

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, la constante necesidad de innovación y cambio, ha llevado al hombre a realizar el desarrollo de nuevas tecnologías, especialmente en el área de la ingeniería.

Disponer de un laboratorio virtual se convirtió en una alternativa complementaria de fácil acceso, contando con la posibilidad de tener experiencias tanto individual como grupal; también constituye una herramienta para trabajar las tecnologías de la información y desarrollar la competencia digital en los estudiantes, logrando así que puedan captar con anticipación la realización de las prácticas de laboratorio con una metodología más didáctica.

El uso de programas de simulación numérica como las simulaciones físicas a través de experimentos de laboratorio, ha cobrado mucha relevancia e importancia en las últimas décadas. Una de estas herramientas que en la actualidad se volvió muy importante es la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

En la actualidad, hablar de CFD implica la combinación con otros modelos numéricos en el análisis de sistemas que involucra el flujo de fluidos, transferencia de calor y otros fenómenos asociados como reacciones químicas por medio de simulación computacional, o bien fenómenos de acoplamiento flujo-estructura; denominando a esta combinación de modelos, modelado del tipo multifísico. La técnica es muy útil y poderosa abarcando un amplio rango de áreas de aplicación industriales y no industriales.

Para realizar la simulación numérica se empleará el programa Solidworks, que mediante su complemento “Solidworks Flow Simulation” (simulación de flujo), se podrá realizar la observación del resalto hidráulico a través del canal Rehbock, donde analizaremos la conjugación de tirantes y la longitud del resalto. Los resultados se compararán con prácticas de laboratorio llevadas a cabo por los estudiantes.

1.2. ANTECEDENTES

Las nuevas generaciones de estudiantes emplean las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en su vida cotidiana al hacer uso de computadoras personales, dispositivos de comunicación móviles, internet y demás. Para esto es natural aprovechar esta

tecnología ya disponible para que los estudiantes comprueben, refuercen y practiquen los conocimientos teóricos adquiridos en el aula.

Durante las últimas décadas se han publicado en el ámbito de la investigación numerosos artículos, e incluso trabajos académicos como el actual, que tratan de dar un paso más en el avance de la tecnología implementando nuevas herramientas altamente capaces de darnos soluciones en problemas ingenieriles como con la CFD.

Así como lo explica Sarmiento (2015) una CFD puede definirse como el área de la computación científica que se encarga de estudiar los métodos computacionales para la simulación de problemas comprendidos por los fluidos en movimiento, con o sin transferencia de calor. En los últimos años, se pueden encontrar disponibles en el mercado muchos programas basados en técnicas CFD que son de gran ayuda y podemos sacar ventajas de ello.

Desde el punto científico de Carrillo et al. (2014) La ventaja principal de la metodología de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es la posibilidad que ofrece para investigar los sistemas físicos de los fluidos, proporcionando una gran cantidad de datos, con una mayor rentabilidad, flexibilidad y velocidad que la que se obtiene con los procedimientos experimentales, logrando obtener resultados eficientes, siempre y cuando se haya realizado una adecuada calibración previo a su uso.

Por igual, Shaw (1992) enfatiza que a medida que fueron apareciendo dichos paquetes computacionales, se dio lugar a que estos métodos ya no sean utilizados solamente en el mundo de la investigación por parte de personas altamente capacitadas, sino que también sean incorporados por organizaciones industriales como una herramienta útil de diseño. En consecuencia, los ingenieros que no poseen los conocimientos necesarios en CFD se han visto en la necesidad de conocer y aprender esta área, con el objetivo de atender la alta demanda tanto educativa como laboral en el campo de la ingeniería.

Como lo menciona Saraz et al. (2012) la elaboración de modelos matemáticos está basada en la comprensión de fenómenos físicos básicos que gobiernan el comportamiento del problema estudiado. Resolviendo tales modelos para un conjunto de condiciones dado, es

obtenida una solución matemática del sistema de ecuaciones resultante. Este procedimiento es conocido como método analítico.

Como plantea Margeirsson (2007) los saltos hidráulicos aparecen en la naturaleza, como en los ríos y afluentes, incluso a veces en situaciones cotidianas como por ejemplo, al abrir un grifo y el agua choca en contra del lavabo. Debido a que se ejerce una alta turbulencia resultan ser procesos de mezcla muy eficientes y disipación energética muy alta. El mayor uso del resalto hidráulico es la disipación de energía, tal y como se aplica en diques y estructuras de generación hidroeléctrica: Por ejemplo, se realizó un estudio sobre la efectividad y el impacto en las cuencas de los canales de disipación del dique Vatnsfell en Islandia.

Del mismo modo, Hager (2010) indica que se puede aplicar el salto hidráulico para mezclar un líquido con otras sustancias, como en el caso de enriquecer agua con aire. Otros usos menos comunes son, por ejemplo, cambiar las alturas de un flujo o aplicar fuerzas.

1.3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.3.1. Planteamiento del problema

La enseñanza en hidráulica es fundamental en la formación de los ingenieros civiles, ya que exige una sólida comprensión de los principios teóricos y sus aplicaciones prácticas. Uno de los conceptos centrales es el resalto hidráulico, que es crucial para comprender fenómenos como es la disipación de energía en obras civiles. Tradicionalmente, esta conexión entre lo práctico y teórico se ha logrado a través del uso de laboratorios físicos, sin embargo, esta clase de laboratorios, como en el que se encuentra el canal Rehbock, presentan barreras significativas.

La dependencia exclusiva de estos espacios limita el acceso en el uso de los equipos a los estudiantes, restringiendo las oportunidades de práctica y observación. Más allá de esto, la imposibilidad de observar y experimentar el ensayo fuera del horario de clases o del espacio físico del laboratorio, obstaculizando el aprendizaje autónomo y repetitivo, realizando diferentes parámetros o visualizando en detalle a su propio ritmo, conceptos que pueden llegar a ser complejos de entender en una sola práctica.

El problema central que esta investigación aborda, es la ausencia de un modelo digital validado que funcione como un respaldo virtual del canal Rehbock del laboratorio. Esta brecha tecnológica y didáctica impide que los estudiantes puedan experimentar el fenómeno del resalto hidráulico de manera interactiva y accesible, más allá de las limitaciones físicas del laboratorio tradicional. Sin una herramienta de este tipo, la comprensión de las variables hidráulicas claves y el comportamiento del flujo puede permanecer abstracta para muchos estudiantes, limitando su capacidad para aplicar estos conocimientos en futuros proyectos de ingeniería.

Por lo tanto, este proyecto se enfoca en implementar y validar un modelo CFD en SolidWorks. Este modelo no solo simulará el resalto hidráulico, sino que también sentará las bases para el desarrollo de un laboratorio virtual interactivo. La finalidad es clara: proporcionar una herramienta didáctica innovadora, que supere las limitaciones físicas actuales, potencie la comprensión del fenómeno del resalto hidráulico y prepare a los estudiantes de ingeniería civil.

1.3.2. Formulación del problema

¿En qué medida el desarrollo y la validación de un modelo de simulación CFD del canal Rehbock en SolidWorks puede servir como una herramienta didáctica eficaz para complementar la enseñanza práctica del resalto hidráulico en el laboratorio de hidráulica, superando las limitaciones de acceso y observación en un entorno físico?

1.3.3. Sistematización del problema

¿Es posible diseñar un modelo en 3D del canal Rehbock utilizando SolidWorks que represente fielmente su geometría y componentes importantes?

¿Cómo configurar un modelo CFD en SolidWorks Flow Simulation que simule el comportamiento del resalto hidráulico bajo condiciones experimentales del laboratorio?

¿Qué nivel de concordancia existe entre los resultados obtenidos en la simulación y los datos experimentales del laboratorio en términos de tirantes y longitud del resalto?

¿Puede considerarse aceptable el margen de error entre los resultados simulados y experimentales para validar el modelo como herramienta educativa?

¿De qué manera este modelo puede ser integrado como parte de un laboratorio virtual que complemente el aprendizaje autónomo y repetitivo en la formación de los estudiantes de ingeniería civil?

1.4. OBJETIVO

1.4.1. Objetivo general

- Realizar el diseño en el programa Solidworks, mediante un modelo CFD para la simulación numérica y experimental del resalto hidráulico generado en el canal Rehbock, para el equipamiento de un laboratorio virtual de hidráulica a beneficio de los estudiantes.

1.4.2. Objetivos específicos

- Modelar en 3D el canal Rehbock del laboratorio usando SolidWorks, asegurando que la réplica virtual sea fiel a la geometría y componentes importantes del canal.
- Simular el comportamiento del flujo en el modelo, utilizando los mismos datos de caudal y condiciones de compuerta de la práctica de laboratorio, para recrear el resalto hidráulico.
- Comparar las variables hidráulicas clave de la simulación, como los tirantes y la clasificación del resalto, con los resultados experimentales para evaluar la precisión del modelo.
- Desarrollar una guía metodológica con el proceso de simulación, para que el modelo pueda ser utilizado como una herramienta práctica de laboratorio virtual.

1.5. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la modelación computacional se ha consolidado como una herramienta esencial en la ingeniería, permitiendo predecir y analizar fenómenos físicos complejos sin recurrir exclusivamente a ensayos de laboratorio, los cuales suelen ser costosos y limitados por condiciones experimentales. En el campo de la hidráulica, la comprensión del comportamiento del flujo en canales abiertos, en particular del resalto hidráulico, resulta fundamental para el diseño, operación y mantenimiento de infraestructuras como canales de riego, vertederos, estructuras de disipación de energía, y obras de control de erosión.

El canal Rehbock ha sido históricamente utilizado como un modelo experimental para estudiar el flujo supercrítico y el resalto hidráulico en condiciones controladas. Sin embargo,

su implementación física requiere recursos materiales y tiempo que pueden ser optimizados mediante el uso de herramientas de simulación como SolidWorks Flow Simulation. Esta integración de software CAD con CFD permite replicar de forma virtual los escenarios hidráulicos, analizar variaciones de parámetros y validar resultados con una alta aproximación a la realidad.

1.5.1. Teórica

Gracias al desarrollo y validación de métodos numéricos rápidos, el continuo aumento de la tecnología en los computadores e implementación de innovaciones en el campo de la ingeniería, muchos de sus problemas se están siendo resueltos mediante técnicas CFD, cuyo uso implica un bajo costo y un análisis más veloz, reemplazando en algunos casos los métodos experimentales y analíticos.

Con el uso de CFD, se realizará la simulación numérica del resalto donde se podrá observar el comportamiento del fluido en el canal en el canal Rehbock y obtener las características estudiadas en el resalto.

Por tanto, el presente trabajo encuentra su justificación en la necesidad de fortalecer el uso de recursos digitales aplicados a la ingeniería hidráulica, promoviendo la simulación como un medio eficiente para el análisis y la enseñanza del comportamiento de los fluidos en canales abiertos. Además, el desarrollo de este modelo busca aportar una herramienta académica accesible para la formación de futuros ingenieros en entornos virtuales cada vez más relevantes.

1.5.2. Metodológica

El enfoque adoptado es la comparación rigurosa de los resultados de dos escenarios de simulación CFD contra los datos experimentales obtenidos en el laboratorio. Estos dos escenarios son:

Modelo 1: Simulación con "Ideal Walls" (Paredes Ideales): Representa una primera aproximación simplificada que ignora los efectos de la fricción en las paredes del canal, asumiendo una rugosidad despreciable. Este modelo sirve como una línea base para evaluar el comportamiento general del flujo.

Modelo 2: Simulación con "Real Walls" (Paredes Reales): Constituye un modelo más avanzado que busca una representación fiel de las condiciones físicas, incorporando la rugosidad específica de los materiales del canal de laboratorio.

La decisión de implementar y comparar estos dos modelos es el pilar metodológico de la investigación. Permite aislar y cuantificar el impacto de una variable física clave: la rugosidad de las paredes. Este enfoque no solo permite replicar el fenómeno, sino que valida científicamente el proceso para su aplicación como herramienta de enseñanza.

1.5.3. Práctica

El software Solidworks es un programa de diseño mecánico en 3D con el que se puede crear geometría 3D usando sólidos paramétricos, la aplicación está enfocada a diseño de producto, diseño mecánico, ensambles, dibujos para taller y simulación de flujos.

El resalto hidráulico constituye un fenómeno de elevada complejidad y con importantes aplicaciones en ingeniería hidráulica en general y en disipación de energía en grandes presas en particular. La gran complejidad del resalto viene dada por las fluctuaciones turbulentas, la intensa entrada de aire y la importante disipación de energía que tienen lugar en el mismo. (Castillo et al., s. f.).

En este caso nos basaremos en la simulación numérica del canal, que se hará con la práctica de laboratorio "Resalto hidráulico", mediante la misma observaremos como se crea el resalto y podremos realizar un análisis comparativo con los resultados reales del canal del laboratorio vs. los resultados obtenidos en Solidworks Flow Simulation.

Para este trabajo se realizará la simulación con la ayuda del programa "SOLIDWORKS PREMIUM 2016", que es compatible con Windows 7, esta versión al igual que las recientes permite desarrollar todas las funcionalidades necesarias para el modelado 3D y ensamblajes requeridos en este trabajo de investigación.

1.6. HIPÓTESIS

El modelo 3D del canal Rehbock y la simulación CFD desarrollada en SolidWorks son herramientas capaces de simular adecuadamente el resalto hidráulico, reproduciendo con un margen de error aceptable (menor al 5%) los resultados obtenidos experimentalmente en laboratorio. Esta precisión valida el modelo como una herramienta didáctica eficaz para

complementar y enriquecer el aprendizaje en el laboratorio de hidráulica, permitiendo el análisis y la visualización de variables hidráulicas clave de forma virtual.

CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL

El Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” se encuentra en funcionamiento desde 1997, nace con la necesidad de formar Ingenieros Civiles con alta formación práctica, que complemente el contenido teórico de las asignaturas relacionadas con la Hidráulica, Hidrología y lo relacionado con el estudio de las Obras Hidráulicas. Con el pasar de los años el laboratorio tuvo grandes cambios y se fue actualizando, requiriendo la implementación de nuevos métodos de aprendizaje que se apeguen a las expectativas de trabajo, que cumplan con los objetivos académicos planteados. (Pérez Peñaloza, 2017, pág. 1).

Siendo el objetivo del laboratorio tal como dice Pérez (2017, pág. 1) “Contribuir a la formación integral de personas en un ambiente académico de libertad y responsabilidad, que sean competitivas y que promuevan mejorar la calidad de vida de la sociedad, en un marco multidisciplinario y de cooperación”. La integración de laboratorios virtuales optimiza el aprendizaje práctico, al permitir experiencias controladas, repetibles y accesibles, que fortalecen la formación técnica del estudiante.

2.1. MARCO TEÓRICO

La Dinámica de Fluido computacional (CFD) son técnicas de diseño y de análisis de alta precisión basados en programas que funcionan en ordenadores. Los primeros códigos de CFD fueron desarrollados por la industria Aeroespacial en los años 1961. Desde entonces, el uso del CFD se ha extendido a todos los sectores donde la dinámica de fluidos tiene un papel importante. Sin duda, este tipo de técnicas son una alternativa a la utilización de dispositivos o modelos experimentales en laboratorios de Hidráulica. Estos laboratorios son normalmente enormes y tiene grandes costes tanto de construcción como de consumo de agua y de energía. (Ngamalieu Nengoue, 2015)

La incorporación de experiencias significativas en los procesos de enseñanza de una asignatura permite que los estudiantes tengan una mayor apropiación de su proceso académico al lograr una mejor comprensión de la justificación y aplicación de los contenidos y competencias propuestos (Vallejo, 2014). En las asignaturas teórico-prácticas, las prácticas de laboratorio, las visitas de campo guiadas y las simulaciones computacionales son ejemplos de este tipo de experiencias (Waldrop, 2013)

El mundo global está interconectado, desde cualquier punto del Planeta y en cualquier momento, por lo que el conocimiento y el aprendizaje pueden y deben ser más accesibles, personales y directos, ya que con el uso diario de las TIC hay un acceso inmediato a multitud de contenidos y herramientas que permiten un aprendizaje diferente con nuevas dinámicas dentro de los procesos de enseñanza-aprendizaje, las cuales reflejan este enfoque tecnológico en su razón de ser. (Zaragoza-Martí, 2019)

2.2. MARCO CONCEPTUAL.

Resalto hidráulico:

Ocurre en el paso brusco de régimen supercrítico (flujo rápido con un tirante menor) a régimen subcrítico (flujo lento con un tirante mayor). El estudio del resalto es importante para el área de la Ingeniería hidráulica al ser fundamental en diseño de disipadores de energía, vertederos y estructuras hidráulicas para proteger contra daños erosivos.

Número de Froude:

Es una relación adimensional que indica la influencia de la gravedad en el movimiento de un fluido, representada por (F), el Número de Froude lo utilizaremos para el cálculo de las ecuaciones fundamentales en el resalto hidráulico. En esta investigación, es el criterio fundamental para clasificar el estado del flujo y, por ende, el resalto hidráulico. Un flujo con " $Fr > 1$ " es supercrítico, uno con " $Fr < 1$ " es subcrítico, y la transición entre ambos da origen al resalto.

Herramienta Didáctica:

En el contexto de esta investigación se define como la réplica virtual del canal Rehbock, cuyo propósito es pasar de un simple modelado técnico para convertirse en un recurso de enseñanza-aprendizaje. Esta herramienta está diseñada para abordar las limitaciones significativas del laboratorio físico, como la imposibilidad de que los estudiantes experimenten fuera del horario de clases y a su propio ritmo.

Laboratorio Virtual:

Se concibe como un "centro sin paredes" que funciona como un respaldo digital y complemento del canal Rehbock físico existente. No busca reemplazar la experiencia real,

sino enriquecerla al ofrecer un espacio para el aprendizaje autónomo y repetitivo. Este laboratorio virtual, materializado en el modelo CFD de SolidWorks

SolidWorks Flow Simulation

Es un software que integra CFD directamente en el entorno CAD, que se utiliza para resolver simulaciones de flujos como es el agua a través de un canal, resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes y modelos turbulentos (Dassault, 2014).

Ideal Walls

Idealización del diseño para la simulación donde la rugosidad de las paredes es depreciable.

Real Walls

Características reales de las paredes del canal, donde toma en cuenta la rugosidad de todos los materiales del objeto o diseño.

SolidWorks Flow Simulation Validación

La validación del modelo se emplea para evaluar la confianza de los resultados, es decir, el rendimiento del modelo calibrado. Por lo general, el modelo se valida dentro de un periodo diferente al utilizado en calibración (Ochoa-Tocachi, 2022, pág. 104)

Modelo CFD Validado:

Constituye el criterio de éxito de esta tesis. No es simplemente un modelo computacional, sino uno cuya fiabilidad ha sido comprobada cuantitativa y cualitativamente. Para este trabajo, un modelo se considera validado cuando:

- **Cualitativamente:** Es capaz de representar visualmente el resalto, replicando el paso de un régimen a otro.
- **Cuantitativamente:** Reproduce los resultados experimentales con un error relativo aceptable. Con base en la hipótesis, se estableció como meta un error inferior al 5% en las variables geométricas clave (tirantes y longitud del resalto) y energéticas. El cumplimiento de este criterio confirma la alta fidelidad del modelo.

2.3. MARCO ESPACIAL

El componente experimental de esta investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de la Carrera de Ingeniería Civil, perteneciente a la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” (UAJMS), ubicada en la ciudad de Tarija, Bolivia.

El foco central de este estudio fue el canal de ensayos tipo Rehbock, una pieza clave del equipamiento del laboratorio de hidráulica de la UAJMS. Este canal de fondo liso y sección rectangular está compuesto por una estructura metálica y paredes de cristal que permiten la visualización directa de los fenómenos hidráulicos. Sus dimensiones principales son 15,00 metros de longitud, 0,60 metros de ancho de solera y 0,60 metros de alto. Este espacio físico no solo sirvió como el lugar para la recolección de los datos empíricos necesarios para la validación, sino que también fue el objeto de estudio para la creación de su réplica virtual. La elección de este entorno se justifica por ser el sistema físico real contra el cual el modelo CFD desarrollado sería validado.

2.4. MARCO TEMPORAL

La investigación se ejecutó durante el primer semestre académico de la gestión 2025. El cronograma de trabajo se estructuró en cuatro fases principales y consecutivas.

La primera fase, de investigación y planificación, se centró en la revisión bibliográfica y la definición de los objetivos.

La segunda fase, de modelado y experimentación, incluyó la toma de mediciones en el canal Rehbock y la construcción del modelo 3D en SolidWorks.

La tercera fase, de simulación y análisis, consistió en la ejecución de las simulaciones CFD bajo los escenarios “Ideal Walls” y “Real Walls”, y el procesamiento de los datos brutos.

Finalmente, la cuarta fase, de validación y redacción, se dedicó a la comparación de resultados, la formulación de conclusiones y la escritura del documento final.

CAPÍTULO III: FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1. Laboratorio Virtual

El origen del concepto del laboratorio virtual tal y como lo conocemos hoy día, aunque modificado y evolucionado, teniendo en cuenta el transcurso del tiempo, se llevó a cabo en el año 1997. Los primeros centros de investigación académica que vieron una oportunidad en este concepto comenzaron a aplicar la idea de reunir a los alumnos y profesores en espacios virtuales que les proporcionaran una forma de trabajar con mayor tasa de éxito. En poco tiempo, hacia el año 2000, la idea de este tipo de laboratorio se había extendido e incluso se habían establecido pautas a nivel global que podrían adoptar otros centros. Y como forma de llevar un paso más adelante la envergadura de los laboratorios virtuales, la NASA dio inicio a un proyecto en el que adoptaría las bases establecidas combinándolas con la idea de un entorno de realidad virtual. Esto permitiría que los alumnos y los profesores pudieran coincidir de manera más realista en espacios propios de los centros académicos sin necesidad de esfuerzos ni desplazamientos, fomentando un aprendizaje más sólido. (V.I.U., 2018)¹

El concepto de laboratorio virtual está implícito en otras nociones tales como las de "colaboratorio", "grupo de trabajo virtual", "empresa virtual", "grupo interinstitucional" y "grupo de colaboración a distancia". (Vary, 2000, pág. 4)

Un "colaboratorio" tal como lo definió William Wulf, investigador especializado en informática que acuñó esa palabra en 1989, es un "centro sin paredes" cuyos usuarios pueden investigar sin tener en cuenta su situación geográfica interactuando con los colegas, teniendo acceso a los instrumentos, compartiendo los datos y los recursos informáticos, recurriendo a la información de las bibliotecas electrónicas. Ese entorno se apoya en unos programas informáticos que permiten trabajar en colaboración y simultáneamente a diversas personas desde distintos sitios.

El hecho de contar con un laboratorio virtual, ayuda a que los estudiantes lleven a cabo todo tipo de prácticas de una manera simplificada, interactuando de distintas maneras dependiendo de las necesidades que tenga cada uno.

¹ <https://www.universidadviu.com/es/actualidad/nuestros-expertos/laboratorio-virtual-por-que-son-tan-recomendables>

Considerando que los equipos en el laboratorio solo pueden ser manejados por un personal autorizado, esta es una de las ventajas que se obtiene al implementar como complemento el laboratorio virtual, puesto que el estudiante tendrá la herramienta a su alcance y podrá poner en práctica todos los conocimientos adquiridos en clase logrando que con su ingenio pueda resolver problemas que se le lleguen a presentar en un futuro.

3.2. Características principales del resalto hidráulico

El resalto hidráulico es un fenómeno local, que se presenta en el flujo rápidamente variado, el cual va siempre acompañado por un aumento súbito del tirante y una pérdida de energía bastante considerable (disipada principalmente como calor), en un tramo relativamente corto. Ocurre en el paso brusco de régimen (ver figura 1) supercrítico (rápido) a régimen subcrítico (lento), es decir en el resalto hidráulico el tirante, en un corto tramo, cambia de una valor inferior al crítico a otro superior a este (Villón B., 2007, pág. 179).



Figura 1: Esquema del proceso del resalto hidráulico.

Fuente: Elaboración propia.

El resalto hidráulico suele ocurrir agua debajo de un obstáculo, como ser una compuerta o vertedero o cuando la pendiente cambia repentinamente (Chow, 1959). En la figura 2 se observa la sección 0 previa a la compuerta (subcrítico), la sección 1 ubicada a continuación de esta estructura (resalto hidráulico), y la sección 2 ubicada inmediatamente después del salto hidráulico (subcrítico).

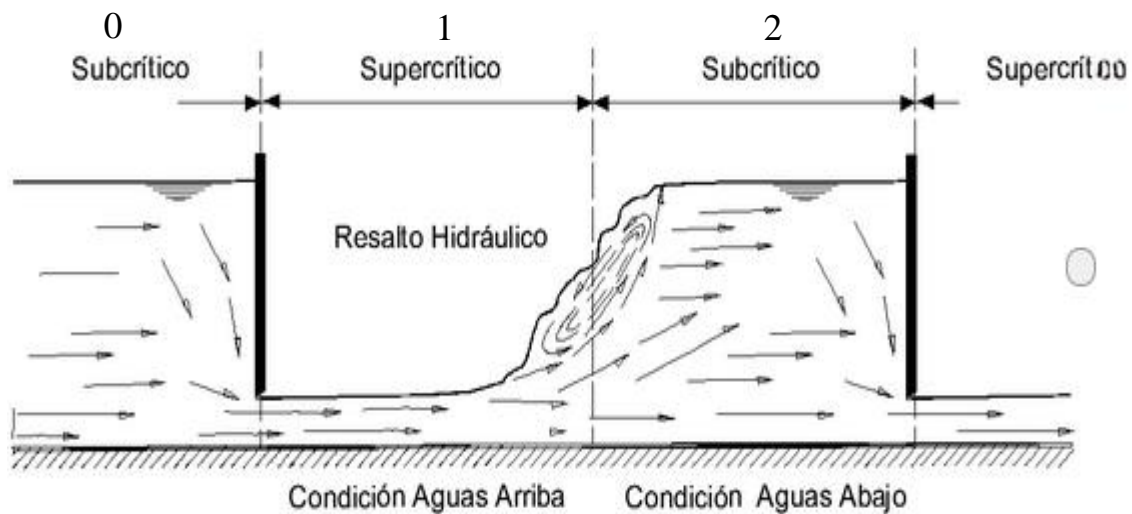


Figura 2: Resalto hidráulico.

Fuente: Sotelo Ávila, G., 2002.



Figura 3: Resalto hidráulico en canal Rehbock.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.1. Aplicaciones del resalto hidráulico

Entre sus aplicaciones más frecuentes se encuentran:

- Disipación de energía en estructuras hidráulicas en donde se desee evitar procesos de socavación (diques, vertederos, rápidos, entre otros).

- Mantenimiento y/o incremento de niveles de lámina de agua en canales de riego y distribución.
- Reducción de presión bajo estructuras, mediante elevación de la lámina de agua.
- Aireación, decoloración y mezcla de componentes químicos para el tratamiento del líquido vital.
- Medición de caudal de una forma más efectiva y económica mediante la creación de una sección de control con un flujo subcrítico.
- Remoción de burbujas de aire atrapadas en conductos cerrados parcialmente llenos.
- Producción de condiciones especiales de flujo, como por ejemplo, flujo crítico en una sección de control aguas abajo en la que se pueda medir el caudal circundante en un canal, de una manera efectiva y económica (French, 1988, pág. 79), (Sotelo Ávila, 2002, pág. 282).

3.2.1.2. Clasificación del resalto hidráulico


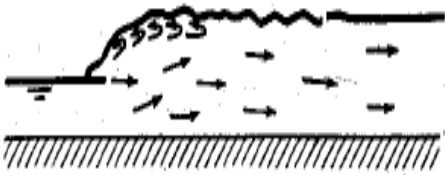
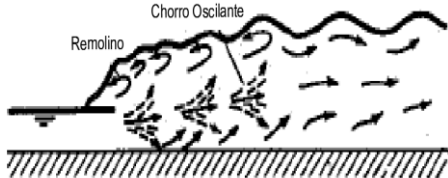


Los resaltos hidráulicos en fondo horizontal se clasifican de acuerdo con los estudios del U.S Bureau of Reclamation –USBR- (1963), según el número de Froude, de la siguiente manera:

- $F_1 = 1,0$ a $1,7$: Resalto Ondulante, la superficie del agua muestra ondulaciones.
- $F_1 = 1,7$ a $2,5$: Resalto Débil, se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, sin embargo, la superficie del agua hacia aguas abajo y la velocidad a través de la sección permanecen razonablemente uniformes, con una baja pérdida de energía.
- $F_1 = 2,5$ a $4,5$: Resalto Oscilante, existe un chorro oscilante que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad. Cada oscilación origina una onda de gran longitud y período irregular, que generalmente se traslada a grandes distancias aguas abajo, causando daños a las diversas estructuras hidráulicas de encauzamiento.
- $F_1 = 4,5$ a $4,9$: Resalto Estable, la extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección vertical. El tirante aguas abajo tiene

menos influencia sobre la acción y posición del resalto; La disipación de energía lograda por este tipo de resalto varía entre el 45% y el 70%.

- $F_1 > 9,0$: Resalto Fuerte, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren a lo largo de la cara frontal del resalto, generando fuertes ondas que se propagan hacia aguas abajo. La disipación de energía lograda por este tipo de resalto alcanza un 85%.

Tabla 1: Clasificación de resalto hidráulico.

CLASIFICACIÓN DE RESALTO HIDRÁULICO	
<p>Resalto Ondulante</p> <p>$F_1 = 1,0$ a $1,7$</p>	
<p>Resalto Débil</p> <p>$F_1 = 1,7$ a $2,5$</p>	
<p>Resalto Oscilante</p> <p>$F_1 = 2,5$ a $4,5$</p>	
<p>Resalto Estable</p> <p>$F_1 = 4,5$ a 9</p>	
<p>Resalto Fuerte</p> <p>$F_1 > 9,0$</p>	

Fuente: Ven Te Chow, 1959.

3.2.2. Ecuación de Bélanger.

Según Bélanger (1828), bajo comprobación experimental de Peterka (1964), un resalto hidráulico, en un canal rectangular de pendiente horizontal para un caudal constante, se forma si el número de Froude aguas arriba del flujo (Fr), el calado del flujo aguas arriba o supercrítico (y_1) y el calado aguas abajo o subcrítico (y_2) satisfacen la ecuación (1):

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) \quad (1)$$

Donde:

Y_1 = Tirante conjugado menor, (m).

Y_2 = Tirante conjugado mayor, (m).

F_1 = Numero de Froude (para flujo supercritico), adimensional.

Como se puede ver, la ecuación de Bélanger relaciona los tirantes conjugados de un resalto hidráulico para el número de Froude aguas arriba del mismo.

3.2.3. Pérdida de energía (ΔE) y eficiencia (η).

La pérdida de energía y la eficiencia son características elementales del resalto hidráulico. Por ello, en muchas ocasiones la principal función del resalto hidráulico es la disipación de energía. En un canal horizontal, la variación de energía se expresa en la ecuación (2):

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (2)$$

Siendo:

ΔE , Pérdida de energía en el resalto, (m).

E_1 , la energía específica en la sección inicial del resalto, (m).

E_2 , la energía específica en la sección final del resalto, (m).

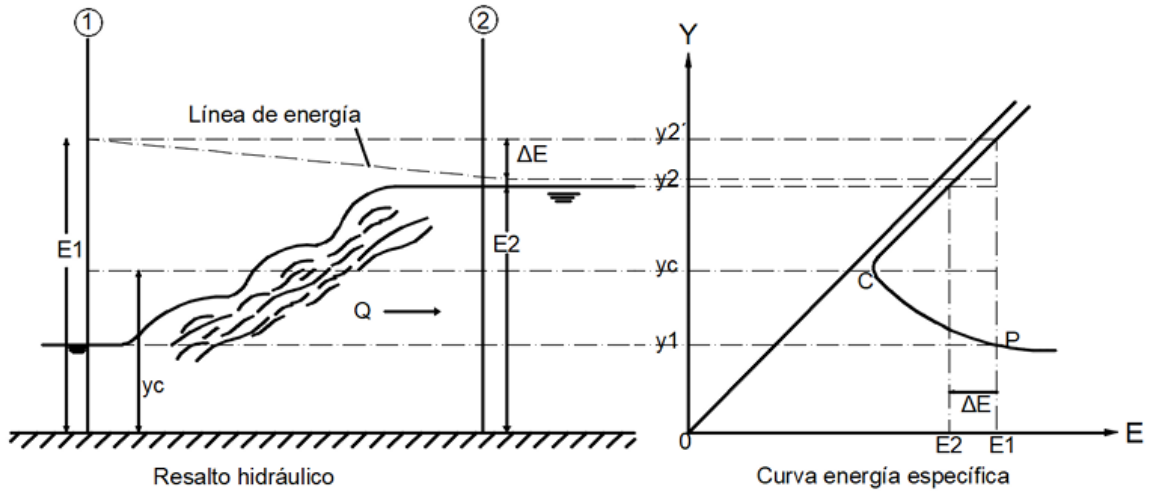


Figura 4: Curva de energía específica para un resalto hidráulico.

Fuente: Bureau of Reclamation, 1987.

La pérdida de energía se calcula a partir de la ecuación de la energía si suponemos (coeficiente de Coriolis) $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$. Tenemos la ecuación (3):

$$\Delta E + \left(Y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) = \left(y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) \quad (3)$$

Donde:

v_1 y v_2 = velocidad para un tirante menor y tirante mayor (respectivamente), (m/s).

g = aceleración de la gravedad, (m/s²).

Y_1 = Tirante conjugado menor, (m).

Y_2 = Tirante conjugado mayor, (m).

Con la ecuación (3), podemos obtener la ecuación (4) para un canal rectangular horizontal:

$$\Delta E = \frac{(Y_2 - Y_1)^3}{4Y_2Y_1} \quad (4)$$

Donde:

ΔE = Pérdida de energía, (m).

Y_1 = Tirante conjugado menor, (m).

Y_2 = Tirante conjugado mayor, (m).

Por tanto, tenemos la ecuación (5):

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{2 - 2\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right) + F_1^2 \left[1 - \left(\frac{Y_1}{Y_2}\right)^2\right]}{2 + F_1^2} \quad (5)$$

Al relacionar la energía específica que fue medida y calculada antes del resalto hidráulico y la energía después del mismo, se obtendrá como resultado la eficiencia de este mismo, como se expresa en la ecuación (6):

$$n = \frac{(8F_1^2 - 1)^{\frac{3}{2}} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (6)$$

Y_1 = Tirante conjugado menor, (m).

Y_2 = Tirante conjugado mayor, (m).

n = Eficiencia, (%).

F_1 = Número de Froude, adimensional.

3.2.4. Longitud del resalto

La longitud del resalto es definida como la distancia entre la sección donde inicia su cara frontal y otra que corresponde a su punto de estancamiento (separación del flujo en las direcciones de avance y retroceso). Por otra parte, la longitud del resalto, es la distancia desde la misma cara frontal del inicio de éste, hasta aquella en que se alcanza la máxima altura de la superficie de agua y se estabiliza la distribución de la velocidad.

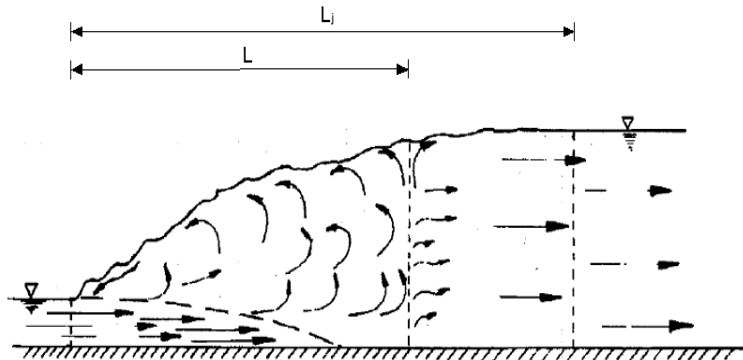


Figura 5: Longitud del resalto hidráulico.

Fuente: Sotelo Ávila, 2002.

Diversos autores han hallado relaciones matemáticas de la longitud del resalto en relación con la profundidad inicial (Y_1) y en función del número de Froude inicial (F_1), la cual es la que mejor define los datos experimentales en general. De acuerdo con (Sotelo Ávila, 2002), se tienen las siguientes ecuaciones:

- Silvester

$$\frac{L}{Y_1} = 9,75(F_1 - 1)^{1,01} \quad (7)$$

- Woyciki

$$\frac{L}{Y_1} = 4,05\sqrt{1 + 8F_1^2} - 12,05 \quad (8)$$

- Smetana y Tizon:

$$\frac{L}{Y_1} = 3\sqrt{1 + 8F_1^2} - 3 \quad (9)$$

- Pavlovsky:

$$\frac{L}{Y_1} = 2,375\sqrt{1 + 8F_1^2} - 4,875 \quad (10)$$

- Ludin:

$$\frac{L}{Y_1} = \left[\frac{13,5F_1}{(6F_1 - 4,5)} \right] \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 3 \right] \quad (11)$$

- Sieñchin:

$$L = 5(Y_2 - Y_1) \quad (12)$$

- Pietrkowsky:

$$\frac{L}{Y_1} = 5,9F_1 \quad (13)$$

Válida para para $5,5 < F_1 < 19,8$

- Safranez:

$$\frac{L}{Y_1} = 6(F_1) \quad (14)$$

Ecuación deducida, para $1,72 < F_1 < 19,1$

- Rajaratnam:

$$\frac{L}{Y_1} = 3(\sqrt{1 + 8F_1^2}) - 1 \quad (15)$$

Ecuación deducida, para $4 < F_1 < 16$

- Sarma y Newnham:

$$\frac{L}{Y_1} = 6,73(F_1 - 1) \quad (16)$$

Ecuación original, para $1,21 < F_1 < 3,79$

- Bertz:

$$\frac{L}{Y_1} = 6,29F_1 - 3,59 \quad (17)$$

Ecuación deducida para $3,3 < F_1 < 15,3$

- Hager, Bremen y Kawagoshi:

$$\frac{L}{Y_1} = 8(F_1 - 1,5) \quad (18)$$

Ecuación deducida para $2,5 < F_1 < 12$

Donde:

L = Longitud del resalto, (m).

Y_1 = Tirante conjugado menor, (m).

F_1 = Número de Froude, adimensional.

3.2.4.1. Modelado

El modelado es el proceso de representación de ideas abstractas, palabras y formas a través del empleo ordenado de texto, imágenes simplificadas, o modelos físicos a escala. Los

ingenieros usan modelos para pensar, visualizar, comunicar, predecir, controlar y entrenar (Eisberg.Lerner., 2010, pág. 29).

La etapa de modelado consiste en ir dando forma a objetos individuales que luego serán usados en la escena creada. (Melissinos, 2010, pág. 65).

3.2.4.2. Clasificación de modelos

Los modelos se clasifican como descriptivos o predictivos:

- **Un modelo descriptivo**

Presenta ideas abstractas, productos o procesos en una forma reconocible. Un ejemplo de un modelo descriptivo es un dibujo de ingeniería o un modelo por computadora 3D de una pieza mecánica.

El dibujo o modelo sirve como medio de comunicación, pero no puede emplearse para pronosticar el comportamiento o desempeño de ideas, productos y procesos.

- **El modelo predictivo**

Es aquel que puede emplearse para comprender y pronosticar el comportamiento o desempeño de ideas, productos y procesos. Un ejemplo de modelo predictivo es el modelo de elemento finito.

Modelado geométrico representa ideas, productos o procesos complejos mediante dibujos o modelos por computadora, que se emplean en lugar de modelos a escala. Los dibujos de refinamiento se crean como esquemas o modelos en 2D y en 3D.

3.3. Modelismo o Simulación

La simulación o modelismo de un sistema es la creación y operación de una representación del sistema que se está diseñando o estudiando. Este modelo puede sujetarse a manipulaciones que serían imposibles de realizar, demasiado costosas o imprácticas (Burbanos S., 2010, pág. 47).

La operación de un modelo puede estudiarse y con ello, inferirse las propiedades concernientes al comportamiento del sistema o subsistema real Simulación 3D es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital, los cuales requieren ciertos tipos de modelos lógicos y matemáticos, que describen el comportamiento de un

elemento de máquina en períodos de tiempo real donde se llevan cálculos complicados del comportamiento de dicho elemento. (Patrick, 2010, pág. 33).

En el campo de la ingeniería hidráulica, esta técnica adquiere una relevancia particular. La modelación o simulación hidráulica se utiliza para recrear y resolver problemas relacionados con estructuras hidráulicas y el flujo en canales. Sin embargo, para resolver los complejos fenómenos físicos que gobiernan estos flujos, como las altas turbulencias y la intensa disipación de energía presentes en el resalto hidráulico, la simulación se apoya en métodos computacionales avanzados.

Debido a que las simulaciones se producen bajo condiciones controladas de laboratorio los modelos hidráulicos tienen múltiples aplicaciones. Tenemos que los modelos hidráulicos, se usan para la solución de problemas relacionados con las estructuras hidráulicas, fenómenos de infiltración o tramos de ríos y recientemente con el transporte de sedimentos. Las principales características de cada uno de estos grupos son indicadas por sus nombres.

Los modelos de estructuras son usados para resolver problemas hidráulicos en conexión con una variedad de estructuras hidráulicas o ciertas partes de ellas como por ejemplo determinar la capacidad hidráulica, reducir las pérdidas de carga en entradas a canales o tuberías, entre otros.

Para abordar estos problemas hidráulicos complejos de manera precisa, especialmente aquellos que involucran fenómenos turbulentos como el resalto hidráulico, los modelos físicos de laboratorio se complementan y, en ocasiones, se reemplazan por métodos computacionales avanzados.

3.4. Dinámica de Fluido Computacional (CFD)

La dinámica de fluido computacional (CFD) puede definirse como el área de la computación científica que estudia métodos computacionales para la simulación de problemas que comprenden fluidos en movimiento, con o sin transferencia de calor, así como sus fenómenos asociados, tales como reacciones química (Sarmiento, 2015).

Es importante resaltar que deben llevarse a cabo algunas suposiciones y aproximaciones numéricas durante el desarrollo de modelos CFD. Además de la rapidez y reducción de costos, en comparación con los procedimientos experimentales, estos también ofrecen un

conjunto de informaciones más completas en la gran mayoría de las aplicaciones de la ingeniería. Por lo general, son proporcionados todos los datos relevantes sobre el flujo en el dominio de interés estudiado. Los métodos experimentales se limitan principalmente a las mediciones de variables en determinados lugares, los cuales deben ser accesibles por el equipo de medición.

Algunos pocos ejemplos de aplicación pueden ser:

- Aerodinámica de aeronaves y vehículos: elevación y arrastre
- Hidrodinámica de los barcos
- Planta de energía: combustión en motores de combustión interna y gas turbinas
- Turbo-maquinaria: flujos dentro de pasajes giratorios, difusores, etc. Ingeniería eléctrica y electrónica: refrigeración de equipos, incluyendo microcircuitos
- Ambiente externo e interno de los edificios: carga de viento y calefacción/ventilación (*Memoria TFG - Adrià Hueso Carro.pdf*, s. f., p. 6).

La dinámica de fluidos computacional abarca la automatización de métodos ingenieriles de diseño para el uso de las soluciones detalladas de las ecuaciones de Navier-Stokes como complemento en la investigación experimental para la naturaleza de flujo. Existen fenómenos complejos como turbulencia, combustión o flujo multifásico donde las ecuaciones exactas no están disponibles o la solución numérica resulta no factible, esto hace necesario la introducción de modelos. Aun si se resuelven estas ecuaciones, la solución puede no ser una representación correcta de la realidad, por lo que es necesario validar los modelos con datos experimentales.

El fundamento de la CFD reside en su capacidad para resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el movimiento de los fluidos. Estas ecuaciones describen principios físicos fundamentales como la conservación de masa, momento y energía. En el corazón de la dinámica de fluidos se encuentran las Ecuaciones de Navier-Stokes.

3.4.1. Ecuación de Navier Stokes

Es una ecuación diferencial parcial que describe el flujo de fluidos incompresibles. Como menciona Hosch, Leonhard Euler formula la ecuación para describir el flujo de fluidos

incompresibles y sin fricción. En 1821 Navier introduce el elemento de fricción agregando la viscosidad a la ecuación. Luego, Stokes toma la ecuación de Navier y la mejora para casos de flujos bidimensionales simples (*Las Ecuaciones de Navier-Stokes – Ingeniería Básica*, 2023).

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 (19):

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} \quad (19)$$

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 (20):

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (20)$$

Donde:

u = Vector de velocidad del fluido.

P = Presión del fluido.

ρ = Densidad del fluido.

ν = Viscosidad cinemática.

∇^2 = Operador laplaciano.

La resolución de las Ecuaciones de Navier-Stokes es uno de los problemas del milenio, son tan importantes porque su resolución implicaría un conocimiento absoluto de cómo un fluido se va a mover partiendo de unas condiciones iniciales y un gran uso que se le podría dar es el de por ejemplo dar previsiones meteorológicas exactas (*Las Ecuaciones de Navier-Stokes – Ingeniería Básica*, 2023).

Es importante destacar que el fenómeno real del resalto hidráulico en un canal abierto es un flujo bifásico, donde interactúan dos fluidos inmiscibles: agua (líquido) y aire (gas). Sin embargo, muchos paquetes de software CFD, incluido el utilizado en este estudio, simplifican el problema modelándolo como un flujo monofásico con una superficie libre. Como se detalla en las conclusiones, esta idealización requiere la implementación de metodologías indirectas para la estimación de los tirantes, pero es una práctica común y aceptada para este tipo de análisis.

En este proyecto, la plataforma de software seleccionada para realizar el modelado geométrico y la posterior simulación CFD es SolidWorks, a través de su módulo integrado SolidWorks Flow Simulation.

3.5. Solidworks

Es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico desarrollado en la actualidad por Solidworks Corp. para el sistema operativo Microsoft Windows. Es un modelador de sólidos paramétrico (Eisberg.Lerner., 2010, pág. 67).

La empresa Solidworks Corp. fue fundada en 1993 por Jon Hirschtick con su sede en Concord, Massachusetts y lanzó su primer producto al mercado, Solidworks 95, en 1995. En 1997 Dassault Systèmes, mejor conocida por su software CAD CATIA, adquirió la compañía. Actualmente posee el 100% de sus acciones y es liderada por Jeff Ray.

El programa permite modelar piezas 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 trasvasar 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 (Melissinos, 2010, pág. 142).

El software de diseño en 3D SolidWorks, ayuda a diseñar mejores productos con mayor rapidez. Cuando existen buenas ideas para un producto, dispondrá de las herramientas que precisa para diseñarlo en menos tiempo y a un menor coste, esto al momento de tratarse de un realizar un diseño o una réplica.

"2D" es sinónimo de "dos dimensiones". Las formas 2D incluyen cuadrados y círculos. "3D" significa tridimensional. Las formas 3D tienen profundidad, e incluyen cubos y esferas. Estos términos son importantes en el arte y el diseño (en la animación por computadora o el cine, por ejemplo). Los gráficos, diagramas y modelos pueden ser 2D o 3D. Estos términos también se usan metafóricamente para hablar de la profundidad o complejidad de una pieza de trabajo (Melissinos, 2010, pág. 88).

3.5.1. Solidworks Flow Simulation

Solidworks Flow Simulation es un nuevo tipo de software de análisis de Dinámica de Fluidos Computacional, denominado CFD concurrente, totalmente integrado en el entorno de diseño mecánico para todas las aplicaciones de ingeniería generales. Todo el software de CFD incluye una representación de las ecuaciones de Navier-Stokes, modelos de turbulencia y modelos de fenómenos físicos. Desde principios de los años ochenta, la complejidad de los códigos de CFD ha ido en aumento, en especial en el modelado físico, pero con un menor énfasis en la gestión de la complejidad geométrica (*Base numérica de CFD integrada en CAD*, s. f., p. 2).

El enfoque de Solidworks Flow Simulation se basa en dos principios fundamentales:

- Uso directo de datos nativos de CAD como origen de la información de la geometría.

- Combinación de modelado de CFD en 3D completo, con métodos de ingeniería más sencillos en los casos en los que la resolución de la malla es insuficiente para la simulación completa en 3D.

La tecnología de Solidworks Flow Simulation que funciona en el sistema de CAD, Solidworks, incorpora una serie de tecnologías:

- Gestión de datos de CAD.
- Generación de mallado.
- Solvers de CFD.
- Tecnologías de modelado de ingeniería.
- Procesado de resultados.

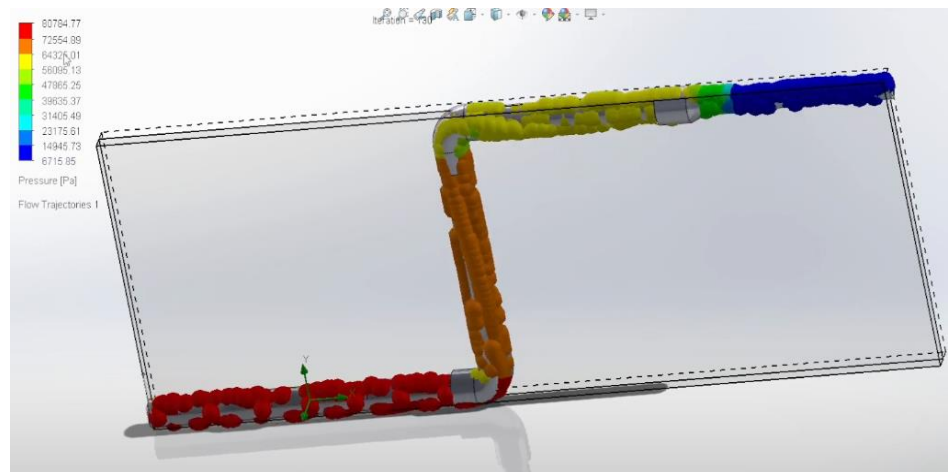


Figura 6: Visualización de la entrada y salida de presión en la tubería.

Fuente: Solidworks Flow Simulation, 2022.

CAPÍTULO IV: APLICACIÓN PRÁCTICA

4.1. ENSAYO EXPERIMENTAL

4.1.1. Características de Canal Rehbock instalado en UAJMS

El canal Rehbock, que es un canal de fondo liso horizontal de sección rectangular con escurrimiento de agua a superficie libre. Está compuesto por una estructura metálica y paredes de cristal que permiten visualizar el fenómeno.

Sus medidas aproximadas son de 0,60 m de ancho por 0,60 m de alto y 15,00 m de longitud.

Tabla 2: Características del canal Rehbock

CARACTERÍSTICAS DEL CANAL		
Forma del canal	rectangular	-
Ancho de solera (b)	0,60	m

Fuente: Elaboración propia

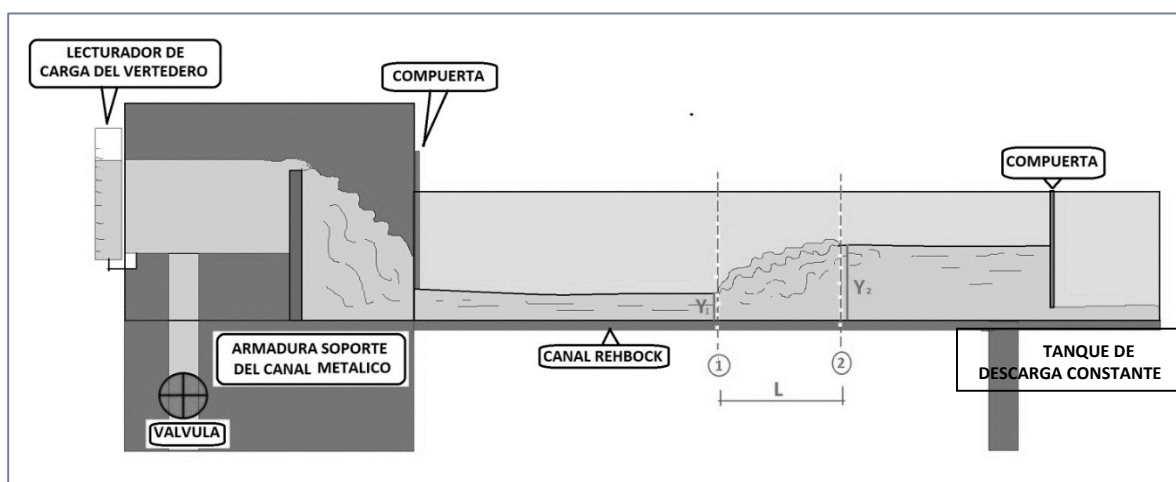


Figura 7: Esquema de canal Rehbock.

Fuente: Guía de práctica de laboratorio (UAJMS).

Vertedero: Se encuentra instalado a la entrada del canal. Con la ecuación calibrada del vertedero podemos obtener el caudal que circula:

$$Q = 1,0024 \times H^{1,43} \quad (21)$$

Donde:

$Q = \text{Caudal}, (m^3/s).$

$H = \text{altura de carga de vertedero, (m)}.$

Tanque de Carga Constante: El tanque de carga constante es el que suministra el agua al canal, y nos garantiza la estabilidad del flujo durante las mediciones.

Compuerta: La compuerta es deslizante rectangular, colocada a la entrada del canal, con la que se jugara con distintas alturas que nos asegure la formación del resalto hidráulico.

4.2. Instrumentos de medición

- Regla graduada.
- Flexómetro.
- Cinta métrica.

4.2.1. Desarrollo de la práctica de laboratorio “Resalto hidráulico”

Se suministra de agua al canal a través del tanque de carga constante y se estabiliza el mismo con ayuda de las válvulas reguladoras para así garantizar que el flujo del canal cumpla con las condiciones necesarias para la generación del salto hidráulico. Una vez que el agua comienza a correr en el canal se realiza la lectura inicial de la mira en la cresta del vertedor (L_i) que será necesario este dato para el cálculo del caudal con la ayuda de la ecuación calibrada del vertedero.

Ajustamos la abertura de la compuerta deslizante a la entrada del canal, hasta que nos asegure la formación del resalto hidráulico, en este caso se realizan 3 variaciones de abertura. Se toma el dato de la altura de compuerta al fondo del canal, esta altura es importante porque ayuda a posicionar al resalto en distintas partes del canal.

Posteriormente, como ya tenemos generado el resalto, realizamos las medidas de los tirantes conjugados (Y_1) ubicado pasando la compuerta en la parte inicial del canal, (Y_2) pasando las burbujas después de la formación del resalto y la longitud del resalto entre estas (L), como dato final tomamos la lectura final (L_f) con la mira mecánica, aguas arriba del vertedor.

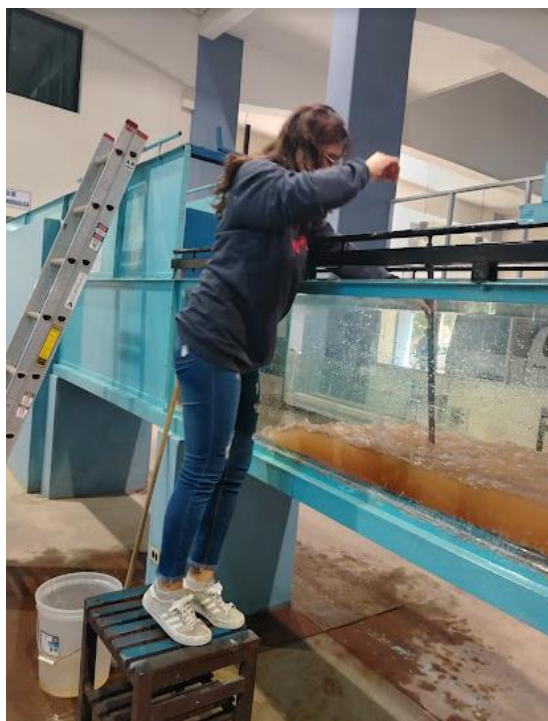


Figura 8: Medición de tirantes conjugados.

Fuente: Elaboración propia.

Todos los datos obtenidos de la práctica podemos observarlos en la tabla (3), la cual se realizó conjunto con los estudiantes de la materia “Hidráulica II, laboratorio”:

Tabla 3: Registro de datos tomados en la práctica.

Datos			1	2	3
Lectura inicial de la mira	Li	(m)	0,038	0,038	0,038
Lectura final de la mira	Lf	(m)	0,10	0,148	0,19
Tirante inicial	Y_1	(m)	0,027	0,043	0,066
Tirante final	Y_2	(m)	0,13	0,17	0,204
Altura de carga	H	(m)	0,062	0,11	0,152
Altura compuerta	h	(m)	0,03	0,05	0,1
Longitud del salto	L	(m)	2,92	3,07	3,2
Base del canal	b	(m)	0,6	0,6	0,6

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Resultados de la práctica

Los resultados podemos observarlos en la tabla (4):

Tabla 4:Tabla de resultados de la práctica

VARIABLES	1	2	3	UM
Caudal (Q)	0,019	0,043	0,068	m ³ / s
Área mojada en 1 (A ₁)	0,016	0,026	0,040	m ²
Área mojada en 2 (A ₂)	0,078	0,102	0,122	m ²
Velocidad en 1 (V ₁)	1,161	1,654	1,712	m / s
Carga velocidad en 1	0,069	0,139	0,149	m
Tirante conjugado 1 (Y ₁)	0,027	0,043	0,066	m
Número de Froude en 1 (F ₁)	2,255	2,547	2,127	-
Velocidad en 2 (V ₂)	0,241	0,418	0,554	m / s
Carga velocidad 2	0,003	0,009	0,016	m
Tirante conjugado 2 (Y ₂)	0,130	0,170	0,204	m
Número de Froude 2 (F ₂)	0,213	0,324	0,391	-
Y ₂ / Y ₁ (experimental)	4,815	3,953	3,091	-
Y ₁ / Y ₂ (experimental)	0,208	0,253	0,324	-
Y ₂ / Y ₁ (Ec.1)	2,728	3,137	2,549	-
Y ₁ / Y ₂ (Ec.1)	0,084	0,178	0,246	-
Pérdidas en el salto (Ec. 4) ΔE	0,078	0,070	0,049	m
Eficiencia en el salto (Ec. 6) η	79,320	76,320	80,330	%
Longitud del resalto (Ec. 12) (L)	0,515	0,635	0,690	m
CLASIFICACIÓN DE RESALTO	DÉBIL	OSCILANTE	DÉBIL	

Fuente: Elaboración propia

4.3. MODELACIÓN 3D EN SOLIDWORKS

Para las modelaciones de estructuras y cualquier figura geométrica compuesta en Solidworks existe una herramienta llamada el modelado por pieza, que nos permite realizar el diseño de los planos en 2D y 3D, que mediante la herramienta ensamblaje permite unir dos o más piezas y fusionarlas entre sí, para crear una sola pieza que muestre todos los componentes unidos.

Para el modelamiento de esta investigación se analizó este formato del modelamiento por piezas, dividiendo en 3 partes, el vertedero al inicio (Pieza 1), la compuerta a la entrada y

salida del canal (Pieza 2) y el canal (Pieza 3). Se vio que esto era lo más conveniente para que se pueda unir correctamente las piezas y no se tenga problemas de geometría o incompatibilidades en el conjunto de piezas (Ensamble).

4.3.1. Croquis en 3D

Abrimos un nuevo proyecto, donde ingresaremos por pieza (Figura 9) y pondremos las unidades a centímetro, gramo, segundo (CGS) para ingresar todas las medidas en estas unidades.

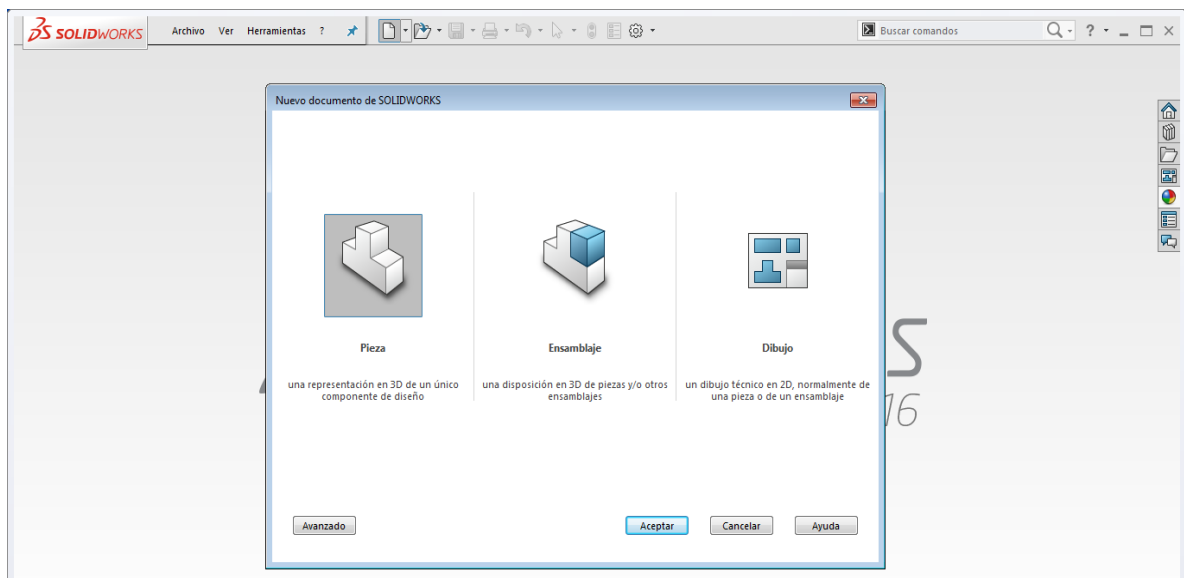


Figura 9: Pantalla inicial de trabajo.

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

Elegimos un plano para empezar el croquis, estos planos pueden ser:

- Alzado.
- Lateral.
- Planta.

En nuestro caso elegiremos el plano alzado (Figura 10), donde este plano representa una vista frontal de la pieza o ensamblaje. Se realizó la elección de este porque se acomoda mejor a nuestra perspectiva para introducir las medidas de la pieza, esto nos ayudara en pasos posteriores a hacer un ensamblaje más ordenado.

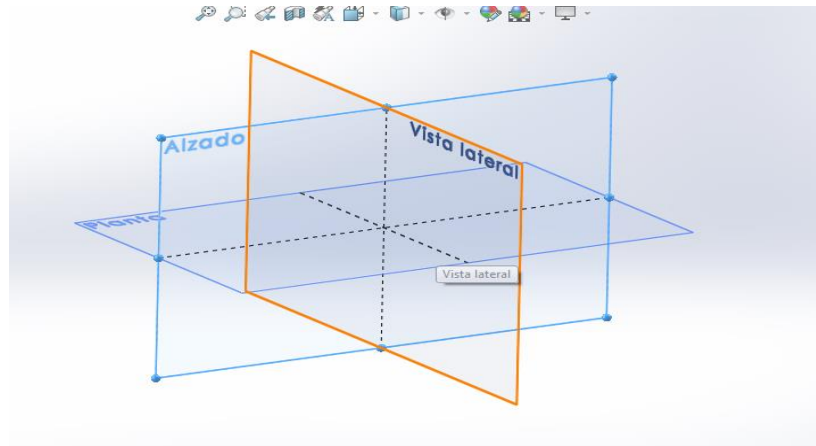


Figura 10: Vista de plano alzado..

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

Mediante distintas líneas y rectángulos, creamos el croquizado del canal como se muestra en la figura (11), podemos observar que el canal mide 1.500cm, donde cada 200cm encontramos un cambio de material hierro inoxidable y vidrio.

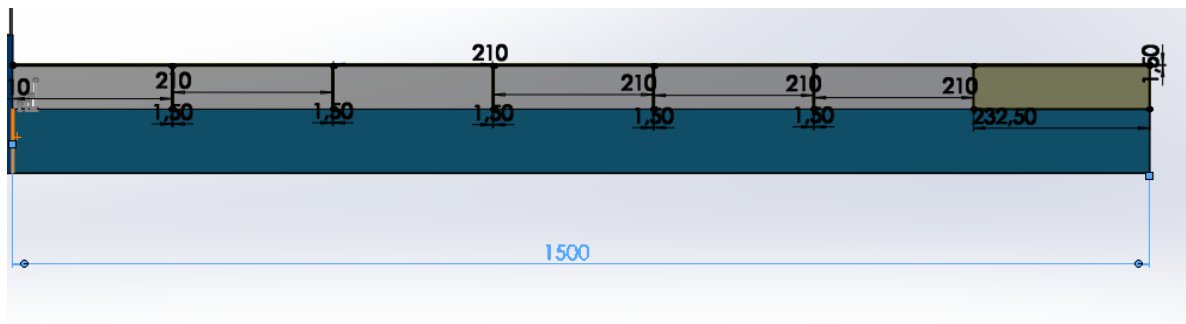


Figura 11: Croquizado del canal

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

4.3.2. Extruir saliente/base

Ahora que el rectángulo está definido mediante cotas, se procede a hacer uso de la función “Extruir saliente/base”. Este paso se puede observar en la figura (12) donde damos como una profundidad (sentido) desde el plano medio de 60cm que este es el ancho del canal o la solera.

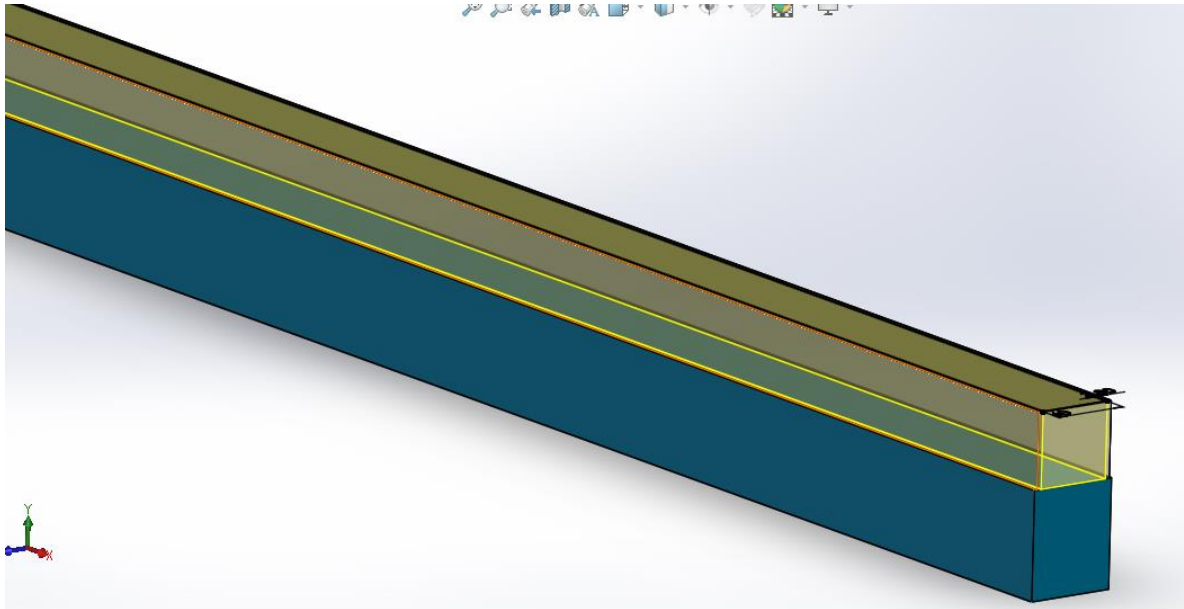


Figura 12: Extruir saliente/base del canal

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

4.3.3. Extruir corte

Una vez que tenemos la pieza como un sólido en 3D, necesitamos vaciar la pieza mediante la función extruir corte (ver figura 13) que esto nos va a generar el canal, para esto necesitamos ingresar los detalles geométricos que se midieron en el canal Rehbock, medidas internas, el material de las caras para dar las condiciones más reales al modelo físico.

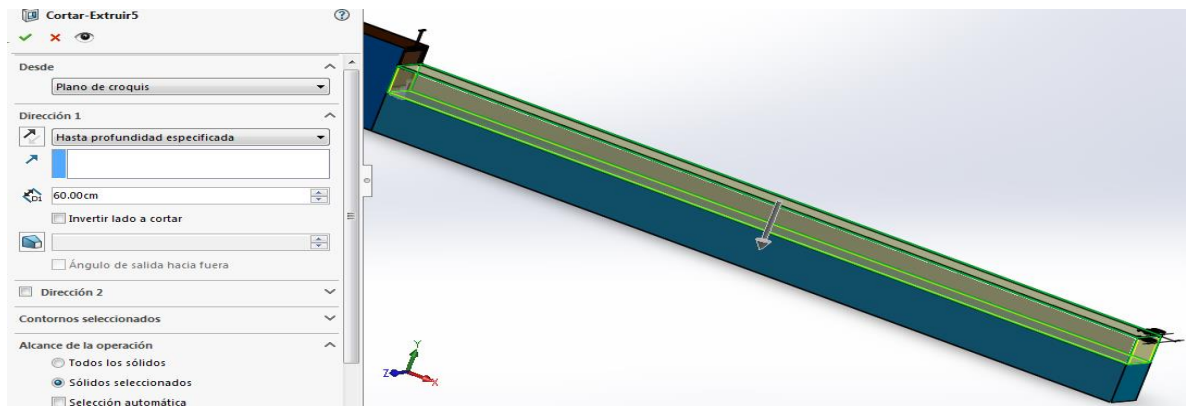


Figura 13: Extruir corte del canal.

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

Dados todos los detalles y afinamientos necesarios, construimos los apoyos del canal que lo hacemos con la función “Extruir saliente/base” un apoyo total por todo el canal, y luego

“Extruir corte” dando la distancia y el sentido en que debe seguir, en este caso en particular los apoyos tienen una altura de 86cm y ancho de 17cm, visto desde el plano lateral.

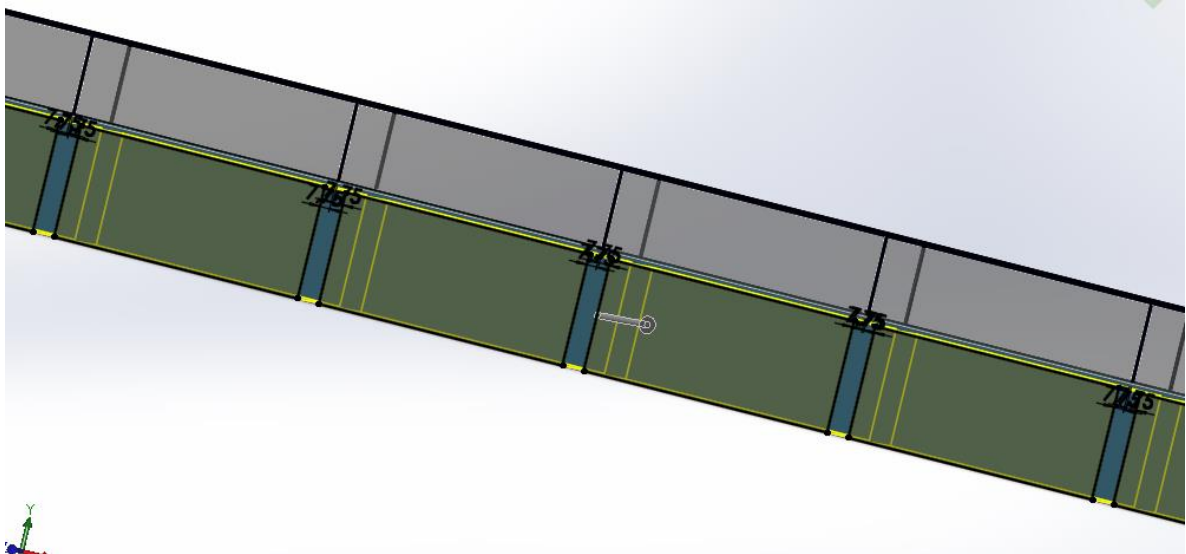


Figura 14: Construcción de los apoyos del canal

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

Finalizando todos los componentes requeridos en esta pieza y detallando cada material, colocando la apariencia y color obtenemos como pieza 1 el canal, mostrado en la figura (15).

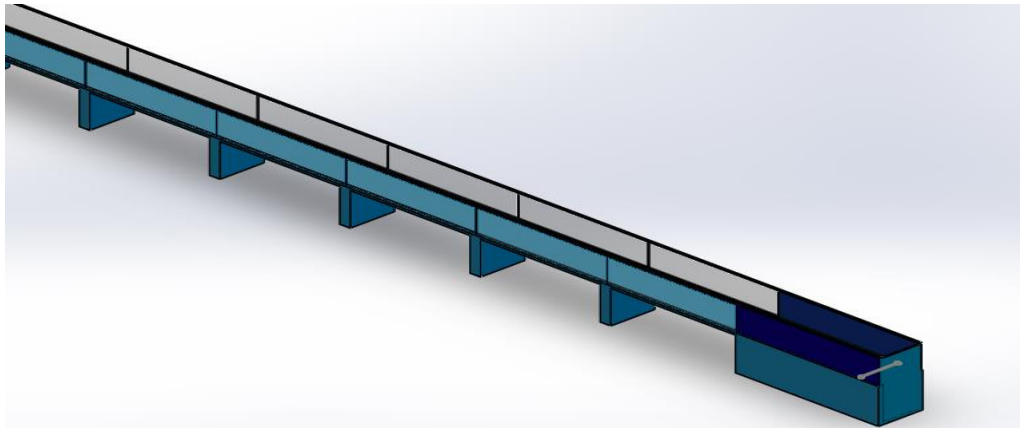


Figura 15: Canal modelado.

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

4.3.4. Vertedero

Realizamos el croquizado del vertedero de la misma forma que hicimos el canal, en el archivo pieza y colocando todos los detalles geométricos de este, como se muestra en la

figura (16), donde tendremos una carga constante de caudal, con la ayuda de la ecuación del vertedor.

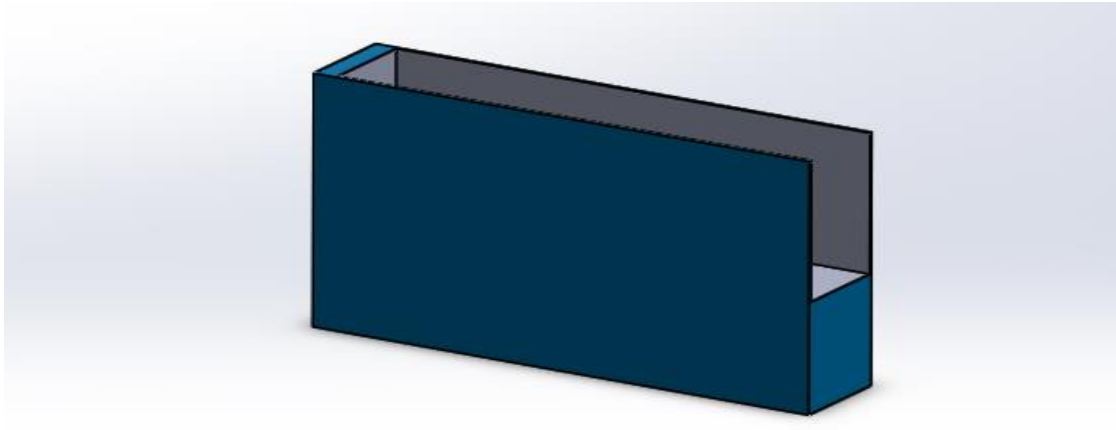


Figura 16: Croquis del vertedero.

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

4.3.5. Compuerta deslizante

En el caso de la compuerta deslizante, se realizó la especificación de su geometría y una función llamada “hélice”, que mediante esta función podemos generar las revoluciones necesarias para que la compuerta se desplace para mover a las diferentes aberturas necesarias.

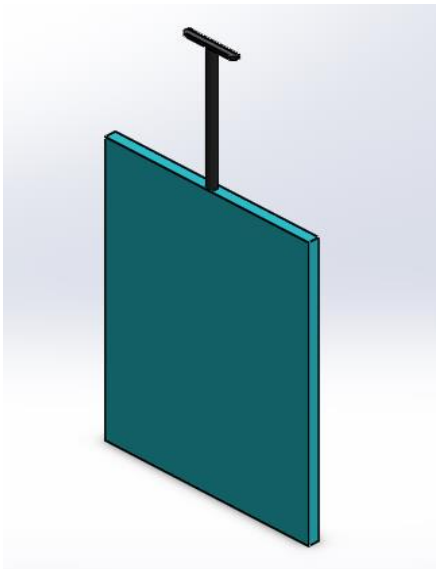


Figura 17: Detalles de la compuerta deslizante

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

4.3.6. Marco fijo de compuerta

Esta estructura es importante para nuestro ensamble y simulación, porque es donde tenemos el orificio por donde se va a deslizar la compuerta y nos va ayudar a tener un rango de movimiento determinado, que para nuestros datos será la abertura de la compuerta deslizante.



Figura 18: Marco fijo para compuerta.

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

4.4. ENSAMBLAJE DE PIEZAS

Una vez realizadas todas las piezas, abrimos un ensamble, donde nuestro soporte de la compuerta será la primera pieza fija que ingresaremos, aquí es importante que los planos de todas las piezas sean compatibles, de este modo es más fácil realizar las “relaciones de posición”. Al hacer coincidir de manera correcta las caras y aristas podemos observar el canal ensamblado y definido (figura 19), desde el ensamble podemos empezar con nuestra simulación.

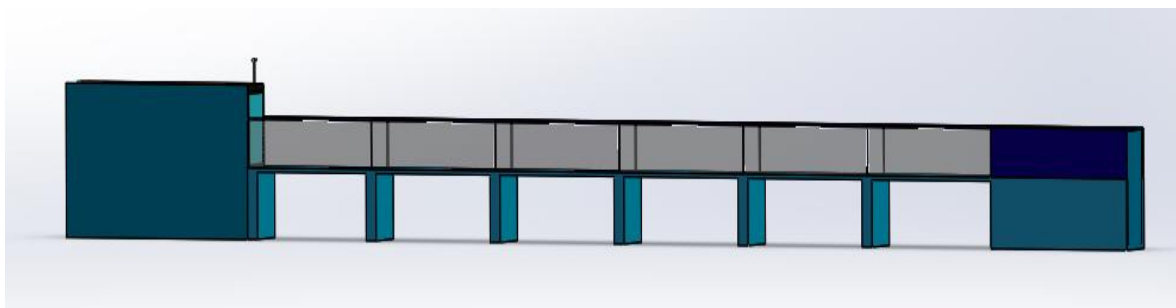


Figura 19: Ensamblaje de canal Rehbock.

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

4.5. SIMULACIÓN EN SOLIDWORKS

Para la simulación, se utilizó el complemento de “Solidworks Flow Simulation”, que se encuentra disponible en el software, que está dedicado para las simulaciones de flujos y que se amoldaba a la investigación que se ha realizado, llevando un proceso para realizar la simulación.

4.5.1. Nuevo proyecto Wizard

Para la simulación con Flow Simulation se inicia con la creación de un nuevo proyecto con Wizard; primero observaremos una pantalla de ventanas múltiples, donde primero debemos nombrar el proyecto (ver figura 19) y posteriormente vamos a determinar y seleccionar los parámetros que se van a considerar para la simulación.

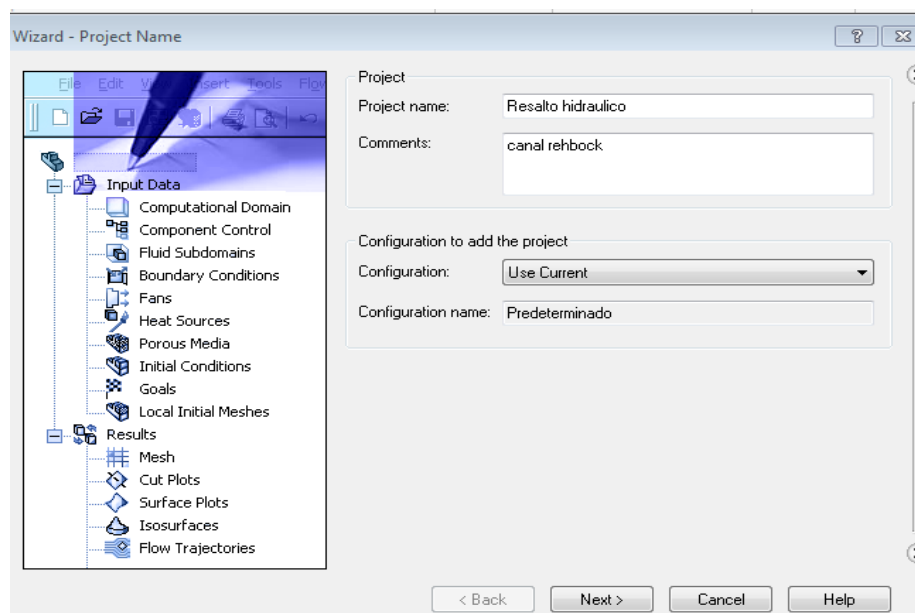


Figura 20: creación de Wizard.

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

Una de las condiciones es que el flujo será interno (figura 20), porque el volumen se encuentra confinado dentro de un canal, también tomaremos en cuenta la gravedad y el tiempo, que al ser esta una superficie libre y abierta, son dos condiciones iniciales que se deben tomar en cuenta.

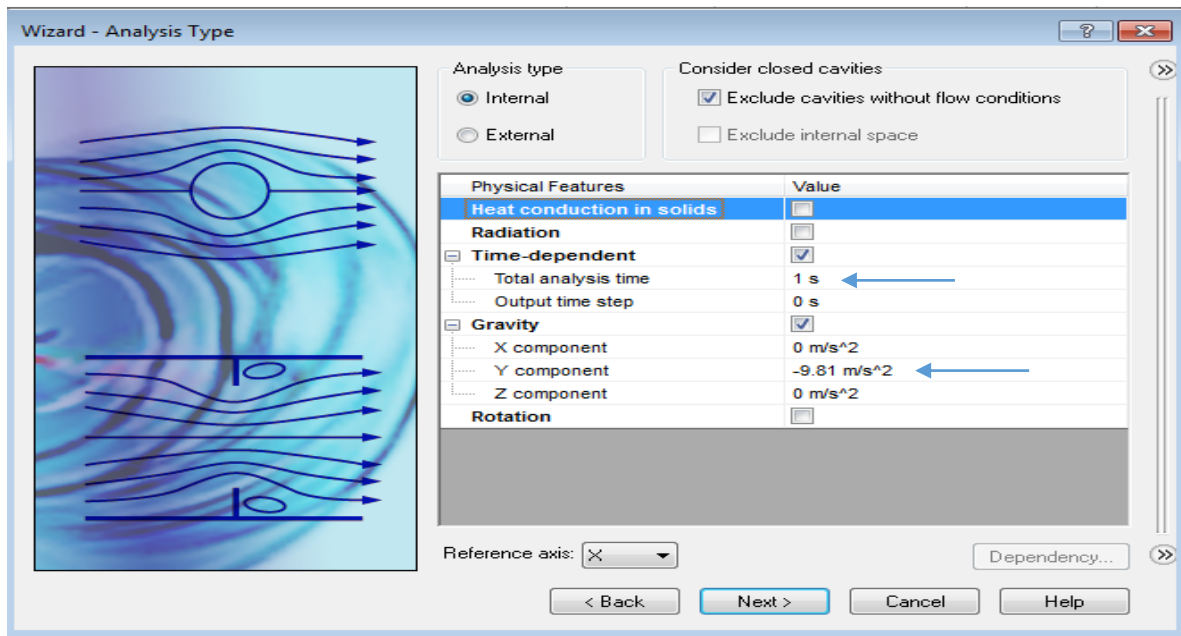


Figura 21: Tipo de análisis a realizar.

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

Seleccionamos el sistema de unidades, SI (Sistema Internacional), para esto todo el ensamble debe estar en MKS (metro, kilogramo, segundo).

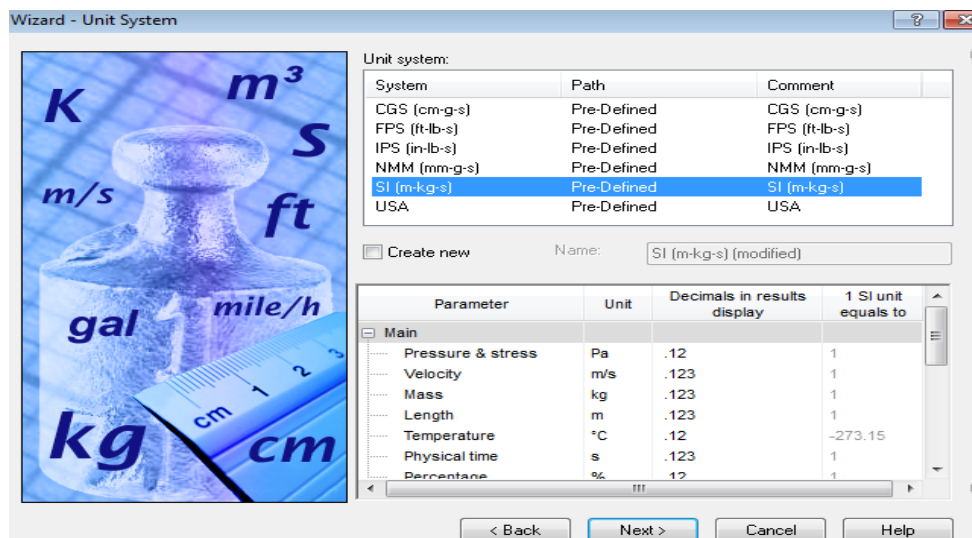


Figura 22: Elección sistema de unidades.

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

Ahora definimos fluido a estudiar en el canal, para nuestro análisis será agua, pero también debemos agregar aire (Air) como fluido secundario para la zona no ocupada por agua; otra

característica importante es seleccionar que el tipo de flujo (Flow type) es “Turbulent only”, con esta opción se asume que el flujo es turbulento desde el inicio.

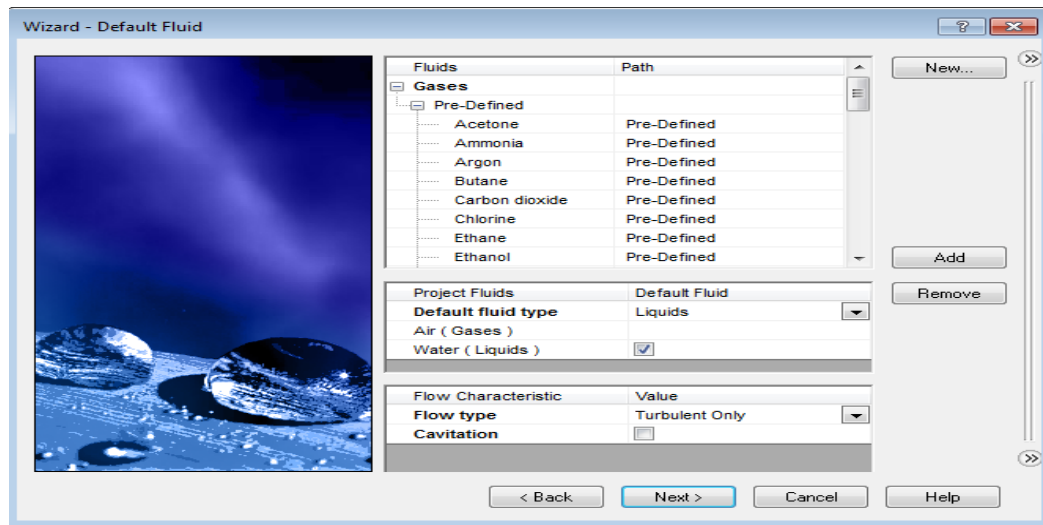


Figura 23: Características del fluido.

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

4.5.2. Dominio computacional

Al concluir con los datos de Wizard, genera automáticamente un cubo que encierra la pieza, esto lo conocemos como el dominio computacional, donde el programa realizara los cálculos, por lo cual a mayor sea el tamaño, aumentará significativamente el proceso de cálculo del programa (ver figura 24-25), 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.

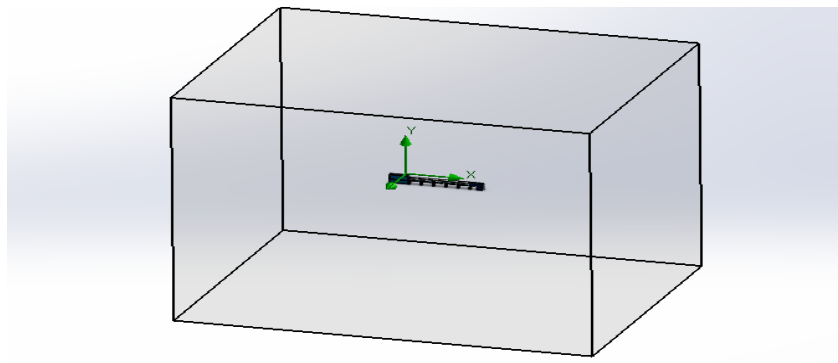


Figura 24: Campo computacional.

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

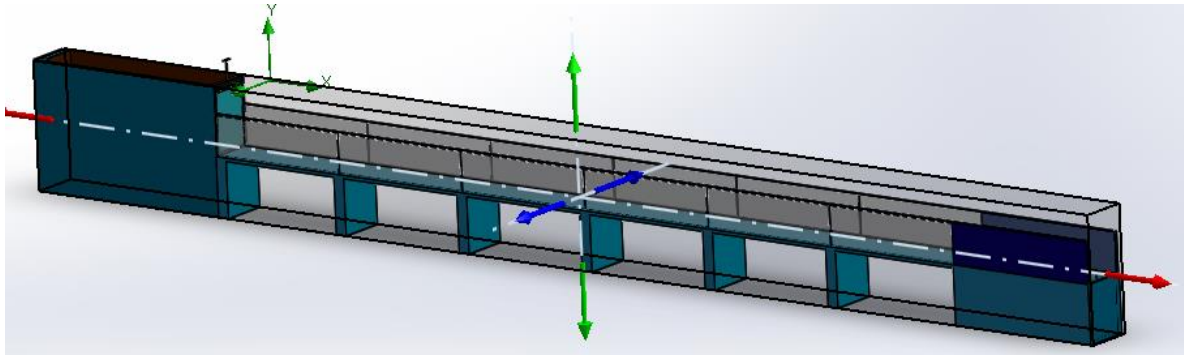


Figura 25: Campo computacional ajustado.

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

Analizamos la geometría del canal mediante “Check geometry”, donde observamos que nuestro ensamble esta satisfactoriamente unido, pero contamos con un error, que no está totalmente cerrado (ver figura 26). Esto se debe a que al trabajar un flujo interno el programa necesita que la estructura este hermética, por este motivo acudiremos al uso de tapas (Lids) en las áreas abiertas del canal.

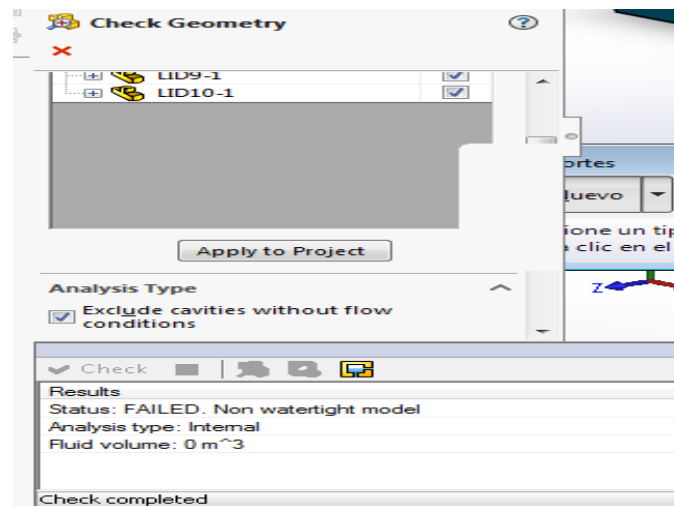


Figura 26: Revisión de errores geométricos

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

Para fines de estudio, se definen 3 tapas en todo el ensamble:

1. En la parte superior del vertedero.
2. En toda la longitud del canal.

3. En la salida del canal, donde se encuentra el tanque de carga constante al final del canal, en esta tapa, se decide hacer una pared delgada, porque la geometría del canal no nos permite añadir una Lid desde “Create Lids”. Esto no influye en el cálculo, solo una continuidad de pared visualmente como se muestra en la figura 26.

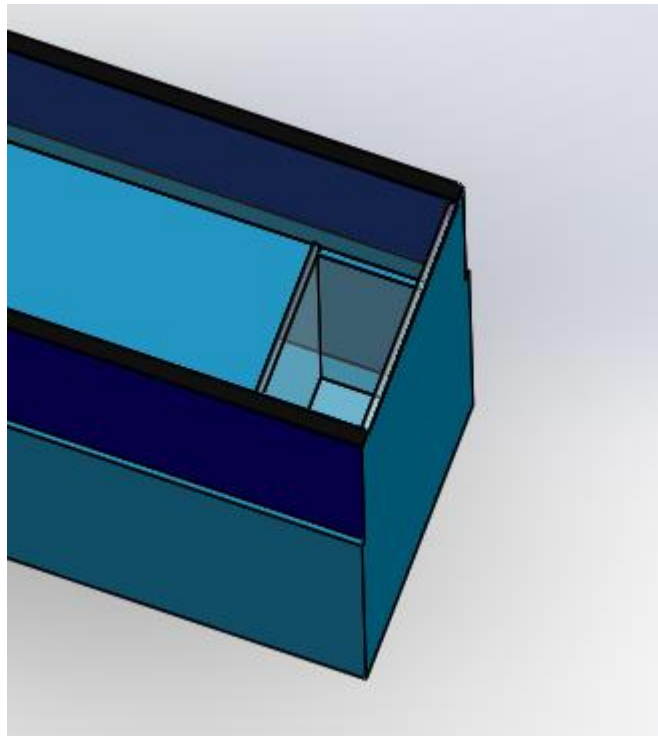


Figura 27: Pared delgada como tapa.

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

Después de definir las tapas en las partes abiertas, observamos que la geometría de esta correctamente cerrada y el programa no detecta errores. Esto significa que:

- El dominio de flujo está bien definido y todas las caras relevantes están incluidas.
- La simulación puede proceder sin problemas geométricos.

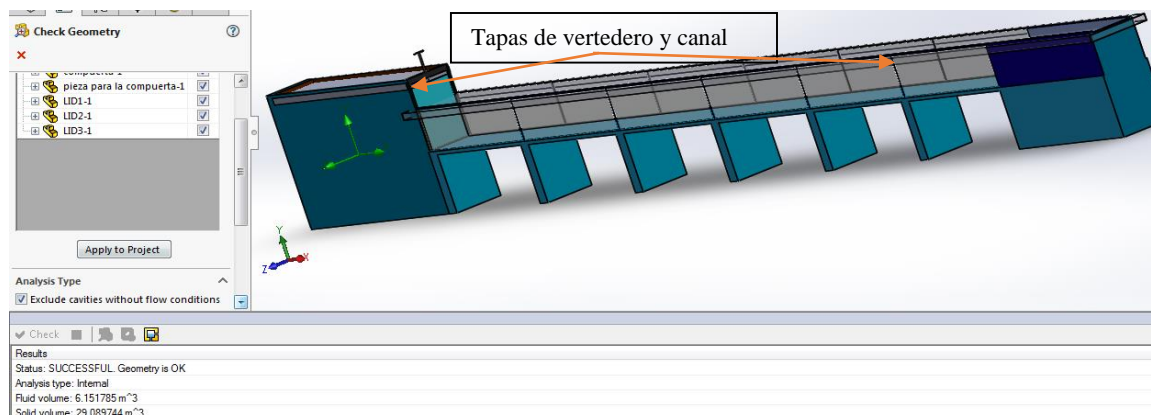


Figura 28: Validación de geometría para simulación.

Fuente: Elaboración propia, con Solidworks.

4.6. CONDICIONES DE CONTORNO

En una simulación computacional, las condiciones de contorno (Boundary Conditions) permiten definir como interactúa el sistema con su entorno, estas condiciones son importantes para obtener resultados coherentes y aproximados con la realidad.

4.6.1. Boundary Conditions

Para nuestro estudio, la condición inicial tendremos que hacer varias veces, en base al caudal que simulemos:

- Diferentes caudales, para diferentes aberturas de compuerta.

En la tabla (5) encontraremos los diferentes caudales y aberturas de compuertas que se realizaron:

Tabla 5: Datos para condiciones iniciales.

Práctica	Caudal(m^3/s)	Abertura de compuerta(m)	Caudalímetro (m^3/s)
1	0,019	0,03	0,0213
	0,043	0,05	0,048
	0,068	0,1	0,07

Fuente: Elaboración propia.

Como primer caudal ingresamos $0,019 \text{ m}^3/\text{s}$, este caudal se colocará en la cara del vertedor en dirección a “X”, con una altura de compuerta de 3cm. La abertura de compuerta podemos

modificarla en la relación de distancia con el plano medio de la base de mi canal, es decir que si mi altura es de 3cm debo ingresar una altura de 1,5cm.

Posteriormente realizaremos un análisis de cálculos (Run) por caudal, como se hizo en la práctica.

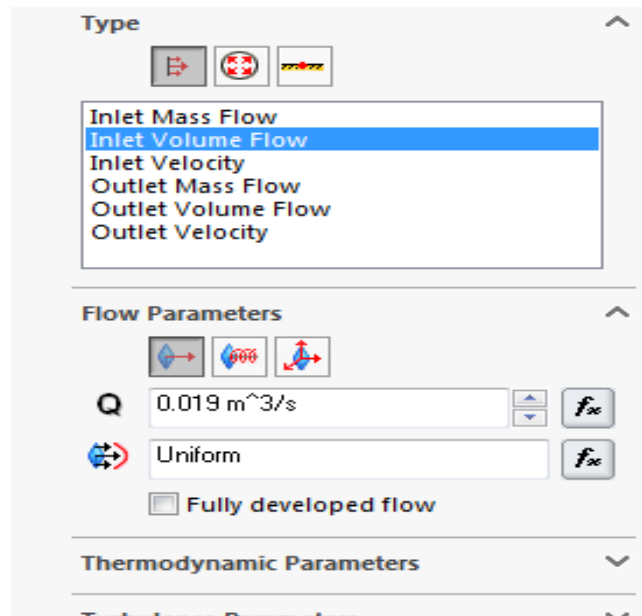


Figura 29: Condición inicial.

Fuente: Elaboración propia.

4.6.2. Pressure opening

Al ser un canal abierto debemos tomar en cuenta los vacíos, para esto elegimos como condición la presión ambiental (Environmental Pressure), la utilizamos considerando como una presión no medida, para mantener la conservación de la energía. Por fines prácticos utilizaremos la que se encuentra definida en el programa.

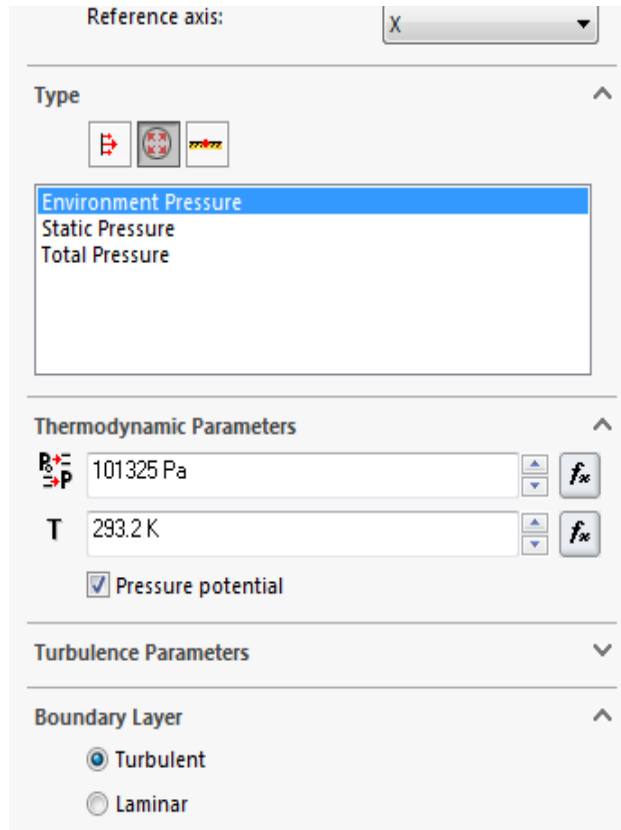


Figura 30: Pressure Opening.

Fuente: Elaboración propia.

4.6.3. Walls

Se definen las paredes que conforman el canal Rehbock, para esto se cuenta con dos opciones:

- Paredes ideales (Ideal Walls), donde no afecta en la simulación los materiales que estan en las paredes, es decir consideramos que la rugosidad del los materiales es despreciable y no tiene una variación significativa en los resultados.
- Paredes reales (Real Walls), donde podemos tomar en cuenta la rugosidad de las paredes que forman parte del canal a analizar, haciendo que el modelo sea lo mas fiel a canal fisico.

Para saber la diferencia de esta característica como condicion de borde, se realizaran diferentes simulaciones para ambos casos, porque el canal real si considera estas rugosidades

y esta toma de decision se vera reflejada en los resultados, por lo que a partir de esta seccion, la simulacion tendemos en el analisis de resultados dos comparativas, la primera para “Ideal Walls Vs. Datos Experimentales” y la segunda simulacion para “Real Walls Vs. Datos Experimentales”.

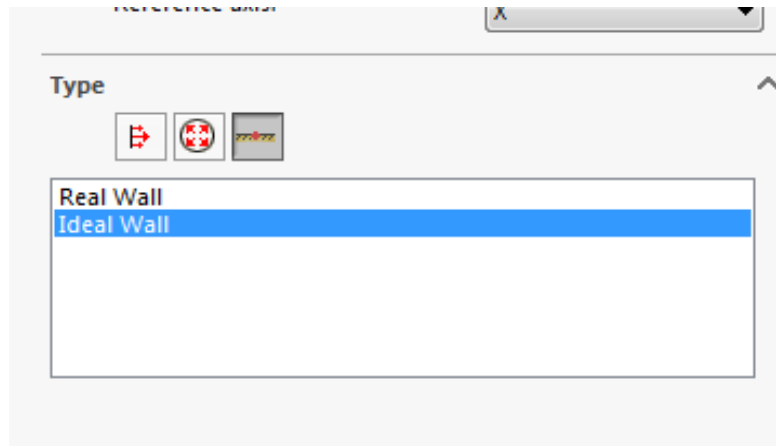


Figura 31: Tipo de paredes del canal.

Fuente: Elaboración propia.

4.6.4. Goals

En cualquier simulación CFD, la selección adecuada de "Goals" (metas u objetivos) en Flow Simulation es importante para garantizar que los resultados sean precisos, relevantes y útiles para validar el modelo.

En nuestro caso elegimos “Global Goals”, donde las metas globales nos permiten observar parámetros físicos en todo el dominio computacional, y “Surface Goals” o meta de superficie, con la que podemos observar volúmenes o velocidades en lugares específicos, como en nuestro caso antes y después de la compuerta donde observaremos el flujo supercrítico.

4.6.5. Run

Una vez determinados todos nuestros objetivos, procedemos a hacer correr (Run) la simulación, el dominio computacional debe ser solo de los lugares donde nos interesa el estudio, para que el programa no necesite hacer iteraciones por demás, esto nos optimiza tiempo y memoria. En nuestro análisis observamos que se realizaron 115 iteraciones en un tiempo aproximado de 18 minutos (ver figura 32)

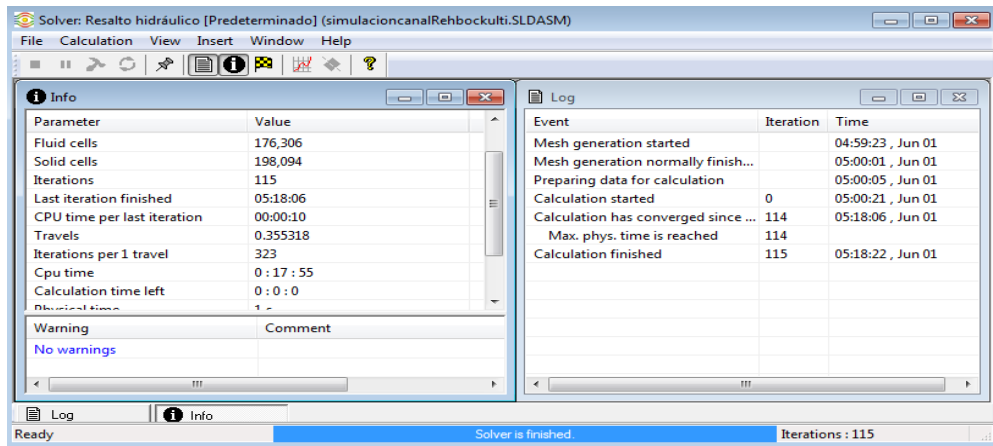


Figura 32: Iteración Flow Simulation (caudal 1).

Fuente: Elaboración propia.

4.6.6. Malla.

La malla es el conjunto de celdas y nodos que se unen a lo largo de todo el dominio en el que se produce el flujo, estas mallas son las que utiliza la calculadora del CFD para resolver las ecuaciones. Como llama inicial usaremos la malla automática con las configuraciones del propio programa (ver figura 33), esto ayudara a que sea más rápido el cálculo del solve, se modificara en las zonas que se quieran hacer un refinamiento para observar más detalladamente en los puntos críticos (al inicio y final del resalto).

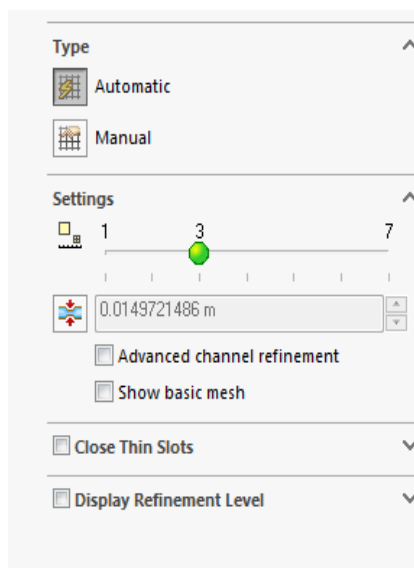


Figura 33: Refinamiento del mallado.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES CFD

5.1.1. Simulación con “Ideal Walls”

Dado que las paredes del canal son de vidrio grueso, un material con rugosidad superficial despreciable y no hay una transferencia de calor que se tenga que considerar; se seleccionó la condición de “Ideal Walls” en Flow Simulation, porque esta elección nos permite optimizar el tiempo de simulación computacional, sin comprometer la precisión de los resultados globales.

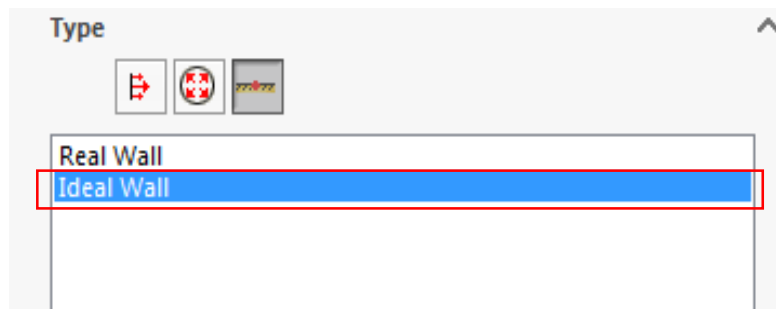


Figura 34: Elección de paredes para Ideal Walls.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta configuración, iniciamos con la simulación para los diferentes caudales.

Como se había dicho anteriormente para la primera simulación se ingresa con el dato de caudal obtenido en la práctica, dado que se hizo la medida de este caudal con Caudalímetro y mediante la ecuación calibrada del vertedero, tomaremos como inicial el caudal de $0,019\text{m}^3/\text{s}$, apegándonos como condición de entrada al caudal que calculan los estudiantes.

Observamos la trayectoria del flujo dando como referencia la cara interna tanto del canal como del vertedor, que es por donde circula el agua. Observamos que las velocidades más altas se presentan antes e inmediatamente a la salida de la compuerta, lo que significa que el agua viene de un flujo turbulento como se observa en la figura 35.

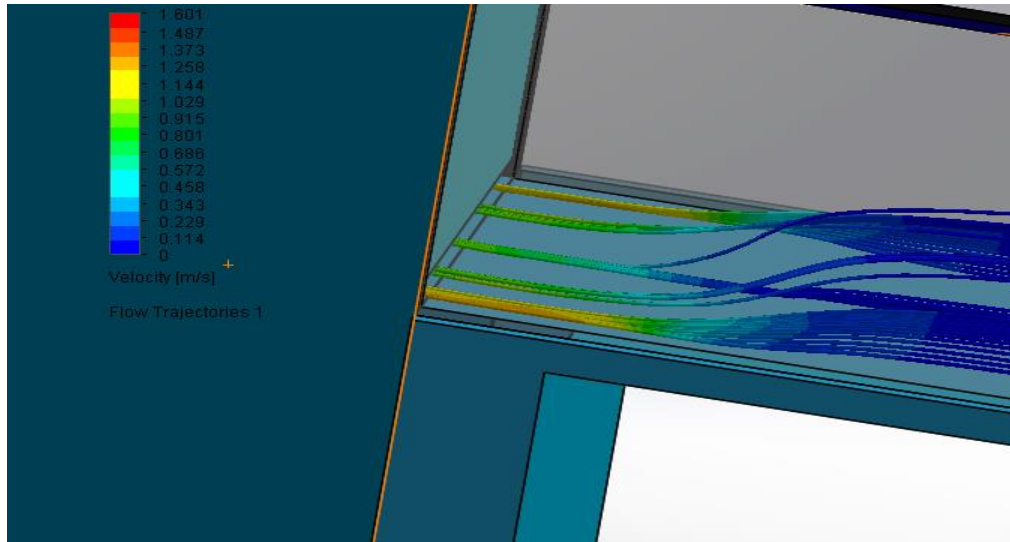


Figura 35: Velocidad a la salida de la compuerta.

Fuente: Elaboración propia.

Como metas complementarias para nuestro análisis necesitamos definir una meta antes de la compuerta deslizante, para ver cómo se está comportando el flujo. Se eligió como cara para este control el fondo del vertedor, porque esta es una cara bien definida en el modelado.

Se refino la malla para los puntos críticos, esto significa que el procesamiento de resultados será un poco más tedioso, pero los resultados pondrán ser más exactos.

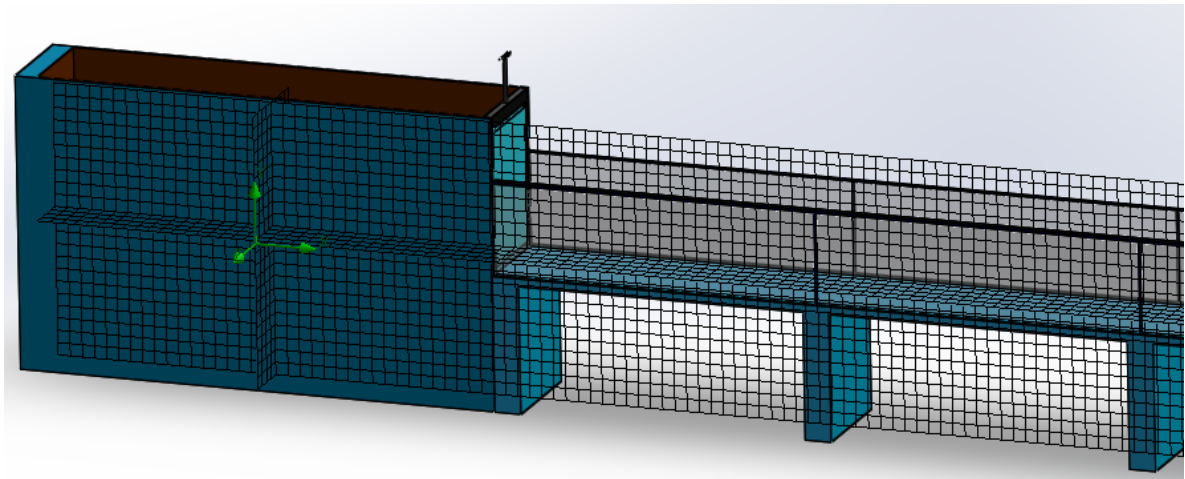


Figura 36: Refinamiento de malla.

Fuente: Elaboración propia.

Ahora busquemos en el árbol de resultados “Cut Plots”, esto nos va a ayudar a ubicar en puntos críticos, insertamos una a una en los puntos donde se vaya a realizar una vista respecto al plano alzado de la compuerta, porque analizaremos justo antes, después y a la salida de la compuerta, en las siguientes imágenes analizaremos

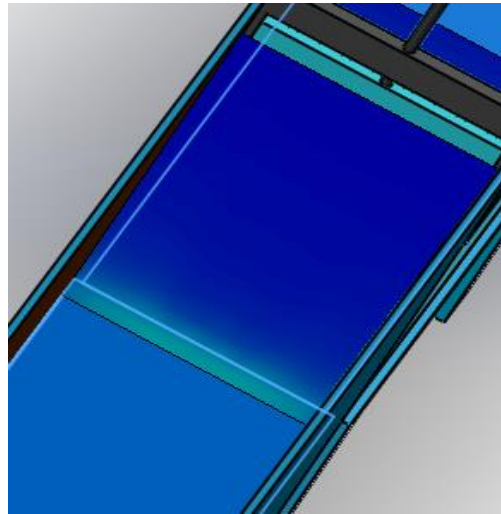


Figura 37: Cut Plots antes de compuerta.

Fuente: Elaboración propia.

Luego de la compuerta podemos observar que se encuentra en la parte del canal con mayor velocidad, lo que indica que nuestro flujo está siendo turbulento.

Pasando el resalto el flujo se estabiliza, por lo que podemos decir que se está que el flujo pasa a un régimen subcrítico.

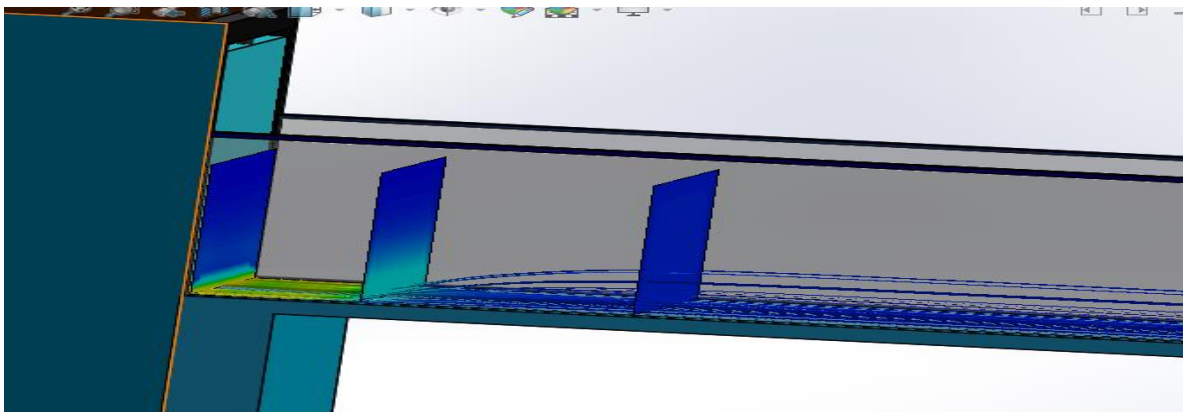


Figura 38: Cut Plots después de la compuerta.

Fuente: Elaboración propia.

Mediante colores podemos observar donde son las partes que presentan una mayor velocidad.

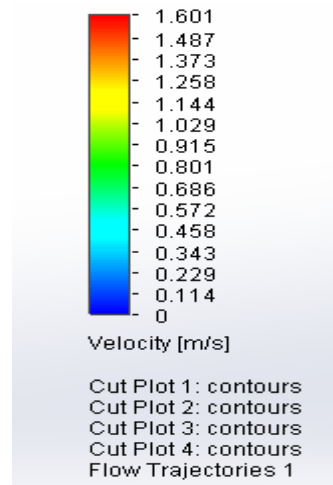


Figura 39: Gráfica de variación de velocidades.

Fuente: Elaboración propia.

Después de la realización de varios puntos en el resalto puestos desde el plano medio, se observan varias velocidades que varían de acuerdo a las condiciones donde se encuentra, observando que la velocidad reduce y se hace negativa por el reordenamiento, el flujo se va estabilizando.

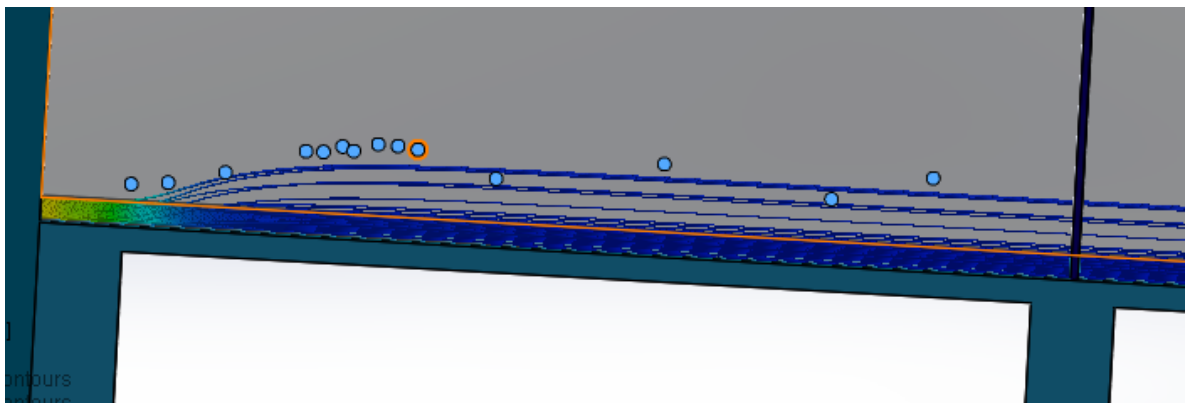


Figura 40: Goals point, velocidades en el resalto.

Fuente: Elaboración propia.

Observamos en la tabla (6) el reporte obtenido desde Solidworks, observando los cambios de velocidad.

Tabla 6: Reporte de velocidades.

X [m]	Y [m]	Z [m]	Velocity [m/s]	Velocity (X) [m/s]	Velocity (Y) [m/s]
1,731	-0,006	-0,340	0,422	0,360	0,220
1,806	0,001	-0,340	0,268	0,212	0,164
1,921	0,028	-0,340	0,118	0,112	0,038
2,083	0,080	-0,340	0,080	0,079	0,013
2,118	0,081	-0,340	0,077	0,077	0,010
2,157	0,094	-0,340	0,075	0,075	0,008
2,180	0,086	-0,340	0,075	0,074	0,007
2,229	0,103	-0,340	0,073	0,073	0,005
2,269	0,101	-0,340	0,072	0,072	0,004
2,310	0,097	-0,340	0,072	0,072	0,003
2,472	0,046	-0,340	0,071	0,071	0,001
2,812	0,095	-0,340	0,070	0,070	0,000
3,155	0,043	-0,340	0,070	0,070	0,000
3,360	0,097	-0,340	0,070	0,070	0,000

Fuente: Elaboración propia.

Dado que la velocidad varía considerablemente, es difícil identificar con este dato la posición de los tirantes del resalto hidráulico, por lo que se realizó mediciones de los tirantes de manera manual, creando un plano mediante líneas, que se acotaron y podemos observar que tiene una cercanía a los datos obtenidos en laboratorio.

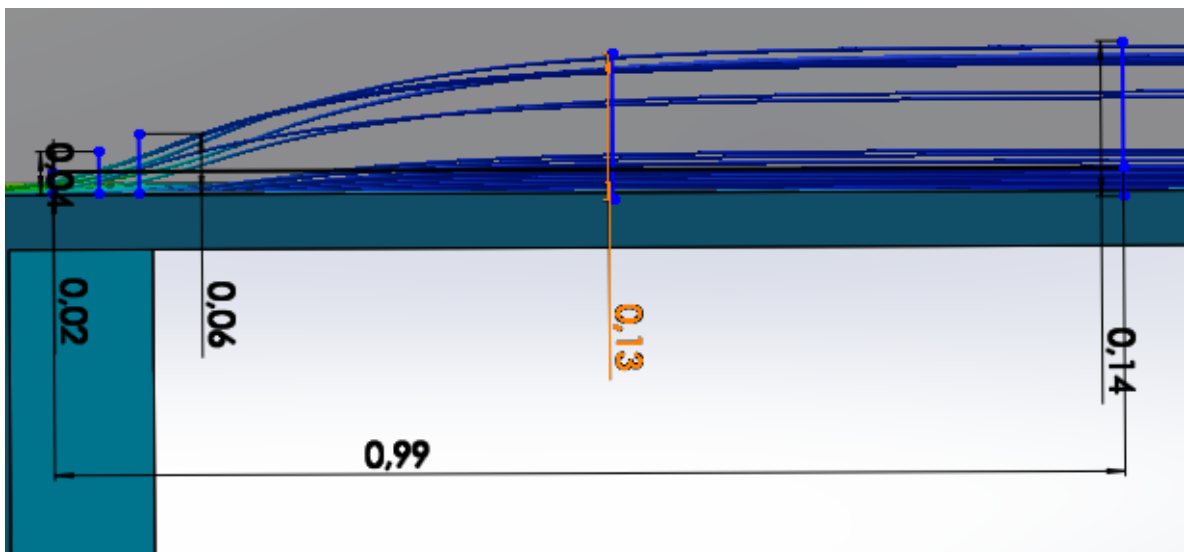


Figura 41: Medición manual de tirantes conjugados.

Fuente: Elaboración propia.

Estas mediciones son válidas como método estimativo, porque al ser medidas mediante líneas, seguimos un eje vertical en el canal.

Se realizaron diferentes mediciones, para Y_1 se hicieron dos medidas (0,02m- 0,04m) por lo que $Y_1 = 0,03\text{m}$ y $Y_2 = 0,14\text{m}$. podemos observar la relación con los tirantes obtenidos en la práctica de laboratorio:

Tabla 7: Comparación de tirantes.

Datos		Tirante por líneas	Tirante de la practica
Tirante inicial	Y_1 (m)	0,03	0,027
Tirante final	Y_2 (m)	0,14	0,13
Abertura compuerta	h (m)	0,03	0,03

Fuente: Elaboración propia.

Se determina que los tirantes no tienen una variación muy grande por lo que el método de trazado de líneas es aceptable, dado que Flow Simulation no permite realizar la simulación de flujo bifásico (agua- aire) con superficie libre.

Se trazaron líneas verticales en diversas secciones del canal donde se observa el fenómeno del resalto hidráulico, también se generaron perfiles de velocidad donde se identificó como altura de tirante la zona a partir donde se observa una incrementación de velocidad, asumiendo que esta zona es la interfaz entre agua y aire. Esta estimación fue contrastada con los datos experimentales (ver tabla 7) obtenidos en laboratorio, mostrando una coincidencia aceptable, validando el método empleado, se usará este mismo método para los otros 2 caudales.

Realizamos la segunda iteración tomado en cuenta que la abertura de compuerta es $h = 0,05\text{m}$ y la compuerta fija al final del canal tiene una altura $h_{cf} = 0,09\text{m}$ esto nos ayuda a representar el resalto de manera más cercana al resalto real.

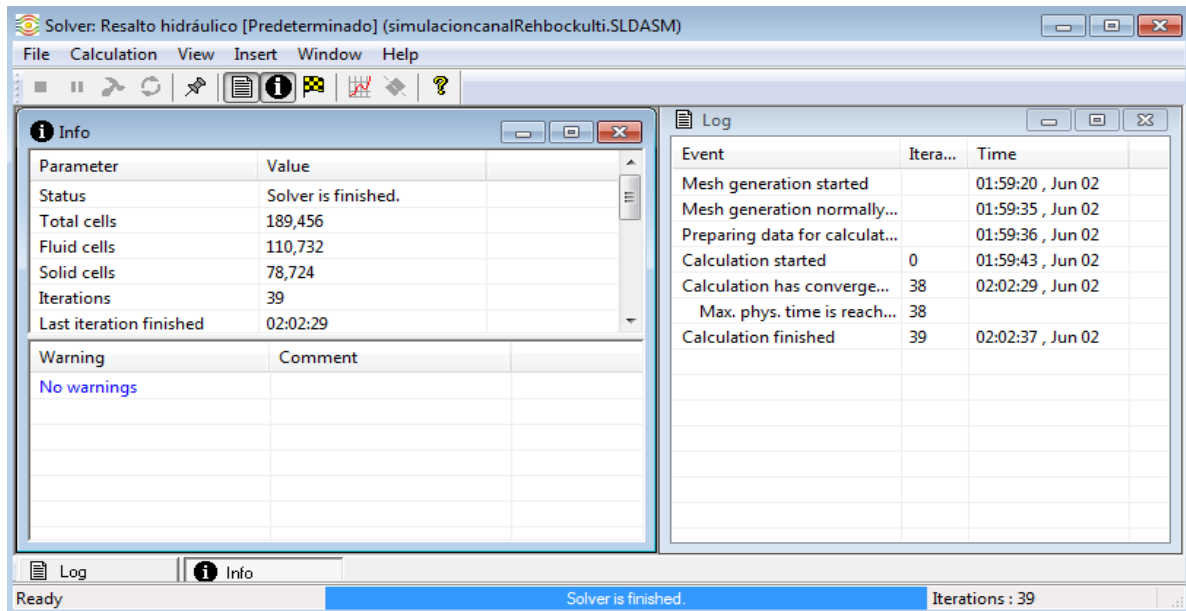


Figura 42: Iteraciones para caudal 2.

Fuente: Elaboración propia.

Observamos la velocidad con el segundo caudal ($Q_2 = 0,043 \text{ m}^3/\text{s}$), donde se ve que hay un cambio más fuerte de régimen.

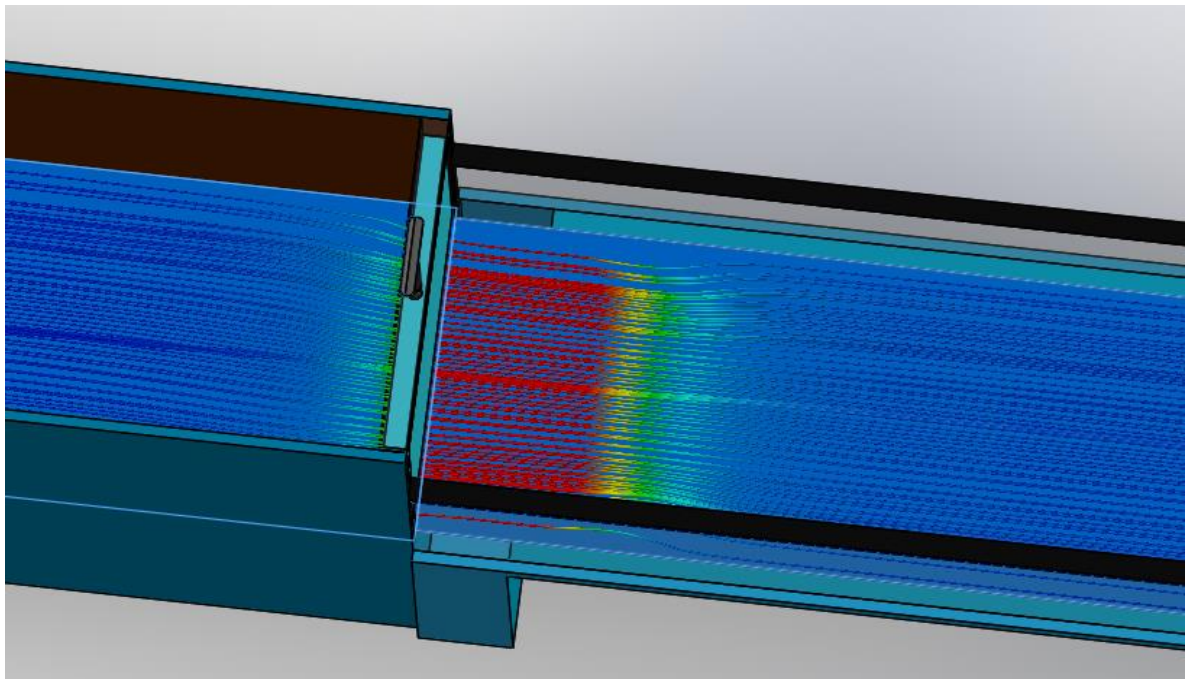


Figura 43: Visualización de velocidad para un caudal 2.

Fuente: Elaboración propia.

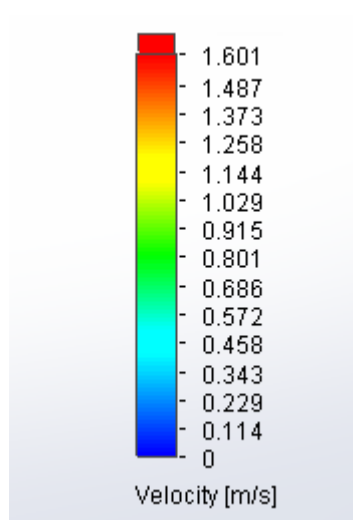


Figura 44: Variación de velocidad en salida de compuerta.

Fuente: Elaboración propia.

Ahora tomamos en cuenta los perfiles de variación de velocidades como se muestra en la figura 45.

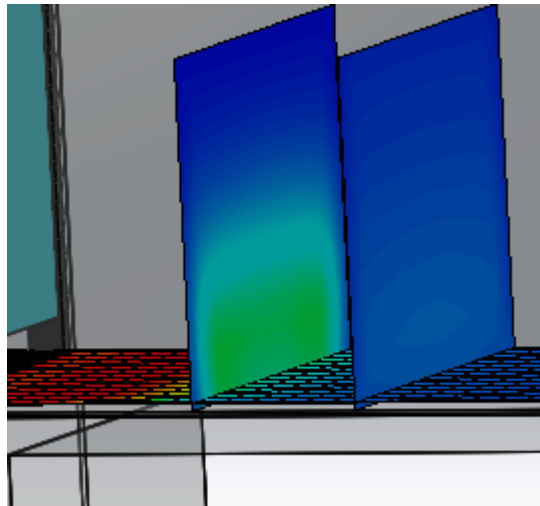


Figura 45: Vista de perfil de velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

Con la ayuda de estas vistas es más identificar donde empieza el tirante 1 aproximadamente, que mediante el método de líneas tendremos:

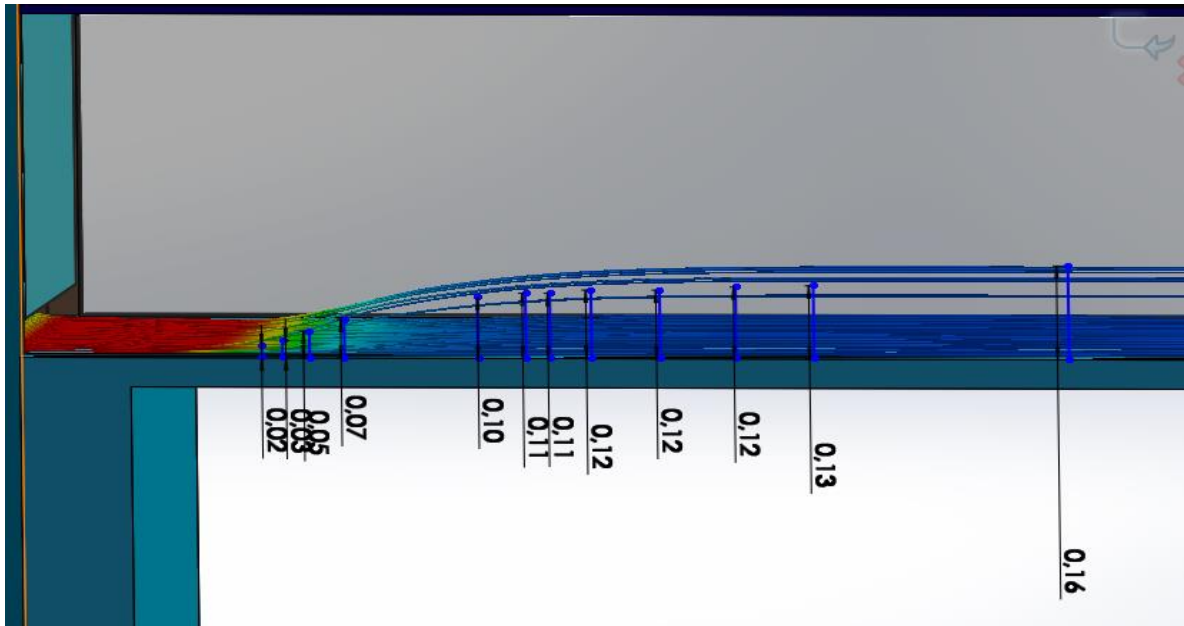


Figura 46: Método de líneas para tirantes.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el tirante 1 (Y_1) se encuentra entre 0,02m hasta un aproximado de 0,07m, que por media sacamos que el tirante conjugado 1 tiene un valor aproximado a $Y_1=0,0425$ m

Y el tirante conjugado 2 tiene un valor aproximado de $Y_2=0,16$ m, realizamos una comparación con los tirantes experimentales, teniendo la tabla 8:

Tabla 8: Tirantes por líneas Vs. tirantes experimentales.

Datos		Tirante por líneas	Tirante de la practica
Tirante inicial	Y_1 (m)	0,0425	0,043
Tirante final	Y_2 (m)	0,16	0,17
Abertura compuerta	h (m)	0,05	0,05

Fuente: Elaboración propia.

Observamos que nuestra variación es menor a 0,05m por lo que validamos las medidas para este segundo caudal.

Mediante la gráfica podemos observar la velocidad global a lo largo del canal de acuerdo al número de iteraciones que el programa realizo.

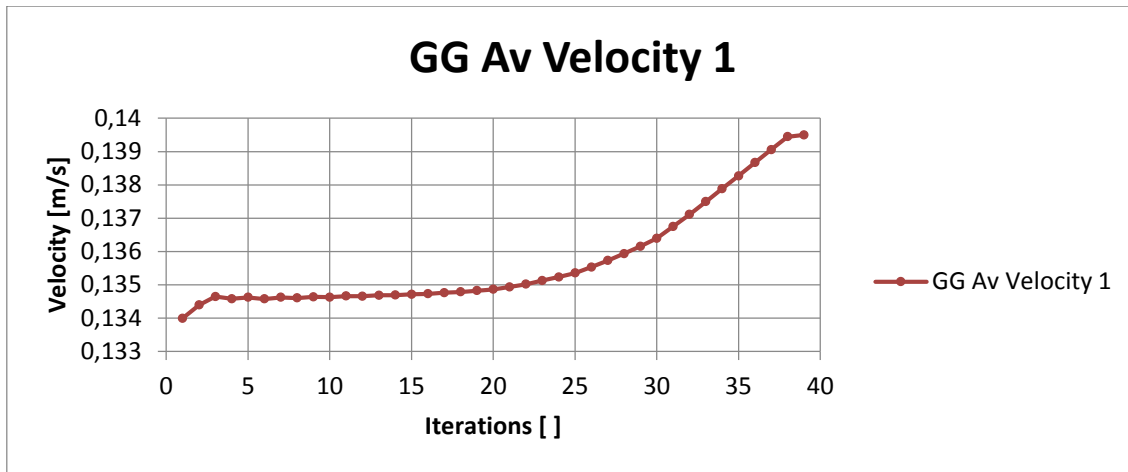


Figura 47: Variación de la velocidad global según iteraciones.

Fuente: Elaboración propia.

Como ultima simulación tenemos el caudal 3, esta simulación tendrá como datos de entrada:

Tabla 9: Datos de entrada para Q_3

DATOS DE ENTRADA		
ABERTURA DE COMPUERTA	0,1	m
ALTURA DE COMPUERTA FIJA	0,065	m
CAUDAL Q_3	0,068	m ³ /s

Fuente: Elaboración propia.

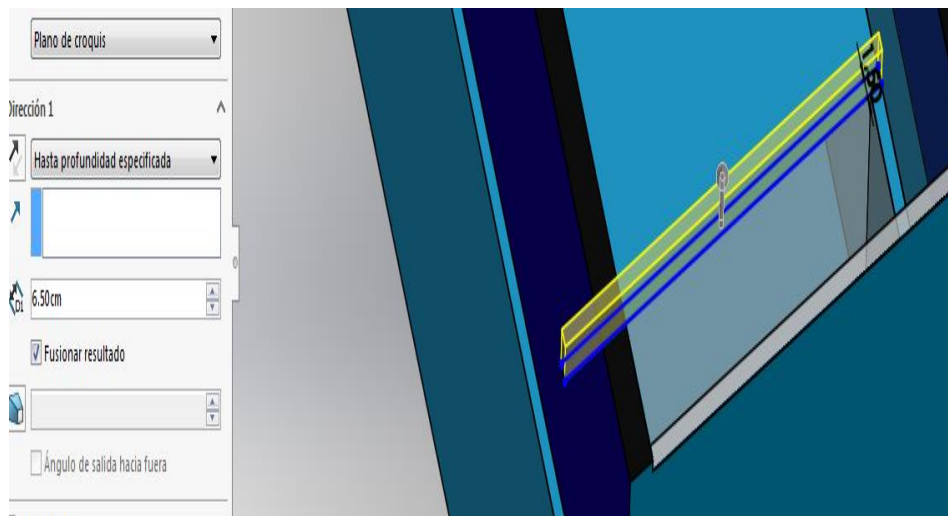


Figura 48: Altura compuerta fija.

Fuente: Elaboración propia.

Como observamos en la figura 46 realizamos el cambio de la altura de compuerta fija al final del canal, al igual que la abertura de compuerta deslizante, esto nos ayuda a la generación del resalto.

Para este caudal el programa realizo un total de 66 iteraciones como lo muestra la figura 49.

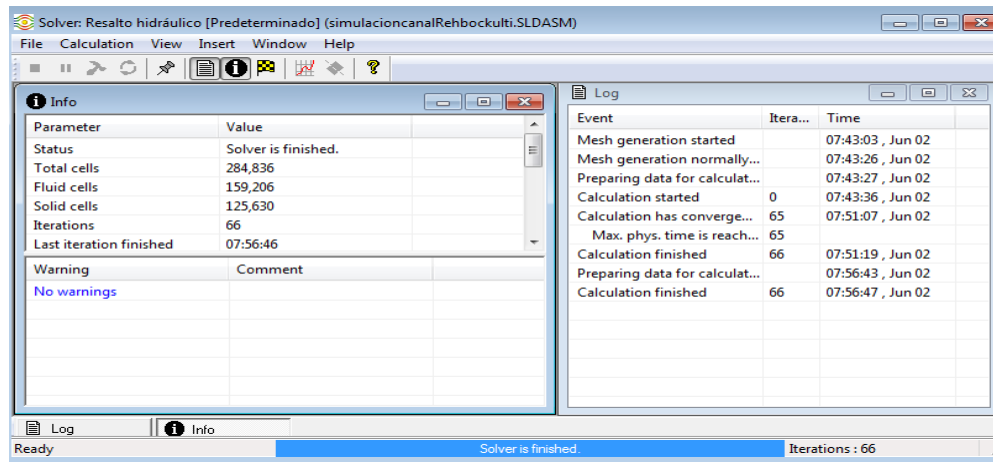


Figura 49: Iteraciones para un Q_3 .

Fuente: Elaboración propia.

Realizamos la simulación y observamos mediante la trayectoria del flujo con la velocidad que hay un aumento significativo de velocidad a la salida de la compuerta deslizante, vemos una zona de recirculación en el resalto, esto es como un remolino central, típico en resaltos hidráulicos donde el flujo gira y forma patrones circulares debido a la interacción entre las capas de agua.

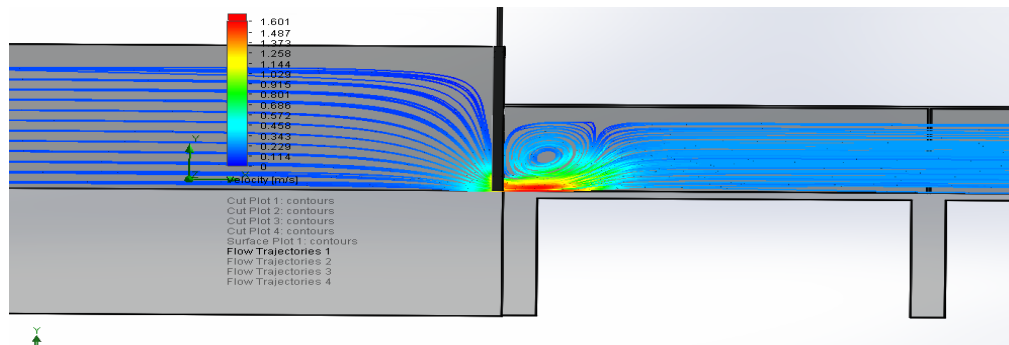


Figura 50: Trayectoria del flujo para un Q_3 .

Fuente: Elaboración propia.

La velocidad podemos dividirla en 3 zonas importantes:

- Zona de alta velocidad: Antes del resalto, las líneas de corriente están más separadas, lo que indica una velocidad más alta del flujo.
- Zona de baja velocidad: Después del resalto, las líneas de corriente están más juntas, indicando una velocidad más baja del flujo.
- Recirculación: En el centro del resalto, las líneas de corriente forman un patrón circular, lo que confirma la presencia de recirculación.

Las líneas de corriente muestran cómo el flujo se divide y redirige alrededor de la compuerta:

- Algunas líneas pasan por la compuerta
- Otras líneas fluyen alrededor de los bordes de la compuerta.
- Las líneas convergen y divergen en el resalto, mostrando la redistribución de energía cinética y potencial.

Mediante Cut Plots podemos observar gráficamente las partes donde las velocidades van desde velocidades fuertes (áreas rojas y amarillas) hasta velocidades prácticamente igual a 0 lo que significa que en estas partes está interviniendo el aire

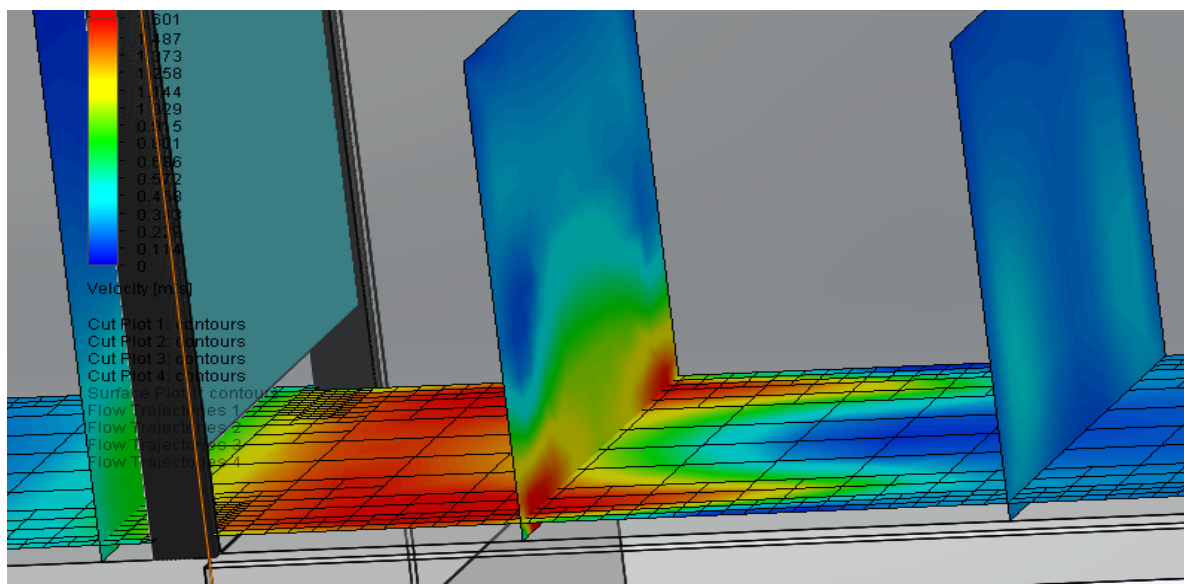


Figura 51: Vistas laterales de velocidades.

Fuente: Elaboración propia.

Con estas vistas y mediante el método de líneas verticales, procedemos a realizar las medidas de los tirantes conjugados.

En este caso en particular solamente tomaremos en cuenta la cara interna del canal, para poder analizar de manera más eficiente, puesto que el remolino no nos permite visualizar un tirante inicial concreto.

Se realizaron diversas mediciones tomando en cuenta las vistas laterales de incremento de la velocidad y las parte donde la velocidad reduce, considerando que hay presencia de aire.

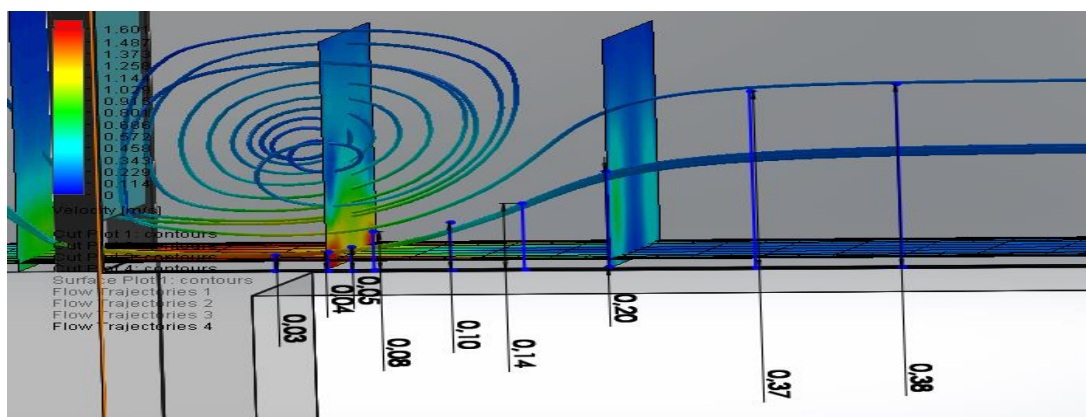


Figura 52: Medición gráfica de tirantes conjugados para Q_3 .

Fuente: Elaboración propia.

Sacamos un promedio para determinar los tirantes, para Y_1 tenemos:

$$Y_1 = \frac{0,04 + 0,05 + 0,08}{3}$$

$$Y_1 = 0,057m$$

Para Y_2 observamos 0,20 se acomoda a nuestras necesidades, puesto que para 0,037m-0,038m la velocidad se hace prácticamente 0.

Tabla 10: Tirantes por líneas Vs. tirantes experimentales para Q_3 .

Datos		Tirante por líneas	Tirante de la practica
Tirante inicial	Y_1 (m)	0,05	0,06
Tirante final	Y_2 (m)	0,20	0,204
Abertura compuerta	h (m)	0,1	0,1

Fuente: Elaboración propia

Para este caudal (Q_3) podemos ver que nuestros tirantes varían menos de un 0,05m por lo que aceptamos los tirantes obtenidos por el método de líneas.

Según las iteraciones que realizamos obtenemos la variación de la velocidad para una velocidad global y una mínima como se observan en las figuras 51 y 52 a continuación respectivamente:

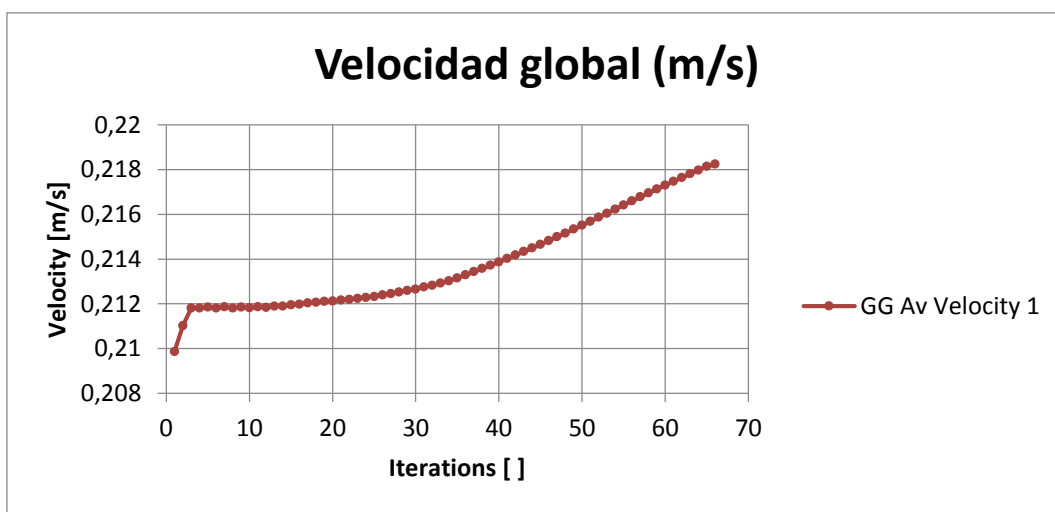


Figura 53: Gráfica de velocidad global según iteraciones.

Fuente: Elaboración propia

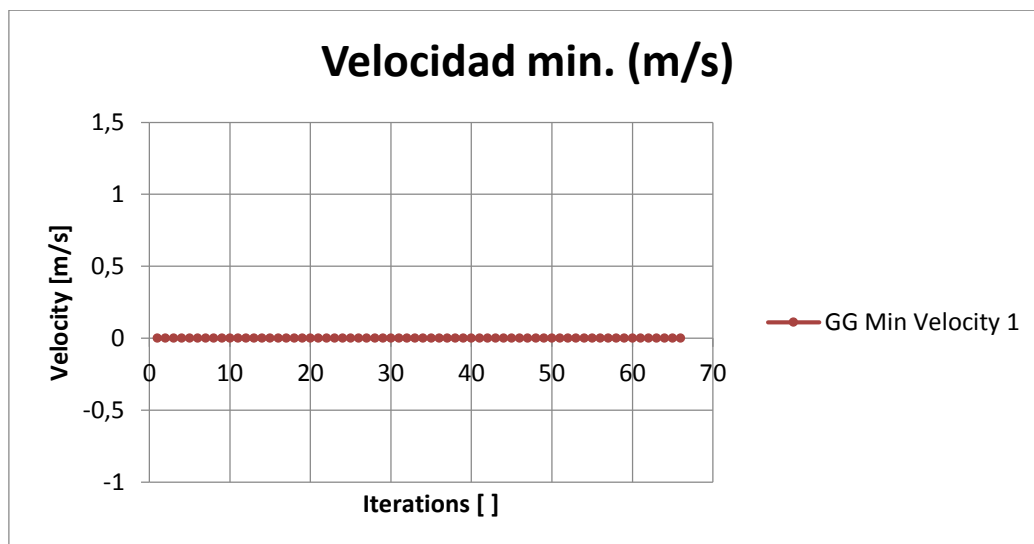


Figura 54: Iteraciones de velocidades mínimas.

Fuente: Elaboración propia.

Ahora nos dirigimos hasta la arista inferior de la compuerta donde es nuestra parte más crítica observamos que el programa nos gráfica que a lo ancho de la compuerta (x) hay variaciones de velocidades presentando cada 0,1m

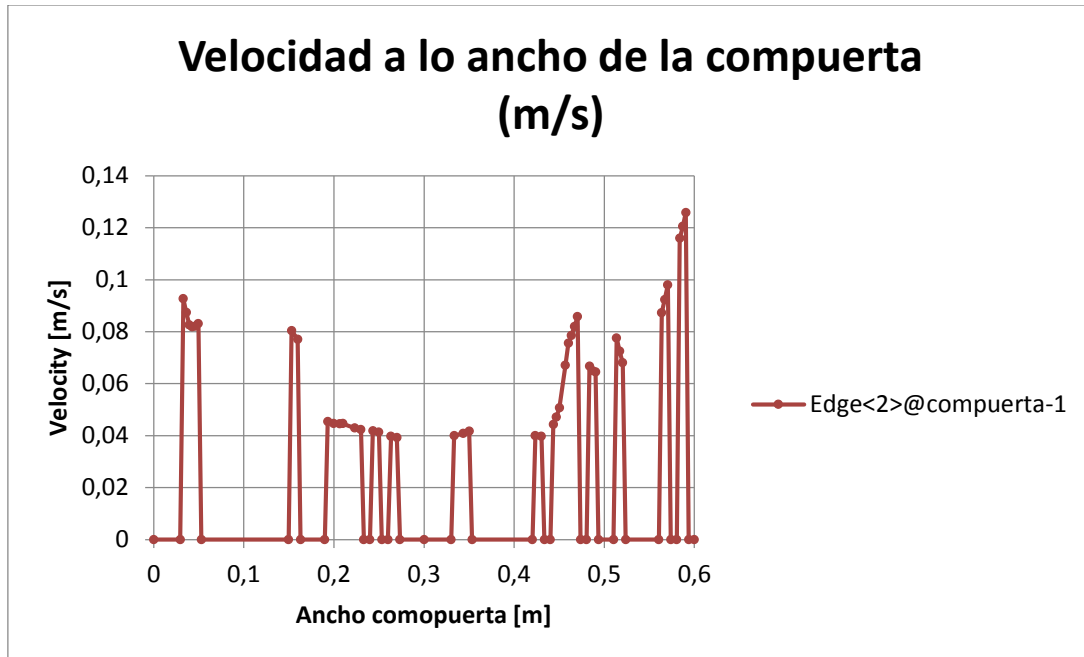


Figura 55: Gráfica de velocidades en lo ancho de la compuerta deslizante.

Fuente: Elaboración propia

Con fines de analizar el comportamiento del flujo observamos como el mallado se hace más fino en ciertas zonas, esto nos indica que como ya se había dicho anteriormente nuestra zona de bajo de la compuerta es donde se tiene mayor incremento de velocidad, que para nuestro análisis esto nos representa el paso de un régimen rápido (supercrítico) a un régimen lento (subcrítico).

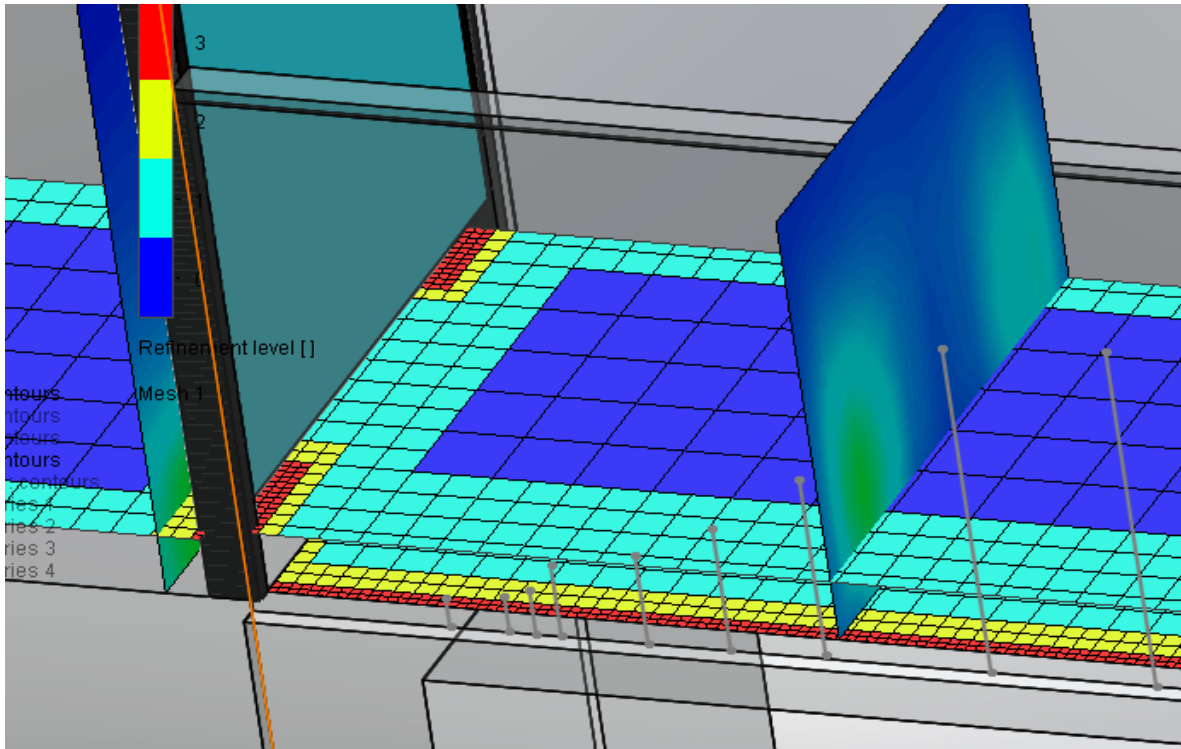


Figura 56: Mallado en plano medio del canal.

Fuente: Elaboración propia

5.1.2. Tabla de resultados “Ideal Walls” por método de líneas verticales

Una vez obtenidos los datos de la simulación CFD, se procedió a calcular las características determinantes del resalto hidráulico, empleando las fórmulas expuestas en el Capítulo 3, que nos ayudaran a tener los resultados teóricos. Al comparar estos resultados numéricos con los datos experimentales obtenidos en la práctica de laboratorio, se observaron ciertas variaciones. Notablemente, la discrepancia en los tirantes conjugados ($y_1 - y_2$), que constituyen la base para los demás cálculos, fue consistentemente inferior a 0.05 metros, tal como se detalla en la Tabla 10. Esta pequeña magnitud en la variación inicial es un primer indicador de la correspondencia entre el modelo y el fenómeno físico.

Procedemos a presentar la tabla 11 que contiene los resultados de la simulación mediante Ideal Walls:

Tabla 11: Resultados de Resalto hidráulico con Ideal Walls.

VARIABLES	1	2	3	UM
Caudal (Q)	0,019	0,043	0,068	m ³ / s
Área mojada en 1 (A ₁)	0,018	0,026	0,030	m ²
Área mojada en 2 (A ₂)	0,084	0,096	0,120	m ²
Velocidad en 1 (V ₁)	1,044	1,674	2,259	m / s
Carga velocidad en 1	0,056	0,143	0,260	m
Tirante conjugado 1 (Y ₁)	0,030	0,043	0,050	m
Número de Froude en 1 (F ₁)	1,925	2,592	3,226	-
Velocidad en 2 (V ₂)	0,224	0,445	0,565	m / s
Carga velocidad 2	0,003	0,010	0,016	m
Tirante conjugado 2 (Y ₂)	0,140	0,160	0,200	m
Número de Froude 2 (F ₂)	0,191	0,355	0,403	-
Y ₂ / Y ₁ (experimental)	4,667	3,765	4,000	-
Y ₁ / Y ₂ (experimental)	0,214	0,266	0,250	-
Y ₂ / Y ₁ (Ec.1)	2,268	3,200	4,089	-
Y ₁ / Y ₂ (Ec.1)	0,068	0,208	0,258	-
Pérdidas en el salto (Ec. 3) ΔE	0,079	0,060	0,064	m
Eficiencia en el salto (Ec. 6) η	81,285	75,803	68,097	%
Longitud del resalto (Ec. 12) (L)	0,550	0,588	0,750	m
CLASIFICACIÓN DE RESALTO	DÉBIL	OSCILANTE	OSCILANTE	

Fuente: Elaboración propia

5.1.3. Simulación considerando la rugosidad, “Real Walls”

Sabiendo que la rugosidad de las paredes es despreciable, pero que afecta en los resultados, se realiza una segunda simulación con los mismos datos de entrada (ver figura 57), pero esta vez considerando en el análisis las paredes como “Real Walls”.

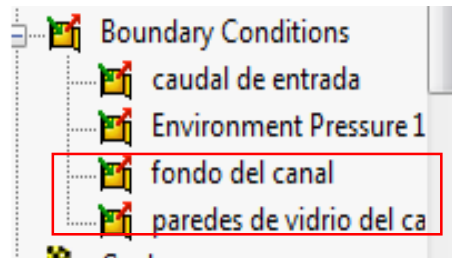


Figura 57: Condiciones de borde con rugosidad.

Fuente: Elaboración propia.

Debemos realizar una nueva configuración solo en los datos de entrada, conservamos nuestro Wizard sin ningún cambio, puesto que solo queremos observar cuanta llegara a ser la variación en la considerados de la rugosidad en los materiales tal como se muestra en la figura 58:

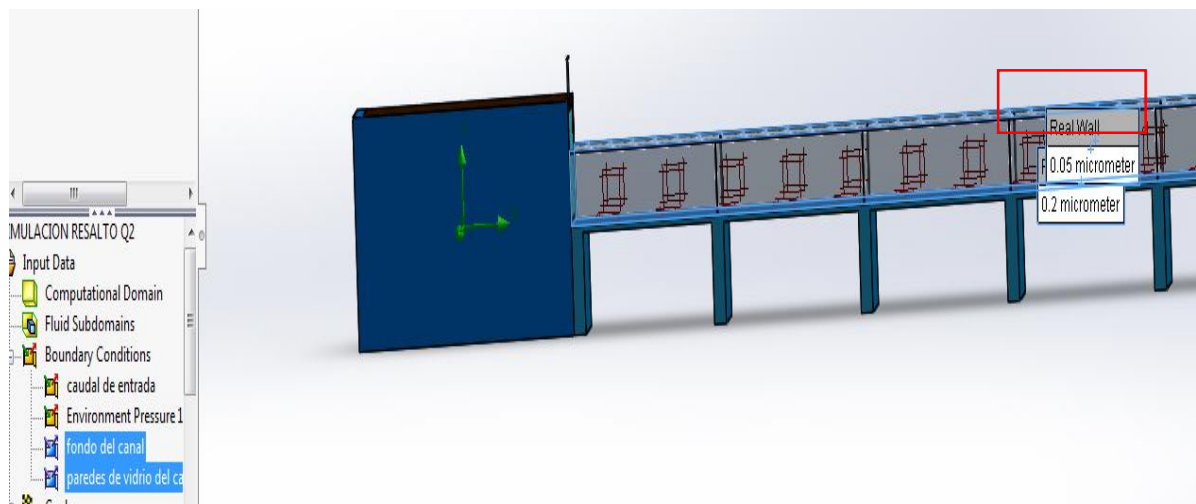


Figura 58: Paredes reales en canal.

Fuente: Elaboración propia.

Tenemos ahora como datos de entrada los siguientes datos para realizar las nuevas simulaciones:

Tabla 12: Datos de entrada para Real Walls.

		Q1	Q2	Q3
Inlet Volume Flow	Caudal (Q)(m ³ /s)	0,019	0,043	0,068
Environment Pressure 1	Presión ambiente normal (Pa)	101325	101325	101325
Real Walls 1	paredes vidrio (μ)	0,05	0,05	0,05
Real Walls 2	fondo de canal (μ)	0,2	0,2	0,2

Fuente: Elaboración propia

Se observa que las condiciones son las mismas, realizamos las simulaciones para nuestros 3 caudales, considerando como métodos las vistas laterales de velocidad y el método de líneas verticales.

5.1.4. Resultados tomando en cuenta la rugosidad, “Real Walls”

Realizamos la iteración (ver figura 59) para el caudal 1 ($Q_1 = 0,019 \text{ m}^3/\text{s}$), donde podemos observar al realizar el plano lateral de velocidad junto con el método por líneas verticales, que obtenemos un tirante 2 (Y_2) 12,8cm que es un valor muy próximo al tirante obtenido en el laboratorio, tal como se muestra en la figura 59.

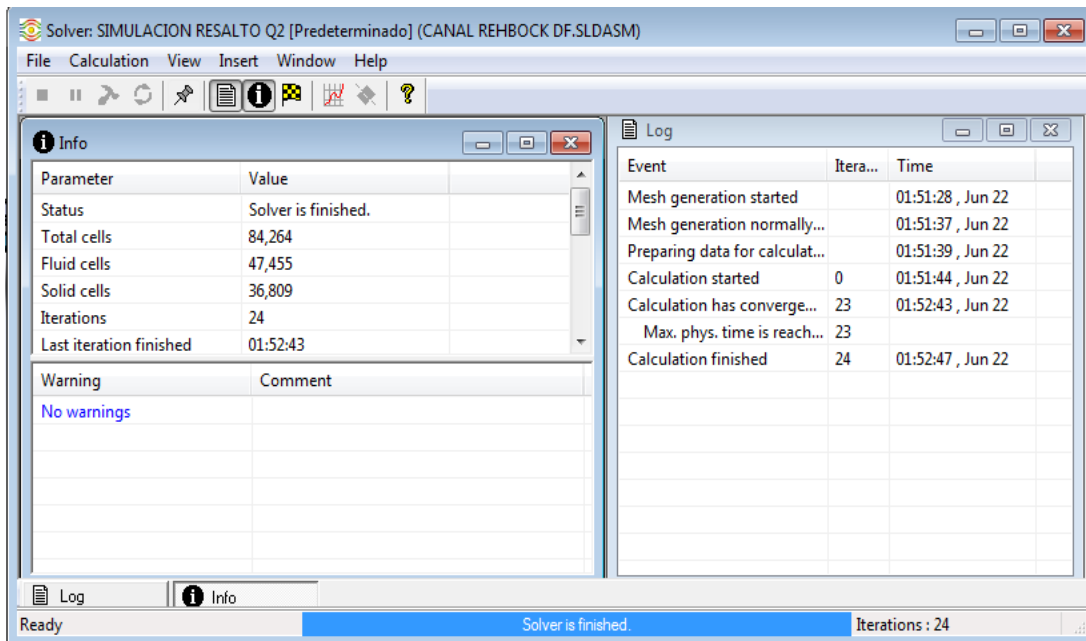


Figura 59: Resultados con rugosidad.

Fuente: Elaboración propia.

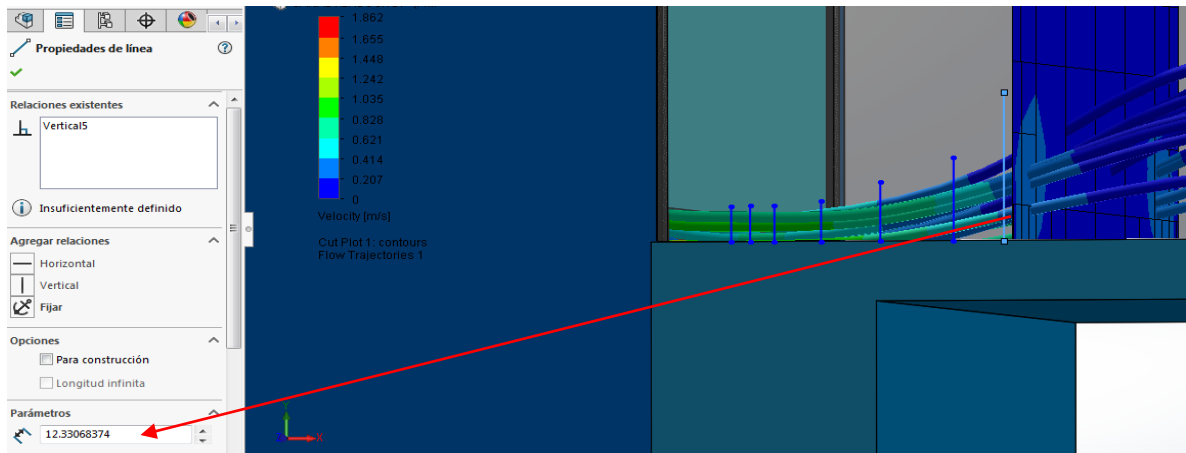


Figura 60: Comprobación tirante (Y_2)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13: Resultados Real Walls para Q_1 .

	Simulación experimental	Simulación con rugosidad
	Q_1	Q_1
Y1 (m)	0,027	0,0277
Y2 (m)	0,130	0,128

Fuente: Elaboración propia.

Ahora procedemos a realizar para el caudal 2 ($Q_2 = 0,043 \text{ m}^3/\text{s}$), donde de la misma forma realizamos las medidas gráficamente, obteniendo nuevamente valores muy próximos a los reales, esta vez comprobamos con tirante 1 (Y_1) obteniendo un tirante de 4,3cm y un tirante 2 ($Y_2 = 16,71\text{cm}$). Empezamos a ver que los datos se aproximan mucho más, considerando que a pesar que el tiempo de iteraciones es un poco más largo, el hecho de considerar la rugosidad de las paredes y no idealizarlas es un paso importante para tener resultados con un menor error relativo.

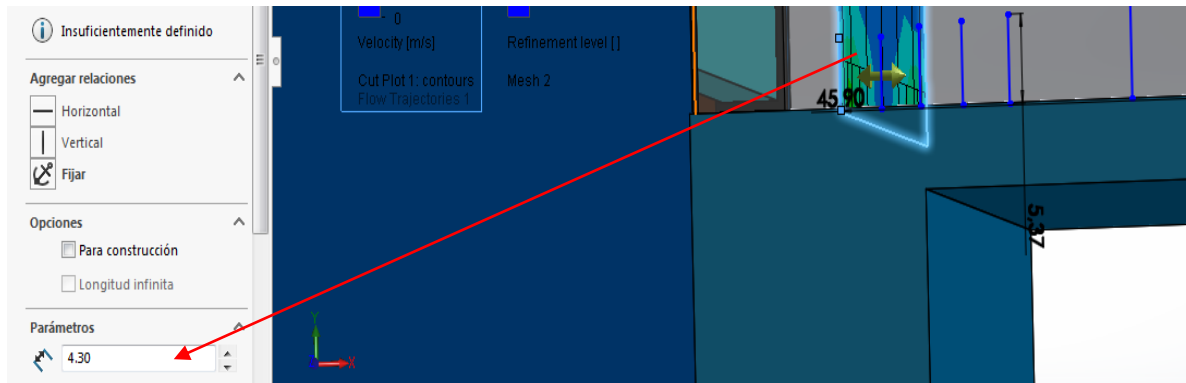


Figura 61: Tirante 1 para caudal 1.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14: Resultados Real Walls para Q_2 .

	Simulación experimental	Simulación con rugosidad
	Q_2	Q_2
Y1 (m)	0,043	0,0430
Y2 (m)	0,170	0,01671

Fuente: Elaboración propia.

Ahora analizamos el caudal 3, debemos considerar que en este caudal es en donde se presenta una mayor discrepancia en los resultados cuando no se toma en cuenta el

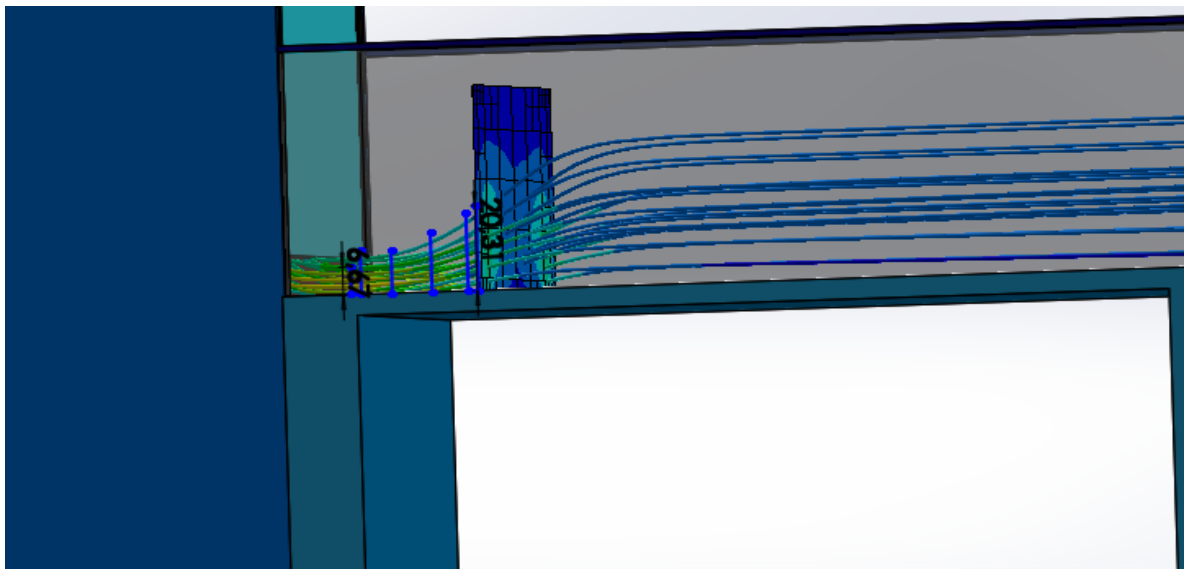


Figura 62: Tirante 1 y 2 para Real Walls.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15: Resultados Real Walls para Q_3 .

	Simulación experimental	Simulación con rugosidad
	Q_3	Q_3
Y_1 (m)	0,066	0,0671
Y_2 (m)	0,204	0,2031

Fuente: Elaboración propia.

Realizados los cálculos, obtenemos los resultados finales para Real Walls:

Tabla 16: Resultados de resalto Real Walls.

VARIABLES	1	2	3	UM
Caudal (Q)	0,019	0,043	0,068	m ³ / s
Área mojada en 1 (A_1)	0,017	0,026	0,040	m ²
Área mojada en 2 (A_2)	0,077	0,100	0,122	m ²
Velocidad en 1 (V_1)	1,131	1,654	1,683	m / s
Carga velocidad en 1	0,065	0,139	0,144	m
Tirante conjugado 1 (Y_1)	0,0277	0,043	0,067	m
Número de Froude en 1 (F_1)	2,170	2,547	2,075	-
Velocidad en 2 (V_2)	0,244	0,426	0,556	m / s
Carga velocidad 2	0,003	0,009	0,016	m
Tirante conjugado 2 (Y_2)	0,128	0,167	0,203	m
Número de Froude 2 (F_2)	0,218	0,332	0,394	-
Y_2 / Y_1 (experimental)	4,632	3,886	3,026	-
Y_1 / Y_2 (experimental)	0,216	0,257	0,330	-
Y_2 / Y_1 (Ec.1)	2,609	3,137	2,477	-
Y_1 / Y_2 (Ec.1)	0,087	0,186	0,249	-
Pérdidas en el salto (Ec. 3) ΔE	0,0716	0,0665	0,0461	m
Eficiencia en el salto (Ec. 6) η	80,019	76,320	80,662	%
Longitud del resalto (Ec. 12) (L)	0,503	0,621	0,680	m
CLASIFICACIÓN DE RESALTO	DÉBIL	OSCILANTE	DÉBIL	

Fuente: Elaboración propia.


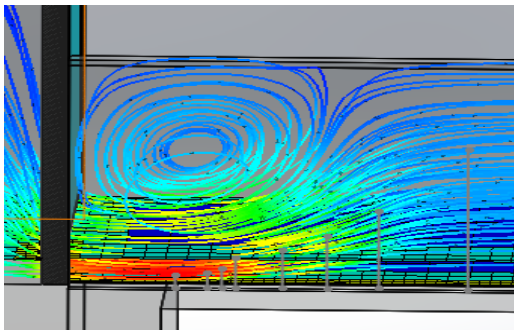

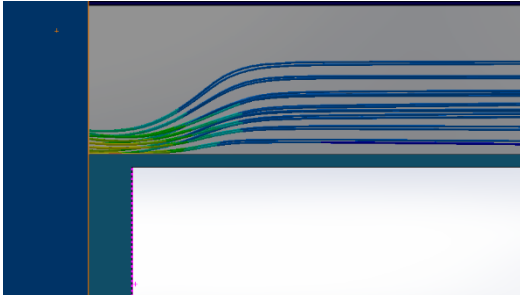
Observamos que no solo gráficamente, sino también numéricamente existe una diferencia significativa e importante para los resultados; viendo la variación entre los resultados con Real Walls e Ideal Walls, se realizará un análisis comparativo de ambos resultados.

5.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE SIMULACIONES CFD, BAJO DISTINTOS ESCENARIOS

5.2.1. Observación del resalto en simulación Vs. experimental.

Como se muestra visualmente la representación del resalto hidráulico para el caudal Q_3 , se hace una comparación cualitativa del ensayo experimental con la simulación CFD, observamos gráficamente como se muestra en la tabla 17, que tanto la simulación para Ideal Walls como para Real Walls tienen una gran similitud, pero es innegable que hay una mayor cercanía de resultados cuando se considera las rugosidades, puesto que esto nos ayuda a tener un escenario más fiel al del laboratorio real como se muestra a continuación en la tabla 16:

Tabla 17: Comparación Cualitativa de resalto experimental Vs. resalto simulado.

RESALTO EN LABORATORIO	RESALTO EN SIMULACIÓN
	IDEAL WALLS 
	REAL WALLS 

Fuente: Elaboración propia

Con este motivo ahora procedemos a presentar una tabla final de resultados experimentales y por simulación obtenidos mediante las ecuaciones. Estos resultados demuestran aproximaciones en sus tirantes conjugados.

Tabla 18: Análisis de resultados finales.

	VARIABLES	1	2	3	UM
RESULTADOS	Caudal (Q)	0,019	0,043	0,068	m ³ / s
	Tirante conjugado 1 (Y ₁)	0,027	0,043	0,066	m
	Número de Froude en 1 (F ₁)	2,255	2,547	2,127	-
	Tirante conjugado 2 (Y ₂)	0,130	0,170	0,204	m
	Pérdidas en el salto (Ec. 3) ΔE	0,078	0,070	0,049	m
	Eficiencia en el salto (Ec. 6) η	79,320	76,320	80,330	%
	Longitud del resalto (Ec. 12) (L)	0,515	0,635	0,690	m
	CLASIFICACIÓN DE RESALTO	DÉBIL	OSCILANTE	DÉBIL	
RESULTADOS POR	Caudal (Q)	0,019	0,043	0,068	m ³ / s
	Tirante conjugado 1 (Y ₁)	0,030	0,043	0,057	m
	Número de Froude en 1 (F ₁)	1,925	2,592	2,650	-
	Tirante conjugado 2 (Y ₂)	0,140	0,160	0,200	m
	Pérdidas en el salto (Ec. 3) ΔE	0,079	0,060	0,064	m
	Eficiencia en el salto (Ec. 6) η	81,285	75,803	75,124	%
	Longitud del resalto (Ec. 12) (L)	0,550	0,588	0,715	m
	CLASIFICACIÓN DE RESALTO	DÉBIL	OSCILANTE	OSCILANTE	
RESULTADOS POR	Caudal (Q)	0,019	0,043	0,068	m ³ / s
	Tirante conjugado 1 (Y ₁)	0,0277	0,043	0,067	m
	Número de Froude en 1 (F ₁)	2,1700	2,5471	2,0750	-
	Tirante conjugado 2 (Y ₂)	0,128	0,1671	0,2031	m
	Pérdidas en el salto (Ec. 3) ΔE	0,072	0,067	0,0461	m
	Eficiencia en el salto (Ec. 6) η	80,0189	76,3200	80,6622	%
	Longitud del resalto (Ec. 12) (L)	0,502	0,6205	0,6799	m
	CLASIFICACIÓN DE RESALTO	DÉBIL	OSCILANTE	DÉBIL	

Fuente: Elaboración propia

Podemos observar en la tabla 18 una correlación entre los resultados reales y los resultados con los datos de la simulación, pero tenemos tendencias relevantes entre el modelo idealizado por CFD y el comportamiento físico del resalto. El estudio se centra en las variables geométricas que definen el resalto hidráulico: el tirante conjugado menor (Y₁), el tirante conjugado mayor (Y₂) y la longitud del resalto (L).

Sabiendo que el error relativo es el error de una medición en relación al valor real, como observamos en la Ec. 22:

$$Error\ Relativo = \frac{|Valor\ Real - Valor\ medido|}{Valor\ Real} \quad (22)$$

Calculamos el error relativo para tirante conjugado menor (Y_1), tirante conjugado mayor (Y_2) y longitud del resalto (L):

Tabla 19: Error relativo de valores de Y_1 , Y_2 , L ,

	ERROR RELATIVO					
	IDEAL WALLS			REAL WALLS		
	1	2	3	1	2	3
Tirante conjugado 1 (Y_1)	11,1%	1,2%	13,6%	2,6%	0,00%	1,67%
Tirante conjugado 2 (Y_2)	7,7%	5,9%	2,0%	1,5%	1,7%	0,5%
Longitud del resalto (Ec.) (L)	6,8%	7,5%	3,6%	2,3%	2,3%	1,5%

Fuente: Elaboración propia

El propósito de este análisis es evaluar la precisión y validez de dos modelos de simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), se realizó dos tipos de modelos denominados Ideal Walls y Real Walls, mediante la comparación de sus resultados con datos obtenidos experimentalmente en un canal de laboratorio tipo Rehbock.

El estudio se realizó bajo dos escenarios de operación, variando el caudal de entrada en 3 caudales diferentes:

$$Q_1 = 0,019 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_2 = 0,043 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_3 = 0,068 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Dichos escenarios presentaron las mismas condiciones de entrada, con la variación de despreciar la rugosidad por lo pequeña que es “Ideal Walls” y tomar en cuenta la rugosidad “Real Walls”, porque afectará en las medidas de los tirantes, que por ecuaciones también afecta en la pérdida de energía y esto es importante para realizar la disipación en obras hidráulicas.

La diferencia fundamental entre los modelos radica en la consideración de la fricción de las paredes. El modelo "Ideal Walls" desprecia la rugosidad del canal, mientras que el modelo "Real Walls" la incorpora para representar de manera más fiel las condiciones físicas, lo cual, como se demostrará, tiene un impacto directo en la precisión de las variables geométricas simuladas.

5.2.2. Predicción y sensibilidad al caudal del modelo con Ideal Walls

Al analizar los resultados del modelo "Ideal Walls", se observa que la herramienta ofrece una primera aproximación aceptable del fenómeno. Para el tirante conjugado mayor (Y_2) y la longitud del resalto (L), los errores relativos se mantienen, en su mayoría, por debajo del 8% (Tabla 19). Esto indica que el modelo es capaz de predecir de forma razonable la magnitud y el tamaño general del resalto hidráulico.

Sin embargo, el análisis del tirante conjugado menor (Y_1) revela una debilidad importante en este modelo simplificado. Se observan errores relativos elevados e inconsistentes, alcanzando un 11,1% para el Q_1 y un 13,6% para el Q_3 . Dado que Y_1 representa la condición inicial del flujo supercrítico que da origen al resalto, una predicción inexacta de esta variable compromete la fidelidad de todo el fenómeno. La imprecisión en Y_1 sugiere que ignorar la fricción de las paredes es una simplificación que limita la capacidad del modelo para simular correctamente las condiciones de entrada del resalto, especialmente a caudales bajos y altos.

En cuanto al número de Froude (F_1) y la longitud del resalto (L), los valores son muy cercanos, dado que en el caso 3 (Q_3) el resalto se lo clasifica como Oscilante según el resultado de número de Froude ($F_1 = 2,65$), es aceptable al estar cerca de la frontera teórica ($F_1 = 2,5$) entre un resalto débil y un resalto oscilante.

5.2.3. Validación modelo con Paredes Reales y Reducción del Error Relativo

La introducción de la rugosidad de las paredes en el modelo "Real Walls" produce una mejora sustancial y decisiva en la precisión predictiva, alineando los resultados de la simulación de manera mucho más estrecha con los datos experimentales. Esta superioridad se confirma cuantitativamente al analizar los errores relativos de las variables geométricas clave en la Tabla 17.

Al examinar los resultados, la mejora de "Real Walls" es evidente en todas las variables clave. Para los parámetros geométricos, el modelo demuestra ser excepcionalmente preciso:

- **Tirante conjugado menor (Y_1):** Aquí se observa la mejora más crítica y reveladora. Mientras que el modelo "Ideal Walls" presentaba errores de hasta el 13,6%, el modelo "Real Walls" reduce el error a un máximo de 2,6%. Esto demuestra que la rugosidad de las paredes es un factor fundamental para determinar con precisión el tirante inicial del flujo, que es el punto de partida para la correcta formación del resalto.
- **Tirante conjugado mayor (Y_2):** La precisión en la predicción de la profundidad de salida del resalto es excepcional. El error relativo se reduce, manteniéndose por debajo del 1,7% para todos los caudales, lo que confirma una predicción altamente confiable de la altura del flujo subcrítico resultante.
- **Longitud del resalto (L):** De igual manera, la predicción de la extensión física del resalto mejora notablemente. El error máximo se reduce a apenas un 2,3%, en contraste con los errores de hasta el 7,5% del modelo "Ideal Walls".

Finalmente, la robustez del modelo "Real Walls" se confirma en la clasificación del resalto (Tabla 18). Este modelo predice correctamente la clasificación para los tres caudales (Débil, Oscilante, Débil), coincidiendo de manera perfecta con las observaciones experimentales. Esto representa una mejora clave sobre el modelo "Ideal Walls", que clasificó erróneamente el resalto para el caudal Q_3 , a pesar que estaba cerca de la frontera Débil-Oscilante el número de Froude.

La práctica de aceptar errores en este rango está bien establecida, dado que es imposible eliminar por completo las discrepancias entre un sistema físico real y una idealización numérica. Estudios de validación similares en el campo de la hidráulica, como el de Carrillo y Castillo (2014), consideran que existe una "buena concordancia" entre la simulación y el experimento con márgenes de error similares, si el modelo CFD, con todas estas dificultades, logra predecir el comportamiento general, la forma del flujo y los valores de las variables principales (como velocidad o tirantes) con errores que rondan el 10%, entonces el modelo se considera validado y útil.

. De igual manera, otros trabajos como el de (Ochoa-Tocachi, 2022), respaldan la fiabilidad de los modelos CFD aun con la presencia de errores controlados en este orden de

magnitud, considerando como “Excelente Predicción” resultados inferiores al 5%. Por lo tanto, con base en estos precedentes, se puede afirmar con confianza que el modelo "Real Walls" ha sido validado exitosamente y constituye una herramienta fiable para su propósito didáctico.

En conclusión, el análisis comparativo centrado en las variables geométricas. Y_1 , Y_2 y L , demuestra que la incorporación de la rugosidad de la pared es un factor crítico. El modelo "Real Walls" se valida como una herramienta robusta y confiable, capaz de predecir con gran exactitud las dimensiones físicas del resalto hidráulico, cumpliendo así con el objetivo de desarrollar un modelo CFD útil y preciso para su aplicación como laboratorio virtual en la enseñanza de la hidráulica.

5.2.4. Demostración gráfica de validación modelo “Real Walls”

Como se ha demostrado en el análisis de errores, el modelo 'Real Walls' ofrece una precisión significativamente mayor. Para visualizar esta mejora de manera directa, se analizan gráficamente las variables geométricas clave del resalto hidráulico.

Tabla 20: Datos para gráficos comparativos.

		Q ₁	Q ₂	Q ₃
RESULTADOS EXPERIMENTALES	Y ₁ (m)	0,027	0,043	0,066
	Y ₂ (m)	0,13	0,17	0,204
	L (m)	0,515	0,635	0,69
RESULTADOS POR IDEAL WALLS.	Y ₁ (m)	0,030	0,043	0,057
	Y ₂ (m)	0,140	0,160	0,200
	L (m)	0,550	0,588	0,715
RESULTADOS POR REAL WALLS.	Y ₁ (m)	0,028	0,043	0,067
	Y ₂ (m)	0,128	0,1671	0,2031
	L (m)	0,503	0,621	0,68

Fuente: Elaboración propia.

Para comenzar, se puede realizar una comparación directa entre los tirantes conjugados medidos y los simulados. Si graficamos el tirante conjugado mayor (Y_2) en función del tirante conjugado menor (Y_1) utilizando los datos de la Tabla 20, observaríamos cómo los puntos correspondientes a "Real Walls" se alinean casi perfectamente con los puntos

experimentales. En contraste, los puntos del modelo "Ideal Walls" mostrarían una desviación visible, confirmando que el modelo que incorpora la rugosidad es el que mejor representa la relación física entre las profundidades del flujo antes y después del resalto.

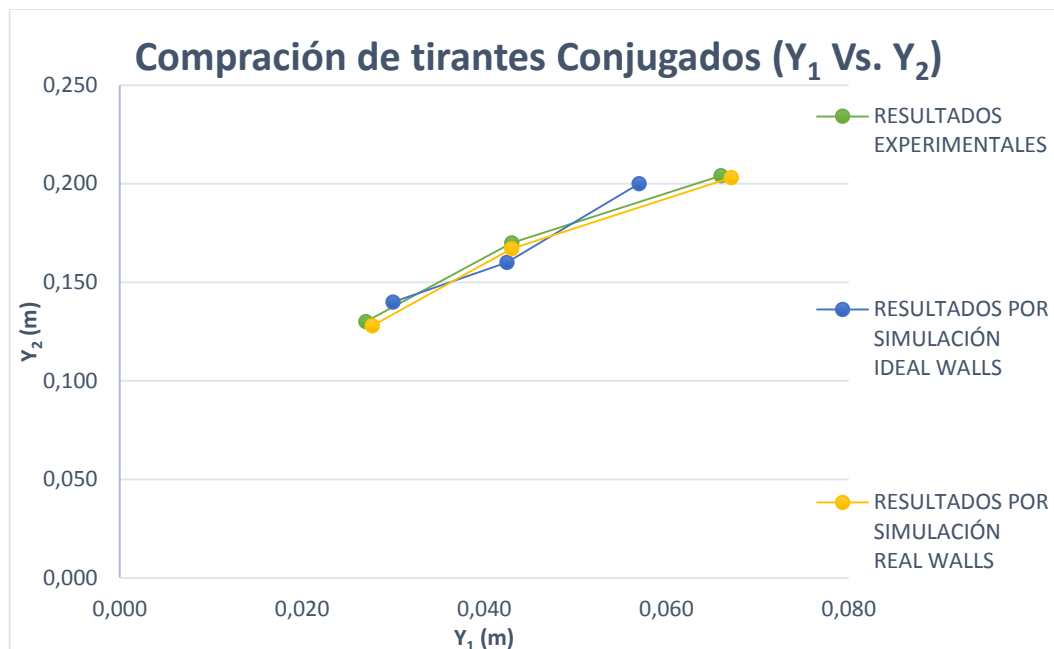


Figura 63: Comparación (Y_1 Vs Y_2)

Con el objetivo de dimensionar el impacto de la rugosidad en la precisión del modelo, se presenta a continuación un análisis gráfico de los errores relativos para las variables geométricas.

5.2.4.1. Análisis de tendencia de Errores según el caudal.

Primero, analizamos el comportamiento del modelo "Ideal Walls". Como se muestra en la Figura 64, los errores relativos para el tirante conjugado menor (Y_1) son inconsistentes y elevados, superando el 10%. Dado que Y_1 es la condición inicial que define el resalto, una imprecisión tan alta en esta variable crítica invalida al modelo para un análisis predictivo fiable. Esto significa que, al despreciar la rugosidad, el modelo no logra calcular correctamente las condiciones del flujo que dan origen al fenómeno. Por estas desviaciones significativas, se considera que el modelo "Ideal Walls" no es una representación válida del canal real.

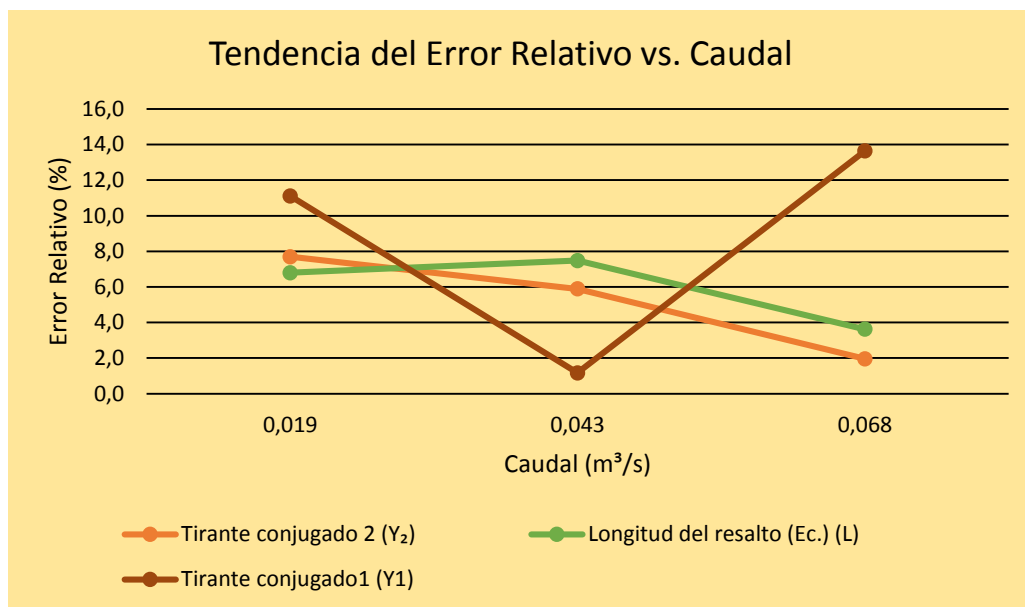


Figura 64: Tendencia de errores Ideal Walls.

Fuente: Elaboración propia

Ahora, se analiza el modelo "Real Walls" en la Figura 65:

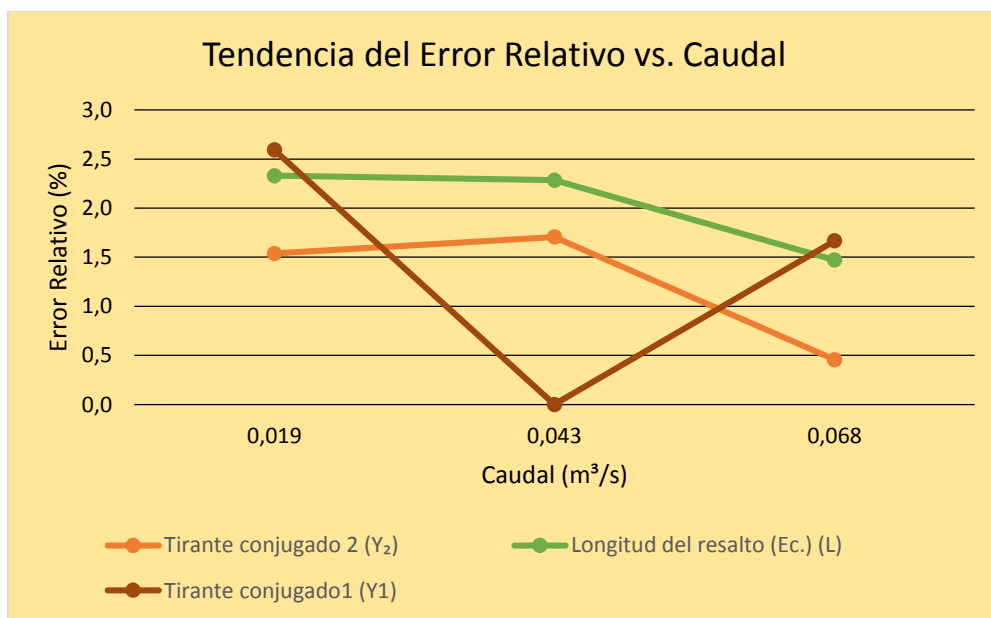


Figura 65: Tendencia de errores Real Walls.

Fuente: Elaboración propia.

La mejora es drástica y evidente. Todas las líneas de tendencia, correspondientes a las variables geométricas (Y_1 , Y_2 y L), se mantienen en una banda de error muy estrecha, baja y

controlada. Es crucial notar que los errores se conservan consistentemente por debajo del 3% para todos los caudales. La línea correspondiente al tirante Y_1 , que era el mayor problema en el modelo anterior, ahora demuestra una estabilidad y precisión excelentes.

Conclusión sobre "Real Walls" es un modelo robusto, estable y fiable. Su precisión no depende de las condiciones del flujo dentro del rango estudiado. Se puede tener un alto grado de confianza en que sus predicciones serán acertadas para cualquier caudal intermedio entre Q1 y Q3.

5.2.4.2. Comparación Directa de Errores Relativos.

La figura 66 y 67, contrasta directamente el desempeño del modelo simplificado ("Ideal Walls") con el modelo validado ("Real Walls") respectivamente, ilustrando el error porcentual para los tirantes conjugados (Y_1 , Y_2) y la longitud del resalto (L)

La diferencia es notoria a simple vista. Mientras que los errores del modelo "Ideal Walls" (Figura 66) alcanzan valores cercanos al 14%, la escala del gráfico "Real Walls" (Figura 67) no supera el 3%. Esta es una indicación visual clara de la ganancia en precisión.

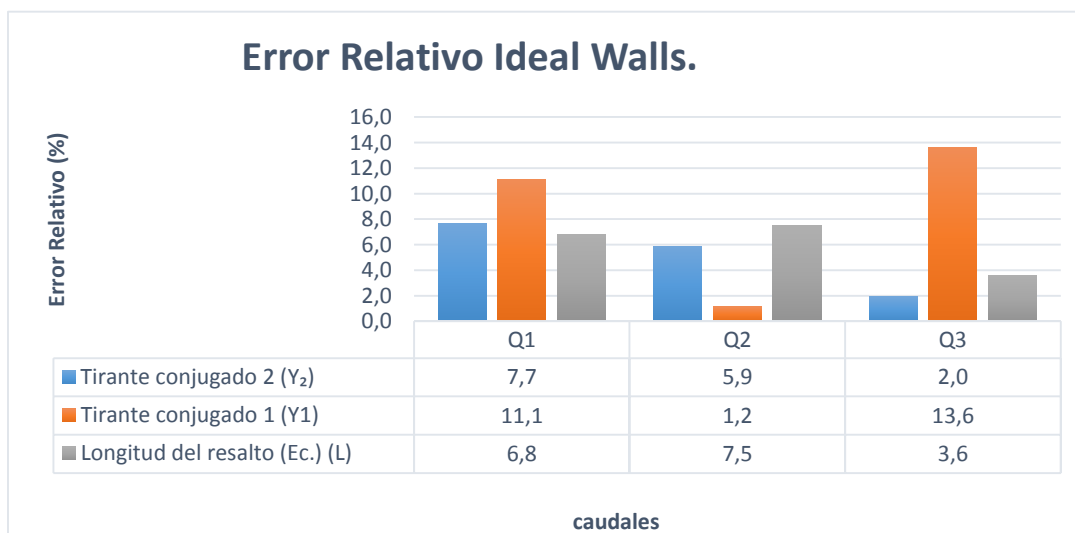


Figura 66: Gráfica errores relativos para Ideal Walls.

Fuente: Elaboración propia

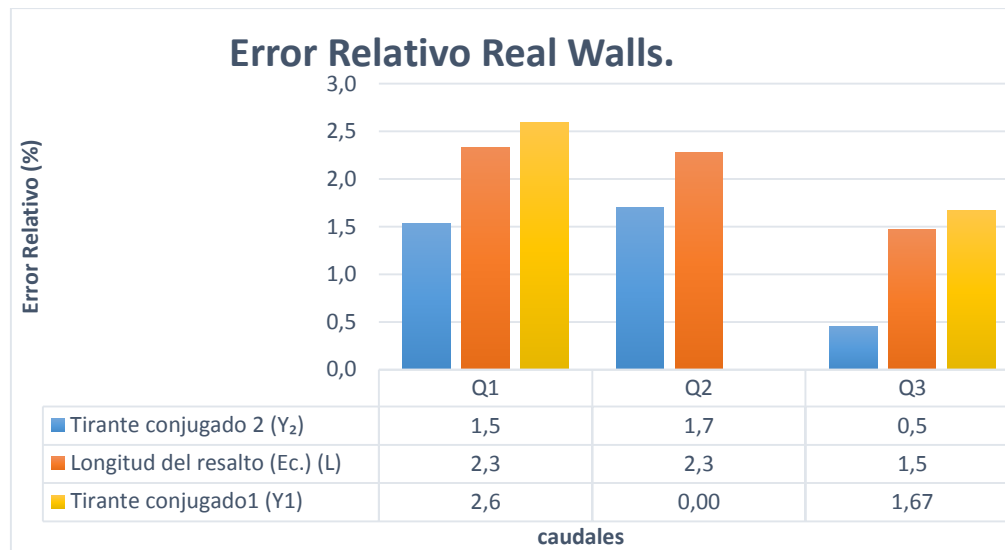


Figura 67: Gráfica errores relativos Real Walls.

Fuente: Elaboración propia

En el modelo "Ideal Walls", el error de la variable crítica Y1 (barra correspondiente) es inaceptablemente alto. Por el contrario, en el modelo "Real Walls", el error para Y₁, Y₂ y L se mantiene estable y en un margen bajo y controlado, confirmando su robustez para predecir la geometría del fenómeno.

5.2.4.3. Conclusión de la Validación Gráfica

Por lo tanto, el riguroso análisis comparativo presentado en esta sección demuestra de manera concluyente e irrefutable la validación del modelo de simulación "Real Walls". A través de la comprobación gráfica y el análisis de errores relativos de las variables geométricas, ha quedado patente que la incorporación de la rugosidad de las paredes no es un mero ajuste, sino un factor determinante para replicar con fidelidad las dimensiones físicas del resalto hidráulico.

Mientras que el modelo "Ideal Walls" mostró desviaciones significativas, con errores que superan el 13% en variables geométricas clave, el modelo "Real Walls" ha probado ser robusto, estable y preciso. Sus niveles de error se mantienen consistentemente por debajo del 3% para los tirantes conjugados y la longitud del resalto, alineándose de forma excelente con los datos experimentales obtenidos en el laboratorio para todos los caudales estudiados.

Este resultado cumple exitosamente con el objetivo central de la investigación: validar un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) como una representación precisa del sistema real. La estabilidad y baja magnitud del error del modelo "Real Walls" confirman que hemos logrado desarrollar un "gemelo digital" fiable del canal de laboratorio en términos de su comportamiento geométrico.

Habiendo establecido firmemente la validez y superioridad de este modelo, se cuenta ahora con una base sólida y cuantificada para proceder a la formulación de las conclusiones generales del estudio y las recomendaciones para su implementación práctica. La confianza en las predicciones del modelo "Real Walls" es alta, lo que permite proyectarlo como una herramienta didáctica de gran valor y potencial para ser aplicada.

5.2.5. Validación del modelo para la Disipación de Energía por ecuación

Una vez que el modelo "Real Walls" demostró alta precisión en la predicción de las variables geométricas (Y_1 , Y_2 y L), se procedió a evaluar su capacidad para el análisis energético.

Aunque SolidWorks Flow Simulation no proporciona la pérdida de energía (ΔE) como un resultado directo, el modelo validado nos permite calcularla de manera indirecta. Se utilizó la Ecuación 4, que depende exclusivamente de los tirantes conjugados:

$$\Delta E = \frac{(Y_2 - Y_1)^3}{4Y_2Y_1}$$

El propósito de esta comparación es determinar si el modelo virtual constituye una herramienta funcionalmente útil para que los estudiantes analicen la disipación de energía, uno de los conceptos más importantes del resalto hidráulico.

Tabla 21: ΔE experimental Vs. ΔE Real Walls

Caudal (m ³ /s)	ΔE experimental (m)	ΔE Real Walls (m)	Diferencia Absoluta (m)
0,019	0,078	0,072	0,006
0,043	0,07	0,066	0,004
0,068	0,049	0,046	0,003

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la tabla (21) revela una fuerte correlación entre los valores de pérdida de energía. A continuación, se detallan los puntos clave de la comparación:

- **Correspondencia de orden y magnitud:** En todos los escenarios, el modelo predice correctamente el orden de magnitud de la energía disipada. Las diferencias absolutas son mínimas, del orden de 3 a 6 milímetros, lo cual es una aproximación muy cercana en el contexto de mediciones hidráulicas a esta escala.
- **Consistencia en el Comportamiento Físico:** El modelo reproduce con éxito la tendencia física observada en el laboratorio. Ambos conjuntos de datos (experimental y simulado) muestran cómo varía la disipación de energía en función del caudal, lo que indica que el modelo captura correctamente la física del fenómeno.
- **Utilidad como Herramienta Didáctica:** Si bien existe una diferencia numérica, que alcanza un máximo del 6 mm para el caudal Q_1 , esta se considera aceptable y no disminuye el valor del modelo como herramienta de enseñanza. Se debe tomar en cuenta que la energía de disipación depende directamente de los tirantes y dado que es una variable derivada de una ecuación cúbica no lineal. La teoría de propagación de errores establece que cualquier incertidumbre o error presente en las variables de entrada se amplificará en el resultado final debido a la naturaleza cúbica de la fórmula. Por lo tanto, aunque el modelo "Real Walls" predijo los tirantes con un error excepcional ($<3\%$), es matemáticamente coherente que el error para ΔE sea ligeramente superior.

En conclusión, la estrecha correspondencia numérica y la consistencia en la tendencia física confirman que el modelo "Real Walls" es una herramienta funcional y precisa para el análisis energético del resalto hidráulico, validando su aplicación como un laboratorio virtual eficaz."

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

Se validó un "gemelo digital" de alta fidelidad para el análisis del resalto hidráulico. El presente estudio logró desarrollar y validar de manera robusta un modelo CFD tridimensional del canal Rehbock de la U.A.J.M.S. El modelo "Real Walls" trasciende la simple réplica geométrica, consolidándose como un gemelo digital capaz de predecir con notable precisión las características del fenómeno, cumpliendo así el objetivo principal de la investigación.

La inclusión de la rugosidad de las paredes es el factor determinante para la precisión del modelo. Se demostró de manera concluyente que la correcta simulación del resalto hidráulico depende críticamente de la consideración de la fricción. El modelo simplificado "Ideal Walls" (sin rugosidad) resultó inadecuado, mientras que el modelo "Real Walls" probó que la inclusión de este parámetro es indispensable para obtener resultados fidedignos.

La precisión del modelo "Real Walls" fue cuantificada y confirmada con errores mínimos. La validación del modelo se sustenta en un análisis de errores riguroso. La comparación de las variables geométricas claves que son los tirantes conjugados (Y_1 - Y_2) y longitud del resalto (L) con los datos experimentales arrojó errores relativos que se mantuvieron consistentemente por debajo del 3%, confirmando la alta fidelidad del modelo para replicar la forma y magnitud del fenómeno físico.

Se validó una metodología indirecta para simular flujos de superficie libre en SolidWorks Flow Simulation. Uno de los hallazgos más significativos fue el éxito al emplear un software que no modela explícitamente flujos bifásicos. Se demostró que el enfoque indirecto, basado en la estimación del tirante a partir del análisis de perfiles de velocidad, es un procedimiento viable, asertivo y robusto para estudiar el resalto hidráulico.

Para este fenómeno, la correcta modelación de la fricción es más crítica que la simulación de la interfaz aire-agua. El estudio revela que la clave para replicar el resalto no residió en la representación de un flujo bifásico, sino en la correcta introducción de las características reales de las paredes que involucran para el estudio del canal, como es la rugosidad. Se concluye que una calibración precisa de la rugosidad tiene un impacto más determinante en los resultados que la propia simulación explícita de la superficie libre, validando el uso de herramientas de simulación más accesibles para fenómenos complejos.

Se identificaron consideraciones prácticas clave para el modelado y la interpretación de resultados. Durante la fase de diseño, se determinó que modelar el conjunto vertedero-canal como una única pieza sólida es más eficaz para evitar solapamientos y errores de ensamblaje en el software. Asimismo, se reconoce que el canal físico presenta fugas menores, por lo que el modelo simulado (idealmente hermético) representa una condición optimizada, factor a considerar al comparar resultados.

El modelo validado se establece como un recurso académico estratégico y una herramienta didáctica eficaz. El gemelo digital y la guía metodológica desarrollada constituyen un laboratorio virtual robusto para la carrera de Ingeniería Civil. Esta herramienta complementa la práctica física, permitiendo a estudiantes y docentes analizar el fenómeno del resalto hidráulico de manera detallada, visual y confiable, superando barreras de acceso a equipos y enriqueciendo el proceso de aprendizaje.

6.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda que, para futuros modelos o ampliaciones de este, se mantenga la segmentación estratégica de piezas. Componentes con grados de libertad, como la compuerta, deben ensamblarse de forma independiente para garantizar su funcionalidad y facilitar análisis de movimiento. Adicionalmente, para detalles como tornillería, perfiles y uniones, se sugiere reemplazar las herramientas de modelado básico por bibliotecas de diseño basadas en estándares y normas. Esto no solo aumentará el realismo visual, sino también la precisión profesional y la interoperabilidad del modelo.

Dado que el modelo CFD validado es un sistema hermético, una de las pocas fuentes de discrepancia restantes son las pérdidas de agua observadas en el canal físico del laboratorio. Se recomienda enfáticamente diseñar y ejecutar un ensayo para cuantificar este caudal de fuga. La obtención de este dato permitiría aplicar un factor de corrección a las mediciones experimentales, refinando aún más la correlación con los resultados de la simulación y llevando el análisis comparativo a un nivel de precisión superior.

Se recomienda presentar una propuesta al Laboratorio de Hidráulica para que el modelo "Real Walls" ya validado como base para generar una biblioteca de simulaciones pre-calculadas sistemáticamente los parámetros clave (caudal de entrada, altura de la compuerta inicial y final), se puede construir un "catálogo de resaltos hidráulicos" que sirva como un

recurso educativo e interactivo, estando disponible con mayor accesibilidad para los estudiantes, que se encontrará disponible en la página oficial del laboratorio.