

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La aplicación de dinámica de fluidos computacional o (CFD, por sus siglas en ingles), a los diseños de obras hidráulicas favorecen a que estos sean más eficientes y de menor costo, utilizando estas herramientas tecnológicas, que son para construir modelos computacionales que pueden optar las formas de cualquier modelo hidráulica a diseñar y simular su comportamiento.

Los simuladores son herramientas para predecir y estimar con eficacia, aceptables y en muchos casos la única solución, nos permite conocer el flujo de fluidos y su comportamiento, resulta de suma importancia realizarlas para ver cómo se llegará a comportar después de ya realizado su construcción.

En presas de gravedad el uso de canales escalonados como vertederos de excedencias es común, debido a que el método utilizado en presas es compatible con la superficie escalonada de la cara aguas abajo de la cortina de la presa, la presencia de los escalones aumenta de manera considerable la resistencia al flujo, y en embalses con poca oferta del suministro de agua en su vertiente principal se utiliza el aporte indirecto de ríos o vertientes aledañas para poder almacenar lo suficiente para así, satisfacer la demanda que se tiene y los canales escalonados en aproximación a la represa con gran diferencia de cotas ayuda a reducir las velocidades que pueden llegar a presentarse y así no provocar daño al embalse.

La aplicación de un modelo computarizado en 3D aumenta la probabilidad con la que se puede estimar el comportamiento del fluido y determinar los parámetros de medición comparación y de esta manera, mejorar el diseño hidráulico de las estructuras hidráulicas y evitar daños en la superficie de la estructura.

Hoy en la actualidad Solidworks (software de diseño CAD 3D) ofrece un conjunto de herramientas completo para crear, simular, publicar, administrar datos y gestionar proyectos y procesos maximizando la innovación y la productividad de los recursos de ingeniería. Todas estas soluciones funcionan juntas para permitir a las organizaciones diseñar productos mejores, de forma más rápida y de manera más rentable.

Gracias a estas metodologías computarizadas se puede encontrar puntos críticos de una obra hidráulica en la cual se ve más afectada y determinar si los parámetros de diseños son los más óptimos de diseño.

La investigación está referido a la simulación del canal de trasvase del agua del río Huacata a el embalse, que este canal es un suministro importante debido a las condiciones climatológicas y por la zona en que se encuentra, existe escases de agua.

1.2. Descripción del problema

El canal de trasvase que conduce al embalse de una represa desencadena un desafío hidráulico significativo debido a su transición abrupta a un vertedero escalonado. Esta estructura, diseñada para disipar la energía del flujo y regular el caudal antes de ingresar al embalse, enfrenta condiciones críticas debido a la curva que debe seguir el flujo antes de alcanzar la represa. Esta curva introduce variaciones extremas en la velocidad y la dirección del flujo, lo que resulta en una distribución no uniforme de las fuerzas hidráulicas a lo largo del canal.

El diseño actual del canal y su disposición como un vertedero escalonado han sido implementados con el propósito de minimizar la erosión del lecho y las pérdidas de energía, sin embargo, las condiciones hidráulicas específicas en la curva antes de la recta plantean preocupaciones adicionales. Se ha observado que estas condiciones pueden generar turbulencia y vórtices significativos, lo que podría aumentar los niveles de erosión y desgaste en las superficies del canal.

La erosión resultante podría tener efectos adversos en la estabilidad y el rendimiento del canal, así como en la integridad estructural del embalse mismo. Por lo tanto, es crucial comprender en detalle los procesos de erosión y desgaste que están ocurriendo en esta ubicación específica del canal para implementar medidas de mitigación efectivas y garantizar la seguridad y la eficiencia a largo plazo de la infraestructura hidráulica.

La investigación se centra en abordar este problema mediante la aplicación de simulaciones hidráulicas avanzadas utilizando CFD al analizar el flujo de agua en la curva y estudiar los patrones de erosión y desgaste resultantes en las superficies del canal, se espera proporcionar una comprensión más profunda de los procesos hidráulicos involucrados y sus efectos en la integridad estructural del canal.

1.3. Planteamiento del problema

¿Las herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) son efectivas para la determinación y análisis del comportamiento de los fluidos en vertederos escalonados, abarcando aspectos como la velocidad, caudal, presión y puntos críticos?

1.4. Justificación de la investigación

La importancia de este trabajo de investigación radica en su contribución al campo de la ingeniería hidráulica, al abordar la necesidad de comprender el comportamiento de los fluidos en estructuras complejas como canales de trasvase con vertederos escalonados y curvas pronunciadas. La optimización del diseño de estas estructuras es esencial para garantizar un flujo eficiente y seguro hacia la presa, lo que no solo mejora la eficacia de los sistemas hidráulicos, sino que también promueve la seguridad de las infraestructuras.

Esta investigación aporta información novedosa al campo al ofrecer nuevos conocimientos sobre la interacción entre los fluidos y las estructuras hidráulicas complejas presentes en un canal de trasvase. Mediante la simulación computacional con Solidworks y Flow Simulation, se obtendrán datos detallados y precisos que permitirán comparar diferentes escenarios y evaluar su impacto en el flujo de agua hacia el embalse. Estos resultados no solo enriquecerán la base de conocimientos existente, sino que también proporcionarán una base sólida para futuras investigaciones en el área.

La investigación resuelve problemas significativos al abordar la necesidad de optimizar el diseño de canales de trasvase para garantizar un flujo eficiente y seguro, especialmente en áreas con vertederos escalonados y curvas pronunciadas. Al identificar los posibles problemas y proponer soluciones basadas en los resultados de la simulación, se contribuirá a mejorar la eficiencia y seguridad de la infraestructura hidráulica, lo que tendrá un impacto positivo en la ingeniería civil y en la gestión sostenible del agua.

Por tanto, esta investigación se llevará a cabo con el objetivo de ampliar el conocimiento en el campo de la ingeniería hidráulica y ofrecer soluciones innovadoras y sostenibles para el diseño y gestión de sistemas hidráulicos complejos. La investigación busca mejorar la comprensión de los fenómenos fluidodinámicos en canales de trasvase, con el propósito de optimizar su funcionamiento y contribuir al desarrollo de infraestructuras hidráulicas más eficientes y seguras.

1.5. Hipótesis

Las herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) son eficientes para determinar y analizar el comportamiento de los fluidos en vertederos escalonados, incluyendo variables como velocidad, caudales, presión y puntos críticos.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento del flujo de agua en el vertedero escalonado mediante el manejo del modelo y simulación de la estructura con CFD para contribuir al manejo de información sobre los diseños de vertederos escalonados.

1.6.2. Objetivos específicos

- Analizar la información disponible sobre la estructura en estudio.
- Realizar una visita técnica para el levantamiento topográfico con la toma de coordenadas y dimensiones de la parte del canal de trasvase a ser estudiado, en cada escalón para tener mayor cantidad de datos y menor margen de error para así realizar los planos con los datos obtenidos para realizar el modelamiento en el programa.
- Establecer los puntos más críticos donde se generan los desgastes de la estructura hidráulica para el análisis y los puntos que serán comparados después de haber obtenido los datos de la simulación y practica en campo con las mediciones con el molinete.
- Modelar el vertedero escalonado en un espacio CAD tridimensional en el programa Solidworks con la información disponible y de una forma que se respete los parámetros de diseño de los planos realizados.
- Simular el comportamiento hidráulico del flujo de agua sobre la estructura en la herramienta Flow Simulation (simulación de fluidos) con todos los parámetros y condiciones ya establecidos para el diseño con el caudal de diseño y con el caudal obtenido con las mediciones del molinete.

- Analizar, interpretar y comparar los resultados obtenidos por el programa de varias simulaciones realizadas en el programa 3D Solidworks con respecto a los parámetros establecidos con la medición en campo.
- Establecer conclusiones y recomendaciones con respecto a los resultados obtenidos.

1.7. Metodología de la investigación

1.7.1. Recolección de información

Los datos e información del proyecto se han obtenido por medio personal entregada por docente-guía, la cual contenía información básica del proyecto Huacata, resumen ejecutivo y con planos de apoyo para mayor referencia para realizar el modelo.

1.7.2. Material

Para el proyecto se utilizaron los siguientes materiales:

- Trabajo de gabinete, se utilizó una computadora la cual contaba con el programa Solidworks y programas necesarios para realizar la investigación.
- Trabajo en campo, se utilizó materiales de medición tanto geométrico como el molinete para las velocidades y la estación total para el levantamiento topográfico.

1.7.3. Plan de trabajo

- Se analizó toda la información proporcionada sobre el proyecto Huacata y se seleccionó la información más importante y necesaria para esta investigación.
- Primera visita técnica a la represa Huacata se realizó el levantamiento topográfico del canal de trasvase con Estación Total y GPS del laboratorio de topografía de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”, tramo final con un vertedero escalonado, donde se realizó la investigación.

- Con los puntos de coordenadas obtenidos al inicio del canal y cada escalón, con las medidas tomadas al canal, a los escalones, alturas de muro, se procedió a realizar los planos.
- En la segunda visita técnica se procedió con la práctica del molinete para tomar los datos de verificación en los puntos establecidos como ser los más críticos por los cambios de direcciones bruscas.
- En el programa Solidworks realizamos el modelaje por “piezas o bloques” ya definidas de la estructura en un solo bloque compuesto, ya que resulta ser más práctico y con menor margen de error que cuando se ensamblan piezas y respetando las coordenadas y medidas de los planos.
- Para iniciar con la simulación se tendrá que activar el complemento del programa Solidworks que es el Flow Simulation, el cual nos permite realizar las simulaciones de dinámicas de fluidos computacional en el cual se introducirá los parámetros de diseño geométrico y de conducción del canal, incluyendo también las características del terreno para poder obtener un resultado más preciso, real y óptimo el cual tendrá más similitud con lo que pasa con la realidad y así poder observar y analizar los resultados de todas las simulaciones que se lleguen a hacer para que el programa lo perciba de mejor manera lo que se está estudiando.
- En el análisis de los resultados obtenidos de las simulaciones se pudo determinar la similitud con los parámetros medidos en la práctica desgastando el vertedero escalona de forma irregular y en puntos en específicos y realizar la comparación de los resultados frente a variaciones dadas a los parámetros para ver cual se adapta mejor a la realidad y los beneficios que traen las simulaciones a los diseños de construcciones como herramientas.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Programa Solidworks

Solidworks es un programa de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. El software ofrece un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo del producto. Sus productos ofrecen la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño. (SolidBI, s. f.)

El programa permite modelar “piezas o bloque” y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en traspasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada.

2.1.1. Historia y Evolución

SOLIDWORKS Corp. fue fundada en 1993 por Jon Hirschtick con sede en Massachusetts. En el año 1995 lanzó su primera versión del CAD 3D al mercado y en 1997 fue adquirida por Dassault Systemes convirtiéndose en una filial de ésta.

Antes de que Solidworks Corp. se convirtiera en filial de Dassault Systemes, la industria necesitaba de un software que combinara el modelado en 3D con la facilidad de uso del escritorio.

En 1993, el fundador de Solidworks, Jon Hirschtick, contrató a un equipo de ingenieros con el objetivo explícito de hacer que la tecnología CAD 3D fuera más accesible para todos. Y así lo hicieron desarrollando la primera tecnología de CAD en 3D que se ejecutaba en la plataforma de Windows. En el año 1995 lanzaron su primera versión del CAD 3D al mercado y en dos meses la herramienta ganó reconocimientos por su facilidad de uso.

En 1997 el gigante mundial de tecnología Dassault Systemes S.A. adquirió Solidworks como filial por 310 millones de dólares.

Hoy Solidworks ofrece un conjunto de herramientas completo para crear, simular, publicar, administrar datos y gestionar proyectos y procesos maximizando la innovación y la productividad de los recursos de ingeniería. Todas estas soluciones funcionan juntas para permitir a las organizaciones diseñar productos mejores, de forma más rápida y de manera más rentable.

Manteniendo su propuesta de valor asociada a la facilidad de uso de la herramienta, ha seguido creando nuevos productos que resuelven situaciones específicas dentro del proceso de desarrollo del producto, ahorrando tiempo y dinero. Actualmente Solidworks presenta soluciones de Fabricación Inteligente, diseño y análisis, diseño eléctrico y electrónico, gestión de datos, proyectos y procesos. (SolidBI, s. f.)

2.1.2. Soluciones que ofrece Solidworks

Solidworks ofrece soluciones intuitivas para cada fase de diseño. Cuenta con un completo conjunto de herramientas que le ayudan a ser más eficaz y productivo en el desarrollo de sus productos en todos los pasos del proceso de diseño. La sencillez que es parte de su propuesta de valor, es decisiva para lograr el éxito de muchos clientes.

La solución de Solidworks incluye cinco líneas de productos diferentes:

- Herramientas de diseño para crear modelos y ensamblajes.
- Herramientas de diseño para la fabricación mecánica, que automatiza documentos de inspección y genera documentación sin planos 2D.
- Herramientas de simulación para evaluar el diseño y garantizar que es el mejor posible.
- Herramientas que evalúan el impacto medioambiental del diseño durante su ciclo de vida.
- Herramientas que reutilizan los datos de CAD en 3D para simplificar el modo en que las empresas crean, conservan y utilizan contenidos para la comunicación técnica.
- Finalmente, todas estas herramientas están respaldadas por Solidworks PDM para gestionar y controlar de forma segura los datos mediante una única fuente de datos reales de sus diseños y Solidworks Manage, una herramienta que gestiona los

procesos y proyectos implicados en todo el desarrollo del producto y está conectado al proceso de diseño.

Todas estas soluciones funcionan de forma conjunta para permitir que las empresas mejoren la fabricación de sus productos y los elaboren de forma más rápida y económica. (SolidBI, s. f.)

2.2. Dinámica de fluidos computacional o CFD

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics) es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, Aero acústica etc. El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que rigen el flujo fluido tienen origen en la mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos.

La principal ecuación resuelta vía Fluido dinámica Computacional es la ecuación de transporte de la variable de interés, representada por el símbolo ϕ .

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{Tiempo}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Advección}} = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Difusión}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Fuente}}$$

(2.1)

Donde:

- la variable ϕ .
- el coeficiente de difusión Γ .
- la fuente S .

Todas las ecuaciones de conservación resueltas en Dinámica de Fluidos Computacional poseen la forma anterior, con cuatro términos: el término de tiempo, el término advectivo,

el término difusivo y el término fuente. Para representar diferentes ecuaciones de conservación se alteran sólo tres componentes de la ecuación.

Por ejemplo, para la ecuación de conservación de masa (o continuidad), la variable Φ es igual a 1, el coeficiente de difusión y la fuente son nulos. A pesar de la fórmula ser ampliamente utilizada para aplicaciones CFD, se puede afirmar que hasta el momento no existe solución analítica de la ecuación arriba. De esa forma, es necesario resolverla por medio de algún método de discretización. (ESSS, 2016)

2.2.1. Discretización

Los métodos de discretización más difundidos, son el método de las diferencias finitas. El método de los elementos finitos y el método de los volúmenes finitos, siendo este último el más utilizado en Dinámica de Fluidos Computacional. Con esos métodos, se intercambia el dominio continuo por un dominio discreto, donde un conjunto de volúmenes de control es utilizado para representar el dominio original. (ESSS, 2016)

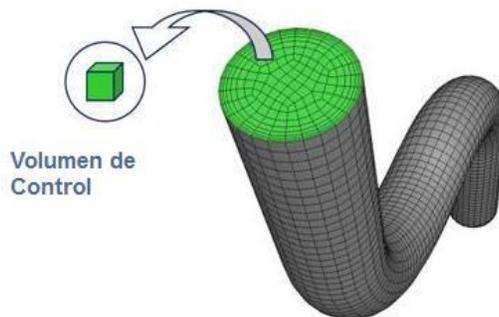


Figura 2.1. El dominio es discretizado en pequeños volúmenes y la ecuación algebraica es resuelta para cada uno de esos elementos.

Fuente: ESSS, 2016.

2.2.1.1. Método de elementos finitos

La geometría de la pieza, sometida a cargas y restricciones, se subdivide en partes más pequeñas, conocidas como “elementos”, que representan el dominio continuo del problema. La división de la geometría en pequeños elementos resuelve un problema complejo, al subdividirlo en problemas más simples, lo que permite a la computadora hacer las tareas con eficiencia.

El método propone que un número infinito de variables desconocidas, sean sustituidas por un número limitado de elementos de comportamiento bien definido. Esas divisiones pueden tener diferentes formas, tales como triangular, cuadrangular, entre otros, dependiendo del tipo y tamaño del problema. Como el número de elementos es limitado, son llamados de “elementos finitos”.

Los elementos finitos están conectados entre sí por puntos, que se llaman nodos o puntos nodales. Al conjunto de todos estos ítems – elementos y nodos – se lo denomina malla. Debido a las subdivisiones de la geometría, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico no se resolverán de una manera exacta, sino aproximada por este método numérico. La precisión de los Métodos dos Elementos Finitos depende de la cantidad de nodos y elementos, del tamaño y de los tipos de elementos de la malla. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una malla, más precisos serán los resultados del análisis. (Mirlisenna, 2016)

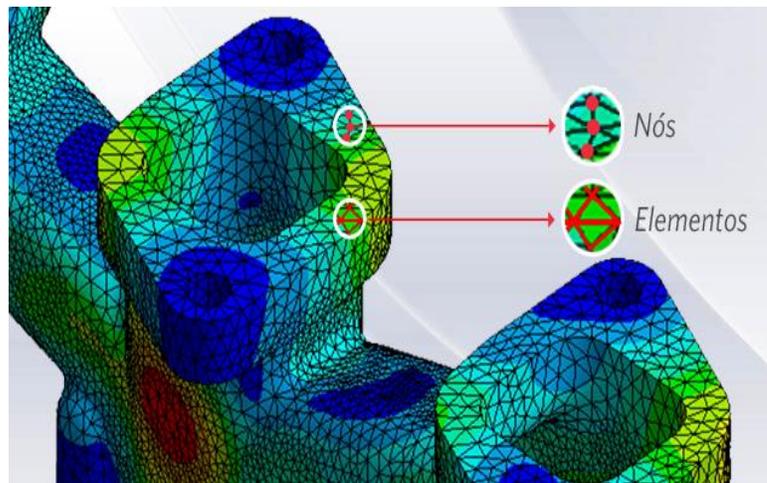


Figura 2.2. Nodos y elementos de una malla.

Fuente: Mirlisenna, 2016.

2.2.1.2. Método de volúmenes finitos

Soluciones analíticas de las ecuaciones de Navier-Stokes se han desarrollado sólo para flujos en geometrías simples y bajo condiciones ideales, debido a lo anterior la utilización de métodos numéricos para resolver flujos reales en geometrías complejas se ha hecho imprescindible. El método de volúmenes finitos (Finite Volume Method – FVM en su sigla en inglés) fue introducido en la década de 1970 por McDonald, MacCormack, y

Paullay e históricamente ha sido método preferido por los científicos e ingenieros que trabajan con la mecánica de fluidos. (Osses, 2016)

Si bien en la última década el método de elementos finitos (FEM) ha tenido importantes avances para poder resolver con éxito los desafíos de la mecánica de fluidos, todavía para problemas complejos relacionados a flujos multifásicos, reactivos, o fuertemente turbulentos, el método de volúmenes finitos es en la práctica la única solución.

Una importante propiedad de FVM es que los principios de conservación (masa, momentum y energía), los cuales son la base de la modelación matemática para la mecánica del continuo, por definición, son respetadas por las ecuaciones discretas deducidas por el método de volúmenes finitos.

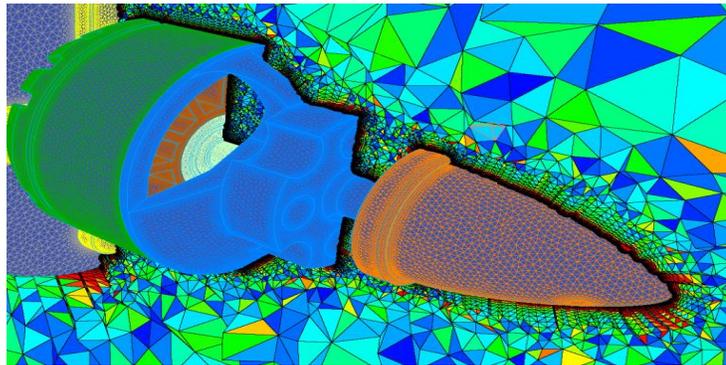


Figura 2.3. Nodos y elementos de una malla.

Fuente: Osses, 2016.

El método no se limita sólo a problemas de mecánica de fluidos, y de forma general envuelve los siguientes pasos:

- 1) Descomponer el dominio en volúmenes de control
- 2) Formular las ecuaciones integrales de conservación para cada volumen de control
- 3) Aproximar numéricamente las integrales
- 4) Aproximar los valores de las variables en las caras y las derivadas con la información de las variables nodales
- 5) Ensamblar y resolver el sistema algebraico obtenido

2.2.2. Ecuación de Navier – Stokes

Ecuación de Navier-Stokes, en mecánica de fluidos, es una ecuación diferencial parcial que describe el flujo de fluidos incompresibles. La ecuación es una generalización de la ecuación ideada por el matemático suizo Leonhard Euler en el siglo XVIII para describir el flujo de fluidos incompresibles y sin fricción. En 1821 ingeniero francés Claude-Louis Navier introdujo el elemento de la viscosidad (fricción) para el problema más realista y mucho más difícil de los fluidos viscosos. A mediados del siglo XIX, el físico y matemático británico Sir George Gabriel Stokes mejoró este trabajo, aunque solo se obtuvieron soluciones completas para el caso de flujos bidimensionales simples. Los complejos vórtices y turbulencias, o caos, que se producen en los flujos de fluidos tridimensionales (incluido el gas) a medida que aumentan las velocidades han demostrado ser intratables para cualquier método de análisis que no sea numérico aproximado.

La ecuación original de Euler, en notación moderna, es la ecuación (2.2):

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} \quad (2.2)$$

Donde:

\mathbf{u} : vector de velocidad del fluido.

P: presión del fluido.

ρ : densidad del fluido.

∇ : indica el operador diferencial de gradiente.

La ecuación de Navier-Stokes, en notación moderna, dada por la ecuación (2.3)

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2.3)$$

Donde:

\mathbf{u} : vector de velocidad del fluido.

P: presión del fluido.

ρ : densidad del fluido.

ν : viscosidad cinemática.

∇^2 : Operador laplaciano.

En el año 2000, la existencia de soluciones suaves y razonables para la ecuación de Navier-Stokes en tres dimensiones fue designada Problema del Milenio, uno de los siete problemas matemáticos seleccionados por el Clay Mathematics Institute de Cambridge, Massachusetts, EE. UU. (Hosch, 2023)

2.2.3. Aplicaciones de del CFD en la ingeniería

La dinámica de Fluidos Computacional es ampliamente utilizada en los diferentes segmentos de la industria y soporta el proyecto y la fabricación de centenares de productos, tales como aviones, automóviles y navíos, así como los más diversos tipos de equipamientos industriales. La Mecánica de Fluidos Computacional puede ser utilizada desde la fase conceptual de un proyecto, ayudando a determinar la viabilidad y la mejor solución en producto, hasta la etapa de producción, permitiendo representar diversos escenarios. Con la ayuda de las herramientas de CFD es posible:

- Simular difusión y convección de sustancias fluidas en los más diferentes ambientes.
- Realizar la planificación y gestión de recursos hídricos.
- Analizar la aerodinámica y aerotermodinámica de vehículos.
- Evaluar la refrigeración de equipamientos, como reactores nucleares, motores etc.
- Hacer estudios de caracterización de polución ambiental, dispersión de gases, análisis y simulación de lanzamiento y contaminantes en corrientes hídricas.
- Simular hidrodinámica y hemodinámica.
- Probar y desarrollar proyectos de sistemas propulsivos y de generación de energía en general.

2.3. Solidworks Flow Simulation

Solidworks Flow Simulation es una intuitiva solución de dinámica de fluidos computacional (CFD, del inglés "Computational Fluid Dynamics") integrada en

Solidworks 3D CAD que le permite simular de forma rápida y sencilla flujos de líquido y gas a través y alrededor de sus diseños para calcular así el rendimiento y las capacidades del producto.

Es una herramienta de simulación de flujo paramétrico general que utiliza el método de volumen finito (Finite Volumen Method, FVM) para calcular el rendimiento del producto a través de estudios hipotéticos que le permiten llevar a cabo la optimización utilizando los resultados. (Solidworks Corp., 2017)

2.3.1. Aplicaciones en ingeniería hidráulica con Solidworks Flow Simulation

2.3.1.1. Superficie libre en Solidworks Flow Simulation

Con la adición de la capacidad de superficie libre, Solidworks Flow Simulation ahora puede realizar simulaciones de más aplicaciones del mundo real. Una aplicación de ingeniería civil comúnmente encontrada en el diseño de flujo de canal abierto es un fenómeno de disipación de energía llamado salto hidráulico, que ocurre cuando un flujo superficial de movimiento rápido se encuentra con un campo de flujo profundo de movimiento relativamente lento.

Los textos de Mecánica de fluidos clasifican el flujo en canales abiertos utilizando el número de Froude adimensional (Fr), que es una función de la velocidad del fluido (V) y el tirante (y). (White, 2004, p. 673)

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (2.4)$$

Subcrítico: $Fr < 1,0$

Crítica: $Fr = 1,0$

Supercrítico: $Fr > 1,0$

Cuando un campo de flujo supercrítico se encuentra con un campo subcrítico, la energía se disipa a través de la turbulencia en una onda estacionaria: el salto hidráulico. Tal

condición se demuestra por el flujo de agua por una pendiente que se encuentra con una piscina más profunda.

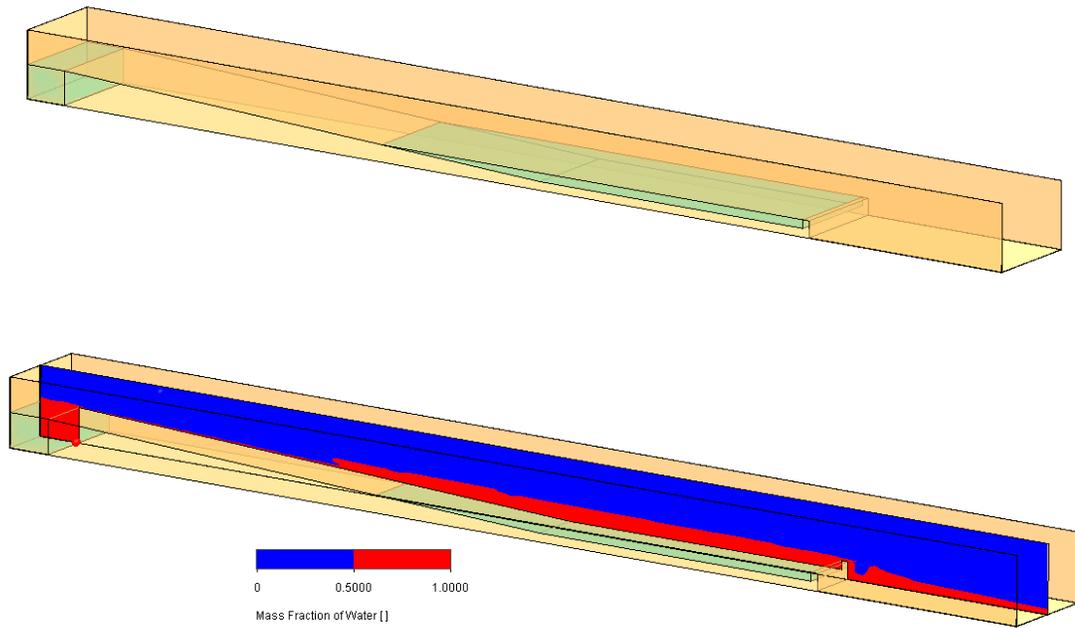


Figura 2.4. Simulación en Solidworks Flow Simulation.

Fuente: Kurtin, 2019.

En la figura 2.6, el agua (color rojo) fluye de izquierda a derecha y genera dos saltos hidráulicos; uno donde la corriente de flujo delgado por la pendiente se encuentra con la piscina,

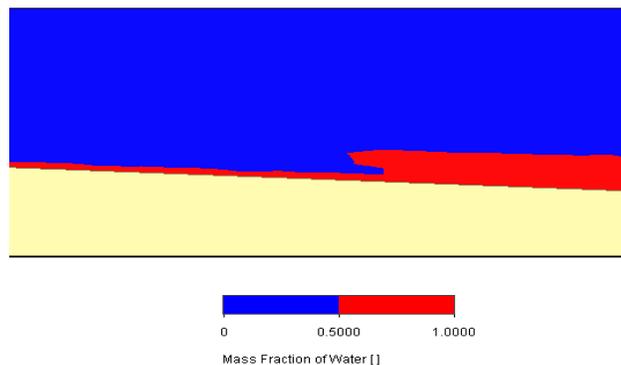


Figura 2.5. Primer salto hidráulico.

Fuente: Kurtin, 2019.

y otro más allá del extremo derecho de la piscina.

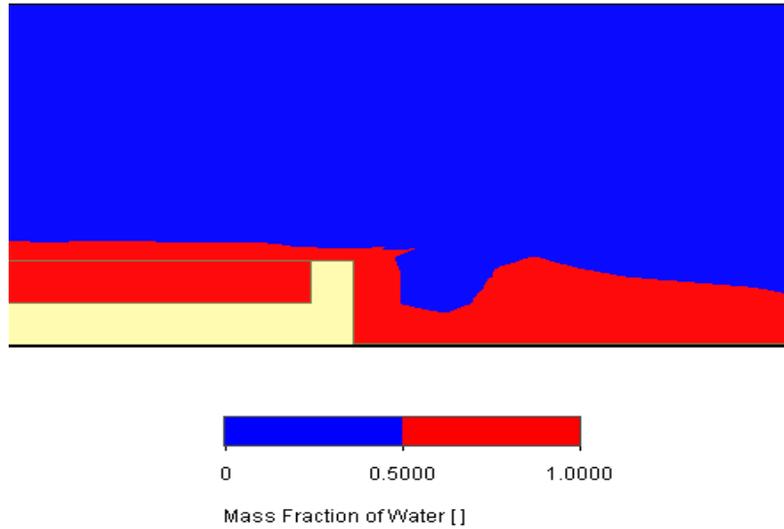


Figura 2.6. Segundo salto hidráulico.

Fuente: Kurtin, 2019.

La intensidad de la turbulencia (relación entre la desviación estándar de las fluctuaciones aleatorias de la velocidad y la velocidad media) muestra la disipación de energía en estas áreas y en el aire perturbado que se encuentra sobre ellas.

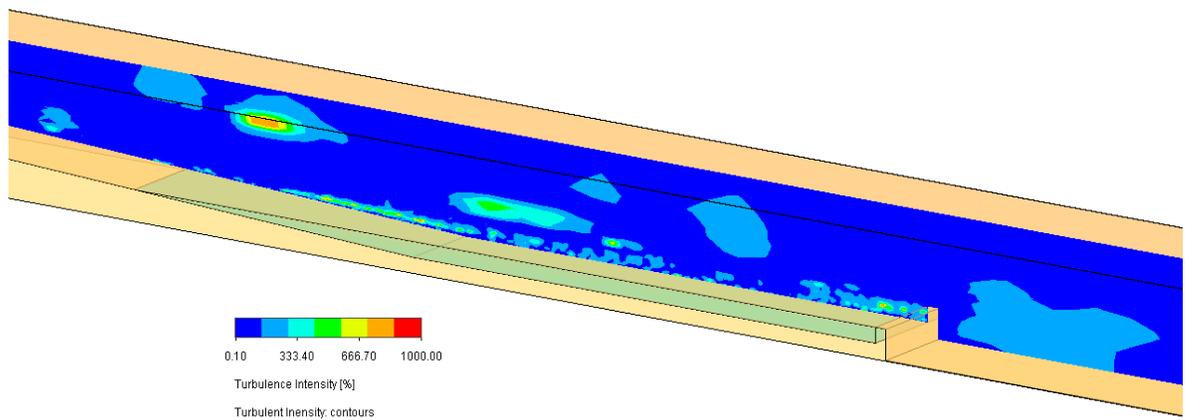


Figura 2.7. Gráfica de intensidad de la turbulencia.

Fuente: Kurtin, 2019.

Existen numerosas aplicaciones hidrológicas de medición de flujo y control de la erosión que aprovechan este comportamiento físico, como vertederos, compuertas, sumideros y aliviaderos. El segundo salto mencionado anteriormente se acerca a simular un vertedero,

que es un medidor de flujo de canal abierto efectivo que incorpora una obstrucción al flujo.

Para investigar esto más de cerca, se realizó una simulación de un vertedero de cresta afilada (1 pie de altura) en Solidworks Flow Simulation con un caudal aguas arriba de 0,01 pies³/s, y los resultados se compararon con aproximaciones analíticas.

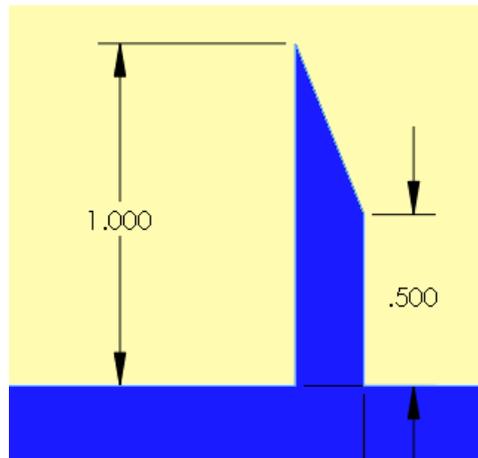


Figura 2.8. Vertedero de cresta afilada.

Fuente: Kurtin, 2019.

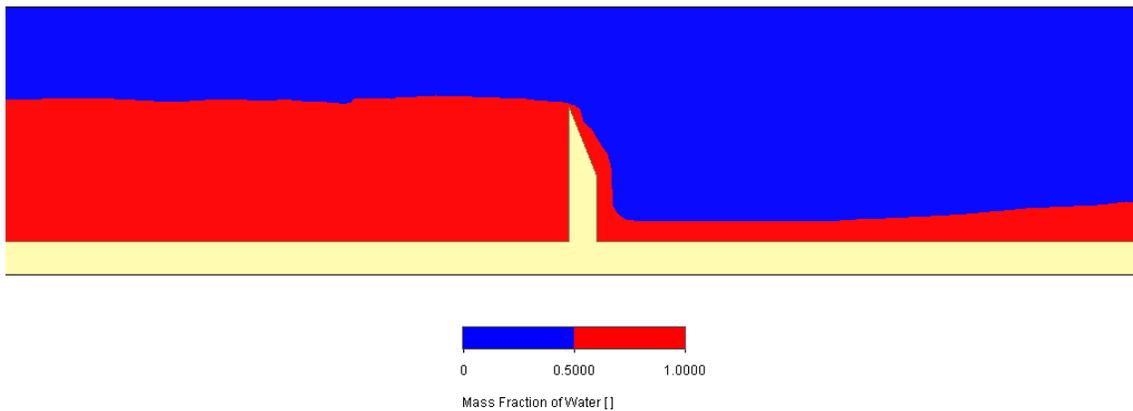


Figura 2.9. Gráfica de corte en 2D.

Fuente: Kurtin, 2019.

White, 2004. Da una solución aproximada con referencia a la figura 2.12 y variables.

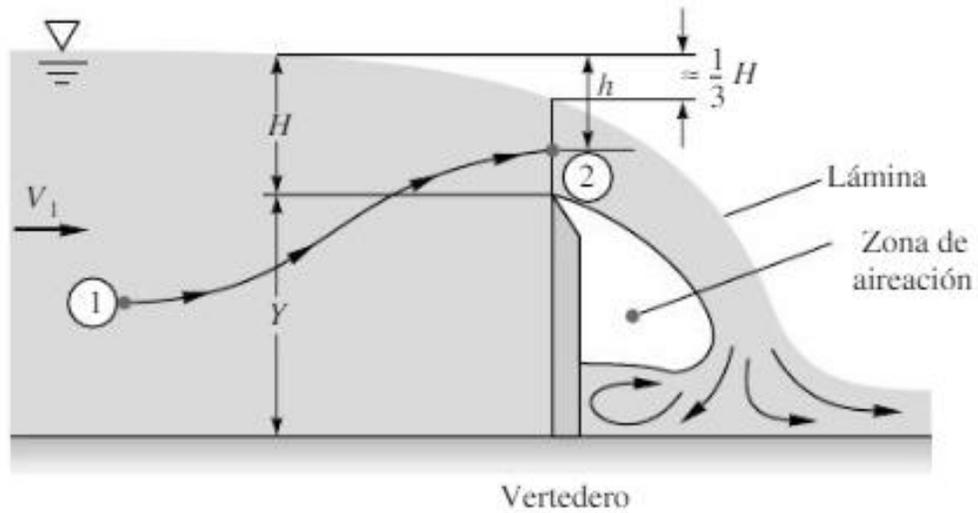


Figura 2.10. Mecánica de fluidos.

Fuente: White, 2004.

El caudal volumétrico por ancho de canal (q) sobre un vertedero fue desarrollado a partir de la ecuación de Bernoulli por el ingeniero francés Boussinesq a principios del siglo XX:

$$q = \frac{2}{3} C_w (2g)^{1/2} H^{2/3} \quad (2.5)$$

donde el coeficiente de vertedero viene dado por:

$$C_w \approx 0,611 + 0,075H/Y \quad (2.6)$$

En Solidworks de la altura de la cresta por encima del vertedero a partir de los resultados de la simulación de flujo que se muestran en la figura 2.13.

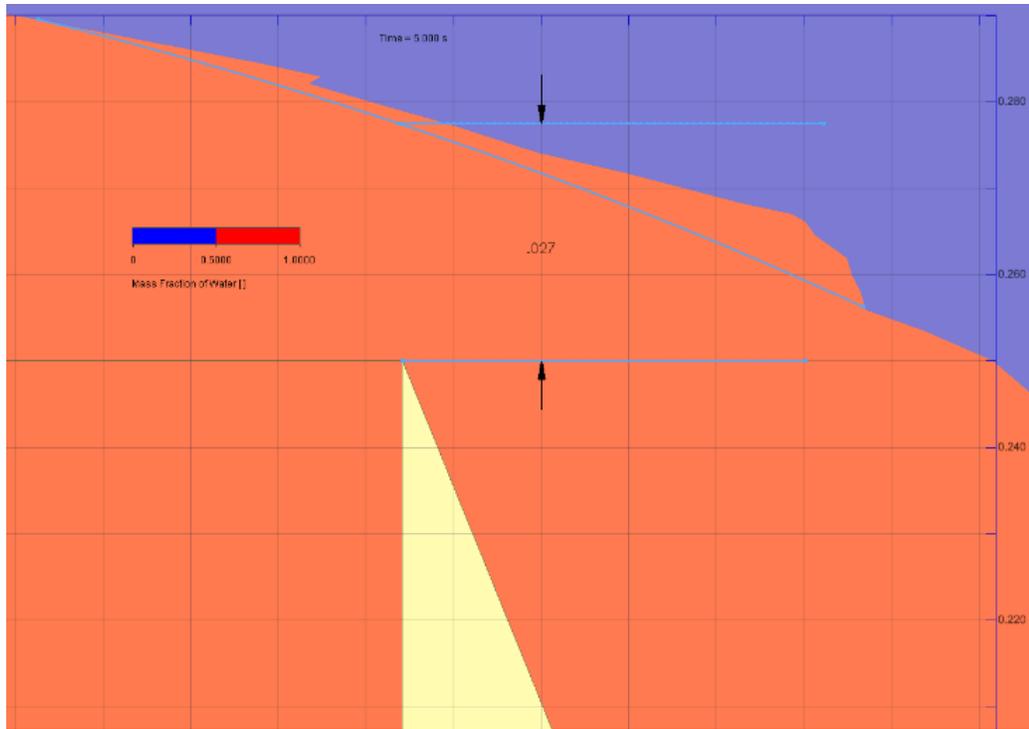


Figura 2.11. Resultados gráficos de la simulación en Solidworks.

Fuente: Kurtin, 2019.

$H = 0,041$ pies (la medida de la altura de la siesta por encima del vertedero ($0,027$ pies) es aproximadamente $2/3$ de H)

$$C_w = 0,614$$

$$q = 0,013 \text{ pies}^3/(\text{s-pies})$$

El ancho de la celda de dominio computacional 2D en la simulación es de 1 pie, por lo tanto, el caudal total (Q) es de $0,013 \text{ pies}^3/\text{s}$, lo que coincide aproximadamente con el valor de entrada de flujo de $0,01 \text{ pies}^3/\text{s}$. La precisión de la solución de superficie libre está influenciada por el nivel de refinamiento de la malla, por lo que más refinamientos deberían producir una mayor precisión. (Kurtin, 2019)

2.3.1.2. Salto hidráulico 3D en Solidworks Flow Simulation

En la figura 2.14 está el modelo antes de la solución 3D. Representa el aliviadero y las piscinas de agua estancada (en color azul claro) con una condición de flujo

aplicada a la cara inferior de la piscina de suministro aguas arriba. (Kurt Kurtin, 2020)

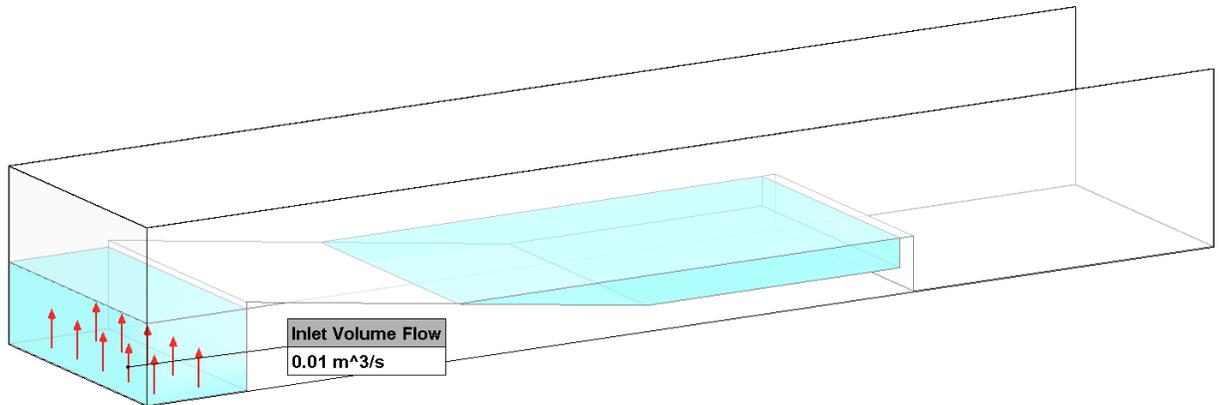


Figura 2.12. Modelo del aliviadero y las piscinas de agua estancada.

Fuente: Kurtin, 2020.

La simulación transitoria se resolvió durante un tiempo total de 10 segundos, lo que resultó en la formación del salto hidráulico a partir de aproximadamente la marca de 5 segundos.

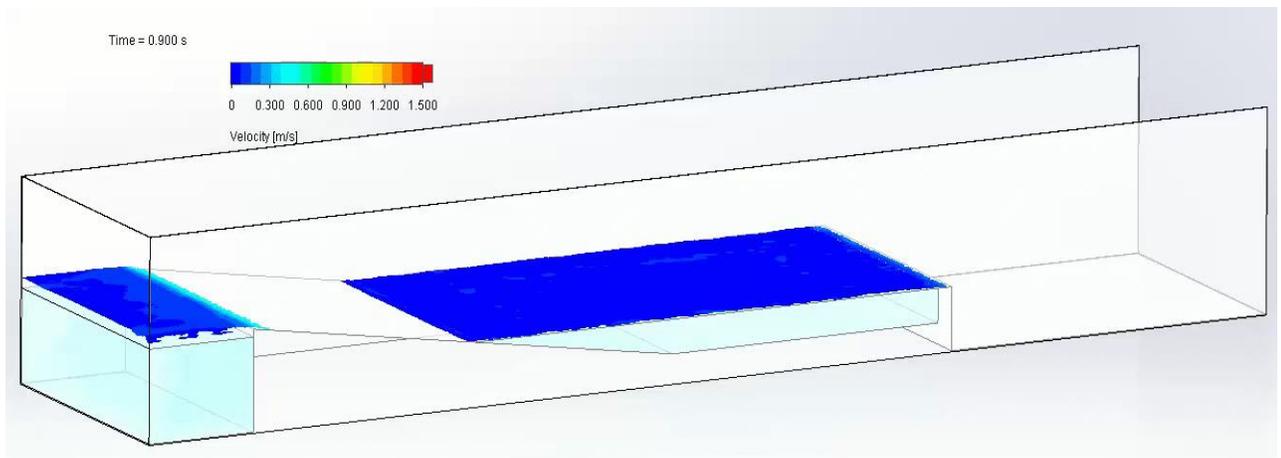


Figura 2.13. Simulación para un total de 10s.

Fuente: Kurtin, 2020.

La figura 2.16 tomadas a los 2, 4 y 6 segundos muestran la superficie libre coloreada con la velocidad del flujo. Se observa la alta velocidad de flujo en la rampa del aliviadero y la

velocidad muy baja en cada una de las superficies de la piscina.

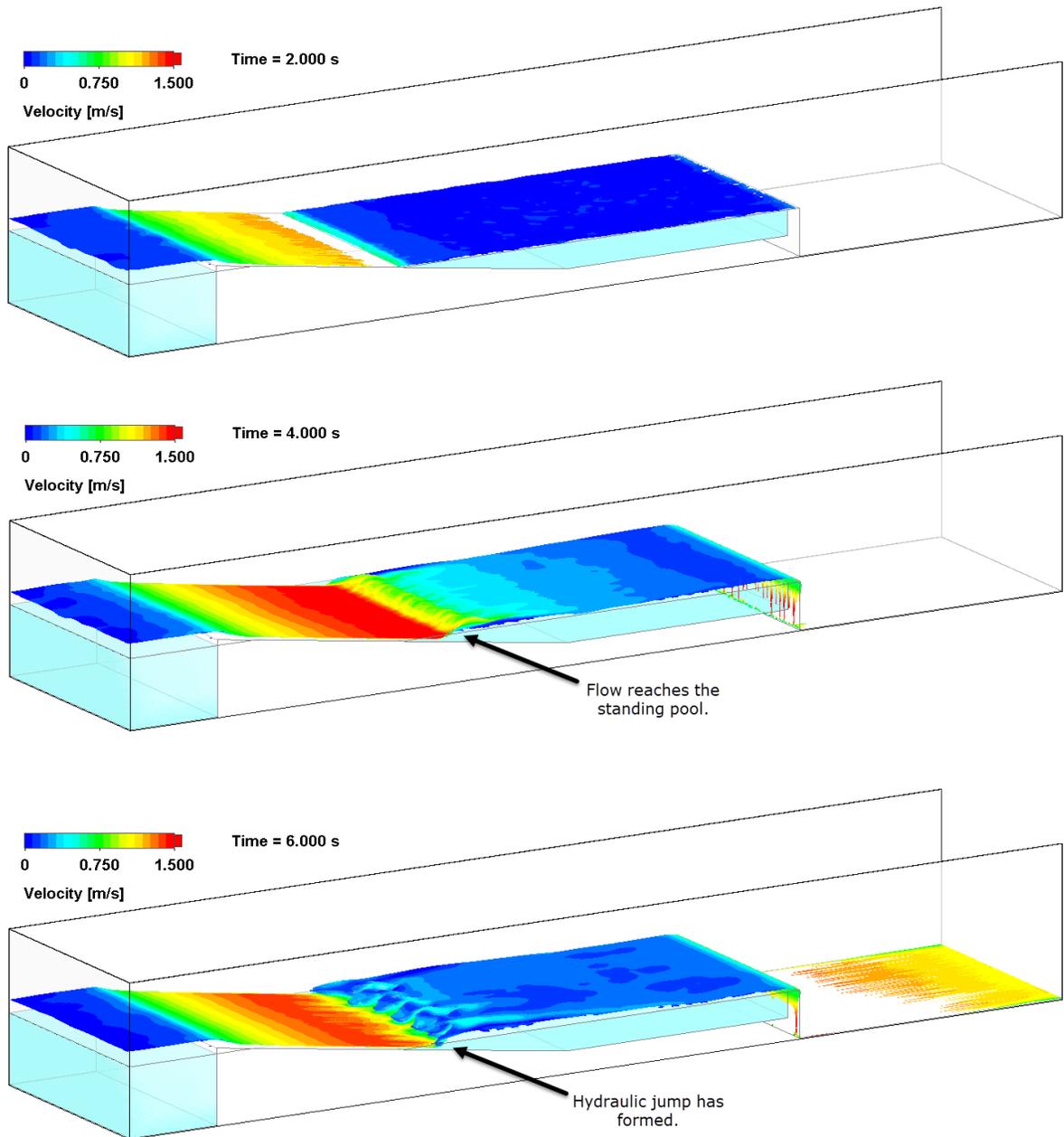


Figura 2.14. Simulación para los 2,4,6s.

Fuente: Kurtin, 2020.

Después de que se formó, el salto hidráulico permaneció estacionario durante el resto de la simulación de 10 segundos. En una vista lateral, la figura 2.17 de la fracción de volumen del agua con una superposición de las líneas de corriente muestra el salto y las áreas de recirculación en el aire y el agua causadas por la turbulencia.

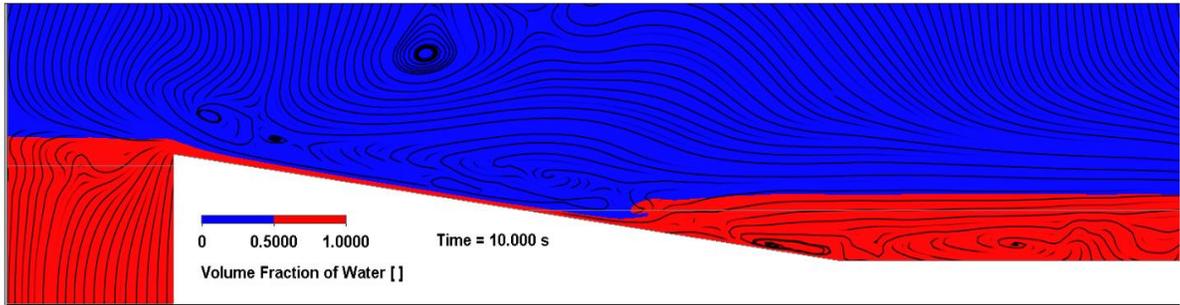


Figura 2.15. Fracción de volúmenes de agua.

Fuente: Kurtin, 2020.

La superficie libre se captura mejor mediante un gráfico de fracción de volumen, a diferencia de un gráfico de fracción de masa. La densidad significativamente mayor del agua hace que el gráfico de fracción de masa muestre un valor cercano a 1 incluso en regiones con un volumen de agua muy pequeño.

Para capturar con precisión el salto hidráulico en 2D o 3D, la malla debe refinarse significativamente donde quiera que se forme la superficie libre, por lo que se necesita un poco de planificación y pruebas para llegar a una malla adecuada. La figura 2.18 de corte a continuación muestra que he generado una malla con un nivel de refinamiento máximo de 4 (celdas de color rojo). (Kurtin, 2020)

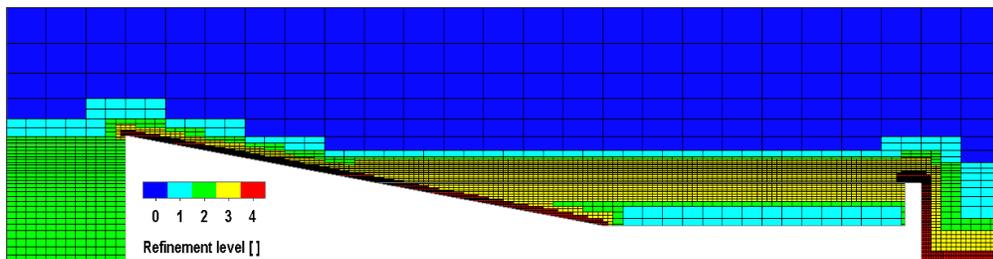


Figura 2.16. Refinación de malla.

Fuente: Kurtin, 2020.

El primero es un control de "refinamiento equidistante" que hace referencia a la cara de la rampa. (ver Figura 2.19)

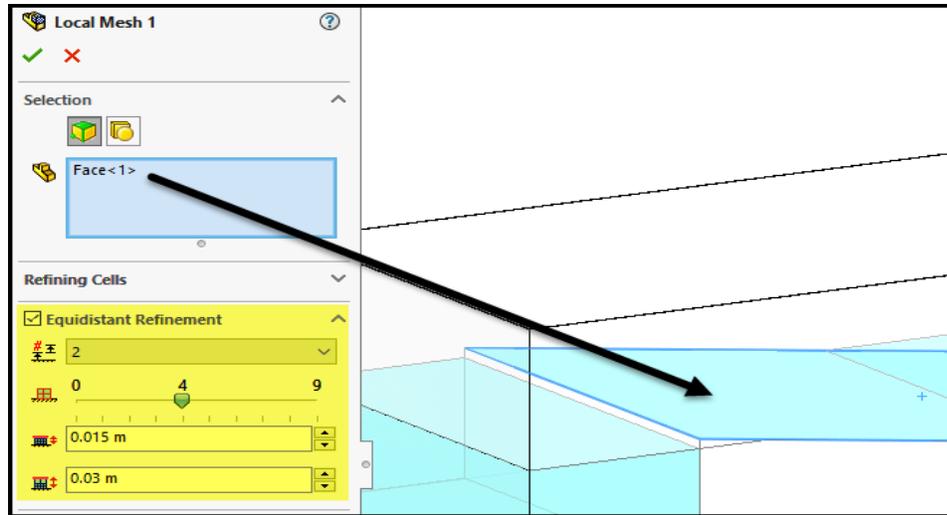


Figura 2.17. Refinación equidistante en la rampa.

Fuente: Kurtin, 2020.

El segundo aplica refinamiento a una región cuboide de la piscina donde esperamos que se establezca la superficie libre. (ver Figura 2.20)

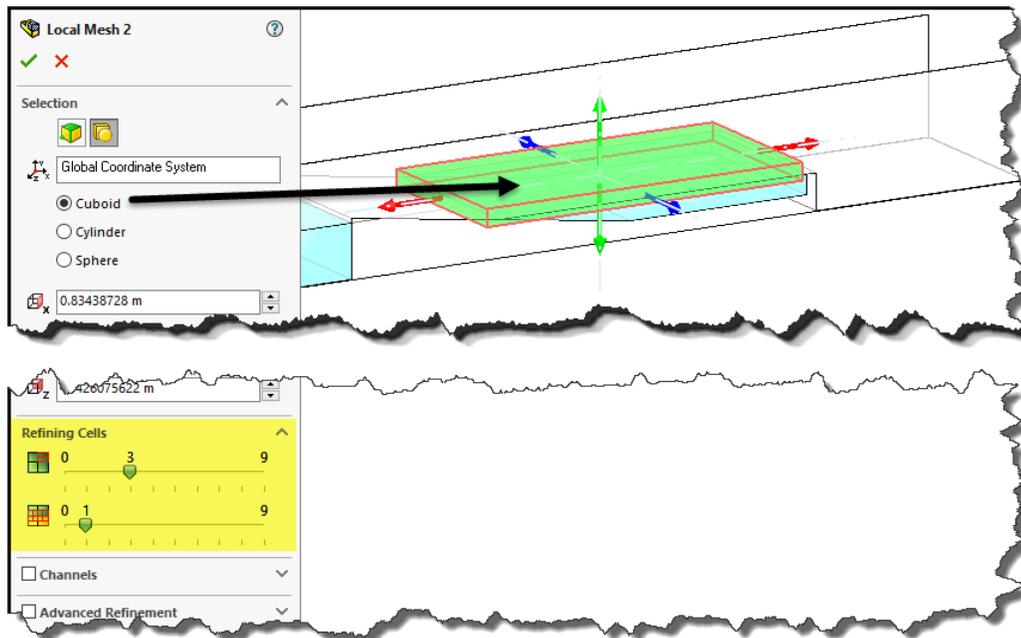


Figura 2.18. Refinación cuboide.

Fuente: Kurtin, 2020.

El tercero es otro "refinamiento equidistante" que hace referencia a caras en el otro extremo del canal. (ver figura 2.21)

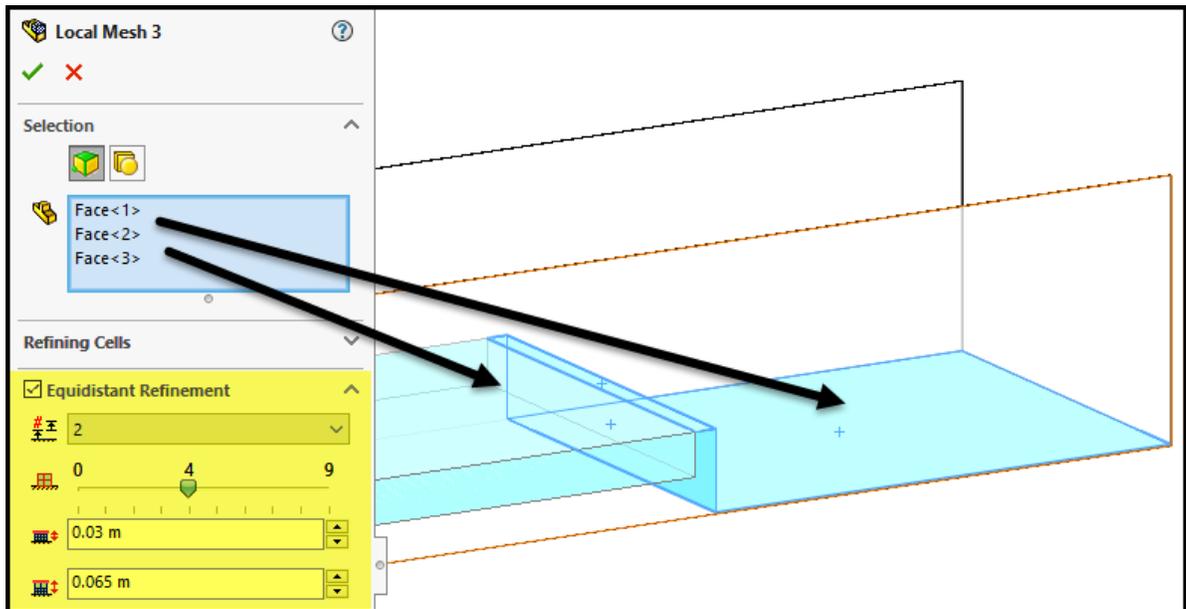


Figura 2.19. Refinación en el extremo del canal.

Fuente: Kurtin, 2020.

2.4. Mecánica de Fluidos

La rama de la mecánica aplicada que estudia el comportamiento de los fluidos, ya sea en reposo o en movimiento, constituye la Mecánica de los Fluidos y la Hidráulica. En el desarrollo de los principios de la Mecánica de los Fluidos algunas de las propiedades de los fluidos juegan un papel preponderante, mientras que otras o influyen muy poco o nada. En la estática de los fluidos, el peso específico es la propiedad importante, mientras que, en el flujo de fluidos, la densidad y la viscosidad son las que predominan. Cuando tiene lugar una compresibilidad apreciable es necesario considerar los principios de la termodinámica. Al intervenir presiones manométricas negativas, la tensión de vapor pasa a ser importante, y la tensión superficial afecta a la estática o cinemática de los fluidos cuando las secciones de paso son pequeñas. (Giles et al., 1994, p.1)

2.4.1. Fluidos

Los fluidos son sustancias capaces de fluir y que se adaptan a la forma de los recipientes que los contienen. Cuando están en equilibrio, los fluidos no pueden soportar fuerzas tangenciales o cortantes. Todos los fluidos son compresibles en cierto grado y ofrecen poca resistencia a los cambios de forma. (Giles et al., 1994, p.1)

Los fluidos pueden dividirse en líquidos y gases. Las diferencias esenciales entre líquidos y gases son:

- a) Los líquidos son prácticamente incompresibles y los gases son compresibles, por lo que en muchas ocasiones hay que tratarlos como tales.
- b) Los líquidos ocupan un volumen definido y tienen superficies libres, mientras que una masa dada de gas se expande hasta ocupar todas las partes del recipiente que lo contenga.

2.4.2. Flujo de Fluidos

El flujo de fluidos es complejo y no siempre puede ser estudiado de forma exacta mediante el análisis matemático. Contrariamente a lo que sucede con los sólidos, las partículas de un fluido en movimiento pueden tener diferentes velocidades y estar sujetas a distintas aceleraciones. Tres principios fundamentales que se aplican al flujo de fluidos son:

- a) El principio de conservación de la masa, a partir del cual se establece la ecuación de continuidad
- b) El principio de la energía cinética, a partir del cual se deducen ciertas ecuaciones aplicables al flujo.
- c) El principio de la cantidad de movimiento, a partir del cual se deducen ecuaciones para calcular las fuerzas dinámicas ejercidas por los fluidos en movimiento.

El flujo de los fluidos puede ser permanente o no permanente; uniforme o no uniforme; laminar o turbulento; unidimensional, bidimensional o tridimensional, y rotacional o irrotacional.

Verdaderamente, el flujo unidimensional de un fluido incompresible tiene lugar cuando el módulo, dirección y sentido de la velocidad en todos los puntos son idénticos. No obstante, el análisis como flujo unidimensional es aceptable cuando se toma como única dimensión la línea de corriente central del flujo y pueden considerarse como despreciables las variaciones de las velocidades y aceleraciones en dirección normal a dicha línea de corriente. En tales casos, se consideran como representativas del flujo completo los valores medios de la velocidad, la presión y la elevación, despreciando las variaciones menores. (Giles et al., 1994, p.118)

2.4.3. Flujo en Canales Abiertos

El flujo en canales abiertos tiene lugar cuando los líquidos fluyen por la acción de la gravedad y sólo están parcialmente envueltos por un contorno sólido. En el flujo de canales abiertos, el líquido que fluye tiene superficie libre y sobre él no actúa otra presión que la debida a su propio peso y a la presión atmosférica. El flujo en canales abiertos también tiene lugar en la naturaleza, como en ríos, arroyos, etc., si bien, en general, con secciones rectas del cauce irregulares. De forma artificial (es decir, construidas por el hombre) tiene lugar en los canales, acequias y canales de desagüe. En la mayoría de los casos, los canales tienen secciones rectas regulares, y suelen ser rectangulares, triangulares o trapezoidales. También tiene lugar el flujo en canales abiertos en el caso de conductos cerrados (como en tuberías de sección recta circular) cuando el flujo no es a conducto lleno. En los sistemas de alcantarillado no tiene lugar, por lo general, el flujo a conducto lleno y su diseño se realiza como canal abierto.

- Flujo Uniforme y Permanente: Comprende dos condiciones de flujo. El flujo permanente, se refiere a la condición según la cual las características del flujo en un punto no varían con el tiempo. El flujo uniforme se refiere a la condición según la cual la profundidad, pendiente, velocidad y sección recta permanecen constantes en una longitud dada del canal. En el caso especial de flujo uniforme y permanente, la línea de alturas totales, la línea de alturas piezométricas y la solera del canal son todas paralelas (es decir, son iguales sus pendientes).

- Flujo No Uniforme: Ocurre cuando la profundidad del líquido varía a lo largo de la longitud del canal abierto, el flujo no uniforme puede ser permanente o no permanente. También puede clasificarse en tranquilo, rápido o crítico.

Flujo Laminar: En canales abiertos se dará para valores del número de Reynolds (Re) de 2.000 o menores. El flujo puede ser laminar hasta $Re = 10.000$. Para el flujo en canales abiertos. (Giles et al., 1994, p.222)

$$Re = 4RV/\nu \quad (2.7)$$

Donde:

Re: número de Reynolds.

R: radio hidráulico.

V: velocidad de la corriente.

ν : viscosidad cinemática.

2.5. Obras hidráulicas

Las obras hidráulicas son estructuras construidas con el fin de captar, extraer, desalar, almacenar, regular, conducir, controlar y aprovechar el recurso hídrico. Para su construcción se deben considerar parámetros y criterios de orden hidrológico e hidráulico.

Las obras hidráulicas sirven para muchos propósitos entre los cuales son los siguientes:

- Riego de cultivos.
- Abastecimiento de agua para consumo doméstico e industrial.
- Producción de energía eléctrica.
- Navegación.

En todos estos casos el agua se utiliza para el beneficio del hombre.

Hay casos en los que el agua puede producir daños y las obras se construyen para eliminarla o controlarla. Así tenemos:

- Alcantarillado para evacuar las aguas servidas.
- Drenaje para eliminar el exceso de agua de una zona cultivada.
- Control de crecientes y protección de orillas.

Por su función las obras hidráulicas pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- Obras de captación: Por gravedad como tomas de derivación y presas de embalse y por bombeo.

- Obras de conducción: Canales y túneles. Pasos de depresiones como acueductos, sifones y rellenos. Tuberías de presión.
- Obras de protección: Desarenadores, aliviaderos, desfogues, disipadores de energía y tanques de presión.
- Obras de regulación: Divisiones, medidores, y reservorios.

Existen además obras como campamentos, caminos, etc., que no son hidráulicas pero complementarias a estas. (Krochin, 1986, p.21)

2.5.1. Obras de captación

Dentro de las obras de captación existen muchos tipos diferentes, pero básicamente se los puede clasificar en obras de toma por derivación directa y obras de almacenamiento.

Las obras de almacenamiento consisten en presas que cierran el cauce del río u otro sitio apropiado formando un reservorio o embalse en el mismo. El reservorio permite regular la utilización del caudal del río, almacenando el agua en las épocas de crecientes y utilizándola en las épocas de sequía. El tipo de la presa depende de una serie de condiciones pudiendo ser de tierra, piedra u hormigón y trabajar a gravedad o como arco.

Las tomas por derivación directa captan el agua que viene por el río sin ningún almacenamiento o sea que no hay ninguna regulación y se aprovecha el caudal que hay en un momento dado. (Krochin, 1986, p.23)

2.5.2. Obras de conducción

El agua captada por las obras de toma debe ser conducida hasta el sitio de su utilización y esto se hace por medio de canales abiertos o de tuberías forzadas. A excepción de las tuberías de presión que llevan el agua a las turbinas de una planta hidroeléctrica.

La diferencia que existe entre conductos que transportan agua a presión y aquella cuya circulación se realiza con una superficie libre, es que en los primeros el líquido ocupa toda la sección y tiene una presión diferente (generalmente mayor) de la atmosférica mientras que en los segundos el líquido ocupa solamente parte de la sección y la presión en la superficie es igual a la atmosférica. Por lo tanto, en los conductos libres la superficie de agua coincide con la línea piezométrica y la gradiente del canal es siempre positiva. En

los conductos a presión la inclinación de la tubería puede ser cualquiera con tal de estar por debajo de la línea piezométricas. (Krochin, 1986, p.140)

2.5.2.1. Canales

Un canal es un conducto en el cual el agua fluye con una superficie libre. De acuerdo con su origen un canal puede ser natural o artificial.

Los canales naturales incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la Tierra, los cuales varían en tamaño desde pequeños arroyuelos en zonas montañosas, hasta quebradas, arroyos, ríos pequeños y grandes. Las corrientes que transportan agua con una superficie libre también son consideradas como canales abiertos naturales.



Figura 2.20. Canal de trasvase de Huacata.

Fuente: Fotografía del autor.

Los canales artificiales son aquellos construidos o desarrollados mediante el esfuerzo humano: canales de navegación, canales de centrales hidroeléctricas, canales, cunetas de drenaje, vertederos, canales de desborde, cunetas a lo largo de la carretera, etc., así como canales de modelos construidos en el laboratorio con propósitos experimentales. Las propiedades hidráulicas de estos canales pueden ser controladas hasta un nivel deseado o diseñadas para cumplir unos requisitos determinados. Las aplicaciones de las teorías

hidráulicas a canales artificiales producirán, por tanto, resultados bastante similares a las condiciones reales y, por consiguiente, son razonablemente exactos para propósitos prácticos de diseño. (Chow, 2004, p.19)

2.5.2.2. Canales en curva

En la práctica es inevitable que un canal tenga curvas, por cuanto ha de adaptarse a la topografía del terreno que es por general irregular. En una curva el flujo del agua se altera. Si el flujo es subcrítico los aspectos más notables son la aparición de un flujo espiral y la sobreelevación de la superficie del agua en la pared exterior de la curva. Si el flujo es supercrítico los aspectos más notables son la aparición de ondas cruzadas y también la sobreelevación de la superficie del agua, pero en las dos paredes del canal. (Chereque Morán, 1993, p.125)



Figura 2.21. Canal de trasvase curva antes del vertedero escalonado de Huacata.

Fuente: Fotografía del autor.

2.5.2.2.1 Curvas en régimen subcrítico

- Flujo Espiral: En el tramo recto de un canal la velocidad media del agua es perpendicular a la sección transversal. En una curva aparecen velocidades

secundarias en el plano de la sección transversal. Como consecuencia el flujo en la curva es de tipo helicoidal o espiral.

Mirando hacia aguas abajo, en una curva a la izquierda el flujo espiral tiene sentido horario y en una curva a la derecha sentido antihorario. Como consecuencia, en los cauces naturales tienden a formarse las secciones típicas que se muestran en la figura 2.24 (Chereque Morán, 1993, p.125)

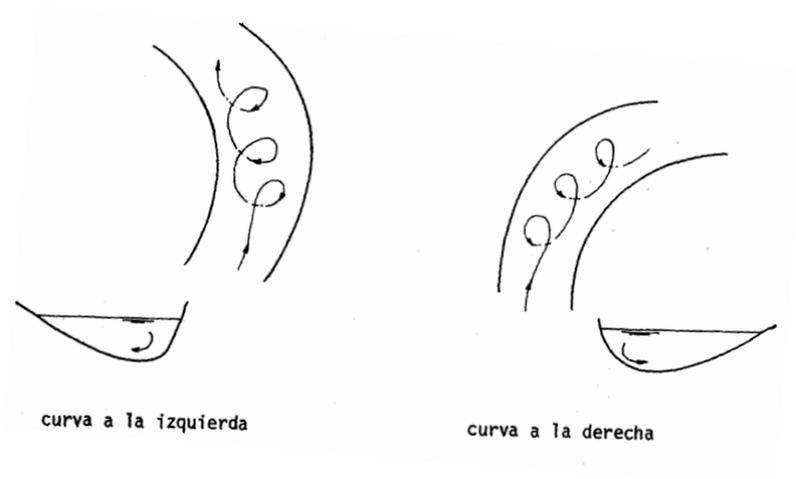


Figura. 2.22. Flujo en espiral.

Fuente: Chereque Morán, 1993.

2.5.2.3. Traspase

Los trasvases son obras hidráulicas cuya finalidad es la de incrementar la disponibilidad de agua en una zona concreta, llevando agua desde una cuenca hidrográfica a otra. El agua trasvasada puede dedicarse a distintos fines, como abastecimiento de poblaciones, regadíos o usos industriales.

2.5.3. Obras de protección

2.5.3.1. Rápidas

Las rápidas son usadas para conducir agua desde una elevación mayor a una más baja. La estructura puede consistir de una entrada, un tramo inclinado, un dissipador de energía y

una transición de salida. El tramo inclinado puede ser un tubo o una sección abierta. Las rápidas son similares a las caídas, excepto que ellas transportan el agua sobre distancias más largas, con pendientes más suaves y a través de distancias más largas. La parte de la entrada de la estructura transición a el flujo desde el canal aguas arriba de la estructura hacia el tramo inclinado. Debe proveer un control para impedir la aceleración del agua y la erosión en el canal. El control es logrado por la combinación de una retención y un vertedero en la entrada. La entrada usada debería ser simétrica con respecto al eje de la rápida, permitir el peso de la capacidad total del canal aguas arriba hacia la rápida con el tirante normal de aguas arriba, y donde sea requerido, permitir la evacuación de las aguas del canal cuando la operación de la rápida sea suspendida. (Palomino B., 2003)

2.5.3.2. Gradadas escalonadas

En zonas de alta pendiente las gradadas disipadoras son estructuras ampliamente utilizadas para realizar transiciones de nivel en zonas de ladera, reducir la velocidad del flujo y minimizar el impacto de las descargas de agua en la canalización o en los elementos aguas abajo de esta. Sin embargo, de acuerdo con las consideraciones, se restringe la caída entre escalones y se proyectan estructuras largas para permitir la transición de nivel en la canalización. Por otra parte, las gradadas disipadoras no garantizan un amortiguamiento de los caudales ni retención de sedimentos que son transportados por el flujo en la canalización. (Velandia D. et al., 2015)

2.5.3.3. Conceptos básicos en la hidráulica de canales escalonados

Un canal escalonado es un canal artificial inclinado formado por escalones, donde h es la altura, L es la huella y θ es la pendiente del escalón. (ver Figura 2.25)

El flujo que escurre sobre canales escalonados es altamente turbulento y presenta auto aireación o "aguas blancas", por lo que, para caracterizar debidamente las propiedades del flujo, dicha aireación siempre debe tomarse en cuenta. (González y Chanson, 2007)

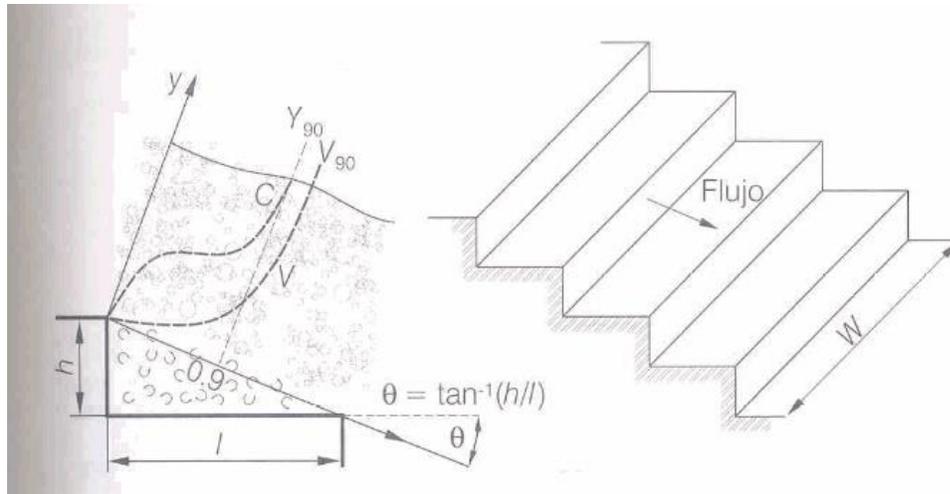


Figura 2.23. Definiciones básicas del flujo en un vertedor.

Fuente: González y Chanson, 2007

2.5.3.4. Tipos de flujo en un vertedor escalonado

El flujo sobre un vertedero escalonado se divide en función del gasto de operación en tres diferentes regímenes:

- Flujo saltante (también llamado de escalón en escalón o “nappe”).
- Flujo transitorio.
- Flujo rasante o “skimming”.

Para gastos pequeños, el flujo escurre sobre el vertedor en forma de caída sucesivas que saltan de un escalón a otro impactando en las huellas del escalón. Chanson propuso que el flujo saltante puede a su vez ser dividido en tres subtipos:

- Flujo saltante con salto hidráulico total o parcialmente desarrollado (tipo NA1 O NA2, respectivamente), y el tipo NA3 o flujo saltante sin salto. (ver figura 2.26)
- El flujo en transición se observa cuando el vertedor opera con gastos intermedios. Este régimen presenta fuertes fluctuaciones hidrodinámicas y una apariencia caótica con gran aireación de flujo y gran cantidad de atomización o "spray", lo cual provoca que las propiedades del flujo cambien de un escalón a otro, el flujo transitorio en dos subtipos: flujo TRA1, el cual presenta cavidades de aire de diversos tamaños debajo de la corriente principal del flujo, y flujo TRA2, donde

dichas cavidades de aire alternan con vórtices de flujo recirculante. (ver figura 2.26)

- Para gastos mayores se observa el flujo rasante, el cual resbala de manera coherente sobre el pseudo fondo formado por los vértices de los escalones. Debajo de la corriente principal del flujo, en las cavidades formadas por los escalones, se observan vórtices de flujo recirculante. Dichos vórtices se mantienen debido a la transmisión de esfuerzo cortante con la corriente principal del flujo y contribuyen de manera importante a la disipación de energía. (González y Chanson, 2007)

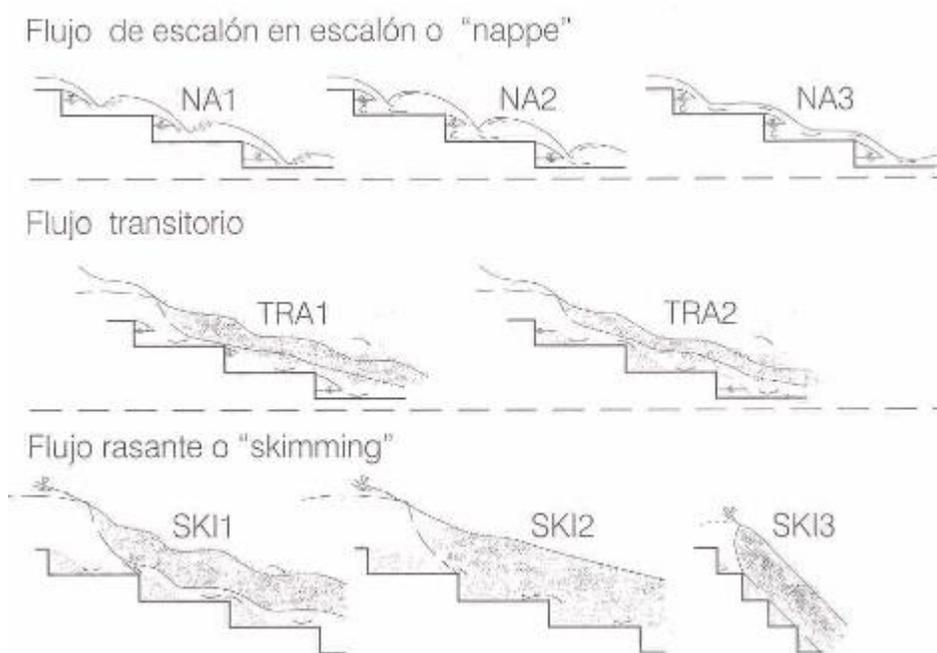


Figura 2.24. Tipos de flujo en vertederos escalonados.

Fuente: González y Chanson, 2007

2.5.3.5. Vertederos

Se llama vertedero a la estructura hidráulica sobre la cual se efectúa una descarga a superficie libre.

Los vertederos son estructuras que tienen aplicación muy extendida en todo tipo de sistemas hidráulicos y expresan una condición especial de movimiento no uniforme en un tramo con notoria diferencia de nivel. Normalmente desempeñan funciones de seguridad

y control. El vertedero puede tener diversas formas según las finalidades a las que se destine. Si la descarga se efectúa sobre una placa con perfil de cualquier forma, pero de arista aguda, el vertedero se llama de pared delgada; cuando la descarga se realiza sobre una superficie, el vertedero se denomina de pared gruesa. Ambos tipos pueden utilizarse como dispositivos de aforo en el laboratorio o en canales de pequeñas dimensiones.

El vertedero de pared gruesa se emplea, además, como obra de control o de excedencias en una presa y como aforador en grandes canales. (Frutos C., 2015, p.37)

2.5.3.5.1 Funciones de los vertederos

Aliviadero como elemento de presa.

Tiene varias finalidades entre las que se destaca:

- Garantizar la seguridad de la estructura hidráulica, al no permitir la elevación del nivel, aguas arriba, por encima del nivel máximo (NAME-Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias).
- Garantizar un nivel con poca variación en un canal de riego, aguas arriba.
- Construirse en una parte de una sección de aforo del río.
- Disipar la energía para que la devolución al cauce natural no produzca daños.

2.5.4. Directrices para el diseño hidráulico de aliviaderos escalonados

2.5.4.1. Régimen de flujos en aliviaderos escalonados

El agua que cae en cascada sobre la cresta de un aliviadero sobre una serie de escalones se puede clasificar en dos regímenes de flujo básicos; flujo de napa y flujo desnatado. Existe una banda de transición entre estos dos regímenes que puede incluir características de cada régimen pero que en general debe evitarse como condición principal de diseño. El flujo de Nappe se define como una serie de láminas (o chorros) de agua en caída libre que pasan de un paso al siguiente. Dependiendo de la pendiente del canal, las dimensiones de los escalones y las condiciones del flujo, puede ocurrir la formación de un salto hidráulico en cada escalón, lo que mejora aún más la disipación de energía. El análisis y diseño de un aliviadero con flujo en napa puede abordarse como una serie de estructuras

de caída sucesivas individuales. Por lo general, a medida que aumentan las descargas o las pendientes se hacen más pronunciadas, se produce la aparición de un flujo desnatado. En el flujo desnatado, las puntas de los escalones forman un límite virtual por encima de donde el flujo se desliza en una corriente razonablemente coherente hacia el aliviadero, aunque altamente turbulento y aireado en gran parte de la longitud del conducto. Dentro de las cavidades triangulares que existen debajo de este fondo virtual y encerradas por los límites de los escalones, el flujo secundario en forma de remolinos de recirculación tridimensionales llena el espacio.(Frizell & Frizell, 2015, p.4)

2.5.4.2. Flujo de vertido (Nappe Flow)

La mayoría de los aliviaderos de las presas generalmente no funcionan en el régimen de napa, a veces también denominado régimen de chorro. Este régimen se encuentra típicamente con descargas bajas (flujos finos) y/o alturas de escalón relativamente grandes. Si bien algunos aliviaderos están diseñados de esta manera, el flujo de napa generalmente se encuentra en estructuras con pequeñas gotas de descarga limitada. Las estructuras más grandes pueden experimentar flujo de napa cuando comienzan a operar con descargas y profundidades de flujo pequeñas. La naturaleza volátil del flujo de la napa puede conducir a una mayor disipación de energía; sin embargo, el rango de descargas generalmente será limitado a menos que la longitud del aliviadero sea tal que los escalones sean relativamente largos.(Frizell & Frizell, 2015, p.5)

El flujo generalmente pasa de flujo de napa a flujo desnatado a medida que aumenta la descarga. La capacidad de predecir la descarga de la unidad donde ocurre esta transición es importante para el diseñador, particularmente si hay preocupación con operaciones de bajo flujo. Como la mayoría de los aliviaderos escalonados de cualquier altura tienden a operar en el régimen de flujo desnatado, el inicio del flujo desnatado es quizás la condición más interesante de comprender. El flujo de transición es aquella región donde las características del flujo de napa y del flujo desnatado pueden existir en alguna combinación en el aliviadero. Todavía existe cierto debate sobre la definición conceptual de flujo de transición. Para un rango limitado de pendiente del aliviadero (20° - 40°), el flujo de napa ocurrió aproximadamente hasta $dc/h = 0,8$. Una ecuación para el inicio del

flujo desnatado para un rango de pendientes de 11,3° a 38,7°, mostrando valores requeridos más altos de d_c/h a medida que disminuye la pendiente del aliviadero:

$$\frac{d_c}{h} > 1.057 - 0.465 \frac{h}{l} \quad (2.8)$$

una ecuación similar para el rango de pendientes, de 25° a 55°, con una dependencia ligeramente menor de la pendiente.

$$\frac{d_c}{h} = 0.91 - 0.14 \frac{h}{l} \quad (2.9)$$

2.5.4.3. Flujo de arrastre (Skimming Flow)

El flujo desnatado es esa condición en la que el agua fluye por la superficie escalonada en una corriente algo coherente sobre una línea que conecta las puntas de los escalones. Las zonas dentro de los espacios triangulares debajo de este “fondo” virtual o pseudo contienen remolinos recirculantes que permanecen estables mediante el intercambio de energía con el flujo desnatado en una capa de corte altamente intensa justo encima de los consejos de pasos. Los escalones se comportan como elementos de macro rugosidad y son importantes en la disipación de energía a lo largo del talud además de ser responsables de potenciar la auto aireación del flujo sobre el de un canal liso de similar pendiente y caudal específico. uno de los temas de investigación más activos en aliviaderos escalonados en las últimas décadas ha involucrado el régimen de flujo desnatado y, en particular, estudios detallados de los efectos del flujo altamente aireado sobre la resistencia a la fricción y la disipación de energía; dos de los principales parámetros que interesan a los diseñadores de aliviaderos.(Frizell & Frizell, 2015, p.7)

Debido a la naturaleza aireada del flujo desnatado, la profundidad del flujo se puede representar de formas alternativas, las dos más comunes son; Y_{90} - la profundidad donde la concentración de aire es igual al 90 por ciento y d_{cw} - la profundidad de agua clara equivalente (es decir, la profundidad corregida utilizando la concentración media de aire para eliminar el volumen (aumento de profundidad aparente) causado por la entrada de aire), donde:

$$d_{cw} = (1 - C_{mean})Y_{90} \quad (2.10)$$

Siendo C_{mean} la concentración de aire media (promedio de profundidad).

2.5.4.4. Tratamiento de Cresta

Los tratamientos de cresta más comunes para aliviaderos escalonados son los desbordamientos libres e incontrolados. Esto es especialmente cierto en estructuras de CCR más pequeñas, pero también es común en presas de altura hidráulica significativa. Las crestas incontroladas generalmente toman la forma de un vertedero de cresta ancha (plana) o quizás la cresta conoidal, más eficiente. La maximización del almacenamiento en embalses también ha llevado al uso de vertederos verticales fijos, tanto de diseño recto como laberíntico, colocados sobre una amplia cresta; puertas de cresta controladas neumáticamente; y una variedad de diseños de compuertas de aliviadero estándar, más comúnmente compuertas radiales. Cada uno de estos tratamientos de cresta da como resultado características particulares que el diseñador debe abordar y el costo no siempre es el factor decisivo. (Frizell & Frizell, 2015, p.9)

2.5.4.5. Vertedero libre sin control

Las crestas de desbordamiento libre son el tratamiento de cresta más común utilizado para aliviaderos escalonados. Gran parte de la investigación moderna sobre este tema ha detallado las condiciones de flujo en los pasos resultantes de un desbordamiento libre e incontrolado. Esto ha dado como resultado que muchos parámetros de diseño de rendimiento importantes se vinculen a los diseños de desbordamiento libre. Además, muchos de los tratamientos de pasos de transición que se han desarrollado son específicos para las crestas de desbordamiento libre, aunque específicos de la forma de la cresta. La forma de la cresta generalmente varía con la pendiente del aliviadero. Cuanto más pronunciada sea la pendiente del aliviadero, más probable será que se utilice algún tipo de forma de cresta aerodinámica, como una conoidal.

Los aliviaderos más altos y con pendientes más pronunciadas tienden a tener una forma de cresta más eficiente, como la cresta conoidal tradicional. Bureau of Reclamation (1987) y U.S. Army Corps of Engineers (1977) proporcionan ecuaciones que pueden predecir la

parte inferior del perfil de la napa para diseñar el perfil escalonado para vertederos con pendiente pronunciada. La ecuación de Nappe para una presa vertical aguas arriba y una velocidad de aproximación baja es:

$$y = \frac{x^{1.85}}{2H_0^{0.85}} \quad (2.11)$$

donde x , y y H_0 son las coordenadas horizontales y verticales desde el vértice de la cresta y H_0 es la cabeza. Un tratamiento típico para los escalones aguas abajo del borde de la cresta es igualar el perfil de la napa (Sorenson 1985, Houston 1987, Frizell 1990, Bindo et al. 1993 y Mateos y Elviro 2000). Por lo general, se utilizan pequeños escalones en la parte superior de la cresta para evitar salpicaduras en flujos mucho más bajos que el flujo de diseño. Luego, las alturas de los escalones varían para coincidir con el perfil de la napa y permanecen constantes una vez que se alcanza el punto de tangencia para la sección con pendiente constante. Los primeros escalones en la parte superior de la cresta son generalmente más pequeños, para minimizar las salpicaduras que pueden ocurrir cuando el flujo se separa de la superficie del aliviadero y luego se vuelve a unir aguas abajo. Esto es especialmente frecuente en caudales bajos, significativamente menores que las condiciones de diseño. Hanna y Frizell (1997) determinaron durante las pruebas de la presa Buckhorn que era importante diseñar la forma del perfil por debajo de la altura de diseño para evitar que el flujo brotara libremente cerca de la parte superior de un aliviadero escalonado con una pendiente muy pronunciada. Durante la construcción de una sección de prueba para el aliviadero en la presa Upper Stillwater, se determinó que era necesario ensanchar la cresta en la dirección del arroyo, lo que resultó en una sección superior muy empinada de 0,32:1 que intersectaba la pendiente de 0,6:1 de 72 pies. (22 m) por el tobogán. El borde exterior del primer escalón coincide con el perfil estimado de la napa inferior. Este perfil también fue diseñado por menos de la cabeza de diseño. Los siguientes pasos sobresalen cada vez más en la forma teórica de la napa durante aproximadamente 10 pies (3 m), debajo de los cuales las intersecciones de las contrahuellas y los escalones coinciden con la curva de la napa. Aunque no ha habido derrames significativos, se ha demostrado que los desbordamientos delgados saltan libremente y caen sobre muchos de

los escalones en esta sección superior sin hacer contacto con la superficie del aliviadero.(Frizell & Frizell, 2015, p.10)

2.5.4.6. Arrastre de aire

La concentración de aire juega un papel importante en la determinación de la profundidad del flujo, la velocidad y la disipación de energía en un aliviadero escalonado. Gran parte del impacto se basa en la profundidad que se utiliza para calcular los parámetros relacionados con la energía; la profundidad equivalente del agua clara o la profundidad de la mezcla aireada. Muchos investigadores han optado por utilizar la profundidad a la que la concentración de aire es igual al 90% como un parámetro importante en la correlación de muchas características que describen el rendimiento del aliviadero escalonado. Además, muchos han descubierto que, para comparar los datos de aliviaderos escalonados con los de vertederos lisos, se debe determinar la profundidad equivalente del agua clara, eliminando esencialmente cualquier abultamiento o aumento en la profundidad del flujo debido a la aireación.(Frizell & Frizell, 2015, p.14)

2.5.4.7. Longitud hasta el punto de inicio de la aireación

La presencia de escalones en el canal o aliviadero aumenta considerablemente la rugosidad y, a su vez, provoca una auto aireación más rápidamente que en superficies lisas. Uno de los factores de diseño más importantes es la longitud a lo largo del conducto hasta el inicio del arrastre de aire. Muchos investigadores han demostrado que este factor es importante para definir las profundidades del flujo y la disipación de energía en el conducto. Se han utilizado modelos físicos de una variedad de escalas para desarrollar varias fórmulas para predecir esta duración inicial.

Todos los métodos y ecuaciones muestran que el factor principal en la distancia a lo largo del canal hasta el punto de entrada del aire es la descarga, con menos dependencia de la pendiente del canal y la altura del escalón. Cuanto más pronunciada sea la pendiente, más corta será la distancia hasta la entrada de aire y, obviamente, los escalones provocarán la aireación antes que en un aliviadero liso.

Se ha investigado la concentración media de aire en el punto de inicio tanto para presas de terraplén como para presas de gravedad más pronunciadas.

$$C_{meani} = 0.163F_r^{0.154} \quad (2.12)$$

Se determinó que el valor promedio de $C_{meani} \approx 0.2$ para pendientes pronunciadas. El punto de inicio como el lugar donde la capa límite alcanza la superficie libre. La concentración media de aire en el punto de inicio, definido como el punto con 0,01% de aire, para pendientes de $26^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ era:

$$C_{meani} = 1.2 \times 10^{-3} (240^\circ - \theta) \quad (2.13)$$

Ambas ecuaciones muestran que la concentración media de aire al inicio no depende de la altura del escalón, sino sólo de la pendiente escalonada del aliviadero. Para una pendiente de 53° , igual a la pendiente de los experimentos, la ecuación 6 arroja una concentración media de aire al inicio de 0,22, que concuerda con el 0,20. (Frizell & Frizell, 2015, p.16)

2.5.4.8. Concentración media del aire

Las condiciones de flujo uniforme o de equilibrio son importantes para predecir la concentración media de aire en el flujo desnatado que baja por un aliviadero escalonado. El flujo uniforme se logra en el punto del vertedero donde la profundidad incremental del flujo, la velocidad y la concentración de aire son esencialmente constantes. Para predecir la concentración media del aire en las regiones de flujo rápida y gradualmente variadas, pero demostró que en la región de flujo uniforme; se podrían utilizar las ecuaciones convencionales de rampa suave. La concentración media uniforme del aire era función de la pendiente y el caudal. Varios investigadores han demostrado en estudios de modelos y prototipos de canales que la concentración media de aire de un aliviadero escalonado es muy similar a la de un aliviadero liso una vez que se ha logrado un flujo uniforme. Una ecuación simplificada para predecir la concentración media de aire en un flujo uniforme:

$$C_{mean} = 0.75(\sin \theta)^{3/4} \quad (2.14)$$

Esta concentración media de aire se puede utilizar para determinar la profundidad equivalente del agua clara y la profundidad volumétrica para las características de

disipación de energía y las alturas de los muros de entrenamiento.(Frizell & Frizell, 2015 p.17)

2.5.4.9. Determinación de flujo uniforme

El flujo uniforme puede ser una condición importante y útil para lograr en el diseño de un aliviadero escalonado. Muchos investigadores han propuesto ecuaciones para predecir si el flujo ha alcanzado el estado de equilibrio en aliviaderos escalonados.

$$\frac{H_{dam}}{d_c} \geq (15 \text{ to } 20) \quad (2.15)$$

Ecuación para estimar la profundidad uniforme equivalente del agua clara en función de la profundidad crítica y la pendiente del aliviadero:

$$\frac{d_{cw}}{d_c} = 0.215(\sin \theta)^{\frac{1}{3}} \quad (2.16)$$

Si la descarga unitaria de diseño es grande o la altura de la presa es baja, lo más probable es que no se logre un flujo uniforme. Esto es común para muchas aplicaciones de presas pequeñas y es difícil estimar el efecto de la altura del escalón versus la disipación de energía en esas condiciones.(Frizell & Frizell, 2015, p.17)

2.5.4.10. Disipación de energía

Una de las características más atractivas de la selección de un aliviadero escalonado sobre un vertedero liso es la disipación de energía mejorada que tiene lugar en el propio vertedero. El beneficio surge de una cantidad reducida de energía cinética en la punta del aliviadero y, por lo tanto, se requiere una cuenca amortiguadora más pequeña (más corta). Los costos de excavación y la cantidad de concreto y refuerzo son las principales características de ahorro de costos de un estanque amortiguador más pequeño. El régimen de flujo también es una característica importante para predecir la disipación de energía.

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\{(1-A)^N [1 + 1.5(\frac{d_c}{h})] + \sum_{i=1}^{N-1} (1-A)^i\}}{N + 1.5(\frac{d_c}{h})} \quad (2.17)$$

Donde:

$$A = \left[0.30 - 0.35 \left(\frac{h}{l} \right) \right] - \left[0.54 - 0.27 \left(\frac{h}{l} \right) \right] \log \left(\frac{d_c}{h} \right) \quad (2.18)$$

En el régimen de flujo de napa, la pérdida total de energía depende en gran medida del número de pasos. La pérdida total de energía en el flujo de napa disminuye a medida que aumenta el número de pasos para la misma pendiente, altura de la presa y descarga. Por lo tanto, para presas bajas con grandes escalones en la región de flujo no uniforme, el flujo de napa produce más pérdida de energía que el flujo de rasante. A medida que aumenta la altura de la presa, las pendientes de los conductos para soportar el flujo de napa o el flujo desnatado deben ser muy diferentes y, aunque se puede lograr un flujo uniforme y una disipación de energía similar con cualquiera de las disposiciones, normalmente se elige el conducto más empinado con flujo desnatado debido a los costos de construcción y al espacio.

Generalmente, diseñar un aliviadero específicamente para el flujo de napa requiere escalones más grandes y pendientes más planas. Es probable que los costos de construcción sean elevados y la opción más rentable sería diseñar para el régimen de flujo desnatado. Los vertidos específicos de mayor tamaño también se están volviendo más comunes como opción de ahorro de costes. Las características del flujo de la napa entonces sólo son significativas porque el flujo de la napa ocurrirá a tasas de flujo más bajas que pueden ocurrir con frecuencia en un proyecto, y podría conducir a salpicaduras y pulverizaciones excesivas. Algunos investigadores han estudiado varias estructuras unidas a los escalones para manipular el campo de flujo turbulento, utilizando patrones de escalones no uniformes o pendientes adversas en los escalones para forzar saltos hidráulicos en los escalones. (Frizell & Frizell, 2015, p.18)

2.5.4.11. Factor de fricción

Para determinar la energía residual debajo de un aliviadero escalonado es fundamental comprender las variables involucradas, es decir, los efectos de fricción, arrastre y aireación.

La diferencia entre aliviaderos lisos y aliviaderos escalonados es que, en aliviaderos lisos predomina la fricción superficial y en aliviaderos escalonados predomina el arrastre por forma. En el flujo desnatado, las puntas de los escalones forman un pseudo-fondo paralelo al fondo del conducto sobre el cual pasa el flujo. El agua roza los bordes de los escalones con formación de vórtices recirculantes entre la corriente principal y las esquinas de los escalones. La transferencia de impulso se produce entre los remolinos recirculantes en los desplazamientos escalonados y el flujo de desnatación principal, lo que aumenta la disipación de energía. En pendientes pronunciadas, los remolinos de recirculación son el mecanismo principal para el arrastre de forma y la disipación de energía, mientras que, en pendientes más planas, los remolinos de recirculación producen arrastre de forma además de la fricción superficial en la superficie del escalón y las estelas de superficie libre.

Aunque predomina el arrastre de forma, el factor de fricción de Darcy-Weisbach es el parámetro aceptado para determinar la disipación de energía. El factor de fricción de Darcy-Weisbach para el flujo de aire y agua viene dado por:

$$f_e = \frac{8gS_f d_{cw}^2}{q_{cw}^2} \left[\frac{D_h}{4} \right] \quad (2.19)$$

Donde, para un conducto hidráulicamente ancho, $D_h/4 \cong d_{cw}$, la profundidad equivalente del agua clara. Esto resulta en:

$$f_e = \frac{8gS_f d_{cw}^3}{q_{cw}^2} \quad (2.20)$$

Para flujo no uniforme y gradualmente variado. Con condiciones de flujo uniforme, la pendiente de fricción es igual a la pendiente del fondo, por lo que se aplica la siguiente ecuación para el flujo desnatado sobre canales de aliviadero escalonados hidráulicamente anchos:

$$f_e = \frac{8g d_{cw}^3 \sin \theta}{q_{cw}^2} \quad (2.21)$$

El factor de fricción y la energía residual en el flujo deben determinarse utilizando los valores de agua clara para la profundidad y la velocidad, incluso si el flujo es altamente turbulento y aireado.

La profundidad media del flujo medida mediante observación visual es del mismo orden de magnitud que la profundidad característica Y90. La profundidad equivalente de agua clara dcw es mucho menor que Y90, lo que confirma la sobreestimación significativa del factor de fricción y la disipación de energía basada en la medición de la profundidad del flujo aireado o la observación visual. Cerca del extremo aguas abajo de un largo vertedero, donde se logra un flujo uniforme, tanto Y90 como dcw se vuelven prácticamente constantes.

Sin embargo, realizar mediciones en flujos altamente aireados es difícil y los resultados pueden variar dependiendo de las técnicas y métodos utilizados para realizar las mediciones de profundidad, concentración de aire y velocidad. Muchas de las primeras investigaciones no midieron la concentración de aire y determinaron profundidades que probablemente eran profundidades de mezcla o profundidades de flujo aireado. El uso de profundidades de flujo aireado para determinar un factor de fricción produjo resultados de factor de fricción muy sobreestimados. Otras veces los factores de escala del modelo no fueron adecuados para producir la aireación que normalmente ocurriría y los resultados de los factores de fricción nuevamente se sobreestimaron. Además, si la longitud o la altura de la instalación no eran adecuadas para lograr un flujo uniforme, los factores de fricción generalmente también se sobreestimaban. (Frizell & Frizell, 2015, p.20)

2.5.4.12. Diseño de pared lateral

Las dimensiones del conducto generalmente son producto de limitaciones de la geometría del sitio, las propiedades de descarga y la economía. Las descargas específicas generalmente han sido bajas para la mayoría de los aliviaderos escalonados diseñados en el pasado. Esto da como resultado profundidades de flujo más bajas, incluso con profundidades de flujo abultadas causadas por la aireación inducida. La opción de estrechar el conducto del aliviadero y aumentar la profundidad y la descarga específica ha recibido cierta atención, pero las incertidumbres con respecto al posible daño por cavitación en la zona antes del punto de inicio han resultado en solo un puñado de diseños

con grandes profundidades de flujo inicial. Además, existe la opción de hacer converger las paredes laterales para permitir dimensiones de descarga terminal más estrechas y cuencas amortiguadoras de menor ancho. Las paredes laterales convergentes causan sus propios problemas, lo que resulta en una mayor profundidad del flujo en las paredes laterales y ondas de choque o la formación de saltos hidráulicos oblicuos a lo largo de las paredes laterales.(Frizell & Frizell, 2015, p. 24)

2.5.4.13. Paredes paralelas

El diseño de paredes laterales verticales paralelas en un vertedero escalonado es principalmente un ejercicio para predecir las profundidades del flujo a lo largo del vertedero de modo que el flujo sea contenido por las paredes de formación. El aumento del volumen del flujo o el aumento de la profundidad debido al arrastre de aire se produce tanto en canaletas lisas como escalonadas. El arrastre de aire generalmente se acelera en un conducto escalonado versus un conducto liso debido al límite extremadamente irregular. La altura de la pared lateral del conducto (hw) generalmente se basa en un multiplicador del “factor de seguridad” para la profundidad uniforme de la mezcla $Y_{90,u}$, $hw = nY_{90,u}$. Ohtsu et al. (2004) sugirieron $n=1,4$ utilizando la relación Y_{99}/Y_{90} . La profundidad uniforme de la mezcla $Y_{90,u}$ viene dada por

$$\frac{Y_{90,u}}{h} = \frac{1}{2} F_*^{(0.1 \tan \theta + 0.5)} \quad (2.22)$$

Donde h es la altura del escalón, F_* es la rugosidad alterna número de Froude y θ es el ángulo de la rampa con respecto a la horizontal. El uso de factores de seguridad de 1,2 para presas de hormigón o lugares no sujetos a posible erosión y de 1,5 para aliviaderos de emergencia y presas de terraplén o sitios propensos a la erosión. Las profundidades máximas pueden ser considerablemente mayores que las propuestas por otros, llegando a alcanzar hasta Y_{99}/Y_{90} de 1.9 para pequeñas profundidades críticas normalizadas.(Frizell & Frizell, 2015, p. 25)

2.5.4.14. Potencial de cavitación

Con el uso cada vez mayor y el deseo de hacer pasar descargas específicas más grandes sobre las superficies escalonadas, todavía hay considerables incógnitas sobre si se puede

formar cavitación y en qué condiciones. Para el diseñador de aliviaderos escalonados, una pregunta importante es: ¿se puede aplicar alguno de los principios tradicionales de diseño de aliviaderos con canal liso con respecto a la mitigación de la cavitación. La incertidumbre que rodea la predicción del potencial de cavitación en aliviaderos escalonados ha perpetuado las prácticas de diseño conservadoras.

El régimen de flujo en el que opera un aliviadero escalonado es un parámetro importante que determina si existe la posibilidad de que se produzca cavitación. Si un aliviadero opera en el régimen de flujo de napa, hay pocas posibilidades de que se forme cavitación. Las condiciones de flujo altamente aireado asociadas con el flujo de napa, incluso con grandes descargas específicas, no conducen a la formación de cavitación. El flujo desnatado forma una capa de corte muy intensa a lo largo de la línea que conecta las puntas de los escalones sucesivos (también llamada pseudo-fondo),

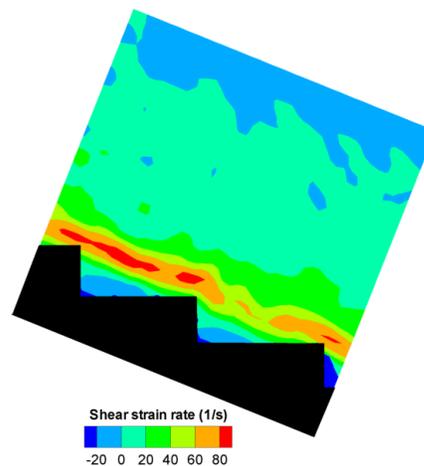


Figura. 2.22. Tasa de deformación por corte a partir de mediciones PIV en un canal escalonado.

Fuente: Frizell & Frizell, 2015

La estructura de flujo dentro de esta capa de corte sustenta la formación de cavitación a lo largo de características de flujo secundario con muchas similitudes con otros tipos de flujos de corte con cavitación, incluidas las capas de corte planas y chorros sumergidos.

A lo largo de los años ha habido varios enfoques para abordar el potencial de cavitación en vertederos escalonados. El índice crítico de cavitación en el punto de inicio del arrastre

de aire en vertederos de pendiente pronunciada basándose en la relación propuesta para una rugosidad distribuida uniformemente, junto con un reanálisis de los datos del factor de fricción. La fórmula empírica resultante estimó el índice de cavitación en el punto de inicio en función de la altura del escalón y de la descarga específica. Basados en la posibilidad de que esta velocidad pueda ser alcanzada antes del inicio del arrastre de aire para un rango de pendientes y alturas de escalón. Cada escalón como una irregularidad singular del fondo con riesgo de cavitación.

Usando esta correlación, el diseñador solo necesita especificar parámetros básicos como la pendiente del aliviadero y la altura del escalón, calcular un factor de fricción a partir de cualquier número de métodos presentados en la literatura y luego aplicar la correlación, $\sigma_c = 16 C_f = 4f$, para predecir el punto crítico. índice de cavitación. Los índices de cavitación del flujo se pueden calcular a lo largo de la longitud del aliviadero, particularmente en la porción no aireada y compararse con el índice crítico. Si el índice de flujo cae por debajo del índice crítico antes de la longitud a lo largo del aliviadero donde comienza el arrastre de aire, entonces posibles características de diseño tales como rampas de aireación o diseños especializados de rampa/muelle en un aliviadero cerrado debería ser considerado.

Colocar una rampa en el primer escalón para activar la aireación al inicio del aliviadero. Esta ubicación fue en gran medida el resultado de asumir que el índice de cavitación crítica era 1, lo que podría ocurrir cerca del comienzo del aliviadero. los aireadores escalonados, concentrándose en reducir la pulverización creada con flujos bajos y al mismo tiempo ofreciendo protección contra la cavitación con flujos altos. los resultados de un estudio modelo de un gran aliviadero escalonado con un aireador instalado para contrarrestar posibles daños por cavitación. Las presiones transitorias medidas en los escalones durante el estudio del modelo indican que se podría alcanzar la presión de vapor, lo que hace posible la formación de cavitación. Si bien las presiones escalonadas transitorias ciertamente pueden favorecer la formación de cavitación, las características del flujo secundario dentro de la capa de corte que se desplaza a lo largo del pseudo-fondo son probablemente el principal factor que contribuye a la posibilidad de formación de cavitación y cualquier daño resultante.(Frizell & Frizell, 2015, p. 27)

CAPÍTULO III. APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1. Ubicación

La investigación en Huacata del que se analizara solo un tramo del canal de trasvase mediante el programa Solidworks se encuentra ubicado en el Departamento de Tarija, el área de aprovechamiento del recurso hídrico está situada en la Provincia Eustaquio Méndez, municipio de San Lorenzo y el beneficio se sitúa en los municipios de San Lorenzo y Cercado, dentro de las coordenadas: 21°15' y 21°31' de latitud sur, 65°42' y 65°50' de longitud oeste.

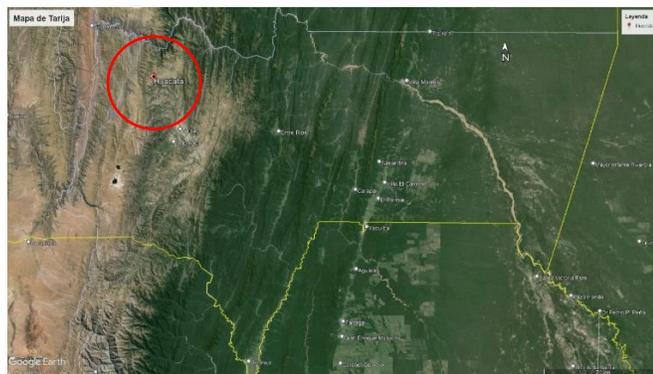


Figura 3.1. Mapa del departamento de Tarija.

Fuente: Google Earth.

El acceso al área del aprovechamiento del proyecto se realiza por el camino comunal que conduce hasta las localidades de Huancoyro y Huacata, mientras que al Valle del Río Guadalquivir se puede acceder por el camino principal que llega hasta la localidad de Tomatas Grande. Estos caminos se encuentran en buen estado todo el año, lo cual ha facilitado la investigación de campo.



Figura 3.2. Ubicación de la estructura en el embalse Huacata.

Fuente: Google Earth.

3.1.1. Canal desde la toma Huacata hasta el sitio de la presa

En forma general, este canal en un 80 % de su longitud está construido en laderas con pendiente moderada, estratos de limolitas y lutitas pizarrosas aflorantes, sin presentar mayores problemas de estabilidad de ladera. El resto está excavado en cubierta coluvial o suelo residual que cubre pequeños sectores del trazo. (Serinco, 2010)

3.1.2. Toma y trasvase del río Huacata

A una altura de 2.804,80 m.s.n.m., se construyó una toma con una capacidad de 800 l/s, seguida de un canal, sistema que permitió el trasvase del agua del río Huacata a la cuenca de la Quebrada Negra a 300 m aguas abajo de su confluencia con el río Casa Cancha, aportando el recurso hídrico al embalse que se formó con la construcción de la presa sobre dicha Quebrada Negra.

La toma está compuesta por una presa derivadora de 7,00 m de altura, con rejilla de fondo tipo tirolesa ubicada en el cuerpo de la presa, embovedado, desgravador, canal de aducción y rápida al final del canal para la entrega del agua al embalse de la Quebrada Negra.

La cota de la corona del vertedero es 2.811,50 m. s. n. m., el ancho de 2,5 m, al pie cuenta con un pozo de disipación de la energía construido en hormigón armado de 17 m de longitud y 1,1 m de profundidad. La altura de la lámina de crecida es igual a 1,88 m, con un bordo libre de 0,62 m, los muros de cierre con las márgenes tienen como cota de coronamiento 2.814,0 m.s.n.m. (Serinco, 2010)

3.1.3. Conducción

El sistema de conducción está conformado por un canal abierto, tres pasos de quebradas y un vertedero escalonado al final de la conducción para entregar el agua al embalse de la Quebrada Negra.

El canal de conducción se inicia inmediatamente después del canal de captación del agua del desgravador en la cota 2.810,0 m.s.n.m.

La sección hidráulica es igual a 0,70 m de tirante hidráulico, 1,50 m de ancho del canal y 0,10 m de bordo libre. La gradiente es igual a 0,07%, y fue determinada por la cota al final del canal en correspondencia con la cota normal del embalse de 2.807,0 m.s.n.m.

Esta gradiente permite una velocidad en el canal igual a 0,95 m/s, suficiente para evitar la sedimentación del mismo.

El canal tiene una longitud de 4.090,79 m, fue excavado en roca en toda su extensión y es de hormigón ciclópeo. En el trayecto se tienen tres cruces de quebradas de 20 m de longitud, que son acueductos de la misma sección del canal, construidos en hormigón armado con apoyos en ambas márgenes de las pequeñas quebradas.

Al final del canal la solera tiene la cota 2.807,18 m.s.n.m. (Serinco, 2010)

3.2. Planos previos

En la aplicación práctica se hizo análisis de la información obtenida del resumen ejecutivo del proyecto Huacata y al no contar con los planos As Built del canal, se optó por realizar un levantamiento topográfico al tramo del canal en estudio.

3.3. Levantamiento topográfico

Para el levantamiento topográfico se optó por realizarse con estación total SOKKIA SET 5X y GPS-GARMIN OREGON 550 que fue proporcionado por el Laboratorio de Topografía de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”. (ver Anexo 1)



Figura 3.3. Levantamiento topográfico.

Fuente: Fotografía del autor.

La práctica se realizó el 11 de agosto de 2022, eligiendo un día con la climatología estable y soleada para que no se presente algún inconveniente con la práctica.

Los puntos de coordenadas se sugirió hacer base con los mojones puestos por la UAJMS, pero al ver que se encontraban destruidos se optó por realizarlo con el GPS (sistema de posicionamiento global) realizando varias pruebas de corroboración inicial para tratar de reducir el margen de error que pudiese existir.

La toma de puntos se realizó directamente al canal desde dentro del canal, así evitando cualquier error de encofrado que se pudiese presentar, al haber algún error de diferencias de grosor del muro.

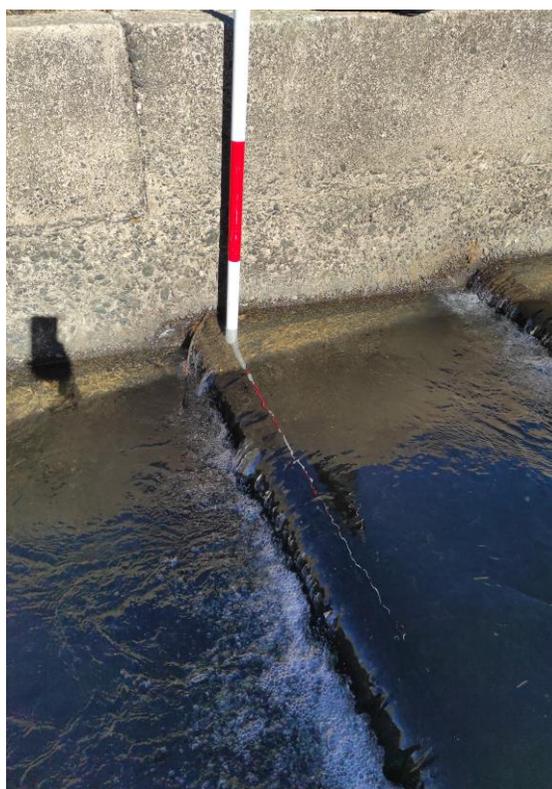


Figura 3.4. Posicionamiento de los prismas en el canal.

Fuente: Fotografía del autor.

Los puntos iniciales para el estudio del canal se tomaron como referencia el muro de la represa de Huacata, con una distancia prudente hasta el primer escalón.

El posicionamiento de los prismas en el canal en la curva y hasta el final se hizo entre cada dentellón de distancia para tener más exactitud y tener la distancia de cada tramo presente en el canal llegando hasta el dentellón 61 donde el nivel de agua del embalse nos permitía llegar a medir.

3.3.1. Datos

Los puntos tomados en la práctica se almacenaron en la memoria de la estación total, para luego ser exportados en formato Excel. (ver Anexo 2)

Tabla 3.1. Resumen de coordenadas tomadas con la estación total.

N°	NORTE	ESTE	ALTITUD	PUNTO
1	7650906,000	312333,000	2803,000	B-1
2	7650933,910	312325,771	2804,089	B-0
3	7650944,799	312340,208	2803,065	D1
4	7650944,803	312340,208	2802,145	DER1
5	7650944,927	312338,781	2802,135	IZQ1
6	7650932,443	312339,328	2802,074	DER2
7	7650932,602	312337,938	2802,062	IZQ2
8	7650931,363	312339,337	2802,058	DER3
9	7650931,354	312337,903	2802,057	IZQ3
10	7650930,291	312339,343	2802,031	DER4
11	7650930,316	312338,001	2802,043	IZQ4
12	7650929,205	312339,436	2802,040	CANAL5
13	7650929,162	312338,140	2802,039	CANAL6
14	7650928,122	312339,554	2802,036	CANAL7
15	7650927,908	312338,225	2802,018	CANAL8
...
113	7650895,092	312376,185	2796,092	CANAL103
114	7650893,781	312375,604	2796,096	CANAL104
115	7650894,657	312377,191	2795,941	CANAL105
116	7650893,346	312376,593	2795,931	CANAL106
117	7650894,238	312378,154	2795,767	CANAL107
118	7650892,917	312377,590	2795,759	CANAL108
119	7650893,768	312379,196	2795,597	CANAL109
120	7650892,471	312378,653	2795,592	CANAL110
121	7650893,367	312380,147	2795,432	CANAL111
122	7650892,042	312379,611	2795,426	CANAL112
123	7650892,911	312381,185	2795,311	CANAL113
124	7650891,617	312380,600	2795,282	CANAL114
125	7650891,139	312385,159	2794,618	CANAL115
126	7650889,895	312384,674	2794,623	CANAL116

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos tomados en campo con la estación total y la toma de medidas que se realizaron al canal como ser el ancho de base, altura, dimensiones de los dentellones se procedió a realizar los planos del tramo del canal que es estudiado. (ver Anexo 5)

3.4. Aforo con molinete hidráulico

La hidrometría es una parte de la hidrología que mide el volumen de agua que circula superficialmente o un conducto en un tiempo dado. Además de medir la cantidad de agua que circula por la sección de un río, tubería o canal.

El trabajo en campo se realizó el 16 de octubre de 2023, (ver Anexo 3) con un total de 4 aforos, los cuales fueron en lugares estratégicos previamente marcados por tener una tendencia más relevante en el tramo de estudio, observaciones que se realizó durante la visita técnica.

En cada punto de aforo se trazó una horizontal del ancho del canal de 1,5m para sacar el seccionamiento del ancho de franja para las mediciones y se determinó realizar 15 puntos de medida a lo ancho de cada aforo, con un ancho de franja de 10 cm entre cada uno.

Para las mediciones al no contar con mucho flujo de caudal se determinó realizar el aforo a dos profundidades por cada punto, a 0,2 de del tirante y a 0,8 del tirante que por punto de aforo en total se tuvo 30 mediciones en total.

Tabla 3.2. Posicionamiento para las tomas de velocidades en cada punto.

Descripcion	Unid.	Vertical N°														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Dist. de la vertical desde la pared "d"	cm	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145
Ancho franja "x"	cm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1. Primer punto de aforo

La ubicación del primer punto de aforo se realizó en el lugar de inicio del levantamiento topográfico para que concuerde con el inicio del modelo realizado en el programa Solidworks, ya que será el caudal de inicio para la simulación hidráulica en el programa.



Figura 3.5. Medición en campo.

Fuente: Fotografía del autor.

Para la determinación del caudal total, se determinó la velocidad media por franja entre las velocidades para 0,2 y 0,8 del tirante y con un área parcial de cada franja se determinó el caudal mediante la fórmula para canales abiertos:

$$Q = V * A$$

Q= caudal (m³/s)

V= velocidad (m/s)

A= área (m²)

Tabla 3.3. Determinación del caudal total (Q) punto 1.

Profundidad	Unid.	Velocidad con molinete en Vertical N°														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,2 y	m/s	0,050	0,060	0,060	0,064	0,065	0,066	0,068	0,069	0,067	0,067	0,067	0,060	0,060	0,050	0,050
0,8 y	m/s	0,050	0,065	0,063	0,066	0,066	0,066	0,067	0,068	0,066	0,067	0,066	0,060	0,055	0,048	0,050

Descripción	Unid.	Velocidad con molinete en Vertical N°															
Velocidad media franja "Vmi"	m/s	0,050	0,063	0,062	0,065	0,066	0,066	0,068	0,069	0,067	0,067	0,067	0,060	0,058	0,049	0,050	
Area franja "Ai"	m ²	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	
Caudal parcial "Qi"	m ³ /s	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	
Caudal total "Q"	m ³ /s	0,010															
Caudal total "Q"	l/s	9,692															
Area total seccion "A"	m ²	0,158															
Velocidad media "Vm"	m/s	0,062															

Fuente: Elaboración propia.

El caudal para el punto N°1 es: Q = 9,692 l/s.

3.4.2. Segundo punto de aforo

El segundo punto de aforo fue en el inicio del vertedero escalonado ya que es el inicio de la curva la cual tiene cambio de dirección horizontal y vertical pero también es el inicio de los dentellones o reductores de velocidad.



Figura 3.6. Primer dentellón.

Fuente: Fotografía del autor.

Tabla 3.4. Determinación del caudal total (Q) punto 2.

Profundidad	Unid.	Velocidad con molinete en Vertical N°														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,2 y	m/s	0,040	0,040	0,045	0,045	0,045	0,050	0,055	0,060	0,060	0,060	0,050	0,050	0,045	0,040	0,040
0,8 y	m/s	0,040	0,035	0,040	0,045	0,045	0,050	0,055	0,055	0,060	0,060	0,050	0,050	0,045	0,040	0,040

Descripcion	Unid.	Velocidad con molinete en Vertical N°														
Velocidad media franja "Vmi"	m/s	0,040	0,038	0,043	0,045	0,045	0,050	0,055	0,058	0,060	0,060	0,050	0,050	0,045	0,040	0,040
Area franja "Ai"	m ²	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
Caudal parcial "Qi"	m ³ /s	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Caudal total "Q"	m ³ /s	0,012														
Caudal total "Q"	l/s	12,34														
Area total seccion "A"	m ²	0,258														
Velocidad media "Vm"	m/s	0,0478														

Fuente: Elaboración propia.

El caudal para el punto N°2 es: $Q = 12,34$ l/s.

3.4.3. Tercer punto de aforo

El tercer punto de aforo fue en el escalón N°5 donde el canal tiene un cambio brusco de pendiente y donde se observa desgaste en el hormigón del canal.



Figura 3.7. Aforo en el dentellón N°5.

Fuente: Fotografía del autor.

Tabla 3.5. Determinación del caudal total (Q) punto 3.

Profundidad	Unid.	Velocidad con molinete en Vertical N°														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,2 y	m/s	0,045	0,045	0,050	0,050	0,050	0,055	0,055	0,060	0,060	0,055	0,050	0,050	0,045	0,040	0,040
0,8 y	m/s	0,045	0,045	0,050	0,050	0,050	0,050	0,055	0,060	0,055	0,050	0,050	0,045	0,040	0,040	

Descripcion	Unid.	Velocidad con molinete en Vertical N°															
Velocidad media franja "V _{mi} "	m/s	0,045	0,045	0,050	0,050	0,050	0,053	0,055	0,060	0,058	0,053	0,050	0,048	0,043	0,040	0,040	
Area franja "A _i "	m ²	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	
Caudal parcial "Q _i "	m ³ /s	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	
Caudal total "Q"	m ³ /s	0,013															
Caudal total "Q"	l/s	12,538															
Area total seccion "A"	m ²	0,255															
Velocidad media "V _m "	m/s	0,0492															

Fuente: Elaboración propia.

El caudal para el punto N°3 es: $Q = 12,538$ l/s.

3.4.4. Cuarto punto de aforo

El cuarto punto de aforo fue en el dentellón N°28, donde la curva llega ya a suavizarse para entrar a la última recta para entrar al embalse.



Figura 3.8. Aforo en el dentellón N°28.

Fuente: Fotografía del autor.

Tabla 3.6. Determinación del caudal total (Q) punto 4.

Profundidad	Unid.	Velocidad con molinete en Vertical N°														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,2 y	m/s	0,050	0,050	0,050	0,055	0,055	0,055	0,060	0,065	0,065	0,060	0,055	0,050	0,050	0,050	0,045
0,8 y	m/s	0,045	0,050	0,050	0,050	0,055	0,055	0,055	0,065	0,060	0,060	0,055	0,050	0,050	0,050	0,045

Descripción	Unid.	Velocidad con molinete en Vertical N°															
Velocidad media franja "Vmi"	m/s	0,048	0,050	0,050	0,053	0,055	0,055	0,058	0,065	0,063	0,060	0,055	0,050	0,050	0,050	0,045	
Area franja "Ai"	m ²	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	
Caudal parcial "Qi"	m ³ /s	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	
Caudal total "Q"	m ³ /s	0,013															
Caudal total "Q"	l/s	13,041															
Area total seccion "A"	m ²	0,243															
Velocidad media "Vm"	m/s	0,0537															

Fuente: Elaboración propia.

El caudal para el punto N°4 es: $Q = 13,041$ l/s.

3.4.5. Molinete hidráulico

Para la toma de velocidades en el canal de trasvase se usó un molinete hidráulico marca Global Water, modelo BA1110



Figura 3.9. Molinete hidráulico Global Water.

Fuente: VVA Industrial.

3.5. Modelación en Solidworks

Para las modelaciones de objetos, estructuras y un sin fin de figuras geométricas compuestas en Solidworks existe una herramienta llamada el modelado por piezas, la cual nos permite pasar el diseño de los planos en 2D a 3D y que mediante la herramienta ensamblaje permite unir dos o más piezas y fusionarlas entre sí.

Esta es una herramienta muy valiosa siempre y cuando la estructura a modelar sea simétrica, y no sea dependiente de desniveles topográficos y las irregularidades del terreno.

Para el modelamiento de esta investigación se analizó este formato del modelaje por piezas dando a cada dentellón con su tramo como una sola pieza, pero al contar con más de 50 dentellones presentes y tener un canal curvo con cambio de dirección vertical y horizontal para la llegada al embalse, no era el más adecuado ya que presento errores en

el ensamblaje ya que no se llegó a unir correctamente las piezas, no se podía respetar las pendientes presentes en el terreno y la estructura estaba inhabilitado para simular.

El método más práctico y realista para esta investigación es manejarla como una sola pieza compuesta, ya que se puede manejar con croquis en planos 3D con coordenadas para la base y de ahí el diseño de todo el canal.

3.5.1. Croquis 3D

Para la elaboración del croquis en 3D, Solidworks solo nos permite el ingreso de coordenadas hasta +- un millón, lo cual para nuestra zona geográfica no era lo más adecuado, entonces en el punto inicial del canal se realizó punto 0 en las tres dimensiones, así restando a los demás puntos de coordenadas el mismo valor para que no exista algún error y se mantengan las diferencias iniciales.

Se realizó con el ingreso de las coordenadas obtenidas en el levantamiento topográfico los cuales tienen variación en las 3 dimensiones y-x-z a Solidworks y al unir de 4 puntos en 4 puntos se generan planos para luego darles volúmenes y forma.

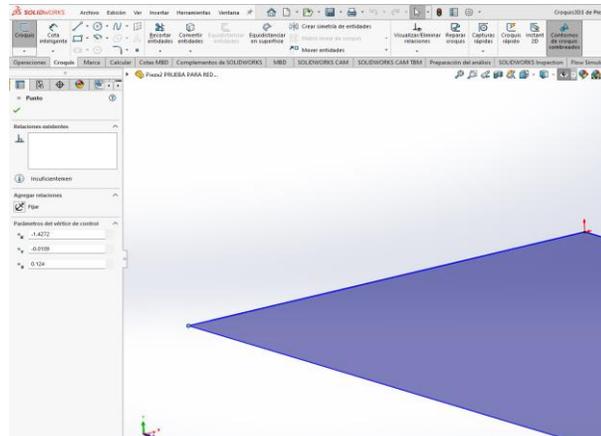


Figura 3.10. Croquis por punto en 3D.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

3.5.2. Extruir saliente o base

La operación de extruir, es una operación para darle el volumen especificado a los croquis previamente realizados, dando así hasta la altura o longitud seleccionada y Solidworks te lo generara el objeto en 3D, teniendo un objeto sólido.

Para ello se tiene que especificar la longitud de la operación, en qué sentido ira y sobre que plano se está trabajando, que en este caso es en planta y se generara una vista previa de como quedara el volumen final.

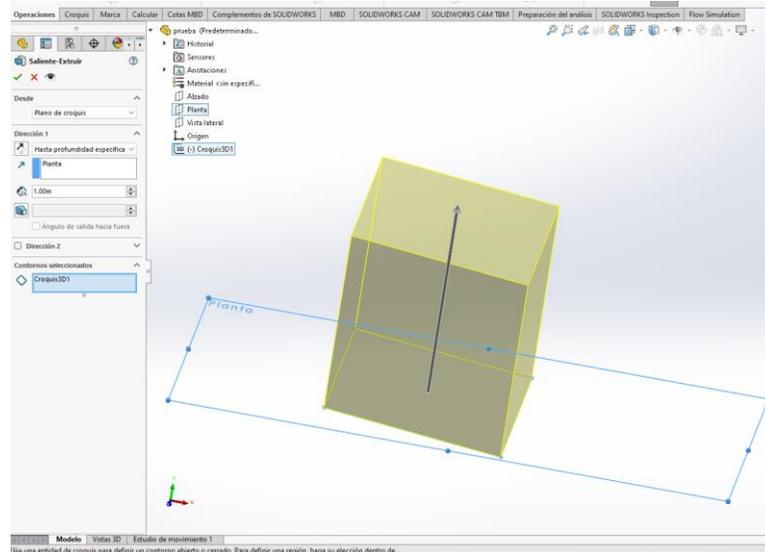


Figura 3.11. Extrucción de los tramos del canal.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

La extrucción realizada a cada tramo corresponde a las medidas internas del canal tomadas con el levantamiento topográfico realizado y no así de toda la estructura, ya que posteriormente se diseñarán las paredes del canal, en función a este primer volumen obtenido.

3.5.3. Vaciado

Para la operación vaciado, al volumen obtenido por la extrucción, se aplica el vaciado lo cual es el vaciado de la estructura creada, con volúmenes nuevos hacia afuera lo cual nos generara las paredes y grosores del canal.

El proceso consta de dos pasos:

- a) La determinación de cuáles serán las caras, por donde pasara el flujo de agua, ya que el programa las elimina y generara un vacío con el interior del canal, este proceso está en color celeste. Ver figura 3.12.
- b) La determinación de las caras del canal en las cuales se generará nuevos volúmenes para la creación de las paredes y en los cuales se tiene que especificar el grosor de

ellas, estas caras están de color rosa y la vista preliminar de como quedara en color amarillo. Ver figura 3.12.

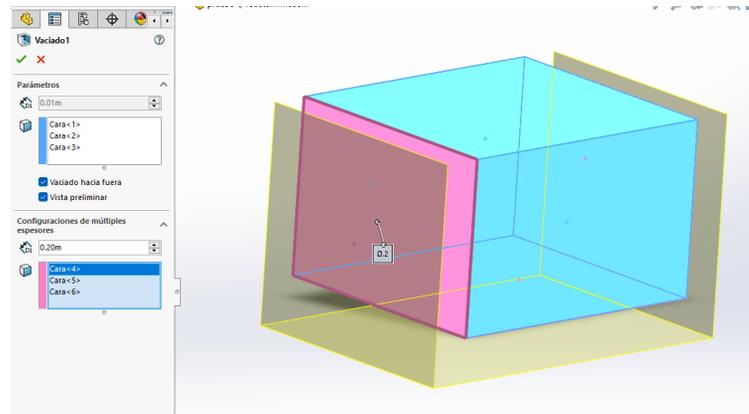


Figura 3.12. Vaciado interno.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

3.5.4. Elaboración de los dentellones

Para la elaboración de los dentellones, una teniendo creado los tramos del canal se diseñan sobre la estructura ya lista con los siguientes pasos:

- a) Se genera un nuevo croquis 3D en el borde del canal con las dimensiones del dentellón, con el ingreso de los 4 puntos los cuales con la cota inteligente le daremos la longitud que especifica lo medido en campo, respetando los bordes y ejes nuevos presentes en cada tramo. Ver figura 3.13.

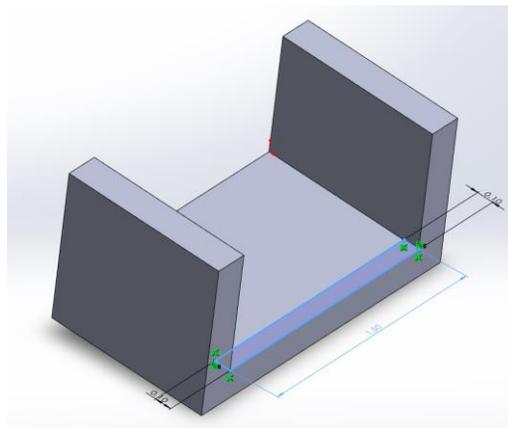


Figura 3.13. Croquis dentellón.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

- b) Para generar el volumen de dentellón se realiza con el comando extruir, lo cual nos permite darle la altura deseada que es de 15 cm desde la base y así fusionarlo con el canal y quede perfectamente soldado y no tenga algún error que después se verá reflejado en la simulación.

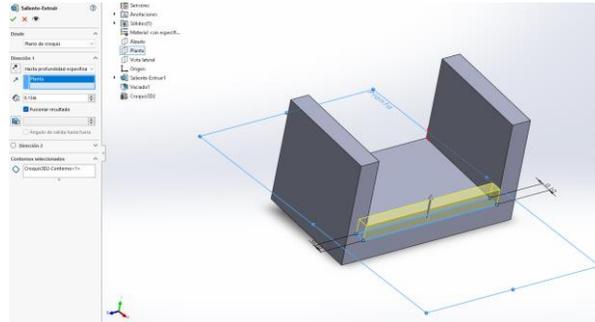


Figura 3.14. Croquis dentellón.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

3.5.5. Tramos

Para la modelación total de la investigación se realizaron todos estos pasos anteriores por tramos ya que se ingresaron uno por uno por fue lo más ideal por el motivo de que se trabajó sobre una misma pieza con múltiples tramos, así se aminorarían los errores y las uniones de los tramos quedarían totalmente soldados sin fugas entre sí para la simulación, desde la inserción de las coordenadas hasta los dentellones respectivos para cada tramo.

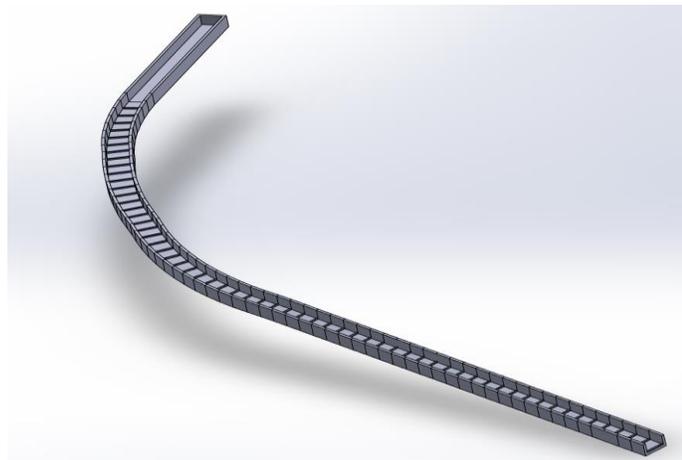


Figura 3.15. Vertedero escalonado Huacata.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

3.6. Simulación en Solidworks

Para la simulación en Solidworks se realizó con el complemento Flow Simulation que es el complemento dedicado para las simulaciones de flujos y que se amoldaba a la investigación que se estaba realizando, lo cual lleva un proceso para realizar la simulación.

3.6.1. Nuevo proyecto con Wizard

Para la simulación con Flow Simulation se inicia con la creación de un nuevo proyecto con Wizard en el cual tenemos que determinar y seleccionar los parámetros que se va usar como la selección del sistema de unidades a trabajar que en este caso es SI (sistema internacional).

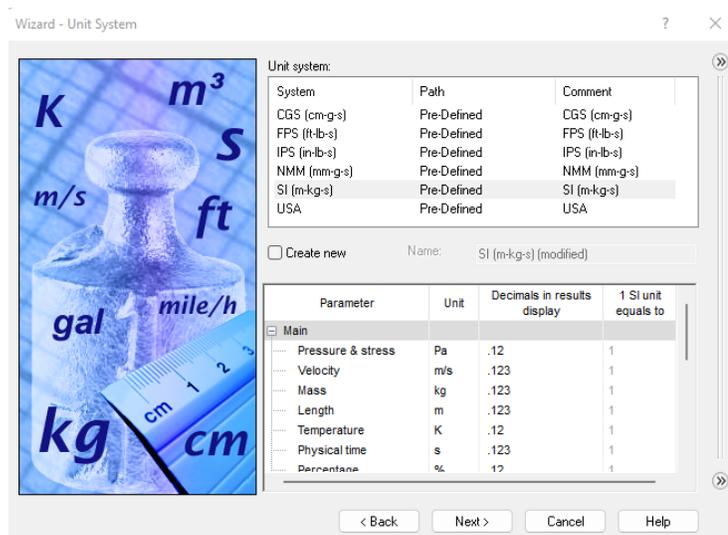


Figura 3.16. Sistema de unidades.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Al dar siguiente para el siguiente cuadro, nos aparece el tipo de análisis a realizar que es interno o externo, para el análisis interno necesita que la estructura este completamente cerrada y que este no presente ninguna fuga o esté abierto, al ser un vertedero tipo canal es abierto, entonces este análisis no es el adecuado por lo cual se eligió el análisis externo.

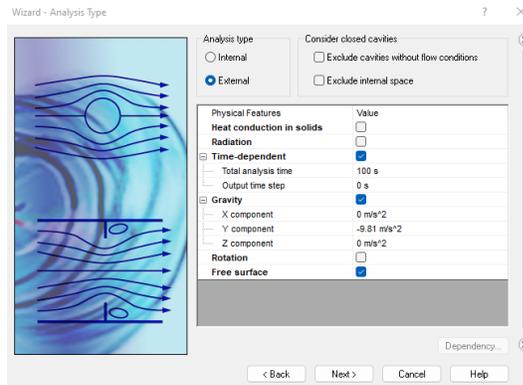


Figura 3.17. Tipo de análisis.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

El análisis del flujo en un canal es abierto por lo cual se activará Free Surface y dependiente del tiempo por lo cual se habilita la dependencia del tiempo (Time-dependent) dentro del cual tenemos que colocar el tiempo total de análisis que se realizara, esto es muy variable porque es dependiente del pc que se usara ya que a mayor tiempo es mayor el tiempo de análisis e iteraciones realizadas.

La gravedad es otro factor que debe ser habilitado y realizar el cambio de eje si es necesario sobre el cual será afectado, ya que puede que el programa no reconozca.

En la determinación de los fluidos para el análisis se agregan de los gases el aire y de los líquidos el agua, ya que serán los dos presentes para el estudio.

Y en la característica del tipo de flujo se selecciona laminar y turbulento para que el análisis tome en cuenta si es que se presentan los dos flujos o no durante el tiempo puesto y no así limitarlo a solo una opción.

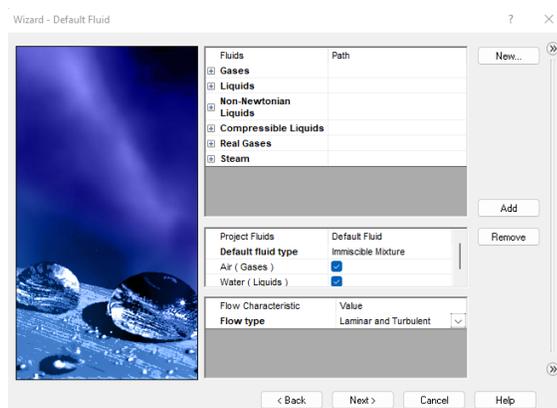


Figura 3.18. Tipo de fluidos.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Para las condiciones de muros y las condiciones iniciales o ambientales que vienen por defecto son los más adecuados para el estudio.

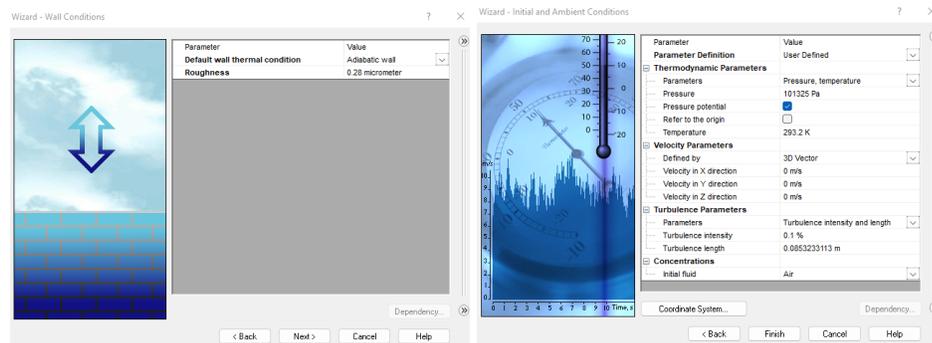


Figura 3.19. Condiciones iniciales.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

3.6.2. Dominio computacional

Al terminar con el ingreso de los datos iniciales, se genera automáticamente el cubo del dominio computacional, donde el programa realizara los cálculos, por lo cual a mayor sea el tamaño, aumentara el proceso de cálculo del programa, por lo cual se lo reduce el tamaño del cubo máximo posible hasta que concuerde con el tamaño de la estructura que tiene que estar dentro de él y revisarlo dentro de los 3 ejes.

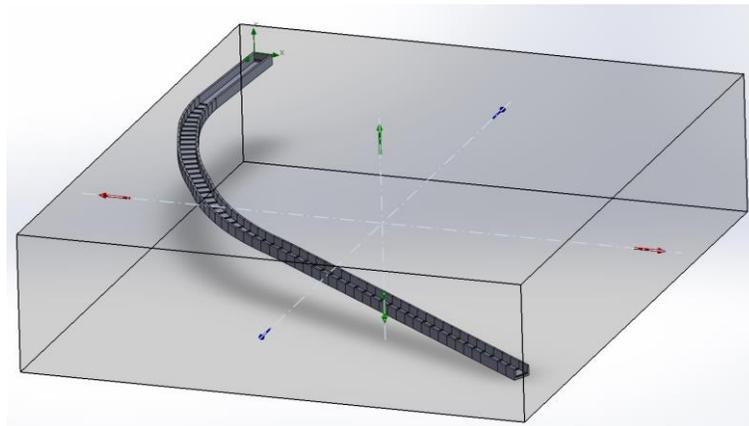


Figura 3.20. Dominio computacional.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

3.6.3. Condiciones de borde

Las condiciones de borde o contorno son parámetros que se aplican en los límites del dominio de simulación para definir como interactúa el fluido con el entorno circundante.

Estas condiciones son esenciales para establecer correctamente el comportamiento del flujo y obtener resultados más precisos en la simulación.

3.6.3.1. Inlet Volume Flow 1

Es el caudal volumétrico (m^3/s) que es la cantidad de flujo que fluye a través de una sección transversal en una unidad de tiempo. Es la condición de entrada y restricción de la simulación el cual es el mismo que sacado en campo.

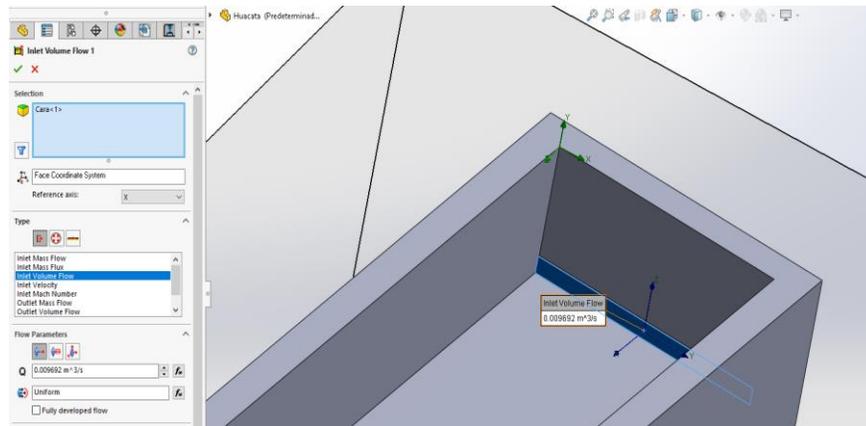


Figura 3.21. Condiciones de borde.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

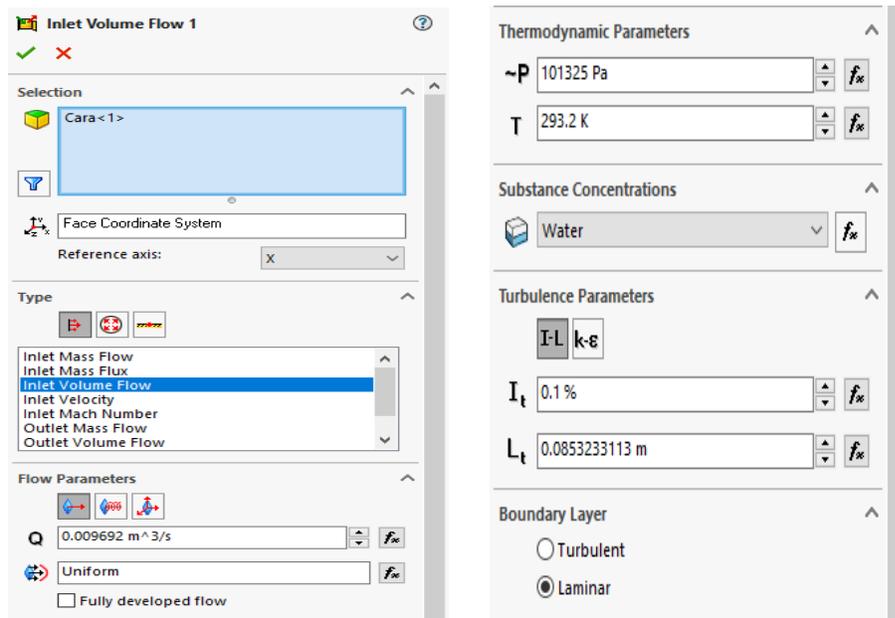


Figura 3.22. Parámetros de condiciones de borde.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Se selecciona la cara donde será la entrada del caudal y de acuerdo a lo medido en campo se utilizó el caudal y el tirante con un flujo uniforme.

En la concentración de sustancias se escoge agua que es el que pasa por el canal, los parámetros de termodinámica como la presión y temperatura del flujo como también los parámetros de turbulencia, ambos tienen valores por defecto por lo cual se dejara así por practicidad para este análisis de estudio.

La capa de borde o contorno se define por el tipo de flujo presente en el canal durante la medida en campo el cual era laminar.

Para los parámetros de pressure opening y wall, en los cuales se deja por defecto ya que se maneja como canal abierto con presión atmosférica y con pared ideal.

3.6.4. Goals

Los goals o metas son los objetivos que se establece para el análisis del flujo, estos objetivos pueden variar dependiendo de lo que se esté buscando en estudio, como ser la velocidad del fluido en ciertas ubicaciones, la presión en una superficie específica, la fuerza resultante en un objeto sumergido, entre otros.

El resultado de los objetivos calculados por el programa se puede exportar en una tabla en formato Excel.

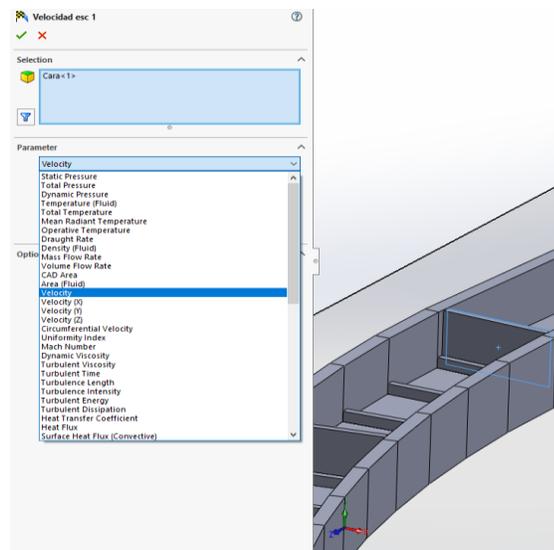


Figura 3.23. Metas en superficie velocidad primer escalón de control.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Tipos de metas: al insertar una meta, el programa da 5 opciones

- **Globales:** Las metas globales proporcionan información general sobre la simulación en su totalidad. Puedes obtener datos como el caudal total a través de todas las salidas, la resistencia total experimentada por el flujo, la energía cinética total presente en el dominio, entre otros, para tener una visión global del desempeño del sistema que estás simulando.
- **Puntuales:** Estas metas te permiten monitorear valores específicos en puntos individuales dentro de tu dominio de simulación. Puedes seleccionar puntos de interés, como entradas, salidas, o cualquier ubicación dentro del dominio, y analizar variables como presión, velocidad, temperatura, etc., en esos puntos particulares a lo largo del tiempo.
- **Superficie:** Al definir las metas en superficies específicas de tu modelo, puedes analizar el flujo a través de esas superficies. Puedes monitorear el flujo volumétrico, la fuerza resultante sobre una superficie, el coeficiente de arrastre, la distribución de presiones, entre otros parámetros, para entender mejor cómo interactúa el fluido con las superficies de tu diseño.
- **Volumen:** Estas metas se definen en volúmenes específicos dentro del dominio de simulación y te permiten analizar propiedades del flujo dentro de esos volúmenes. Puedes calcular valores promedio de variables como velocidad, temperatura, presión, entre otros, para comprender el comportamiento global del flujo en áreas específicas de tu modelo.
- **Ecuación:** Las metas basadas en ecuaciones te permiten definir relaciones matemáticas personalizadas para analizar el comportamiento del flujo en función de parámetros específicos. Puedes utilizar ecuaciones para establecer criterios de convergencia, controlar variables dependientes, o realizar cálculos personalizados según tus necesidades de análisis.

3.6.5. Malla

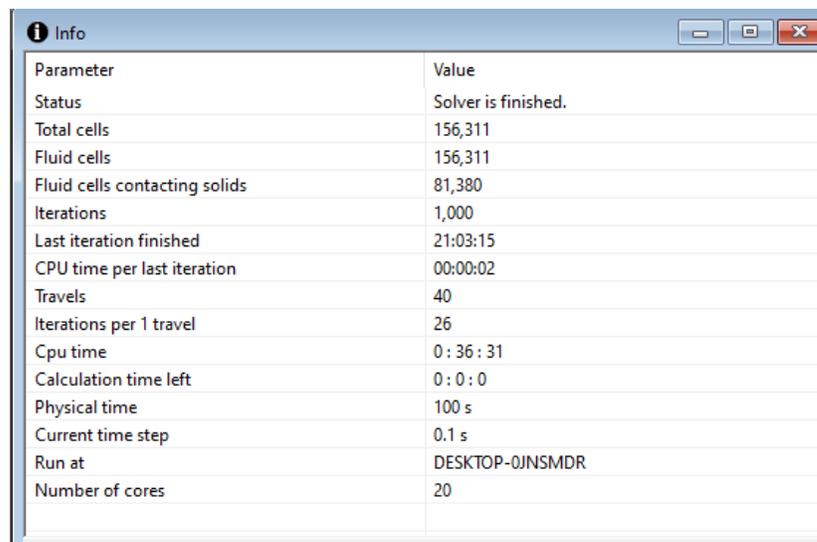
La malla computacional es la que se aplica en todo el dominio de simulación de manera uniforme mediante una discretización en elementos más pequeños para calcular y analizar el flujo de manera numérica.

Un tamaño más pequeño de malla proporciona una mayor resolución y precisión de los resultados con un mayor tiempo de cálculo. Por lo cual con la que llega por defecto del programa se adapta bien a la estructura lo cual no era necesario refinar más la malla.

3.6.6. Procesamiento de datos

El proceso de cálculo se resuelve de forma de iteraciones el cual es de tiempo variable, porque mientras más iteraciones realiza el programa más tiempo tarda.

Para este estudio fue un tiempo de 36 min con 1000 iteraciones.



Parameter	Value
Status	Solver is finished.
Total cells	156,311
Fluid cells	156,311
Fluid cells contacting solids	81,380
Iterations	1,000
Last iteration finished	21:03:15
CPU time per last iteration	00:00:02
Travels	40
Iterations per 1 travel	26
Cpu time	0 : 36 : 31
Calculation time left	0 : 0 : 0
Physical time	100 s
Current time step	0.1 s
Run at	DESKTOP-0JNSMDR
Number of cores	20

Figura 3.24. Solucionador 36min.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Simulación con datos de aforo

Para el primer análisis se realizó la comparación con el aforo con molinete para la corroboración de datos y así determinar que el programa esta calibrado para la estructura en estudio, el proceso de cálculo se tomó toda la estructura por lo que las condiciones de borde son al inicio del tramo con tres puntos de controles de velocidad.

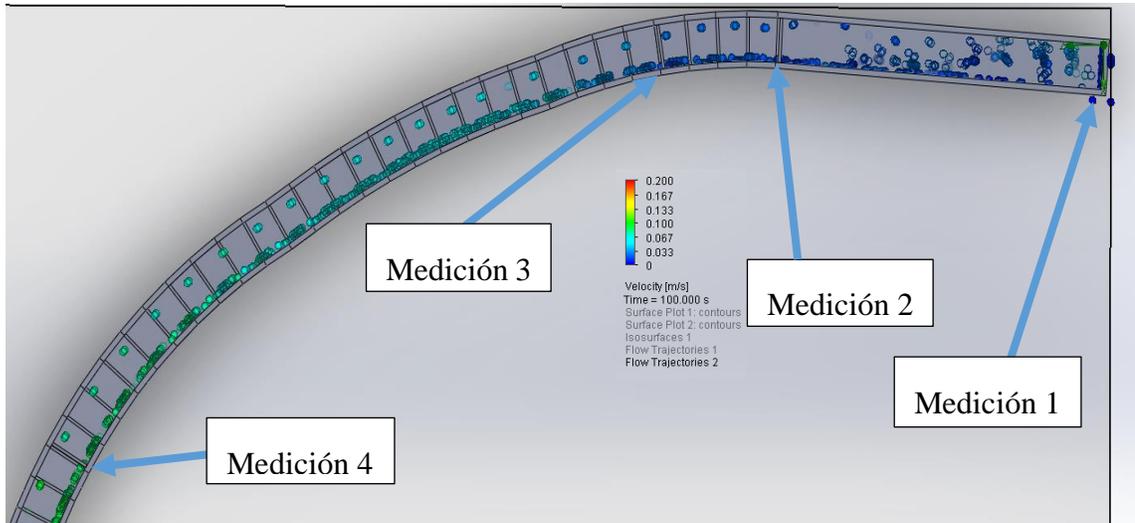


Figura 4.1. Puntos de control en la obra hidráulica.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Haciendo las simulaciones se puede observar el incremento de velocidad del flujo a medida que va avanzando por el canal y acercándose al embalse, las condiciones de borde que se uso es el caudal inicial que se realizó en el campo como medición 1 con un caudal de $0,009692 \text{ m}^3/\text{s}$, según las líneas de flujo se puede observar una tendencia de que la mayor velocidad se puede encontrar hacia el lado derecho del canal lo cual es posible por la pendiente del terreno y que la estructura presenta una curva con pendiente considerable. Las velocidades que se pueden observar en este tramo de control van de $0,003\text{m/s}$ a $0,007\text{m/s}$.

4.1.1. Puntos de control

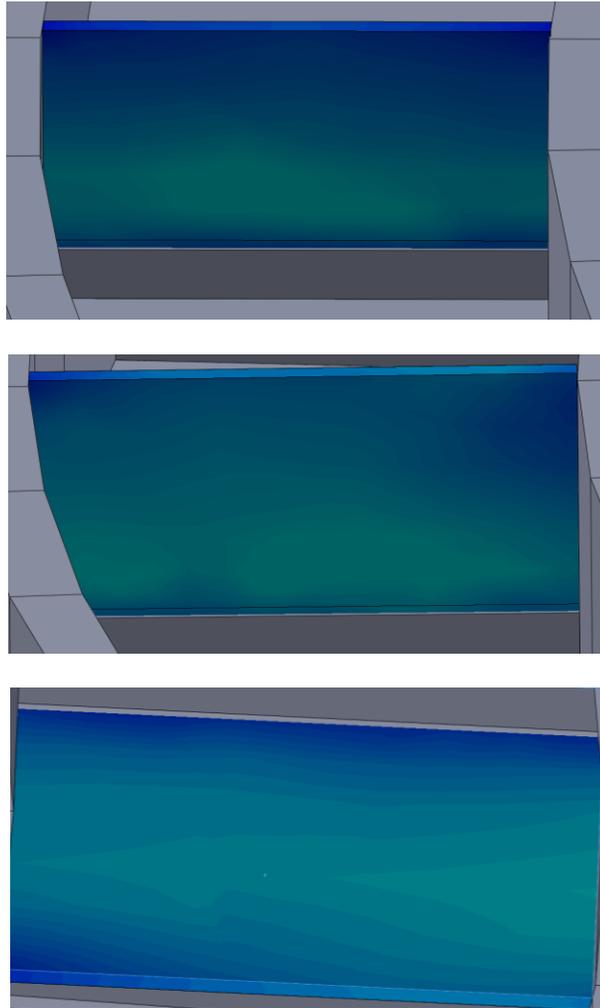


Figura 4.2. Comportamiento de la velocidad en los tres escalones de control.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Para una mejor observación de los puntos de control se tomó una superficie transversal en cada uno de los tres puntos y en función a la velocidad podemos observar una vista más específica de cada superficie graficada figura4.2 que en la primera imagen del primer control las velocidades mayores se encuentran en el centro ya que es donde acaba el canal y empieza el vertedero escalonado y el flujo no viene con grandes cambios de pendiente

En la segunda grafica se puede observar que la velocidad se va acercando al lado derecho la mayor parte y una pequeña al lado contrario, esta diferencia puede deberse a que ya nos encontramos en el quinto escalón y ya presentamos cambio de dirección tanto horizontal y vertical con mayor tendencia.

En la tercera y último punto de control se observa que la mayor velocidad esta direccionada hacia el lado derecho siendo que ahí es donde se encontrara la velocidad máxima.

4.1.2. Comportamientos

- En el primer tramo podemos observar que las líneas de flujo sobre el comportamiento del agua no presentan mayor relevancia ya que todavía no pasa algún obstáculo relevante y la pendiente en esta parte del canal es moderada.

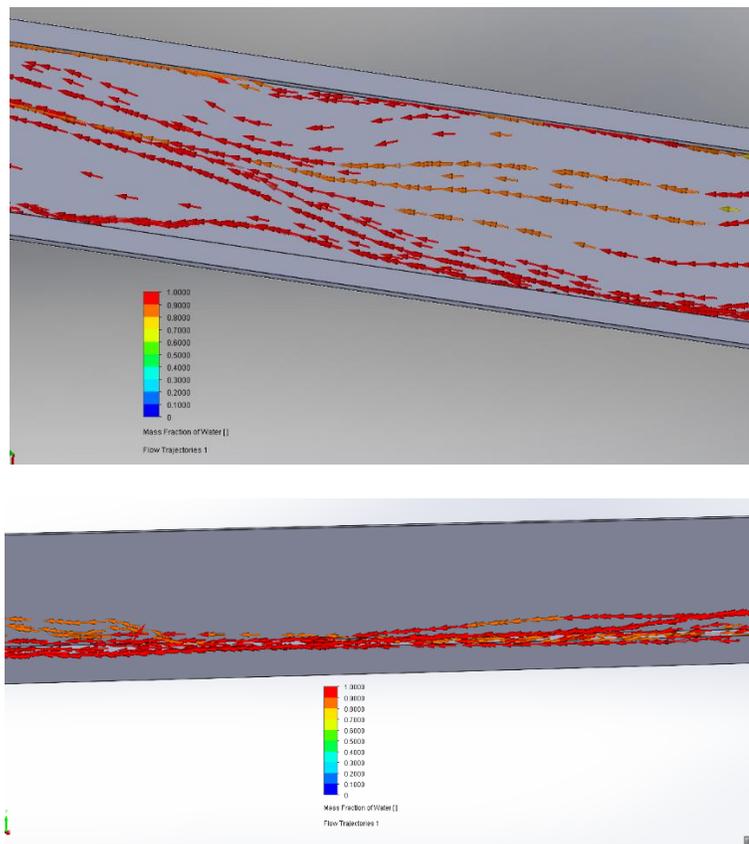


Figura 4.3. Comportamiento tramo antes de la curva.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

- En la primera parte de la curva se puede observar el flujo de agua como llega a los escalones y los va atravesando de manera que el mayor porcentaje de volumen de

agua está más pegado al suelo y al pasar los dentellones se puede observar cómo va aumentando la altura del flujo, pero bajando su concentración.

Esto se debe a que se van creando burbujas de aire por el movimiento y choque que hace el agua con la estructura.

Cabe mencionar que mientras más roja estén las líneas de flujo mayor es la concentración.

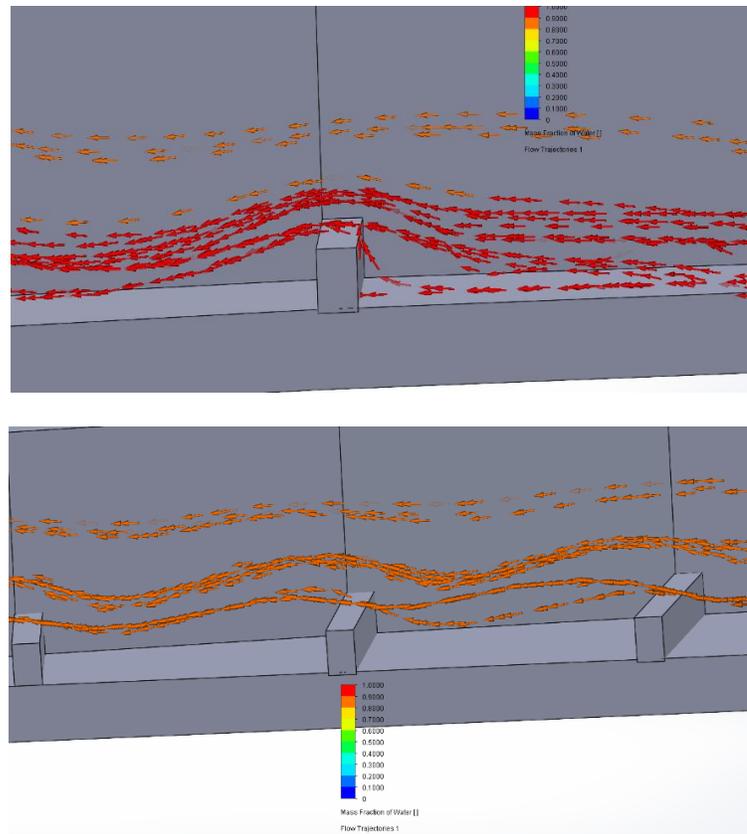


Figura 4.4. Comportamiento primer tramo de la curva.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

- En la segunda parte de la curva se percibe que el flujo tiende a elevarse esto se debe a la pendiente y a la formación de burbujas de aires, es por eso que ya no se observa que la concentración de agua está en lo máximo.

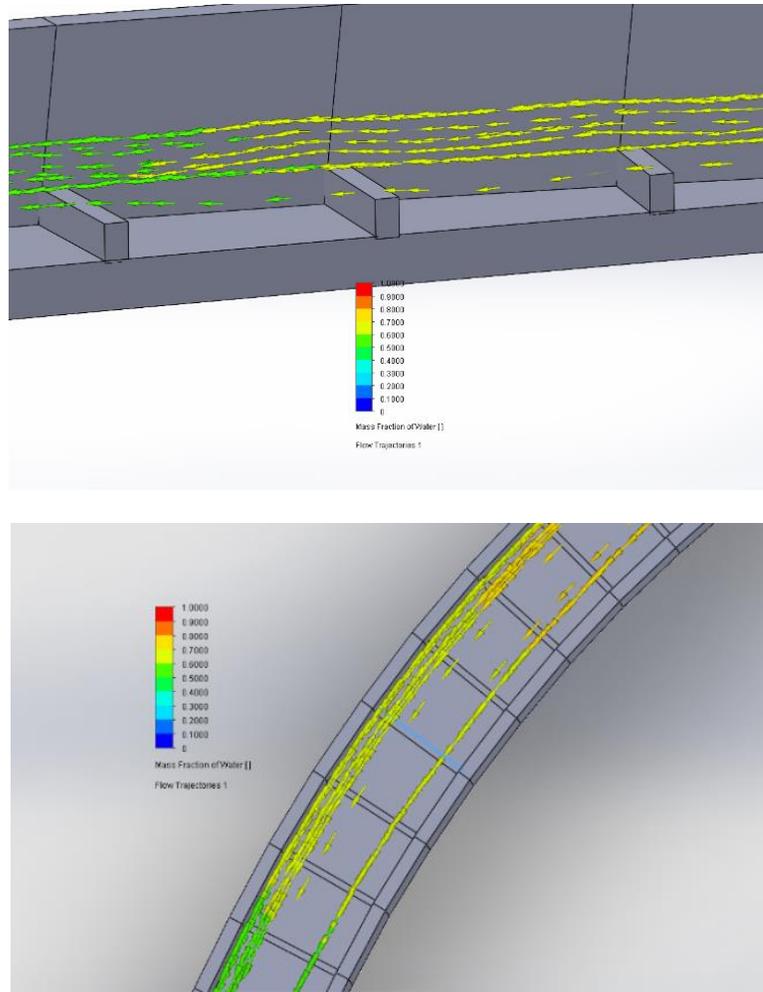


Figura 4.4. Comportamiento segundo tramo de la curva.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

- En el último tramo del vertedero escalonado que es un tramo recto se observa que el flujo es más simétrico y regular a lo ancho del del canal, también se observa que se crean remolinos entre los dentellones o reductores de velocidad lo cual sirve de forma auto limpiante del canal y no dejan que se estanquen los sedimentos entre ellos.

Durante la visita técnica se pudo observar esta tendencia ya que en los primeros escalones existía sedimentos en cada uno de ellos, pero en el último tramo ya se encontraba libre de ellos.

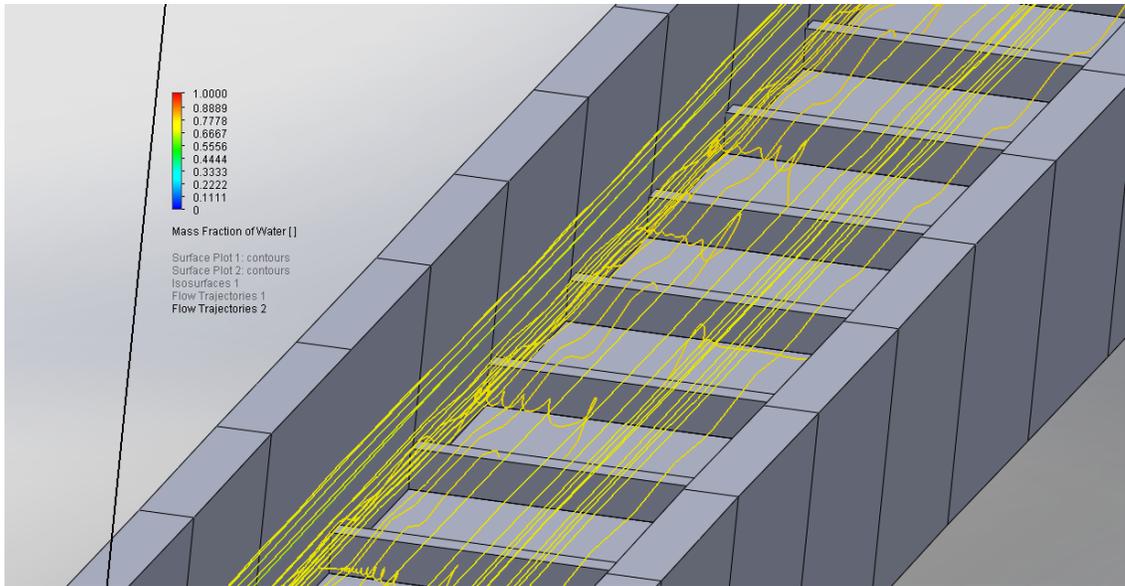


Figura 4.5. Comportamiento último tramo.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

4.1.3. Gráficas y resultados

La exportación de los resultados de los goals (metas u objetivos) se hizo en función al tiempo físico de simulación que se dio de 100 segundos y las 1000 iteraciones realizadas por el programa, fue el tiempo planteado para que el flujo de agua se estabilice en la estructura.

De la figura 4.6 podemos ver los gráficos de el volumen de agua que pasa según el tiempo de los tres puntos de control y se puede observar que en función al orden que llevan en los tres puntos como pasa de 0 al 100% del flujo de agua y posteriormente se estabiliza, entre cada control también se observa el tiempo que tarda el flujo en llegar entre 5 y 30 segundos Para pasar por los tres puntos respectivamente, pero luego se estabiliza el flujo siendo constante y determinando que el tiempo que se dio para la simulación de 100 segundos fue el correcto para tener los resultados más reales.

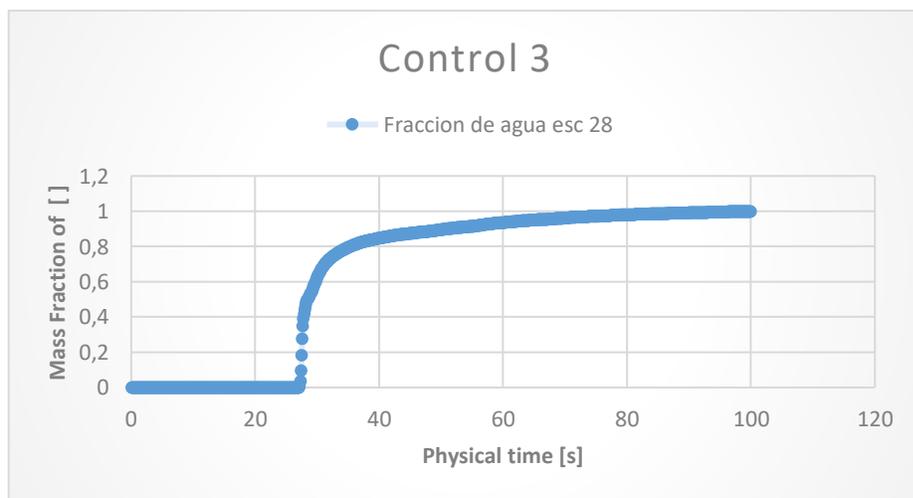
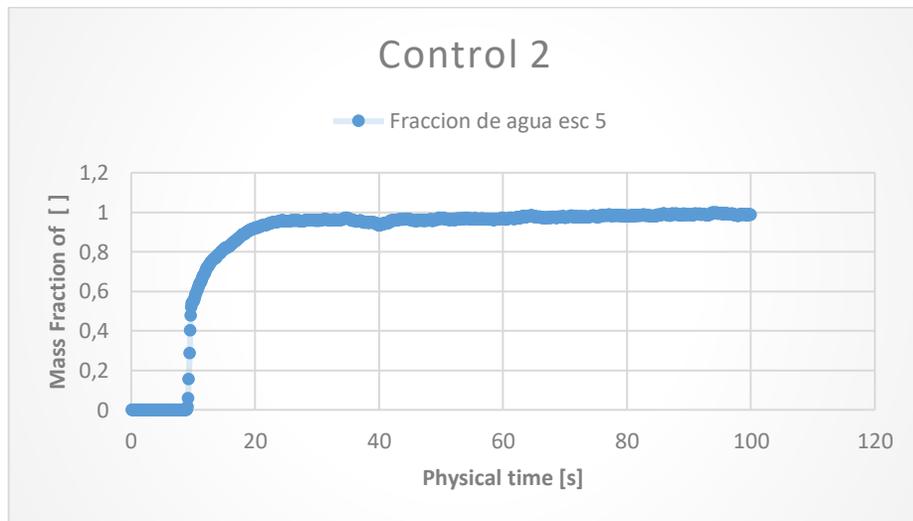
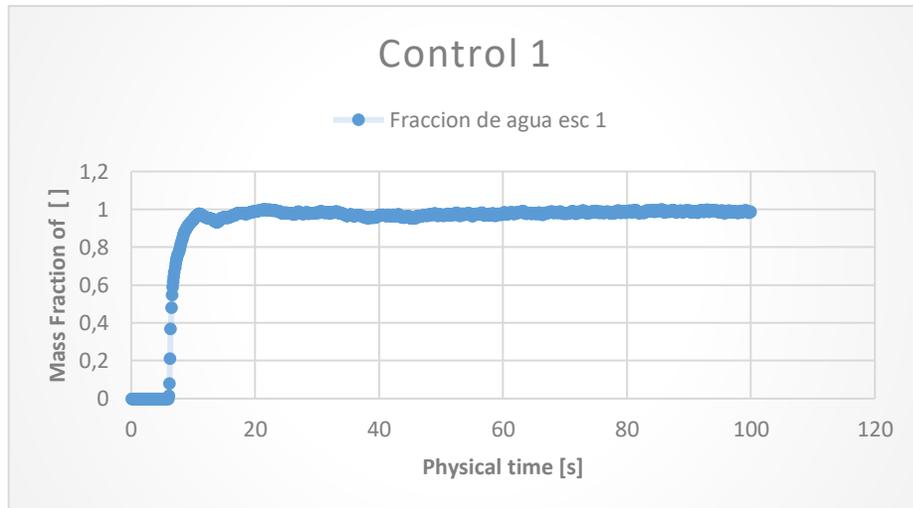


Figura 4.6. Fracción de agua en función del tiempo.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

- El comportamiento de la velocidad en el primer control se puede observar que al llegar el agua al control llega con un pico de velocidad con 0,11 m/s, para posteriormente ir regulándose y estabilizando entre 0,06 m/s a 0,04 m/s. Cabe mencionar que el pico del caudal se da cuando el canal estaba vacío y llega por primer contacto el agua, por lo cual se descarta porque no son las condiciones de estudio.

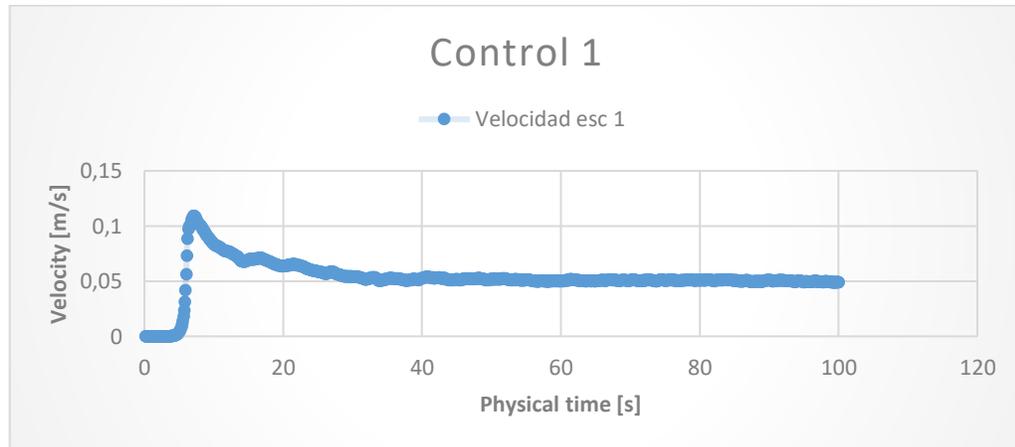


Figura 4.7. Velocidad primer control.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

- Los resultados obtenidos para el segundo control se observa un comportamiento similar al primero con un pico de velocidad con el primer encuentro del fluido con el punto y posterior baja hasta estabilizarse en el tiempo de simulación con velocidades entre 0,06 m/s y 0,05 m/s.

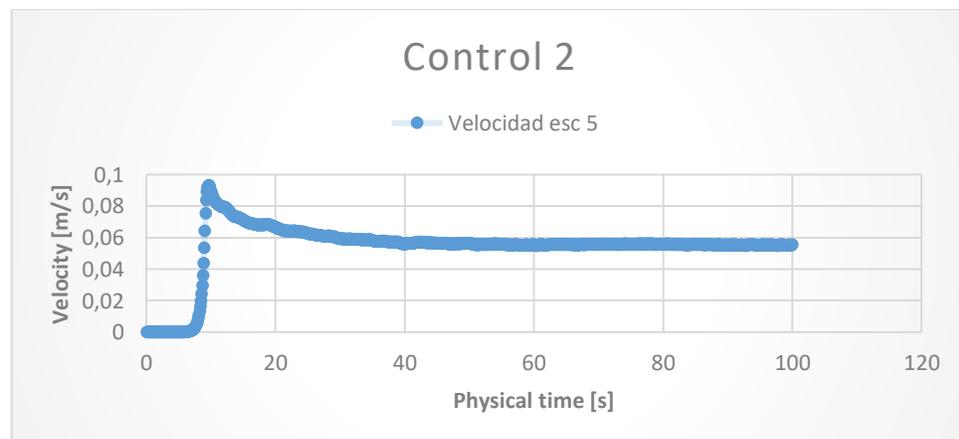


Figura 4.8. Velocidad segundo control.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

- En registro del tercer control se observa que el comportamiento es distinto a los dos primero, esto podría ser ya que esta al finalizar la curva donde claramente se ve un incremento de la velocidad y constancia de ella que va desde los 0,055 m/s hasta los 0,06 m/s, esto debido a que la pendiente ya es más pronunciada.

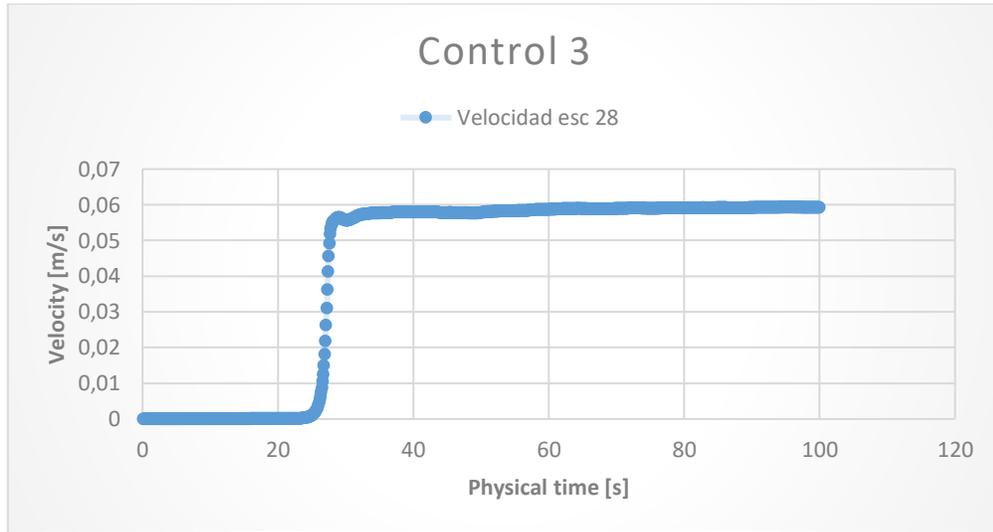


Figura 4.9. Velocidad tercer control.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

4.1.3.1. Tablas comparativas

Para la simulación se entró con la condición de borde o frontera de 0,009692 m/s y los otros tres puntos se analizó la comparación de velocidades. Los resultados exportados en formato Excel de las simulaciones se encuentran en anexo 4.

En la tabla 4.1 se observa los resultados de las simulaciones y del aforo, son resultados semejantes entre sí para cada punto de control con unos valores más altos para las simulaciones, estas pequeñas discrepancias pueden ser debido a que el programa no captura la complejidad del flujo real, pero son mínimas y el programa se ajusta bastante a la estructura analizada.

Tabla 4.1. Tabla comparativa aforo con molinete y simulaciones.

	Aforo		Simulaciones	
	Media (m/s)	Minima (m/s)	Media (m/s)	Maxima (m/s)
Control 1	0,0480	0,0487	0,0509	0,0541
Control 2	0,0492	0,0548	0,0556	0,0571
Control 3	0,0537	0,0556	0,0585	0,0595

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Puntos de control con caudales

En las tres placas de control se aplicaron los goals o metas en controles de superficie, los cuales se dio el objeto de realizar los controles de caudal “SG VOLUME FLOW RATE OF WATER” el cual se obtuvo los resultados en la exportación de resultados. Ver Anexo 4

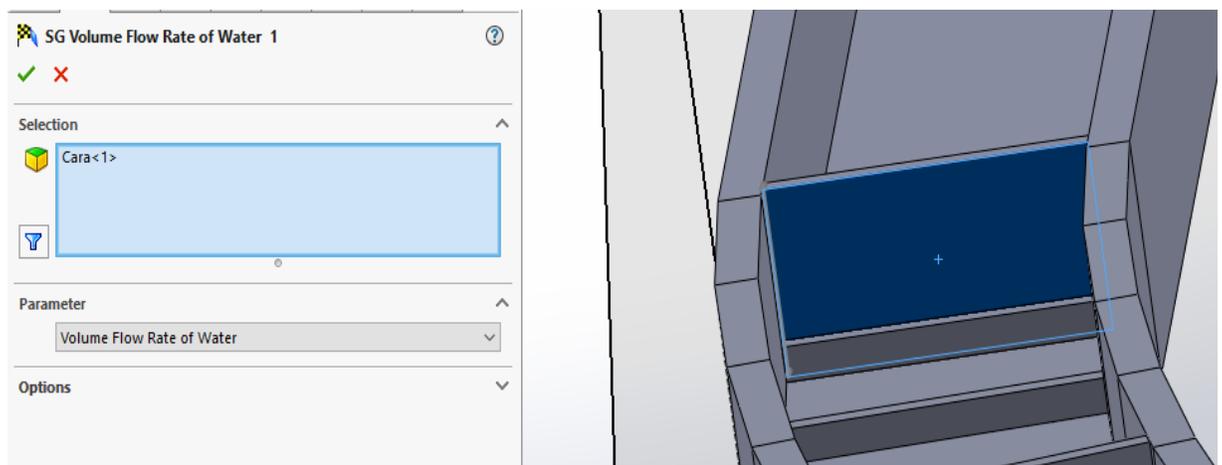


Figura 4.10. Control de caudales primer dentellón.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

En los resultados exportados se obtuvo:

Tabla 4.2. Tabla resultados de caudales.

Goal Name	Unit	Value
SG Volume Flow Rate of Water 1	[m3/s]	0,0128
SG Volume Flow Rate of Water 2	[m3/s]	0,0137
SG Volume Flow Rate of Water 3	[m3/s]	0,0142

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Simulación con el caudal de diseño

El caudal de diseño de la estructura es de $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tirante de $0,7\text{m}$ y velocidad de $0,95 \text{ m/s}$. (Serinco, 2010)

Con estos datos modificamos el tirante y caudal inicial de las condiciones de borde o frontera para que el programa realice una nueva simulación.

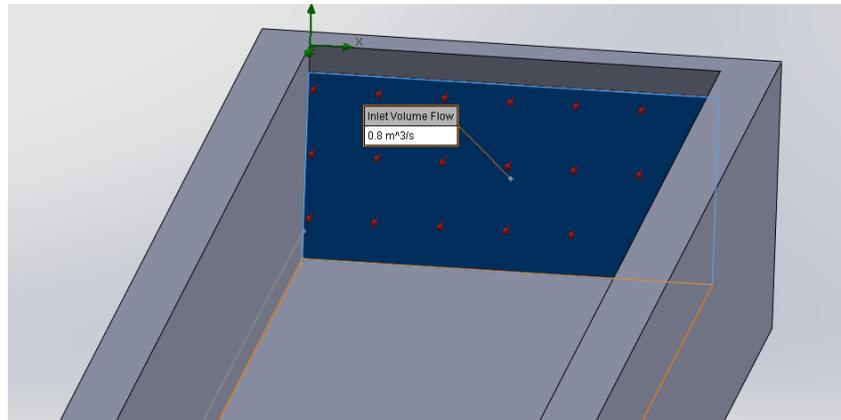


Figura 4.11. Condiciones de borde de diseño.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

4.2.1. Velocidades

En cuestión de velocidades se observa variaciones entre $0,8 \text{ m/s}$ a 3 m/s dentro de la curva donde se observan los puntos más críticos el último tramo de la recta excede los 4 m/s .

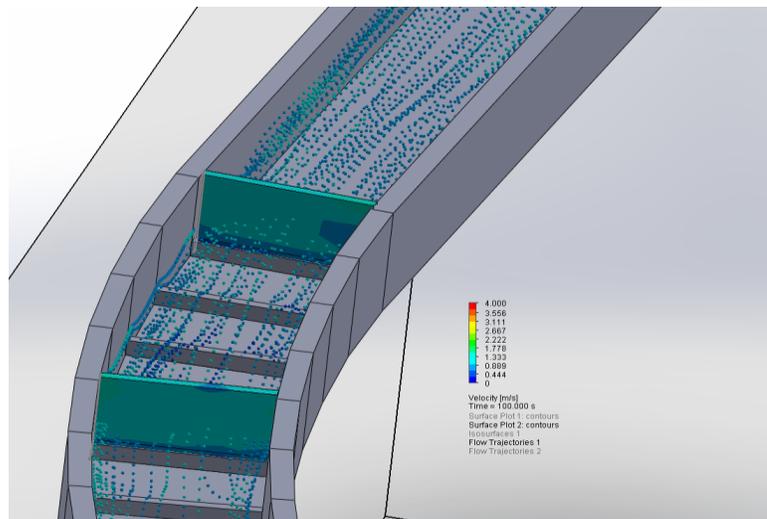


Figura 4.12. Velocidades de diseño.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

En el primer tramo de la curva se observa velocidades variables entre 0,85 m/s a 1,5 m/s, con diferencias de que las menores se encuentran más abajo que las superiores de acuerdo al tirante, también se observa que la línea de flujo del lado derecho toma diferencia en cuestión de velocidad con mayor incremento con respecto al lado izquierdo y que las líneas de flujo que llegaban del medio tienden de irse hacia los costados con mayor intensidad a la derecha.

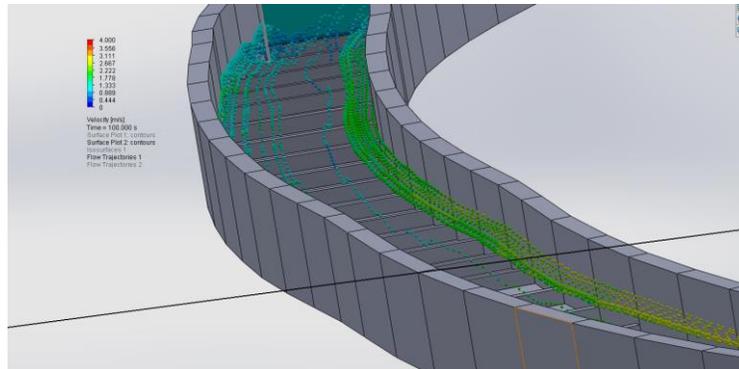


Figura 4.13. Velocidades de diseño.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

En el lado derecho se observa velocidades de 2,2 m/s más constantes y continuas y más altas que las del lado izquierdo de unos en cambio el lado izquierdo tiene más fluctuación más lenta y variable que cambios más notorios de velocidad y en la última parte de la curva se puede observar que las velocidades aumentan antes que el lado derecho con unos 3 dentellones de anticipación, entrando con velocidades al último control de 2 m/s a 3 m/s.

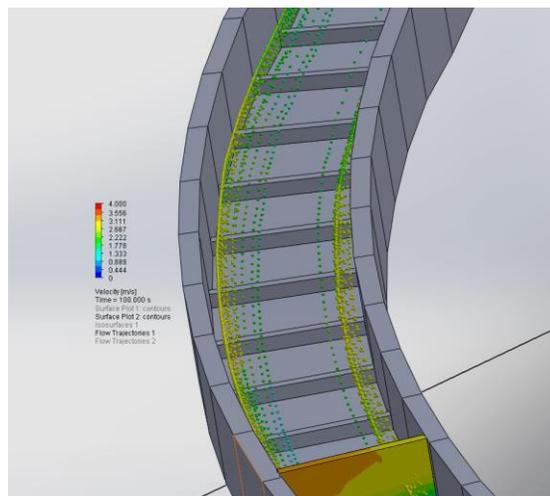


Figura 4.14. Velocidades de diseño.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

En el último tramo recto se puede ver que las velocidades se estabilizaron y aumentaron como se esperaba por la pendiente del canal.

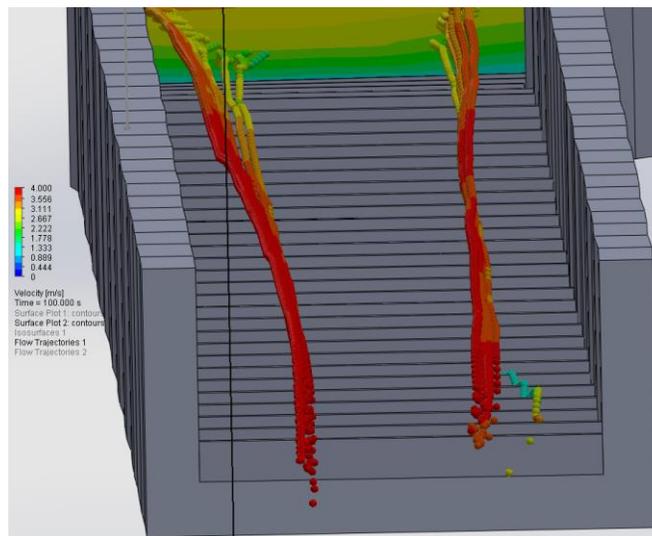


Figura 4.15. Velocidades de diseño.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

4.2.2. Volúmenes, comportamiento y presiones

Con el caudal de diseño o máximo para la estructura se determinó las partes más críticas para rebalses ya que en campo se pudo observar puntos en los cuales se presentaban humedad, socavación y partes con malezas lo que en ese tiempo se suponía que era por rebalses en tiempo de cuando el canal está lleno.

En Solidworks se determina mediante la visualización de las capas de “mass fraction of water” primero los aplicaremos a las paredes del canal y luego una visualización 3d.

Cabe mencionar es que las zonas mientras más roja o intenso es el color más concentración de agua en el caso del color verde sería un 50% de agua y 50% de aire presente en burbujas.

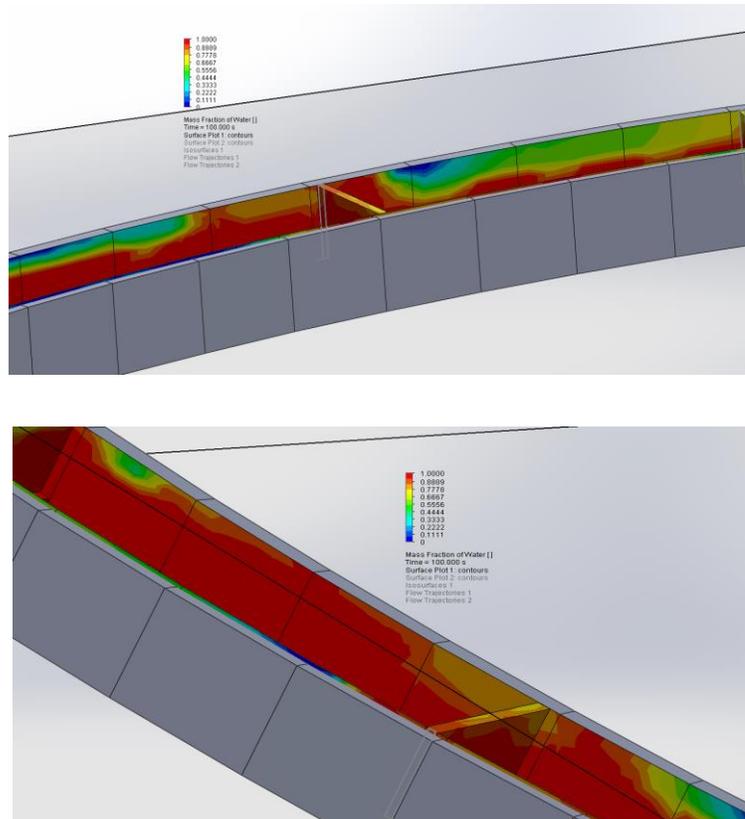
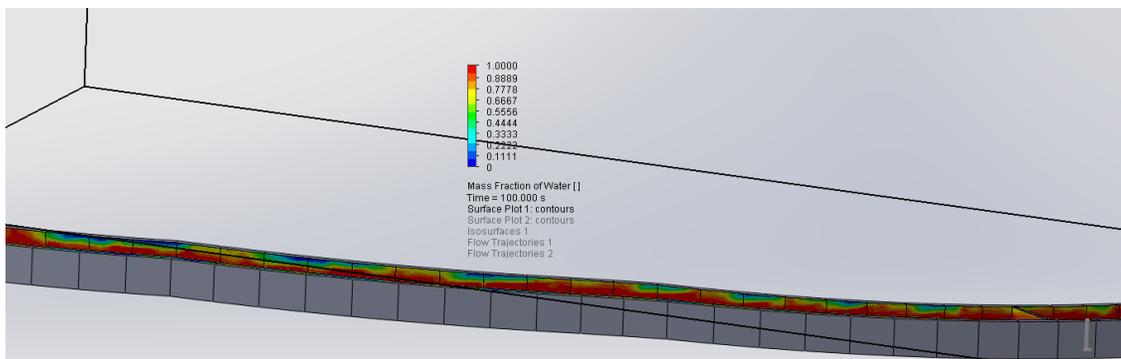


Figura 4.16. Paredes del canal.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Se puede observar que en el primer tramo de la curva se observa desbordes de agua los dos lados del canal en los primeros 6 escalones dando cuenta esto como un punto de inflexión y que también se comporta de distintos modos de los dos lados al no ser simétrico el efecto que se observa.



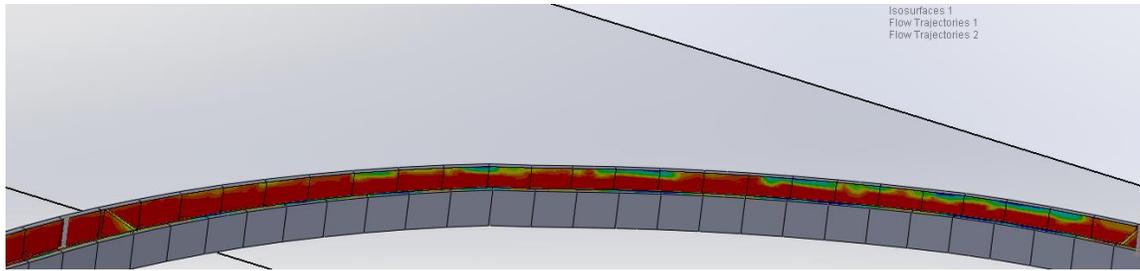


Figura 4.17. Paredes del canal.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

En las figuras 4.16 podemos observar un comportamiento más regular en el lado derecho del canal sin desbordes y con el efecto que realiza el caudal turbulento marcado en las paredes del canal, pero en el lado izquierdo se observa que al final de la curva un posible desborde de agua lo cual se debe al último cambio de dirección del canal.

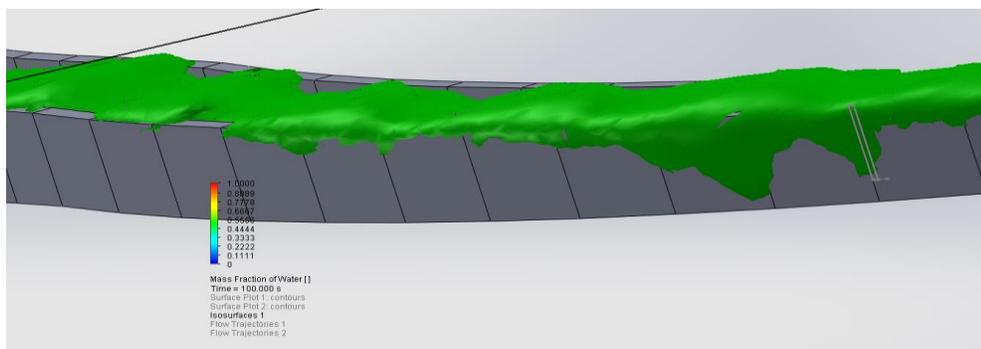
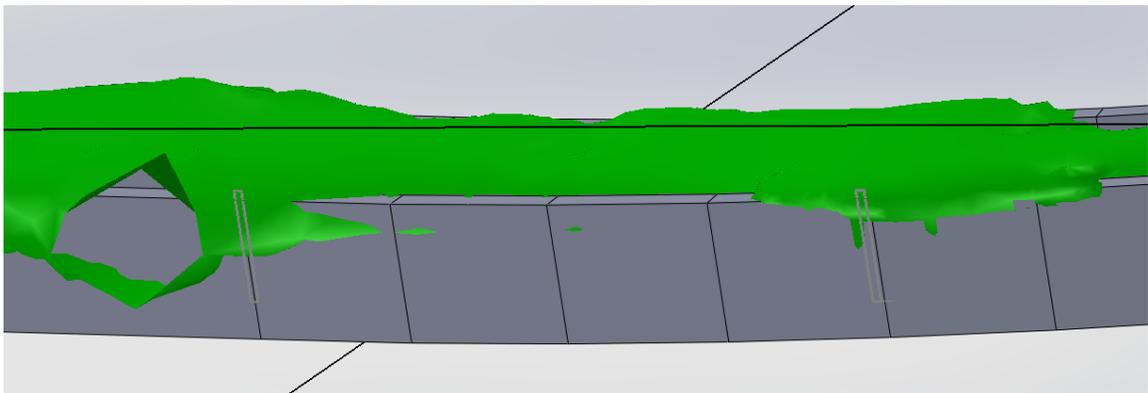


Figura 4.18. Comportamiento en 3d volumétrico.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

En la visualización del caudal en volumétrico se observa el comportamiento que se notó en el anterior análisis en el cual presentaba desbordes en el inicio de la curva en los dos

lados y al final de la curva en el último cambio de dirección, lo cual en campo pudimos observar los desgastes que existían en el muro del canal por lo que se determinó poner los puntos de control en ese sector.

Podemos ver que el flujo es en color verde que llega hasta arriba lo cual podemos determinar que es aproximadamente el 50 % del flujo.

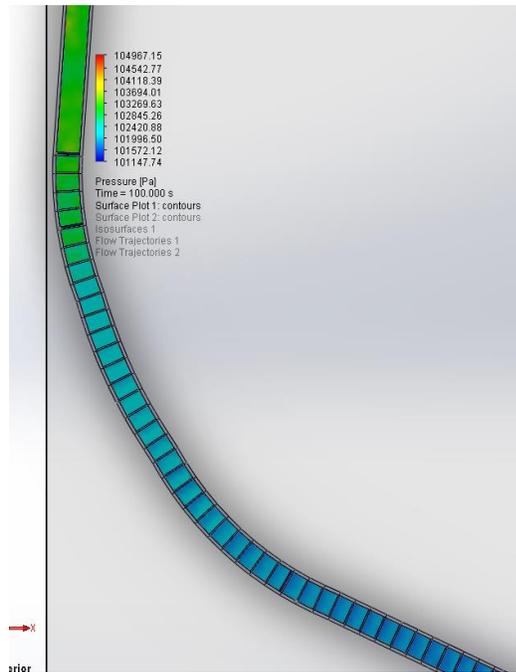


Figura 4.19. Presiones.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Las presiones que se manejan en el canal están en un rango de 100.000 Pa hasta 105.000 Pa. Al ser una obra abierta y al no presentar presiones máximas ni negativas relevantes, observamos que no son de mayor importancia para el estudio.

4.3. Simulación con colchones de agua

El tercer análisis se realiza con las inclusiones de bloques de agua dentro de la estructura con un análisis comparativo con los parámetros del diseño.

4.3.1. Proceso de modelación

Para el proceso de modelado en 3D para los bloques se generan en dos pasos:

- El primero es una generación de un Croquis 3D generados por punto en una cara de las paredes del canal y para luego realizar la unión por tres líneas generando una figura ficticia triangular de lo que se puede presentar en realidad en los tramos del vertedero escalonado.

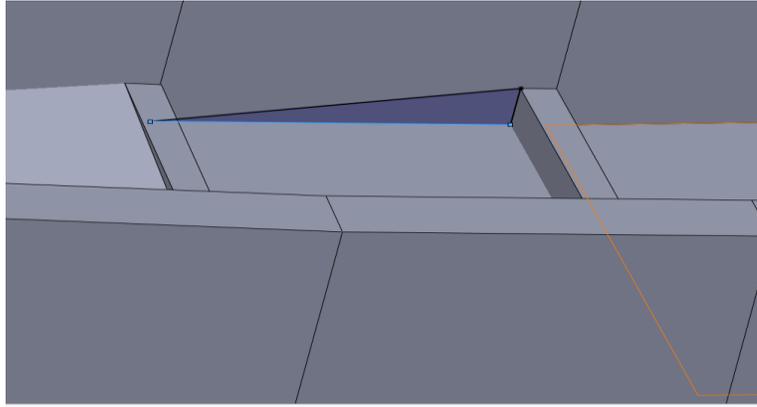


Figura 4.20. Croquis 3D colchones de agua.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

- El segundo paso es la generación del volumen del colchón de agua con el comando de “extruir saliente o base” con el cual se genera un volumen para el croquis generado, el cual se especifica la longitud requerida, que para este caso es de 1,5 m lo cual hace referencia al ancho del canal y se especifica al no fusionar o soldar con la estructura, ya que serán bloques independientes los cuales serán tomados como agua.

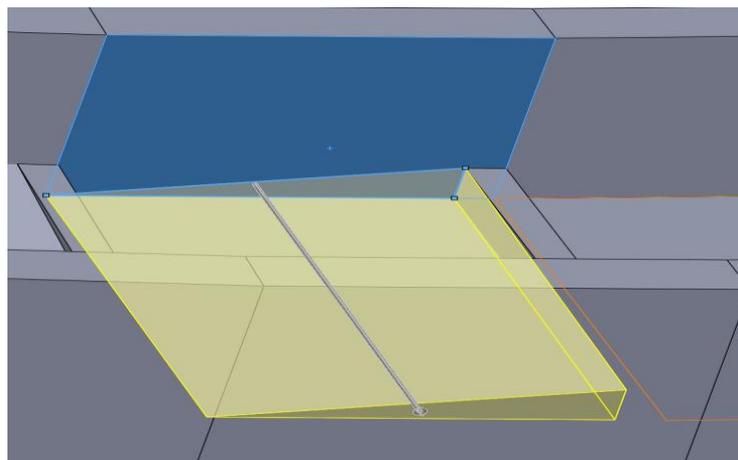


Figura 4.21. Generación de volúmenes para los colchones de agua.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Con este proceso se generará para cada escalón su colchón de agua, este proceso se repetirá para todas las secciones de la estructura a excepción del primer tramo rectangular que el croquis se lo tomo desde la base del canal y dando una altura de 15cm la altura de los dentellones.

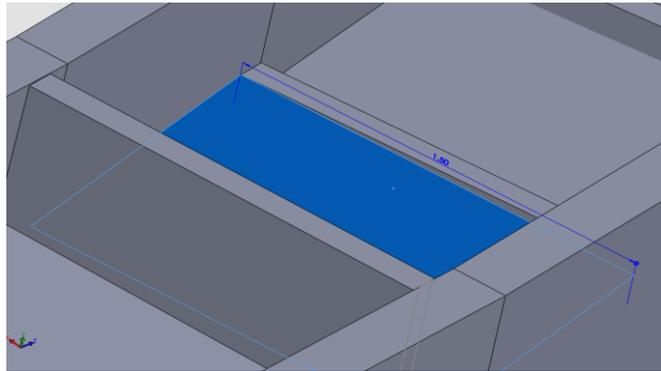


Figura 4.22. Colchón N°1 de agua.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Al terminar el proceso de modelado, se selecciona todos los bloques nuevos y se le da apariencia o color de agua, una de las opciones que nos da el programa para mas practicidad a la hora de observar los resultados ya que al generar los bloques nuevos tiene la misma apariencia que la estructura.

4.3.2. Proceso de simulación

Para el proceso de simulación hay que darle las condiciones para que el programa lo tome como liquido o “water”, para esto en el comando de condiciones iniciales, selecciones todos los bloques nuevos generados.

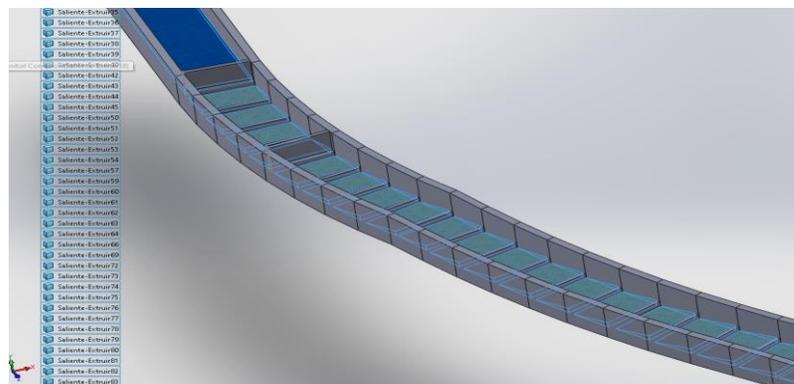


Figura 4.23. Colchones de agua.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Para esto desactivamos los componentes sólidos, lo cual nos abrirá las ventanas de más opciones en el cual nos aparecerá la concentración de sustancia y en el cual damos la opción de water para que en el proceso de cálculo lo tome como agua y no así como un sólido o aire.

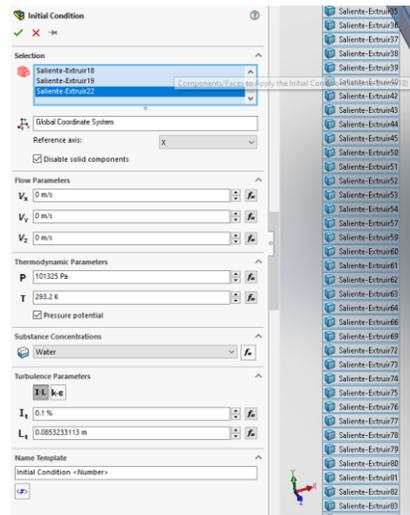


Figura 4.24. Condiciones iniciales.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Al generar ya esta nueva condición para el nuevo estudio, mantenemos las demás condiciones o datos iniciales del prediseño de la estructura para realizar una comparación al final con los resultados.

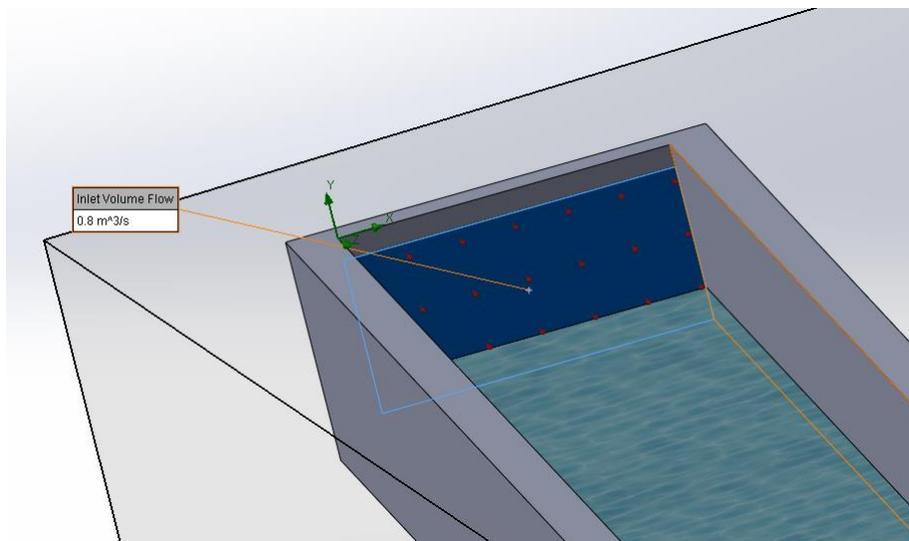


Figura 4.25. Condiciones de borde.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

4.3.3. Point goals

Se generaron nuevos controles los cuales serían puntuales en el primer dentellón del vertedero, para los cuales se generó un croquis con “líneas constructivas” las cuales son líneas de apoyo y con el comando “cota inteligente” se dio una distancia del muro del canal de 10 cm y se hicieron secciones a lo vertical, generando 6 puntos de control a 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm y 70 cm desde el fondo del canal.

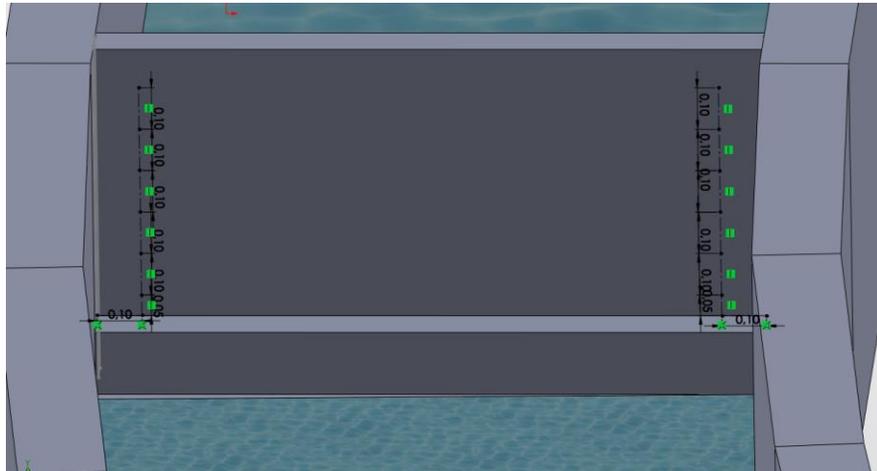


Figura 4.26. Croquis con líneas constructivas.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Con estas referencias ingresamos a las metas puntuales y los aplicamos en la placa en los puntos especificados, a cada punto de control se le dio objetivos específicos de control, los cuales se obtendrán en la exportación del Excel de resultados al finalizar la simulación.

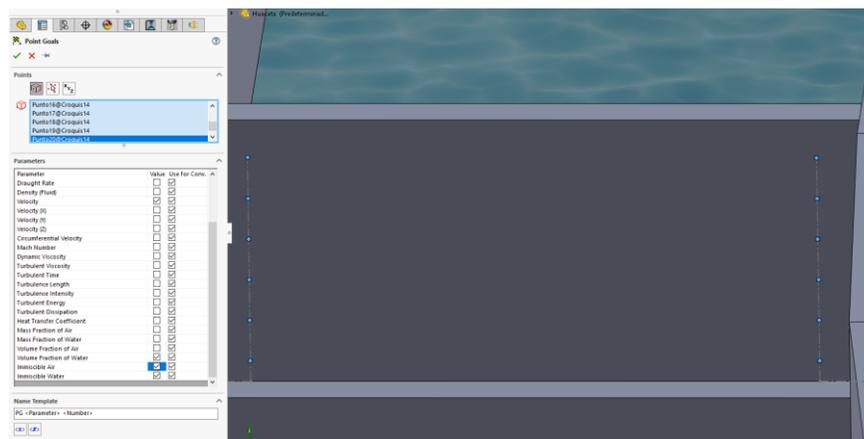


Figura 4.27. Metas puntuales.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Parameter	Value
Status	Solver is finished.
Total cells	135,849
Fluid cells	135,849
Fluid cells contacting solids	70,475
Iterations	1,000
Last iteration finished	01:38:14
CPU time per last iteration	00:00:02
Travels	40
Iterations per 1 travel	26
Cpu time	0 : 31 : 43
Calculation time left	0 : 0 : 0
Physical time	100 s
Current time step	0.1 s
Run at	DESKTOP-0JNSMDR
Number of cores	20

Warning	Comment
No warnings	

Figura 4.28. Procesamiento de datos.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

El proceso de simulación fue similar con una reducción de aproximadamente 5min, con un tiempo total de 31 minutos con 1000 iteraciones.

4.3.4. Visualización de resultados

4.3.4.1. Velocidades

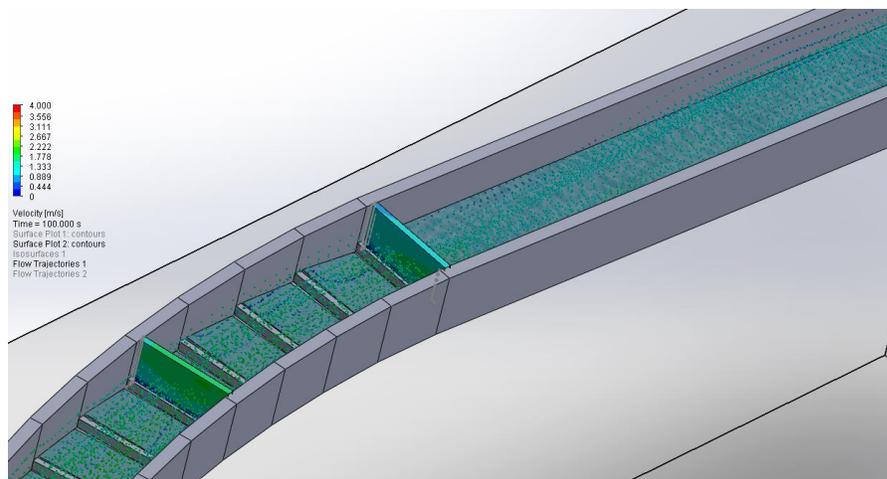


Figura 4.29. Primer tramo de la curva.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

En el primer tramo e inicio del vertedero escalonado se observan velocidades variables entre 0,9 m/s a 2 m/s, con velocidades menores al fondo del canal y las mayores al centro y arriba del canal, en las observaciones horizontales se observan velocidades regulares entre sí.

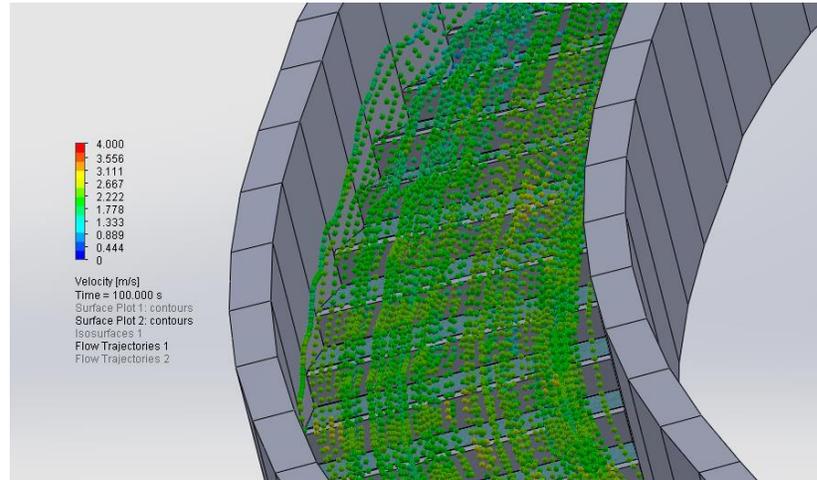


Figura 4.30. Centro de la curva.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

En el sector medio de la curva se observa velocidades más constantes y regulares variando entre 1,8 m/s a 2,3 m/s

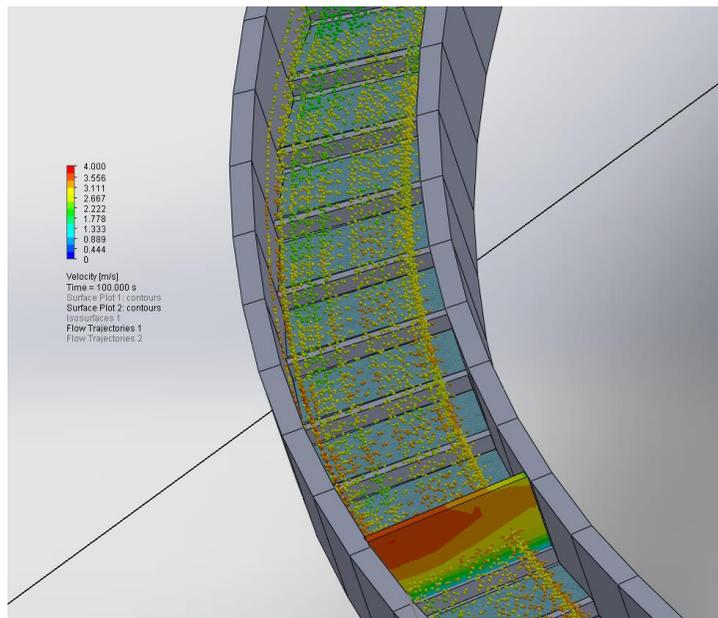


Figura 4.31. Tramo final de la curva.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

Al final de la curva se observan velocidades entre 2,2 m/s a 3,5 m/s mayor velocidad al lado izquierdo del canal y en la parte superior y pegado hacia la pared del canal.

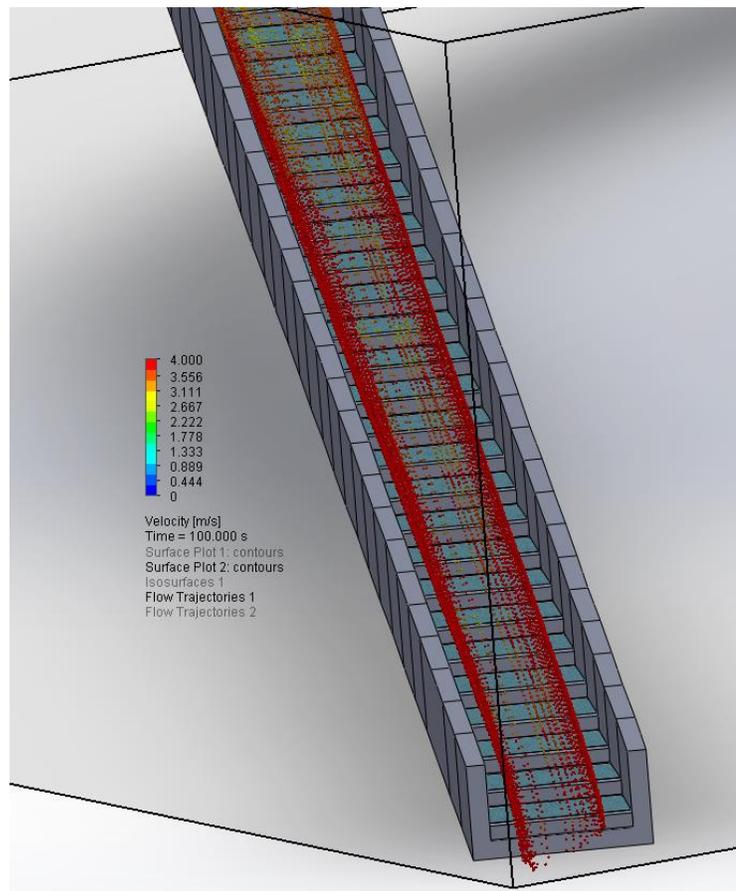


Figura 4.32. Último tramo del vertedero escalonado.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

En el último tramo del vertedero escalonado se observa velocidades altas que van de los 3,5 m/s a 4 m/s.

4.3.4.2. Comportamientos

En el comportamiento de los volúmenes podemos observar los mismos comportamientos que el análisis con el vertedero vacío, para el lado derecho un flujo más bajo y regular y para el lado izquierdo un flujo más alto y las posibilidades de desbordes para el inicio de la curva y al final de la curva, hacia el lado externo de la curva.

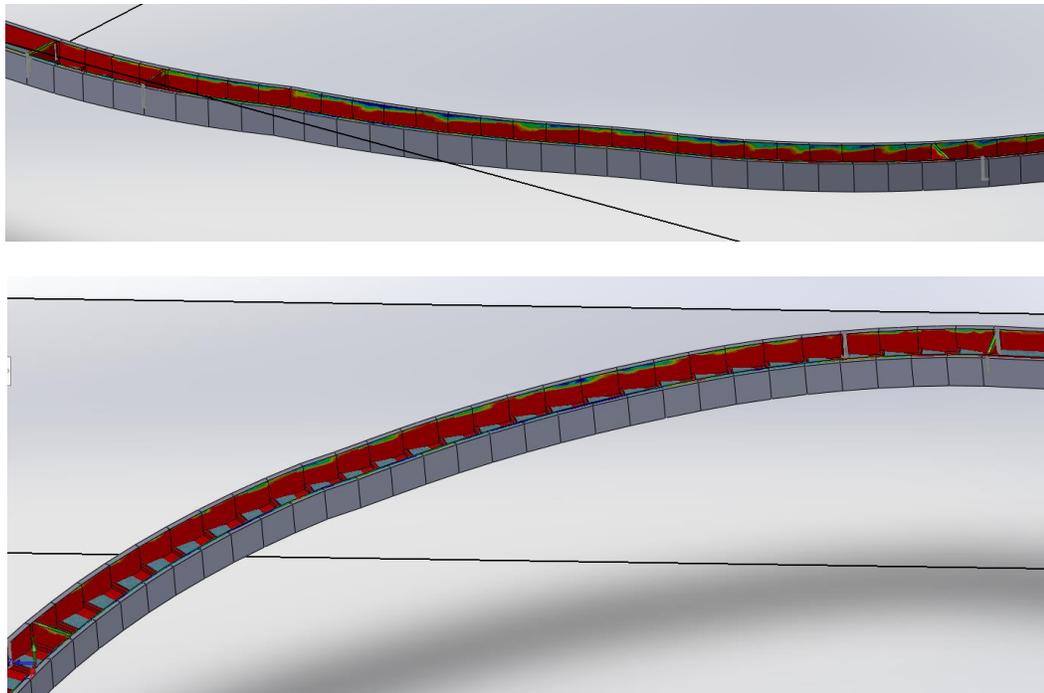


Figura 4.33. Volúmenes aplicados a las paredes del vertedero.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

4.3.4.3. Metas y comparaciones

4.3.4.3.1 Metas puntuales en el primer dentellón

Tabla 4.3. Tabla Velocidades primer dentellón.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
PG Velocity izq 20cm	[m/s]	1,064	1,072	1,046	1,120
PG Velocity izq 30 cm	[m/s]	1,259	1,295	1,259	1,320
PG Velocity der 30cm	[m/s]	1,726	1,723	1,697	1,749
PG Velocity izq 40cm	[m/s]	1,314	1,346	1,314	1,370
PG Velocity der 40cm	[m/s]	1,861	1,853	1,830	1,876
PG Velocity izq 50cm	[m/s]	1,256	1,269	1,247	1,286
PG Velocity der 50cm	[m/s]	0,959	0,951	0,940	0,962
PG Velocity izq60cm	[m/s]	1,247	1,244	1,212	1,265
PG Velocity der 60cm	[m/s]	0,963	0,945	0,920	0,973
PG Velocity izq70cm	[m/s]	1,166	1,109	1,080	1,166
PG Velocity der 70cm	[m/s]	1,512	1,486	1,433	1,527
Velocidad esc 1	[m/s]	1,245	1,251	1,237	1,272

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla de velocidades resumida, se observa las velocidades obtenidas a 100 segundos de simulación, obteniendo así como los puntos a 40 cm del fondo del canal como una velocidad máxima puntual con mayor velocidad para el lado derecho del canal lo cual se puede observar en la figura 4.32 en la placa de control grafica similar con descripción en colores, el último escalón de la tabla es la velocidad obtenida para toda la superficie de la placa de control a 100 segundos de simulación.

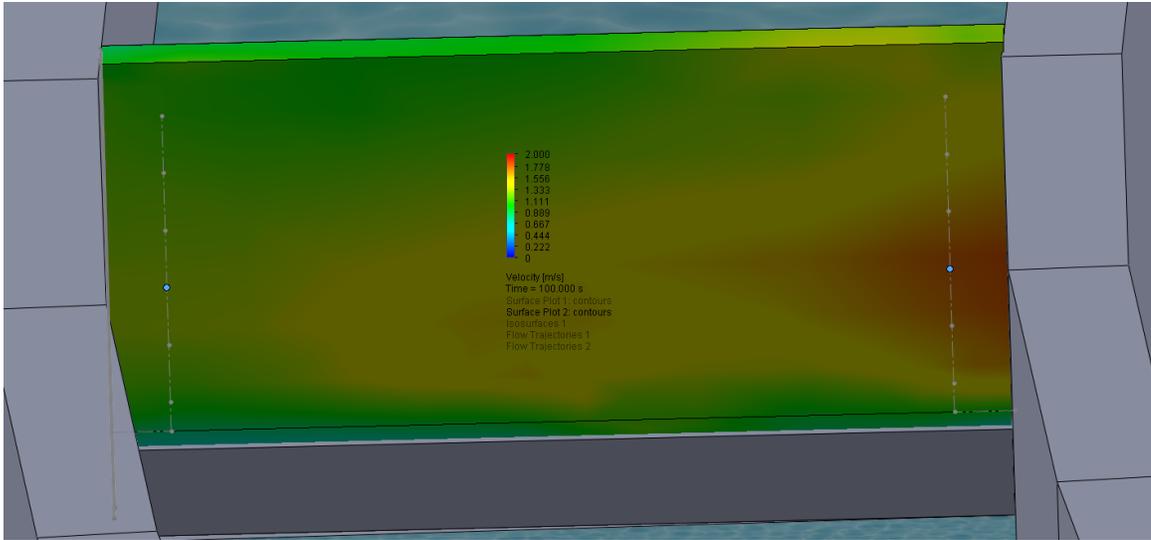


Figura 4.32. Velocidades primer tramo.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

4.3.4.3.2 Comparaciones

En el análisis comparativo en la placa de control más lejana, con las mismas condiciones y datos de entrada y con la diferencia de los colchones de agua para un caso y el otro estudio con inicio de la estructura vacía, los dos con 100 segundos de simulación podemos determinar:

- El tiempo de estabilización o concentración del caudal es menor para el estudio con los colchones de agua lo cual lo vuelve más eficiente, tardando 14 segundos con respecto a los 26 segundos que tarda la simulación con el vertedero vacío, lo cual reduciría el tiempo de simulación.

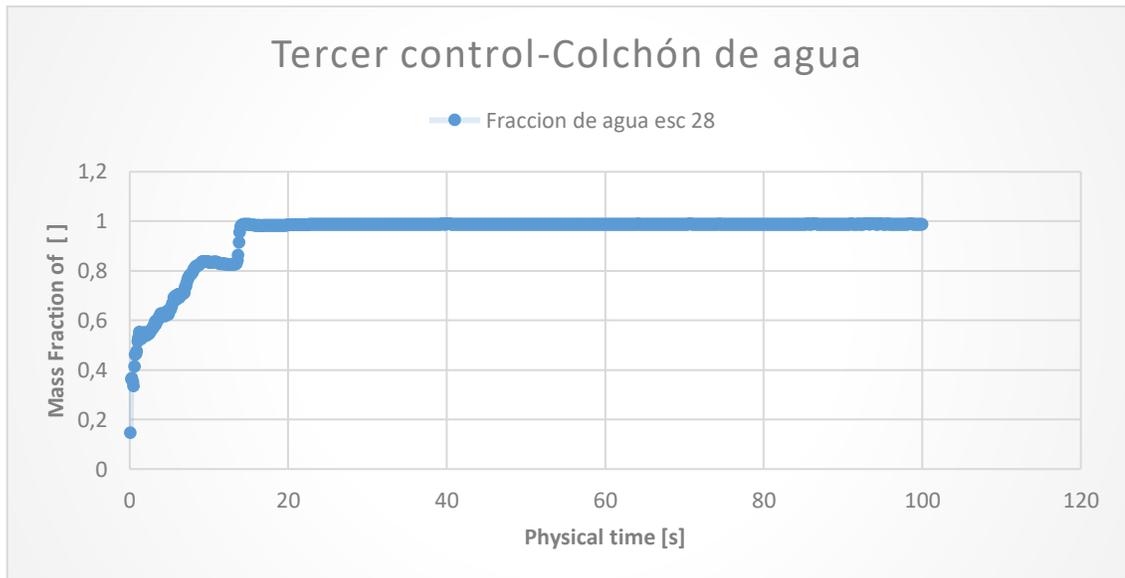
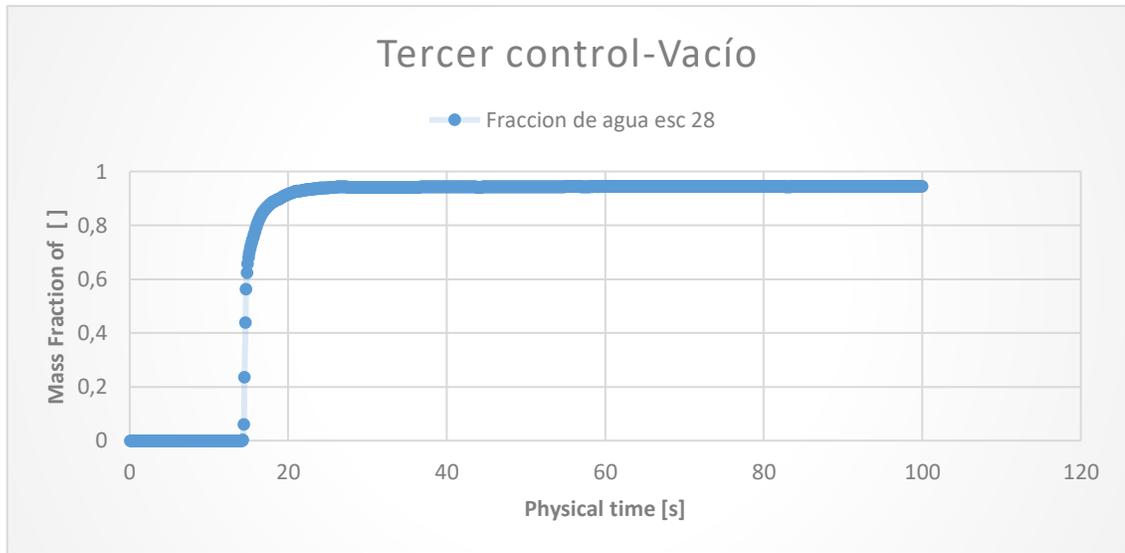


Figura 4.33. Concentración de agua tercer control.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

- El impacto de velocidad que tiene el flujo cuando está vacío el canal es mayor que cuando tiene los colchones de agua.
- Las velocidades a los 100 segundos de simulación para los dos casos son resultados similares, pero dando por mayor al estudio con los colchones de agua con 2,65 m/s con respecto al estudio con el vertedero seco con 2,58 m/s.

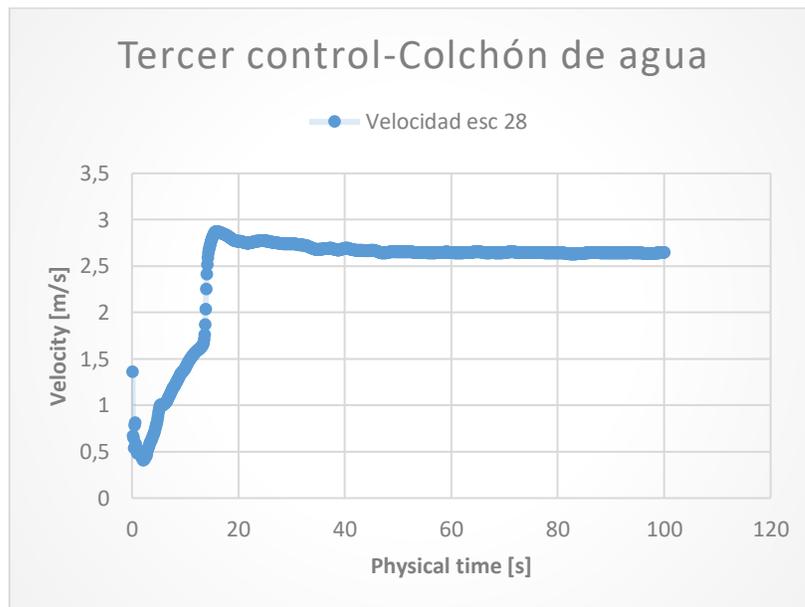
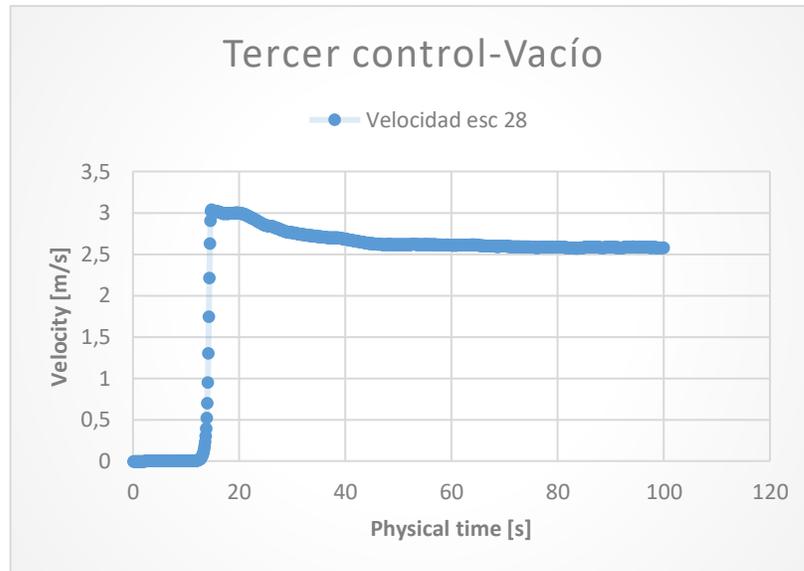


Figura 4.34. Velocidad de agua tercer control.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Solidworks.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Los planos realizados con las coordenadas tomadas en campo, permitió observar que la curva crítica del vertedero escalonado esta seccionada en tres tramos de distintas longitudes con cambios de dirección, asumiendo que es motivo del encofrado de la obra dada la irregularidad.
- El aforo con el molinete hidráulico se realizaron las mediciones en temporada con flujo uniforme y estable, sin exceso de turbulencia y se realizó una limpieza exhaustiva del canal sacando los obstáculos puestos por los comunarios y pescadores como también sedimentación encontrada en el canal ya que afectaría las mediciones.
- Se estableció los puntos estratégicos en la curva donde se observaron cambios de direcciones bruscas y desgastes más notorios en las paredes del canal que son en los reductores de velocidad o dentellones N°1, N°5 y N°28.
- La modelación de la estructura hidráulica se optó por modelarlo en una sola estructura para así evitar errores de ensamblaje y se manejó la estructura con croquis 3d con las coordenadas tomadas en campo para una mayor exactitud en la simulación.
- Las reiteras simulaciones aplicadas a la estructura se determinó un mínimo de 100 segundos físicos en la estructura para que el flujo llegue a pasar por los 3 puntos de control y se estabilice.
- La aplicación de placas o superficies en cada punto de control hace ser más eficiente a los controles por que analiza de manera sección transversal toda esa parte de la sección.
- Los resultados del dentellón N°1 o primer control da velocidad media en aforo son 0,0480 m/s y en simulación 0,0509 m/s. El tirante es de 17,2 cm, las velocidades mayores se encontraban más hacia el centro inferior de la sección.
- Los resultados del dentellón N°5 o segundo control de velocidad media en aforo son 0,0492 m/s y en simulación 0,0556 m/s. El tirante es de 17,0 cm, se observa que las velocidades mayores de la sección tienden a ubicarse más próximo de las paredes del canal.

- Los resultados del tercer control de velocidad media en aforo son 0,0537 m/s y en simulación 0,0585 m/s. El tirante es de 16,2cm, las velocidades mayores de la sección se encuentran en el lado derecho.
- El análisis comparativo de los tres puntos de control es de que la velocidad medida con el molinete hidráulico con respecto a las simulaciones son resultados semejantes entre si con una pequeña elevación para las simulaciones, este margen se debe a la idealización de los modelos computarizados que ciertas condiciones las toman como optimas, sin tomar en cuenta las condiciones que está expuesta la estructura, la diferencia es mínima por lo cual se observa que el modelo se ajusta a la estructura en estudio.
- El análisis con los datos de diseño que fue construida la estructura de $Q= 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$, $h=0,7 \text{ m}$ y $v=0,95 \text{ m/s}$ (estudio a diseño final), se determinó los puntos críticos en la estructura en los cuales según las simulaciones se generan velocidades máximas y también desbordes del flujo, puntos que concuerdan con los cambios brusco de dirección dentro de la curva dentro de los primeros 6 escalones y al final de la curva antes de entrar a la última recta.
- El análisis de volúmenes determinó como zona critica al tramo curva del vertedero, más específicamente inicio y final, lo cual se corrobora con las observaciones hechas en campo.
- En el primer tramo se obtuvo velocidades entre 0,85m/s a 1,5 m/s lo cual se aproxima a la velocidad de diseño de 0,95 m/s.
- Dentro de la curva existe variaciones de velocidad con respecto a la ubicación, manteniendo una velocidad casi constante para el lado derecho con 2,2 m/s y una variación de 1,5m/s a 2,2 m/s para el lado izquierdo.
- Al final de la curva para entrar al último tramo recto se notó un aumento más brusco de velocidad para el lado izquierdo que el derecho entrando a la última sección de control con velocidades de 2 m/s a 3 m/s.
- Las velocidades para la salida del canal al ingresar al cuerpo del embalse Huacata es de 3m/s a 4 m/s.
- Para el tercer análisis con los colchones de agua se determinó ser más eficiente con respecto al estudio con la estructura vacía, reducen así el tiempo de simulación,

reduciendo los picos de velocidad que se daban con el primer contacto del fluido con las placas de control y manteniendo resultados similares a los 100 segundos de simulación.

- La aplicación de CFD a estructuras hidráulicas ayuda a determinar zonas críticas las cuales no se pueden observar hasta una vez construido la estructura, esto ayuda a prediseños para optimizarlo o en obras complementarias o algún mejoramiento para ciertas partes de la estructura.

5.2. Recomendaciones

- Para obras hidráulicas indispensables en zonas alejadas se recomienda concientizar a las comunidades de cuidar estas obras ya que se encontró en este caso escombros y rocas que usan para cruzar el canal lo cual provoca daño y entorpece el funcionamiento de la obra.
- Para la curva del vertedero escalonado se recomienda un aumento del borde libre de 10 cm a 20 cm para evitar el desborde del flujo de agua.
- La superelevación en vertederos con curvas pronunciadas ayudaría a mejorar el flujo de agua y reducir las fuerzas hidráulicas que actúan sobre las paredes de la estructura, con una ligera elevación del nivel del agua en el lado externo de la curva ayudara a que la superficie del agua se incline hacia el interior de la curva, esto compensara el aumento de velocidad que sufre el lado externo y así evitar erosión y socavación lo cual contribuye a la estabilidad.
- Para los desgastes en las paredes se puede aplicar un revestimiento protector en las áreas desgastadas para reforzar la resistencia a la erosión y evitar la pérdida adicional de material con revestimiento de concreto o revestimiento con polímeros de alta densidad.
- Para los modelamientos de estructuras hidráulicas en Solidworks, es mejor realizarlo en un solo objeto ya que se evitará complicaciones de ensamblaje y movimiento de coordenadas respetando las de diseño.
- En las simulaciones mientras más precisos sean los datos de ingreso y condiciones de los parámetros de cálculo, los resultados serán más precisos y coherentes con la realidad.
- En futuras investigaciones se recomienda con distintos tipos de rugosidades dentro las obras hidráulicas ya que el desgaste de las paredes en contacto con el flujo maneja un tipo de desgaste a comparación del que no.

- La aplicación de CFD (dinámica de flujo computacional) al diseño de la estructura para así evitara realizar modificaciones y gastos posteriores.
- Para obras ya construidas se recomienda la validación y comparación de resultados obtenidos en campo con el modelo que se está trabajando para determinar si se ajusta o no la obra en estudio.
- La metodología para la toma de coordenadas para futuras investigaciones puede ser aplicados con drones topográficos y RTK los cuales pueden llegar a ser más precisos.