



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Obtención de relaciones de diseño de canales con rugosidad artificial (Rugosidad Tipo A) mediante modelo numérico

Trabajo de Titulación Previo a la
Obtención del Título de Ingeniero
Civil

AUTORES:

Jonnathan Patricio Illescas Ortega
CI: 0106392335
Correo electrónico: jpiortega95@gmail.com

Walter Geovanny Zhimnay Sánchez
CI: 0106471501
Correo electrónico: geovanzh@gmail.com

DIRECTOR:

Verónica Margarita Carrillo Serrano
CI: 0104040480

Cuenca – Ecuador

17 de febrero de 2022



Resumen

La importancia en el diseño de una estructura que transporta agua es mantenerla bajo un umbral que evite el deterioro, la erosión y daños en elementos estructurales, es decir, garantizar condiciones óptimas dentro de su vida útil. En el caso particular de los canales de alta pendiente donde la velocidad es el principal parámetro que debe ser controlado, debido a los altos valores que se presentan; es necesario la implementación de obras complementarias para mantener un régimen de flujo deseable.

Actualmente, existen dos principales técnicas para controlar la velocidad de flujo en canales de alta pendiente: flujo en forma de escaleras y la rugosidad artificial. El flujo en forma de escalera al ser una alternativa muy cara no es una técnica muy empleada, contrario a las estructuras de rugosidad artificial, las cuales constituyen un ahorro en costos correspondientes a su construcción, seguridad a la estructura y alargan su vida útil.

La rugosidad artificial consiste en incorporar elementos salientes en el perímetro del canal creando una resistencia adicional y reduciendo la energía cinética. En el diseño de dicha rugosidad se dispone de ábacos y expresiones presentadas por los principales exponentes: Pikalov F. (1935) y Aivazian (1977), sin embargo, para afirmar estas teorías no se dispone de información suficiente en cuanto a las condiciones de flujo y demás factores, por lo cual no es posible generalizar una sola teoría que sirva de base para el diseño de canales con rugosidad artificial y consecuentemente es indispensable realizar una validación a las expresiones de diseño existentes.

El fenómeno ocasionado por la implementación de la rugosidad artificial en canales a cielo abierto es analizado mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés), con el uso de OpenFoam, un software libre ampliamente usado para la modelación de flujos tridimensionales que resuelve de forma numérica las ecuaciones de gobierno de Navier-Stokes, basado en el método de volúmenes finitos. Para la aplicación de la CFD es necesario construir un modelo tridimensional, especificar condiciones iniciales y de contorno, modelar la turbulencia y el método de solución para las ecuaciones de gobierno.

El presente estudio toma como base un modelo físico (canal del Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos de la Universidad de Cuenca), donde a partir de la calibración preliminar de los parámetros para la simulación obtenidos de investigaciones anteriores; realizadas bajo el mismo enfoque, se puede replicar las condiciones de flujo en el modelo numérico. Posteriormente se realizan las simulaciones en el canal con y sin rugosidad artificial Tipo A en el fondo, variando caudal, pendiente longitudinal y espaciamiento entre bloques de rugosidad según lo recomendado en la literatura, con el fin de comparar la efectividad de uso de rugosidad artificial con respecto a los modelos teóricos propuestos (Aivazian y Pikalov), además de proponer un potencial ajuste a sus expresiones y parámetros de diseño.

Palabras clave: CFD. Coeficiente de Chezy. Ecuación de Navier-Stokes. OpenFoam. Rugosidad artificial. Simulación numérica.



Abstract:

The importance in the design process of a structure that transports water it's essential to maintain a threshold that avoids deterioration, weathering, material dragging and structural damage; that is, optimum conditions must be guaranteed within its useful life. In the particular case of water slopes where velocity is the main factor that must be controlled, due to high values that occur, it's necessary to implement complementary works to maintain a desirable flow regime.

Nowadays there's two methods to control de flow velocity on steep canals: steps and artificial roughness. The steps method can be too expensive so it's unusual to use, however artificial roughness is the best cost efficiency alternative on construction, and can give security and stretch its lifespan.

Artificial roughness, which consists in incorporating protruding elements in the canal's perimeter, generating an additional resistance that helps to reduce the kinetic energy. Although this phenomenon has not been widely studied, there are abacuses and design equations presented mainly by authors such as Pikalov F. (1935) and Aivazian (1977); however, these theories were developed under different slope conditions, roughness block height, considering the phenomenon of aeration, and other factors; so, their validation will allow us to have greater certainty when using them for design, however, these theories have not enough information/data on the flow conditions and factors applied, there's also a lack of linked studies to validate/confirm such theories, by which is not possible to generalize a theory that allows a basis for valid artificial roughness channel design therefore is necessary/required/essential to authenticate current design.

This phenomenon is analyzed with Computational Fluid Dynamics (CFD) using OpenFOAM, a free software widely used to model three-dimensional flows that iteratively solves the Navier-Stokes governing equations through a numerical procedure based on the Finite Volume method. The application of the CFD methodology for flow analysis requires the construction of the three-dimensional model (Salome-Meca), the specification of the initial conditions, the turbulence modeling, the solving of the governing equations (OpenFoam) and, finally, the data post-processing (Paraview).

This study is based on the channel geometry of the Hydraulics and Fluid Dynamics Laboratory of the University of Cuenca, and the previous calibration of the parameters for the simulation (absolute roughness) in terms of replicating flow variables of the laboratory measurements, which were taken from previous investigations performed under the same approach. Subsequently, simulations are realized in the channel with and without artificial roughness Type A in the channel bottom, varying the flow rate and the spacing between roughness blocks as recommended in the manuals, in order to compare the effectiveness when using artificial roughness according to the proposed theoretical models (Aivazian and Pikalov), in addition to proposing a potential adjustment to their expressions and design parameters.

Keywords: CFD. Chezy coefficient. Navier Stokes equation. OpenFoam. Artificial roughnes. Numerical simulation.



Tabla de contenidos

1. INTRODUCCIÓN.	13
2. MARCO TEÓRICO.	15
2.1. Flujo en canales abiertos.	15
2.1.1. Flujo en canales con alta pendiente.	16
2.2. Rugosidad artificial.	16
2.2.1. Método de F.I. Pikalov.	17
2.2.2. Método de Aivazian.	18
2.2.3. Coeficiente de rugosidad constante para canales con rugosidad artificial según Agroskin.	19
2.2.4. Particularidades del uso de la rugosidad artificial Tipo A.	20
2.3. Modelación numérica.	23
2.3.2. Ecuaciones de gobierno de la mecánica de fluidos.	23
2.3.3. Ecuaciones de Navier Stokes.	25
2.3.4. Análisis de flujo turbulento.	25
2.3.4.1. Método RANS o ecuaciones de Navier – Stokes promediadas por Reynolds.	26
2.3.4.2. Modelos de cierre de turbulencia “dos ecuaciones”.	27
2.4. Open-source Field Operation And Manipulation (OpenFoam).	27
2.4.1. Etapa de pre-procesamiento.	28
2.4.1.1. Elaboración y validación de la malla.	28
2.4.1.2. Condiciones iniciales y de frontera.	29
2.4.2. Etapa de solucionador.	29
2.4.2.1. Número de Courant y estabilidad del modelo.	30
2.4.3. Etapa de post-procesamiento.	30
3. METODOLOGÍA	31
3.1. Configuración del modelo.	31
3.1.2. Escenarios de análisis.	31
3.1.4. Parámetros de la simulación.	32
3.1.4.1. Tiempo de simulación.	32
3.1.4.2. Condiciones iniciales y de contorno.	32
3.1.5. Simulación en OpenFoam.	34
3.1.6. Post-procesamiento en Paraview.	34
3.2. Análisis de flujo en un canal con y sin rugosidad artificial.	34
4. RESULTADOS	36
4.1. Configuración del modelo.	36
4.1.1. Calidad de la malla.	36
4.1.2. Tiempo de estabilización del flujo.	36
4.2. Análisis cualitativo de los resultados.	37
4.2.1. Hidráulica de flujo.	37
4.2.1.1. Sección transversal de flujo y distribución de velocidad.	37
4.2.1.2. Perfiles longitudinales de flujo.	38
4.2.1.3. Vectores de velocidad.	43
4.3. Análisis cuantitativo de los resultados.	51
4.3.1. Resultados para el canal normal (sin rugosidad artificial).	51
4.3.2. Resultados para el canal con rugosidad artificial.	51
4.4. Efectividad de reducción de velocidad.	52
4.5. Análisis de la expresión de Aivazian.	54



4.6. Análisis del método de Agroskin. _____	56
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____	57
5.1. Conclusiones _____	57
5.2. Recomendaciones _____	58
6. BIBLIOGRAFÍA _____	59
7. ANEXOS _____	61
Anexo 1. Teorías de diseño: Pikalov y Aivazian _____	61
Anexo 2. Configuración del modelo numérico para la simulación. _____	63
Anexo 3. Elaboración de la malla en el software Salome-Meca _____	70
Anexo 4. Simulación en OpenFoam. _____	76



Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Modelo de rugosidad artificial Tipo A (Doble Zigzag). _____ 17

Ilustración 2 Rugosidad artificial – Método de Aivazian. _____ 18

Ilustración 3 Valor de K para rugosidad artificial tipo zigzag (Método de Aivazian). _____ 19

Ilustración 4 Relación del coeficiente de rugosidad del caudal y la pendiente en flujos uniformes no aireados. _____ 20

Ilustración 5 Patrón de flujo. _____ 21

Ilustración 6 Tipos de flujo sobre superficie rugosa. _____ 21

Ilustración 7 Modelo dual $k-\omega$ SST. _____ 27

Ilustración 8 Estructura general de OpenFoam. _____ 28

Ilustración 9 Parches considerados para el modelo. _____ 32

Ilustración 10 Condiciones iniciales para las variables de interés (u, v, w y p). _____ 33

Ilustración 11 Archivo ControlDrit – Configuración para el número de Courant. _____ 34

Ilustración 12 Estabilización de flujo para un punto al inicio del canal con rugosidad artificial. 37

Ilustración 13 Estabilización de flujo para un punto al final del canal con rugosidad artificial. _ 37

Ilustración 14 Sección transversal de flujo y velocidad para el canal normal y canal con rugosidad artificial. _____ 38

Ilustración 15 Perfiles longitudinales de canales con y sin rugosidad artificial Tipo A con caudales de 9 l/s y 26 l/s con pendientes de 10 y 15%. _____ 42

Ilustración 16 Vectores de velocidad del canal con y sin rugosidad artificial Tipo A con caudal de 9l/s y pendiente longitudinal de 10%. _____ 44

Ilustración 17 Vectores de velocidad del canal con y sin rugosidad artificial Tipo A con caudal de 9l/s y pendiente longitudinal de 15%. _____ 46

Ilustración 18 Vectores de velocidad del canal con y sin rugosidad artificial Tipo A con caudal de 26l/s y pendiente longitudinal de 10%. _____ 48

Ilustración 19 Vectores de velocidad del canal con y sin rugosidad artificial Tipo A con caudal de 26l/s y pendiente longitudinal de 15%. _____ 50

Ilustración 20 Eficiencia de reducción de velocidad para espaciamiento de 7 y 8 cm para una pendiente de 10%. _____ 53

Ilustración 21 Eficiencia de reducción de velocidad para espaciamiento de 7 y 8 cm para una pendiente de 15%. _____ 53

Ilustración 22 Comparación entre el factor f de Darcy y f de Aviazian para la pendiente de 10%. 54

Ilustración 23 Comparación entre el factor f de Darcy y f de Aviazian para la pendiente de 15%. 55

Ilustración 24 Altura de los elementos de rugosidad. _____ 65

Ilustración 25 Casos para la constante de rugosidad. _____ 65

Ilustración 26 Pantalla principal de Salome. _____ 70

Ilustración 27 Ingreso de coordenadas para los puntos. _____ 70

Ilustración 28 Puntos para el canal con rugosidad artificial Tipo A. _____ 70

Ilustración 29 Crear superficies a partir de curvas. _____ 71

Ilustración 30 Curvas de la geometría. _____ 71

Ilustración 31 Crear superficies a partir de curvas. _____ 71

Ilustración 32 Superficies en el canal. _____ 71

Ilustración 33 Crear el Shell a partir de superficies. _____ 72

Ilustración 34 Shell. _____ 72

Ilustración 35 Crear el Solid a partir del Shell. _____ 72

Ilustración 36 Creación de los grupos para el sólido. _____ 73

Ilustración 37 Sólido con sus respectivos grupos. _____ 73

Ilustración 38 Herramienta para crear la malla. _____ 73

Ilustración 39 Parámetros de entrada para crear la malla a partir de un sólido. _____ 74

Ilustración 40 Tamaño máximo y mínimo de la celda para la malla. _____ 74



Ilustración 41 Creación de grupos para el mallado. _____	74
Ilustración 42 Creación del mallado en Salome-Meca. _____	75
Ilustración 43 Exportar la malla en formato compatible con OpenFoam. _____	75
Ilustración 44 Acceso a la carpeta en el terminal de Ubuntu. _____	76
Ilustración 45 Parámetro de calidad de la malla en OpenFoam. _____	76
Ilustración 46 Condición inicial de entrada de agua. _____	77
Ilustración 47 Acceder a la red de la Universidad de Cuenca. _____	78
Ilustración 48 Entorno de mobaXterm. _____	78
Ilustración 49 Acceso a Cluster mediante la dirección IP. _____	78

Índice de tablas

Tabla 1 Abaco de diseño para rugosidad artificial tipo A (Método de Pikalov). _____	18
Tabla 2 Valores de m para diferentes pendiente y alturas de rugosidad. _____	20
Tabla 3 Datos de entrada para el canal normal. _____	32
Tabla 4 Parámetros de calidad de las mallas. _____	36
Tabla 5 Calado y velocidad media para el canal normal. _____	51
Tabla 6 Calado y velocidad media para el canal con rugosidad artificial para la pendiente de 10%. _____	51
Tabla 7 Calado y velocidad media para el canal con rugosidad artificial para la pendiente de 15%. _____	52
Tabla 8 Efectividad del uso de rugosidad artificial para un espaciamiento de 7 y 8 cm para la pendiente de 10%. _____	52
Tabla 9 Efectividad del uso de rugosidad artificial para un espaciamiento de 7 y 8 cm para la pendiente de 15%. _____	53
Tabla 10 Análisis del factor de fricción f para la pendiente de 10%. _____	54
Tabla 11 Análisis del factor de fricción f para la pendiente de 15%. _____	55
Tabla 12 Variables para la Regresión lineal múltiple. _____	55
Tabla 13 Análisis del método de Agroskin para la pendiente de 10%. _____	56
Tabla 14 Análisis del método de Agroskin para la pendiente de 15%. _____	56
Tabla 15 Diseño de los bloques de rugosidad artificial " Método de Pikalov" para SO: 10%. _____	61
Tabla 16 Diseño de los bloques de rugosidad artificial "Método de Pikalov" para SO: 15%. _____	61
Tabla 17 Diseño de los bloques de rugosidad artificial " Método de Aivazian" para SO: 10%. _____	61
Tabla 18 Diseño de los bloques de rugosidad artificial " Método de Aivazian" para SO: 15%. _____	62
Tabla 19 Archivo alpha.water. _____	63
Tabla 20 Archivo "U". _____	63
Tabla 21 Archivo "p_rgh". _____	64
Tabla 22 Archivo "nut". _____	65
Tabla 23 Archivo "omega". _____	66
Tabla 24 Archivo "k". _____	66
Tabla 25 Archivo "g". _____	67
Tabla 26 Archivo "transportProperties". _____	67
Tabla 27 Archivo "turbulenceProperties". _____	67
Tabla 28 Archivo "controlDict". _____	68
Tabla 29 Archivo "setFields". _____	68
Tabla 30 Archivo decomposeParDirt. _____	79



Cláusula de Propiedad Intelectual

Jonnathan Patricio Illescas Ortega, autor/a del trabajo de titulación “Obtención de relaciones de diseño de canales con rugosidad artificial (Rugosidad Tipo A) mediante modelo numérico”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 17 de febrero de 2022.

Jonnathan Patricio Illescas Ortega

C.I: 0106392335



Cláusula de Propiedad Intelectual

Walter Geovanny Zhimnay Sánchez, autor/a del trabajo de titulación "**Obtención de relaciones de diseño de canales con rugosidad artificial (Rugosidad Tipo A) mediante modelo numérico**", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 17 de febrero de 2022.

Walter Geovanny Zhimnay Sánchez

C.I: 0106471501



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Jonnathan Patricio Illescas Ortega en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “**Obtención de relaciones de diseño de canales con rugosidad artificial (Rugosidad Tipo A) mediante modelo numérico**”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 17 de febrero de 2022.

Jonnathan Patricio Illescas Ortega

C.I: 0106392335



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Walter Geovanny Zhimnay Sánchez en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "**Obtención de relaciones de diseño de canales con rugosidad artificial (Rugosidad Tipo A) mediante modelo numérico**", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio Institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 17 de febrero de 2022.

Walter Geovanny Zhimnay Sánchez

C.I: 0106471501



AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su comprensión y apoyo incondicional a lo largo de este largo caminar.

A la directora del trabajo de titulación, Ing. Verónica Carrillo, quien demostró desde el primer día la voluntad de guiarnos en el desarrollo del presente trabajo.

Para mi compañero de titulación, Walter, por su dedicación y responsabilidad, y, sobre todo, por su apoyo desinteresado no solo en la realización de este trabajo. Agradecimiento especial al Ing. Nicolás Merchán, que nos ha brindado una asesoría desde el primer día solventando algunas dudas que se presentaban. Y a todas las personas que de una y otra forma apoyaron en la realización de este trabajo.

Jonnathan Illescas

La humildad y gratitud hacen grande al ser humano. Quisiera empezar agradeciendo a nuestra directora de trabajo de titulación Ing. Verónica Carrillo, quien amablemente nos ha sabido guiar en el desarrollo del presente. Al Ing. Nicolás Merchán, que, desde la distancia, ha sabido solventar algunas de nuestras dudas. A mi compañero de titulación, por su dedicación y esfuerzo, a mis amigos de estudio, y finalmente a toda mi familia, que ha sido la parte más importante en mi formación profesional. A todos, gracias.

Walter Zhimnay

DEDICATORIA

A mi madre quien gracias a su esfuerzo y perseverancia me ha sabido llevar por buen camino y siempre me ha apoyado incondicionalmente.

A mi padre que desde el cielo me ilumina para seguir adelante con mis proyectos.

Y a todas las personas que siempre me han brindado su apoyo y buscan mi crecimiento personal.

Jonnathan Illescas

A todas las personas que formaron parte del conocimiento adquirido y han hecho posible la realización de este trabajo, pero, en especial a mis dos madres Isabel y Lourdes, dedico con cariño el mismo. De la misma manera a mis tíos Gerardo, María, Nube, Carmen, Mariana y mis primos Valentín, Pablo, Paola, María y Guiliana.

Walter Zhimnay



1. INTRODUCCIÓN.

Desde la antigüedad, las estructuras hidráulicas dentro de la ingeniería constituyen un problema a la hora del diseño, debido a la complejidad en la modelación e incertidumbre permanente en el comportamiento que refleja la trayectoria del flujo que circula en ellas. La aplicabilidad de las teorías existentes en la hidráulica se ve limitada en varias ocasiones, ya que al ser concebidas bajo ambientes controlados donde se asume un flujo unidireccional, contraponen en muchos casos lo que en la realidad ocurre, un flujo tridimensional. Por lo tanto, es necesario mediante la experimentación, replicar los fenómenos hidráulicos y validar las hipótesis y especificaciones descritas en la teoría.

En el diseño de canales abiertos, cuencos de disipación, alcantarillas, entre otros, alojados en tierra o revestidos con hormigón, uno de los parámetros más importantes es la velocidad, tanto la velocidad mínima, a fin de verificar que no se produzca sedimentación, en el caso en el que el agua transporte material sólido, así también la velocidad máxima para evitar la erosión y deterioro de la estructura, principalmente en canales con altas pendientes mayores al 10% (Chow, 1994). Las altas velocidades representan una condición desfavorable de funcionamiento de una estructura hidráulica, ya que producen erosión, arrastre de material y deterioro estructural; como consecuencia incrementa el costo para mantenimiento y reduce la vida útil de la misma.

Una de las metodologías más usadas para reducir la velocidad de flujo en canales de alta pendiente es el uso de rugosidad artificial, la cual comprende la incorporación de bloques de impacto y direccionadores de flujo de geometría regular como: nervaduras en zigzag, bloques rectangulares, piedras gruesas colocadas sobre el perímetro completo (rugosidad completa) o sobre la parte inferior o lateral del canal (Ryabov, 1967).

Varios estudios experimentales se han desarrollado con la finalidad de observar la eficiencia en la disminución de la velocidad de los diversos tipos de rugosidad artificial (Yakntenfel'd, 1999), generándose ábacos y ecuaciones que se relacionan con el coeficiente de resistencia de flujo de Chezy "C" y Darcy "f", permitiendo replicar el diseño de este tipo de estructuras para condiciones de funcionamiento específicas. Entre los principales desarrollos destacan las teorías de diseño de E.A. Zaramin & F.I. Pikalov propuestas en 1930 y la de O. M. Aivazian en 1935. Sin embargo, Ryabov (1967) menciona que las teorías anteriormente citadas para el diseño de rugosidad artificial, han sido probadas en ambientes experimentales simplificados, pero no reflejan el comportamiento real del flujo, es decir; cuando se aplican a condiciones reales de flujo, no se reduce la velocidad a los valores proyectados.

En base al planteamiento propuesto por distintos autores, entorno a la teoría desarrollada y aplicada hasta ahora, se establece que no se estiman los valores reales de las condiciones de flujo en canales donde se implementa la rugosidad artificial, por lo tanto, es realizar un análisis integral de dichas condiciones de flujo para verificar y/o actualizar las teorías disponibles. Actualmente son pocos los estudios que detallan el comportamiento del flujo en canales con rugosidad artificial, y considerando que dependiendo de las condiciones de aplicación; como el tipo de flujo, pendiente, estructura del canal y estructura de rugosidad artificial, los desarrollos disponibles no pueden generalizarse, estos deben respaldarse con análisis adicionales que comprueben su efectividad.

Según Aivazian (1996) para el cálculo hidráulico en canales de alta pendiente con rugosidad artificial se requiere de un método completo, que en base a los estudios experimentales y su sistema desarrollado de dependencias universales e hipótesis sobre resistencias hidráulicas y turbulencia,



puedan solucionar la aproximación de los cálculos a los valores reales, buscando reducirse siempre a una operación simple sobre la base de las fórmulas de Chezy o de Darcy.

En el campo de la hidráulica, la experimentación a partir de modelos físicos ha sido una de las prácticas más empleadas desde la antigüedad para modelar fenómenos hidráulicos, mismos que constituyen una representación a escala reducida de un elemento que necesita ser analizado. Un modelo físico (modelo) debe cumplir la teoría de similitud hidráulica con la estructura en la vida real (prototipo). Cabe mencionar que, si bien los modelos físicos tienen la ventaja de reflejar el comportamiento real de un fenómeno, no permiten mayor flexibilidad al momento de representar diferentes escenarios de análisis, dado que están fundamentados en procesos constructivos, aunque no de la magnitud de la obra real, sin embargo, su construcción requiere tiempo y cualquier modificación que permita un análisis de escenarios amerita tiempos y recursos adicionales.

Una alternativa a la experimentación con modelos físicos es el uso de la modelación numérica mediante la implementación de la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés). La experimentación a través de CFD, permite emplear herramientas computacionales para resolver numéricamente las ecuaciones que gobiernan el flujo (ecuaciones de Navier – Stokes) en un dominio discretizado y proporciona una descripción espacial del flujo para visualizar y analizar su comportamiento con mayor detalle (Versteeg & Malalasekera, 2007). Cabe mencionar que, los modelos numéricos si tienen la ventaja de ser más flexibles para representar diferentes escenarios de un mismo fenómeno y obtener a detalle los resultados de las distintas variables que intervienen en cada punto del dominio.

Objetivos.

Objetivo general.

- Analizar el comportamiento de flujo de la estructura de rugosidad artificial denominada Rugosidad Artificial Tipo A mediante simulación numérica.

Objetivos específicos.

- Establecer una configuración que permita analizar las condiciones de flujo y eficiencia en la reducción de velocidad de la rugosidad artificial Tipo A.
- Realizar un análisis comparativo de las condiciones de flujo en un canal abierto con rugosidad artificial y sus respectivas condiciones en un canal sin ningún tipo de rugosidad adicional.
- Establecer correcciones a las relaciones existentes y/o nuevas relaciones, así como también potenciales ajustes a los parámetros de diseño de este tipo de estructuras para que produzcan la reducción de velocidad deseada.



2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Flujo en canales abiertos.

El flujo en canales abiertos tiene lugar cuando la fuerza motriz se da por acción de la gravedad. Por lo tanto, a diferencia del flujo en conductos cerrados, la presión sobre la superficie del líquido en canales abiertos siempre es la presión atmosférica. El análisis de flujo en canales abiertos es complejo debido a que la posición de la superficie libre puede cambiar con el tiempo y el espacio, lo que hace más difícil su análisis y modelación, además que las condiciones físicas en canales abiertos están expuestas a mayores variaciones. Este tipo de flujos se produce en ríos, canales, zanjas de drenaje, alcantarillados, cunetas y tuberías que no trabajan a sección llena (Chow, 1994).

El flujo en canales abiertos se clasifica en: uniforme o variado (espacio como criterio) y, permanente o no permanente (tiempo como criterio). El flujo uniforme permanente es el tipo de flujo fundamental que se considera en la hidráulica de canales abiertos (Chow, 1994) y se da cuando existe un equilibrio dinámico entre las fuerzas resistentes y las gravitacionales. Cuando el flujo ocurre en un canal abierto, el agua encuentra resistencia a medida que fluye aguas abajo.

El flujo uniforme tiene las siguientes características (Chow, 1994):

- Calado de flujo, velocidad media y distribución de velocidad constantes.
- Las pendientes de la línea de energía (S_f), de la superficie de agua (S_w) y del fondo del canal (S_o) son constantes e iguales. ($S_f = S_w = S_o$).

“Se ha desarrollado y publicado una gran cantidad de ecuaciones prácticas de flujo uniforme, pero ninguna de éstas cumple todas las cualidades de una buena ecuación” (Chow, 1994), las expresiones más conocidas y ampliamente utilizadas son las ecuaciones de Chezy, de Darcy-Weisbach y de Manning, basadas en valores empíricos y semi-empíricos.

- Ecuación de Chezy

Desarrollada por el ingeniero francés Antoine Chezy, es la primera expresión de flujo uniforme para canales abiertos (Chow, 1994):

$$V = C \sqrt{R_h \cdot S_f} \quad \text{Ec.1}$$

- Ecuación de Darcy-Weisbach

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{R_h \cdot S_f} \quad \text{Ec.2}$$

- Ecuación de Robert Manning

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} \sqrt{S_f} \quad \text{Ec.3}$$



Donde:

V [m/s]: Velocidad media de flujo.

C [-]: Factor de resistencia de flujo (Coeficiente de Chezy).

R_h [m]: Radio hidráulico.

S_f [m/m]: Pendiente de la línea de energía, para flujo uniforme $S_f = S_o$ (S_o : pendiente longitudinal del canal).

g [m/s²]: Aceleración de la gravedad.

f [-]: Factor de fricción de Darcy.

n [s/m^{1/3}]: Coeficiente de rugosidad de Manning.

Los factores C , f y n representan la resistencia debido a la fricción en el canal y dependen de la rugosidad superficial, nivel de agua, caudal, socavación, irregularidad, tamaño y forma en el canal (Chow, 1994).

2.1.1. Flujo en canales con alta pendiente.

Se considera “alta pendiente” a aquella con un valor mayor al 10% (Chow, 1994), donde la velocidad media de flujo por lo general es alta y está acompañada de una intensa turbulencia en régimen de flujo supercrítico o rápido. Cuando dicha velocidad alcanza cierta magnitud (6 m/s), el agua atraparé aire, produciendo un aumento en su volumen e incremento en la profundidad media de flujo. Además de la velocidad, factores como: la rugosidad del canal, distancia recorrida, sección transversal y caudal de descarga tienen efecto en la entrada de aire (Chow, 1994).

La problemática más común en canales de alta pendiente son los daños en su estructura debido a la erosión hídrica, socavación, arrastre de material y lavado de finos como consecuencia de sobrepasar la velocidad permisible. Por lo tanto, para garantizar la vida útil de la estructura durante su período de diseño se deben implementar estructuras alternas que reduzcan la velocidad.

De acuerdo a Krochin (1986), las formas constructivas más comunes empleadas para reducir la velocidad en canales con alta pendientes son:

- Flujo en forma de escalera.
- Rugosidad artificial.

El flujo en canales con alta pendiente en forma de escalera puede significar una solución cara (Krochin, 1986), sin embargo, las estructuras de rugosidad artificial constituyen un ahorro de costos en construcción y mantenimiento pues logran de igual forma un flujo deseable en el canal.

2.2. Rugosidad artificial.

Son elementos salientes en forma de bloques, barreras, depresiones, o protuberancias colocadas sobre el perímetro completo (rugosidad completa) o sobre la parte inferior o lateral de canal. Esta rugosidad produce una resistencia adicional y disipa la energía cinética, generalmente se las coloca solo en el fondo para evitar un flujo inestable en las paredes (Ryabov, 1967) (Krochin, 1986).

De acuerdo a Yakntenfel'd (1999), existen numerosos autores dedicados a la hidráulica de canales con alta pendiente tales como: I. B. Isachenko, E. A. Zamarin, F. I. Pikalov, Agroskin, M. Viparelli y O. M. Aivazian. Autores como Isachenko, Viparelli y M. Aivazyán estudiaron también el efecto de la rugosidad en la saturación de aire de un flujo de canal abierto, lo cual no fue considerado por los demás autores. Entre las teorías más usadas para el diseño de canales con rugosidad artificial están las de F. I. Pikalov y Aivazian.

Al describir la velocidad de flujo en canales con rugosidad artificial, la mayoría de los autores utilizan la ecuación de Chezy (*ver ecuación 1*) para flujo uniforme (Ryabov, 1967), en la que asocian el coeficiente de resistencia de Chezy con la resistencia de flujo debido a los bloques de rugosidad.

Existen diferentes tipos de rugosidad artificial entre las que se tienen: doble zigzag, v invertida, dados, barras continuas, entre otros. El presente estudio se enfoca en el análisis del tipo de rugosidad artificial doble zigzag, denominado Tipo A, el cual se observa en la Ilustración 2 (Krochin, 1986), para el cual se describen los métodos de diseño y sus particularidades, expuestas principalmente en Krochin (1986), Ryabov (1967) y el estudio realizado en Aivazian (1996).

- Tipo A (Doble Zigzag).

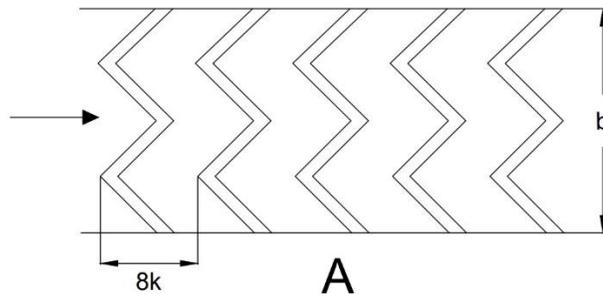


Ilustración 1 Modelo de rugosidad artificial Tipo A (Doble Zigzag).
Fuente: (Krochin, 1986).

2.2.1. Método de F.I. Pikalov.

En 1935, el profesor F.I. Pikalov realizó varios experimentos empleando diferentes tipos de rugosidad artificial, donde relaciona el coeficiente C de Chezy para flujo uniforme; mediante fórmulas empíricas, con el ancho del canal, altura de flujo y altura del bloque de rugosidad. Todos los modelos de rugosidad artificial corresponden a una adaptación de Mostkov, 1954. La ecuación de diseño para rugosidad Tipo A se expone en el libro de Diseño Hidráulico (Krochin, 1986):

$$\frac{1000}{C} = 116.1 - 6.1 \left(\frac{h}{k} \right) - 1.2 \left(\frac{b}{h} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

C [-]: Factor de resistencia de flujo (Coeficiente de Chezy)¹.

h [m]: Altura de agua sobre la rugosidad.

k [m]: Altura del bloque de rugosidad.

b [m]: Ancho del canal.

El rango de aplicabilidad de las ecuaciones propuestas para diferentes modelos de rugosidad artificial debe garantizar como condición general el cumplimiento de $h \geq 3k$ para asegurar un régimen gradual uniforme, sin embargo, en el caso de la rugosidad Tipo A se presentan únicamente ábacos de diseño desde $h \geq 5k$ hasta $h \geq 12k$, como se observa en la Tabla 1.

¹ Según lo especifica en Krochin (1986), para el uso de rugosidad artificial Tipo A y asegurar una estabilidad de flujo, el coeficiente C de Chezy debe mantenerse entre los límites: $11.85 \leq C \leq 35.09$.

Además, de acuerdo a Krochin (1986) para la obtención del coeficiente C, se debe multiplicar el valor C presentado en la tabla por un factor de corrección 1.25 para pendientes de 10% y 1.33 para pendientes entre 4% y 6%.

TIPO		h/k	Valores de C para diferentes proporciones de b/h											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A		5	11.85	12.00	12.20	12.38	12.56	12.76	12.95	13.16	13.37	13.59	13.87	14.04
		6	12.79	12.97	13.2	12.39	13.61	13.83	14.06	14.31	14.56	14.81	15.08	15.36
		7	13.85	14.08	14.33	14.58	14.84	15.11	15.38	15.67	15.97	16.29	16.61	16.96
sen α	Factor de corrección	8	15.13	15.4	15.7	16.00	16.31	16.64	16.98	17.33	17.70	18.08	18.48	18.90
		9	16.67	17.01	17.36	17.73	18.12	18.52	18.94	19.38	19.84	20.33	20.83	21.37
0.04-0.06	1.33	10	18.55	18.98	19.42	19.88	20.37	20.88	21.41	21.98	22.57	23.20	23.87	24.57
0.1	1.25	11	20.92	21.46	22.03	22.62	23.26	23.92	24.63	25.38	26.18	27.03	27.93	28.90
mayor a 0.15	1.00	12	23.98	24.69	25.45	26.25	27.1	28.01	28.99	30.03	31.15	32.36	33.67	35.09

Tabla 1 Abaco de diseño para rugosidad artificial tipo A (Método de Pikalov).

Fuente: (Krochin, 1986).

2.2.2. Método de Aivazian.

El método planteado en 1977 por I. I. Aivazian; en base a los experimentos de Bazin (Aivazian, 1996), tiene como punto de partida identificar la sección del canal en donde la velocidad de circulación supera el valor permisible como se observa en la Ilustración 2, y a partir de las ecuaciones de Chezy y Darcy – Weisbach, determinar la altura de rugosidad necesaria para asegurar la velocidad de diseño.

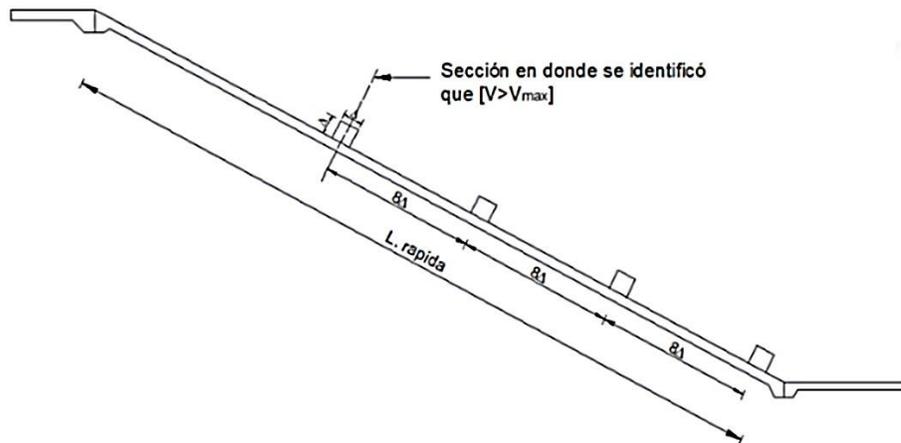


Ilustración 2 Rugosidad artificial – Método de Aivazian.

Fuente: (Proaño, 2013).

a) Cálculo del calado normal de flujo a velocidad máxima permisible.

$$h = \frac{Q}{b V_{max}} \quad \text{Ec.5}$$

Donde:

h [m]: Calado normal de flujo.

b [m]: Ancho del canal.

Q [m³/s]: Caudal de diseño.

V_{max} [m/s]: Velocidad máxima permisible.

b) Cálculo del coeficiente de fricción de Darcy (*ver ecuación 2*):

$$f = \frac{8g R_h S_f}{V_{max}^2} \quad \text{Ec.6}$$

c) Cálculo de la altura de del bloque de rugosidad, formula empírica general presentada en 1977.

$$f = 0.04 + 2.29S_f^2 + KS_f^{0.1} \frac{k}{R_h} \left(\frac{b}{P}\right)^2 \quad \text{Ec.7}$$

Donde:

R_h [m]: Radio hidráulico.

k [m]: Altura del bloque de rugosidad.

K [-]: Coeficiente que depende del tipo de bloque de rugosidad (Ilustración 3).

b [m]: Ancho del canal.

P [m]: Perímetro mojado.

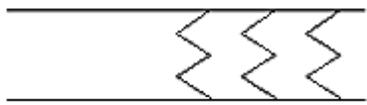
TIPO	ESQUEMA	K
5		2.0

Ilustración 3 Valor de K para rugosidad artificial tipo zigzag (Método de Aivazian).
Fuente: (Proaño, 2013).

Un nuevo estudio de Aivazian (1996), para el diseño en particular de canales con rugosidad tipo A, obtuvo una expresión derivada de la ecuación anterior (*ver ecuación 7*) pero con más experimentos de respaldo, misma que relaciona el coeficiente de Darcy, el calado de flujo y la altura de la rugosidad.

$$f = 0.035 + 3 \cdot \left(\frac{k}{h_0}\right)^{1.4} \quad \text{Ec.8}$$

Donde:

h_0 [m]: Altura normal de flujo.

k [m]: Altura de la rugosidad.

Al igual que en la metodología anterior, se debe garantizar que se cumpla la condición $h \geq 3k$ (Aivazian, 1996).

2.2.3. Coeficiente de rugosidad constante para canales con rugosidad artificial según Agroskin.

En base a las investigaciones sobre el flujo en canales con rugosidad artificial por parte de varios autores, se planteó la imposibilidad de caracterizar la rugosidad artificial por un valor constante, dado que en los experimentos se observaba que el coeficiente de rugosidad variaba con el cambio en la pendiente del canal, aun cuando el tipo y tamaño de los bloques de rugosidad se mantenían constantes (Yakntenfel'd, 1999).



Sin embargo, según Yakntenfel'd (1999), la conclusión anterior no es del todo correcta, debido a que tras los experimentos realizados por Bazin y Aivazian para flujos no aireados ($i \leq 0.1$) (Aivazian, 1996) y utilizando la ecuación de I. I. Agroskin; propuesta en 1930 para el cálculo del coeficiente de Chezy, se evidencia la posibilidad de caracterizar un valor de coeficiente de rugosidad constante “m” que no dependa de la pendiente como se observa en la Ilustración 4. La expresión de Agroskin viene dada por:

$$C = \frac{1}{m} + 17.72 \cdot \log (R_h) \quad \text{Ec.9}$$

Donde:

C [-]: Factor de resistencia de flujo (Coeficiente de Chezy).

m [-]: Coeficiente de rugosidad.

R_h [m]: Radio hidráulico.

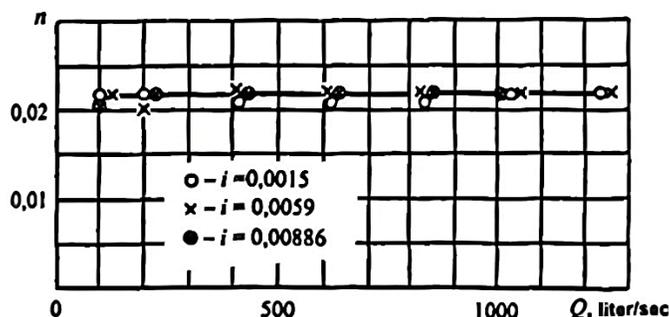


Ilustración 4 Relación del coeficiente de rugosidad del caudal y la pendiente en flujos uniformes no aireados. Fuente: (Yakntenfel'd, 1999).

De acuerdo a los experimentos de Agroskin, se obtuvo valores de “m” para diferentes condiciones de pendiente (<10%) y alturas de rugosidad, validando así la invariabilidad del coeficiente de rugosidad respecto al cambio de pendiente como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Valores de m para diferentes pendiente y alturas de rugosidad. Fuente: (Yakntenfel'd, 1999).

Altura de la rugosidad [cm]	Pendiente longitudinal del canal [m/m]	Número de experimentos	Coeficiente de rugosidad “m”
1.00	0.0512	10	0.024
	0.0955	8	0.025
0.80	0.0512	9	0.023
	0.0955	10	0.024
0.60	0.0512	7	0.022
	0.0955	3	0.022
0.40	0.0512	2	0.020
	0.0955	3	0.021

2.2.4. Particularidades del uso de la rugosidad artificial Tipo A.

- Patrón de flujo.

En ensayos de diferentes autores; sobre canales de altas pendientes con rugosidad artificial Tipo A en la solera del canal, como se aprecia en la Ilustración 5, cuando se alcanza una relativa uniformidad

en el flujo, el calado presenta un mayor valor en las partes donde existe más interferencia, según Aivazian (1996) se caracteriza a este flujo como un “movimiento cuasi-uniforme”.

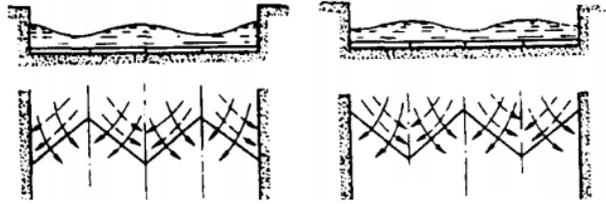


Ilustración 5 Patrón de flujo.
Fuente: (Aivazian, 1996).

- Medida del calado normal y velocidad.

Las dimensiones del flujo deben ser medidas en un sitio no confinado por nervaduras según varios autores, por el contrario, algunos como Zamarin y Pikalov expresan que éstas deben medirse en un sitio confinado por nervaduras. Aivazian (1996) recomienda medir el flujo en la zona confinada, debido a que en dicho sitio se produce el valor de velocidad más alta con el fin de verificar que no sobrepase la velocidad máxima permisible.

- Espaciamiento entre nervaduras (δ).

La pérdida de energía en un flujo turbulento sobre una superficie rugosa se debe principalmente a la formación de estelas por detrás de cada elemento de rugosidad como se evidencia en la Ilustración 6. La intensidad de tales fuentes de vorticidad en la dirección del flujo determina, en gran medida, el carácter de la turbulencia y los fenómenos de disipación de energía en el flujo (Chow, 1994).

Por consiguiente, el espaciamiento longitudinal entre los bloques constituye el parámetro de mayor importancia en el flujo en canales con incremento de rugosidad superficial. Bajo ese concepto, el flujo sobre superficies rugosas puede clasificarse en tres tipos básicos:

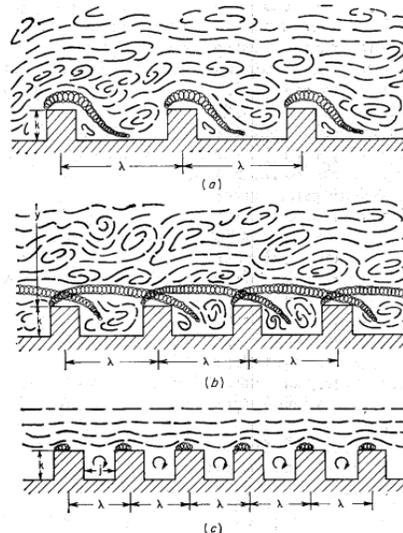


Ilustración 6 Tipos de flujo sobre superficie rugosa.
Fuente: (Chow, 1994).



- a) **Flujo con rugosidad “aislada”:** los elementos de rugosidad están muy apartados uno del otro, de tal modo, la estela y la vorticidad de cada elemento está completamente desarrollada y disipada antes de que se alcance el siguiente elemento.
- b) **Flujo con interferencia de remolinos:** los elementos de rugosidad están colocados tan cerca unos de otros, de forma que, las estelas y la vorticidad de cada elemento interfieren con aquellas desarrolladas en el siguiente elemento, dando como resultado una vorticidad intensa, compleja y una mezcla turbulenta.
- c) **Flujo cuasi liso:** los elementos de rugosidad están tan cerca uno de otro, por lo cual el flujo esencialmente se desliza por encima de la cresta de los elementos. Las ranuras entre los elementos se llenarán de agua estancada, misma que contiene remolinos estables, creando una pseudo-pared.

Tomando en cuenta que la rugosidad artificial representa un sistema de resistencias locales: expansiones y contracciones repentinas, para obtener el máximo efecto, la distancia δ entre nervaduras debe ser tal que ambos tipos de resistencia puedan ocurrir en su totalidad (Aivazian, 1996). Si la distancia entre las nervaduras es muy grande, el flujo entre ellos puede acelerarse y la rugosidad pierde su efecto de resistencia de flujo, sin embargo, si el espaciamiento es muy pequeño, el canal trabaja como si fuera liso (cuasi liso) disminuyendo la resistencia.

Los principales autores recomiendan que la separación entre bloques de rugosidad debe estar entre $7k$ (Aivazian) y $8k$ (F. Pikalov).

- Distribución de velocidad

Un análisis que se expone en (Aivazian, 1996) recomienda que para lograr una distribución de velocidad relativamente uniforme se debe garantizar el cumplimiento de:

$$\frac{k}{d} \geq 0.05 \quad \text{Ec.10}$$

$$n \geq \frac{b}{20 \cdot k} \quad \text{Ec.11}$$

Donde:

d [m]: Ancho de la banda ocupado por un zigzag.

b [m]: Ancho del canal.

k [m]: Altura de bloque de rugosidad.

n [-]: Número de zigzags.

Para cumplir la condición de uniformidad del flujo, considerando un ancho de canal de 30 cm (canal base de experimentación) y con un ancho de un zigzag de 15 cm (doble zigzag en la base), la altura mínima de los bloques de rugosidad debe ser mayor a 7.5 mm.

- Limitación del uso de rugosidad artificial en canales de alta pendiente.

En canales abiertos con alta pendiente se produce el atrapamiento de aire como consecuencia de las altas velocidades, 6 m/s (Chow, 1994), lo que implica alteraciones en las condiciones de flujo proyectadas e incertidumbre en el diseño al emplear algunas de las teorías expuestas anteriormente.



2.3. Modelación numérica.

La naturaleza del flujo real es muy compleja porque las leyes básicas que describen el movimiento completo de un fluido no se formulan, ni se manejan fácilmente desde un punto de vista matemático, siendo necesario el recurso de la experimentación (Streeter & Wyle, 1988).

2.3.1. Dinámica de fluidos computaciones (CFD).

La mecánica de fluidos; rama de la física encargada de estudiar el comportamiento de los fluidos en reposo y en movimiento, considera a la dinámica de fluidos computacional (CFD) como una rama de la dinámica de fluidos que emplea enfoques numéricos y permite abordar problemas de gran complejidad: transferencia de calor y fenómenos asociados a reacciones químicas, entre otros.

La dinámica de fluidos computacional se basa en la solución numérica de las ecuaciones de gobierno de flujo (Navier-Stokes), que constituyen una serie de ecuaciones con derivadas parciales no lineales y describen el movimiento de un fluido en un dominio discretizado, aun cuando dicho fluido es considerado un medio continuo y su descripción matemática puede realizarse mediante funciones continuas.

2.3.2. Ecuaciones de gobierno de la mecánica de fluidos.

Las ecuaciones que gobiernan la mecánica de fluidos se basan en la ley de conservación de masa, momentum y energía, estas propiedades se estudian en el interior de un volumen de control (VC).

- Ecuación general de transporte.

Las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía mantienen la misma estructura de cuatro términos:

$$\underbrace{\frac{\delta(\rho\phi)}{\delta t}}_{\text{Temporal}} + \underbrace{\nabla(\rho\phi\vec{U})}_{\text{Convectivo}} = \underbrace{\nabla(\Gamma\nabla\phi)}_{\text{Difusivo}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Fuente}} \quad \text{Ec.12}$$

Donde:

ϕ : Variable transportada, puede ser masa, cantidad de momentum o energía por unidad de masa.

Γ : Constante de difusión.

S_ϕ : Fuente, contiene los términos que no comparten las ecuaciones.

ρ : Densidad del fluido.

t : Tiempo.

∇ : Operación diferencial de gradiente.

En forma general, el término temporal corresponde a la tasa de incremento de ϕ dentro del VC y el término convectivo representa la tasa neta de flujo de ϕ debido a la convección a través de los límites del VC. Por otro lado, el término difusivo representa la tasa neta de incremento de ϕ debido a la difusión a través de los límites del VC, es decir, fenómenos que ocurren a nivel molecular, por ejemplo: debido a los efectos de la viscosidad, mientras que, el término fuente corresponde a la tasa neta de incremento de ϕ debido a las fuentes dentro del VC.

Para representar las diferentes expresiones de conservación se varían los siguientes términos de la ecuación general de transporte: la variable ϕ , el coeficiente de difusión y el término fuente.



a) Ecuación de la conservación de la masa.

Expresa que la tasa de acumulación y la tasa neta de flujo de la masa es igual dentro de un mismo volumen de control, y éstas se obtienen a partir de la ecuación general de transporte (*ver ecuación 12*) donde $\phi = 1$, el término difusivo y de fuente son nulos.

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \left[\frac{\delta(\rho u)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho w)}{\delta z} \right] = 0 \quad \text{Ec.13}$$

Donde:

u, v, w : Componentes de la velocidad en x, y, z, respectivamente.

Para un fluido estacionario incompresible, es decir; donde la densidad no cambia con respecto al tiempo se tiene que la ecuación de conservación de la masa es:

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} = 0 \quad \text{Ec.14}$$

b) Ecuación de la conservación de la cantidad de momentum.

La tasa de cambio del momentum es igual a la sumatoria de fuerzas sobre una partícula (segunda ley de Newton). En el caso de fluidos, la tasa de acumulación más la tasa neta de entrada y salida de momentum en un mismo volumen de control, es igual a la fuerza resultante que actúa sobre este volumen.

Se distinguen dos tipos de fuerzas (Versteeg & Malalasekera, 2007):

- Fuerzas superficiales: aquellas que actúan directamente sobre la superficie del volumen de control.
- Fuerzas corporales: actúan directamente sobre la masa del volumen de control.

Tras realizar el balance de esfuerzos y presiones en cada dirección y simplificando los términos, las ecuaciones de momentum para flujos incompresibles quedan definidas de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{\delta(u)}{\delta t} + \left[\frac{\delta(u^2)}{\delta x} + \frac{\delta(uv)}{\delta y} + \frac{\delta(uw)}{\delta z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\delta P}{\delta x} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\delta \tau_{xx}}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{xy}}{\delta y} + \frac{\delta \tau_{xz}}{\delta z} \right] \\ \frac{\delta(v)}{\delta t} + \left[\frac{\delta(uv)}{\delta x} + \frac{\delta(v^2)}{\delta y} + \frac{\delta(vw)}{\delta z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\delta P}{\delta y} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\delta \tau_{xy}}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{yy}}{\delta y} + \frac{\delta \tau_{yz}}{\delta z} \right] \\ \frac{\delta(w)}{\delta t} + \left[\frac{\delta(uw)}{\delta x} + \frac{\delta(vw)}{\delta y} + \frac{\delta(w^2)}{\delta z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\delta P}{\delta z} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\delta \tau_{xz}}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{yz}}{\delta y} + \frac{\delta \tau_{zz}}{\delta z} \right] - g \\ \frac{\delta(U)}{\delta t} + [\nabla(UU)] &= -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} [\nabla(\tau_{ij})] - g_z \end{aligned} \quad \text{Ec.15}$$

Donde:

P : Presión del fluido.

$U(u,v,w)$: Vector de velocidad del fluido en la dirección x, y y z.

g : Aceleración de la gravedad.

τ_{ij} : Esfuerzos cortantes.

c) Ecuación de conservación de la energía.

La ecuación de conservación de la energía se aplica cuando el gradiente de temperatura es importante tanto para flujos compresibles como incompresibles, sin embargo, para un gran número de aplicaciones de la mecánica de fluidos, la temperatura en los flujos se considera constante en todos



sus puntos, siendo innecesaria dicha expresión en el estudio de un canal a flujo abierto (Villamizar, 2014).

2.3.3. Ecuaciones de Navier Stokes.

Las ecuaciones Navier Stokes constituyen un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que describen cómo se relacionan la velocidad, presión, temperatura y densidad de un fluido en movimiento a partir de un estado inicial. Estas expresiones fueron derivadas de forma independiente por el matemático y físico irlandés Sir George Gabriel Stokes y por el ingeniero y físico francés Claude Louis Navier a principios del siglo XIX.

El conjunto de ecuaciones diferenciales en teoría podría resolverse para un problema de flujo utilizando métodos de cálculo, sin embargo, en la actualidad se emplean varios métodos de discretización como diferencias finitas, volúmenes finitos y métodos espectrales que se encuentran dentro de la CFD, donde es necesario que el orden de la discretización sea igual o mayor que el orden de la ecuación que se está discretizando.

A partir de las ecuaciones de conservación de momentum y masa, se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles:

$$\begin{aligned} \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} &= 0 \\ \frac{\delta(u)}{\delta t} + \left[\frac{\delta(u^2)}{\delta x} + \frac{\delta(uv)}{\delta y} + \frac{\delta(uw)}{\delta z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\delta P}{\delta x} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \right] \\ \frac{\delta(v)}{\delta t} + \left[\frac{\delta(uv)}{\delta x} + \frac{\delta(v^2)}{\delta y} + \frac{\delta(vw)}{\delta z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\delta P}{\delta y} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\delta^2 v}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta z^2} \right] \\ \frac{\delta(w)}{\delta t} + \left[\frac{\delta(uw)}{\delta x} + \frac{\delta(vw)}{\delta y} + \frac{\delta(w^2)}{\delta z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\delta P}{\delta z} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\delta^2 w}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 w}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 w}{\delta z^2} \right] + g \\ \frac{\delta(U)}{\delta t} + [\nabla(UU)] &= -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} [\nabla(\nabla U)] + g \end{aligned} \tag{Ec.16}$$

Donde:

μ : Viscosidad dinámica.

En la ecuación anterior existen cuatro variables independientes: las coordenadas espaciales (x,y,z) de algún dominio y el tiempo t, y cuatro variables dependientes: la presión p y los 3 componentes de la velocidad (u,v,w).

2.3.4. Análisis de flujo turbulento.

En la mecánica de fluidos se conocen dos tipos de flujo según el efecto de la viscosidad en relación con la inercia: laminar y turbulento. El flujo laminar se presenta cuando las fuerzas viscosas son muy fuertes en relación a las fuerzas inerciales, en consecuencia, sus partículas se mueven en trayectorias o líneas de corriente suaves y definidas. Por otra parte, en el flujo turbulento, las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas inerciales, apareciendo fluctuaciones rápidas de velocidad y presión y provocando que el movimiento se vuelva tridimensional e inestable.

Modelar la turbulencia es uno de los tres elementos claves en la CFD, junto con la generación de la malla y el desarrollo de algoritmos (Wilcox, 2006), dicho modelado debe ser mínimamente complejo mientras captura la esencia de los principios que rigen en ella.

La elección del modelo de turbulencia dependerá de la física del fluido, el nivel de precisión requerida, los recursos computacionales y la cantidad de tiempo disponible para la simulación (ANSYS, 2013). Dentro de los modelos usuales para simular procesos turbulentos destacan los



métodos de simulación numérica directa (DNS), de simulación de grandes vórtices (LES) y métodos basados en promediar temporalmente las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS), todos estos están integrados en el software OpenFoam.

2.3.4.1. Método RANS o ecuaciones de Navier – Stokes promediadas por Reynolds.

En el presente estudio se implementó el método RANS (‘Reynolds Averaged Navier Stokes’), este modelo numérico constituye una aproximación para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes y fue propuesto por Reynolds en el año de 1895 (Versteeg & Malalasekera, 2007).

El modelo RANS provee un enfoque computacional económico para flujos turbulentos complejos, su planteamiento se basa en considerar que cualquier variable del flujo puede descomponerse en dos partes, un valor promediado $\bar{\varphi}(\vec{x})$ y una fluctuación $\hat{\varphi}(\vec{x}, t)$ llamada descomposición de Reynolds.

Las ecuaciones del modelo RANS, se obtienen al introducir la descomposición de las variables de flujo en las ecuaciones de Navier-Stokes.

$$\begin{aligned} \frac{\delta \bar{u}}{\delta t} + \left[\frac{\delta(\bar{u}^2)}{\delta x} + \frac{\delta(\bar{u}\bar{v})}{\delta y} + \frac{\delta(\bar{u}\bar{w})}{\delta z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\delta \bar{P}}{\delta x} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\delta^2 \bar{u}}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \bar{u}}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \bar{u}}{\delta z^2} \right] + \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\delta(\overline{\rho u'^2})}{\delta x} - \frac{\delta(\overline{\rho v' u'})}{\delta y} - \frac{\delta(\overline{\rho w' u'})}{\delta z} \right] \\ \frac{\delta \bar{v}}{\delta t} + \left[\frac{\delta(\bar{u}\bar{v})}{\delta x} + \frac{\delta(\bar{v}^2)}{\delta y} + \frac{\delta(\bar{v}\bar{w})}{\delta z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\delta \bar{P}}{\delta y} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\delta^2 \bar{v}}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \bar{v}}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \bar{v}}{\delta z^2} \right] + \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\delta(\overline{\rho u' v'})}{\delta x} - \frac{\delta(\overline{\rho v'^2})}{\delta y} - \frac{\delta(\overline{\rho w' v'})}{\delta z} \right] \\ \frac{\delta \bar{w}}{\delta t} + \left[\frac{\delta(\bar{u}\bar{w})}{\delta x} + \frac{\delta(\bar{v}\bar{w})}{\delta y} + \frac{\delta(\bar{w}^2)}{\delta z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\delta \bar{P}}{\delta z} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\delta^2 \bar{w}}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \bar{w}}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \bar{w}}{\delta z^2} \right] + \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\delta(\overline{\rho u' w'})}{\delta x} - \frac{\delta(\overline{\rho v' w'})}{\delta y} - \frac{\delta(\overline{\rho w'^2})}{\delta z} \right] + g \\ \frac{\delta(\bar{U})}{\delta t} + \nabla(\bar{U}\bar{U}) &= -\frac{\nabla \bar{P}}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2[(\nabla \bar{U})] - \frac{1}{\rho} \nabla(\overline{\rho \bar{U}' \bar{U}'}) + g \end{aligned} \tag{Ec.17}$$

En la ecuación 17, aparecen términos adicionales debido a las interacciones entre varias fluctuaciones turbulentas, llamados tensores de Reynold $\overline{\rho \bar{U}' \bar{U}'}$, mismos que necesitan ser expresados en términos del campo de velocidad media (u, v, w). El modelo para aproximar el valor de los tensores de Reynolds es el Linear Eddy Viscosity, basado en la hipótesis de Boussinesq propuesta en 1877, donde sostiene que los tensores de Reynolds son proporcionales a la tasa de deformación de la velocidad promediada en el tiempo. El coeficiente de proporcionalidad es llamado viscosidad Eddy o viscosidad turbulenta “ μ_t ” (Versteeg & Malalasekera, 2007), el cual permite asociar el efecto de la turbulencia sobre un flujo medio, de la misma manera que la viscosidad molecular afecta a un flujo laminar (CFD-Online, 2016).

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\nabla u + (\nabla u)^T - \frac{1}{3} \nabla u \right) - \frac{2}{3} \rho k l \tag{Ec.18}$$

Donde:

μ_t [kg/(m·s)]: Viscosidad dinámica Eddy.

k [m^2/s^2]: Energía cinética turbulenta por unidad de masa.

I : Matriz identidad.

Y reemplazando en la ecuación 19, se obtiene la ecuación del modelo RANS para flujo incompresible:

$$\frac{\delta(U)}{\delta t} + \nabla(UU) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla^2 [(\mu + \mu_t) (\nabla U + (\nabla U)^T)] - g_z - \nabla \left(\frac{2}{3} \rho k l \right) \tag{Ec.19}$$

La viscosidad Eddy " μ_t " se determina mediante la implementación de uno de los modelos de cierre de turbulencia dentro del modelo RANS, estos modelos dependen del número de ecuaciones de transporte adicionales que se necesitan para resolver Navier-Stokes, tales como: modelos de cero ecuaciones o algebraicos de viscosidad Eddy, modelos de una ecuación y modelos de dos ecuaciones, entre otros.

2.3.4.2. Modelos de cierre de turbulencia "dos ecuaciones".

Los modelos de cierre de turbulencia a partir de modelos de dos ecuaciones han servido como base para gran parte de la investigación del modelo de turbulencia durante las últimas tres décadas (Wilcox, 2006). Éstos modelo simplifican el problema en dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades de turbulencia de flujo.

Una de las variables comunes en los modelos es la energía cinética turbulenta " k ", que representa la energía por unidad de masa de las fluctuaciones turbulentas. La segunda variable cambia según el tipo de modelo, entre ellas tenemos la disipación de energía turbulenta " ϵ " y la tasa de disipación de turbulencia específica " ω ", ambas representan la velocidad a la que la energía cinética turbulenta se convierte en energía térmica interna, ϵ respecto a unidad de volumen y ω respecto a unidad de volumen y tiempo (CFD-Online, 2016).

- Modelo de turbulencia $k - \omega$ SST (Shear Stress Transport).

El modelo $k - \omega$ SST consiste en un modelo dual, donde se utiliza el enfoque del modelo $k - \omega$ para una mejor aproximación en las partes cercanas a la pared y el modelo $k - \epsilon$ estándar en la región completamente turbulenta lejos de la pared, evitando así la imprecisión en las partes cercanas a la pared generadas por el modelo $k - \epsilon$ y la sensibilidad debido a las condiciones de flujo libre del modelo $k - \omega$, como se aprecia en la Ilustración 7.

La ecuación de transporte para $k - \omega$ SST es la misma que para el modelo $k - \omega$ estándar, salvo la incorporación de un término adicional "F1", el cual permite combinar los dos modelos $k - \omega$ y $k - \epsilon$. La función F1 varía entre 0 y 1, siendo 0 utilizado para el modelo $k - \epsilon$ y 1 para el modelo $k - \omega$.

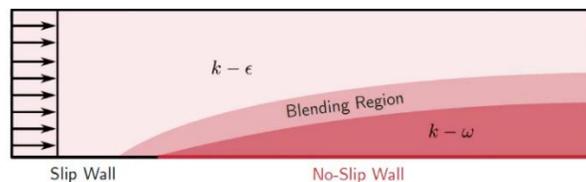


Ilustración 7 Modelo dual $k - \omega$ SST.

Fuente: (Wimshurst, [CFD] The $k - \omega$ Turbulence Model [Archivo de video], 2020).

2.4. Open-source Field Operation And Manipulation (OpenFoam).

OpenFOAM es un software gratuito y de código abierto desarrollado con lenguaje C++, que utiliza métodos numéricos para la solución de problemas de CFD; partiendo de la discretización de un dominio de interés, estableciendo condiciones iniciales y resolviendo de forma iterativa las ecuaciones de gobierno. La Ilustración 8 presenta el esquema generalizado de OpenFoam para abordar un problema consta de las siguientes etapas:

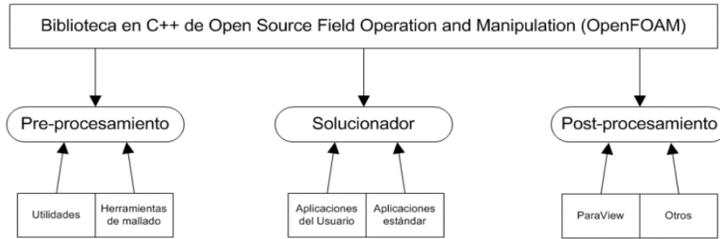


Ilustración 8 Estructura general de OpenFoam.

Fuente: (Greenshields, 2020).

La estructura de OpenFoam; donde se definen los parámetros que rigen la simulación, se conforma de tres carpetas principales, las cuales se detalla a continuación:

Dentro de la carpeta ‘0’, se localiza todo lo concerniente a las condiciones iniciales y de frontera para la simulación (caudal de entrada, rugosidad de las paredes, entrada de aire, presión, entre otros). La carpeta ‘constant’ contiene la información detallada de la malla (*polyMesh*), las propiedades físicas del sistema (*g* y *transportProperties*) y el modelo para abordar el comportamiento de la turbulencia (*turbulenceProperties*). Por último, la carpeta ‘system’ contiene archivos donde se detalla los parámetros para la resolución, tiempo de simulación, precisión de los datos, entre otros (*controlDict*), esquemas de discretización (*fvSchemes*) y método de solución y tolerancias de convergencia para las variables de interés (*fvSolution*). La configuración de cada archivo se expone en la parte de *Anexo 2*.

2.4.1. Etapa de pre-procesamiento.

La etapa de pre-procesamiento consiste en la entrada del problema de flujo al programa CFD en las que se incluyen las siguientes actividades:

- Definición de la geometría de la región de interés, dominio computacional.
- Subdivisión del dominio en un número de subdominios más pequeños que no se superponen (generación de la malla). La precisión de una solución CFD se rige por el número de celdas en la cuadrícula y en general, cuanto mayor sea el número de celdas, mejor será la precisión de la solución.
- Especificación de las condiciones iniciales y de contorno: viscosidad, densidad, rugosidad, modelos de turbulencia, caudal, tiempo de simulación, etc.

2.4.1.1. Elaboración y validación de la malla.

Las mallas se componen de nodos, caras y celdas que no se superponen, y a su vez, no contienen espacios vacíos. Estas pueden ser de tipo estructuradas (cuya retícula de celdas se constituye por una red de familias de líneas coordenadas) y no estructuradas (la red no tiene ningún patrón, ni sigue una dirección preferente), preferible para mallas complejas.

La calidad de la malla juega un papel fundamental en la estabilidad y exactitud de los cálculos numéricos (ANSYS, 2013). Durante cada ejecución, OpenFoam comprueba que la malla satisfaga los siguientes parámetros:

- a) No-ortogonalidad: de acuerdo a Villamizar (2014), para el indicador de calidad de no-ortogonalidad se especifica las siguientes condiciones:



- $\theta < 50^\circ$: la malla no necesita de ninguna corrección.
 - $50^\circ < \theta < 70^\circ$: la malla requiere de una corrección limitada, Como recomendación se deben emplear mallas de no-ortogonalidad θ menor a 70 (Greenshields, 2020).
 - $50^\circ < \theta < 80^\circ$: es posible que la simulación se realice, pero la precisión puede ser afectada, por efectos de malla.
 - $\theta > 80^\circ$: no se garantiza la convergencia de la solución.
- b) Relación de aspecto: se define como la relación entre el tamaño máximo y mínimo de una celda, un valor de 1 representa una malla ideal, OpenFoam considera alto el valor de la relación de aspecto cuando es mayor a 1000 (Villamizar, 2014). De acuerdo a Merchán (2019), la relación de aspecto no debe sobrepasar el valor de 10.

2.4.1.2. Condiciones iniciales y de frontera.

Las condiciones iniciales son necesarias para definir un problema numérico e iniciar las variables en todo el dominio, mientras que, las condiciones de frontera son aquellas que se definen en el espacio donde se da el fenómeno. Se asignan las variables según el tipo establecido para cada frontera (pared fija, entrada y salida de agua y aire). Los archivos que contienen dichas condiciones se fijan en la carpeta “0”, representando los valores en las fronteras del dominio para el tiempo $t = 0$ s.

2.4.2. Etapa de solucionador.

En esta etapa se emplean las aplicaciones del usuario, dando total libertad de crear, modificar o usar algoritmos estándar para desarrollar y resolver ecuaciones diferenciales parciales (Greenshields, 2020). Dentro de OpenFoam, la configuración para el solucionador se encuentra dentro de la carpeta “system”.

A tener un flujo bifásico (agua – aire), se utilizó el solucionador “InterFoam”, mismo que se adapta a la resolución de las ecuaciones del modelo RANS, donde el método de discretización empleado es el método de Volúmenes finitos (MFV), el cual usa ecuaciones discretizadas del tipo integral y a su vez resuelve numéricamente ecuaciones diferenciales representadas en las celdas de la malla que conforman el volumen de control.

$$\int_{VC} \frac{\delta(\rho\phi)}{\delta t} dV + \int_{VC} \nabla * (\rho\phi\vec{U}) dV = \int_{VC} \nabla * (\Gamma\nabla\phi) dV + \int_{VC} S_\phi dV \quad \text{Ec.20}$$

Donde:

dV : Diferencial de volumen.

Aplicando el teorema de divergencia de Gauss y aproximando las integrales por el método de volúmenes finitos tenemos:

$$V_{celda} * \frac{\delta\rho\phi}{\delta t} + \sum_i^{N \text{ caras del CV}} \rho_i\phi_i\vec{U}_i * A_i = \sum_i^{N \text{ caras}} \Gamma_i\nabla\phi_i * A_i + S_\phi * V_{celda} \quad \text{Ec.21}$$

A su vez ‘InterFoam’ trabaja con el método VOF (Método del volumen del fluido), mismo que predice el patrón de onda generada por el casco que avanza en la superficie libre, propuesto por Hirt y Nicholls en 1981. Este método añade una ecuación de transporte adicional para una función escalar α denominada fracción, la cual indica el contenido relativo de aire con respecto al agua en cada punto del dominio computacional (Villamizar, 2014).



$$\frac{\delta\alpha}{\delta t} + \nabla * (\vec{U}\alpha) = 0 \quad \text{Ec.22}$$

Donde α representa la fracción de volumen de la siguiente manera:

- $\alpha = 1$, para un punto (x, y, z) del fluido líquido (l) en un tiempo t .
- $\alpha = 0$, para un punto (x, y, z) del fluido gaseoso (g) en un tiempo t .
- $0 < \alpha < 1$, para un punto en la zona de transición ($l - g$), mezcla de agua y aire.

2.4.2.1. Número de Courant y estabilidad del modelo.

En la resolución numérica de ecuaciones diferenciales, la incertidumbre de aproximación a la solución exacta se puede abordar desde el punto de vista de la convergencia, sin embargo, esta no es fácil de establecer, por lo que se deben emplear otros parámetros como la estabilidad del modelo. Esta estabilidad numérica viene dada por la condición Courant, definido de la siguiente manera:

$$Co = \frac{U\Delta t}{\Delta x} < 1 \quad \text{Ec.23}$$

Valores altos del número de Courant demandan un mayor tiempo (Δt) para poder capturar con precisión las características locales del flujo. El solver '*interFoam*', a comparación de otros modelos, es un solucionador mucho más sensible al número de Courant, y de acuerdo a Villamizar (2014), es preferible que este valor no exceda de 0.5.

2.4.3. Etapa de post-procesamiento.

La etapa de post-procesamiento comprende el uso de un software de lectura de datos de OpenFOAM llamado ParaView (Villamizar, 2014), el cual consiste en un programa de visualización y análisis de datos multiplataforma de código abierto, donde se pueden crear visualizaciones para analizar datos utilizando técnicas cualitativas y cuantitativas. La exploración de datos se puede realizar de forma interactiva en 3D o mediante programación, utilizando las diferentes opciones que ofrece el software.

Paraview se ejecuta mediante el comando '*paraFoam*', mismo que convierte los datos tabulados de la simulación de OpenFoam, a un formato de animación para su representación gráfica, permitiendo observar la variación de las variables de interés para cada instante de tiempo: fracción de volumen, presión y velocidad, además de posibilitar el gráfico de campos de velocidades, cortes transversales y longitudinales para medición de variables en todo el dominio, animación 3D de las simulaciones, entre otros.



3. METODOLOGÍA

Se analizó la eficiencia del uso de rugosidad artificial Tipo A para la reducción de la velocidad de flujo en canales de alta pendiente ($\geq 10\%$), en comparación con lo expuesto en la literatura mediante simulación numérica en el software OpenFOAM (Open Fluid and Manipulation). Como etapa preliminar, se definieron los parámetros de configuración, análisis de convergencia y eficiencia del modelo. Habiéndose definido la configuración, se dio inicio a las simulaciones con el objetivo de determinar los parámetros hidráulicos y la eficiencia de la estructura de rugosidad artificial Tipo A, para ello se plantearon varios escenarios en función al caudal, pendiente longitudinal, sumergencia relativa y espaciamiento de los bloques de rugosidad, donde se observaron las principales variables que intervienen en el flujo del canal (velocidad y calado medio), tanto al inicio, en la mitad de su longitud total y al final del mismo. Posteriormente se realizó el procesamiento de los datos, determinando su correspondencia respecto a los valores proporcionados por relaciones de la literatura.

3.1. Configuración del modelo.

3.1.1. Configuración geométrica.

La configuración del modelo donde se analiza las condiciones de flujo y eficiencia de la rugosidad artificial Tipo A, mediante la técnica CFD, se basa en la geometría del canal de pendiente variable perteneciente al Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca. Para el análisis se consideró un canal de 30 cm de ancho, 30 cm de altura² y un largo de 1 m, dado que, para esa distancia, al trabajar con caudales bajos se puede alcanzar un flujo uniforme.

3.1.2. Escenarios de análisis.

Para analizar el comportamiento de los parámetros de flujo en canales con rugosidad artificial Tipo A y medir la efectividad en la disminución de la velocidad frente a lo expuesto en la literatura, se consideraron diferentes escenarios:

- Caudal: 26, 20, 17 l/s y 9l/s.
- Pendiente longitudinal: 10% y 15%.
- Altura de rugosidad: se tomó un valor de $k = 1$ cm para todos los casos, debido a que se dispone de caudales bajos y se requiere mantener una proporcionalidad con la geometría del canal.
- Espaciamiento entre bloques sugeridos por los autores Aivazian, $7k$ y Pikalov, $8k$.

3.1.3. Configuración del mallado.

La representación geométrica y el mallado de los canales con y sin rugosidad artificial se realizó en el software Salome – Meca, mismo que permite utilizar tanto mallas estructuradas y no estructuradas en dos y tres dimensiones. A su vez, estas se construyeron considerando la dirección de flujo (eje x), el ancho del canal (eje y) y la altura (eje z), definiéndose a demás, el tipo de contorno para cada frontera:

² Se disminuye la altura del canal (45cm), esto debido a que se va a experimentar con caudales bajos y permite acortar el tiempo de simulación al tener menor dominio computacional.

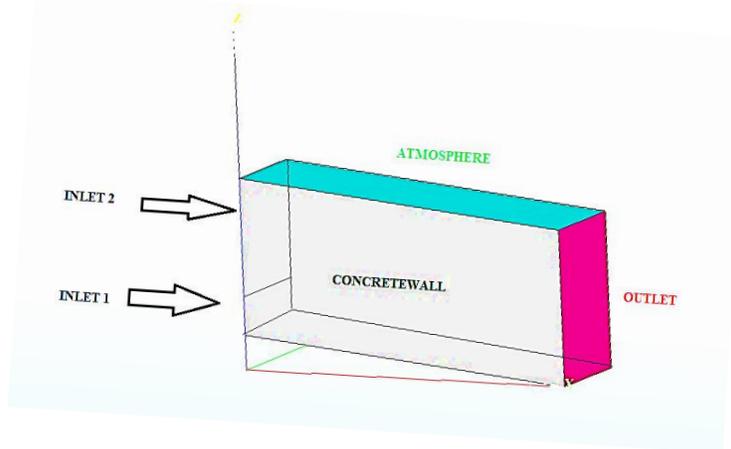


Ilustración 9 Parches considerados para el modelo.

- ‘inlet1’: Entrada de agua: Altura de flujo y velocidad para un canal normal obtenidos a partir de la ecuación de Manning, con un n de Manning característico del canal obtenido del estudio de Merchán (2019), cuyo valor es 0.0122, como se muestra en la Tabla 3.
- ‘inlet2’: Entrada de aire (Parte superior de la entrada de flujo).
- ‘concretewall’: Muros laterales y base del canal.
- ‘outlet’: Salida de agua y aire.
- ‘atmosphere’: Parte superior del canal.

Tabla 3 Datos de entrada para el canal normal.

Caudal [l/s]	26		20		17		9	
Pendiente longitudinal del canal [%]	10	15	10	15	10	15	10	15
Calado normal de flujo [m]	0.036	0.031	0.030	0.026	0.027	0.024	0.018	0.016
Velocidad media de flujo [m/s]	2.431	2.771	2.216	2.523	2.090	2.379	1.656	1.881

El tamaño de las celdas en la malla fue seleccionado en base a la recomendación de Merchán (2019), debido a la similitud del estudio, con mallas de tipo fino y un tamaño de celda no mayor a 0.5 cm. El proceso de creación de la geometría y mallado en el software Salome-Meca se presentan en el **Anexo 3**. A su vez, la calidad del mallado se midió a través de los parámetros de no-ortogonalidad y relación de aspecto, detallados en la **sección 2.4.1.1.**, mediante el comando “*checkMesh*” de OpenFoam.

3.1.4. Parámetros de la simulación.

3.1.4.1. Tiempo de simulación.

En el transcurso de la simulación, existió una variación de la velocidad hasta alcanzar un estado estacionario. De acuerdo al estudio de Merchán (2019), se recomienda un tiempo de estabilización de 4 segundos, tomando en cuenta que éste tiene como base el mismo canal y enfoque. Para corroborar dicho tiempo, se realizó un análisis de la variación de velocidad en dos puntos fijos: parte inicial y final del canal, donde se midió la velocidad de un punto en la parte central del canal a 0.6 del calado, y el tiempo transcurrido hasta que la velocidad se mantenga constante y alcance la convergencia.

3.1.4.2. Condiciones iniciales y de contorno.

A continuación, se detallan la configuración de los archivos para el tiempo “0” que corresponden a las condiciones iniciales y de contorno del modelo numérico:

a) Carpeta “0”:

- *Alphawater*: es la fracción volumétrica del líquido, de valor 1 cuando es líquido (‘inlet1’) y 0 cuando es aire (outlet y atmosphere).
- *k*: representa la energía cinética turbulenta del modelo $k - \omega SST$, de acuerdo a Berrones & Quinlligana (2017), para canales se establece un valor de 5% catalogado como turbulencia media (inlet1).
- *nut*: representa la viscosidad cinemática turbulenta donde se detallan las condiciones de rugosidad de las paredes, función de pared logarítmica (‘concretewall’), cuyos parámetros son: k_s , que representa la altura de rugosidad equivalente, con un valor promedio de 0.0035 para el canal de estudio según Merchán (2019). Así también, se debe especificar el parámetro C_s , coeficiente de rugosidad dependiente de la forma y distribución de dichos granos, con un valor típico de 0.5 (*ver Anexo 1*).
- *p_rgh*: presión modificada, debido a la interacción de dos fluidos (agua y aire) se modifica la presión sobre las paredes, además, se asume una presión total uniforme de 0 en la parte superior del canal (‘atmosphere’) durante toda la simulación y un gradiente de presión igual a 0 en la salida del canal (‘outlet’) en el tiempo $t=0$.
- *U*: Campo de velocidades, definido como velocidad inicial $V(x,y,z)$, o través del valor de caudal mediante la función *flowRateInletVelocity* a la entrada del canal (‘inlet1’), siendo este último, el parámetro hidráulico seleccionado para las simulaciones del presente estudio.

La configuración planteada de los archivos *p_rgh* y *U*, están propuestos para definir las condiciones iniciales de las 4 incógnitas de las ecuaciones de Navier-Stokes (u, v, w y p) y evitar la divergencia de la solución, se estableció el gradiente de velocidad en la entrada (‘inlet1’) y la presión cero en la salida (‘outlet’) (Villamizar, 2014) como se muestra en la Ilustración 10.

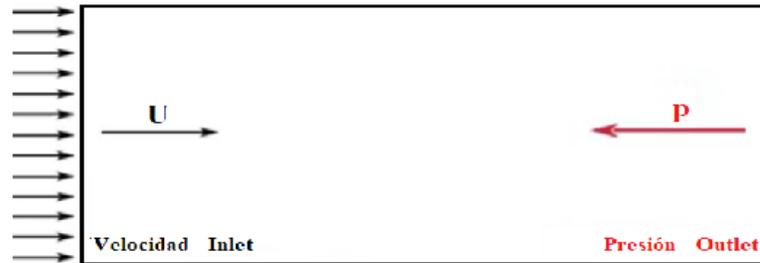


Ilustración 10 Condiciones iniciales para las variables de interés (u, v, w y p).

b) Carpeta “constant”:

- *gravedad*: aceleración de la gravedad 9.8m/s^2 en la dirección negativa del eje z .
- *transportProperties*: Fluidos newtonianos: agua (peso específico 1000kg/m^3 y viscosidad $1.0 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$) y aire (peso específico 1kg/m^3 y viscosidad $1.480 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$).
- *turbulenceProperties*: se define el modelo de turbulencia y cierre de las ecuaciones RANS, para este caso es el modelo “RASModel” y “kOmegaSST” respectivamente.

c) Carpeta “System”:



- *Control Dict*: La condición de Courant es un parámetro importante cuando se trabaja con el solucionador *interFoam* y debe presentar valores menores a 1. Para que se cumpla dicha condición, se estableció su configuración en el archivo respectivo de *OpenFoam* en la Tabla 28 (*Anexo 2*), ajustando el paso de tiempo conforme avanza la simulación de acuerdo al máximo número de Courant para todo el dominio, en especial en la zona de interfaz ($Co \leq 0.5$), como se muestra en la Ilustración 11.

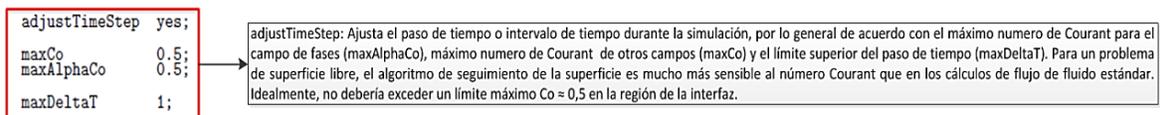


Ilustración 11 Archivo *ControlDrit* – Configuración para el número de Courant.
Fuente: (Villamizar, 2014).

3.1.5. Simulación en *OpenFoam*.

Posterior a la configuración del modelo para la simulación, se ejecuta el comando '*interFoam*' para llevar a cabo la experimentación. Sin embargo, con la finalidad de disminuir el tiempo de simulación, se realiza la partición del dominio computacional y se ejecuta la simulación en múltiples procesadores (simulación en paralelo). La configuración de la simulación en paralelo se llevó a cabo en el Cluster de la Universidad de Cuenca, proceso que se detalla en el *Anexo 4*.

3.1.6. Post-procesamiento en *Paraview*.

La medición del calado y velocidad media se obtuvieron con el software *Paraview*, sin embargo, debido a la turbulencia manifestada en mayor proporción en el canal con rugosidad artificial y dado que para los análisis posteriores, es necesario comparar dicha velocidad con el valor teórico que corresponde a un valor promedio, la velocidad registrada será un promedio de velocidades en el área de flujo; mientras que, los valores de calado serán obtenidos en punto central del canal.

Las mediciones se realizaron en la parte inicial (x:20cm), media (x: 50cm) y final (90cm) del canal, con el fin de evitar alteraciones en los resultados ocasionados por las condiciones de contorno en la parte inicial y final del canal, y de esta manera analizar el comportamiento de las variables de interés (calado y velocidad) conforme avanza el flujo. Además, para verificar que no existe la interferencia de los resultados debido a las condiciones de contorno definidas en la salida del canal y validar que la longitud de 1 m de canal es la adecuada para alcanzar un régimen permanente, se realizó una simulación extra de un canal de 1.5 m de largo, con una sección de control a 90 y 140 cm para un caudal de 20 l/s y pendiente 10%, comparando los valores de calado y velocidad entre dichas secciones de control y con la registrada para el canal de 1 m (sección de control: 90 cm).

Para visualizar de mejor manera el comportamiento del flujo en un canal con y sin rugosidad artificial, se extraen el perfil de flujo y vectores de velocidad mediante los comandos de *Paraview* (*slice*, *contour* y *glyph*), este último obtenido a través de cortes paralelos al fondo del canal y diferentes alturas como la altura de los bloques de rugosidad, mitad del calado y en la superficie de flujo libre, con la finalidad de ver la efectividad a diferentes alturas y reducción de velocidad de los bloques de rugosidad estudiados.

3.2. Análisis de flujo en un canal con y sin rugosidad artificial.

A través de los resultados obtenidos en la etapa de post-procesamiento, se registran estos valores, perfiles y vectores de velocidad de flujo en forma de tablas, graficas e ilustraciones respectivamente.



- Análisis de la efectividad de reducción de velocidad.

Para analizar la efectividad de reducción de velocidad, se parte de las velocidades obtenidas en las simulaciones para el canal con rugosidad artificial Tipo A bajo diferentes escenarios de análisis mencionados anteriormente, y de los valores teóricos de velocidad obtenidos a través de las metodologías de Pikalov y Aivazian; con ello, en relación a la velocidad del canal sin rugosidad artificial, se determina la efectividad de reducción de velocidad y se realiza un análisis comparativo entre la parte experimental y teórica.

- Análisis de las metodologías de diseño.

De acuerdo al análisis de efectividad, se selecciona la(s) teoría(s) de diseño de rugosidad artificial que más se apegan a valores experimentales, posteriormente, se realiza una comparación entre el factor de resistencia de flujo (Coeficiente C para la teoría de Pikalov y factor f para Aivazian) teórico y experimental de la(s) metodología(s) seleccionada(s) anteriormente, y de ser necesario, se propone un ajuste, mediante un análisis estadístico, en función de las variables que más influyen en el flujo como la pendiente, caudal, altura de flujo, sumergencia relativa de los bloques, etc., para que el factor de resistencia teórico y real sean idénticos.

- Método de Agroskin.

En base a la teoría de Agroskin, (*ver sección 2.2.3*), considerando los valores experimentales de velocidad media y calado registrados en el tramo final del canal con rugosidad artificial (sección de control: 90 cm), para un espaciamiento de 7 cm, dado que dicho estudio se basa en los experimentos de Aivazian, se determina el valor del coeficiente de rugosidad “m” de la *ecuación 9*, comparando dicho valor con lo expuesto en la Tabla 1 para una altura de bloque de 1 cm, con el fin de validar la hipótesis planteada en Yakhttenfel’d (1999), donde se manifiesta que existe un único coeficiente de rugosidad característico para un canal con rugosidad artificial Tipo A, que no varía con el cambio de pendiente.



4. RESULTADOS

4.1. Configuración del modelo.

A continuación, se presentan los resultados de los parámetros para la configuración del modelo:

4.1.1. Calidad de la malla.

De acuerdo a los criterios establecidos en la *sección 2.4.1.1* para la validación de la malla, en todos los casos, la no-ortogonalidad se encuentra debajo del límite recomendado < 50 , contrario a los valores de relación de aspecto, que sobrepasan el umbral establecido de 10 en el canal con rugosidad artificial. La complejidad de la configuración geométrica y el uso de mallas no estructuradas (celdas triangulares y tetraédricas) para las zonas más conflictivas (esquinas en los bloques de rugosidad), ocasionan un valor alto de relación de aspecto, sin embargo, OpenFoam valida las mallas. En la Tabla 4 se detallan los valores de no-ortogonalidad y relación de aspecto para cada malla:

Tabla 4 Parámetros de calidad de las mallas.

So [%]	Canal	δ [cm]	Q [l/s]	No-Ortogonalidad	Relación de aspecto
10	RA	7	26	16.32	10.86
	RA	8		16.39	10.57
	RA	7	20	16.10	10.77
	RA	8		16.30	10.77
	RA	7	17	16.11	10.21
	RA	8		16.33	10.20
	RA	7	9	16.09	9.99
	RA	8		16.33	10.89
15	RA	7	26	16.31	10.12
	RA	8		16.32	10.79
	RA	7	20	16.32	8.03
	RA	8		16.25	8.02
	RA	7	17	16.26	7.37
	RA	8		16.26	7.80
	RA	7	9	16.25	7.38
	RA	8		16.31	7.90
10	CN	-	26	14.47	4.98
	CN	-	20	14.56	2.61
	CN	-	17	14.67	4.53
	CN	-	9	14.65	4.63
15	CN	-	26	16.33	5.75
	CN	-	20	14.75	4.65
	CN	-	17	14.78	4.42
	CN	-	9	14.74	4.41

Nota: CN: canal normal, RA: rugosidad artificial, δ espaciamiento entre bloques.

4.1.2. Tiempo de estabilización del flujo.

Mediante un análisis de la variación de velocidad en dos puntos fijos: parte inicial y final de un canal con rugosidad artificial, presentados en la Ilustración 12 y 13, respectivamente, para un caudal de 17 l/s y pendiente longitudinal de 10%, se verificó el tiempo de 4 segundos para la simulación, dado que para la parte inicial del canal se presenta un tiempo aproximado de estabilización de 0.5s y 3.5s para la parte final.

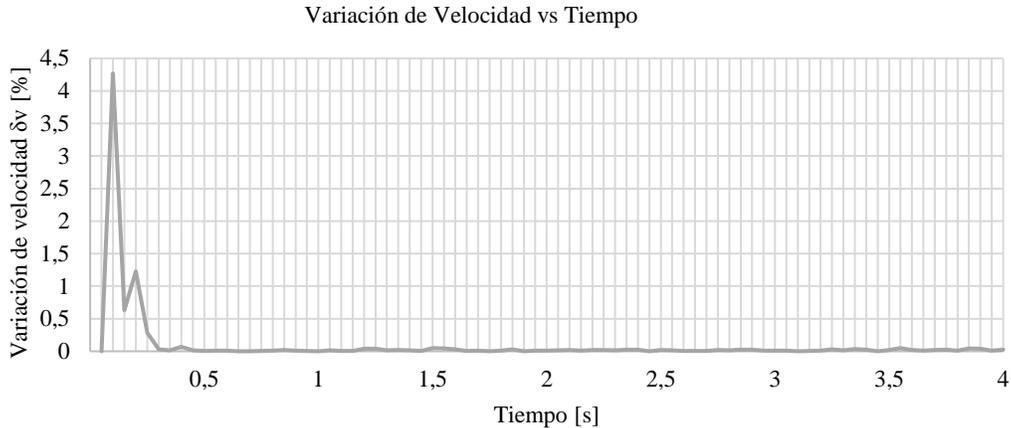


Ilustración 12 Estabilización de flujo para un punto al inicio del canal con rugosidad artificial.

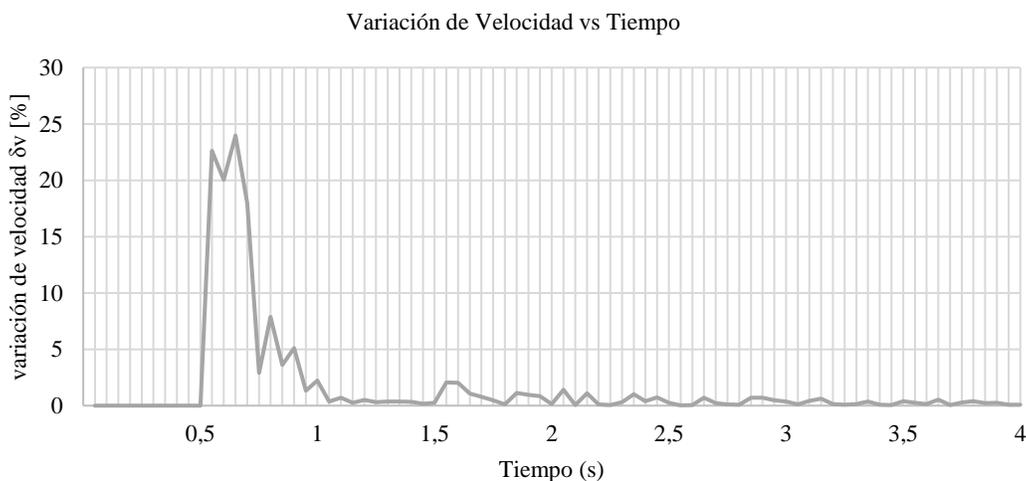


Ilustración 13 Estabilización de flujo para un punto al final del canal con rugosidad artificial.

4.2. Análisis cualitativo de los resultados.

4.2.1. Hidráulica de flujo.

Para visualizar de mejor manera el flujo en canales antes y después de implementarse los bloques de rugosidad artificial tipo A para un espaciamiento entre bloques de 7 cm, se presentan las gráficas con las secciones transversales, perfiles longitudinales de flujo y el campo de vectores de velocidad a lo largo del canal a diferentes alturas características de flujo (fondo del canal, altura de la rugosidad, altura media de flujo y superficie de flujo) para caudales de 9 y 26 l/s, y pendientes del 10 y 15%, que corresponden a los valores extremos simulados.

4.2.1.1. Sección transversal de flujo y distribución de velocidad.

En la Ilustración 14 se presenta la gráfica de la sección transversal, y su correspondiente distribución de aire y agua (primera parte) que define la ubicación de la superficie libre (línea negra) y su correspondiente distribución de velocidad (segunda parte) para un canal con y sin rugosidad artificial

tipo A, obtenida a 90 cm del inicio del canal (sección de control). La sección del canal sin rugosidad presenta un calado uniforme en toda la sección, mientras, que, para el canal con rugosidad artificial tipo A, se manifiesta un calado cuasiuniforme, y de acorde a lo expuesto en la teoría, con una altura de flujo mayor en el centro y cerca de los bordes del canal, lo que implica menores velocidades de flujo, además de zonas de calados menores entre el centro y el borde de canal, ligadas a zonas de mayor velocidad.

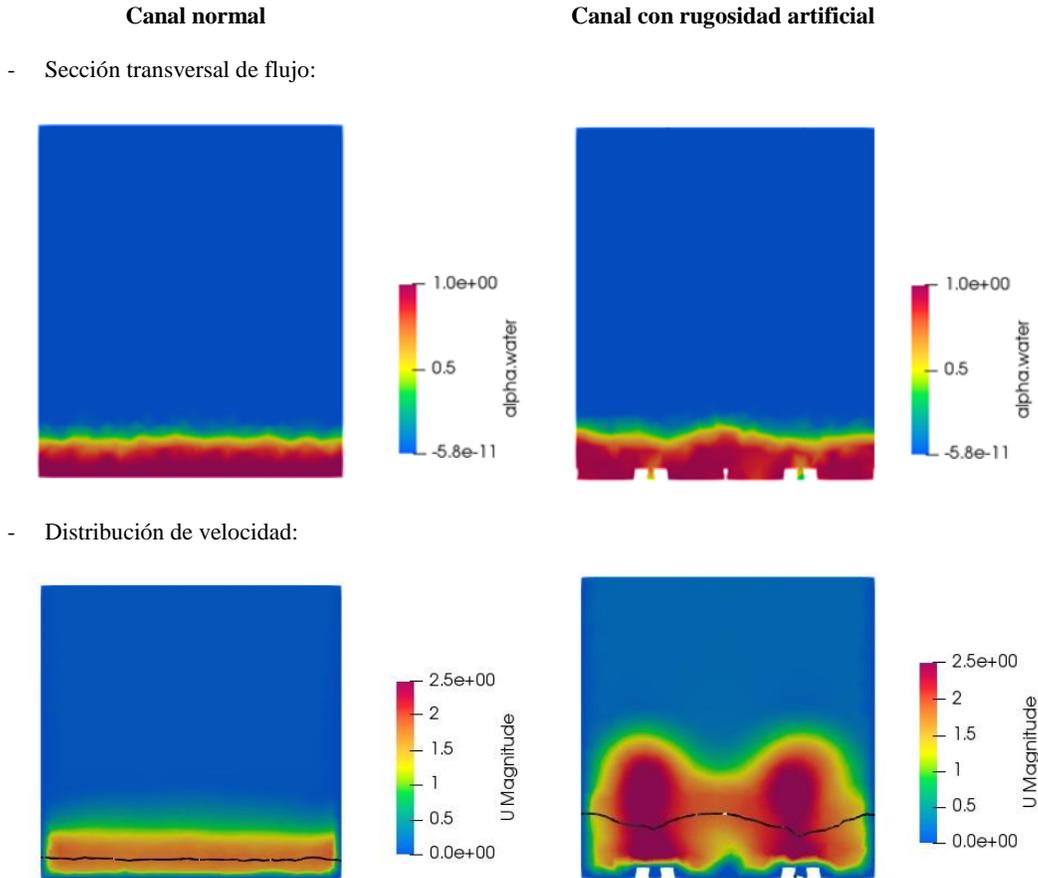


Ilustración 14 Sección transversal de flujo y velocidad para el canal normal y canal con rugosidad artificial.

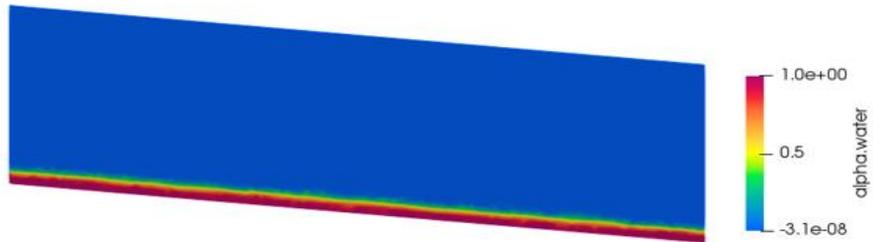
4.2.1.2. Perfiles longitudinales de flujo.

En la Ilustración 15 se presentan los perfiles de flujo obtenidos en la parte central del canal, tanto para el canal normal (sin rugosidad artificial) como para el canal con rugosidad artificial tipo A, para las combinaciones de los valores extremos de caudal y pendiente.

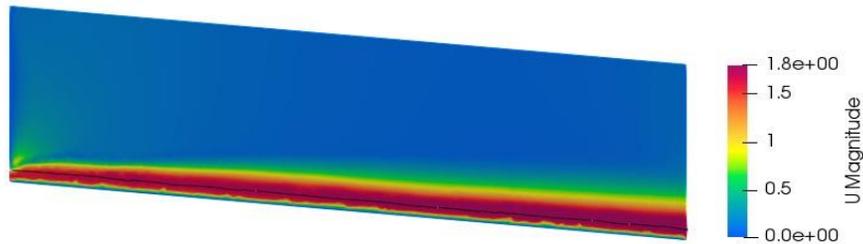


Canal normal

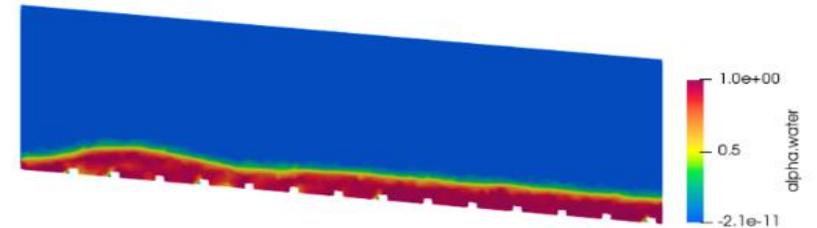
- Perfil longitudinal de flujo



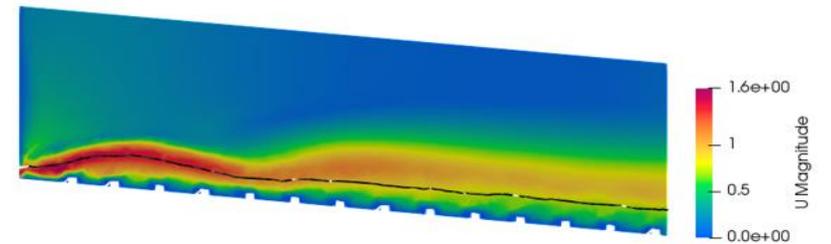
- Variación de velocidad



Canal con rugosidad artificial



Relación h/k: 3.3.



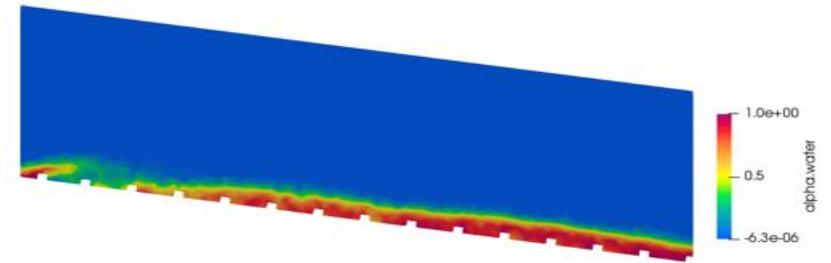
Q:9l/s, S_o:10%



Canal normal

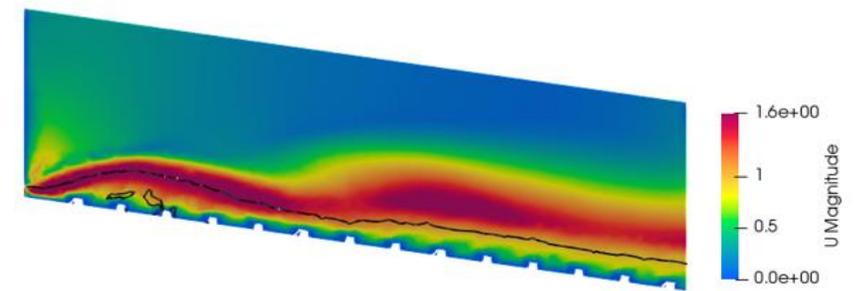
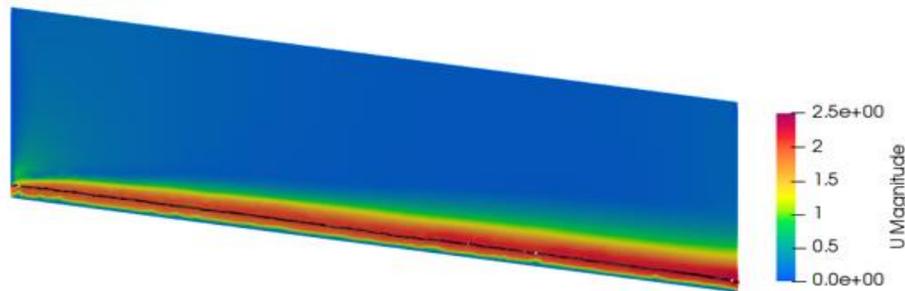
Canal con rugosidad artificial

- Perfil longitudinal de flujo



Relación h/k: 3.

- Variación de velocidad



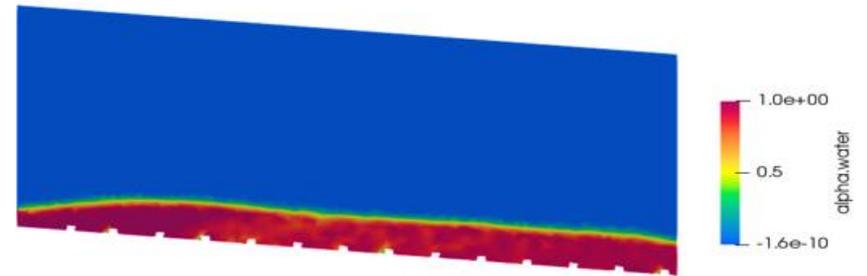
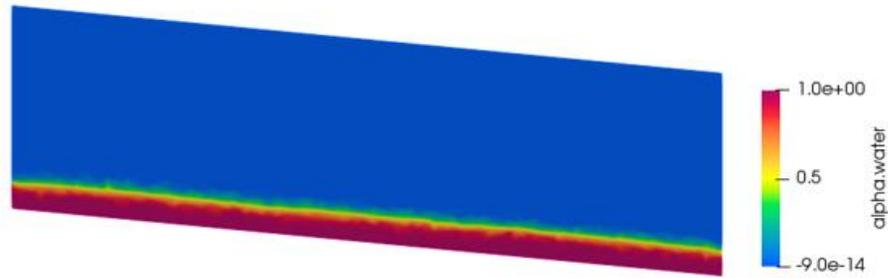
Q:9l/s, S₀:15%.



Canal normal

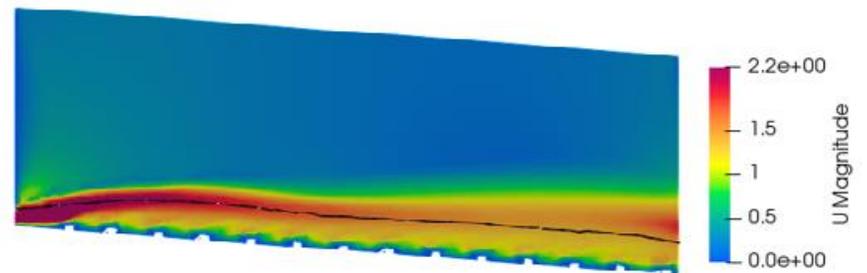
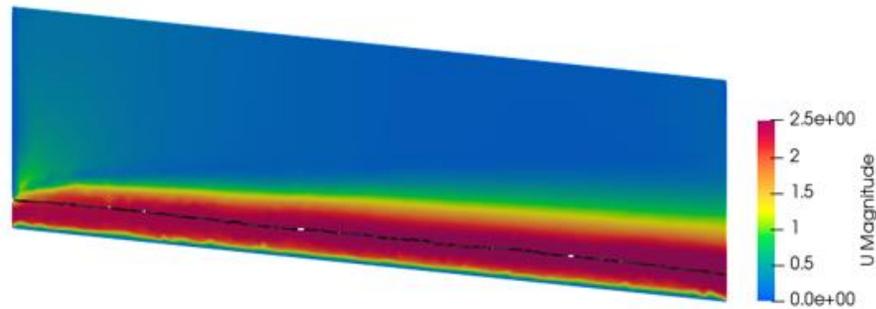
Canal con rugosidad artificial

- Perfil longitudinal de flujo



Relación h/k : 6.4.

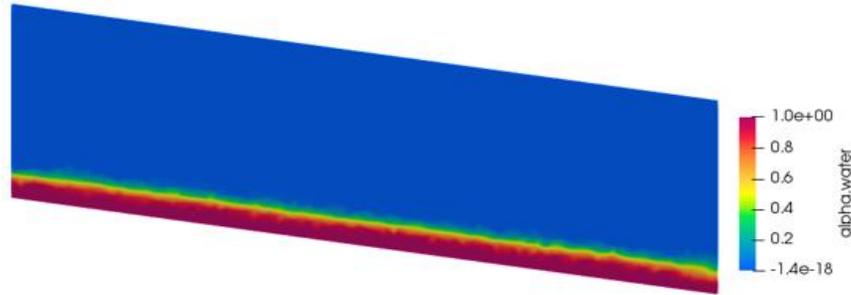
- Variación de velocidad



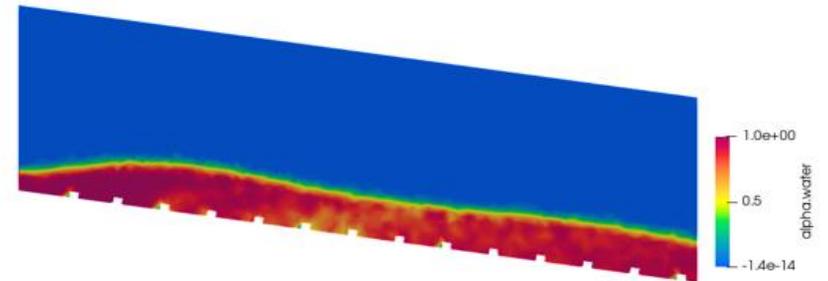
Q :26l/s, S_0 :10%.

Canal normal

- Perfil longitudinal de flujo

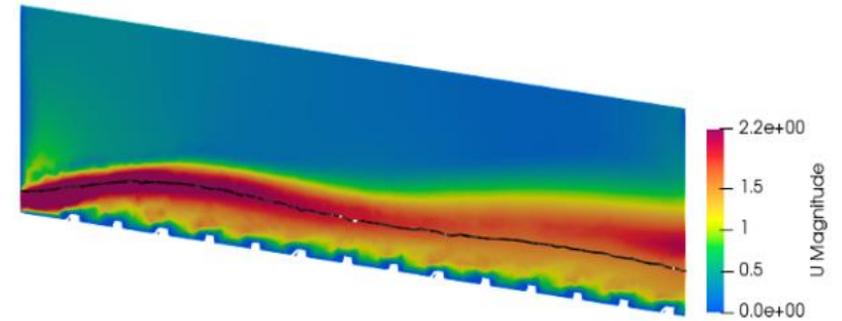
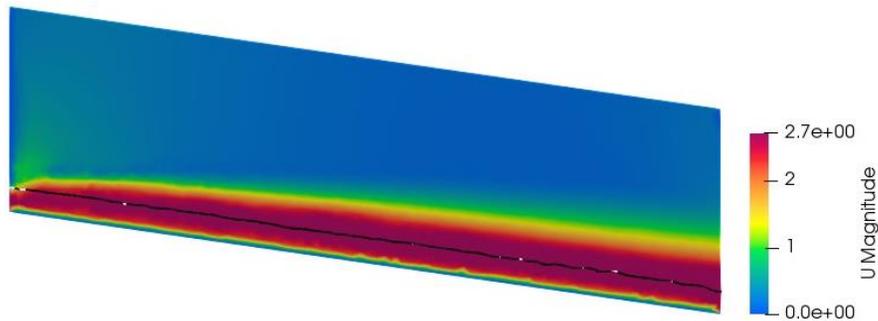


Canal con rugosidad artificial



Relación h/k: 6.2.

- Variación de velocidad



Q:26l/s, S_o:15%.

Ilustración 15 Perfiles longitudinales de canales con y sin rugosidad artificial Tipo A con caudales de 9 l/s y 26 l/s con pendientes de 10 y 15%.



En la Ilustración 15, se observa una alta inestabilidad en los canales con rugosidad artificial en comparación con los canales que no implementan los bloques de rugosidad. La inestabilidad se traduce en la formación de un “resalto hidráulico”, que se genera en los primeros 30 cm y denota una pérdida de energía. La turbulencia en canales con rugosidad artificial es mayor a medida que aumenta la pendiente, mientras que, en canales sin rugosidad, este fenómeno no es distinguible para las pendientes expuestas. Además, para el caso de una relación de $h/k < 3$ correspondiente al canal con caudal 9l/s y pendiente 15%, el flujo presenta gran turbulencia en forma de discontinuidad, acorde a la teoría.

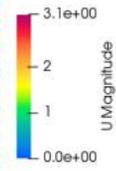
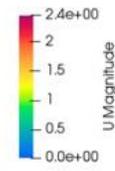
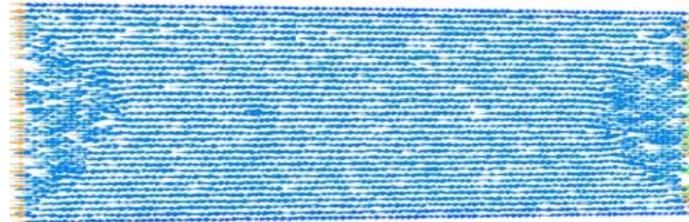
4.2.1.3. Vectores de velocidad.

Para visualizar de mejor manera la efectividad de los bloques de rugosidad a medida que la altura de flujo es mayor, se presentan los vectores de velocidad obtenidos a diferentes alturas de flujo para los caudales de 9 y 26l/s y pendiente de 10 y 15%, como se aprecia en las siguientes ilustraciones:

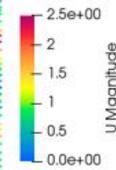
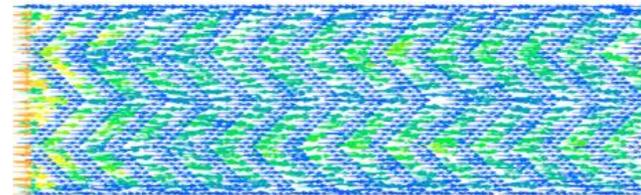
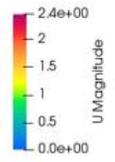
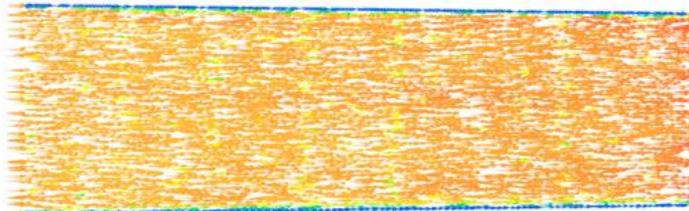
- Caudal de 9l/s – S_o : 10%.

Canal normal

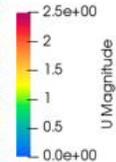
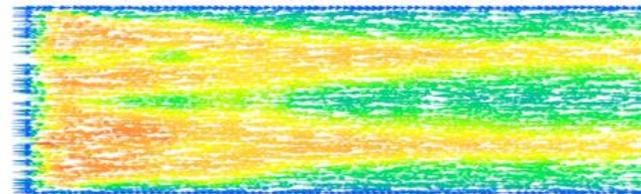
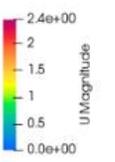
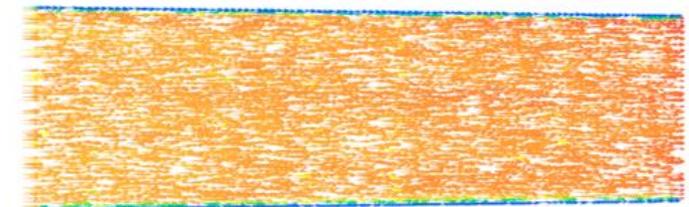
Canal con rugosidad artificial.



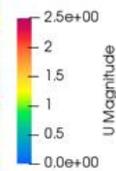
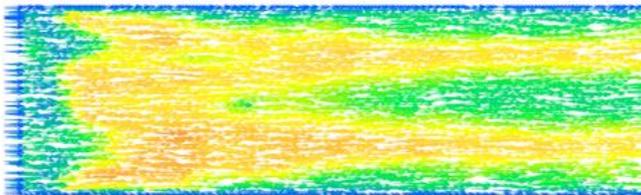
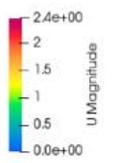
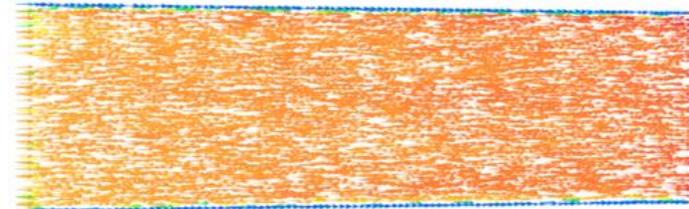
Nivel: Fondo del canal “ $y=0$ ” $Q:9l/s$, $S_0:10\%$ [Relación $h/k:0$].



Nivel: Altura del bloque “ $y=1cm$ ” $Q:9l/s$, $S_0:10\%$ [Relación $h/k:1$].



Nivel: Altura media de flujo “ $y=h/2$ ” $Q:9l/s$, $S_0:10\%$ [Relación $h/k:1.65$].



Nivel: Superficie libre “ $y=h$ ” $Q:9l/s$, $S_0:10\%$ [Relación $h/k:3.3$].

Ilustración 16 Vectores de velocidad del canal con y sin rugosidad artificial Tipo A con caudal de $9l/s$ y pendiente longitudinal de 10% .



Como se puede apreciar en la Ilustración 16, la reducción de la velocidad, a medida que aumenta la profundidad de flujo, va decreciendo, sin embargo, en la superficie libre, las velocidades del canal con rugosidad artificial son menores a las del canal normal. De esta manera, se evidencia que la efectividad de la reducción de velocidad por la implementación de rugosidad artificial tipo A, es factible en un canal con caudales y pendientes bajas como la presentada.

- Caudal de 9l/s – So: 15%.



Para una pendiente del 15%, se observa el mismo patrón evidenciado en el caso anterior para diferentes profundidades de flujo. Sin embargo, a pesar de tener el mismo caudal de análisis, los valores de la velocidad son mayores para una pendiente mayor, implicando que la efectividad de los bloques de rugosidad va disminuyendo conforme aumenta la pendiente. Además, se corrobora lo mencionado anteriormente en los perfiles longitudinales, donde para una relación h/k próxima a 3, el flujo presenta gran inestabilidad, principalmente en la parte inicial del canal.

- Caudal de 26l/s – So:10%

Canal normal

Canal con rugosidad artificial.

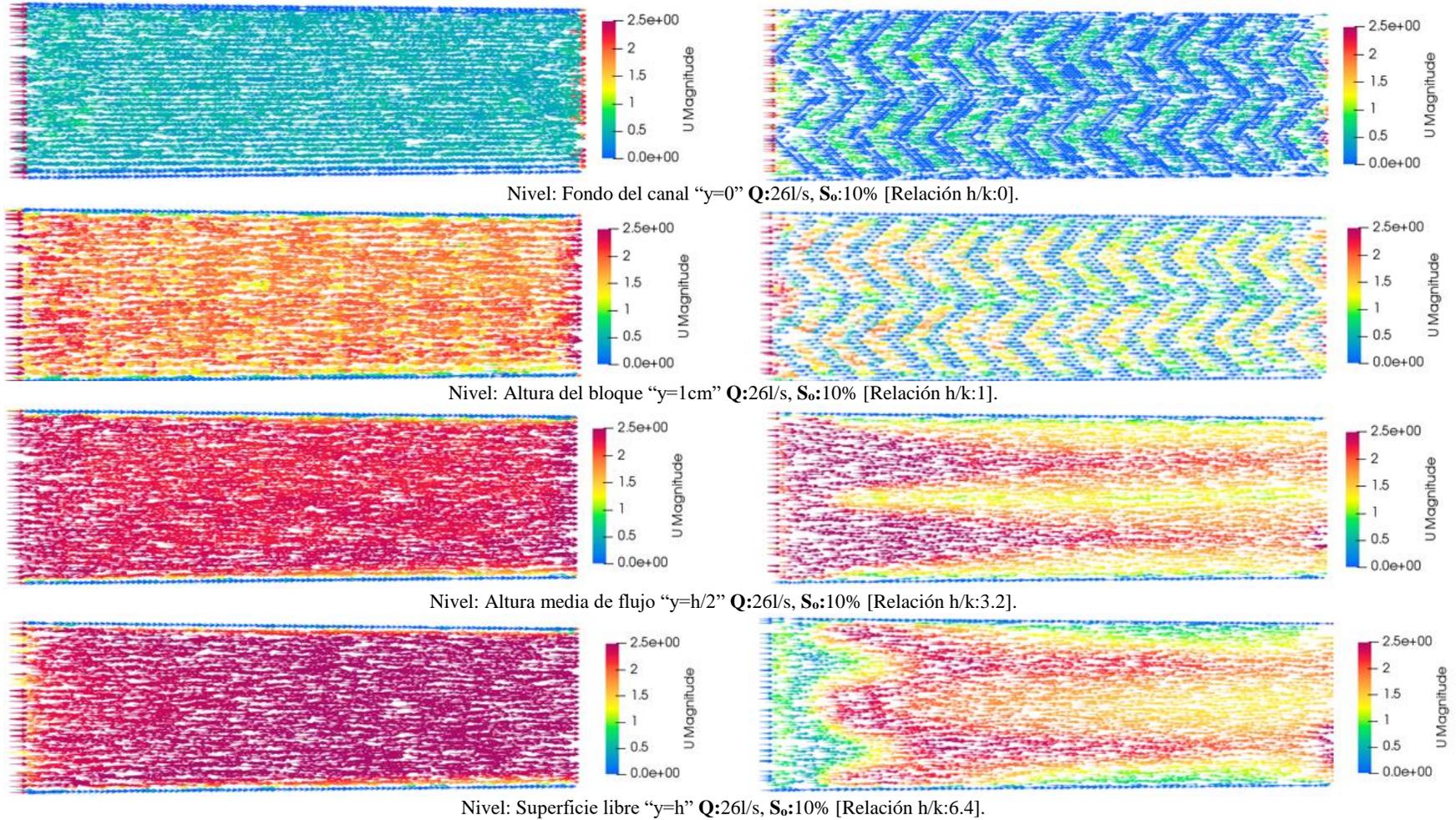


Ilustración 18 Vectores de velocidad del canal con y sin rugosidad artificial Tipo A con caudal de 26l/s y pendiente longitudinal de 10%.



En la Ilustración 18, se evidencia el mismo patrón de velocidades que en los anteriores casos a diferentes alturas de flujo. Sin embargo, la efectividad se ve reducida en comparación con la efectividad en un canal de menor caudal pero igual pendiente, como lo es el de 9 l/s de la Ilustración 17. De esta manera, podemos mencionar que la efectividad de reducción también depende del caudal, a mayores caudales, menor efectividad.

- Caudal de 26l/s – So: 15%

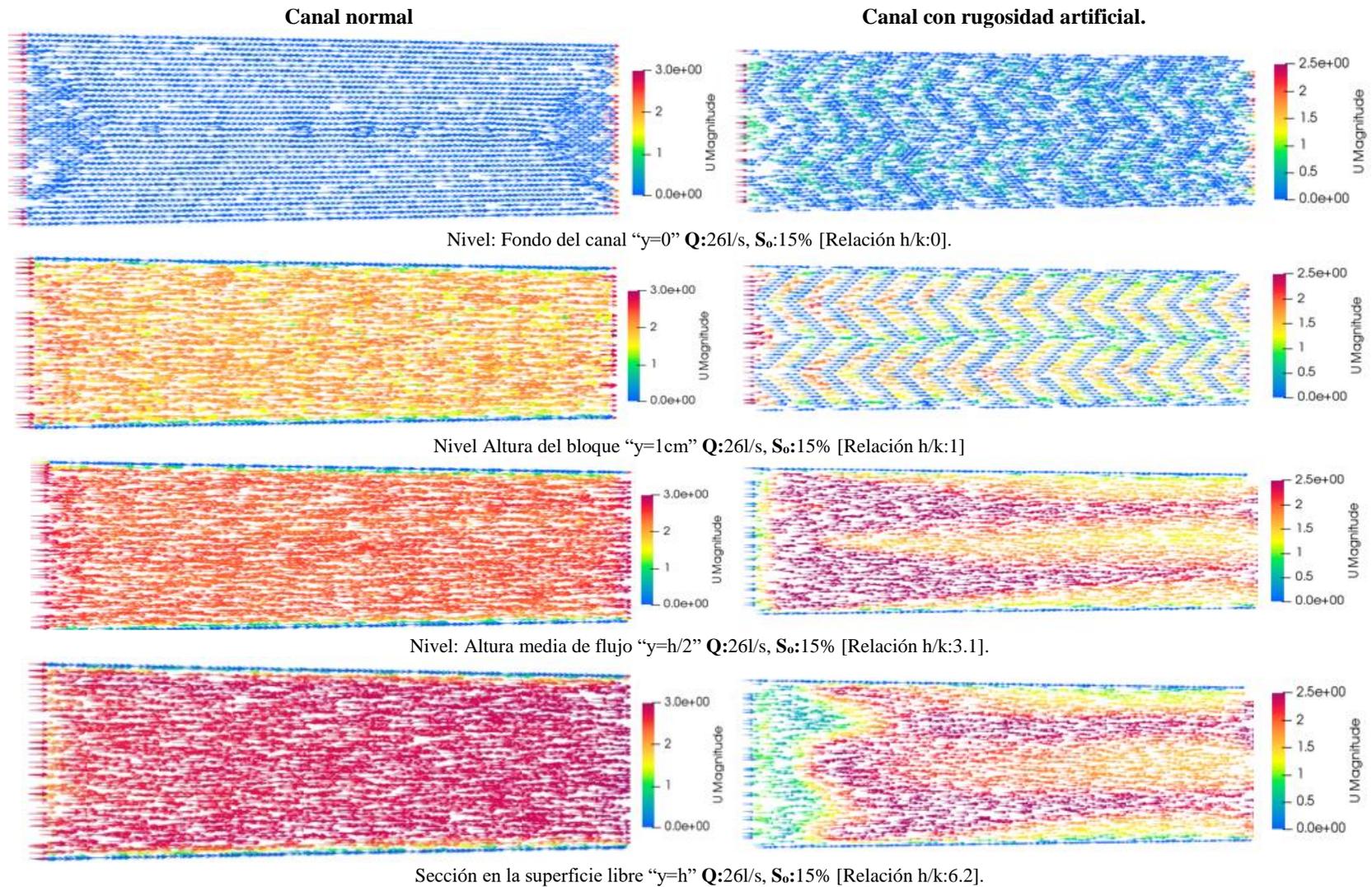


Ilustración 19 Vectores de velocidad del canal con y sin rugosidad artificial Tipo A con caudal de 26l/s y pendiente longitudinal de 15%.



Se observa nuevamente el mismo patrón de flujo que, en los anteriores casos a diferentes alturas, con la característica que, al observar la efectividad de los bloques de rugosidad, esta es la menor expuesta hasta ahora, debido al mayor caudal y pendiente. Así, se corrobora la idea que, a una mayor pendiente y caudal, la efectividad de la rugosidad artificial se reduce.

4.3. Análisis cuantitativo de los resultados.

A continuación, se presentan los resultados de las variables de interés (calado y velocidad) registrados en diferentes secciones de control para el canal con y sin rugosidad artificial.

4.3.1. Resultados para el canal normal (sin rugosidad artificial).

La Tabla 5 presenta los valores de calado y velocidad promedio del canal normal (sin rugosidad artificial) medidos en la sección de control a 90 cm del inicio del canal.

Tabla 5 Calado y velocidad media para el canal normal.

S ₀ [%]	Q [l/s]	Calado [m]	Velocidad [m/s]
10	26	0.037	2.352
	20	0.032	2.156
	17	0.027	2.038
	9	0.018	1.604
15	26	0.034	2.593
	20	0.028	2.362
	17	0.026	2.212
	9	0.017	1.768

4.3.2. Resultados para el canal con rugosidad artificial.

La Tabla 6 y 7 se presenta los valores de calado, velocidad media y relación h/k para diferentes escenarios de análisis registrados en las distintas secciones de control en el canal con rugosidad artificial Tipo A.

a) Pendiente 10%:

Tabla 6 Calado y velocidad media para el canal con rugosidad artificial para la pendiente de 10%.

Q [l/s]	Espaciamiento entre bloques [cm]	Calado [m]				Relación h/k ³	Velocidad [m/s]			
		20	50	90	140		20	50	90	140
26	δ: 7	0.075	0.069	0.074		6.4	1.876	1.617	1.417	
	δ: 8	0.071	0.069	0.076		6.6	1.840	1.528	1.312	
20	δ: 7	0.072	0.057	0.067		5.8	1.610	1.435	1.216	
	δ: 8	0.067	0.059	0.067		5.6	1.608	1.430	1.247	
	δ: 7	0.072	0.057	0.065	0.067	5.7	1.674	1.436	1.224	1.179
	δ: 8	0.067	0.057	0.066	0.066	5.6	1.655	1.414	1.235	1.181
17	δ: 7	0.075	0.052	0.064		5.4	1.460	1.366	1.053	
	δ: 8	0.062	0.056	0.060		5	1.531	1.263	1.064	
9	δ: 7	0.056	0.044	0.043		3.3	1.122	0.952	0.846	
	δ: 8	0.055	0.046	0.042		3.2	1.155	0.924	0.817	

b) Pendiente 15%:

³ Obtenida para la sección de control de 90 cm y 140 cm.



Tabla 7 Calado y velocidad media para el canal con rugosidad artificial para la pendiente de 15%.

Q [l/s]	Espaciamiento entre bloques [cm]	Calado [m]			Relación h/k^4	Velocidad [m/s]		
		20	50	90		20	50	90
26	$\delta: 7$	0.073	0.064	0.072	6.2	2.113	1.827	1.572
	$\delta: 8$	0.074	0.064	0.069	5.9	2.199	1.735	1.575
20	$\delta: 7$	0.074	0.053	0.063	5.3	1.813	1.491	1.360
	$\delta: 8$	0.068	0.058	0.067	5.7	1.812	1.543	1.347
17	$\delta: 7$	0.068	0.049	0.060	5	1.656	1.490	1.271
	$\delta: 8$	0.064	0.050	0.060	5	1.612	1.387	1.222
9	$\delta: 7$	0.044	0.031	0.040	3	1.202	1.240	0.986
	$\delta: 8$	0.050	0.039	0.042	3.2	1.137	1.068	0.971

Se evidencia que el calado y velocidad media de flujo para el canal de 1 y 1.5 m, bajo las mismas condiciones y sección de control a 90 cm, no presentan variaciones considerables, debido a que existe una diferencia promedio de 2.3% entre calados y 0.8% entre velocidades. En cuanto a comparar la sección de control anterior con la sección de control a 140 cm, existe una diferencia promedio de 1.50% entre calados y 2.1% entre velocidades, denotando que el flujo ha alcanzado un estado de régimen permanente en 1 m de recorrido.

4.4. Efectividad de reducción de velocidad.

A continuación, se presenta el análisis de la eficiencia de la incorporación de la rugosidad artificial medida a través de la reducción de velocidad antes y después de incorporar los bloques en el fondo del canal. En las Tablas 8 y 9, se compararon las velocidades obtenidas en la simulación del canal normal y el canal de rugosidad artificial con espaciamientos entre bloques de 7 cm y 8 cm, para la pendiente de 10 y 15%. Adicional a ello, se muestran las velocidades y porcentajes de reducción teórica de Pikalov y Aivazian.

a) Pendiente 10%:

Tabla 8 Efectividad del uso de rugosidad artificial para un espaciamiento de 7 y 8 cm para la pendiente de 10%.

Q [l/s]	Espaciamiento entre bloques [cm]	Velocidad del canal normal [m/s] (Exp)	Velocidad del canal con RA [m/s] (Exp)	Efectividad [%] (Exp)	Velocidad teórica (Pikalov) [m/s] ⁵	Eficiencia Teo. [%] (Pikalov)	Velocidad teórica (Aivazian) [m/s]	Eficiencia Teo. [%] (Aivazian)
26	$\delta: 7$	2.35	1.42	39.6	0.96	59.1	1.26	46.4
	$\delta: 8$		1.31	44.3				
20	$\delta: 7$	2.16	1.18	45.4	0.86	60.2	1.10	48.6
	$\delta: 8$		1.18	45.4				
17	$\delta: 7$	2.04	1.05	48.5	0.80	60.8	1.02	50.0
	$\delta: 8$		1.06	48.0				
9	$\delta: 7$	1.60	0.85	46.9	0.64	60.1	0.74	53.8
	$\delta: 8$		0.82	48.8				
Promedio:				45.9		60		50

Nota: RA: Rugosidad artificial, Exp: Experimental, Teo: Teórico.

⁴ Obtenida para la sección de control de 90 cm y 140 cm.

⁵ Valores de velocidad teórica de Pikalov y Aivazian se encuentran en la Tabla 15 – 18 (ver Anexo I).

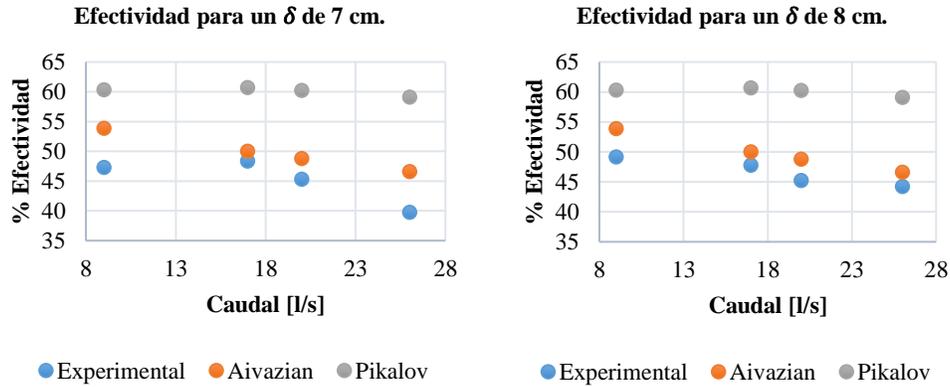


Ilustración 20 Eficiencia de reducción de velocidad para espaciamiento de 7 y 8 cm para una pendiente de 10%.

b) Pendiente 15%:

Tabla 9 Efectividad del uso de rugosidad artificial para un espaciamiento de 7 y 8 cm para la pendiente de 15%.

Q [l/s]	Espaciamiento entre bloques [cm]	Velocidad del canal normal [m/s] (Exp)	Velocidad del canal con RA [m/s] (Exp)	Efectividad [%] (Exp)	Velocidad teórica (Pikalov) [m/s]	Eficiencia Teo. [%] (Pikalov)	Velocidad teórica (Aivazian) [m/s]	Eficiencia Teo. [%] (Aivazian)
26	δ : 7	2.59	1.57	39.4	1.19	54.1	1.39	46.3
	δ : 8		1.58	39.2				
20	δ : 7	2.36	1.36	42.4	1.06	55.1	1.22	48.3
	δ : 8		1.35	42.7				
17	δ : 7	2.21	1.27	42.5	0.99	55.2	1.13	48.9
	δ : 8		1.22	44.8				
9	δ : 7	1.77	0.99	44.1	0.79	55.4	0.82	53.7
	δ : 8		0.97	45.2				
Promedio:				42.7		55		49

Nota: RA: Rugosidad artificial, Exp: Experimental, Teo: Teórico.

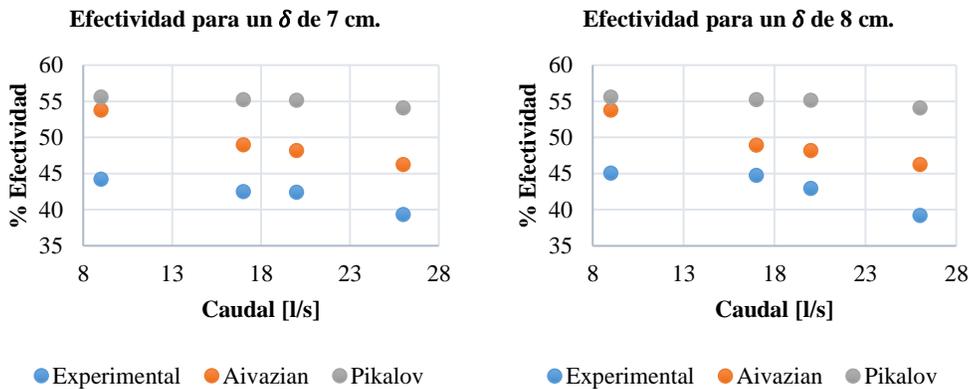


Ilustración 21 Eficiencia de reducción de velocidad para espaciamiento de 7 y 8 cm para una pendiente de 15%.

El espaciamiento entre bloques no refleja una dispersión considerable para los mismos escenarios de análisis, más, se evidencia una disminución de la efectividad de reducción de velocidad a medida que aumenta el caudal tanto para la pendiente de 10 y 15%, sin embargo, la diferencia es menor al variar la pendiente.



Además, se evidencia, que la teoría de Aivazian se apega más a la efectividad de reducción de velocidad real, sobre todo para las simulaciones con pendiente del 10%, siendo esta 3.8% mayor al valor experimental, y de la misma manera, para la pendiente de 15%, un valor mayor de 6.7%. Por otra parte, para la teoría de Pikalov existe una diferencia mayor tanto para la pendiente de 10% y 15%, siendo 10.2% y 12.4% mayores a los valores experimentales, respectivamente.

En base a la variabilidad de la eficiencia de reducción de velocidad, se omitió dicha teoría para análisis posteriores, por lo tanto, la teoría de Aivazian será tratada más a fondo a continuación.

4.5. Análisis de la expresión de Aivazian.

Para analizar a mayor detalle la correlación entre los resultados de las simulaciones y la teoría de Aivazian, en las Tablas 10 y 11 se compara el factor de fricción “*f*” obtenido a través de la ecuación de Darcy (*ver ecuación 6*) y los datos resultantes de la simulación numérica, con el factor obtenido a través de la teoría de Aivazian (*ver sección 2.2.2.*), a través de los datos obtenidos de las Tablas 6 y 7 para un espaciamiento entre bloques de 7 cm. La elección de dicho espaciamiento se basa en lo expuesto en la teoría y al no existir una diferencia notoria con el espaciamiento de 8 cm.

a) Pendiente 10%:

Tabla 10 Análisis del factor de fricción *f* para la pendiente de 10%.

Q [l/s]	Velocidad del canal con RA [m/s] (Exp)	Calado medio de flujo [m]	Radio Hidráulico [m]	f_{Darcy}	Relación k/h	$f_{Aivazian}$	Diferencia [%]
26	1.42	0.074	0.050	0.194	0.156	0.258	6.44
20	1.18	0.067	0.047	0.263	0.174	0.295	3.19
17	1.05	0.064	0.045	0.318	0.185	0.318	0.04
9	0.85	0.043	0.034	0.367	0.302	0.596	22.87

Nota: RA: Rugosidad artificial.

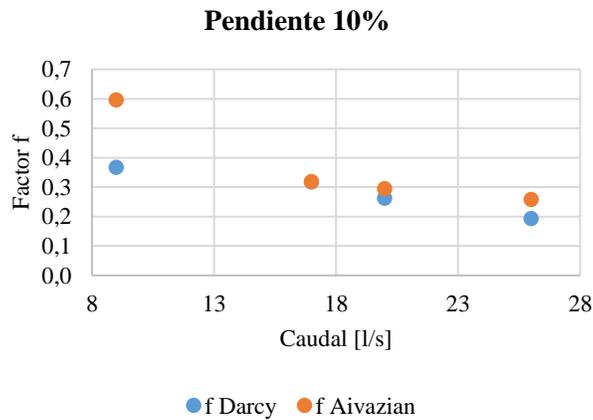


Ilustración 22 Comparación entre el factor *f* de Darcy y *f* de Aviazian para la pendiente de 10%.

b) Pendiente 15%:



Tabla 11 Análisis del factor de fricción f para la pendiente de 15%.

Q [l/s]	Velocidad del canal con RA [m/s] (Exp)	Calado medio de flujo [m]	Radio Hidráulico [m]	f_{Darcy}	Relación k/h	$f_{Aivazian}$	Diferencia [%]
26	1.57	0.072	0.049	0.231	0.162	0.269	3.77
20	1.36	0.063	0.044	0.282	0.189	0.326	4.33
17	1.27	0.061	0.043	0.315	0.197	0.344	2.89
9	0.99	0.040	0.032	0.384	0.331	0.673	28.91

Nota: RA: Rugosidad artificial.

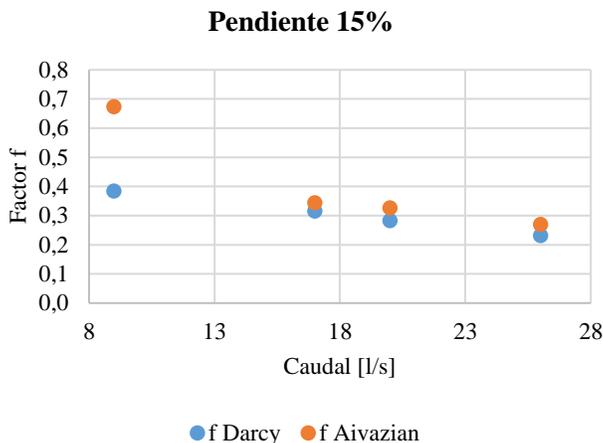


Ilustración 23 Comparación entre el factor f de Darcy y f de Aivazian para la pendiente de 15%.

De acuerdo a los resultados obtenidos para el factor f de Darcy (simulado) y Aivazian (teórico) mostrados en las Ilustraciones 22 y 23, se tiene una diferencia entre 3 y 29% comparando entre ambos valores para pendientes de 10 y 15%, por lo tanto, se propone un ajuste para obtener el factor f de Darcy real a partir del f de Aivazian, a través de una regresión lineal múltiple, que asocie a las principales variables que intervienen como: caudal, pendiente y relación k/h , presentados en la Tabla 12.

Tabla 12 Variables para la Regresión lineal múltiple.

S_o [%]	Q [l/s]	k/h	Relación $f_{Darcy} / f_{Aivazian}$
10	26	0.156	0.750
	20	0.174	0.892
	17	0.185	0.999
	9	0.302	0.616
15	26	0.162	0.860
	20	0.189	0.867
	17	0.197	0.916
	9	0.331	0.570

Al realizar la regresión lineal múltiple, se debe tener en cuenta que el coeficiente de correlación sea lo más cercano a 1 posible para obtener una buena expresión de ajuste. Para el presente caso, y las variables consideradas (Q , S_o y k/h) (ver **Tabla 12**), se obtuvo la siguiente expresión con un R^2 de 0.97.

$$\frac{f_{Darcy}}{f_{Aivazian}} = 2.20 \cdot S_o^{0.51} \cdot Q^{-1.83} \cdot (k/h)^{-3.28} \tag{Ec.24}$$



Donde:

f_{Darcy} : Factor f de Darcy.

$f_{Aivazian}$: Factor f de Aivazian (*ver ecuación 8*).

S_o [m/m]: Pendiente longitudinal del canal.

k [m]: Altura de la rugosidad.

h [m]: Altura de flujo sobre la rugosidad.

Q [l/s]: Caudal de diseño.

4.6. Análisis del método de Agroskin.

En las Tablas 13 y 14, se presenta el cálculo del coeficiente de rugosidad “m” de la teoría de Agroskin en base a los datos obtenidos de velocidad media y calado, registrados en la sección de control a 90 cm para un espaciamiento entre bloques de 7 cm, valores registrados en las Tablas 6 y 7.

a) Pendiente 10%:

Tabla 13 Análisis del método de Agroskin para la pendiente de 10%.

Caudal [l/s]	Altura de flujo total [m]	Radio hidráulico [m]	Velocidad media [m/s]	Coefficiente de Chezy	m de rugosidad
26	0.074	0.050	1.417	20.131	0.023
20	0.067	0.047	1.179	17.283	0.024
17	0.064	0.045	1.053	15.717	0.025
9	0.043	0.033	0.846	14.616	0.025
Promedio:					0.025

b) Pendiente 15%:

Tabla 14 Análisis del método de Agroskin para la pendiente de 15%.

Caudal [l/s]	Altura de flujo total [m]	Radio hidráulico [m]	Velocidad media [m/s]	Coefficiente de Chezy	m de rugosidad
26	0.072	0.049	1.572	18.419	0.024
20	0.063	0.044	1.360	16.669	0.025
17	0.061	0.043	1.271	15.786	0.025
9	0.040	0.032	0.986	14.299	0.025
Promedio:					0.025

De acuerdo a los resultados, existe un valor constante para el coeficiente de rugosidad “m” de 0.025 tanto para la pendiente de 10% y 15%, que caracteriza al tipo de rugosidad artificial zigzag para el método de diseño de Agroskin, de esta manera, se observa la independencia del coeficiente de rugosidad con respecto al cambio de pendiente y se sustentan los valores de “m” expuestos en la Tabla 1 para la misma altura de rugosidad, aunque dichos estudios de respaldo se basan en canales no aireados. (<10%).



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dentro del presente estudio se plantearon como objetivos: realizar una simulación numérica de un canal de alta pendiente con rugosidad artificial, utilizando el modelo de rugosidad tipo A, sus particularidades y restricciones propuestas en la literatura, además de determinar su efectividad en la reducción de la velocidad y proponer ajustes a los parámetros de diseño existentes.

5.1. Conclusiones

La configuración del modelo para analizar las condiciones de flujo para un canal con rugosidad artificial tipo A, está basada en un modelo físico de un canal abierto, con ancho de 30 cm, altura de 30 cm y largo de 1 m. En este modelo, la experimentación se llevó a cabo bajo diferentes escenarios de flujo, caudales entre 9 y 26 l/s, pendientes de 10 y 15% y altura de bloque de rugosidad de 1 cm, los cuales permitieron analizar su comportamiento y medir la reducción de la velocidad, así también verificar el cumplimiento de las diferentes hipótesis de diseño propuestas en las teorías: relación mayor a 3 entre calado y altura de rugosidad, espaciamiento entre bloques de 7 y 8 veces la altura de la rugosidad. El estudio del fenómeno se realizó a través de simulaciones numéricas basadas en la dinámica de fluidos computacional (CFD).

Al presentarse en el modelo un flujo turbulento para un fluido incompresible y sumado a esto la interacción del agua con el aire, la técnica CFD desarrollada en OpenFoam, aborda el modelamiento de dicho fenómeno a través del solucionador de las ecuaciones de gobierno RANS (*interFoam*). Este solucionador trabaja para dos fluidos incompresibles, y a su vez, con la elección del modelo de turbulencia $k - \omega SST$, que combina las ventajas de los modelos $k - e$ y $k - \omega$ en las zonas de flujo libre y cercanas a la pared respectivamente, garantizando una mejor representación del flujo en todo el dominio. La medición de las variables de interés fue realizada a través del software de post-procesamiento Paraview, mismo que permitió el uso de múltiples herramientas para presentar de varias maneras los resultados, y así poder analizar las correlaciones de las diferentes variables: pendiente, caudal, velocidad media de flujo, efectividad de reducción de la velocidad.

Dentro de la configuración del modelo, uno de los parámetros más importantes es el tiempo de simulación, que, de acuerdo a los resultados obtenidos de la variación de velocidad respecto al tiempo, se establece un tiempo mínimo de simulación de 4 segundos hasta la estabilización del flujo.

La principal diferencia entre el flujo en un canal con y sin rugosidad artificial, radica en su comportamiento, siendo el flujo en un canal con rugosidad artificial, más turbulento e inestable, por la presencia de los bloques de rugosidad. Consecuencia de dicha turbulencia, para las diferentes condiciones de flujo, la sección del canal presenta un calado cuasiuniforme, acorde a lo expuesto en la teoría, donde existe mayor reducción de velocidad en la parte central y en los bordes del canal (calados mayores), a diferencia de la parte entre el centro y el borde, cuya región es la más crítica a la hora del diseño estructural de los bloques, debido a las altas velocidades que se presentan.

Se observa que la incorporación de rugosidad artificial trae consigo la formación de un resalto hidráulico al inicio del flujo, consecuencia del aumento de la rugosidad (aumento de resistencia y consecuente aumento de calado), lo que implica una pérdida notable de energía. El resalto hidráulico se desarrolla aproximadamente dentro de los primeros 30 cm para todos los casos, y posterior a ello, se alcanza una relativa uniformidad de flujo aguas abajo. Por otro lado, el flujo en un canal sin rugosidad artificial presenta una uniformidad en el calado, con valores idénticos en toda la sección de flujo, con un régimen de flujo permanente, casi desde el inicio del canal.



En el análisis de la implementación de la rugosidad artificial tipo A, el parámetro principal que se debe medir es la efectividad de reducción de la velocidad, y de acuerdo a los resultados, esta efectividad es de alrededor del 45.9% y 42.7% para pendientes de 10 y 15 % respectivamente, menores a los valores teóricos de Aivazian, 50% y 49% y de Pikalov 60% y 55% para las mismas pendientes, lo que denota una dependencia de la efectividad de la reducción de velocidad frente al cambio de pendiente y caudal, que conforme aumentan, disminuye la efectividad, la cual es más sensible a la variación de caudal, más no para diferentes espaciamientos entre bloques.

En base a los resultados de efectividad de reducción de velocidad experimentales frente a los valores teóricos, la teoría de Aivazian presenta menor diferencia en comparación a Pikalov, sin embargo, la variación para dichos resultados aumenta a medida que se incrementa la pendiente, posiblemente debido a la alta turbulencia, por lo tanto, la teoría de Aivazian es la que mejor se asemeja a la experimentación. A raíz de dicha aseveración y el análisis de los resultados obtenidos, se propone un ajuste a la expresión de diseño propuesta por este autor para la obtención del factor f de Darcy a través de las variables: caudal, pendiente y altura de flujo, misma que se presenta en la ecuación 24. Si bien los resultados del presente estudio representan valores preliminares debido a que el análisis realizado es de carácter exploratorio ya que no se realizaron simulaciones en número necesario para definir una teoría más general, los resultados obtenidos son alentadores y se constituyen en el punto de partida para el desarrollo de un análisis más completo.

Otro parámetro de diseño a tomar en cuenta es la relación h/k , que de acuerdo a la gráfica de perfiles de flujo y vectores de velocidad para relaciones de $h/k < 3$ (caudal 9 l/s y pendiente 15), se presenta una alta inestabilidad y discontinuidad en el flujo, además de existir mayor variabilidad en los resultados experimentales en comparación a los teóricos, apoyando a la hipótesis de que las fórmulas de diseño no son apropiadas en esta condición. Por el contrario, para valores de relación h/k mayores a 3, existe una uniformidad en el flujo y menor variabilidad en los resultados experimentales frente a los teóricos, sin embargo, se evidencia una pérdida de efectividad de reducción de la velocidad conforme aumenta la altura de flujo, siendo más notoria a partir de su altura media, donde el efecto de los bloques se vuelve despreciable.

Adicionalmente, basado en lo que propone Agroskin, se ha considerado la posibilidad de encontrar un coeficiente de rugosidad constante “ m ” para el tipo de rugosidad artificial tipo A, donde los valores obtenidos para este coeficiente resultan similares respecto al cambio de pendiente (10 y 15%), con un valor de 0.025, corroborando lo expuesto en la teoría (*ver Tabla 2*), sin embargo, usar esta metodología de diseño es comparable a usar la teoría de Aivazian, ya que se derivan del mismo muestreo de estudio, por lo tanto se puede utilizar como alternativa de diseño, en especial para pendientes de $\leq 10\%$.

5.2. Recomendaciones

Tras realizar varias simulaciones numéricas, con la finalidad de obtener y validar las relaciones de diseño para canales con rugosidad artificial tipo A, y bajo el alcance del estudio, se recomienda corroborar los presentes ensayos realizados a partir de simulación numérica mediante una validación experimental, misma que debería abarcar iguales condiciones y analizar todos los factores que intervienen en el flujo. Además, es necesario ampliar el rango de experimentación, con la finalidad de contemplar mayores caudales y relaciones h/k , incluyendo pendientes dentro del rango de 10 y 15% y de esta manera corroborar las expresiones expuestas en la teoría, así como la expresión de ajuste para el método Aivazian propuesta en el presente estudio. Adicional, se debe realizar simulaciones con espaciamiento entre bloques mayor o menor a los establecidos en la teoría, y comparar el cambio de la efectividad al variar este parámetro geométrico del canal.



6. BIBLIOGRAFÍA

- Aivazian, O. (1996). New investigations and new method of hydraulic calculation of chutes with intensified roughness. *Hydrotechnical Construction*, 30(6), 335-356.
- Anonimo. (s.f.). *Flujo en canales abiertos*. Obtenido de Gunt Hamburg: https://www.gunt.de/images/download/open-channel_flow_spanish.pdf
- ANSYS. (2013). *ANSYS Fluent User's Guide*. Obtenido de <http://www.ansys.com/>
- Badano, N., & Menéndez, Á. (2014). *Evaluación de metodologías para la modelación Reynolds Averaged Navier Storkes (RANS) de la capa límite en conducto circulares*. Asociación Argentina de mecánica computacional, Buenos Aires.
- Berrones, J., & Quilligana, O. (2017). *Simulación numerica de una rapida con fondo rugoso en el paquete computacional OpenFoam*. Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17059>
- Blazek, J. (2015). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications* (Tercera ed.).
- Carrera Casa, J. (2016). *Análisis del requerimiento de aeración forzada en rápidas y elaboración de una hoja de cálculo para el diseño de aireador seleccionado*. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito.
- CFD-Online. (25 de Octubre de 2016). *CFD Online*. Obtenido de Two equation turbulence models: https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity
- Chow, V. T. (1994). *Hidraulica de canales abiertos*. McGraw Hill.
- Gallardo, P. (2018). *Diseño de canales abiertos*. 3 Ciencias. doi:En 1769 el ingeniero francés Antoine Chézy desarrolló probablemente la primera
- Greenshields, C. (20 de Julio de 2020). *OpenFOAM User Guide*. Obtenido de The OpenFOAM Foundation : <https://openfoam.org/>
- Haro, P. (2010). *Analisis de flujo inestable y autoaiereado en canales con fuerte pendiente*. Tesis de Magister , Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Hirt, C., & Nichols, D. (Enero de 1981). Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of free Boudaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201-225.
- Holzmann, T. (2017). *Mathematics, Numerics, Derivations and OpenFoam (R)* (Cuarta ed.). Obtenido de www.holzmann-cfd.de.
- Jarrin, M. (2014). *Bases para el diseño hidráulico de transiciones en flujo subcrítico y supercrítico*. Tesis de pregrado, Quito.
- Kok, J. (1999). *Resolving the dependence on free-stream values for the k-omega turbulence model*.
- Krochin, S. (1986). *Diseño hidráulico* (Tercera ed.). Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Kurbanaliev, A. I., Maksutov, A. R., Obodoeva, G. S., & Oichueva, B. R. (2019). *Using OpenFOAM Multiphase Solver interFoam for large scale Modeling*. San Francisco.
- Léon, E., & Pérez, K. (2012). *Analisis de un sistema de tuberias con fuga utilizando dinámica de fluidos (CFD) mediante el software OpenFoam*. Tesis de pregrado, Universidad Fransisco de Paula Santander Ocana. , Facultad de Ingeniería.
- Marbello, R., & Cardenas, M. (2017). *Ecuaciones de diseño de cunetas, empleando la ecuacion de Manning y la ecuacion de Darcy & Weisbach - Colebrook & White. Caso colombiano*.
- Martín, E., Mies, M., & Varas, F. (s.f.). *Introducción a OpenFoam*. Obtenido de Departamento de matemática aplicada II: <http://www.dma.uvigo.es/files/cursos/openfoam/sesion1.pdf>
- Merchán, P. (2019). *Simulación numérica experimental de un canal con un nuevo modelo de rugosidad artificial*. Universidad de Cuenca, Cuenca, Azuay, Ecuador.
- OpenFoam* . (s.f.). Obtenido de <https://www.openfoam.com/documentation/guides/>



- Osses, J. (12 de Diciembre de 2016). *El método de volúmenes finitos*. Obtenido de ESSS: <https://www.esss.co/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/#:~:text=El%20punto%20de%20partida%20del,1>.
- Proaño, P. (2013). *Bases para el diseño hidráulico de la estructura de entrada, cámara de desarenación y estructuras de limpieza, con caudales entre 20 m³/s Q 2 m³/s para desarenadores en aprovechamientos hidroeléctricos*. Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Quito. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/32054/1/Trabajo%20de%20Titulaci%C3%B3n.pdf>
- Reyes, J. (2019). *Estudio hidrodinámico de la reducción de la resistencia al avance mediante la variación en la separación de cascos en la geometría de Trimarán a través de técnicas CFD*. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena.
- Rumsey, C. (15 de Enero de 2021). *Turbulence Modeling Resource*. Obtenido de Langley Research Center : <https://turbmodels.larc.nasa.gov/index.html>
- Ryabov, A. (1967). Hydraulic design of channels with artificial roughness.
- Saadati, E. (2009). *Turbulence Modelling*. Sharif University of Technology. Obtenido de <https://slideplayer.com/slide/3872321/>
- Salaheldin, T., Imran, J., & Hanif Chaudhry, M. (2000). Simulación de flujos en canales abiertos con pendiente fuertes. *Ingeniería del agua*, 7(4), 391-408.
- Streeter, V., & Wyle, B. (1988). *Mecánica de fluidos* (Octava ed.).
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics* (Segunda ed.). Pearson Education.
- Villamizar, A. (2014). *Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá.
- Wilcox, D. (2006). *Turbulence Modeling for CFD*. La Canada, California : DCW Industries.
- Wimshurst, A. [. (5 de Marzo de 2019). [CFD] How are Wall Functions Modified for Roughness? [Archivo de video].
- Wimshurst, A. [. (14 de Marzo de 2019). [CFD] The k-omega SST Turbulence Model [Archivo de video]. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=myv-ityFnS4&t=161s>
- Wimshurst, A. [. (24 de Julio de 2020). [CFD] Pressure-Inlet Boundary Conditions [Archivo de video].
- Wimshurst, A. [. (24 de Febrero de 2021). [CFD] Eddy Viscosity Models for RANS and LES [Archivo de video]. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=SVYXNICeNWA&t=384s>
- Yakntenfel'd, J. P. (1999). Hydraulic calculation of chutes with increased roughness. *Hydrotechnical Construction*, 283 - 286 .



7. ANEXOS

Anexo 1. Teorías de diseño: Pikalov y Aivazian

Cálculo de la velocidad y efectividad de reducción teórica para cada metodología de diseño (*ver sección 2.2.1 y 2.2.2.*) bajo las siguientes condiciones:

Ancho del canal: 30cm.

Altura del bloque de rugosidad: 1cm.

Caudales de diseño: 26 – 20 – 17 – 9 l/s.

Pendientes de diseño: 10 – 15 %.

- Método de F. I. Pikalov & Zamarin:

La Tabla 15 y 16 se presenta los resultados de los parámetros hidráulicos a partir del método de Pikalov:

Tabla 15 Diseño de los bloques de rugosidad artificial " Método de Pikalov" para S_0 : 10%.

Caudal [l/s]	26	20	17	9
Altura de flujo sobre la rugosidad [m]	0.062	0.052	0.047	0.028
Altura total de flujo [m]	0.072	0.062	0.057	0.038
Radio hidráulico [m]	0.05	0.044	0.041	0.030
Relación h/k	6.2	5.2	4.7	2.8
Condición h/k >3	Si	Si	Si	No
Relación b/h	4.8	5.8	6.4	10.8
Factor de corrección para C	1.25			
Límite superior	35.09			
Coefficiente de Chezy	17.25	16.16	15.63	14.50
Límite inferior	11.85			
Velocidad media de flujo [m/s]	0.96	0.86	0.80	0.64

Tabla 16 Diseño de los bloques de rugosidad artificial "Método de Pikalov" para S_0 : 15%.

Caudal [l/s]	26	20	17	9
Altura de flujo sobre la rugosidad [m]	0.063	0.053	0.047	0.028
Altura total de flujo [m]	0.073	0.063	0.057	0.038
Radio hidráulico [m]	0.049	0.044	0.041	0.030
Relación h/k	6.28	5.29	4.73	2.82
Condición h/k >3	Si	Si	Si	No
Relación b/h	4.78	5.67	6.35	10.63
Factor de corrección para C	1.0			
Límite superior	35.1			
Coefficiente de Chezy	13.88	12.99	12.55	11.61
Límite inferior	11.850			
Velocidad media de flujo [m/s]	1.19	1.06	0.99	0.79

La Tabla 17 y 18 se presenta los resultados de los parámetros hidráulicos a partir del método de Aivazian:

- Método de Aivazian:

Tabla 17 Diseño de los bloques de rugosidad artificial " Método de Aivazian" para S_0 : 10%.

Caudal [l/s]	26	20	17	9
Velocidad máxima [m/s]	1.26	1.10	1.02	0.74
Calado para la velocidad máxima[m]	0.069	0.060	0.056	0.041



Relación h/k	5.9	5.0	4.6	3.1
Condición h/k ≥ 3	Si	Si	Si	Si

Tabla 18 Diseño de los bloques de rugosidad artificial " Método de Aivazian" para S_0 : 15%.

Caudal [m³/s]	26	20	17	9
Velocidad máxima [m/s]	1.39	1.22	1.13	0.82
Calado para la velocidad máxima [m]	0.062	0.055	0.050	0.037
Relación h/k	5.2	4.5	4.0	2.7
Condición h/k ≥ 3	Si	Si	Si	No
Calado aireado [m]	0.086	0.076	0.070	0.051



Anexo 2. Configuración del modelo numérico para la simulación.

Para la elaboración de los diferentes archivos se tomó como referencia el Manual de OpenFoam (Greenshields, 2020), el tutorial para “WaterChanel” de OpemFoam y lo expuesto en el trabajo de titulación “*Simulación numérica experimental de un canal con un nuevo modelo de rugosidad artificial*” (Merchán, 2019).

Directorio 0

- Archivo “*alpha.water*”.

En este archivo se especifica la configuración para la fracción volumétrica, es decir:

$$\alpha_{water} = \begin{cases} 1 & \text{para la fase de agua} \\ 0 & \text{para la fase de aire} \end{cases}$$

En la Tabla 19 se presenta la configuración del archivo alphawater, donde para el ingreso de agua se especifica en '*inlet1*' con 'fixedValue' de valor 1 (fase de agua). Posterior a ello, los valores de '*zeroGradient*' crean un campo de volumen con condiciones de contorno de gradiente cero en valores cerca de las paredes, en '*Outlet*' el valor 0 indica una entrada y salida de aire. Finalmente, '*atmosphere*' es definido con '*inletOutlet*' de valor 0, indicando una cara abierta con posibilidad de entrada y salida de flujo.

Tabla 19 Archivo alpha.water.

Version	2.0	<i>Versión del programa</i>
Format	ascii	<i>Formato de datos</i>
Class	volScalarField	<i>Clase relativa a los datos</i>
location	"0"	<i>Ruta al archivo</i>
Object	alpha.water	<i>Nombre del archivo</i>
dimensions	0 0 0 0 0 0 0	<i>Unidad (SI)</i>
internalField	uniform	0
boundaryField		
patch	type	value
inlet1	fixedValue	1
inlet2	zeroGradient	-
concretewall	zeroGradient	-
outlet	zeroGradient	0
atmosphere	inletOutlet	0

- Archivo “*U*”.

En la Tabla 20 se muestra la configuración del archivo “*U*” correspondiente a la velocidad, la cual se asigna en base a la magnitud de la velocidad de entrada o el valor de caudal inicial. Al asignar la velocidad en función del valor de caudal inicial, se define a la variable como tipo '*flowRateInletVelocity*', este valor viene dado en m^3/s en '*inlet1*'. Los valores asignados para los siguientes componentes se establecen por defecto del tutorial '*WaterChanel*'.

Tabla 20 Archivo “*U*”.

Version	2.0	<i>Versión del programa</i>
format	Ascii	<i>Formato de datos</i>
class	volVectorField	<i>Clase relativa a los datos</i>
location	"0"	<i>Ruta al archivo</i>
object	U	<i>Nombre del archivo</i>



dimensions	0 1 -1 0 0 0 0	<i>Unidad (SI)</i>
internalFields	uniform	0
boundaryFields		
patch	Type	value
inlet1	flowRateInletVelocity	volumetricFlowRate: 0.026 / 0.020 / 0.017
inlet2	fixedvalue	(0,0,0)
concretewall	fixedvalue	(0,0,0)
outlet	inletOutlet ⁶	(0,0,0) \$internalField
atmosphere	pressureInletOutletVelocity ⁷	(0,0,0)

- Archivo “p_rgh”.

En la Tabla 21 se presenta la configuración de la presión, donde 'p0' es definido como cero por ser un canal a cielo abierto de presión manométrica cero. La variable del vector velocidad “U” se define con su mismo nombre, porque ésta es la variable de equilibrio en las ecuaciones de gobierno. Los valores de las demás variables son asignados por defecto del tutorial 'WaterChannel', para una mejor referencia se consulta la guía de condiciones de contorno de OpenFoam.

Tabla 21 Archivo "p_rgh".

Version	2.0	<i>Versión del programa</i>
format	Ascii	<i>Formato de datos</i>
class	volScalarField	<i>Clase relativa a los datos</i>
location	"0"	<i>Ruta al archivo</i>
object	Pgh	<i>Nombre del archivo</i>
dimensions	1 -1 -2 0 0 0 0	<i>Unidad (SI)</i>
internalFields	uniform	0
boundaryFields		
patch	type	value
inlet1	-	-
inlet2	-	-
concretewall	-	-
outlet	zeroGradient	-
atmosphere	totalPressure ⁸	0
	p0	Uniform 0
	U	U
	phi	phi
	rho	rho
	psi	none
	gamma	1

- Archivo “nut”.

En la Tabla 22 se muestra la configuración del archivo *nut* que especifica la rugosidad en las paredes del canal asociados en los parámetros Ks (rugosidad absoluta) y Cs (constante de rugosidad), los cuales son tomados en base a la calibración del canal de estudio propuesta en (Merchán, 2019), un valor de 0.0035 para Ks, y 0.5 para Cs, recomendado por la literatura.

⁶ Es una condición mixta, que cambia entre “zeroGradient” cuando el flujo fluye hacia afuera del dominio en una cara del parche y “FixedValue” cuando el flujo fluye hacia adentro del dominio.

⁷ Especifica zeroGradient en todo momento, excepto en el componente tangencial donde se establece “FixedValue” para el flujo de entrada.

⁸ Establece la presión estática a partir de la definición de la presión total, dicha presión para cada región se determina restando la presión dinámica de la presión total.

Tabla 22 Archivo "nut".

Version	2.0	<i>Versión del programa</i>
format	ascii	<i>Formato de datos</i>
class	volScalarField;	<i>Clase relativa a los datos</i>
location	"constant"	<i>Ruta al archivo</i>
object	nut	<i>Nombre del archivo</i>
dimensions	0 2 -1 0 0 0 0	<i>Unidad (SI)</i>
internalFields	uniform	0
boundaryFields		
patch	type	value
inlet1	-	-
inlet2	-	-
concretewall	nutkRoughWallFunction ⁹	0
	Ks	0.0035
	Cs	0.5
outlet	-	-
atmosphere	-	-

Ks representa el tamaño de los elementos de rugosidad como se muestra en la Ilustración 24, que por defecto es cero cuando es una pared lisa, mientras que para paredes rugosas se debe especificar un valor distinto de cero para que la rugosidad surta efecto.

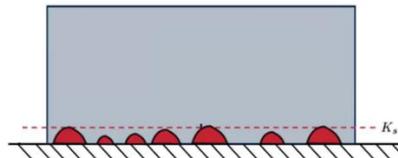


Ilustración 24 Altura de los elementos de rugosidad.

Fuente: (Wimshurst, [CFD] *How are Wall Functions Modified for Roughness?* [Archivo de video], 2019).

Para definir la rugosidad, Cs representa la forma y el espaciado de los elementos de rugosidad; no existe mucha información acerca de una metodología para asignar un valor para Cs, los manuales de usuario especifican que su valor varía entre 0.5 y 1.0 como se aprecia en la Ilustración 25. De acuerdo a ANSYS (2013) en su capítulo 7 especifica que el valor por defecto para Cs es de 0.5.

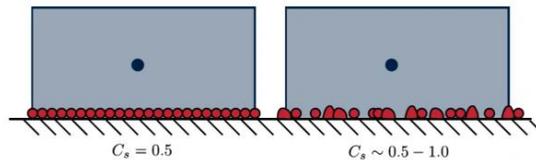


Ilustración 25 Casos para la constante de rugosidad.

Fuente: (Wimshurst, [CFD] *How are Wall Functions Modified for Roughness?* [Archivo de video], 2019).

- Archivo "omega".

En la tabla 23 se presenta la configuración del archivo *omega*, donde los valores de las variables son asignados por defecto cuando se selecciona el tutorial 'Water Channel'. La condición inicial 0.003 para omega se usa para satisfacer la ecuación Eddy y evitar la indeterminación en la zona de corriente libre, donde la energía y la frecuencia de turbulencia es cero.

⁹ Condición de contorno que proporciona una restricción de pared sobre la viscosidad turbulenta, es decir cuando se utilizan funciones de pared para paredes rugosas (OpenFoam, n.d.).



Tabla 23 Archivo "omega".

Version	2.0	<i>Versión del programa</i>
format	ascii	<i>Formato de datos</i>
class	UniformDimensioned VectorField	<i>Clase relativa a los datos</i>
location	"constant"	<i>Ruta al archivo</i>
object	g	<i>Nombre del archivo</i>
boundaryFields		
dimensions	0 1 -2 0 0 0 0	<i>Unidad (SI)</i>
internalField	uniform	0.003
boundaryFields		
patch	type	value
inlet1	fixedValue	\$internalField
inlet2	-	-
concretewall	omegaWallFunction ¹⁰	\$internalField
outlet	-	-
atmosphere	-	-

- Archivo "k".

En la Tabla 24 se presenta la configuración del archivo *k*, donde el principal parámetro es la intensidad de turbulencia obtenido mediante la experimentación. En (Berrones & Quilligana, 2017) y (CFD-Online, 2016) se menciona que para una buena simulación es recomendable realizar una buena estimación de la intensidad de la turbulencia, para lo cual describe los casos y valores recomendables:

- 1) Turbulencia alta: flujos con altas velocidades dentro de geometrías complejas como maquinaria rotatoria (turbinas y compresores), valores de 5% - 20%.
- 2) Turbulencia media: flujos con velocidades medias – altas en estructuras no tan complejas (tuberías, canales), valores de 1% - 5%.
- 3) Turbulencia baja: cuando se tiene flujos con velocidades bajas, menos del 1%.

Tabla 24 Archivo "k".

Version	2.0	<i>Versión del programa</i>
Format	ascii	<i>Formato de datos</i>
Class	volScalarField	<i>Clase relativa a los datos</i>
object	k	<i>Nombre del archivo</i>
boundaryFields		
dimensions	0 -2 -2 0 0 0 0	<i>Unidad (SI)</i>
internalField	Uniform	0.0001
boundaryFields		
Patch	Type	value
Inlet1	FixedValue	\$internalField
	intensity	0.05
Inlet2	-	-
concretewall	kgRwallFunction ¹¹	\$internalField
outlet	-	-
Atmosphere	-	-

Directorio constant

¹⁰ Condición de contorno que proporciona una restricción de pared sobre la tasa de disipación viscosa para números de Reynolds bajos y altos.

¹¹ Proporciona una envoltura simple alrededor de la condición de gradiente cero, que se puede utilizar para energía cinética turbulenta, es decir *k*, la raíz cuadrada de la energía cinética turbulenta *q*, y los campos de tensión de Reynolds *R* (OpenFoam, s.f.).



- Archivo "g".

La Tabla 25 presenta los valores predefinidos para la gravedad según el tutorial 'Water Channel'.

Tabla 25 Archivo "g".

Version	2.0	<i>Versión del programa</i>
format	ascii	<i>Formato de datos</i>
class	UniformDimensioned VectorField	<i>Clase relativa a los datos</i>
location	"constant"	<i>Ruta al archivo</i>
object	g	<i>Nombre del archivo</i>
dimensions	0 1 -2 0 0 0 0	<i>Unidad (SI)</i>
value	0 0 -9.81	<i>Aceleración de la gravedad [m/s²]</i>

- Archivo "transportProperties".

La Tabla 26 se presenta los parámetros de transporte para el fluido newtoniano (fluido compuesto por agua y aire), fijados a una temperatura de 20 °C y una presión igual a la atmosférica.

Tabla 26 Archivo "transportProperties".

Version	2.0	<i>Versión del programa</i>
Format	ascii	<i>Formato de datos</i>
Class	dictionary	<i>Clase relativa a los datos</i>
location	"constant"	<i>Ruta al archivo</i>
Object	transportProperties	<i>Nombre del archivo</i>
phases	(water air)	
water		
transportModel	Newtonian	<i>Viscosidad contante</i>
nu	1.00E-06	<i>Viscosidad cinemática [m²/s]</i>
rho	1000	<i>Densidad [kg/m³]</i>
air		
transportModel	Newtonian	<i>Viscosidad contante</i>
nu	1.48E-05	<i>Viscosidad cinemática [m²/s]</i>
rho	1	<i>Densidad [kg/m³]</i>
Properties of both phases		
sigma	0.07	<i>Tensión superficial [N/m]</i>

- Archivo "turbulenceProperties".

En la Tabla 27 se presenta la configuración donde se especifica el modelo para abordar el problema de turbulencia (RASModel).

Tabla 27 Archivo "turbulenceProperties".

Version	2.0	<i>Versión del programa</i>
format	Ascii	<i>Formato de datos</i>
class	Dictionary	<i>Clase relativa a los datos</i>
location	"constant"	<i>Ruta al archivo</i>
object	turbulentProperties	<i>Nombre del archivo</i>
simulationType	RAS	<i>Modelo de turbulencia</i>
RASModel	kOmegaSST	<i>Implementación del modelo de turbulencia k-omega-SST para flujos incompresibles</i>



turbulence	On	Activar o desactivar la resolución del modelado de turbulencias.
printCoeffs	On	Activar o desactivar para imprimir los coeficientes del modelo al terminal en el iniciar la simulación

Directorio “system”

- Archivo “controlDict”

En la Tabla 28 se muestra la configuración donde se establecen las condiciones de registro de datos: tiempo de simulación, intervalos de registro, precisión de cifras significativas y número de Courant.

Tabla 28 Archivo “controlDict”.

Version	2.0	<i>Versión del programa</i>
format	Ascii	<i>Formato de datos</i>
class	dictionary	<i>Clase relativa a los datos</i>
location	"system"	<i>Ruta al archivo</i>
object	controlDict	<i>Nombre del archivo</i>
application	interFoam	<i>Solver</i>
startForm	startTime	<i>Control del tiempo inicial de la simulación</i>
startTime	0	
stopAt	endTime	<i>Control del tiempo final de la simulación</i>
endTime	4	
deltaT	0.1	<i>Paso del tiempo de la simulación</i>
writeControl	ajustableRunTime	<i>Controla el tiempo de salida de escritura a archivo.</i>
writeInterval	0.05	<i>Incremento de tiempo para escribir resultados.</i>
purgeWrite	0	
writeFormat	Ascii	<i>Formato de los archivos de datos.</i>
WritePrecision	6	<i>Precisión de cifras significativas.</i>
writeCompresion	compressed	
timeFormat	General	
timePrecision	6	<i>Cantidades de cifras significativas.</i>
runTimeModifiable	Yes	
ajustTimeStep	Yes	<i>Ajusta el paso de tiempo durante la simulación.</i>
maxCo	1	<i>Numero de Courant.</i>
maxAlphaCo	0.5	
maxDeltaT	1	<i>Límite superior del paso de tiempo.</i>

- Archivo “setFields”

En la Tabla 29 se presenta la configuración donde se define el volumen inicial de agua que tendrá el canal a la entrada antes de iniciar la simulación.

Tabla 29 Archivo "setFields”.

Version	2.0	<i>Versión del programa</i>
----------------	-----	-----------------------------



format	Ascii	<i>Formato de datos</i>
class	dictionary	<i>Clase relativa a los datos</i>
location	"system"	<i>Ruta al archivo</i>
object	setFieldsDict	<i>Nombre del archivo</i>
defaultFieldsVales		<i>Establece el valor predeterminado de los campos</i>
volScalarFieldValue	alpha.water 0	
Regions		
boxToCell		<i>Crea un cuadro delimitador para definir el conjunto de celdas de la región de entrada de agua.</i>
box	(xmin ymin zmin) (xmax ymax zmax)	
fieldValues		
volScalarFieldValue	alpha.water 1	<i>La fracción de fase de agua se define como 1 en esta región.</i>

- Archivos *fvschemes* y *fvsolution*.

Archivos que especifican el esquema de discretización y de solución de las ecuaciones de RANS, las instrucciones para su configuración se encuentran en el manual del OpenFoam.



Anexo 3. Elaboración de la malla en el software Salome-Meca

En este apartado se detallan los pasos para la elaboración de la malla en el software Salome-Meca que será utilizada en la simulación numérica.

- 1- Descargar el programa de la página web: www/code-aster.org.
- 2- Al abrir el programa, hacer clic en nuevo proyecto y, en la barra principal, elegir *Geometry* para habilitar los comandos de elaboración de malla.

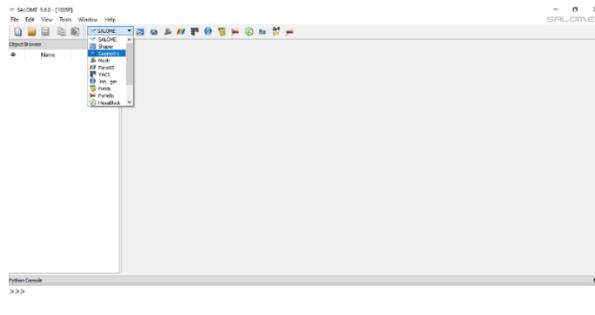


Ilustración 26 Pantalla principal de Salome.

- 3- Mediante la herramienta *Create a point* se habilita la ventana de *point construction*, donde se especifica las coordenadas (x,y,z) de la geometría del canal.

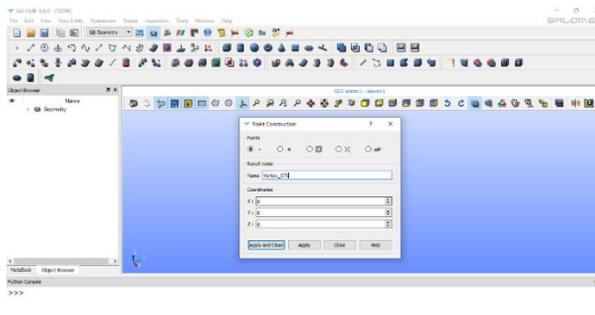


Ilustración 27 Ingreso de coordenadas para los puntos.

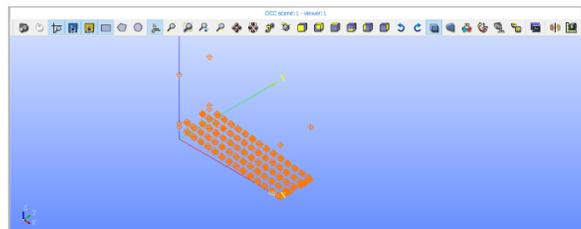


Ilustración 28 Puntos para el canal con rugosidad artificial Tipo A.

- 4- Con la herramienta *Create a Curve*, se crea los perfiles mediante la unión de puntos en el espacio interactivo, mientras que, con la opción *Build a closed wire* se crean perfiles cerrados seleccionando los puntos en la sección *Points*.

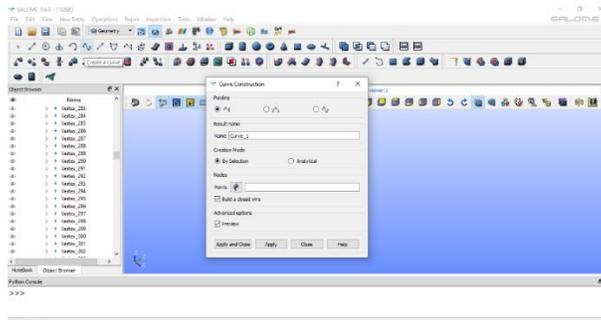


Ilustración 29 Crear superficies a partir de curvas.

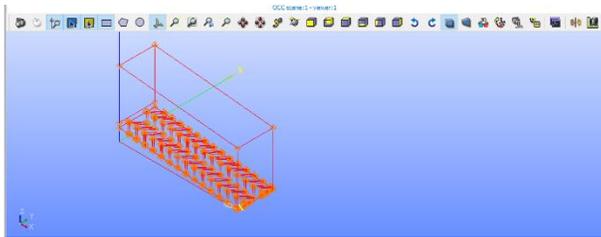


Ilustración 30 Curvas de la geometría.

- 5- Se crean las superficies del modelo a partir de los perfiles creados anteriormente, mediante la herramienta *Build fase*, se ingresa el perfil que se desea transformar en superficie.

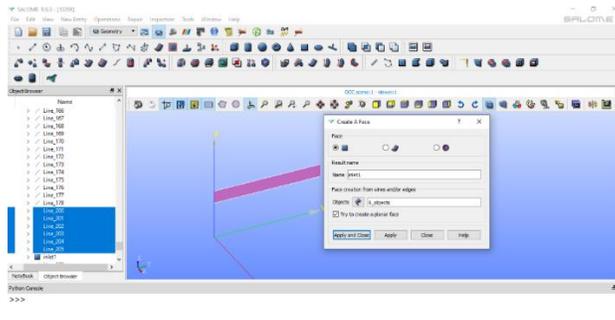


Ilustración 31 Crear superficies a partir de curvas.

Las superficies a crear serán: *inlet1* (entrada de agua), *inlet2* (parte superior de la entrada de flujo), *concretewalls* (paredes laterales y piso del canal), *outlet* (salida de agua) y *atmosphere* (parte superior del canal).

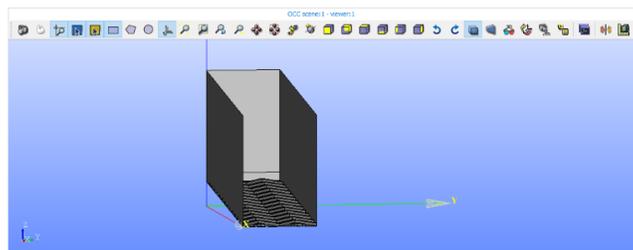


Ilustración 32 Superficies en el canal.

- 6- Mediante la herramienta *Build Shell*, se crea el cascaron o *Shell* a partir de todas las superficies que se desea unir, éstas deben estar en contacto y no superpuestas.

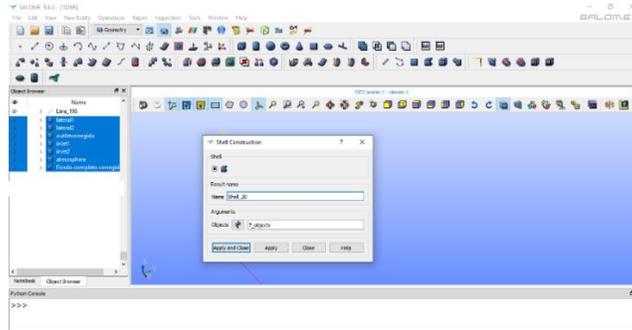


Ilustración 33 Crear el Shell a partir de superficies.

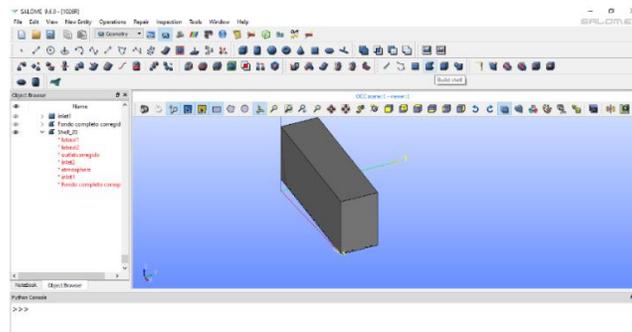


Ilustración 34 Shell.

- 7- Posteriormente, a partir de la herramienta *Build solid* se crea el sólido en base al *Shell* creado.

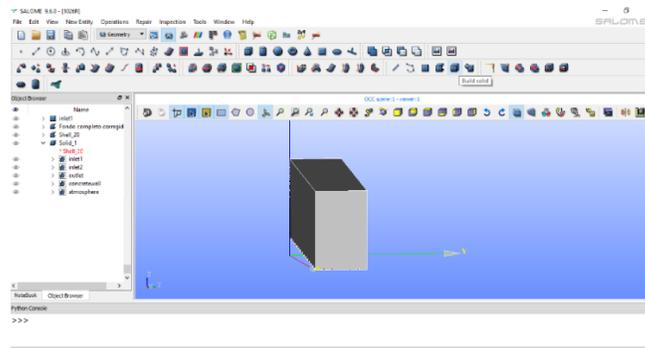


Ilustración 35 Crear el Solid a partir del Shell.

- 8- Se crean los grupos para cada región de la geometría, para ello ingresar a *New Entity* y seleccionar la opción de *Create Group*, luego elegir la tercera opción , posteriormente dar click en *Add* para agregar la superficie.

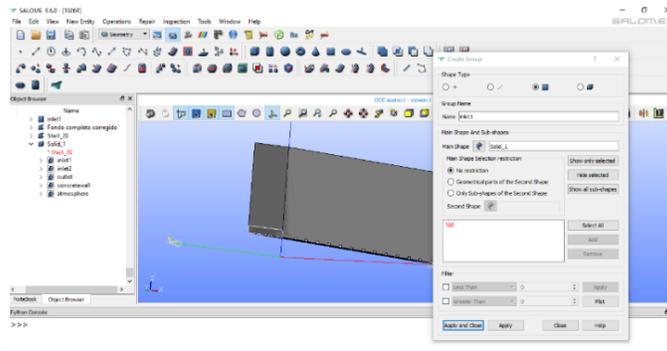


Ilustración 36 Creación de los grupos para el sólido.

9- Para elaborar el mallado del sólido, dar clic en la función *Mesh* del menú *Module*.

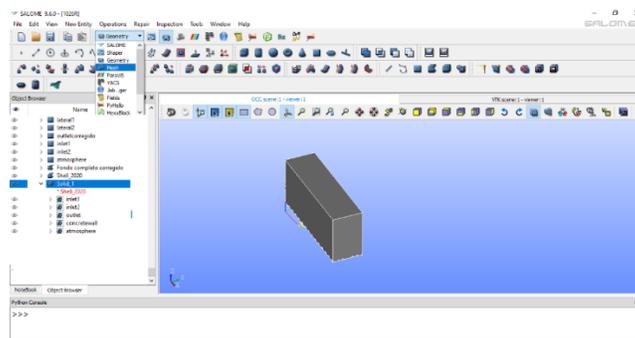


Ilustración 37 Sólido con sus respectivos grupos.

10- En el menú *Mesh*; seleccionar *Create Mesh*, el cual despliega una ventana en la que se debe especificar el sólido de entrada, posterior elegir la opción 3D, en *Algorit* seleccionar NETGEN 1D-2D-3D, y finalmente en *Hypotesis* la opción NETGEN 3D Parameters.

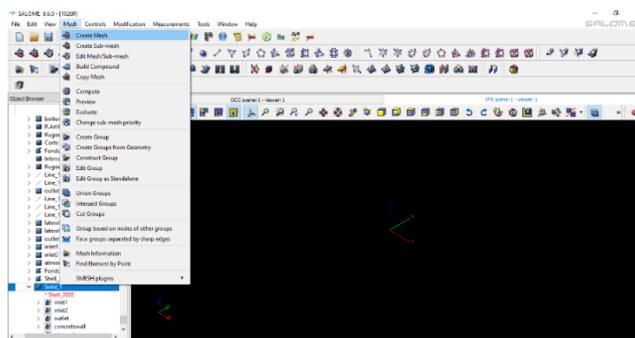


Ilustración 38 Herramienta para crear la malla.

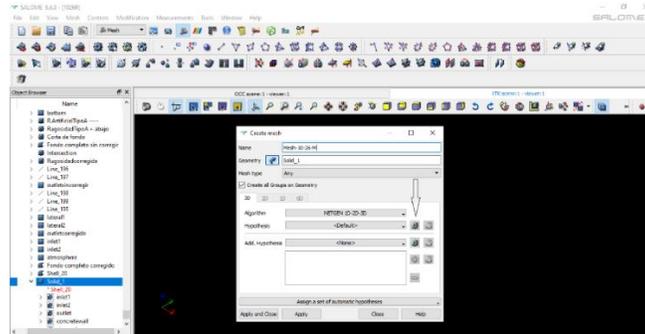


Ilustración 39 Parámetros de entrada para crear la malla a partir de un sólido.

En *Hypotesis Construction* se debe especificar el tamaño máximo y mínimo de las celdas (*size max* y *size min*), y elegir que tan fino se requiere la malla (*very fine, fine, Moderate, Course*), de acuerdo a (Merchán, 2019) se recomienda la opción *Fine*.

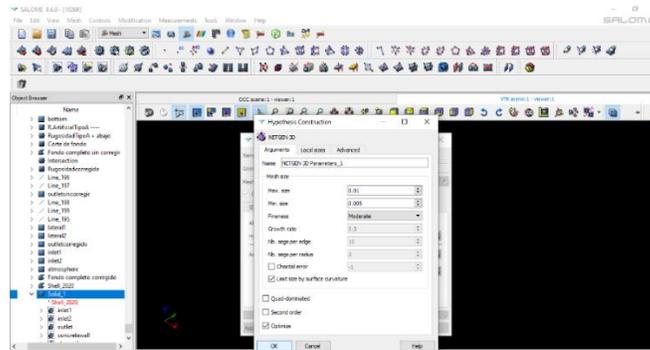


Ilustración 40 Tamaño máximo y mínimo de la celda para la malla.

11- Al igual que en la creación del sólido, se debe especificar los grupos para cada región en la malla mediante el comando *Create Group*, en donde se elige la opción *Face*, seguido *Group on geometry* y posterior en *Geometrical Object*, seleccionar *Direct geometry selection*, finalmente elegir el grupo de la sección del sólido base; cabe recalcar que se debe ingresar el mismo nombre de que se asignó al grupo en el sólido para evitar problemas al momento de exportar la malla a OpenFoam.

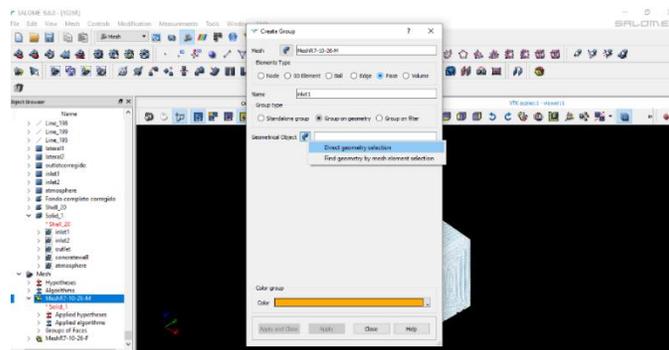


Ilustración 41 Creación de grupos para el mallado.

12- Hacer clic derecho en la malla creada y seleccionar la opción *Compute* para crear el mallado sobre el sólido.

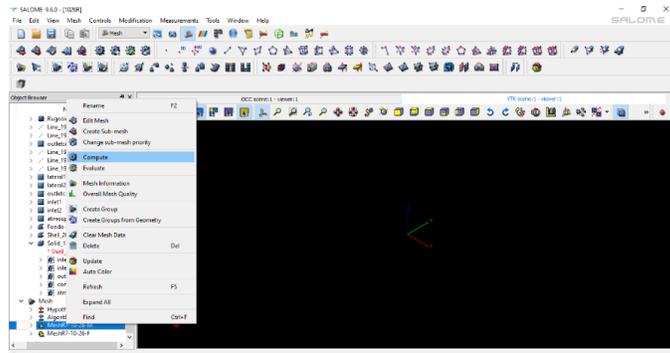


Ilustración 42 Creación del mallado en Salome-Meca.

13- Como paso final se debe exportar la malla en formato “*unv*”, ya que es compatible con OpenFoam.

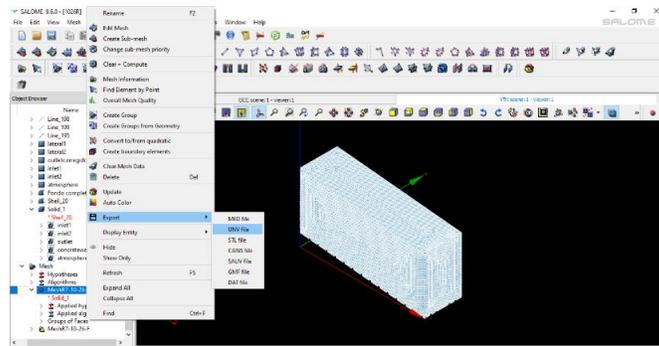


Ilustración 43 Exportar la malla en formato compatible con OpenFoam.

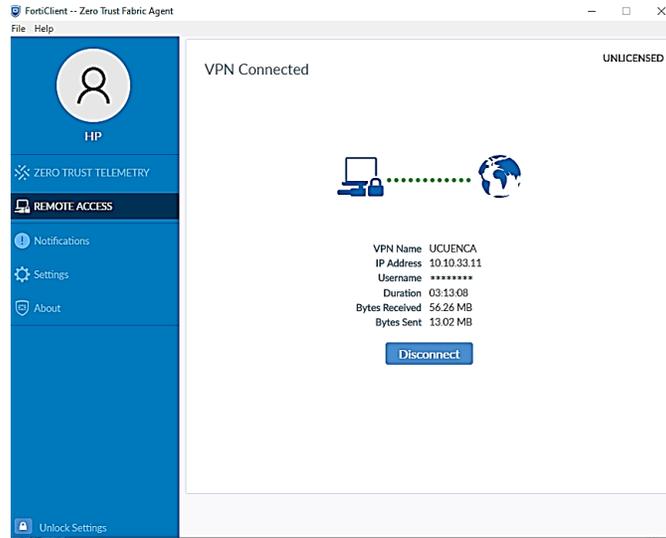


Ilustración 47 Acceder a la red de la Universidad de Cuenca.

- 2- Una vez conectado mediante FortiClient, descargar la aplicación mobaXterm en la siguiente página web <https://mobaxterm.mobatek.net/download-home-edition.html> (programa que genera la ventana para acceder al cluster).
- 3- Abrir el programa mobaXterm e ingresar a la herramienta SESSION.

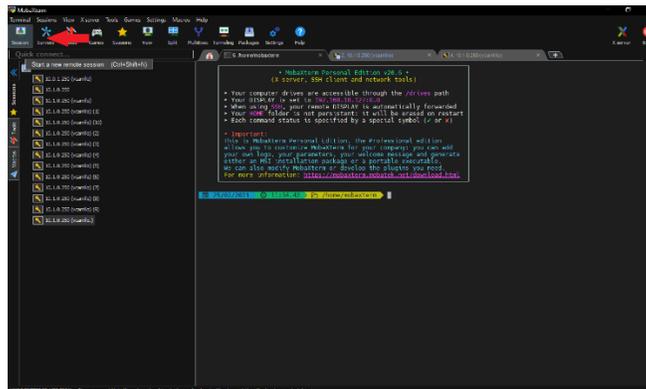


Ilustración 48 Entorno de mobaXterm.

- 4- En la ventana SESSION, ingresar a SSH e introducir la dirección IP y usuario proporcionados por la Universidad, posterior colocar la contraseña.

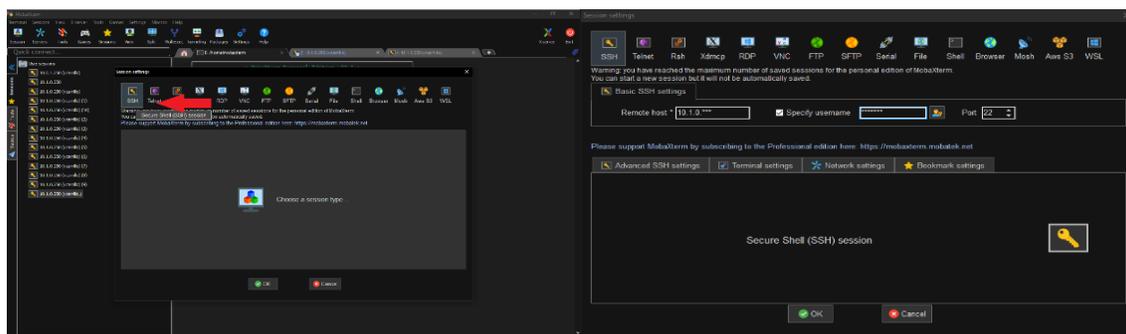


Ilustración 49 Acceso a Cluster mediante la dirección IP.



Posteriormente, se repiten los pasos presentados en la sección de *Simulación en OpenFoam* hasta ingresar el comando *setFields*. A partir de este punto, realizar la descomposición del dominio mediante el comando *decomposePar*, y automáticamente se crean carpetas “*processor #*” con el número de subdominios creados. Las especificaciones para la descomposición se establecen en el archivo *decomposeParDict* ubicado en la carpeta *system*, éste se detalla en la Tabla 30:

Tabla 30 Archivo *decomposeParDict*.

Version	2.0	<i>Versión del programa</i>
format	ascii	<i>Formato de datos</i>
class	dictionary	<i>Clase relativa a los datos</i>
location	"system"	<i>Ruta al archivo</i>
object	decomposeParDict	<i>Nombre del archivo</i>
numberOfSubdomains	#	<i>Numero de procesadores disponibles</i>
method	simple	<i>Método de descomposcion</i>
simpleCoeffs	<i>Descompone la geometría en función del or</i>	
n	(#x, #y, #z)	<i>Numero de división que se realiza en la malla para cada eje (x, y, z).</i>
delta	0.001	
hierarchicalCoeffs	<i>Se especifica el orden de división de la malla (ej. X, Y, Z)</i>	
n	(1,1,1)	
delta	0.001	
order	xyz	
manualCoeffs	<i>Descomposicion manual</i>	
dataFile	""	
distributed	no	<i>Distribución de datos en varios discos</i>
roots	()	

5- A continuación, se corre la simulación en paralelo ejecutando el comando *mpirun -np <N de procesadores><Soler> -parallel >log*; por ejemplo, para una descomposición en 16 subdominios y el solver *interFoam* se tiene:

```
mpirun -np 16 interFoam -parallel
```

Para una simulación en segundo plano, se agrega *&>simulación.log &*.

6- Reconstruir la malla y unir las carpetas con los resultados mediante el comando *reconstructPar*.

7- Finalmente, tras reconstruir el postprocesamiento de los datos generados para cada tiempo establecido en la simulación, se usa el programa *ParaView*, el cual transforma los datos numéricos en un entorno gráfico, mediante el comando *paraFoam*.

Para mayor detalle del proceso de simulación en paralelo consultar en (Merchán, 2019) “*Simulación numérica experimental de un canal con un nuevo modelo de rugosidad artificial*”.