | - |
| | Vi ML (m/s) | 2.475 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf ML (m/s) | 3.465 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf PS (m/s) | 2.534 | - | Cumple | Cumple |
| 2 | Hi ML (m) | 0.739 | Cumple | - | - |
| | Vi ML (m/s) | 3.026 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf ML (m/s) | 4.243 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf PS (m/s) | 4.264 | - | Cumple | Cumple |
| 3 | Hi ML (m) | 0.760 | Cumple | - | - |
| | Vi ML (m/s) | 3.154 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf ML (m/s) | 4.031 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf PS (m/s) | 4.174 | - | Cumple | Cumple |

Cuadro 17

Consideraciones para alcantarillas, Box Culvert 2 celdas

(Elaboración propia)

| Box Culvert 3 Celdas | | | | | |
|----------------------|-------------|-------|--|--------------------------|----------------------------|
| No. Prueba | Parámetro | Valor | No Sobrepasar el 80% de Capacidad (1.6 m máximo) | Velocidad Máxima (6 m/s) | Velocidad Mínima (0.5 m/s) |
| 1 | Hi ML (m) | 0.786 | Cumple | - | - |
| | Vi ML (m/s) | 3.536 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf ML (m/s) | 3.592 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf PS (m/s) | 3.590 | - | Cumple | Cumple |
| 2 | Hi ML (m) | 0.882 | Cumple | - | - |
| | Vi ML (m/s) | 2.517 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf ML (m/s) | 3.465 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf PS (m/s) | 3.406 | - | Cumple | Cumple |
| 3 | Hi ML (m) | 1.029 | Cumple | - | - |
| | Vi ML (m/s) | 3.465 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf ML (m/s) | 4.313 | - | Cumple | Cumple |
| | Vf PS (m/s) | 4.329 | - | Cumple | Cumple |

Cuadro 18

Consideraciones para alcantarillas, Box Culvert 3 celdas

(Elaboración propia)

En los cuadros 10, 12 y 14 se destaca que en 6 de las 9 pruebas realizadas, la carga total calculada en el software fue menor que la obtenida al aplicar los factores de escalamiento. Esta diferencia se explica debido a que el software realiza los cálculos bajo condiciones ideales, sin incluir algunas de las irregularidades presentes en el entorno físico, como la rugosidad de los materiales o las pérdidas por fricción adicionales que se presentan en el laboratorio. Además, un factor clave que influyó en esta pérdida de energía en el laboratorio fueron los sedimentos, los cuales no estuvieron presentes en la simulación por software. La presencia de sedimentos en el cauce real aumenta la resistencia al flujo, lo que genera mayores pérdidas de energía y afecta la carga total. Al no incluirse este factor en el software, las cargas obtenidas por simulación resultan menores en comparación con las obtenidas en las pruebas físicas.

Otro valor clave es el caudal, en la estructura de una celda se observaron caudales entre 1 y $3m^3/s$; en la de dos celdas, entre 5 y $9.5m^3/s$; y en el modelo de tres celdas, los caudales variaron entre 13 y $21m^3/s$. Estos resultados reflejan con precisión el efecto de añadir más celdas, ya que a mayor número de celdas, mayor es el caudal que puede soportar la estructura. Aunque no se muestra de manera constante, el caudal tiende a incrementarse proporcionalmente con el número de celdas, lo que demuestra que cada celda adicional contribuye a aumentar la capacidad de flujo de la estructura.

En los cuadros 11, 13 y 15 se emplearon los valores resultantes del análisis por similitud y los obtenidos del análisis por software para determinar un parámetro clave: el número de Froude en la entrada y salida de la alcantarilla. Este valor es fundamental, ya que determina si el comportamiento del flujo en la alcantarilla está controlado por las condiciones de entrada o salida. Con base en esto, se puede orientar la selección de las ecuaciones a utilizar en los cálculos y, en caso de ser necesario, guiar al diseñador en la optimización del diseño de la estructura para modificar las condiciones y mejorar su desempeño hidráulico.

Finalmente, los cuadros 16, 17 y 18 indican que los modelos estudiados tanto en laboratorio como por software cumplen con tres de los parámetros clave establecidos en los manuales que regulan el diseño de alcantarillas. Aunque estos tres factores son esenciales y proporcionan una buena indicación de la idoneidad del diseño y el uso de estas alcantarillas bajo ciertas condiciones, el diseñador aún debe considerar otros parámetros adicionales. Estos factores, que no serán descritos ni son objeto de análisis en esta investigación.

C. Análisis cualitativo

En el proceso de experimentación y simulación, algunos parámetros no pudieron ser registrados directamente; no obstante, resulta interesante mencionarlos, dado que influyen en el comportamiento general de los modelos. Adicionalmente, se incluirá una vista aérea que comparará visualmente el modelo de laboratorio y la simulación en software para analizar el flujo del agua.

A. Antes de la Prueba

B. Después de La Prueba



Figura 47. Arrastre de sedimentos, Box Culvert 1 celda

(Elaboración propia)

A. Antes de la Prueba

B. Después de La Prueba



Figura 48. Arrastre de sedimentos, Box Culvert 2 celdas

(Elaboración propia)

A. Antes de la Prueba



B. Después de La Prueba



Figura 49. Arrastre de sedimentos, Box Culvert 3 celdas

(Elaboración propia)

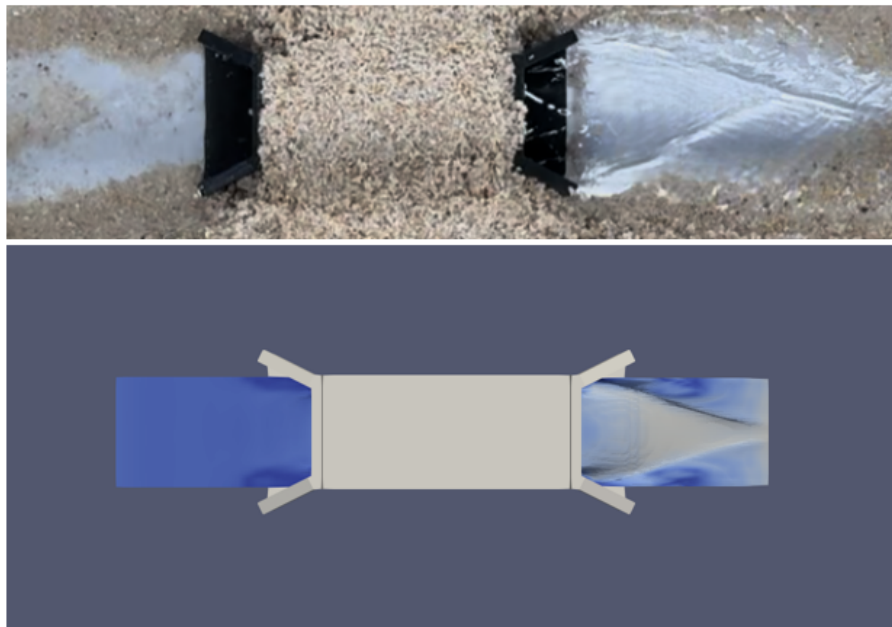


Figura 50. Comparativa de comportamiento entre Box Culvert de 1 celda de laboratorio y por simulación
(Elaboración propia)

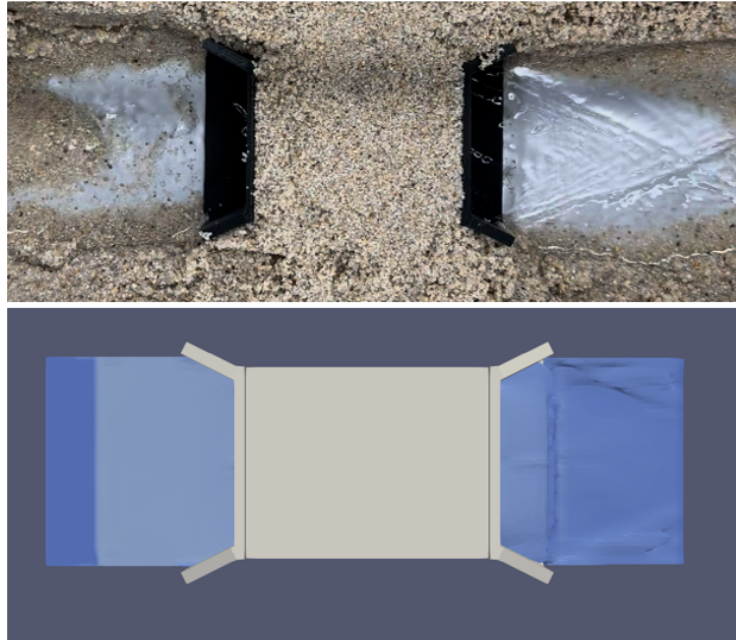


Figura 51. Comparativa de comportamiento entre Box Culvert de 2 celdas de laboratorio y por simulación (Elaboración propia)

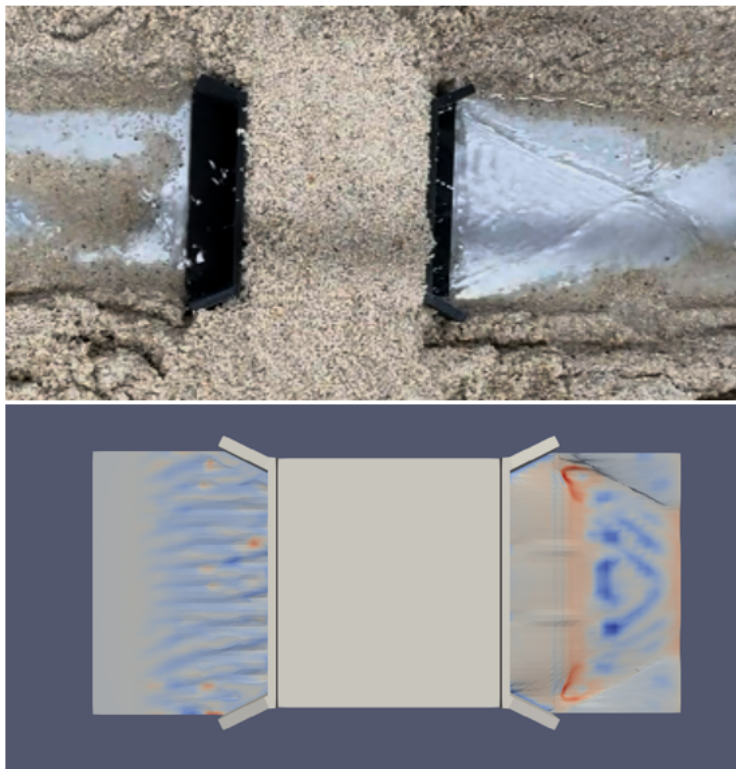


Figura 52. Comparativa de comportamiento entre Box Culvert de 3 celdas de laboratorio y por simulación (Elaboración propia)

En las figuras 47, 48 y 49 se observa que al inicio de las pruebas de cada uno de los modelos no hay presencia de sedimentos ni en la entrada ni en la salida. Sin embargo, al final de las pruebas, los sedimentos se acumulan por completo en la entrada y no logran llegar a la salida en ningún momento. Esto resulta positivo porque indica que la estructura es efectiva en detener el sedimento en la entrada, evitando que se arrastre a lo largo del sistema y cause obstrucciones o daños en la salida. Además, este comportamiento refleja que la alcantarilla está actuando como una barrera natural frente a los sedimentos, lo cual podría ser útil en situaciones donde es necesario proteger la salida de la estructura.

No obstante, este fenómeno también tiene implicaciones negativas. La acumulación de sedimentos en la entrada podría generar bloqueos con el tiempo, reduciendo la capacidad de la alcantarilla para transportar el caudal de manera eficiente y generando posibles inundaciones en la parte superior. La acumulación excesiva también implicaría la necesidad de un mantenimiento más frecuente para evitar que la estructura se vea comprometida.

Este comportamiento indica que el diseño de la alcantarilla, en su estado actual, no permite que los sedimentos se evacuen de manera eficiente hacia la salida, lo que sugiere que la dinámica del flujo no es lo suficientemente fuerte para arrastrar las partículas de sedimento a lo largo de la estructura.

Por otro lado, en las figuras 50, 51 y 52 se presenta de manera cualitativa la diferencia entre las pruebas de laboratorio y las simulaciones realizadas por software. Un aspecto interesante es que, en todas las pruebas, se observa la formación de una vena contracta en la salida de la estructura, tanto en el entorno físico como en el entorno simulado. Este fenómeno es clave para comprender el comportamiento del flujo y su desarrollo, ya que demuestra que la simulación está reproduciendo con precisión un comportamiento característico del flujo en situaciones reales.

La presencia de la vena contracta en ambas pruebas sugiere que el modelo de simulación está bien ajustado y refleja fielmente los aspectos dinámicos del flujo que ocurren en condiciones reales. Aunque las simulaciones por software se desarrollan bajo condiciones ideales, sin los factores externos e imperfecciones del laboratorio, este resultado visual muestra una correlación clara entre ambos escenarios, lo que valida, en parte, la fiabilidad de las simulaciones para representar el comportamiento del flujo.

La vena contracta es el punto de máxima contracción del flujo al pasar por una apertura, donde la velocidad aumenta y la presión disminuye. Este fenómeno presenta aspectos positivos, como facilitar la identificación de patrones de flujo eficientes y permitir la optimización del diseño hidráulico al ajustar las estructuras para mejorar su rendimiento en la salida. Sin embargo, también tiene desventajas, como la generación de pérdidas de energía debido a la disminución de la presión, lo que afecta la eficiencia del flujo. La alta velocidad en la zona de contracción puede provocar erosión en las paredes de la estructura si no están adecuadamente protegidas, y también puede afectar la vida marina del ecosistema donde se encuentra, atrapando animales o interfiriendo su paso.

VIII. CONCLUSIONES

- La conducta hidrodinámica del box culvert, evaluada mediante el uso de software libre, mostró que las simulaciones lograron replicar con precisión fenómenos importantes como la vena contracta y las variaciones de velocidad en diferentes secciones de la estructura. Los caudales simulados reflejan una relación directa entre el número de celdas y la capacidad hidráulica del sistema, donde los modelos con más celdas permitieron un mayor caudal, tal como lo demuestran los valores de entre 13 y $21m^3/s$ en el modelo de 3 celdas.
- Las magnitudes clave a partir de las cuales se derivaron los factores de escalamiento para el análisis hidráulico de los box culverts fueron: longitud, área, velocidad, tiempo y caudal. Con base en estas dimensiones, es posible formular cualquier ecuación necesaria para el diseño de estructuras en canales abiertos, así como para determinar parámetros de interés en el análisis hidráulico. Estas magnitudes fundamentales permiten ajustar y adaptar los resultados del modelo a condiciones reales, asegurando un diseño eficiente y preciso.
- Al comparar los resultados obtenidos por software con los resultados de laboratorio, se observó una discrepancia máxima del 29.73 % en las pruebas del box culvert de una celda, mientras que la menor diferencia fue del 2.67 % en el box culvert de dos celdas. Estas diferencias se atribuyen a las condiciones ideales simuladas en el software, que no consideraron factores como la rugosidad del material y la presencia de sedimentos, los cuales afectaron los resultados de las pruebas físicas. A pesar de estas variaciones, los resultados obtenidos en el software demostraron ser consistentes en términos generales, proporcionando una representación adecuada del comportamiento hidráulico del box culvert.
- El comportamiento hidráulico de las tres tipologías de box culvert (1, 2 y 3 celdas) fue examinado tanto en laboratorio como por software, mostrando una tendencia clara: a mayor número de celdas, mayor capacidad para manejar caudales más altos. En el box culvert de 1 celda, los caudales variaron entre 1 y $3m^3/s$, en el de 2 celdas entre 5 y $9.5m^3/s$, y en el de 3 celdas entre 13 y $21m^3/s$. En ambos enfoques, se observó una mayor eficiencia en las tipologías de más celdas, aunque las pruebas de laboratorio reflejaron mayores pérdidas de energía debido a la fricción y los sedimentos, factores no considerados en las simulaciones por software.

IX. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios detallados sobre la dinámica de los sedimentos en el box culvert, analizando la acumulación, el tamaño de las partículas y su transporte a lo largo del tiempo. Evaluar cómo diferentes tipos de sedimentos afectan el flujo y desarrollar soluciones para mitigar el riesgo de obstrucción en las entradas y salidas de las estructuras.
- Profundizar en el análisis del impacto de la rugosidad de los materiales en las pérdidas por fricción y el comportamiento hidráulico. Implementar pruebas con diferentes materiales, como concreto, PVC y revestimientos alternativos, para identificar aquellos que optimicen el flujo y minimicen las pérdidas energéticas, permitiendo un diseño más eficiente.
- Utilizar alternativas de programas de simulación, como HEC-RAS, FLOW-3D y ANSYS Fluent, para validar y contrastar los resultados obtenidos. Realizar un análisis comparativo que permita identificar posibles inconsistencias y mejorar la precisión de las simulaciones..
- Adaptar las condiciones físicas del laboratorio para que se asemejen más al entorno idealizado en el software. Esto incluye ajustar factores como la rugosidad de las superficies, el control preciso del flujo y la eliminación de elementos externos, como los sedimentos no controlados, que afectan las pruebas físicas.
- Incorporar equipos que ofrezcan un ajuste detallado y uniforme del ancho del caudal y la velocidad del flujo, permitiendo simular de manera controlada situaciones más críticas. Esto facilitaría la evaluación del comportamiento del box culvert bajo condiciones extremas de flujo, como caudales elevados o velocidades variables, mejorando la capacidad de replicar escenarios complejos y optimizando la precisión de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio.
- Evaluar distintas estructuras de entrada y salida en el diseño de los box culverts, incorporando formas más aerodinámicas, con el fin de reducir la formación de vena contracta y minimizar pérdidas de energía.
- Desarrollar un análisis comparativo entre box culverts y otras soluciones de drenaje (tubos circulares, arcos prefabricados, puentes pequeños) para determinar las condiciones óptimas de aplicación de cada uno.

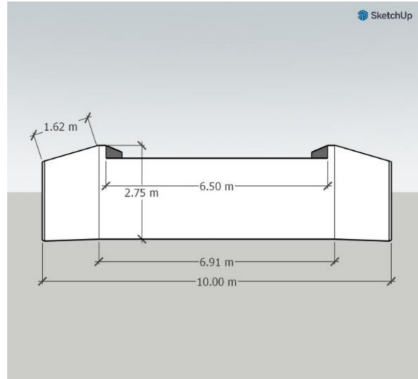
X. BIBLIOGRAFÍA

- Analysis and Design of Box Culvert: A Review*, author=Sagar Jamle. (2019). https://www.researchgate.net/publication/338701140_Analysis_and_Design_of_Box_Culvert_A_Review
- Ayres. (2024). *Computational Fluid Dynamics/3D Hydraulic Modeling*. <https://www.ayresassociates.com/project/cfd-3d-hydraulic-modeling/>
- Cadavid, J. (2009). *Hidráulica de Canales: Fundamentos*.
- Cengel, Y. (2006). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*.
- COMITRAN. (2016). *Manual de Consideraciones Técnicas Hidrológicas e Hidráulicas*. http://www.pgrweb.go.cr/DocsDescargar/Normas/NO%20DE-41271/Version1/Manual_consideraciones_tecnicas_hidrologicas_e_hidraulicas_para_infraestructura_vial_CA.pdf
- Creamer, P. (2007). *Culvert Hydraulics: Basic Principles*. <https://www.conteches.com/knowledge-center/archived-pdh-articles/culvert-hydraulics-basic-principles/>
- Felipe, O. (2016). *Conozca el estado de algunos puentes en la provincia*. <https://www.prensalibre.com/ciudades/zacapa/conozca-el-estado-de-los-puentes-en-la-provincia/#:~:text=El%20Ministerio%20de%20Comunicaciones%2C%20Infraestructura,que%20tuvo%20acceso%20Prensa%20Libre>
- Fluent, A. (2023). *Fluid Simulation Software*. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent#:~:text=Ansys%20Fluent%20is%20a%20general,within%20a%20single%20window%20workflow>
- Giles, R. (2018). *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10194/Din%C3%A1mica%20de%20fluidos%20viscosos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gribbin, J. (2014). *Introduction to Hydraulics and Hydrology With Applications for Stormwater Management*.
- Gunt. (2023). *HM 165: Estudios Hidrológicos*. https://www.gunt.de/images/datasheet/764/HM-165-Estudios-hidrologicos-gunt-764-pdf_1_es-ES.pdf
- Jamle, S. (2019). *Analysis and Design of Box Culvert: A Manual Approach*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-and-Design-of-Box-Culvert%3A-A-Manual-Patel-Jamle/e4e5c3b241c49a7e707b81d22efa12ff964a0ad8#cited-papers>
- Jiménez, C. (2018). *Mecánica de Fluidos: Viscosidad y Turbulencia*. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10194/Din%C3%A1mica%20de%20fluidos%20viscosos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Joncic, N. (2020). *3D mesh-triangles with different resolution*. https://www.researchgate.net/figure/3D-mesh-triangles-with-different-resolution-3D-Modelling-for-programmers-Available-at_fig5_339746954
- OpenFOAM. (2024). *OenFOAM*. <https://www.openfoam.com/>
- Parvez, A. (2015). *HYDRAULIC DESIGN OF BOX CULVERT FOR HIGHWAY AT COASTAL REGION*. https://ijaer.com/admin/upload/1425706756_M_Parvez_Alam_Feb_4.pdf
- Patel, R. (2019). *Analysis and Design of Box Culvert: A Manual Approach*. https://ijaers.com/uploads/issue_files/37-IJAERS-MAR-2019-34-Analysisand.pdf

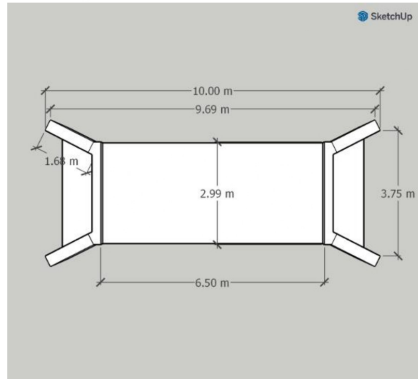
- Philip, S. (2020). *A Study on Design Parameters of Box Culvert: A Review*. https://www.researchgate.net/publication/350042852_A_Study_on_Design_Parameters_of_Box_Culvert_A_Review
- Sarsembayeva, A. (2023). *Comparison of Small Bridges and Box Culverts*. <https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/122153>
- Silva, V. (2020). *¿Qué es CFD (Computational Fluid Dynamics)?* [https://fantr.com/es/blog/que-es-cfd-computational-fluid-dynamics-143#:~:text=El%20CFD%20\(Computational%20Fluid%20Dynamics,de%20fluidos%20en%20diversas%20aplicaciones](https://fantr.com/es/blog/que-es-cfd-computational-fluid-dynamics-143#:~:text=El%20CFD%20(Computational%20Fluid%20Dynamics,de%20fluidos%20en%20diversas%20aplicaciones).
- SimFlow. (2024). *SimFlow*. <https://sim-flow.com/download/cfd-simulation-software/>
- U.S.D.T. (2012). *Hydraulic Design Of Highway Culverts*. <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/12026/hif12026.pdf>
- Vergara, M. (2010). *Técnicas de Modelación en Hidráulica*.
- Zepeda, O. (2019). *Análisis y dimensionamiento de alcantarilla tipo cajón para libramiento del cauce de un río y capacidad de carga para vehículo de diseño T3-S2-R4*. <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/3618>

XI. APÉNDICES

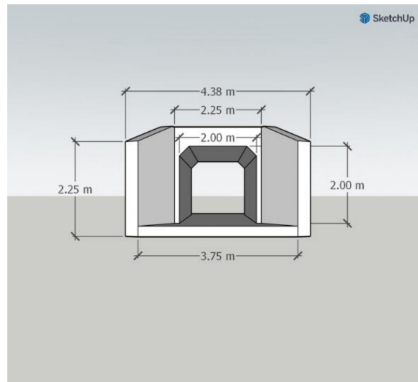
A) Vista Lateral



B) Vista Superior



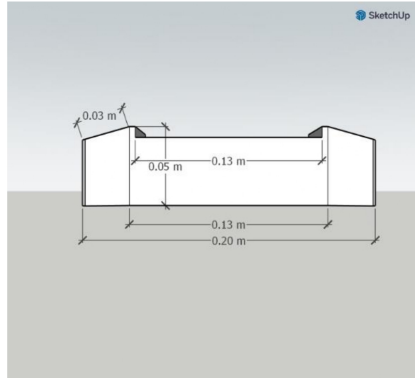
C) Vista Frontal



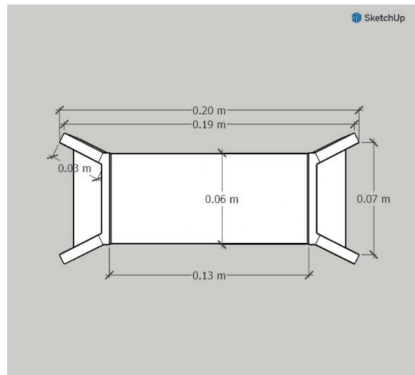
(Elaboración propia)

Figura 53. Medidas Box Culvert de 1 celda reales

A) Vista Lateral



B) Vista Superior



C) Vista Frontal

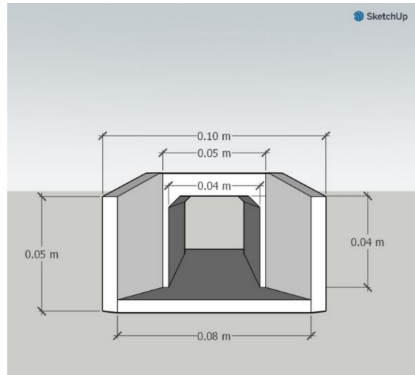
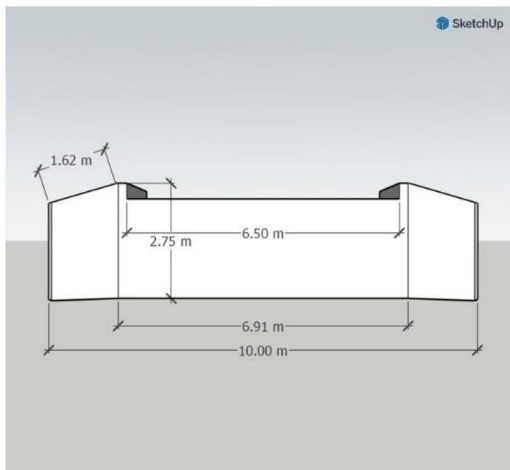
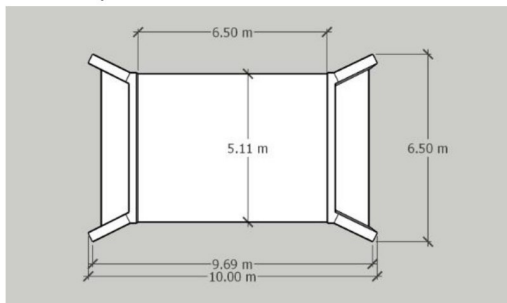


Figura 54. Medidas Box Culvert de 1 celda con escala 1:50
(Elaboración propia)

A) Vista Lateral



B) Vista Superior



C) Vista Frontal

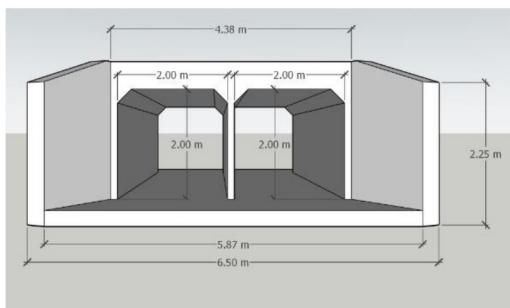
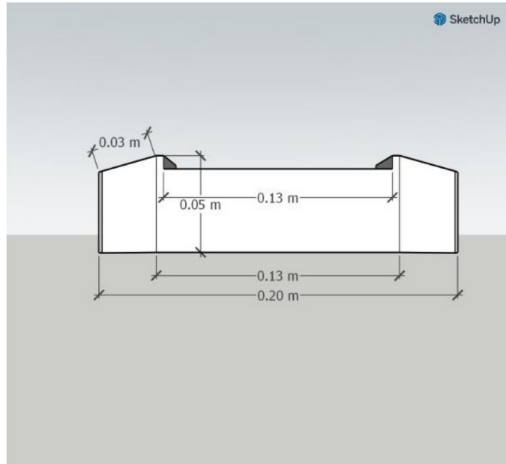


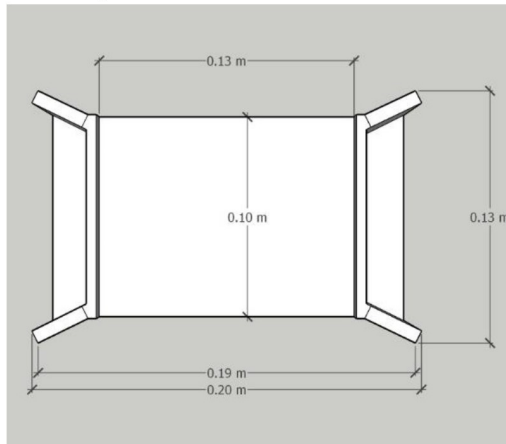
Figura 55. Medidas Box Culvert de 2 celdas reales

(Elaboración propia)

A) Vista Lateral



B) Vista Superior



C) Vista Frontal

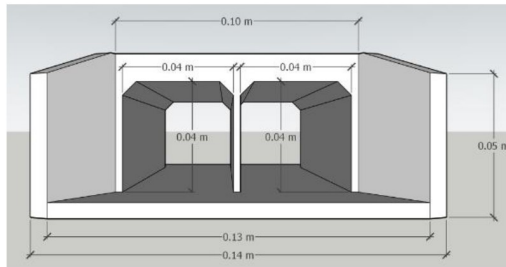
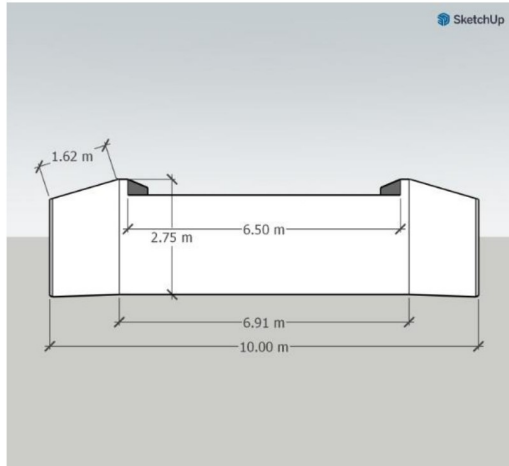
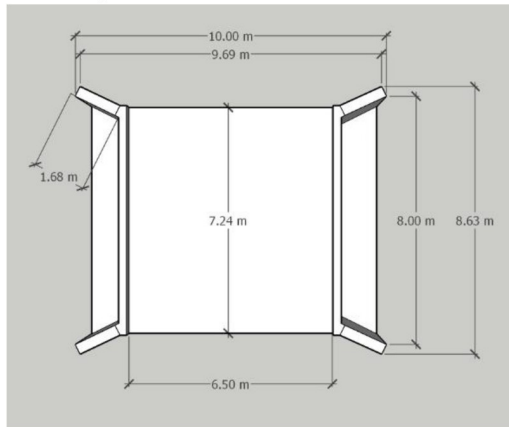


Figura 56. Medidas Box Culvert de 2 celdas con escala 1:50
(Elaboración propia)

A) Vista Lateral



B) Vista Superior



C) Vista Frontal

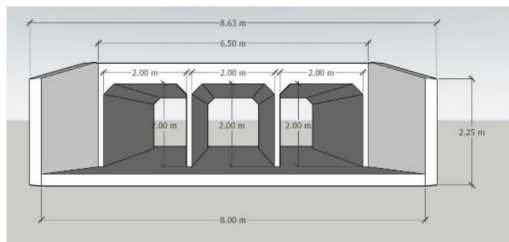
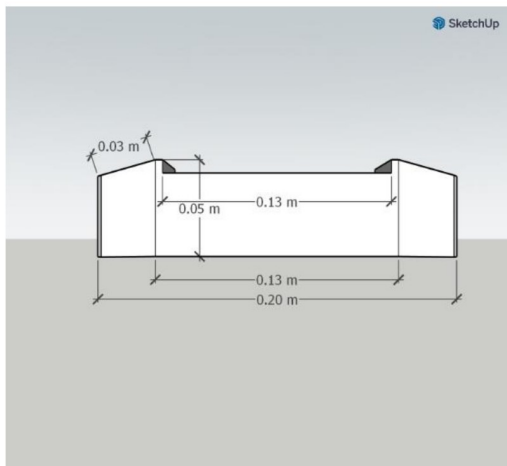


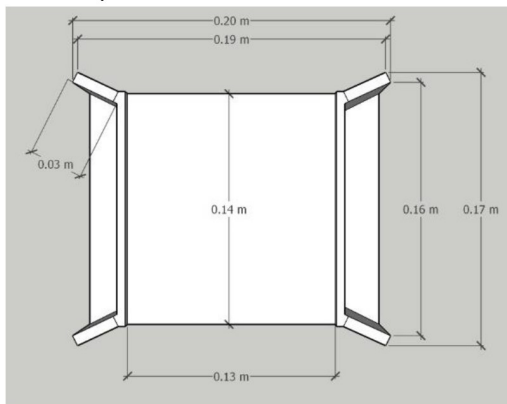
Figura 57. Medidas Box Culvert de 3 celdas reales

(Elaboración propia)

A) Vista Lateral



B) Vista Superior



C) Vista Frontal

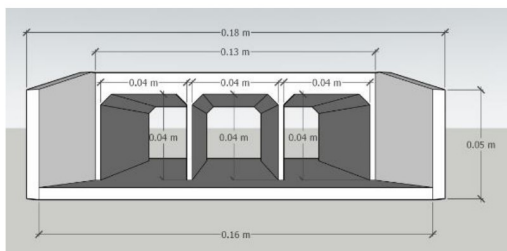


Figura 58. Medidas Box Culvert de 3 celdas con escala 1:50
(Elaboración propia)

Factores de Escalamiento Aplicables a la Investigación

1. A partir del principio de similitud de Froude:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Puesto que se cumplen las condiciones ideales entre el modelo y prototipo:

$$\frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{gL_p}}$$

y teniendo en cuenta que la gravedad es la misma en el modelo y en la realidad, se puede reescribir la ecuación como:

$$\frac{V_m}{\sqrt{L_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{L_p}}$$

2. Longitud:

$$\frac{L_m}{L_p} = \lambda_L$$

$$L_m := 0.04 \text{ m}$$

$$L_p := 2 \text{ m}$$

$$\lambda_L := \frac{L_m}{L_p} = 0.02$$

3. Área:

Recordando que área es una longitud al cuadrado:

$$\lambda_A = \lambda_L^2$$

$$\lambda_A := \lambda_L^2 = 0.0004$$

Figura 59. Cálculo de factores de escalamiento aplicables a este estudio: longitud y área (Elaboración propia)

4. Velocidad:

Despejando de la fórmula la escala de velocidad:

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{\sqrt{L_m}}{\sqrt{L_p}} = \sqrt{\frac{L_m}{L_p}}$$

y sabiendo que:

$$\frac{L_m}{L_p} = \lambda_L \quad \frac{V_m}{V_p} = \lambda_V$$

Se obtiene:

$$\lambda_V = \sqrt{\lambda_L}$$

$$\lambda_V := \sqrt{\lambda_L} = 0.141$$

5. Tiempo:

Recordando que:

$$V = \frac{d}{T}$$

Al despejar el tiempo:

$$T = \frac{d}{V}$$

Sustituyendo dichos valores por sus respectivas escalas:

$$\lambda_T = \frac{\lambda_L}{\sqrt{\lambda_L}} = \sqrt{\lambda_L}$$

$$\lambda_T := \sqrt{\lambda_L} = 0.141$$

Figura 60. Cálculo de factores de escalamiento aplicables a este estudio: velocidad y tiempo (Elaboración propia)

6. Caudal:

Recordando que:

$$Q = V \cdot A$$

Sustituyendo dichos valores por sus respectivas escalas:

$$\lambda_Q = \sqrt{\lambda_L} \cdot \lambda_L^2 = \lambda_L^{\frac{5}{2}}$$

$$\lambda_Q := \lambda_L^{\frac{5}{2}} = 0.000056569$$

Figura 61. Cálculo de factores de escalamiento aplicables a este estudio: caudal
(Elaboración propia)

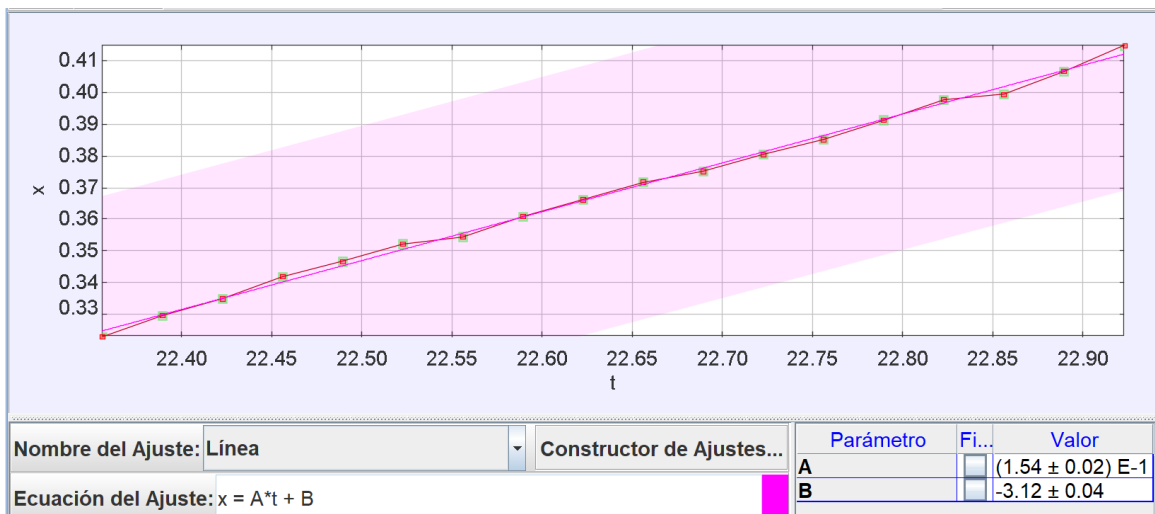


Figura 62. Box Culvert de 1 celda, velocidad de entrada, prueba 2
(Elaboración propia)

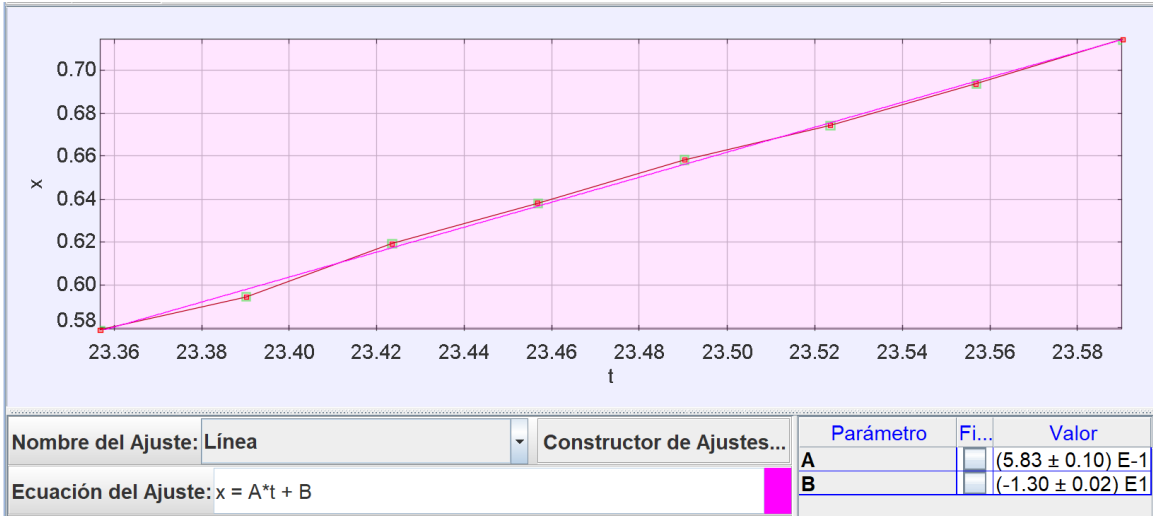


Figura 63. Box Culvert de 1 celda, velocidad de salida, prueba 2

(Elaboración propia)



Figura 64. Box Culvert de 1 celda, profundidad de entrada, prueba 2

(Elaboración propia)



Figura 65. Box Culvert de 1 celda, profundidad de salida, prueba 2
(Elaboración propia)

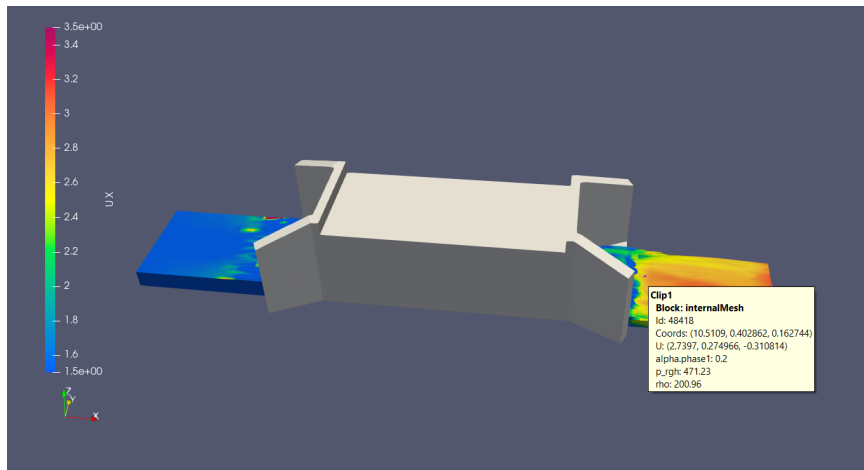


Figura 66. Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 2, Box Culvert 1 celda
(Elaboración propia)

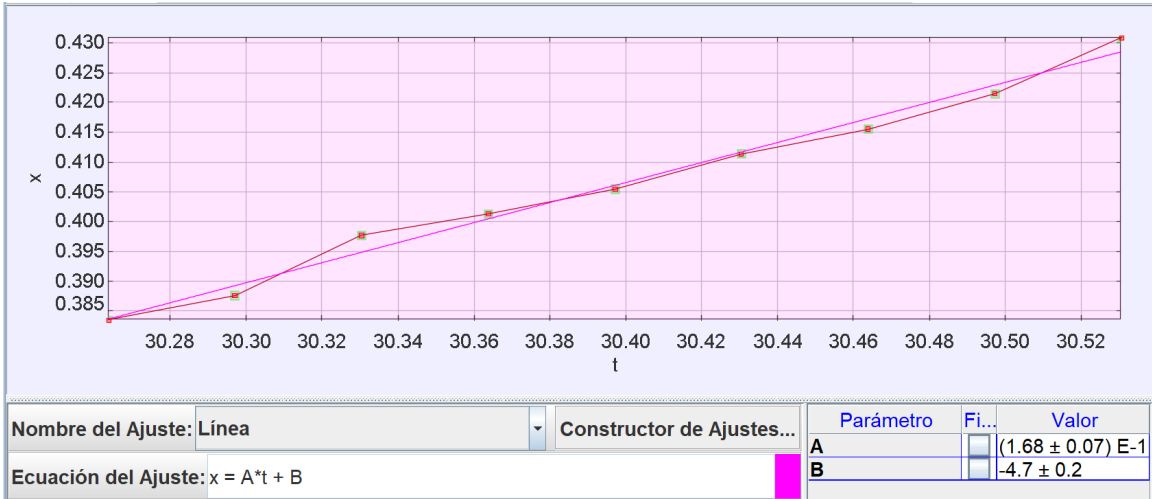


Figura 67. Box Culvert de 1 celda, velocidad de entrada, prueba 3

(Elaboración propia)

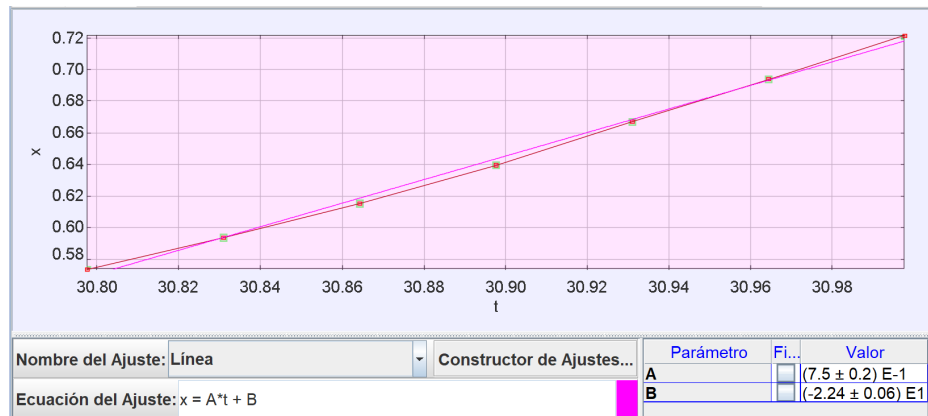


Figura 68. Box Culvert de 1 celda, velocidad de salida, prueba 3

(Elaboración propia)



Figura 69. Box Culvert de 1 celda, profundidad de entrada, prueba 3
(Elaboración propia)

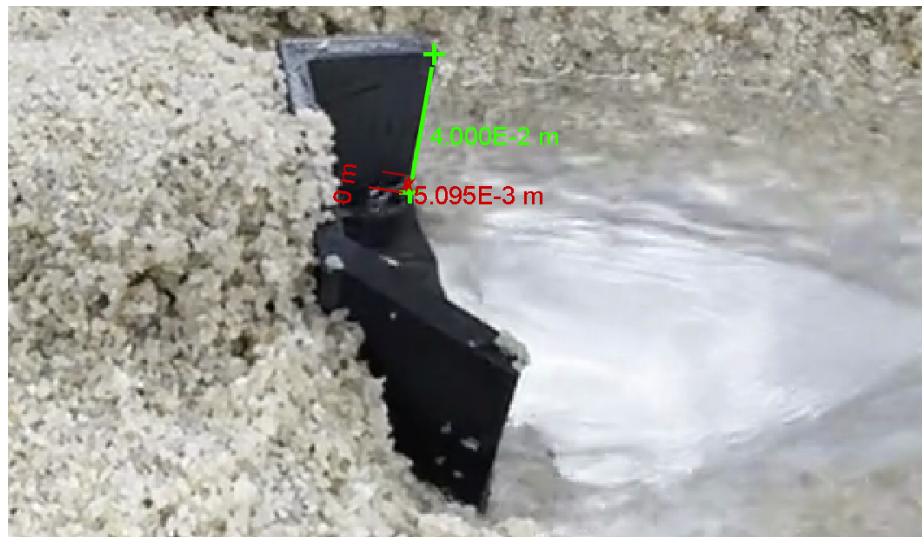


Figura 70. Box Culvert de 1 celda, profundidad de salida, prueba 3
(Elaboración propia)

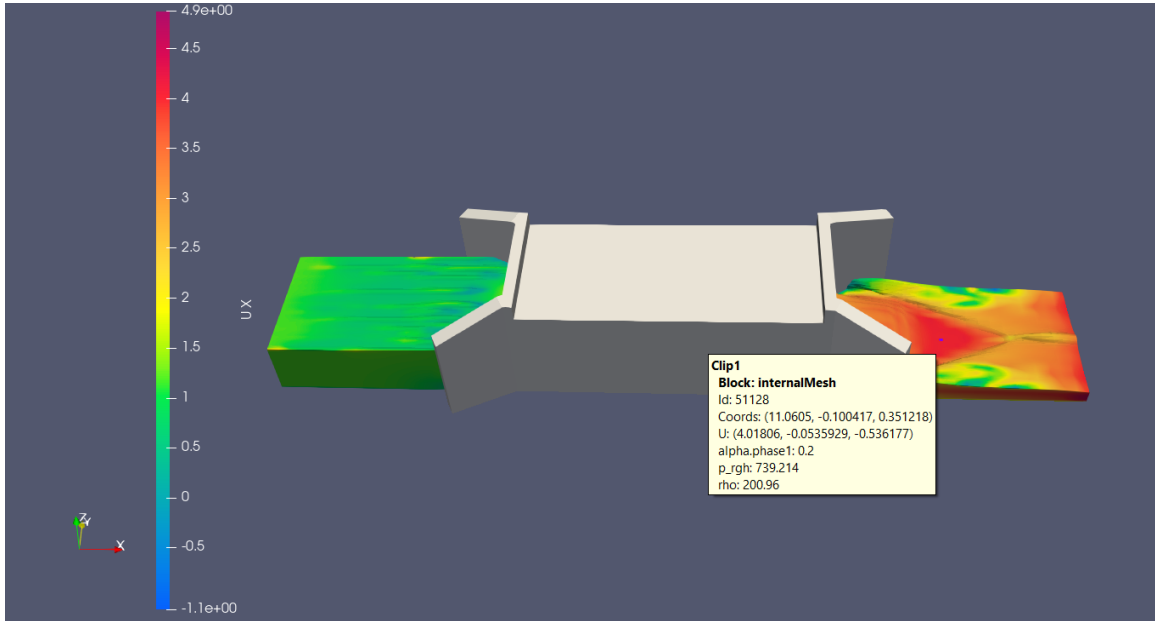


Figura 71. Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 3, Box Culvert 1 celda (Elaboración propia)

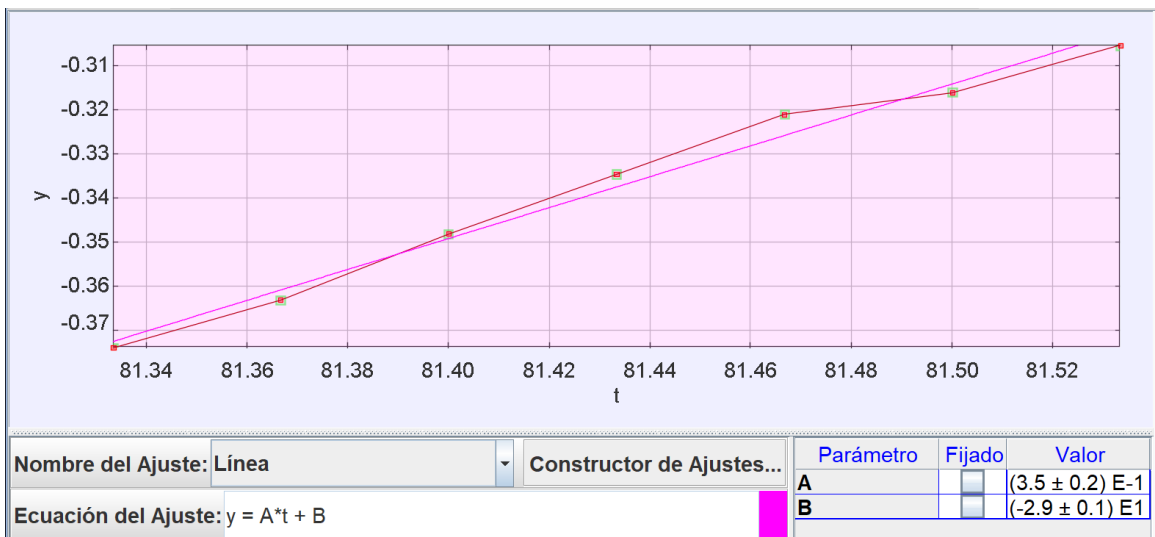


Figura 72. Box Culvert de 2 celdas, velocidad de entrada, prueba 1 (Elaboración propia)

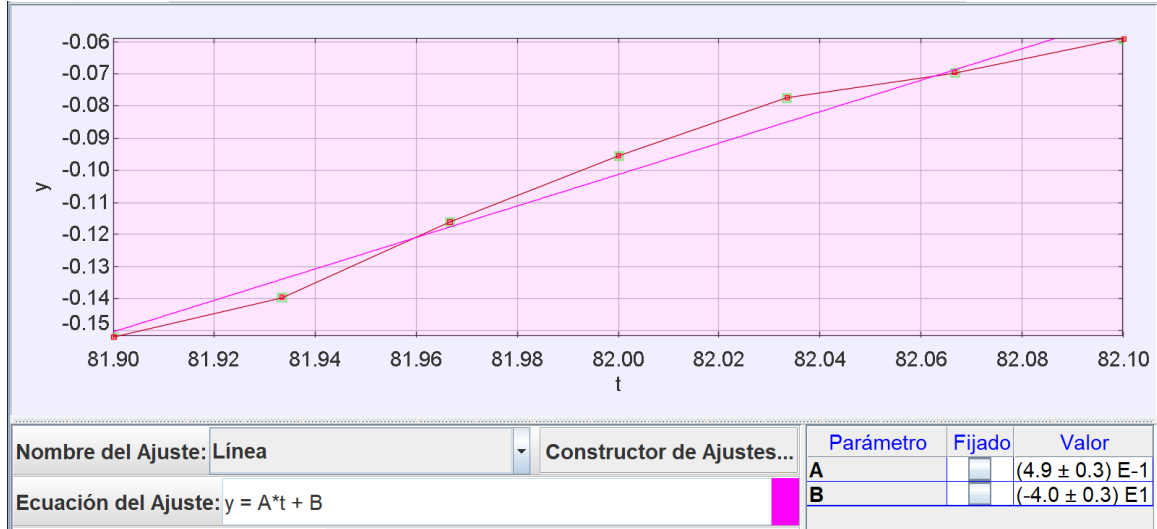


Figura 73. Box Culvert de 2 celdas, velocidad de salida, prueba 1

(Elaboración propia)

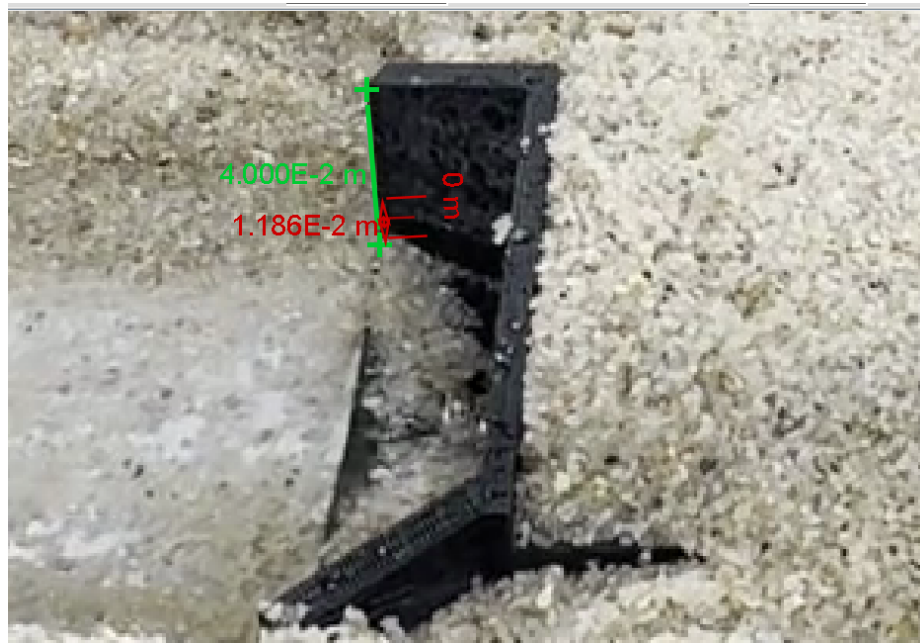


Figura 74. Box Culvert de 2 celdas, profundidad de entrada, prueba 1

(Elaboración propia)

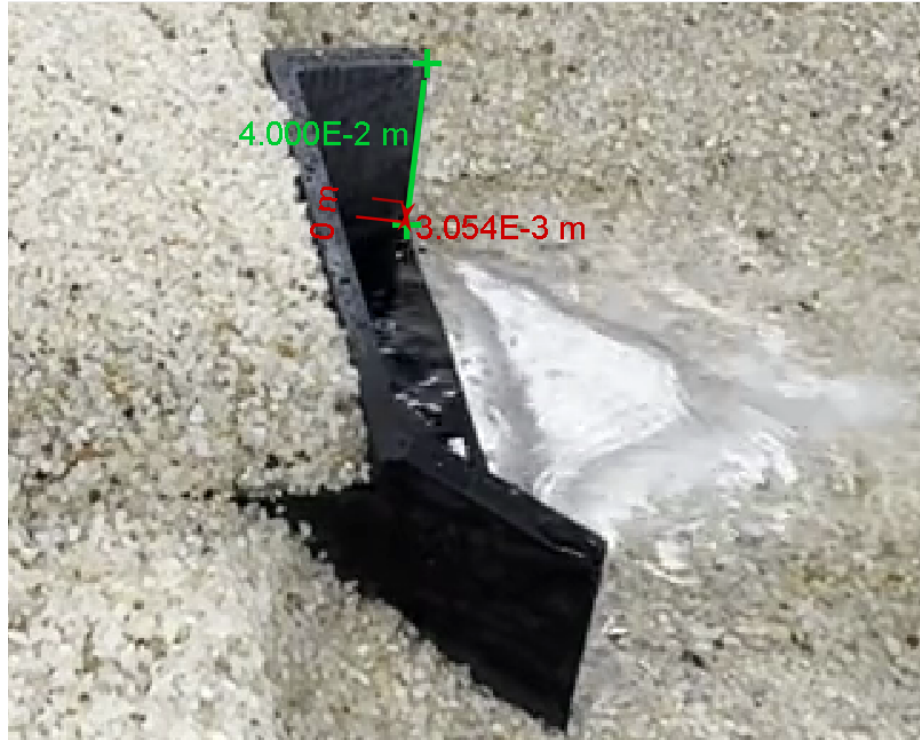


Figura 75. Box Culvert de 2 celdas, profundidad de salida, prueba 1
(Elaboración propia)

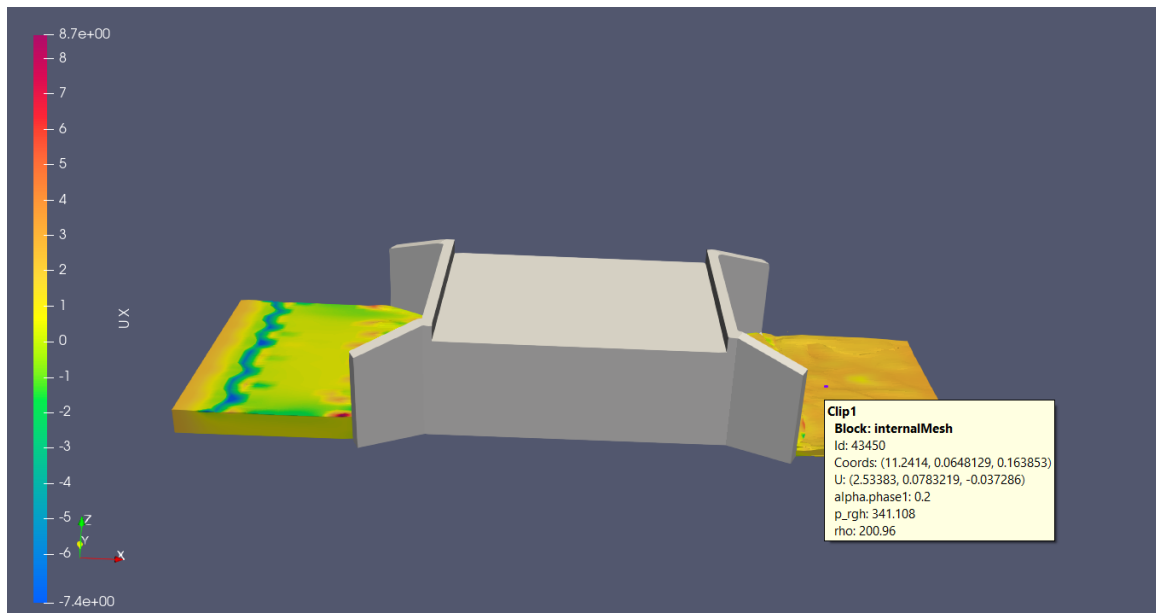


Figura 76. Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 1, Box Culvert 2 celdas
(Elaboración propia)

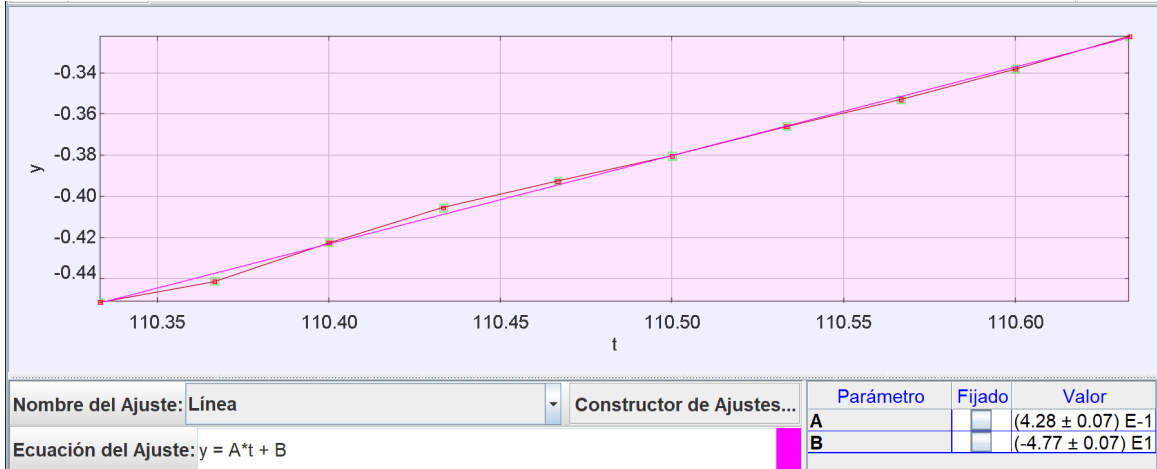


Figura 77. Box Culvert de 2 celdas, velocidad de entrada, prueba 2

(Elaboración propia)

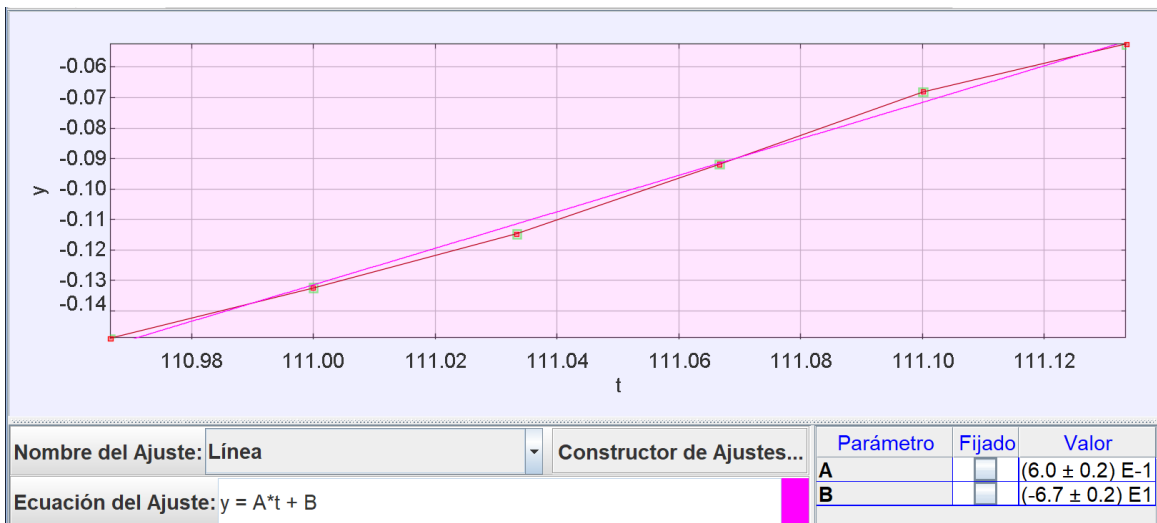


Figura 78. Box Culvert de 2 celdas, velocidad de salida, prueba 2

(Elaboración propia)

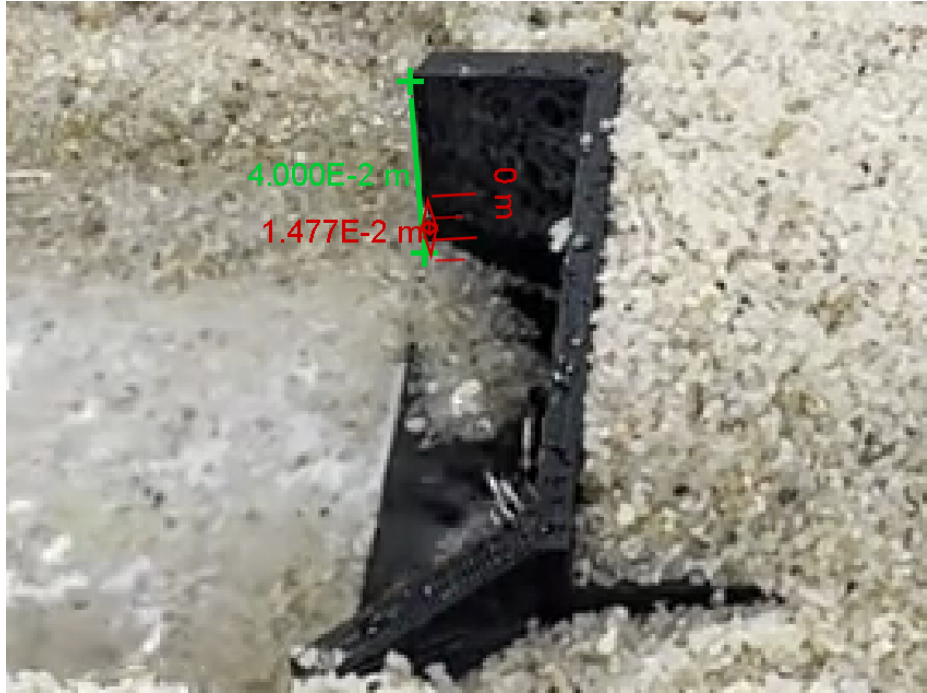


Figura 79. Box Culvert de 2 celdas, profundidad de entrada, prueba 2
(Elaboración propia)

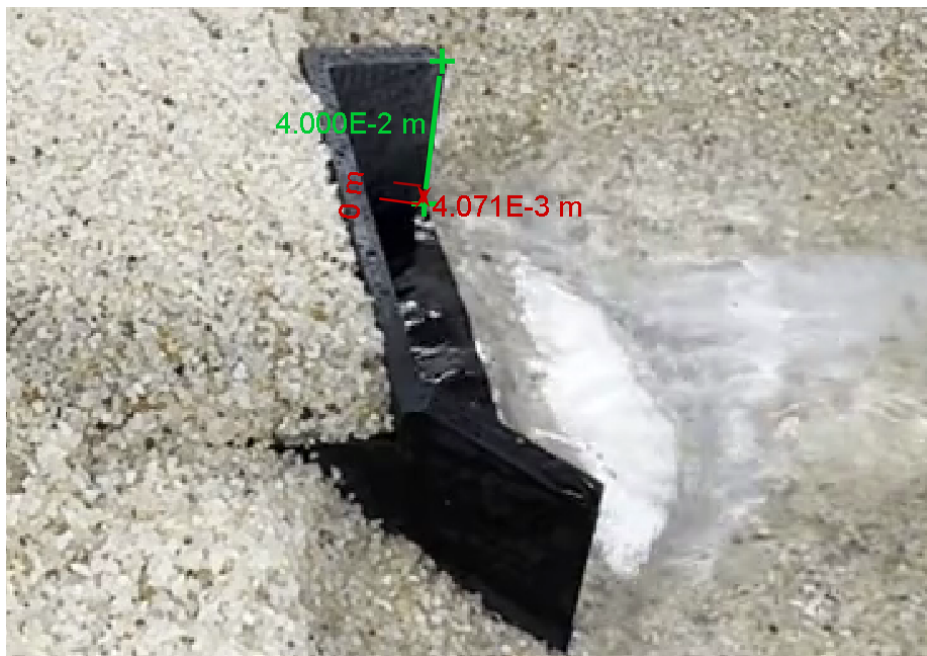


Figura 80. Box Culvert de 2 celdas, profundidad de salida, prueba 2
(Elaboración propia)

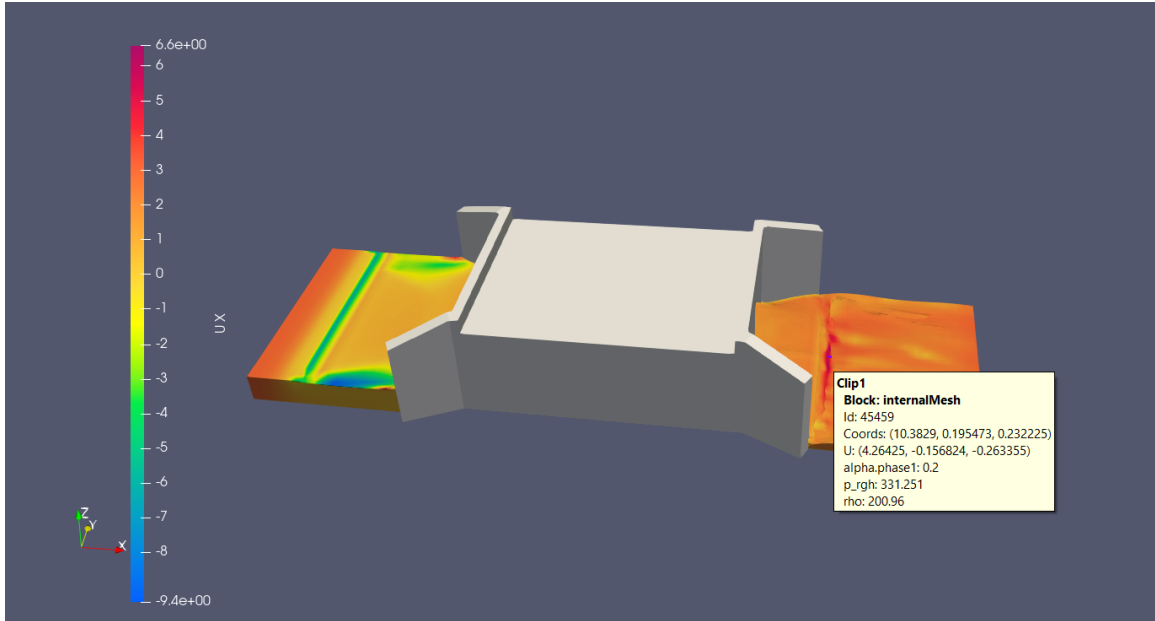


Figura 81. Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 2, Box Culvert 2 celdas (Elaboración propia)

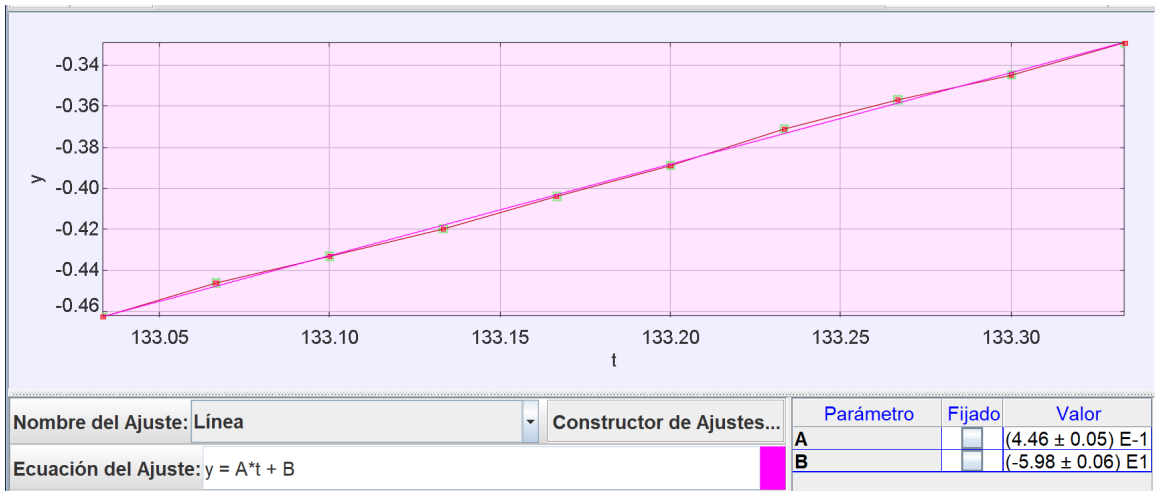


Figura 82. Box Culvert de 2 celdas, velocidad de entrada, prueba 3 (Elaboración propia)

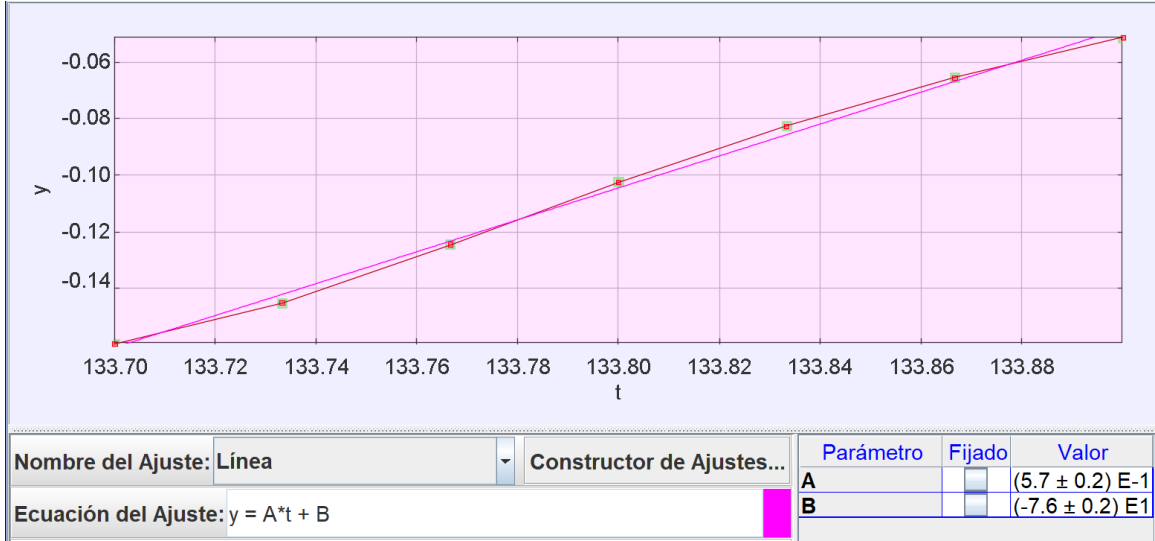


Figura 83. Box Culvert de 2 celdas, velocidad de salida, prueba 3
(Elaboración propia)

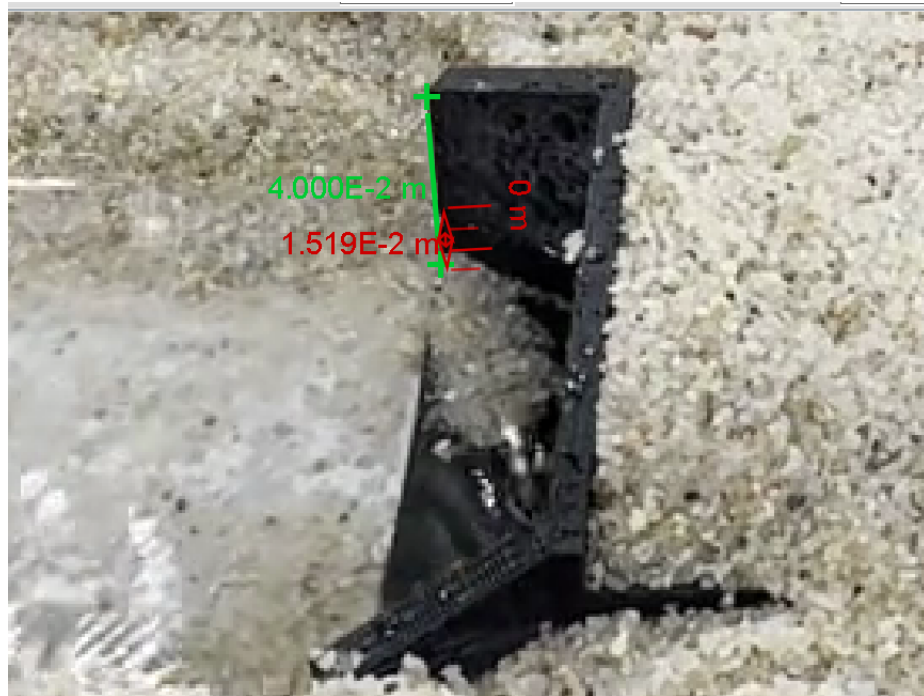


Figura 84. Box Culvert de 2 celdas, profundidad de entrada, prueba 3
(Elaboración propia)

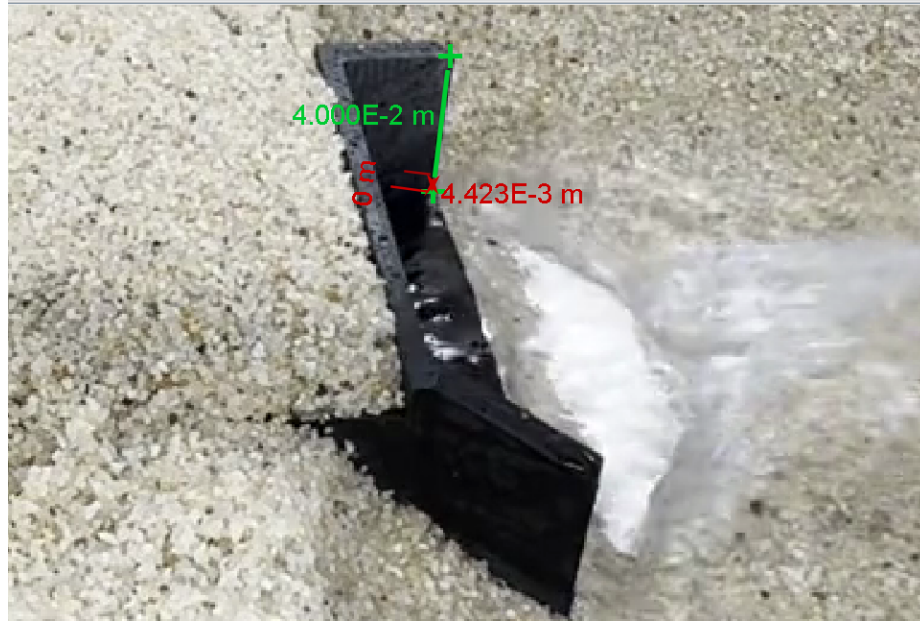


Figura 85. Box Culvert de 2 celdas, profundidad de salida, prueba 3
(Elaboración propia)

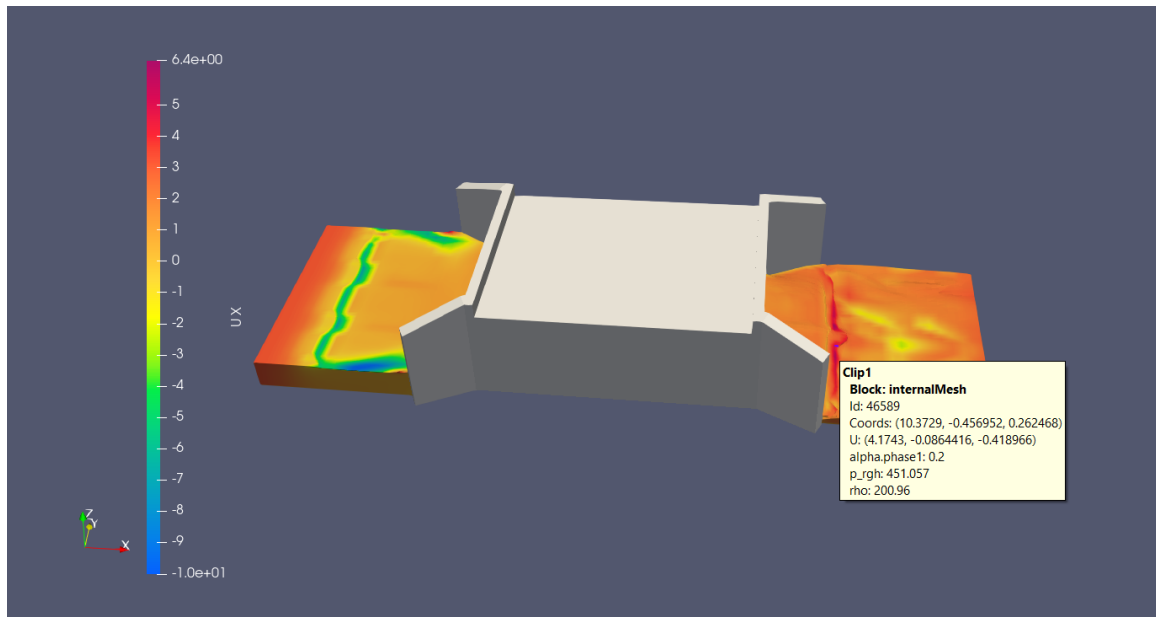


Figura 86. Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 3, Box Culvert 2 celdas
(Elaboración propia)

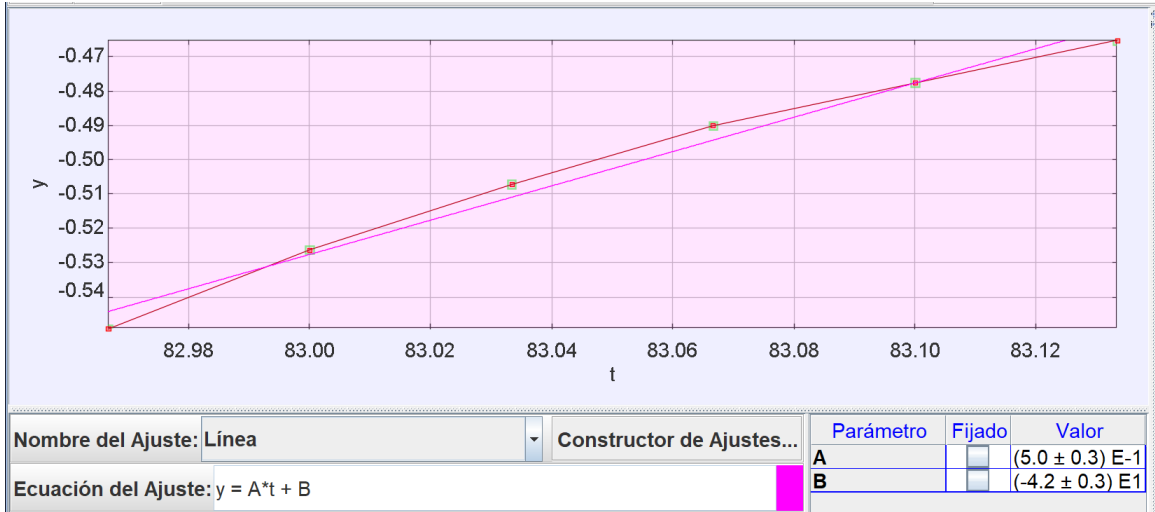


Figura 87. Box Culvert de 3 celdas, velocidad de entrada, prueba 1

(Elaboración propia)

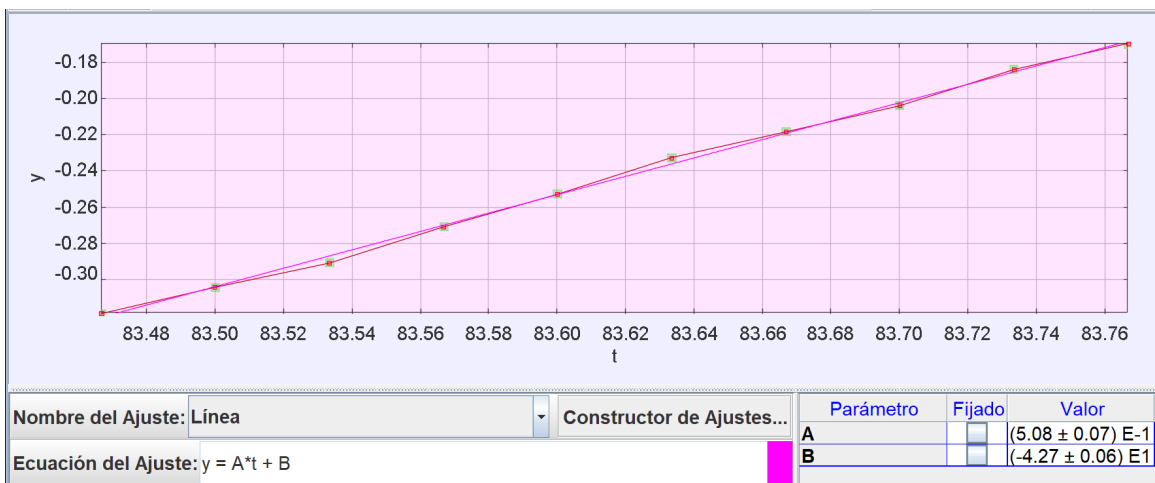


Figura 88. Box Culvert de 3 celdas, velocidad de salida, prueba 1

(Elaboración propia)



Figura 89. Box Culvert de 3 celdas, profundidad de entrada, prueba 1
(Elaboración propia)

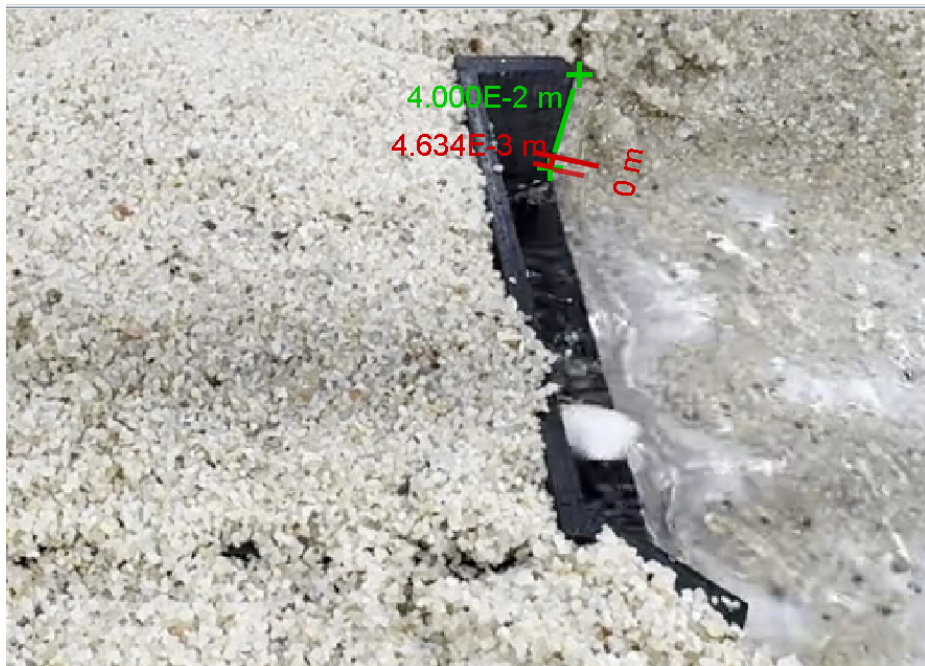


Figura 90. Box Culvert de 3 celdas, profundidad de salida, prueba 1
(Elaboración propia)

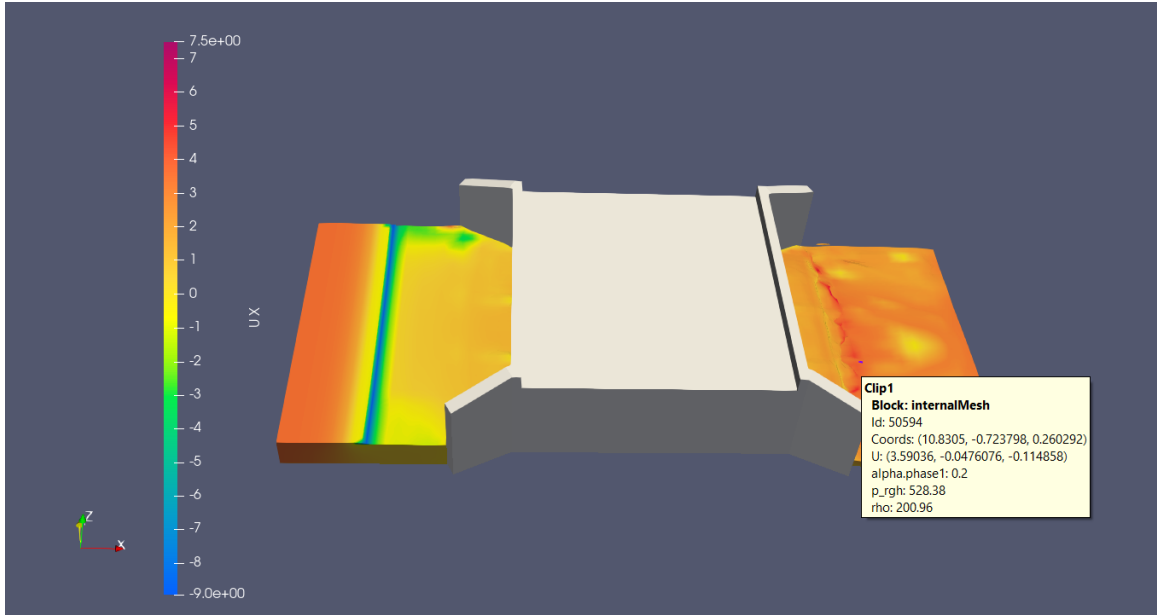


Figura 91. Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 1, Box Culvert 3 celdas (Elaboración propia)

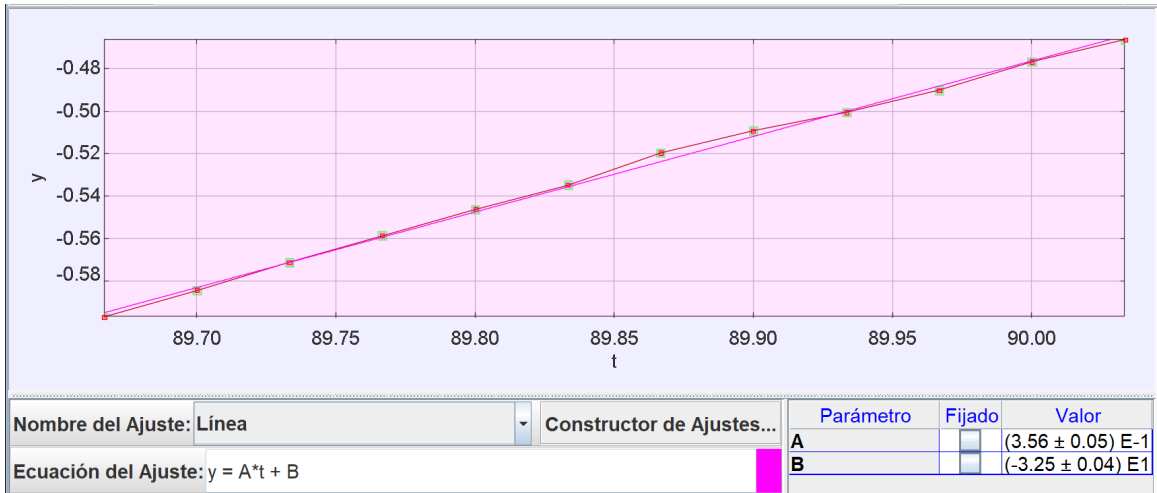


Figura 92. Box Culvert de 3 celdas, velocidad de entrada, prueba 2 (Elaboración propia)

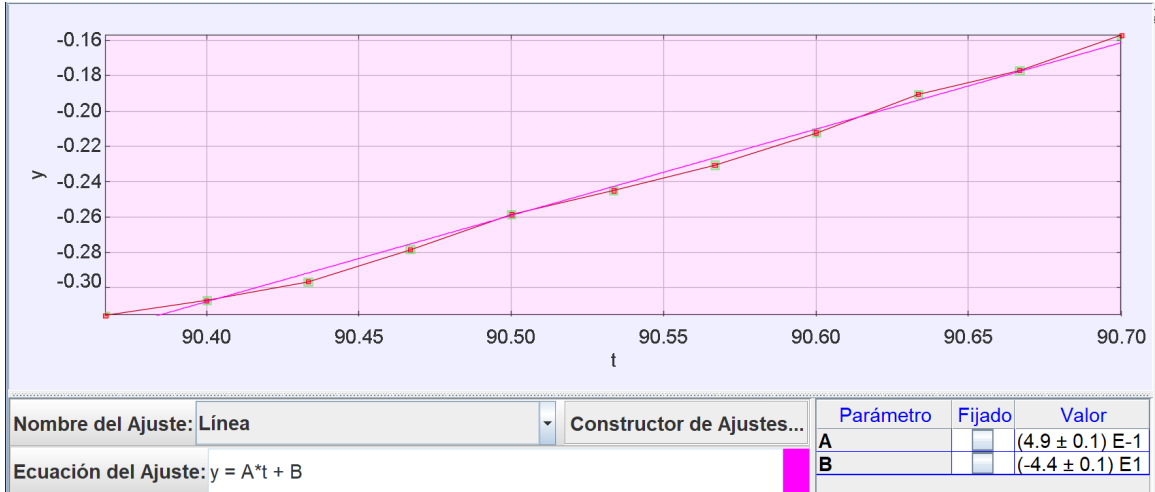


Figura 93. Box Culvert de 3 celdas, velocidad de salida, prueba 2

(Elaboración propia)

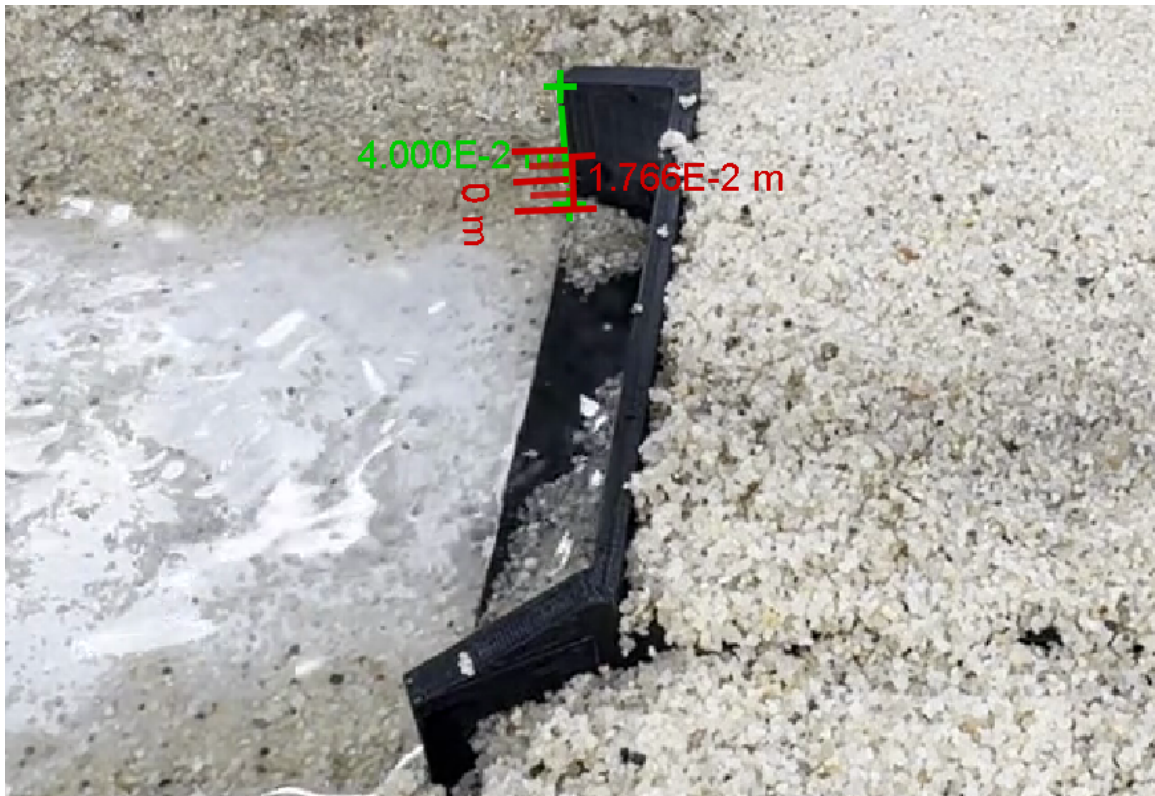


Figura 94. Box Culvert de 3 celdas, profundidad de entrada, prueba 2

(Elaboración propia)



Figura 95. Box Culvert de 3 celdas, profundidad de salida, prueba 2
(Elaboración propia)

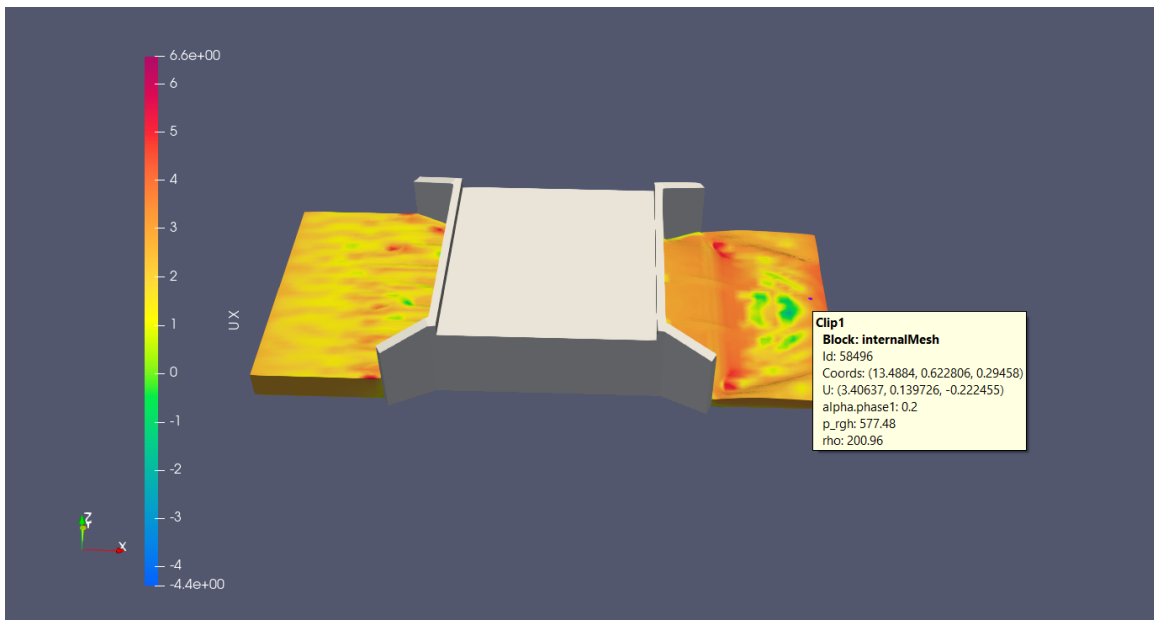


Figura 96. Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 2, Box Culvert 3 celdas
(Elaboración propia)

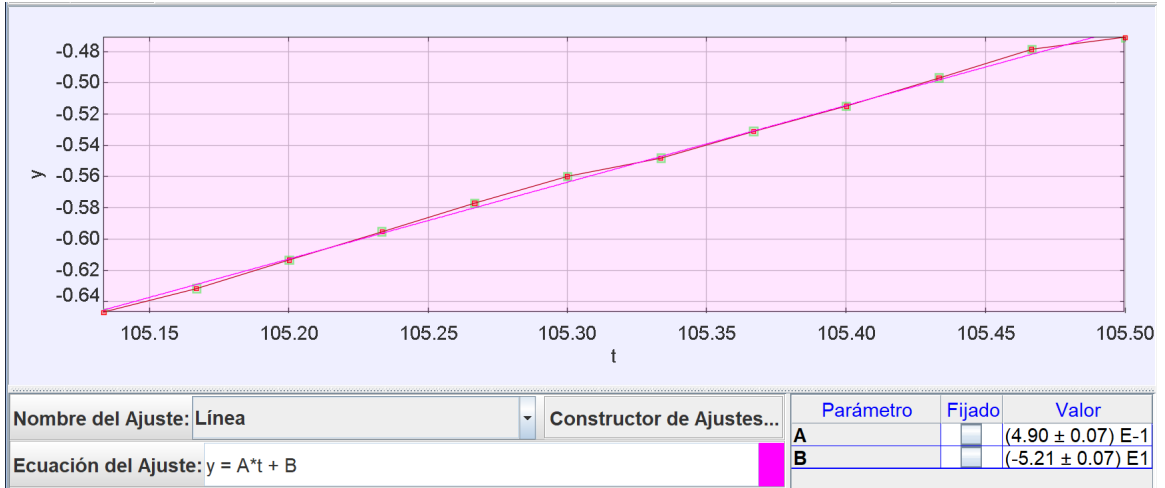


Figura 97. Box Culvert de 3 celdas, velocidad de entrada, prueba 3
(Elaboración propia)

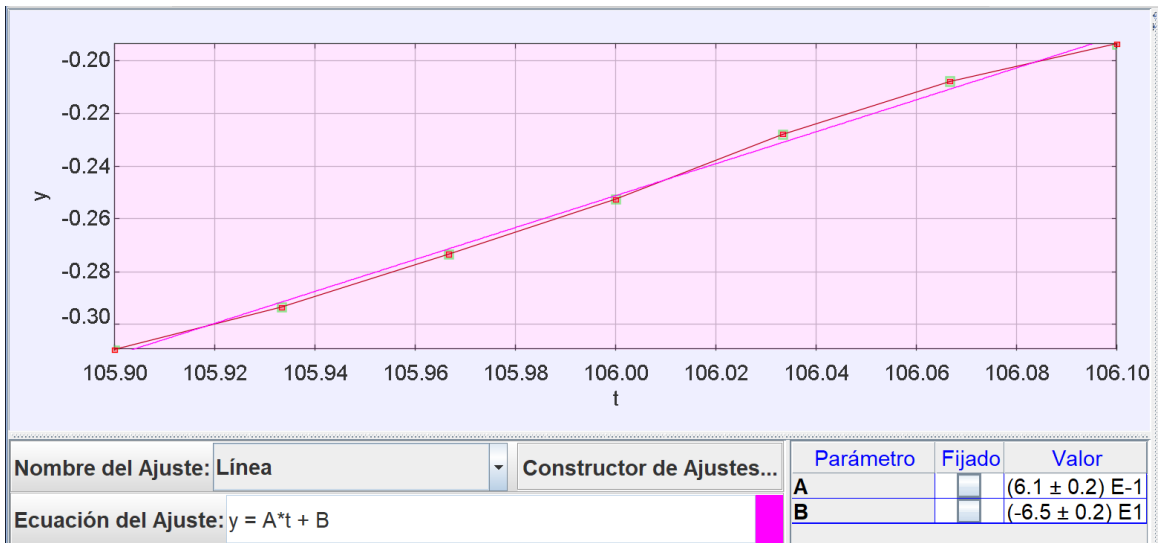


Figura 98. Box Culvert de 3 celdas, velocidad de salida, prueba 3
(Elaboración propia)



Figura 99. Box Culvert de 3 celdas, profundidad de entrada, prueba 3
(Elaboración propia)



Figura 100. Box Culvert de 3 celdas, profundidad de salida, prueba 3
(Elaboración propia)

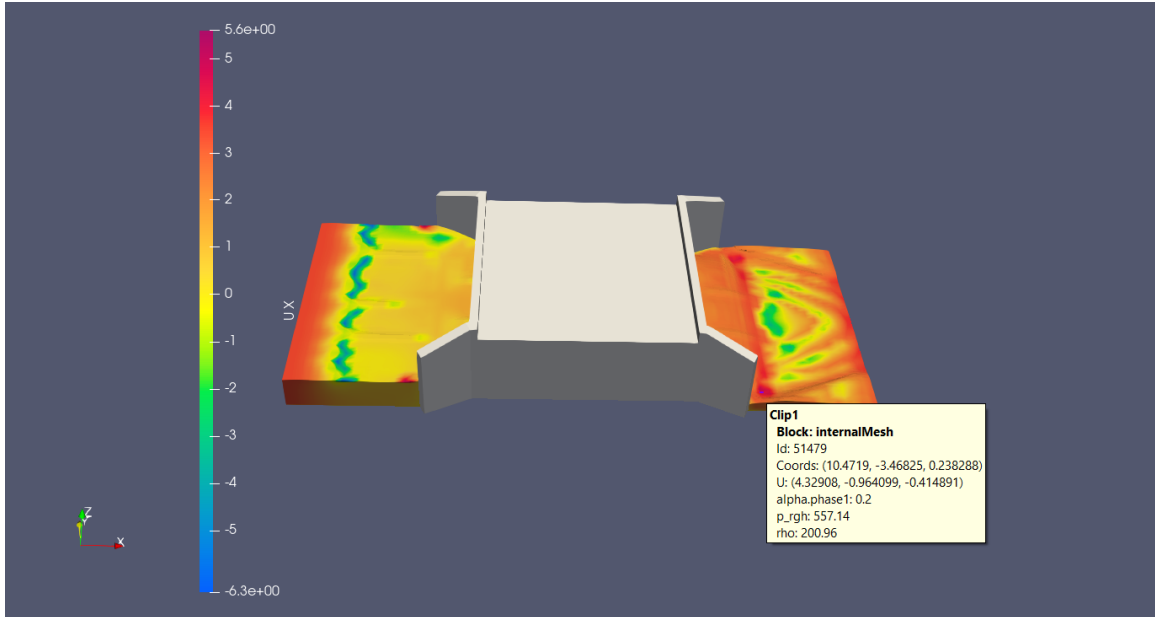


Figura 101. Velocidad final y profundidad final obtenida por software, prueba 3, Box Culvert 3 celdas (Imagen de Autoría Propia)

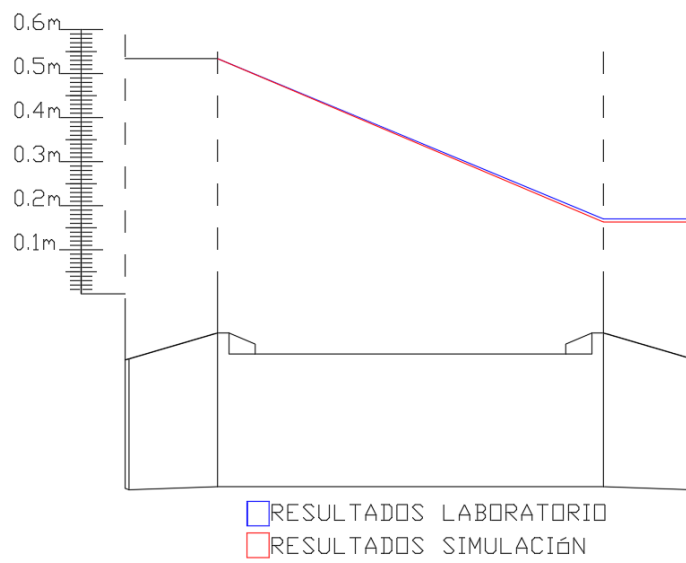


Figura 102. Carga total, Box Culvert 1 celda, prueba 1

(Elaboración propia)

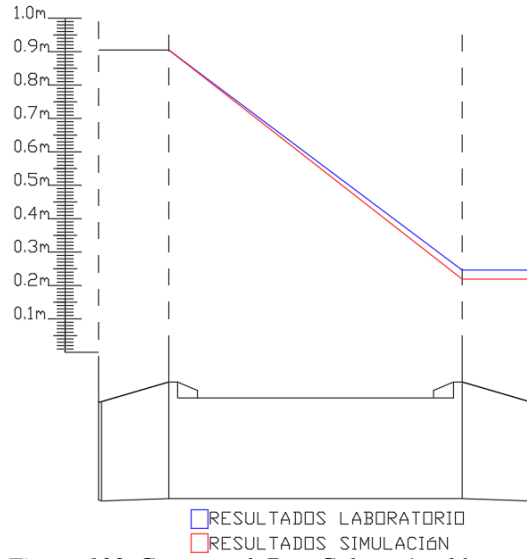


Figura 103. Carga total, Box Culvert 1 celda, prueba 2

(Elaboración propia)

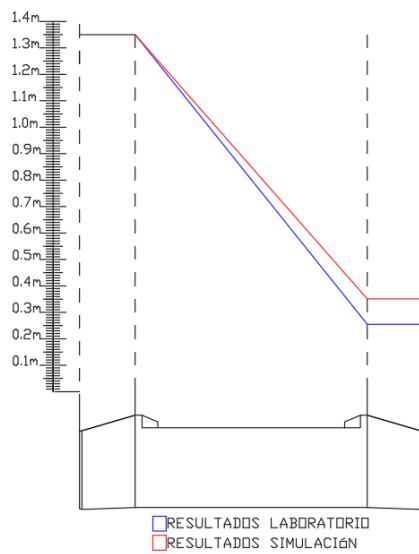


Figura 104. Carga total, Box Culvert 1 celda, prueba 3

(Elaboración propia)

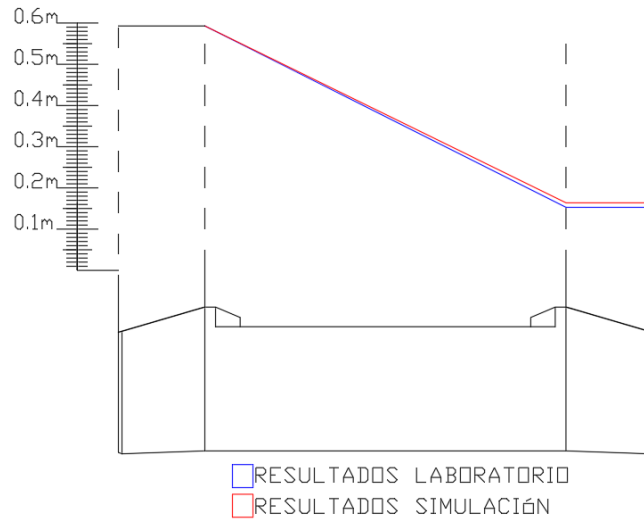


Figura 105. Carga total, Box Culvert 2 celdas, prueba 1

(Elaboración propia)

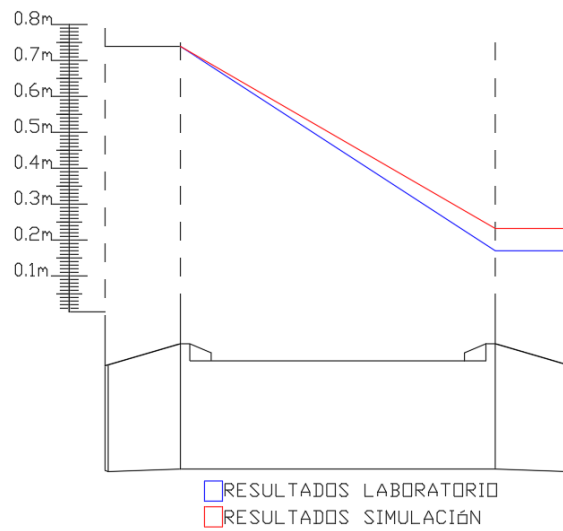


Figura 106. Carga total, Box Culvert 2 celdas, prueba 2

(Elaboración propia)

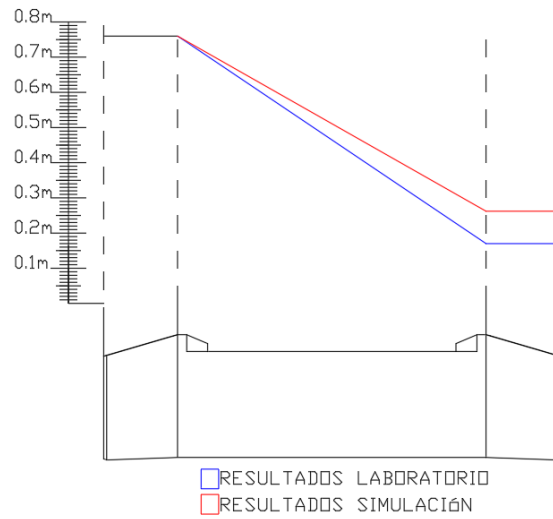


Figura 107. Carga total, Box Culvert 2 celdas, prueba 3

(Elaboración propia)

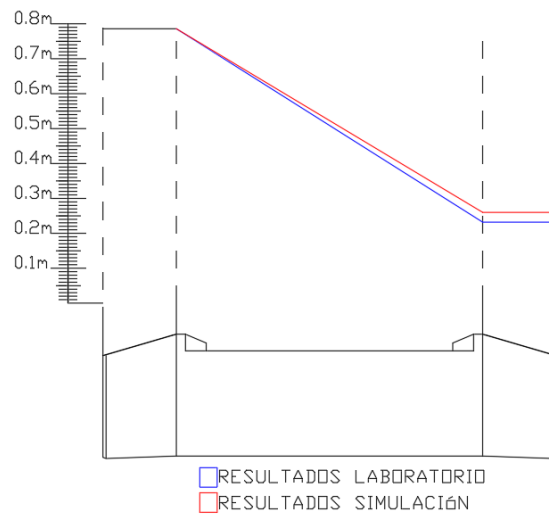


Figura 108. Carga total, Box Culvert 3 celdas, prueba 1

(Elaboración propia)

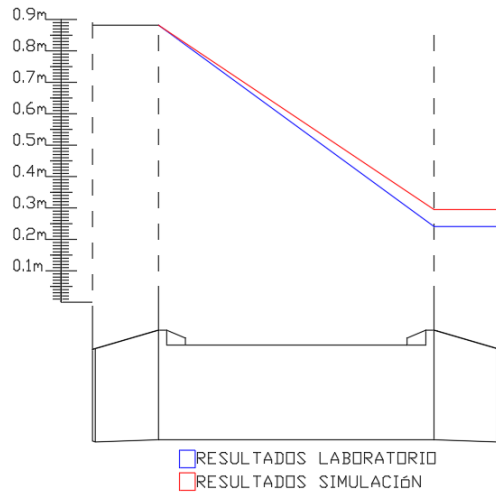


Figura 109. Carga total, Box Culvert 3 celdas, prueba 2

(Elaboración propia)

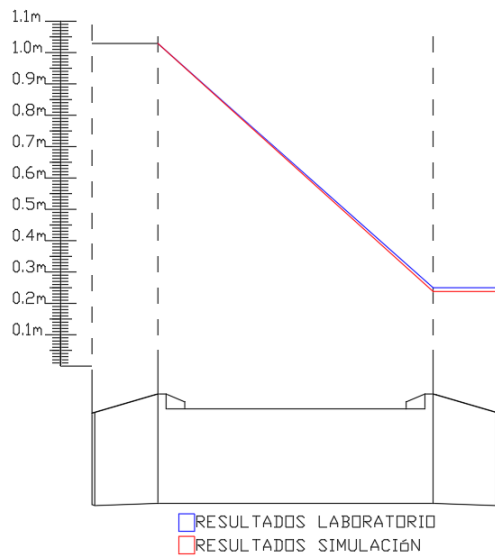


Figura 110. Carga total, Box Culvert 3 celdas, prueba 3

(Elaboración propia)