



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LA BOCATOMA MARÍA AUXILIADORA DEL RÍO QUIROZ CON MODELO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL

Francisco Arteaga-Acuña

Piura, octubre de 2017

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

Arteaga, F. (2017). *Análisis hidráulico de la bocatoma María Auxiliadora del Río Quiroz con modelo numérico tridimensional* (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](#)

UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA



“Análisis hidráulico de la bocatoma María Auxiliadora del Río Quiroz con modelo numérico tridimensional”

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil

Francisco Javier Arteaga Acuña

Asesor: Dr. Ing. Jorge Reyes Salazar

Piura, Octubre 2017

A mis padres Malena y Francisco, por todo su apoyo y confianza;

A mi hermana Alejandra, por su paciencia y cariño;

Y a mis amigos, por su amistad incondicional.

Prólogo

Las obras hidráulicas deben considerar en su diseño y construcción la presencia de fenómenos hidráulicos, hidrológicos y sedimentológicos, para asegurar un buen funcionamiento.

Muy recientemente la ingeniería hidráulica tiene la posibilidad de utilizar modelación numérica tridimensional, la cual se encuentra en proceso de validación, en especial para casos de erosión localizada; por lo tanto, esta tesis plantea la aplicación de un modelo de difusión científica a un caso de una bocatoma que presentó problemas de erosión, con el objetivo de determinar si el modelo podía predecirlos y así constituirse en una herramienta que aumente la confiabilidad a los diseñadores de futuras obras hidráulicas.

El caso seleccionado fue el de la bocatoma de la Central Hidroeléctrica María Auxiliadora de Quiroz, donde se produjeron severos daños por erosión en varias zonas de la estructura debido a un inadecuado funcionamiento hidráulico desde su inicio de operación.

La causa del problema estuvo relacionada con las altas velocidades producidas en la losa aguas abajo debido a la geometría utilizada en la estructura; además, otra de las causas fue la falta de un mecanismo disipador de energía, por lo que el impacto producido por el fluido y los sedimentos transportados era muy elevado y favorecía la erosión.

Las ideas mencionadas anteriormente se obtuvieron mediante un análisis únicamente cualitativo del diseño original utilizado en la estructura erosionada. Tal como se mencionó, se usará la modelación numérica tridimensional, cuyo objetivo es determinar de manera cuantitativa los parámetros de la erosión ocurrida, tales como los valores de velocidad de flujo y de esfuerzo de corte que generaron dicha erosión.

Se agradece al Dr. Ing. Jorge Reyes Salazar, Director del Instituto de Hidrología, Hidráulica e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, y al Ing. Leo Guerrero Asmad, docente de la misma casa de estudios, por su colaboración en la facilitación de la información necesaria, del programa correspondiente para realizar la modelación numérica y por su constante asesoramiento en la realización de la presente investigación.

Resumen

Se ha llevado a cabo la modelación numérica de la bocatoma de la Central Hidroeléctrica María Auxiliadora de Quiroz a través del software ANSYS-CFX con el objetivo de estudiar el desempeño hidráulico de dicha estructura.

ANSYS-CFX es un software de dinámica de fluidos computacional que trabaja con la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes y con los modelos de turbulencia (k-épsilon en nuestro caso) para analizar el comportamiento hidráulico del fluido.

En las simulaciones realizadas se utilizó el caudal promedio y máximo ($50 \text{ m}^3/\text{s}$ y $300 \text{ m}^3/\text{s}$), tanto para la condición de compuertas abiertas, donde la erosión se produce por arrastre de sedimentos; como la condición de compuertas cerradas, la cual presenta erosión por caída del fluido debido al rebasamiento.

A través de estas simulaciones se obtuvieron valores de velocidad de flujo y esfuerzo de corte, los cuales se utilizaron en combinación con las ecuaciones de potencia de flujo y los gráficos de potencial erosivo de Wibowo et al. (2005), citados por U.S. Bureau of Reclamation (2012), para analizar el riesgo de ocurrencia de la erosión. Con los datos analizados se comprobó que existe una gran probabilidad de ocurrencia de erosión en la estructura debido a los altos valores de potencia de flujo que genera el fluido.

Índice General

Introducción	1
Capítulo 1: Marco teórico y conceptos generales	3
1.1 Concreto de alta resistencia	3
1.1.1. Introducción	3
1.1.2. Tipos de concreto	3
1.1.2.1. Concreto simple	4
1.1.2.2. Concreto hidráulico	5
1.1.2.3. Concreto de alta resistencia	5
1.1.2.4. Concreto Fondag	8
1.2. Abrasión y erosión en estructuras hidráulicas	12
1.2.1. Abrasión	12
1.2.1.1. Tipos de abrasión	12
1.2.2. Erosión en estructuras hidráulicas	14
1.2.2.1. Erosión en concreto de alta resistencia	14
1.2.2.2. Proceso de erosión	15
1.2.3. Resistencia a la abrasión vs resistencia a la compresión	16
1.2.3.1. Método de discos giratorios	16
1.2.3.2. Método de ruedas dentadas	16
1.2.3.3. Método de cojinete de bolas	16
1.3. Disipación de energía	17
1.3.1. Proceso de disipación de energía	17
1.3.2. Resalto hidráulico	19
1.3.2.1. Aplicaciones	20
1.3.2.2. Clasificación	21
1.3.2.3. Características	23
1.3.2.4. Resalto hidráulico como disipador de energía	25
1.3.3. Principales disipadores de energía	27
1.3.3.1. Salto de esquí	27
1.3.3.2. Bloques de impacto	29
1.3.3.3. Tanques Amortiguadores	31
1.3.3.4. Poza disipadora	32
Capítulo 2: Bocatoma Quiroz	33
2.1 Central Hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz	33
2.1.1. Ubicación	33

2.1.2.	Objetivos	33
2.1.3.	Descripción de obras	35
2.1.4.	Bocatoma Quiroz	37
2.2.	Río Quiroz	47
2.2.1.	Características generales	47
2.2.2.	Hidrología	47
Capítulo 3: Métodos numéricos		51
3.1	Dinámica de fluidos computacional – CFD	51
3.1.1.	Comportamiento básico de los fluidos	51
3.1.2.	Principios de conservación	52
3.1.3.	Introducción a la mecánica de fluidos computacional	53
3.2.	Métodos de solución numéricos	53
3.2.1.	Componentes	53
3.2.1.1.	Modelo matemático	53
3.2.1.2.	Método de discretización	53
3.2.1.3.	Sistemas de vectores coordenados y de base	54
3.2.1.4.	Malla numérica	54
3.2.1.5.	Aproximaciones finitas	56
3.2.1.6.	Método de solución	57
3.2.1.7.	Criterio de convergencia	57
3.2.2.	Propiedades	57
3.2.2.1.	Consistencia	57
3.2.2.2.	Estabilidad	57
3.2.2.3.	Convergencia	58
3.2.2.4.	Conservación	58
3.2.2.5.	Acotamiento	58
3.2.2.6.	Realizabilidad	58
3.2.2.7.	Precisión	58
3.2.3.	Posibilidades y limitaciones	59
3.2.3.1.	Eficiencia y precisión	59
3.3.	Modelos numéricos	61
3.3.1.	Características	61
3.3.2.	Tipos de modelos numéricos	61
3.3.2.1.	Dimensionalidad	62
3.3.2.2.	Método de cálculo	63
3.3.2.3.	Regímenes de flujo	63
3.3.2.4.	Variaciones en el tiempo	64
3.3.2.5.	Contornos de cauce	64
3.4.	Turbulencia	64
3.4.1.	Características de la turbulencia	65
3.4.1.1.	Aleatoriedad	65
3.4.1.2.	Tridimensionalidad	65
3.4.1.3.	Difusividad	65
3.4.2.	Descripción física del fenómeno	65
3.4.3.	Modelos de turbulencia	66
3.4.3.1.	Ecuaciones de Navier-Stokes	67
3.4.3.2.	Experimento de Reynolds	67
3.4.3.3.	Ecuaciones promediadas de Reynolds	68
3.4.3.4.	Tipos de modelos de turbulencia para CFD	68
3.5.	Programas para el análisis de CFD	73

3.5.1.	CFX	73
3.5.2.	SSIIM	73
3.5.3.	FLUENT	74
3.5.4.	FLOW-3D	74
3.5.5.	HEC-RAS	75
3.5.6.	FESWSW-2DH	75
3.5.7.	RIVER-2D	75
3.6.	Programa escogido: ANSYS-CFX	76
3.6.1.	Características	76
3.6.1.1.	Modelado de la turbulencia	76
3.6.1.2.	Flujos multifásicos	77
3.6.1.3.	Interacción fluido-estructura	77
3.6.2.	Capacidades y limitaciones	77
Capítulo 4: Simulación numérica de la bocatoma Quiroz		79
4.1	Simulación del diseño original de la bocatoma	79
4.1.1.	Generación de la geometría de la bocatoma	79
4.1.1.1.	Digitalización de planos	80
4.1.1.2.	Creación de espacio de trabajo	86
4.1.1.3.	Creación del cuerpo del fluido	93
4.1.2.	Generación de la malla	95
4.1.2.1.	Creación de malla computacional	95
4.1.2.2.	Asignación de zonas de interés	98
4.1.3.	Ingreso de datos	101
4.1.3.1.	Generación del dominio	101
4.1.3.2.	Configuración de las condiciones de borde	106
4.1.3.3.	Configuración del tipo de análisis	110
4.1.4.	Procesamiento	111
4.1.4.1.	Análisis de datos	111
4.1.4.2.	Convergencia y estabilidad	112
4.1.5.	Resultados	113
4.1.5.1.	Velocidades de flujo	113
4.1.5.2.	Esfuerzos de corte	132
4.1.5.3.	Efectos de erosión	132
Conclusiones y recomendaciones		145
Bibliografía		147
Anexo A		149
Anexo B		153
Anexo C		157
Anexo D		167
Anexo E		177

Introducción

El campo de la Ingeniería Hidráulica es bastante amplio y complejo, las herramientas utilizadas para su estudio rara vez incluyen conceptos generales aplicables a un gran número de casos o temas de estudio, sino que más bien están destinadas a analizar de manera detallada las características particulares de cada caso; en otras palabras, existe una gran variedad de herramientas para estudiar los temas de la Ingeniería Hidráulica pero cada una de estas se enfoca en una característica en particular. No obstante, el gran desarrollo que ha existido a lo largo de los últimos años ha permitido la aparición de nuevas tecnologías que facilitan el estudio de la gran diversidad de temas existentes relacionados con hidráulica. Este es el caso de la dinámica de fluidos computacional, pues el gran incremento de desarrollo computacional ha permitido un avance importante en el ámbito de los modelos numéricos de simulación de flujo.

En el primer capítulo, se explica de manera general los temas relacionados con el análisis de erosión a través de una modelación numérica; entre ellos tenemos la abrasión hidráulica, los concretos de alta resistencia y los mecanismos de disipación de energía. En el segundo capítulo, se busca dar un enfoque particular de la estructura que será analizada a través de dicha modelación, la bocatoma de la Central Hidroeléctrica María Auxiliadora de Quiroz. Estos dos capítulos le permiten al lector ubicarse contextualmente en el proyecto estudiado y se busca dar a conocer los antecedentes del problema, los cuales son los principales factores que impulsaron a llevar a cabo la presente investigación.

Para entender el comportamiento del fluido en la bocatoma a través de una modelación numérica, es necesario conocer los conceptos básicos de su funcionamiento; es por eso que el tercer capítulo de la presente tesis se presenta a manera de introducción al vasto mundo de la dinámica de fluidos computacional; en éste se busca explicar los conceptos relacionados con el desarrollo de los métodos numéricos y los modelos de turbulencia, los cuales son la base de los programas o softwares que realizan modelaciones numéricas; estos programas resuelven un complejo sistema de ecuaciones para poder representar el comportamiento del fluido a través de la simulación numérica. Adicionalmente, en este capítulo se presentan algunas características de los principales programas de modelación numérica y los motivos por los cuales se decidió trabajar con el programa ANSYS-CFX frente a los demás.

Finalmente en el último capítulo se realiza el proceso de la modelación numérica, explicando detalladamente todos los pasos del procedimiento; entre estos destacan: el pre-

procesamiento, el cual está relacionado con la configuración del programa y el ingreso de los datos a analizar; el procesamiento, que es la resolución de manera interna del sistema de ecuaciones de Navier-Stokes; y el post-procesamiento, en el cual el usuario tiene la disponibilidad de extraer todos los resultados obtenidos de la interacción entre el fluido y la estructura hidráulica, entre los principales se tiene las líneas de flujo, la velocidad del fluido y los esfuerzos de corte. En este capítulo también se representan los resultados obtenidos y los cálculos realizados en el análisis de la erosión producto de la interacción fluido-estructura.

Capítulo 1

Marco teórico y conceptos generales

1.1 Concreto de alta resistencia

1.1.1 Introducción

El concreto es uno de los materiales de construcción más utilizado hoy en día debido a la gran variedad de usos y aplicaciones que ofrece a bajo costo. Este material posee una gran cantidad de propiedades estructurales y funcionales gracias a la variabilidad al momento de realizar el diseño de mezcla.

La principal características del concreto es su alta resistencia a la compresión en estado endurecido, es por ello que ésta se toma como referencia en los diversos proyectos de construcción. Existen diversas pruebas para medir la resistencia del concreto según unos estándares establecidos, pero las más importantes son las pruebas referidas al control de calidad y cumplimiento de especificaciones.

Cuando no es necesario tener una propiedad específica se emplea el concreto simple y las pruebas se vuelven más sencillas al no presentar exigencia alguna por parte del material. Sin embargo, los resultados de control de calidad y cumplimiento de especificaciones se vuelven más importantes según el alcance de la obra a construir y el tipo de aplicación que se le dará al concreto (pavimentos, puentes, túneles, etc.).

1.1.2 Tipos de concreto

Como se ha mencionado anteriormente, las características del concreto varían según la aplicación que se le dé. Esta variación se logra realizando cambios en su composición, la cual está definida por una mezcla de cemento, agua, agregado grueso y fino, aditivos y aire. En los concretos que requieren alguna característica específica también se incluye el uso de adiciones para alcanzar dicha propiedad. El concreto en estado fresco es una mezcla fluida con la capacidad de ser moldeado unas horas aún después de ser elaborado, hasta el momento en el cual comienza el fraguado inicial y ocurre su endurecimiento e incremento de resistencia con el tiempo.

Las características del concreto, tanto en estado fresco como estado endurecido dependen de las propiedades de los componentes que lo conforman, siendo los más importantes la relación agua/cemento y, la calidad y naturaleza de los agregados.

En general, el concreto normal se aplica en elementos más sencillos y que no necesitan una elevada resistencia como: muros, columnas, losas, cimentaciones y vigas de edificaciones, las cuales solamente requieren valores de resistencia a la compresión ente 150 a 400 kg/cm².

Existen otro tipo de concretos que necesitan características específicas, como el concreto de alto comportamiento, el cual puede presentar alguna de las siguientes propiedades: mayor resistencia a la compresión, bajo o alto peso volumétrico, resistencia a agentes químicos, al clima extremo o al tránsito intenso. Para obtener estas características se realizan cambios en el diseño de mezcla del concreto, incluyendo además de los materiales típicos, aditivos o adiciones; en algunos casos, se emplean técnicas especiales en el momento del mezclado, la colocación y el curado. En la Tabla 1.1 se mencionan algunas de las propiedades que se pueden requerir en estos concretos.

Tabla 1.1 Aplicaciones de concretos de alto comportamiento

Propiedad requerida	Aplicación
Alta resistencia	En cimentaciones especiales, edificios de concreto de gran altura y puentes.
Alto módulo de elasticidad	En cimentaciones especiales, edificios de concreto de gran altura y puentes.
Resistencia a la abrasión	Pavimentos de concreto y pisos industriales con tránsito pesado de maquinaria o vehículos y en obras hidráulicas.
Mayor durabilidad y vida útil prolongada	En obras públicas como: presas, aeropuertos, puertos, puentes, carreteras y túneles.
Baja permeabilidad	Concreto que protege al acero de refuerzo de la corrosión como en obras marítimas, plantas de tratamiento y plantas industriales.
Resistencia al ataque químico	Su aplicación puede ser en hospitales, plantas agrícolas o industrias donde se trabaje con sustancias ácidas.
Alta resistencia al congelamiento y deshielo	Estructuras de concreto sujetas a clima extremo de bajas temperaturas.
Tenacidad y resistencia al impacto	Plantas industriales y talleres mecánicos, donde se requiere de una alta resistencia y dureza superficial del concreto.

Fuente: Rocha (2009).

1.1.2.1 Concreto simple

El concreto simple es un material de construcción formado principalmente por agua, agregados, cemento y aire; esta combinación genera ganancia de resistencia a la compresión después de un tiempo de reacción. Pueden presentar aditivos que modifiquen la velocidad del fraguado, según la cantidad de tiempo de la que se disponga; no obstante, estos no modifican sustancialmente las características finales del concreto.

A pesar de la buena resistencia a la compresión que presenta el concreto, no tiene un buen comportamiento frente a otro tipo de esfuerzos, como la tracción, la flexión, entre otros; por esta razón es que el concreto se complementa con el acero para formar el concreto armado. Estos materiales en conjunto trabajan correctamente ante las diversas sollicitaciones de carga a las que se somete.

Entre las características del concreto simple, destaca su resistencia a la compresión comprendida entre 100 y 400 kg/cm² y su baja resistencia a la flexión, la cual no es muy significativa en el cálculo debido a su bajo valor.

1.1.2.2 Concreto hidráulico

El concreto hidráulico es aquél que después del proceso de hidratación y de las reacciones entre los materiales (endurecimiento) es inalterable frente a condiciones en ambientes acuosos. En este tipo de concretos es muy común el uso de aditivos y adiciones, en cantidades inferiores al 1% en masa del total, para obtener algunas características especiales o modificar el comportamiento del concreto. La gran variedad de adiciones y aditivos utilizados está representado por los siguientes elementos: colorantes, aceleradores, retardadores de fraguado, fluidificantes, impermeabilizantes, fibras, etc.

De acuerdo a la función que cumple, a su peso volumétrico y a su resistencia a la compresión, el concreto hidráulico se clasifica en:

- Concreto hidráulico clase 1: Este concreto presenta en estado fresco una masa volumétrica entre 2200 y 2400 kg/cm³. En estado endurecido presenta una resistencia a la compresión mayor a 250 kg/cm².
- Concreto hidráulico clase 2: Este concreto presenta en estado fresco una masa volumétrica entre 1800 y 2200 kg/cm³. En estado endurecido presenta una resistencia a la compresión menor a 250 kg/cm².¹

1.1.2.3 Concreto de alta resistencia

Antecedentes

Hoy en día, al hablar de concreto de alta resistencia no nos referimos al mismo concepto que se tenía antes. Anteriormente, se les consideraba así a aquellos concretos que alcanzaban los 350 kg/cm², lo que en la actualidad esto es considerado como un valor normal.

En la década de los 80 se consideraba concreto de alta resistencia a aquellos que presentaban valores entre 400 o 500 kg/cm², no obstante, posteriormente se diseñaban concretos cuyos valores de resistencia alcanzaban incluso el doble de estos. Para lo que antes se consideraba el uso de estructuras de acero, como edificios y puentes de dimensiones y claros grandes, ahora se utiliza concreto de alta resistencia para su diseño y construcción.

La evolución que ha tenido este material a lo largo del tiempo se ha dado de forma gradual y constante, pues las investigaciones y pruebas que se realizan sobre este generan la aparición de concretos cada vez mejores. Actualmente, se puede incluso hablar sobre los concretos de muy alta resistencia, los cuales están clasificados en la Tabla 1.2 en cuatro clases según la resistencia promedio alcanzada.

¹ Determinada de acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-2-02-053, *Características del Concreto con Inclisor de Aire*.

Tabla 1.2 Concretos de muy alta resistencia

Clase	Resistencia a la compresión	
	(kg/cm ²)	MPa
I	750	75
II	1000	100
III	1250	125
IV	Más de 1500	Más de 150

Fuente: Rocha (2009).

Las diversas instituciones que analizan el diseño y aplicación del concreto, buscan entender su comportamiento real a través de diversas pruebas de laboratorio; además se evalúan las relaciones existentes entre la proporción y la calidad de los materiales que conforman dicho concreto, así como su mejoramiento en el desempeño mediante una buena colocación. Según investigaciones, es necesario el uso de características específicas en los componentes del concreto y procedimientos especiales de mezclado y dosificación.

Definición

El concreto de alta resistencia es un tipo de concreto de alto desempeño que se caracteriza principalmente por tener una resistencia a la compresión mayor a 400 kg/cm². La producción de este concreto requiere una mayor exigencia en las pruebas de control de calidad y cumplimiento de especificaciones en comparación con el concreto simple.

El ACI² define a este tipo de concreto como aquel que tiene una resistencia a la compresión mayor a 420 kg/cm².

Características

El concreto de alta resistencia se emplea muchas veces para cumplir con las especificaciones de los proyectos que requieren una elevada resistencia a la compresión, no obstante, también se utiliza para aprovechar otras características tales como:

- Colocación de concreto en estado de servicio a una edad mucho menor.
- Construcción de edificios altos con columnas de menor sección, esto también supone un mayor espaciamiento entre elementos y un menor peso de la estructura.
- Alta fluidez que permite bastante facilidad de colocación en zonas congestionadas de acero de refuerzo.
- Construcción de estructuras de puentes con bastante luz, y la capacidad de mejorar la durabilidad e integridad de sus elementos.
- Mejor resistencia a la erosión (CEMEX).

Además, el concreto de alta resistencia es utilizado para satisfacer necesidades específicas para aplicaciones particulares como en presas, cubiertas de gradería, cimentaciones marinas y pisos industriales. Es importante resaltar que la utilización de este tipo de concreto no es una garantía en sí mismo de durabilidad.

² American Concrete Institute

Este concreto cuenta con un estricto control de calidad de sus componentes primarios, además de un monitoreo de su proceso de producción con tecnología bastante desarrollada. A pesar de estas facilidades de seguridad, es necesario tener siempre precaución con:

- El tiempo de manejabilidad, pues es menor al del concreto simple y se debe procurar realizar una buena colocación.
- La altura de bombeo máxima es de 25 metros de altura, se debe utilizar aditivos ayudantes de bombeo para alturas mayores.
- No se debe aplicar vibrado, mezclado, ni reutilizar el concreto que ya haya comenzado el fraguado en caso se den demoras en la obra.

Requerimiento de materiales

Para obtener las características deseadas en este concreto es necesario que se tenga cuidado con la selección de sus componentes, además, estos deben cumplir con una serie de exigencias con el fin de asegurar una buena resistencia a la compresión.

Se recomiendan los cementos tipo I y II, con cantidades de silicato tricálcico mayores a los normales, un módulo de finura alto y una composición química uniforme. En el caso del agregado grueso o grava, se requiere una alta resistencia mecánica, estructura geológica sana, bajo nivel de absorción, buena adherencia, de tamaño pequeño y densidad elevada. Para el agregado fino (arena) se pide una buena graduación, poco material fino plástico y módulo de finura cercano a 3.00.

La mezcla debe tener una relación agua/cemento baja, entre 0.25 y 0.35, el cemento debe mezclarse previamente con el agua con una revolvedora de alta velocidad, además, se debe emplear agregados cementantes, controlar el período de curado, compactar el concreto por presión y realizar un confinamiento bidireccional.

Se recomienda el uso de uno o más aditivos químicos combinados, como superfluidificantes y retardantes; y el uso de aditivos minerales como ceniza volante, microsílica o escoria de alto horno.

Cuando se tiene como finalidad alcanzar una muy alta resistencia a la compresión, es necesario tener un control de calidad de cada uno de los materiales de la mezcla; es por ello que se debe cumplir con una relación agua/cemento adecuada para poder atender las características del concreto que supongan una buena trabajabilidad y, por lo tanto, su revenimiento.

En caso de existir dificultades para lograr una alta resistencia, ésta no se puede incrementar solamente aumentando la cantidad de material cementante. Los factores que pueden afectar el procedimiento de mezcla y por ende impedir alcanzar una resistencia alta contra la compresión pueden ser: materiales nocivos en los agregados, agregado grueso fracturado, inadecuada forma y textura, entre otros.

Usos y aplicaciones

El uso de este tipo de concreto se ha incrementado considerablemente en los últimos años gracias a las facilidades que este material presenta, especialmente en obras de gran tamaño. El concreto de alta resistencia es muy utilizado en estructuras de gran alcance ya que este permite reducir las dimensiones de los diversos elementos estructurales, esta reducción genera un material más resistente y durable, además, se ha podido demostrar según análisis dinámicos que existe una disminución del desplazamiento lateral.

Unos estudios han podido demostrar que en términos económicos, la utilización de un concreto de alta resistencia no supone un problema, esto se debe al cambio de tamaño en los elementos estructurales, los cuales tendrían una menor sección transversal. Sin embargo, el uso de este concreto tiene en su contra la falta de reglamentos actuales que expliquen sobre su comportamiento detallado cuando se utiliza en elementos estructurales de alta resistencia.

A pesar de que existen diversas construcciones con este concreto, no se ha logrado obtener procedimientos para su elaboración. Por ello, diversos institutos están en la búsqueda de: las características necesarias de los materiales para lograr una alta resistencia a la compresión y los aditivos más recomendables para conseguir un alto comportamiento del concreto.

1.1.2.4 Concreto Fondag

Es un concreto de alta resistencia obtenido como el resultado de la mezcla de dos componentes fundamentales que aseguran una alta resistencia contra la compresión y una buena resistencia contra la abrasión, además permite que este concreto pueda ser utilizado en ambientes acuosos, es decir, lugares en contacto directo con el agua.

Las características de alta resistencia las obtiene de la calidad de los agregados, los cuales son conocidos como ALAG o agregados de alta resistencia, cuya principal propiedad es su elevada densidad; además, para alcanzar una adecuada resistencia contra la abrasión y la capacidad de trabajar este concreto en un medio acuoso se recurre al uso de cementos de aluminato cálcico.

Cementos de aluminato cálcico

Son cementos que tienen como principal compuesto el aluminato de calcio hidráulico. Estos también son conocidos como cementos aluminosos, cementos con alta alúmina y como Ciment fondu en Francia.

Generalmente este tipo de cemento no tiene un uso convencional sino que está destinado a proyectos con requerimientos específicos, por lo que se aprecia que este material es usado en cantidad a pequeña escala y solamente para aplicaciones especiales.

Antecedentes

La primera aparición de estos cementos se dio en Francia en el año 1908, donde Jules Bied de la Pavin de la Lafarge Company patentó este material después de lograr su obtención a partir del proceso de fabricación de cemento a partir de caliza y bauxita de bajo sílice.

Se desarrolló inicialmente como el resultado de la búsqueda de un cemento que ofreciera propiedades de resistencia a los sulfatos, posteriormente se descubrieron otras propiedades que garantizaron su futuro en aplicaciones especializadas.

Composición

El principal constituyente activo de estos cementos es el aluminato monocálcico. Sin embargo, estos usualmente contienen otros aluminatos cálcicos, así como una gran variedad de fases menos reactivas procedentes de las impurezas de las materias primas. Por ello, se cuenta con una amplia gama de composiciones, estas dependen de la aplicación y la pureza de la fuente de aluminio utilizada.

Aplicaciones

Debido a su costo relativamente alto, los cementos de aluminato cálcico son utilizados en una cantidad de aplicaciones reducidas tales como:

- En concretos de construcción, el desarrollo de resistencia es logrado de manera rápida incluso a bajas temperaturas.
- En concretos de construcción, es posible desarrollar una alta resistencia química.
- En concretos refractarios, la resistencia se mantiene a altas temperaturas.
- Como componente de formulaciones de cemento mezclado, pueden ser obtenidos varias propiedades como el desarrollo bastante rápido de resistencia y expansión controlada.

Precauciones

El uso incorrecto de los cementos de aluminato de calcio ha dado lugar a bastantes problemas en el sector de la construcción, especialmente durante el tercer cuarto del siglo XX, cuando se utilizó este tipo de cemento por sus facilidades al momento de obtener un rápido endurecimiento.

Después de muchos años algunos de los edificios y estructuras que fueron construidas con este material, colapsaron debido a la degradación del cemento y, por lo tanto, muchos de ellos tuvieron que ser demolidos o reforzados. El proceso de degradación que ocurría en estas estructuras se conocía como conversión, el cual era acelerado por la acción del calor y de la humedad.

Ciment fondu Lafarge

Este cemento, desarrollado por la compañía francesa Lafarge, es un aglomerante hidráulico con alto contenido en alúmina que presenta una riqueza en óxido de aluminio (Al_2O_3) del 40% aproximadamente.

Gracias a su porcentaje de aluminato monocálcico, los morteros y concretos desarrollados con este material obtienen excelentes características mecánicas, principalmente una excelente resistencia. Además, contiene cantidades de óxido de hierro que lo convierten en un ligante adecuado para aplicaciones refractarias siempre y cuando no se utilicen adiciones.

El Ciment fondu Lafarge tiene procesos de fabricación y comercialización que sigue un control de calidad certificado según la norma ISO 9002.

En la actualidad, Lafarge sigue realizando tareas de investigación y desarrollo centrándose en la innovación y trabaja para mejorar continuamente las propiedades de este cemento.

Composición

Las Tablas 1.3 y 1.4 muestran la composición del Ciment fondu Lafarge según el resultado obtenido por las normas EN 196-2 y EN 196-21, las cuales están referidas al análisis químicos de los cementos y la determinación de contenido de cloruros, dióxido de carbono y alcalinos en los cementos, respectivamente.

Tabla 1.3 Componentes principales del *Ciment fondu* Lafarge (en %)

Componente	Valores típicos	Valores garantizados
Al ₂ O ₃	37.5 – 41.5	> 37.0
CaO	36.5 – 39.5	< 41
SiO ₂	2.5 – 5.0	< 6.0
Fe ₂ O ₃	14.0 – 18.0	< 18.5
MgO	-	< 1.5
TiO ₂	-	< 4

Fuente: Ciment fondu Lafarge. Ficha Comercial.

Tabla 1.4 Componentes secundarios del *Ciment fondu* Lafarge (en %)

Componente	Valores estrictos garantizados
S en forma de iones sulfuro	< 0.1
Cl en forma de iones cloruro	< 0.1
Na ₂ O + 0.6K ₂ O	< 0.4

Fuente: Ciment fondu Lafarge. Ficha Comercial.

Los valores garantizados están establecidos a partir de un nivel de calidad aceptable (NCA) de 2.5% según la norma ISO 3941; los valores estrictos garantizados se refieren a los límites estrictos de conformidad del producto, y finalmente, los valores típicos son los valores habituales de la producción.

Usos

El Ciment fondu Lafarge es utilizado en un amplio rango de aplicaciones:

- Como reactivo en productos formulados.
- Como bases aglutinantes hidráulicas en concretos especiales y refractarias.
- Como acelerador en cementos Portland.

Cuando es utilizado por sí solo o como base aglutinante hidráulica para concretos especiales, el Ciment fondu puede producir una serie de características específicas como lo son:

- Excelente resistencia al calor y a los ciclos térmicos
- Excelente resistencia contra la abrasión.

Cuando este cemento se utiliza en combinación con agregados especiales como los agregados sintéticos de alta resistencia ALAG, puede obtenerse un mejor desempeño del concreto obtenido.

A diferencia del cemento Portland, el Ciment fondu no produce la liberación de cal durante el proceso de hidratación; esta característica provee de una buena resistencia química al concreto ante ácidos corrosivos y una gran cantidad de sustancias agresivas.

Aplicaciones

Este material tiene numerosas aplicaciones dentro del sector de la Ingeniería Civil, entre ellas destaca su uso en la construcción de pisos industriales, presas, aliviaderos, canales y otras obras hidráulicas, también se aplica como reemplazo de losas de carretera y en descarga y transferencia de bahías.

Entre las aplicaciones refractarias, el Ciment fondu es utilizado principalmente en el aislamiento del concreto; cuando es usado en combinación con los agregados adecuados, el concreto obtenido puede ser aplicado hasta en obras donde se alcancen temperaturas superiores a los 1100°C.

En productos formulados usados en la química de la construcción, el Ciment fondu es usado como reactivo o como aglutinante principal en una amplia gama de productos, entre ellos, el mortero de fraguado rápido, el cemento cola (pegamento de azulejos), productos autonivelantes, etc.

Este material también se comercializa como acelerador de cemento Portland para trabajos de sellado rápido y en reparaciones menores. Cuando se trata de fines estructurales, no debe aplicarse mezclas de Ciment fondu con cemento Portland.

En comparación con las compañías inglesas que también fabrican este material bajo los requisitos establecidos por la norma EN 14647, las instalaciones francesas que producen este cemento exigen controles de calidad adicionales y más rigurosos definidos por la norma NF 002, la cual supone el cumplimiento de la etiqueta NF como ligante hidráulico. (Kerneos Inc.)

Características

Este es un concreto premezclado que presenta una excelente resistencia frente a varios factores, entre ellos, la temperatura, los choques térmicos, la abrasión, cavitación y corrosión; por este motivo es que este material es utilizado en proyectos con aplicaciones de mayor exigencia.

En el proceso de hidratación del concreto Fondag, además de ocurrir una unión física entre el cemento y los agregados, también se da una adherencia química que permite el desarrollo elevado de las características antes mencionadas.

En lo que respecta a la resistencia frente a la temperatura extrema y los choques térmicos, el concreto Fondag responde de manera muy estable en un rango de temperaturas que va desde los -180°C hasta los 1100°C, esto se debe gracias a su alto contenido de alúmina y la ausencia de cal libre.

Frente a la abrasión, los choques mecánicos y el punzonamiento, este concreto presenta altas resistencias en comparación con los concretos convencionales, debido a su baja porosidad, excelente dureza y alta densidad (2650 kg/m³).

Este material también tiene aplicaciones en lugares donde se requiera una elevada resistencia inicial, aprovechando su característica de rápido endurecimiento, la cual le permite alcanzar valores de resistencia a la compresión de 250 kg/cm² en un tiempo de 6 a 8 después de su colocación y de entre 550 a 600 kg/cm² a las 24 horas.

Además, su baja porosidad combinada con la ausencia de generación de hidróxidos de calcio libre durante la hidratación, le permiten resistir ambientes corrosivos y sustancias que contengan ácidos diluidos con pH entre 3.5 a 11.

Entre otras características, este material presenta una buena resistencia frente al ácido sulfhídrico presente en aguas servidas (pH 2.0), baja humedad residual, facilidad de uso, etc.

Usos

El concreto Fondag está diseñado especialmente para los ambientes más agresivos donde estén presentes las fuerzas de abrasión, erosión, impacto mecánico, químico, corrosión, altas temperaturas y repetitivos choques térmicos, por lo que su uso es ideal en las siguientes aplicaciones:

- Trabajos donde se requiera una fuerza mecánica elevada en un corto periodo de tiempo.
- Trabajos que necesiten una alta resistencia frente a la corrosión por sulfatos, aceites, efluentes industriales, agua con agentes agresivos y ácidos diluidos (pH mayor a 3.5).
- Trabajos que estén sujetos a abrasión, erosión e impacto mecánico. El concreto Fondag logra una mejor resistencia frente al desgaste producido por agregados naturales de alta dureza.
- Trabajos con necesidades de resistencia frente a choques térmicos a muy bajas temperaturas, por ejemplo los causados por gases licuados.
- Trabajos con necesidades de resistencias a altas temperaturas y choques térmicos repetitivos.

Adicionalmente, la aplicación de este concreto es adecuada para situaciones muy exigentes, tales como:

- Áreas expuestas al calor, al desgaste e impacto como resultado de la producción de acero e industrias metalúrgicas: siderúrgicas y metalúrgicas no ferrosas.
- Superficies industriales sometidas a usos intensivos como en: industrias químicas, petroquímicas, de acero, metalúrgicas y de alimentos.
- Estructuras hidráulicas sometidas a abrasión y erosión, entre ellos: vertederos, presas, compuertas, etc.
- Aplicaciones criogénicas: áreas en contacto directo con gases licuados.

1.2 Abrasión y erosión en estructuras hidráulicas

1.2.1 Abrasión

La palabra abrasión es un término genérico muchas veces utilizado para describir el desgaste de estructuras de concreto; este daño puede darse de diversas maneras, sin embargo, la abrasión propiamente dicha hace referencia al desgaste producido por la interacción entre dos sólidos a través del rozamiento o fricción.

Por lo tanto, se define a la resistencia a la abrasión como la habilidad de una superficie de concreto a resistir el desgaste por roce, frotamiento y fricción.

1.2.1.1 Tipos de abrasión

Globalmente, la abrasión se designa al desgaste que ocurre en un mecanismo entre dos sólidos que se mueven en direcciones contrarias, la fricción entre estas dos partículas generará el desgaste en la superficie del cuerpo con menor dureza. Pero al analizar la

abrasión, lo importante es conocer el modo cómo estos dos sólidos entran en contacto, de ahí es que se distinguen dos tipos de abrasión: por fricción y por impacto.

Abrasión por fricción

La abrasión por fricción se designa en casos donde las partículas se desplazan sobre una superficie con un movimiento más o menos paralelo, y generan fuerzas normales a lo largo de ésta, como se observa en la Figura 1.1.

La dureza de las partículas en movimiento determina qué tan perjudiciales son para la superficie del concreto.

Abrasión por impacto

El deterioro por impacto ocurre cuando un cuerpo sólido en movimiento golpea de manera puntual sobre una superficie. En la Figura 1.2 se observa que la energía de impacto no es aplicada sobre una superficie considerable sino sobre una zona específica.

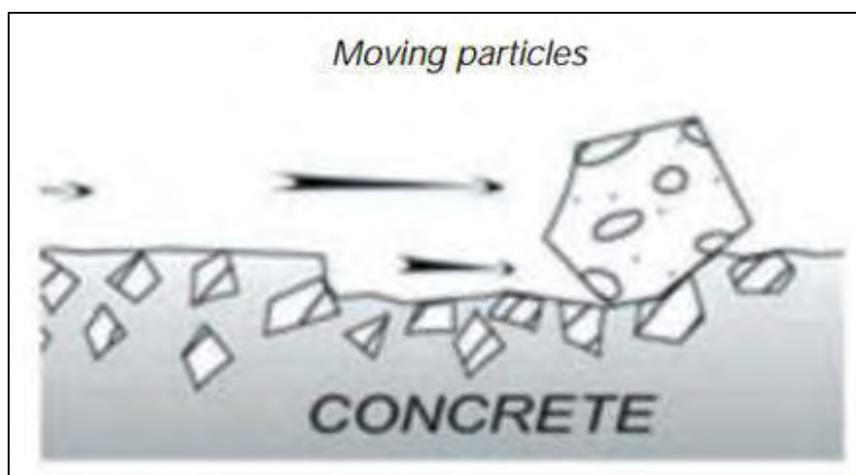


Figura 1.1 Abrasión por fricción.

Fuente: Van Herdeen, Fryda & Saucier (2005)

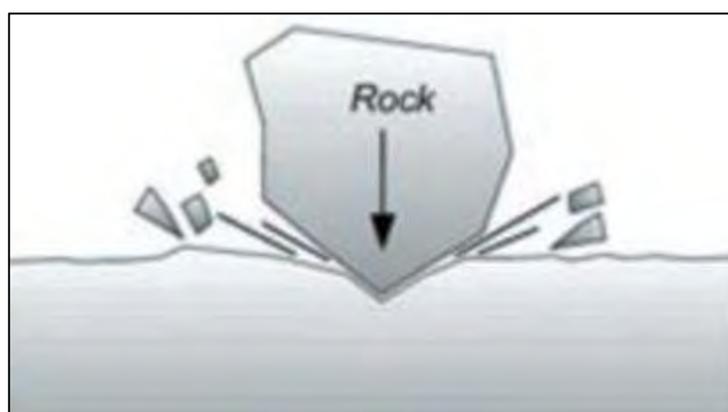


Figura 1.2 Abrasión por impacto.

Fuente: Van Herdeen, Fryda & Saucier (2005)

El impacto supone la aplicación de una gran cantidad de energía repentina sobre el material, eso favorece la creación y la propagación de grietas. Se puede afirmar que la aparición y expansión de estas grietas dependen de las propiedades intrínsecas de cada material y del nivel de esfuerzo en la zona de la grieta. Bajo un impacto repetitivo y continuo, las grietas

irán incrementando su tamaño y uniéndose entre ellas para lograr el desprendimiento de grandes porciones de material. (Van Heerden, Fryda, & Saucier, 2005)

1.2.2 Erosión en estructuras hidráulicas

Ghaffori y Col. (1995), citados por Hilerio & Gonzales (2003), indicaron que el término erosión es normalmente utilizado para describir el desgaste abrasivo ocasionado por la acción de fluidos que contienen partículas en suspensión, tal como ocurre en los revestimientos de canales y en otros tipos de estructuras hidráulicas.

1.2.2.1 Erosión en concreto de alta resistencia

Muchas obras de ingeniería están expuestas constantemente a distintos fenómenos que pueden afectar su durabilidad y funcionalidad, tal es el caso de las estructuras hidráulicas, las cuales deben trabajar permanentemente en contacto directo con el agua y con los sedimentos que transporta.

En estas estructuras, el término erosión se utiliza para hablar sobre el proceso de desintegración de superficies de concreto expuestas, producto de las cargas que surgen del transporte de sedimentos.

Las superficies del concreto suelen estar sometidas al desgaste abrasivo producido por la capacidad de transporte de agua y la acción de los sólidos llevados en ella; generalmente, estos factores conducen a la erosión del concreto, por lo que es necesario conocer la resistencia a la abrasión del concreto.

Esta resistencia influye bastante en la vida útil en obras tales como: diseño de pisos industriales, pavimentos, canales, vertedores de presas, entre otros; por ello, éstas se diseñan y construyen con un concreto de alta resistencia (CAR) para asegurar un mejor desempeño.

Vales (1997), citado por Hilerio & Gonzales (2003) menciona que algunos estudios han encontrado que la resistencia a la abrasión del concreto hidráulico depende primordialmente de la microestructura superficial del concreto. Mientras que otros análisis han demostrado que la resistencia a la compresión y la resistencia a la abrasión están fuertemente relacionadas.

Cabe resaltar que a pesar que el desgaste por abrasión no ocasione problemas estructurales, puede traer consecuencias en el comportamiento bajo las condiciones de servicio o indirectamente facilitar la pérdida de durabilidad por otros factores (agresión química, corrosión, etc.). Sin embargo, es difícil cuantificar dicha resistencia, debido a que la acción perjudicial varía de un caso a otro, según indican Toutaniji y Col. (1999), citados por Hilerio & Gonzales (2003).

No hay criterio general para definir la resistencia a la abrasión, por lo general, esta resistencia se evalúa en base a un conjunto de parámetros que definen las propiedades mecánicas del concreto, además se utilizan de métodos que investigan y buscan simular de manera realista los procesos abrasivos.

Dado que es difícil evaluar la resistencia del concreto a la abrasión, se ha considerado que ninguno de los procedimientos de prueba actuales es el más apropiado porque no toma en cuenta todas las condiciones y variables que intervienen en el fenómeno. (Hilerio & González, 2003).

Los principales daños que ocurren por erosión en las obras hidráulicas son los siguientes:

A. Daños por erosión de materiales abrasivos:

Estructuras hidráulicas como vertederos, estribos de puentes y túneles, debido a la acción de materiales abrasivos transportados por corrientes lentas de agua (frotamiento más raspadura).

B. Daños de erosión por cavitación:

Diques, vertederos, túneles y otros sistemas transportadores de agua, donde la velocidad del agua es alta y hay presencia de bajas presiones. Se produce una separación del flujo de agua de la superficie. A esto por lo general se le conoce como erosión por cavitación.

1.2.2.2 Proceso de erosión

En obras hidráulicas el término erosión es usado para describir el desgaste de la superficie sólida como resultado de la acción del flujo del agua y de la acción de las partículas transportadas en ella.

La aparición de esta erosión en superficies de concreto de estructuras hidráulicas puede ser causada por la acción de los procesos de deterioración debido a:

- Fuerzas de fricción durante el deslizamiento y rodadura de los sedimentos transportados por la corriente de agua en contacto con las superficies de concreto.
- Fuerzas de impacto de los sedimentos transportados por la corriente de agua debido al choque de éstas con las superficies de concreto.

El proceso abrasivo del concreto se da en varias etapas. En la fase inicial la erosión es causada por el transporte de sedimentos, los cuales generan daños en la estructura a través de la rodadura y deslizamiento de las partículas sobre la superficie de concreto.

Posteriormente, por el aumento de la capacidad de transporte, las partículas más pequeñas entran en un estado de suspensión y las más grandes empiezan a desplazarse a modo de rebote. En esta fase, el proceso de abrasión depende principalmente de la carga de transporte en el fondo. Además de la acción de molienda contra la superficie de concreto, se pueden observar daños a la superficie producto del impacto de partículas sólidas.

Al incrementar aún más el transporte de sedimentos, aumenta la presión del agua debido a la existencia de una mayor cantidad de partículas y de mayor tamaño, las cuales intensifican el proceso abrasivo. El daño en las superficies de concreto está relacionado con el incremento del tamaño de las partículas sólidas y la intensidad del impacto contra el fondo.

Los daños a las superficies de concreto son el resultado de procesos hidrodinámicos del flujo de agua y la acción abrasiva causada por las partículas transportadas. Los impactos del flujo de agua en el proceso de falla se expresa mediante esfuerzos de corte en la superficie, esfuerzos normales y presión interna del cuerpo de la estructura hidráulica. Las partículas transportadas por el agua se desplazan sobre la superficie a través de movimientos característicos como rotación, movimiento de translación, saltación y las combinaciones entre ellos.

La acción erosiva de las partículas transportadas causa la aparición de grietas finas en la superficie y en el interior de la estructura de concreto. Estas grietas se generan debido a la limitada resistencia a la tracción del concreto. Las fuerzas de compresión y tracción aceleran el desarrollo de las grietas, debilitan la estructura por fatiga y destruyen los enlaces internos en la estructura, mientras que el flujo de agua empieza a arrastrar las partículas de concreto que se desprende. El proceso de degradación continúa en el interior de la estructura haciendo más visibles los daños.

El proceso de deterioración es incluso más rápido en flujos turbulentos debido a la intensidad de los fenómenos hidrodinámicos (presión de agua, vibración en la estructura y choque de partículas contra la base).

Los daños causados por la acción abrasiva del agua están caracterizados por la rugosidad, la superficie irregular con presencia de agujeros y protuberancias en la estructura.

La abrasión en estructuras hidráulicas ocurre normalmente en las partes expuestas de las estructuras de evacuación, tales como: aliviaderos, canales de salida, canales de derivación, cuencas de aquietamiento, desagües de drenaje y alcantarillas.

1.2.3 Resistencia a la abrasión vs resistencia a la compresión

Como ya ha sido mencionado, no existe un criterio general para cuantificar la abrasión en las estructuras de concreto; sin embargo, hay pruebas de desgaste que miden la profundidad de dicha abrasión en este tipo de estructuras. Los ensayos más empleados están contemplados en la norma ASTM-C-779, entre ellos están:

1.2.3.1 Método de los discos giratorios

Esta prueba consiste de un disco con tres superficies planas que giran en trayectoria circular a 0.2 Hz. Cada superficie gira sobre su propio eje a 4.7 Hz. Se emplea arenisca de carburo de silicio del N° 60 como agente abrasivo. Los especímenes (3 piezas) pueden ser de aproximadamente 30.5 cm por lado. La prueba dura 30 minutos, en donde al final se mide la profundidad individual y se obtiene un promedio. Además el informe deberá contener los datos de la mezcla de concreto.

1.2.3.2 Método de las ruedas dentadas

Este procedimiento consta de la acción de tres ruedas dentadas de acero que giran libremente y a su vez están sujetas a un árbol vertical. Las muestras usadas pueden ser de 30.5 cm. por lado. La prueba tiene una duración de 30 a 60 minutos dependiendo del tipo de simulación. El informe contiene la profundidad obtenida con respecto al tiempo a intervalos de 15 minutos, así como los datos de la mezcla del concreto.

1.2.3.3 Método del cojinete de bolas

La función de este aparato es dependiente de la acción abrasiva de un arreglo de baleros que giran a 17 Hz con una carga en una superficie húmeda. La acción del agua con las partículas sueltas durante la prueba proporciona impacto, generando así una fricción deslizante. Los tamaños de las probetas son iguales al de los procedimientos anteriores. El informe consistirá en obtener la profundidad a cada 50 segundos durante 1200 segundos que dura la prueba.

Algunos estudios realizados por Hilerio y González (2003) del Departamento de Materiales de la Universidad Autónoma Metropolitana de México determinaron, mediante el ensayo de “concreto lavado con chorro de arena a presión” descrito en la norma ASTM-C-418 que, existe una relación entre la resistencia a la compresión y a la abrasión.

En la Figura 1.3 se pueden observar los resultados obtenidos de dichos ensayos, en estos se distinguen dos grupos claramente definidos: mezclas de concreto de alta resistencia con volúmenes de desgaste bajos y, mezclas de concreto con resistencias normales y gran volumen de desgaste.

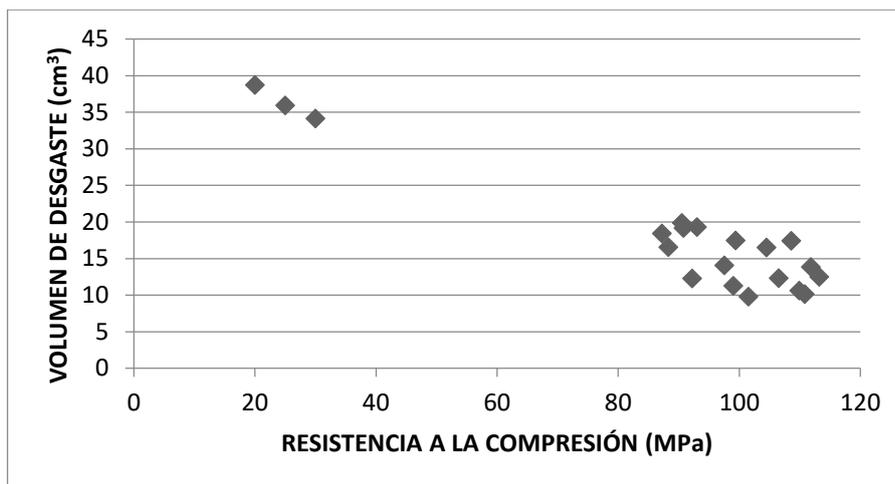


Figura 1.3 Volumen de desgaste en función de la resistencia a la compresión.

Fuente: Hilerio &González (2003).

Con dichos resultados, Hilerio y González (2003) llegaron a las siguientes conclusiones:

- Es posible reducir el problema del desgaste del concreto hasta un 55%, siempre y cuando se haga uso de concretos de alta resistencia.
- Dado que el concreto hidráulico es un material compuesto, la variabilidad de densidades en toda la masa será una causa que origina que el desgaste no sea uniforme.

1.3 Disipación de energía

1.3.1 Proceso de disipación de energía

En el flujo natural del agua de un río a través de su cauce, se puede apreciar la formación de diversas ondulaciones debido a la falta de uniformidad del movimiento del flujo; esto supone que, a mayores velocidades se presenten más ondulaciones, las cuales son las encargadas de que se produzca la turbulencia necesaria que conlleve a la generación de las pérdidas de energía.

Este proceso ocurre de manera similar en un canal de conducción. En ellos, se producirá una mayor pérdida de energía ante materiales que presenten una mayor rugosidad. Es por este motivo que, para establecer la capacidad de conducción de un canal es importante definir las pérdidas generadas como resultado de la fricción del fluido con las paredes del mismo.

Las pérdidas de energía debido a la fricción se rigen según la ecuación de Darcy-Weissbach, ésta generalmente se utiliza en el cálculo de la pérdida de energía en tuberías, sin embargo, puede ser aplicada para calcular dicha pérdida en un canal de conducción mediante el cambio de una de las variables.

La ecuación de Darcy-Weissbach (ecuación 1.1) está definida en función de la velocidad del flujo, la longitud de contacto entre el fluido y el conducto, y el diámetro del conducto:

$$hf = f \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \left(\frac{V^2}{2 \cdot g}\right) \quad (1.1)$$

Al tratarse de un canal, se cambia el diámetro del conducto por un valor equivalente, el cual viene a ser cuatro veces el radio hidráulico (R_h).

$$hf = f \cdot \left(\frac{L}{4 \cdot R_H} \right) \cdot \left(\frac{V^2}{2 \cdot g} \right) \quad (1.2)$$

Esta equivalencia entre $D = 4 \cdot R_H$ se demuestra de la siguiente manera:

$$R_H = \frac{A}{P} = \frac{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}{\pi \cdot D} = \frac{D}{4} \rightarrow D = 4 \cdot R_H \quad (1.3)$$

Si consideramos la relación entre las pérdidas por fricción y la longitud del canal, se obtiene la pendiente del gradiente hidráulico, que es:

$$S = \frac{hf}{L} \quad (1.4)$$

Despejando el valor de la velocidad, y agrupando las variables de gravedad y el factor de fricción nos da:

$$V = C \cdot \sqrt{R_H \cdot S} \quad (1.5)$$

Siendo:

$$C = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{f}} \quad (1.6)$$

Obtenemos la ecuación de Chezy para un flujo uniforme. La constante C depende del tipo de aplicación y las condiciones de estudios que se tengan. Robert Manning relacionó esta expresión con el coeficiente de la rugosidad n, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_H^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (1.7)$$

En estas fórmulas mencionadas se tiene:

hf = Pérdida de energía por fricción (m).

f = Factor de fricción.

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

S = Pendiente del fondo del canal.

R_H = Radio hidráulico (m).

Esta velocidad expresada en forma de gradiente está vinculada con la existencia de esfuerzos de corte, debido a que estas se relacionan, según la ecuación de Newton de la viscosidad, de la siguiente manera:

$$\tau = u \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad (1.8)$$

Donde u es la viscosidad del fluido (cm^2/s) y dv/dy es la relación entre el diferencial de velocidad y el diferencial de profundidad.

Para un fluido ideal estos esfuerzos de corte no existen, pues la fuerza de resistencia del cuerpo es igual a cero. En el caso de fluidos reales, esta fuerza de resistencia es el resultado de la aparición de esfuerzos cortantes; dicha fuerza viene a ser la integración de estos a lo largo de toda la superficie:

$$T = \int_A u \left(\frac{dv}{dy} \right) dA \quad (1.9)$$

Donde T es la fuerza de arrastre o resistencia de superficie (N).

A esta fuerza resultante se le conoce como resistencia de superficie porque los esfuerzos de corte son proporcionales al área donde actúan. Estos esfuerzos generan una transformación en dicha zona, la cual es interpretada como pérdidas de energía producidas por las fuerzas de resistencia (Villamarín, 2013).

1.3.2 Resalto hidráulico

El resalto o salto hidráulico es el resultado de la elevación brusca del nivel de agua que se da en un canal abierto, debido al retardo de la corriente por las condiciones de flujo aguas abajo. Precisamente, el resalto se forma por la pronunciada curvatura de las líneas de corriente de un flujo rápidamente variado; dicho flujo se caracteriza por tener un régimen supercrítico que presenta grandes velocidades y alta turbulencia a lo largo del canal.

Con la formación de este resalto se produce una transición violenta del cambio de flujo, de supercrítico a subcrítico como se aprecia en la Figura 1.4.

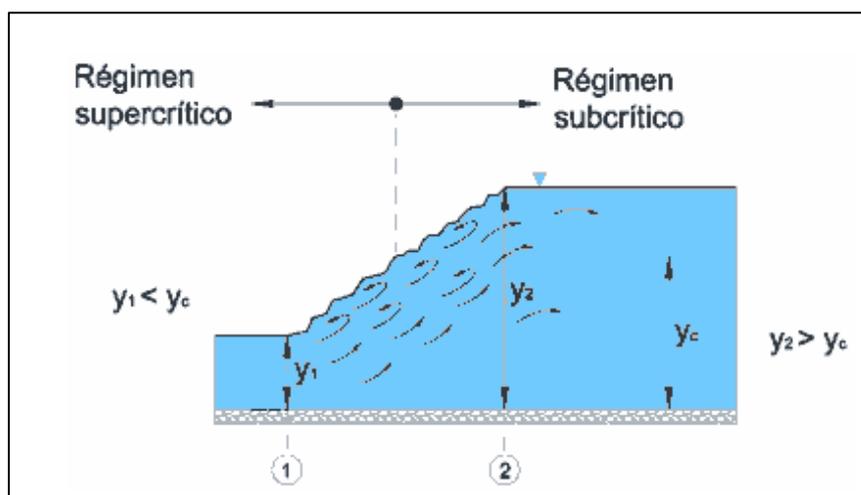


Figura 1.4 Cambio de régimen en salto hidráulico.

Fuente: <http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/06/el-rapidamente-variado-el-cual-va.html>

Se recurre a cambios repentinos de dirección y de sección para inducir la aparición del resalto, y así, generar en el flujo una gran turbulencia y conseguir dicha disipación. En la Figura 1.5 se ve que generalmente, el salto se forma después de pasar a través de una

compuerta, aguas abajo de un vertedero o posterior al cambio brusco de una pendiente alta a una casi horizontal.

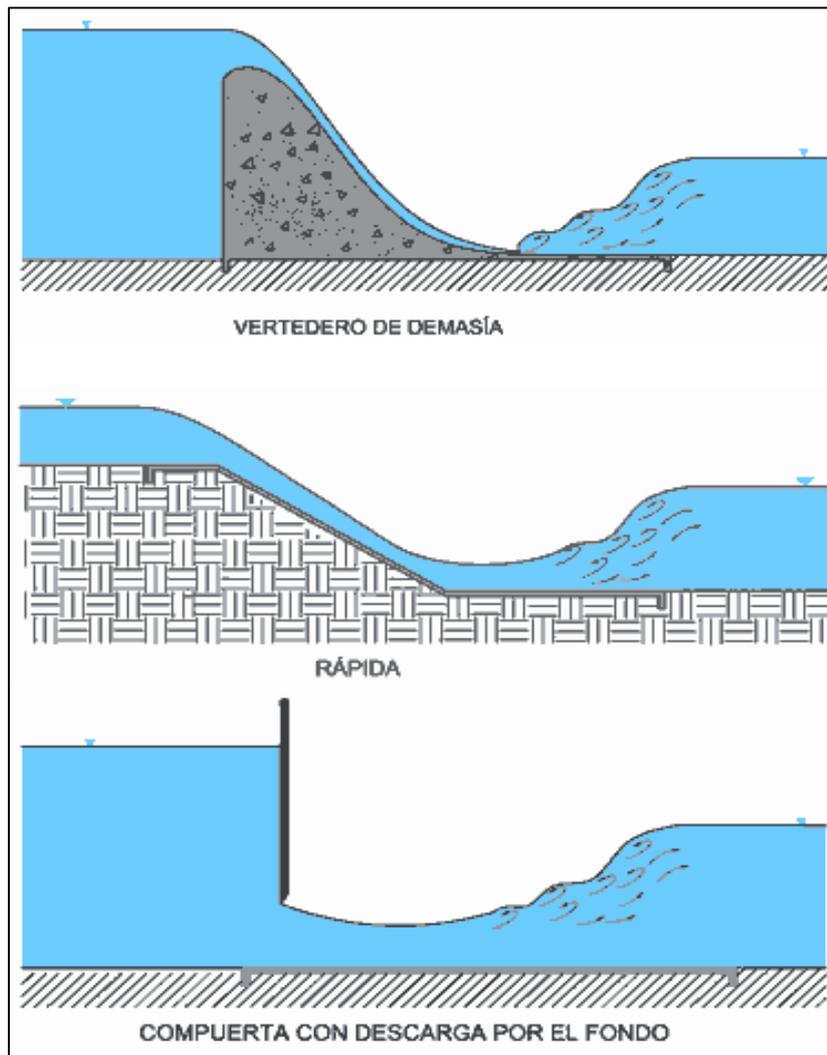


Figura 1.5 Lugares de formación de salto hidráulico.

Fuente: <http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/06/el-rapidamente-variado-el-cual-va.html>

1.3.2.1 Aplicaciones

Como aplicación principal, el resalto hidráulico es utilizado en la búsqueda de la disipación de energía en flujos con grandes velocidades para prevenir la erosión aguas abajo de la estructura; sin embargo, se ha aprovechado la aparición este fenómeno para los siguientes usos:

- Generar un aumento en el nivel de aguas debajo de la estructura en n canaletas de medición, canales de irrigación y estructuras de distribución de agua.
- Conseguir una mayor profundidad del agua aguas debajo para aumentar el peso sobre la losa de mampostería ubicada en esta zona, y por ende, lograr una reducción de las presiones en la parte superior de la estructura.
- Indicar condiciones especiales de flujo, como la existencia de flujo supercrítico o la presencia de una sección de control, de tal manera que puede localizarse una estación de aforo.

- Prevenir la ocurrencia de fenómenos de erosión o socavación en la base de estructuras hidráulicas como presas, vertederos, entre otros.
- Mezclar químicos utilizados para la purificación de agua y casos similares.
- Airear el agua en sistemas de suministros urbanos.
- Remover bolsas de aire en las líneas de suministro de agua y prevenir el taponamiento por aire. (Chow, 2004).

1.3.2.2 Clasificación

El criterio de clasificación del flujo se realiza a partir del número adimensional de Froude (Fr), el cual está expresado en función de la velocidad media de la sección del canal, la profundidad hidráulica y la aceleración de la gravedad; estas tres variables se relacionan de la siguiente manera:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D_H}} \quad (1.10)$$

Donde:

v = Velocidad media de la sección del canal (m/s).

D_H = Profundidad crítica, la cual es la relación entre el área transversal de la sección (A) y el ancho del espejo de agua (T).

g = Constante de gravedad (m/s^2).

De esta manera se puede distinguir tres tipos de flujo:

- Flujo subcrítico, el número de Froude es menor a la unidad ($Fr < 1$):
Presentan velocidades y pendientes bajas debido a que las fuerzas gravitacionales son mayores a las fuerzas inerciales, esto genera un incremento en el tirante de agua.
- Flujo crítico, el número de Froude es igual a la unidad ($Fr = 1$):
Se caracteriza por tener gran inestabilidad debido a las constantes combinaciones entre las fuerzas inerciales y gravitacionales, por esta razón, se le considera como un estado intermedio entre los otros dos tipos de flujos donde no se forman saltos hidráulicos. Es poco recomendable y no se acepta el diseño de obras hidráulicas en estas condiciones.
- Flujo supercrítico, el número de Froude es mayor a la unidad ($Fr > 1$):
Las fuerzas inerciales tienen un papel más importante que el de las fuerzas gravitacionales. A diferencia del flujo subcrítico, las velocidades y pendientes tienen un valor alto, y por ende, la altura del agua es más pequeña. En este estado, es donde se incrementa la aparición de resaltos hidráulicos, los cuales se subclasifican según su capacidad de disipación de energía. Los flujos supercríticos pueden presentar un valor de Froude hasta mayores de 9, punto donde alcanzan su mayor capacidad de disipación.

El U.S. Bureau of Reclamation, citado por Villamarín (2013), clasifica a los resaltos hidráulicos formados en flujos supercríticos según el número de Froude al inicio del resalto; de esta manera se obtienen seis grupos, los cuales son:

- $Fr=1$, el flujo es crítico y no se forma el resalto.

- $1 < Fr_1 < 1.7$, la superficie del agua muestra ondulaciones y se presenta el **resalto ondulante** (Figura 1.6).

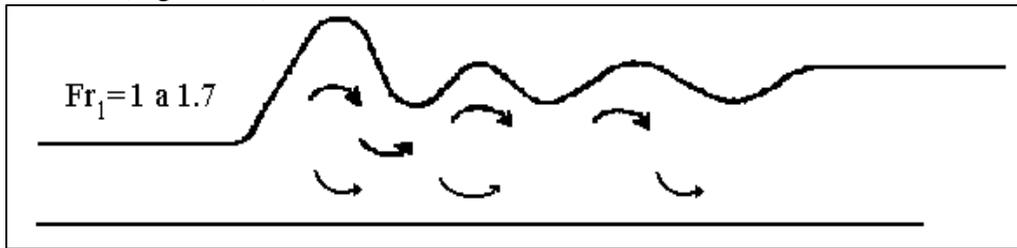


Figura 1.6 Resalto hidráulico ondulante.

Fuente: Chow (2004).

- $1.7 < Fr_1 < 2.5$ se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero aguas abajo la lámina es muy uniforme. La pérdida de energía es baja. Este se denomina **resalto débil** (Figura 1.7).



Figura 1.7 Resalto hidráulico débil.

Fuente: Chow (2004).

- $2.5 < Fr_1 < 4.5$ existe un chorro que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie. Cada oscilación produce una onda grande con periodo irregular, que puede viajar a lo largo de varios kilómetros, se produce entonces el **resalto oscilante** (Figura 1.8).

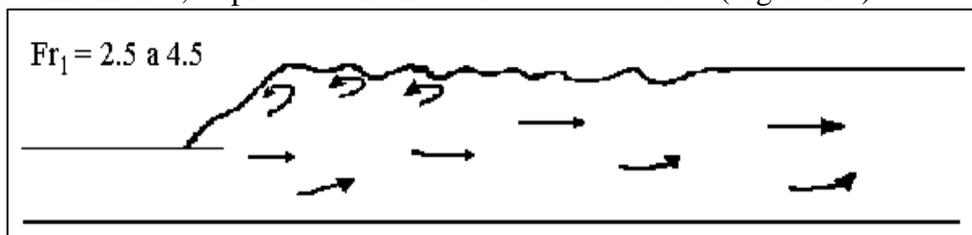


Figura 1.8 Resalto hidráulico oscilante.

Fuente: Chow (2004).

- $4.5 < Fr_1 < 9$ la extremidad de aguas abajo del remolido superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección vertical. La acción y la posición de este resalto son menos sensibles a la variación en la profundidad de aguas abajo. El resalto se encuentra bien balanceado y su comportamiento es el mejor. La disipación de energía varía entre 45% y 70%. Se presenta entonces el **resalto estable** (Figura 1.9).

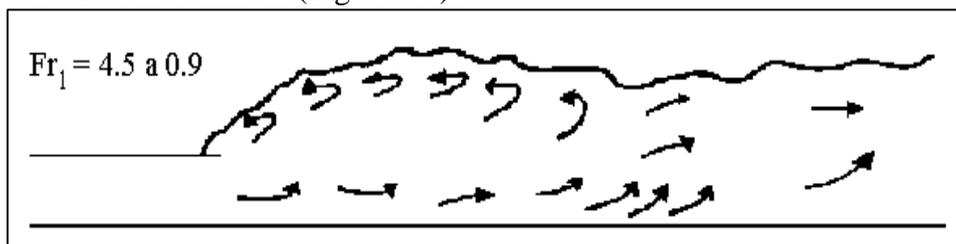


Figura 1.9 Resalto hidráulico estable.

Fuente: Chow (2004).

- $Fr > 9$, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que discurren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando oscilaciones hacia aguas abajo, y puede prevalecer una superficie rugosa. La acción del resalto es brusca pero efectiva debido a que la disipación de energía puede alcanzar un 85%. Este resalto se denomina *resalto fuerte* (Figura 1.10). (Villamarín, 2013)

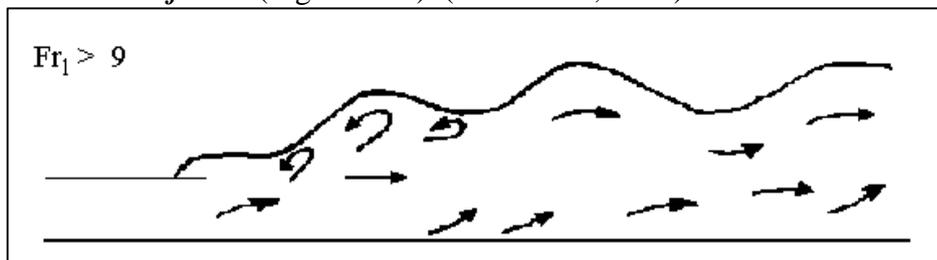


Figura 1.10 Resalto hidráulico fuerte

Fuente: Chow (2004).

Se debe recalcar que los rangos del número de Froude dados anteriormente para los siguientes tipos de resalto no están claramente demarcados sino que se trasladan en cierto modo según las condiciones locales.

1.3.2.3 Características

Para prevenir problemas de erosión y abrasión debido a elevadas tensiones de corte, se aprovechan las distintas características de los resaltos hidráulicos para disminuir los valores de velocidad de flujo en canales abiertos.

Al lugar geométrico donde se forma este resalto se le conoce como colchón hidráulico. Constantemente se realizan estudios para lograr una mayor disipación de energía en longitudes cada vez más cortas, por lo que para el diseño de estos colchones hidráulicos se consideran las siguientes variables que se presentan a continuación:

Pérdida de energía

La pérdida de energía es la diferencia existente entre las energías específicas de dos puntos, en el caso de un resalto hidráulico se consideran un punto inmediato anterior al salto y otro punto aguas arriba después de la estabilización del mismo.

Esta pérdida de energía está determinada por la siguiente ecuación:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 \cdot y_1 \cdot y_2} \quad (1.11)$$

Donde:

E_1 = Energía específica antes del resalto.

E_2 = Energía específica después del resalto.

y_1 = Profundidad del agua antes del resalto.

y_2 = Profundidad del agua después del resalto.

Eficiencia

La eficiencia del resalto hidráulico está definida como la relación entre las energías entre los puntos mencionados, antes y después del salto. Se puede observar en la siguiente ecuación que la eficiencia está en función solamente del número de Froude del flujo de aproximación.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8 \cdot F_1^2 + 1)^{3/2} - 4 \cdot F_1^2 + 1}{8 \cdot F_1^2 (2 + F_1^2)} \quad (1.12)$$

A la relación $\frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1}$ se le conoce como pérdida relativa y es una función adimensional del número de Froude.

Altura del resalto

Es la diferencia entre las profundidades antes y después del resalto:

$$h_j = y_2 - y_1 \quad (1.13)$$

En esta ecuación, cada término puede ser expresado en relación con la energía específica inicial:

$$\frac{h_j}{E_1} = \frac{y_2}{E_1} - \frac{y_1}{E_1} \quad (1.14)$$

Donde:

$\frac{h_j}{E_1}$ = Altura relativa.

$\frac{y_2}{E_1}$ = Profundidad inicial relativa.

$\frac{y_1}{E_1}$ = Profundidad seciente relativa.

Longitud del resalto

Es la distancia que existe desde la cara inicial del resalto hasta un punto agua arriba posterior a este.

Esta característica es muy importante para el diseño de obras hidráulicas porque define la necesidad de incluir elementos complementarios que reduzcan la longitud del resalto o de implementar medidas de protección en el material utilizado, como por ejemplo, el aumento de su resistencia frente a las tensiones de corte generadas por la liberación de energía.

A pesar de su importancia, esta longitud es muy difícil de determinar; sin embargo, se puede recurrir a métodos gráficos, como el de la Figura 1.11, que permiten estimar una longitud aproximada teniendo como referencia el número de Froude y una relación adimensional como la mostrada en la ecuación 1.15. (Chow, 2004)

$$\frac{L}{(y_2 - y_1)} ; \frac{L}{y_1} ; \frac{L}{y_2} \quad (1.15)$$

1.3.2.4 Resalto hidráulico como disipador de energía

Para lograr la disipación del exceso de energía que tienen los flujos supercríticos, el resalto hidráulico es un medio muy útil que también ayuda a prevenir los posibles problemas de erosión aguas abajo generados por las altas velocidades presentes.

En toda la extensión del resalto se debe proteger la estructura mediante el uso de materiales resistentes que impidan la socavación del lecho del canal natural aguas abajo, a este espacio protegido se le conoce como cuenco de disipación, cuenco de aquietamiento o colchón hidráulico.

En teoría, este cuenco disipador debería confinar en su totalidad al resalto hidráulico; sin embargo, por motivos económicos rara vez se diseña para cubrir toda la longitud del salto, en su lugar se recurre al uso de elementos complementarios que permitan acortar la su distancia para reducir el tamaño y costo del cuenco disipador.

El resalto hidráulico, así como cualquier otro disipador de energía debe ser capaz de eliminar la excedencia de energía cinética del flujo supercrítico. Ésta es eliminada a través de procesos de difusión de velocidad entre partículas de agua con una alta cantidad de energía que ingresan a una masa de agua con velocidades relativamente bajas o nulas.

El U.S. Bureau of Reclamation, citado por Villamarín (2013), da las siguientes recomendaciones prácticas para los distintos tipos de resalto.

- ✓ Para los resaltos débiles no se necesita la implementación de elementos adicionales; por su longitud relativamente corta, un colchón hidráulico con un dimensionamiento adecuado es suficiente para estos casos.
- ✓ Debido a su difícil manejo, no se dan recomendaciones de diseño cuando se presenta un resalto oscilante, éste generalmente aparece en estructuras de canales, presas de derivación y obras de descarga.
- ✓ En el caso de resaltos permanentes no existen muchos inconvenientes. Se recurre al uso de elementos como bloques deflectores para acortar la distancia del resalto y del colchón hidráulico.
- ✓ Cuando el número de Froude es mayor a 9, la utilización de un colchón hidráulico se vuelve económicamente desventajosa, debido a las grandes profundidades que debería tener, en estos casos se recomienda el uso de otros tipos de disipadores.

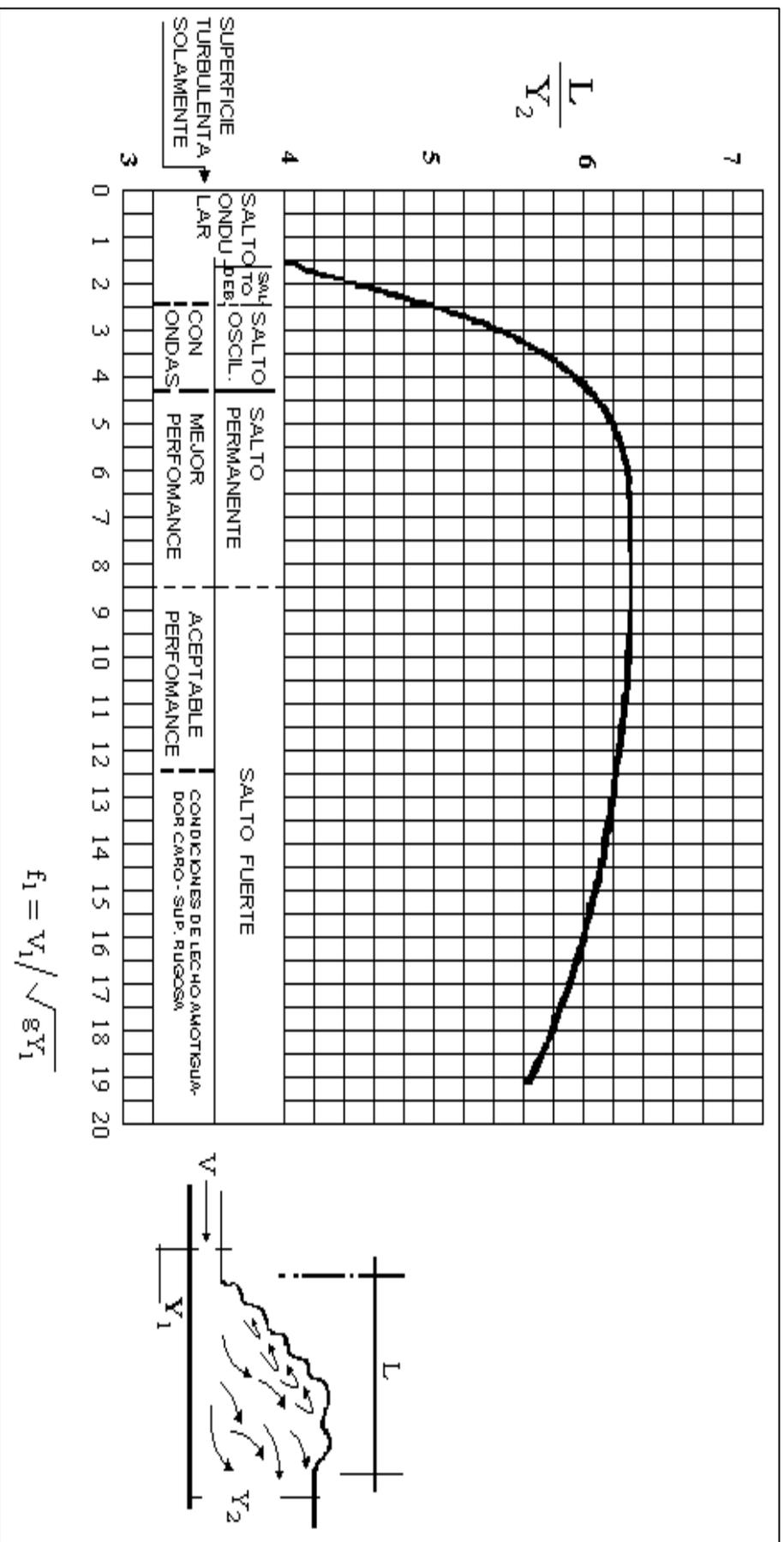


Figura 1.11 Longitud de resalto hidráulico en términos de la profundidad aguas abajo en canales horizontales.

Fuente: Chow (2004).

1.3.3 Principales disipadores de energía

En hidráulica de canales, se utilizan los siguientes métodos para lograr la disipación de energía:

- Ingreso de partículas de agua dentro de una masa de agua.
- Salida de chorros de agua en el aire.

El primero basa su funcionamiento en el consumo de energía debido a procesos de fricción interna que se dan a través de la generación de vórtices, generalmente en zonas de corte o de alto gradiente de velocidad. Para conseguir una óptima disipación de la energía es necesario generar zonas de alta turbulencia.

El otro método recurre a la fricción ejercida por la resistencia del aire sobre la masa de agua en caída, lo cual tiene como resultado la disipación de energía. Se consigue una mayor disipación si la altura de caída es pequeña y la diferencia de velocidades entre el agua y el aire son relativamente altas.

Usualmente, se recurre a una combinación entre estos dos métodos en las distintas estructuras de disipación. Generalmente se aplican en estructuras que disipan la energía cinética mediante la fricción interna.

En la medida que la turbulencia provocada en la masa del fluido sea mayor, se conseguirá una mejor disipación. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las estructuras de disipación de energía también se exponen constantemente a otros fenómenos que pueden afectar negativamente a su durabilidad, entre ellas están las vibraciones, pulsaciones, abrasión, cavitación y erosión.

Por este motivo, al momento de diseñar los distintos disipadores de energía es necesario tener en cuenta que la estructura sea capaz de resistir el efecto dinámico de estos fenómenos. Desafortunadamente, no existe material capaz de soportar firme y permanentemente los efectos de cavitación, ni tampoco de abrasión.

Es necesario, conocer y aplicar adecuadamente los límites físicos impuestos por los materiales comúnmente utilizados. La mayoría de disipadores de energía se debe construir en acero o concreto, de tal modo que las propiedades de estos materiales de construcción comunes fijen los límites de aplicación del diseño hidráulico (Villamarín, 2013).

1.3.3.1 Salto de esquí

Es necesario este tipo de disipador cuando se tiene que realizar grandes descargas de agua directamente en el río, como las que tienen lugar en los vertederos. Se utilizan trampolines para expulsar el flujo de agua hacia el aire o hacia otra masa de agua, y así reducir su velocidad, para lograr la disipación de energía.

La forma de la trayectoria que sigue el flujo se puede estimar a través de una ecuación que depende de la descarga, de su energía en el extremo y del ángulo de salida del chorro.

Su funcionamiento se basa principalmente en la formación de remolinos que ayuden a liberar la energía, estos se pueden presentar en los siguientes dos casos: cuando el remolino se forma sobre la superficie del trampolín, como se aprecia en la Figura 1.12, y cuando se encuentra sumergido aguas abajo. Por este motivo, existen dos tipos de saltos de esquí: sumergido y estriado; ambos tienen el mismo comportamiento hidráulico y trabajan bajo los mismos conceptos de disipación de energía, su diferencia prima en la forma como se expulsa el agua.



Figura 1.12 Modelo de salto de esquí de Saladillo, Argentina.

Fuente: Bacchiega (2009)

Salto de esquí sumergido - liso

La liberación de energía en este tipo de disipador se da a través de la generación de una turbulencia en el flujo, la cual se manifiesta por la formación de un resalto hidráulico en la superficie previa al salto como se observa en la Figura 1.13.

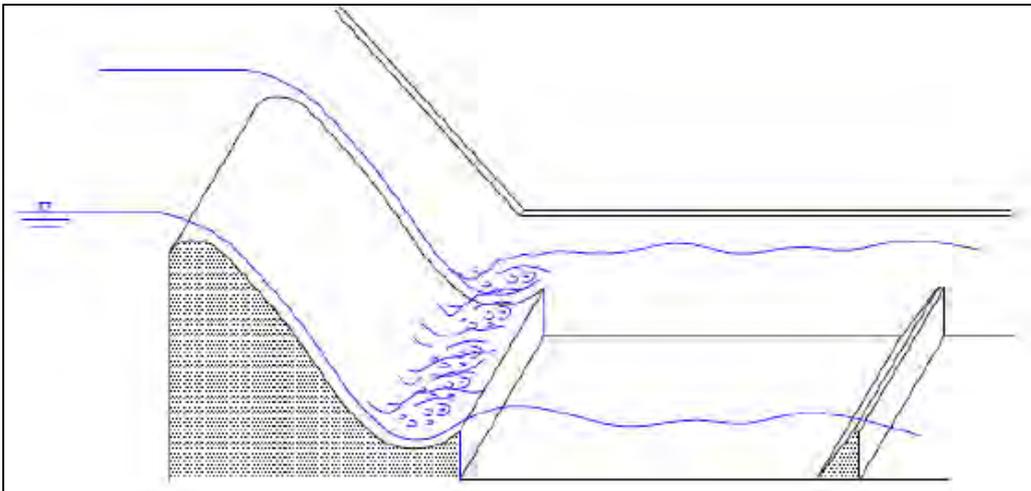


Figura 1.13 Salto de esquí sumergido.

Fuente: Villamarín (2013).

Es importante mencionar que, el salto de esquí sumergido puede ser dañino para las superficies de concreto debido al deterioro que causa el material transportado que impacta contra esta superficie producto del cambio de dirección que ocurre en el remolino formado.

Este tipo de salto solamente se presenta en un estado sumergido, de no ser así, toda la masa de agua que saldría despedida verticalmente podría generar problemas de erosión aguas abajo.

Salto de esquí estriado

En este disipador ocurre la salida vertical de la mitad de la masa de agua a través de trampolines o estrías, las cuales dividen la cantidad de agua que viaja a gran velocidad para que la turbulencia generada no sea muy excesiva y no se produzca daños por erosión en la superficie del vertedero aguas abajo.

En la Figura 1.14 se aprecia que, en comparación con el salto liso, éste es más eficiente debido a que la división de la masa del fluido acelera el proceso de disipación de energía. El salto de esquí estriado puede o no estar sumergido, esto dependerá de las profundidades del cauce.

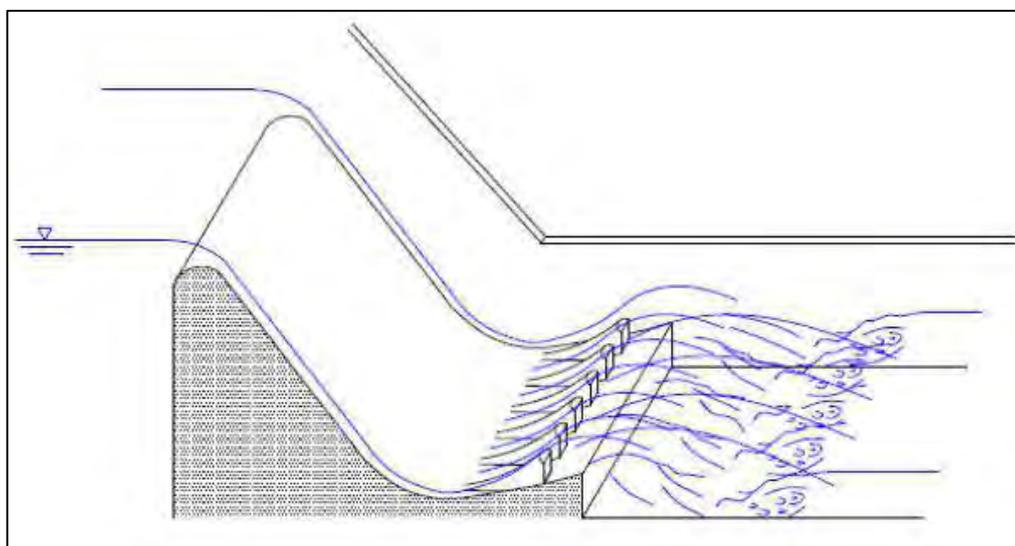


Figura 1.14 Salto de esquí estriado.

Fuente: Villamarín (2013).

1.3.3.2 Bloques de impacto

Los bloques de impacto son accesorios complementarios para canales de entrega, rápidas o vertederos que se utilizan para acortar la longitud del resalto hidráulico que se forma en estos casos; también son utilizados para evitar aceleraciones del flujo perjudiciales para la estructura.

Entre los bloques de impacto mostrados en la Figura 1.15 se encuentran los bloques dentados, los pilares deflectores y los umbrales, los cuales presentan un funcionamiento hidráulico parecido pero difieren en su ubicación con respecto al colchón hidráulico.

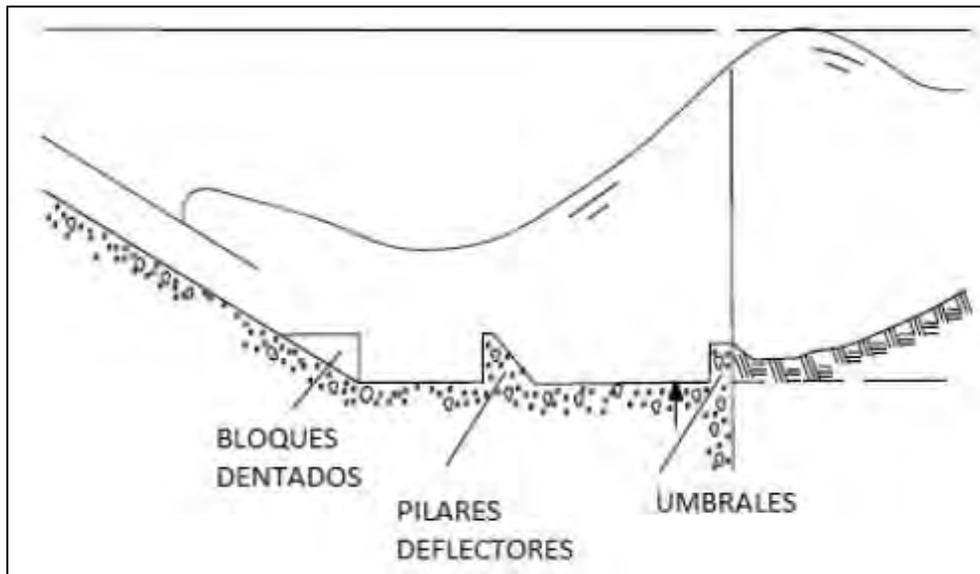


Figura 1.15 Bloques de impacto en canal de entrega.

Fuente: Villamarín (2013).

Bloques dentados

Los bloques dentados son utilizados para controlar el salto hidráulico al inicio de un canal de entrada como se muestra en la Figura 1.16, estos permiten estabilizar el resalto dentro del colchón hidráulico; sin embargo, en el caso de drenajes pluviales, los cuales son muy variables, no se puede utilizar estos bloques con dimensiones específicas para realizar un trabajo preciso y controlado.

En el caso de uso de bloques dentados discontinuos el flujo se divide, esto permite elevar el nivel de agua y reducir la longitud de salto que se forma.

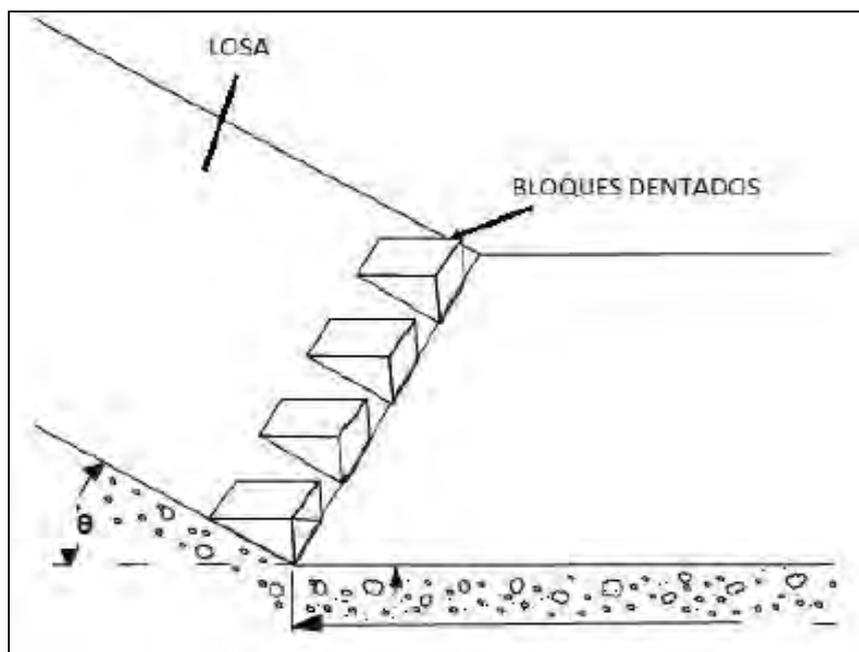


Figura 1.16 Bloques dentados en la entrada de un canal de entrega.

Fuente: Villamarín (2013).

Pilares deflectores

Estos bloques de impacto se encuentran ubicados en posiciones intermedias del colchón hidráulico, su principal función es la disipación de energía a través del impacto de la masa de agua sobre ellos. Generalmente son utilizados en pequeñas estructuras con velocidades relativamente bajas.

Umbrales

Los umbrales o remates son bloques de impacto continuos o dentados que se ubican al final del colchón hidráulico o canal de entrega. Estos, además de reducir la longitud del resalto, sirven para controlar la socavación.

Cuando se tienen canales largos o altas velocidades de flujo, los umbrales o remates deben ser dentados para controlar dichas velocidades.

Mancha (1963), citado por Villamarín (2013), analizó los disipadores que están limitados por un umbral continuo, como el observado en la Figura 1.17; estos crean remolinos aguas abajo del umbral para disipar la energía y por ello es importante proteger el fondo del canal en esta zona por riesgo de erosión.

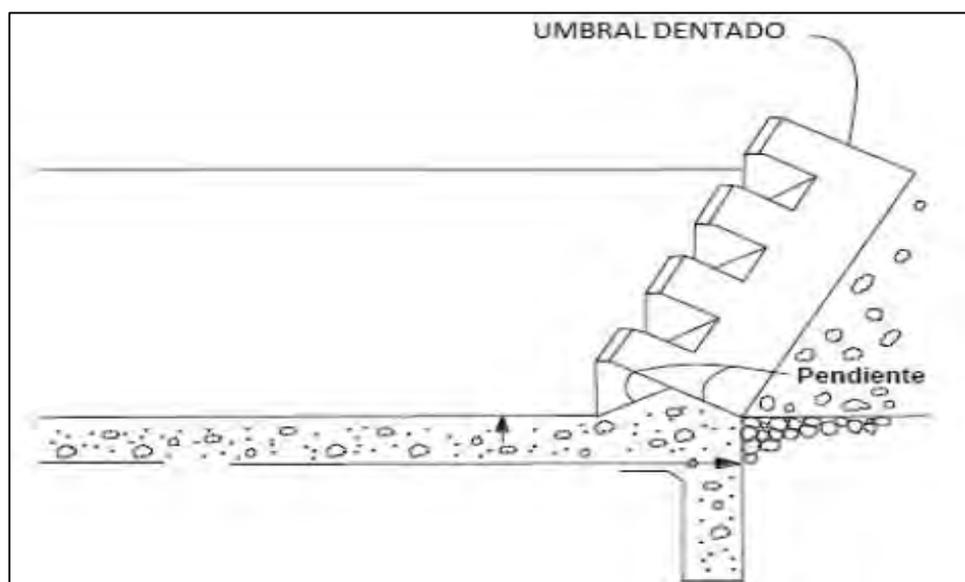


Figura 1.17 Umbrales a la salida de un canal de entrega.

Fuente: Villamarín (2013).

1.3.3.3 Tanques amortiguadores

Es uno de los disipadores de energía más comunes. Su funcionamiento se basa en la formación de un resalto hidráulico sumergido producto de la caída del flujo a un tanque de amortiguación de sección rectangular.

Se pueden producir variaciones en la altura y longitud del resalto según la distancia de la caída de la masa de agua del vertedero sobre el tanque; también se pueden controlar estas características del resalto cambiando el ancho de dicho tanque amortiguador según se aprecia en la Figura 1.18 y Figura 1.19 respectivamente.

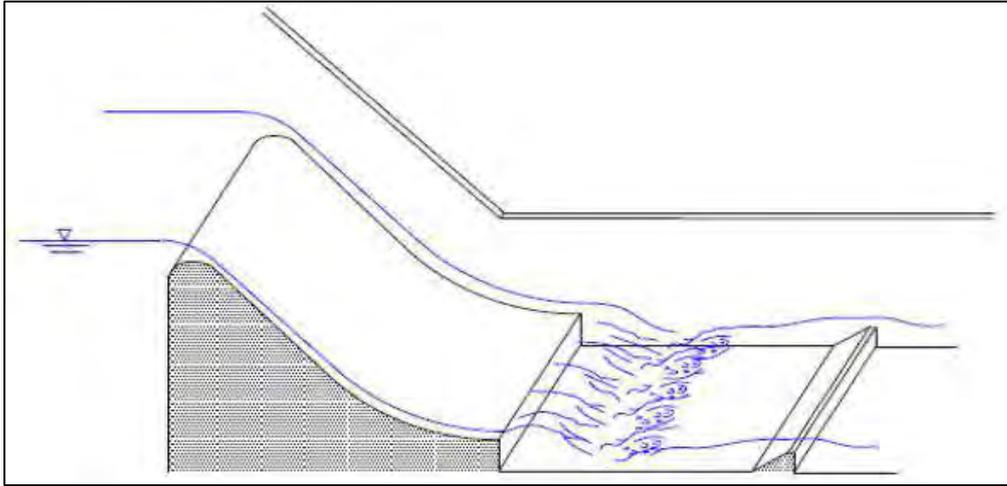


Figura 1.18 Tanque amortiguador en cambio de profundidad.

Fuente: Villamarín (2013).

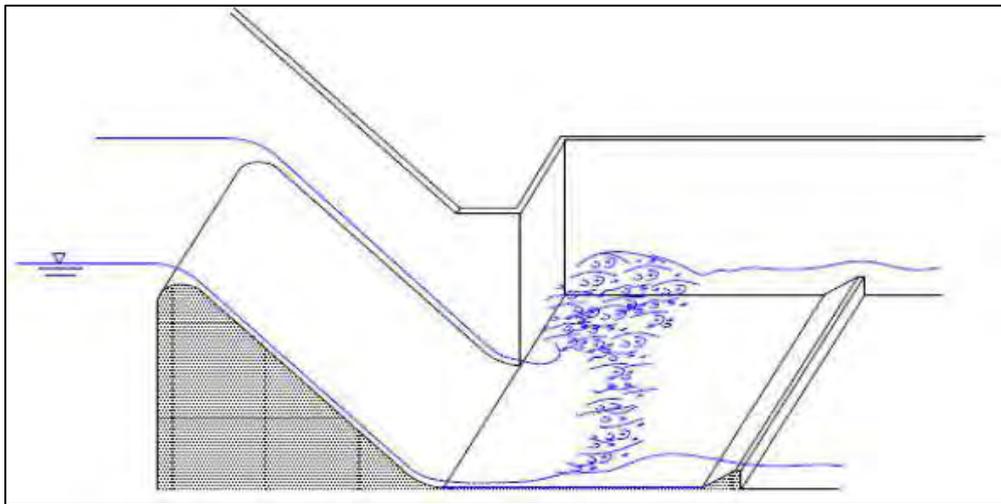


Figura 1.19 Tanque amortiguador en ensanchamiento de canal.

Fuente: Villamarín (2013).

1.3.3.4 Poza disipadora

Las pozas disipadoras son estructuras que aprovechan el cambio brusco de pendiente para generar un resalto hidráulico que permita la disipación de energía.

En una poza el agua fluye a una velocidad mayor a la velocidad crítica durante un tramo corto de pendiente elevada hasta que se produce la transición a una pendiente suave que fuerza la formación del salto hidráulico, y con ello la disipación de energía por la turbulencia generada.

Capítulo 2

Bocatoma Quiroz

2.1 Central Hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz

2.1.1 Ubicación

La Central Hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz (CHMAQ) está ubicada en el norte del Perú, departamento de Piura, provincia de Ayabaca, distrito de Paimas, en el valle del río Quiroz, cerca del caserío de Zamba, según se indica en Figura 2.20 y Figura 2.21.

Este proyecto adoptó un sistema arbitrario de elevaciones durante su construcción, el cual presentaba altitudes que variaban entre los 404.5 y 500.0 m. de acuerdo al sistema escogido. Según los mapas del IGN³, la altitud real de la zona es de 800 m.s.n.m., observándose una diferencia de aproximadamente 300 m entre las elevaciones reales y arbitrarias.

La casa de máquinas de la CHMAQ es accesible desde el tramo de la carretera Paimas – Ayabaca mediante un corto desvío, mientras que el barraje, donde se halla la bocatoma, el desarenador y las demás estructuras, se encuentra a 5 kilómetros aguas arriba, entre el río Quiroz y la carretera mencionada Paimas – Ayabaca. (ITD S.A.C., 2005)

2.1.2 Objetivos

El proyecto presenta como principal objetivo, el aprovechamiento de la caída de agua del río Quiroz para la generación de energía a través de una central hidroeléctrica con capacidad de producción de hasta 3.6 MW de potencia. De los cuales solamente se ha aprovechado el 45% de esta capacidad, debido a que la central solamente cuenta con 2 turbinas Francis de eje horizontal de 0.8 MW de potencia efectiva.

³ Instituto Geográfico Nacional

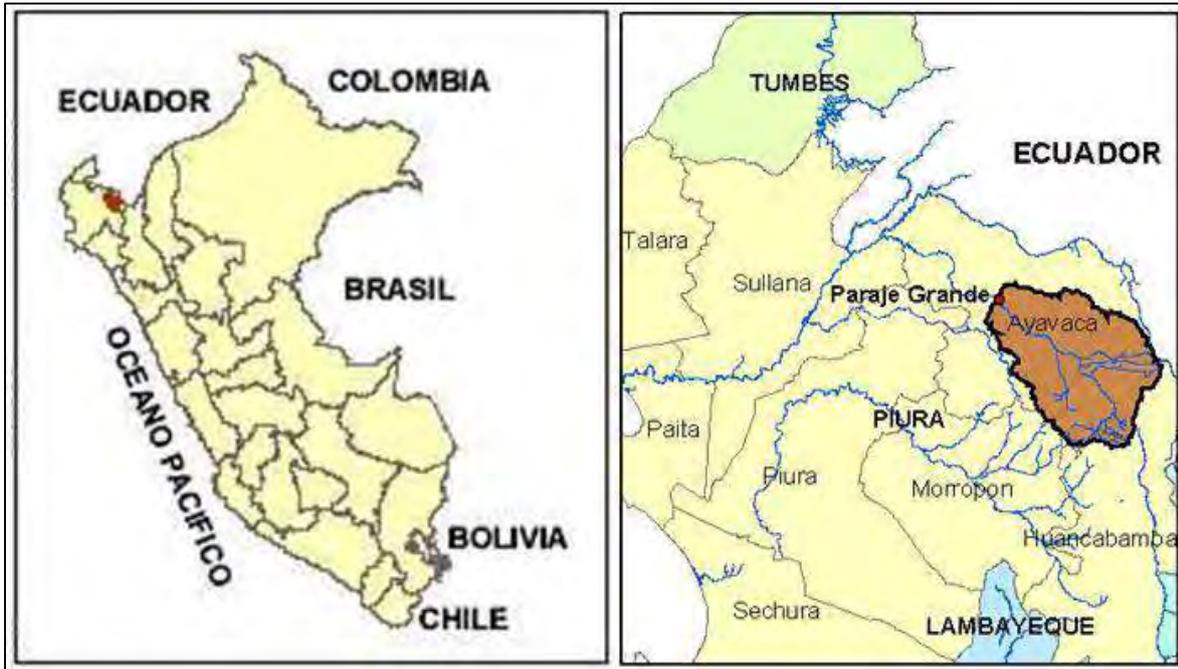


Figura 2.20 Macro-ubicación de la CHMAQ.

Fuente: Empresa de Ingeniería, Tecnología y Desarrollo S.A.C. (2005).

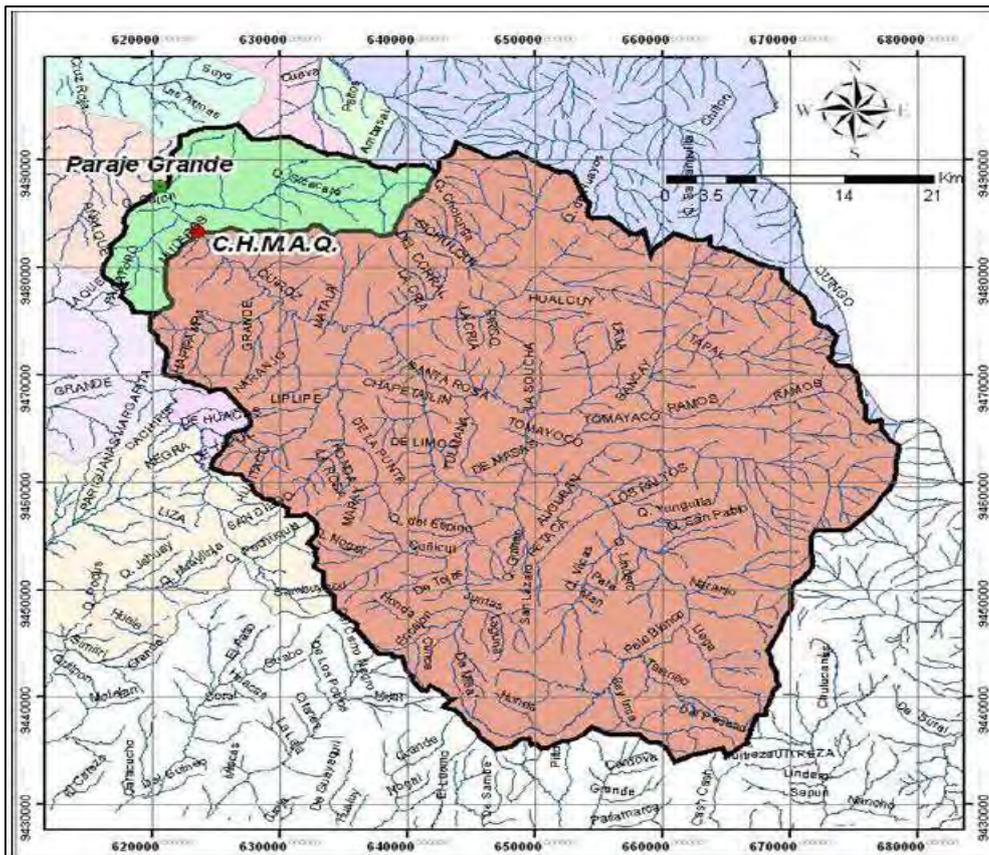


Figura 2.21 Localización de la CHMAQ.

Fuente: Empresa de Ingeniería, Tecnología y Desarrollo S.A.C. (2005).

2.1.3 Descripción de obras

Bocatoma

Las estructuras hidráulicas que conforman la bocatoma, y que serán explicadas posteriormente, son las siguientes:

- Bocal
- Tuberías de conducción
- Aliviadero móvil
- Vertedero fijo
- Canal de limpia o purga

Desgravador

Es una estructura hidráulica ubicada aproximadamente a 70 metros de la bocatoma entre las progresivas Km 0-100.00 y Km 0-080.00; su principal función es la de eliminar el material grueso de arrastre y devolverlo al río.

El desgravador está compuesto de dos naves y un canal de descarga hacia el río; tiene incorporadas compuertas deslizantes de accionamiento manual que permiten su maniobrabilidad. En las Figura 2.22 y Figura 2.23 se puede observar el detalle y funcionamiento de la estructura. (Universidad de Piura, 2002)

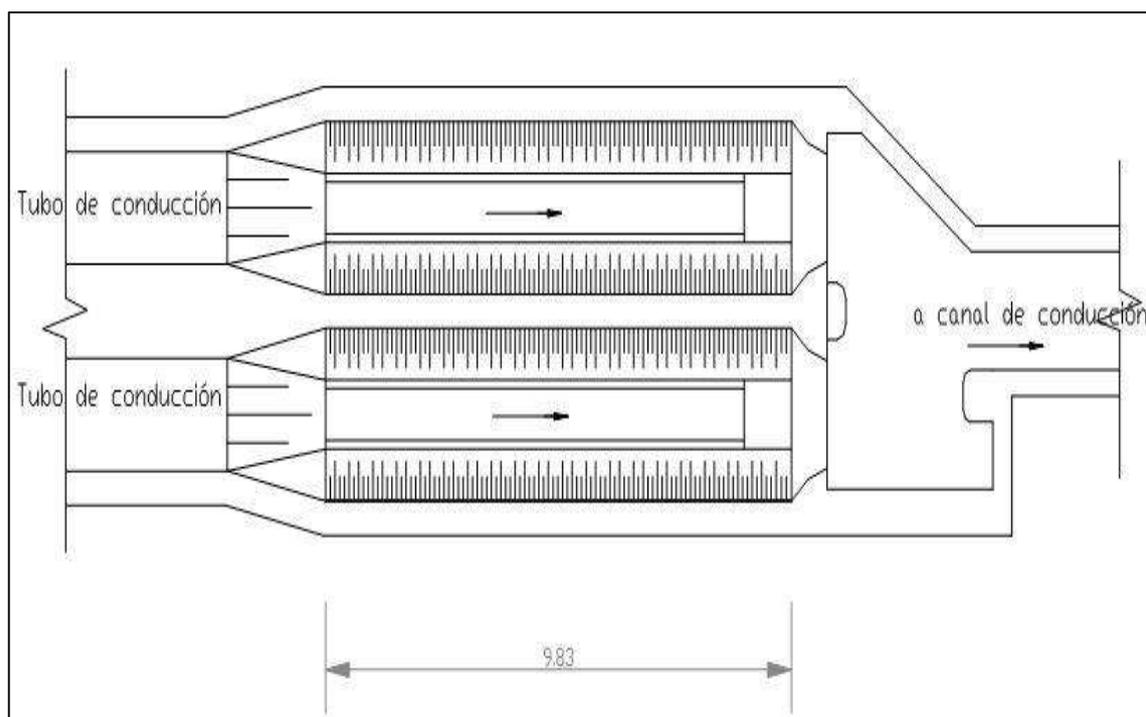


Figura 2.22 Vista en planta del desgravador.

Fuente: Universidad de Piura (2002).



Figura 2.23 Desgravador de la CHMAQ.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Desarenador

Este desarenador, ubicado entre las progresivas Km 0+390.10 y Km 0+456.00, es una estructura hidráulica de lavado continuo tipo dufour. Presenta una única nave con canal de purga en el fondo, un canal by pass ubicado a la izquierda de la nave y un conducto de purga de sedimentos (Figura 2.24 y Figura 2.25).

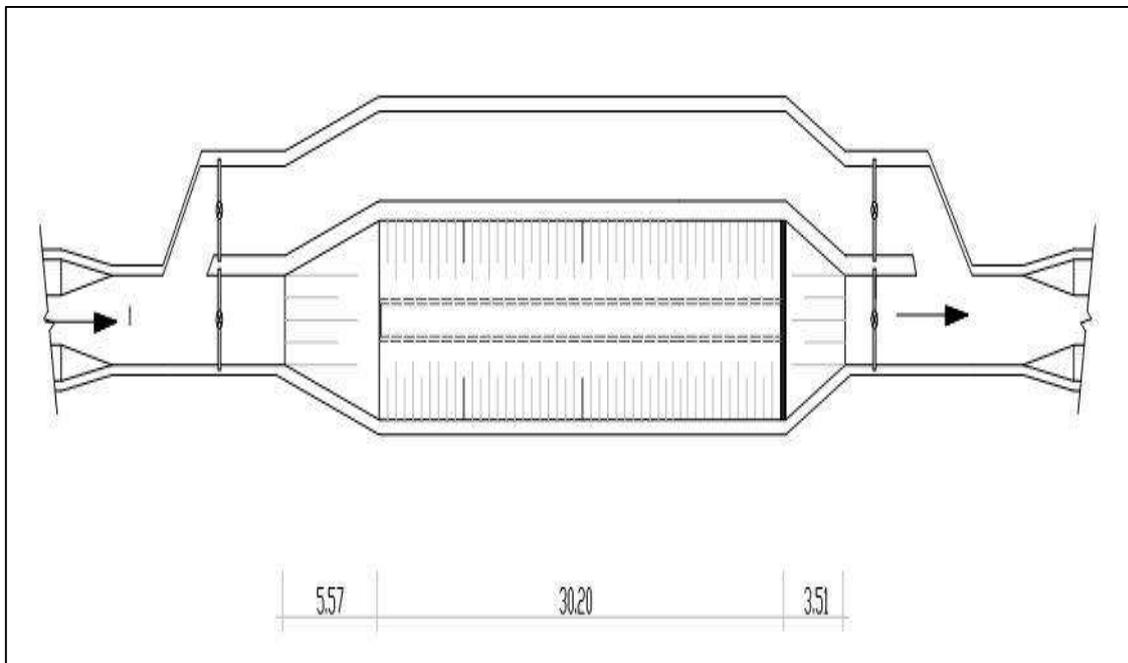


Figura 2.24 Vista en planta del desarenador

Fuente: Universidad de Piura (2002).



Figura 2.25 Desarenador de la CHMAQ.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Según observaciones realizadas por la empresa Electronoroeste S.A., este desarenador no tiene la capacidad ni la eficiencia aceptable para su funcionamiento, sobre todo en época de lluvias. Además, el canal de la nave, cuya geometría no es la más adecuada, presenta una distribución de flujo no uniforme que puede causar riesgo por colmatación en la cámara de carga y daño en las turbinas de central. Adicionalmente se recomienda que las dos compuertas de acción manual que controlan el flujo dentro del desarenador sean sustituidas por mecanismos de accionamiento eléctrico (Electronoroeste S.A.).

Canal de aducción a la cámara de carga

El canal de aducción de la CHMAQ es de mampostería de piedra, tiene una forma trapezoidal y una longitud de 5 km. En algunas zonas a lo largo del canal existe el riesgo continuo de ingreso de piedras y tierra al canal, como se observa en la Figura 2.26.

Cámara de carga y aliviadero de demasías

Está ubicado al final del canal de aducción. Presenta un vertedero libre que permite evacuar los excedentes de agua hacia el río por medio del canal o aliviadero de demasías, además cuenta con una compuerta para la eliminación de sedimentos y rejillas en los ingresos a la tubería de presión.

2.1.4 Bocatoma Quiroz

Antecedentes

El convenio entre el Gobierno de Perú y el de Reino Unido suscrito en el año 1984 tenía como finalidad la construcción de varias centrales hidroeléctricas en las zonas rurales del Perú; una de ellas fue la Central Hidroeléctrica Quiroz⁴.

En el mes de febrero del año 1996 se inauguró la central con el nombre que actualmente lleva, Central Hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz.

⁴ Nombre original del proyecto.



Figura 2.26 Canal de aducción a la cámara de carga.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Desde su puesta en marcha, la CHMAQ presentó problemas de funcionamiento debido al carácter provisional de la bocatoma en el río, y por otros problemas no resueltos en su totalidad relacionados con la trayectoria del canal de aducción y de sus estructuras, que tuvieron como consecuencia el transporte de sedimentos de gran tamaño que produjeron daños por abrasión y erosión en los rodetes de las turbinas.

Por este motivo, Electronoroeste S.A. buscó contratar una empresa consultora para dar solución a esta situación. Así, en el año 1998, la empresa consultora Colpex Project S.A. es contratada para la preparación del “Proyecto de Bocatoma provisional de la Central Hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz”.

La Empresa Consultora Colpex Project S.A. es nuevamente contratada en el año 2000 para la realización de:

- a) Estudio de factibilidad de mejoramiento de la CHMAQ.
- b) Expediente técnico para mejoramiento de la CHMAQ.
- c) Diseño en detalle de las obras civiles para el barraje con la bocatoma permanente en el río Quiroz y de ciertas estructuras del canal de aducción.
- d) Estudio de factibilidad de ampliación de la CHMAQ.

Con dicha documentación, Electronoroeste S.A. convocó en el año 2001 a concursos para la ejecución del barraje con la bocatoma permanente en el río Quiroz. Los trabajos a realizar eran los siguientes:

- a) Mejoramiento del funcionamiento del canal de aducción.
- b) Ampliación de la capacidad de las estructuras del canal para satisfacer la demanda de caudales para la potencia instalada de 3.6 MW.

La empresa Cesar Wiese y Cia S.R. Ltda., una de las ganadoras del concurso, llevó a cabo la ejecución de las obras civiles; mientras que la empresa PETSА Contratistas Generales

S.A.C. tuvo a su disposición la realización del diseño en detalle, fabricación, suministro y montaje del equipo hidromecánico del barraje y ciertas estructuras del canal de aducción, con la excepción de la compuerta inflable *obermeyer* de 8 x 2 m adquirida y suministrada por Electronoroeste S.A. Estos trabajos se empezaron a realizar a fines del año 2001 y concluyeron en su mayoría en el mes de febrero del año 2002.

Por dificultades operativas de la CHMAQ y daños en el barraje, Electronoroeste S.A. encargó en el año 2002 a la Universidad de Piura la elaboración del “Diagnóstico de la situación y recomendaciones para el funcionamiento adecuado y para una futura ampliación de la infraestructura de la Central Hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz” y en el año 2003, la preparación del Expediente Técnico para “Reparación y Construcción de las Estructuras de protección de la Bocatoma de la Central Hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz”; este documento sirvió como base para la ejecución de la Obra “Reparación en zona de Bocatoma de la Central Hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz”, realizada en los años 2003 y 2004 por parte del Contratista J.C. Contratistas Generales E.I.R.L.

Finalmente, Electronoroeste S.A. convocó a mediados del año 2005 la Adjudicación Directa Selectiva No. A01-015-2005/ENOSA con el fin de encontrar una empresa consultora que realice la “Elaboración del Expediente Técnico de Licitación para la Ingeniería de Detalle y la Fabricación, Suministro y Montaje de las Compuertas planas para la Bocatoma de la C.H. María Auxiliadora del Quiroz”, resultando escogida la Empresa Ingeniería, Tecnología y Desarrollo S.A.C. (ITD S.A.C., 2005)

Evaluación y diseño

Situación del diseño original de la bocatoma

La bocatoma, construida inicialmente en 2001, se encuentra ubicada 5 km aguas arriba de la casa de máquinas, en una zona caracterizada por la presencia de grandes cantidades de material aluvial acumulado por el río. El flujo extremo que se generaba en esta zona afectó de manera negativa a la estructura, debido a que ocasionó una grave erosión en las placas protectoras y al cuenco amortiguador ubicado debajo de ella.

La placa original de concreto reforzado que servía de soporte para las compuertas inflables de la presa presentaba una resistencia de diseño de 210 kg/cm^2 y estaba recubierta por 10 cm de concreto Fondag, una mezcla de Ciment fondu con agregado denso.

Aguas abajo de las compuertas, la placa amortiguadora de 15 cm de espesor, presentaba una resistencia de diseño de 210 kg/cm^2 y contenía una doble malla de acero reforzado N°3; las barras de refuerzo que conformaban dicha malla estaban espaciadas a 15 cm desde el centro en ambas direcciones.

El riesgo por erosión era continuo y afectaba la estabilidad general de la estructura. Con respecto a las placas protectoras, la mayor parte de la capa de concreto Fondag había sido erosionada y en algunas zonas puntuales la fuerza erosiva era tan intensa que habían afectado a la placa subyacente, llegando a exponer el acero de refuerzo a través de pequeños agujeros que se extendían 1.50 m a través del material base (Figura 2.27).

La placa amortiguadora se vio afectada de manera similar con acero de refuerzo expuesto y agujeros aislados que se extendían a través del material



Figura 2.27 Erosión en la placa de concreto Fondag.

Fuente: Universidad de Piura (2005).

Alternativas de corrección

Hubo muchas propuestas para solucionar el problema producido por la erosión. Para la protección de la placa aguas abajo, los diseñadores consideraron inicialmente la colocación de planchas de acero encima del concreto. Esta alternativa de corrección no se consideró estéticamente correcta por los paisajes montañosos en donde se encontraba la estructura (Figura 2.28). Los ingenieros buscaron una opción más económica y ecológica que solucionara el problema y mantuviera intacta la belleza del valle.

En los alrededores del área donde se ubicaba la bocatoma, las rocas poseían muy buenas características de dureza, por lo que los ingenieros decidieron aprovecharlas y utilizarlas en la reconstrucción de la bocatoma. El fácil acceso al material y los altos valores de resistencia contra la abrasión que poseía fueron la solución definitiva ante el problema.

Evaluación de solución

Un estudio de ingeniería determinó que la erosión era el resultado de distintos factores. Cuando las vejigas inflables de las compuertas obermeyer estaban desinfladas, éstas se encontraban en una posición totalmente horizontal y el río se comportaba como un canal totalmente abierto; en esta situación, las vejigas estaban protegidas por las compuertas de metal que se apoyaban sobre ellas; sin embargo, las placas de concreto ubicadas a cada lado de las compuertas se erosionaban debido al alto volumen de flujo que transportaba grandes cantidades de material aluvial.

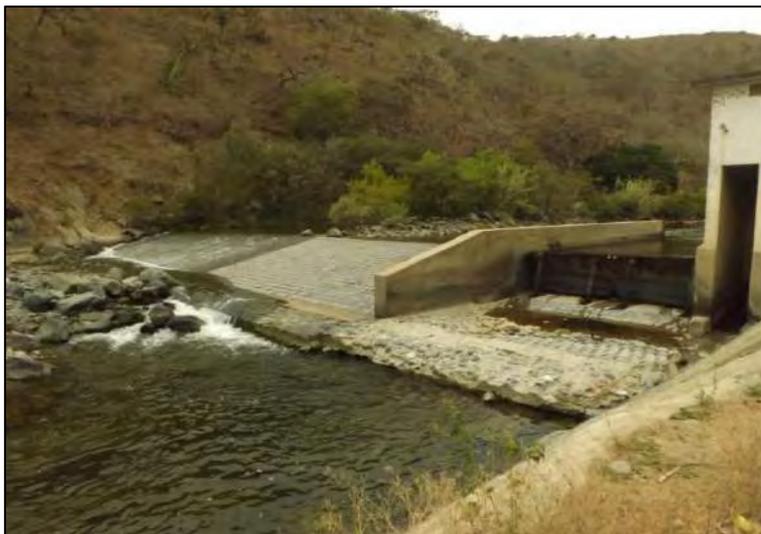


Figura 2.28 Paisaje montañoso alrededor de la bocatoma.

Fuente: Universidad de Piura (2005).

En cambio, cuando las vejigas estaban infladas y las compuertas completamente cerradas, la erosión tenía lugar a través del desbordamiento del flujo, el cual caía aproximadamente una altura de 2 m sobre la placa aguas abajo y provocaba su destrucción mediante fuerzas de impacto.

Adicionalmente, el diseño original no había previsto la gran cantidad de sedimentos que acarrearía el flujo en esa zona del río y, la geometría de la bocatoma contribuía a generar flujos de alta velocidad que aumentaba la acción erosiva.

Por ello, para acabar con este problema era necesario remover, reconstruir y modificar la estructura existente para que pueda resistir las velocidades de impacto y el transporte de sedimentos. Para prevenir la erosión en la zona de descarga era necesario diseñar una poza ubicada inmediatamente aguas abajo de las compuertas.

El nuevo diseño, observado en la 2.29, consta de una placa de concreto reforzado que subyace bajo una capa de bloques de roca que tiene una longitud de 6.10 m y un ancho de 8 m; esta comienza después de una zona de transición de 1.70 m de longitud.

Esta nueva placa de concreto reforzado presenta un espesor variable. En el eje aguas arriba, el cual es el punto más bajo de la zona de protección contra la erosión, el espesor es de 0.25 m y en el eje aguas abajo aumenta hasta 0.70 m. Esta placa está completamente superpuesta por una capa protectora formada con bloques de roca. La roca escogida para este propósito es de alta resistencia contra la acción abrasiva de la carga de sedimentos del río.

Características del nuevo diseño

La nueva protección contra la erosión aguas abajo de la bocatoma es un sistema estructurado por capas. Una vez que la anterior placa fuera removida, el área se escavó hasta la cota 492.30 m.s.n.m. donde se colocó un geotextil no tejido de 300 g/m² sobre el material aluvial y coluvial (Figura 2.29). En la parte superior del geotextil, se asentó una capa de 30 cm de espesor conformada por un filtro de material granular seleccionado cuyo tamaño máximo era de 1.905 cm. En esta capa se colocaron tubos de cloruro de polivinilo de 2 pulgadas de diámetro y una longitud suficiente para extenderse a través de las capas de concreto y la capa de bloques de roca, las cuales serían colocadas posteriormente.

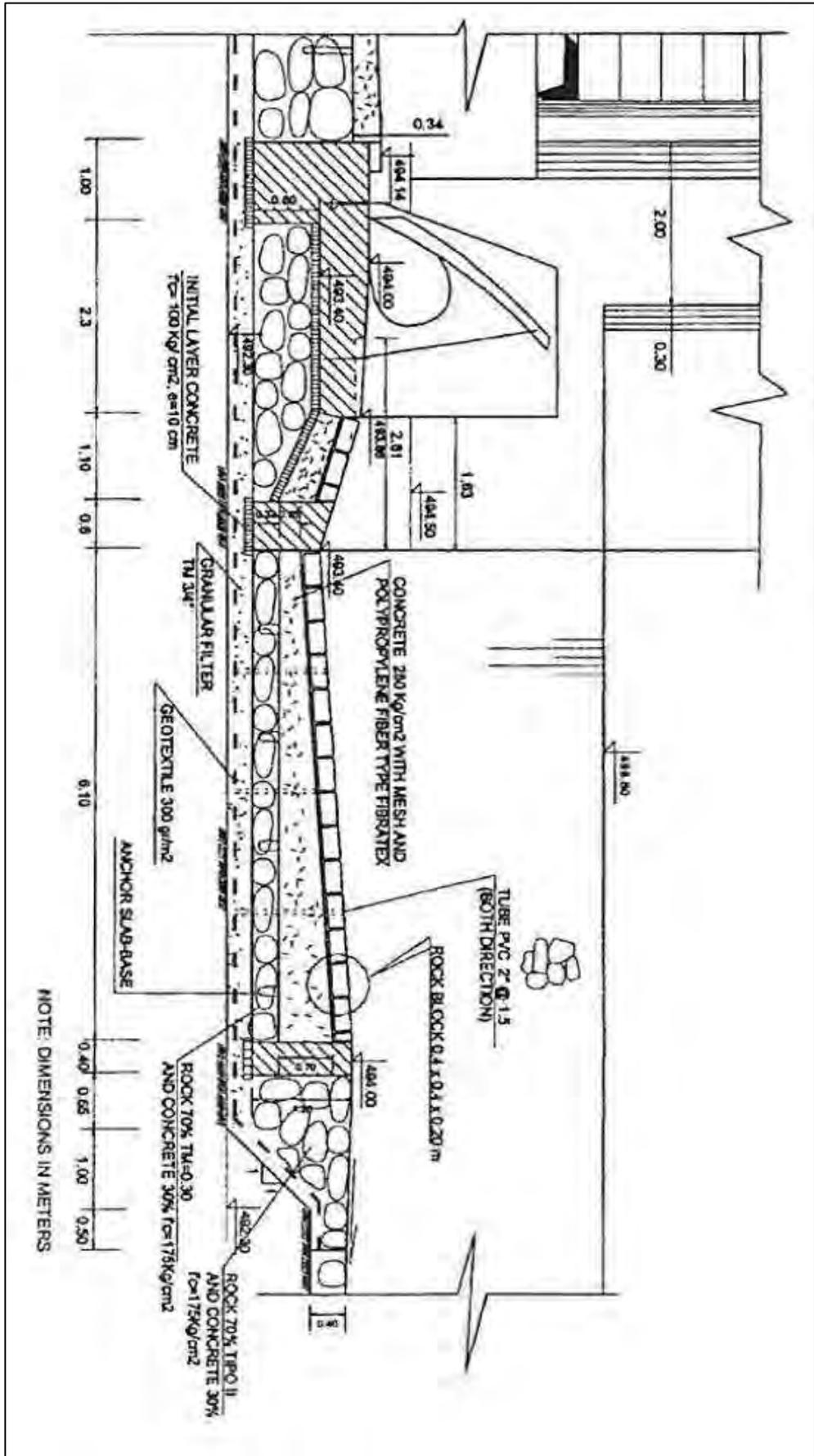


Figura 2.29 Perfil del nuevo diseño del aliviadero móvil de la bocatoma Quiroz.

Fuente: Universidad de Piura (2005).

La siguiente capa, con un espesor de 32 cm era la de concreto de baja resistencia ($f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$). En ella se integraron andesitas, que eran rocas volcánicas limpias y de buena calidad, por lo que dicha capa presentaba una distribución en volumen del 30% en concreto y 70% en roca. Según las especificaciones el tamaño máximo de la roca era de 30 cm.

Esta capa de concreto de baja resistencia servía de base para la placa de concreto con espesor variable y de alta resistencia ($f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$). El diseño de esta placa se dejó a cargo del contratista; sin embargo, según las especificaciones se requería el uso de cemento Portland tipo MS. Además, el agregado grueso debía ser traído de una cantera local ubicada a 8 km del proyecto y su tamaño máximo no debía sobrepasar los 1.905 cm. En el caso del agregado fino, estaba especificado que el 100% pasara a través del tamiz 3/8" y que no más del 10% se quedara retenido en el tamiz N°100, adicionalmente, su módulo de fineza debía estar comprendido entre 2.5 y 2.9.

Dicha placa de alta resistencia presenta una malla simple de acero de refuerzo N°3 (A-36). Las barras de esta malla de refuerzo se encontraban distanciadas a 20 cm hacia ambas direcciones desde el centro. Para aportar mayor resistencia en esta capa se utilizaron fibras de polipropileno Fiberstand 100.

Las dos placas de concreto estaban unidas con acero de refuerzo N°3, el cual se extendía verticalmente más allá de la placa de baja resistencia. Debido a que las capas inferiores presentan rocas de gran tamaño, el acero de refuerzo fue colocado mediante agujeros perforados en la losa acabada y luego rellenados con concreto. Estos agujeros eran de 8 cm de diámetro y penetraban 25 cm dentro de la losa inferior. El acero de refuerzo utilizado consistía en una barra de 0.55 m doblada 90°, 0.40 m en posición vertical y el resto en posición horizontal (Figura 2.30).

Los bloques de roca para protección, ubicados en la parte superior de la placa de alta resistencia, eran de 40 x 40 x 20 cm y fueron colocados sobre una cama de mortero de 2.5 cm. Se utilizaron anclajes para asegurar conjuntamente la placa de alta resistencia con los bloques.

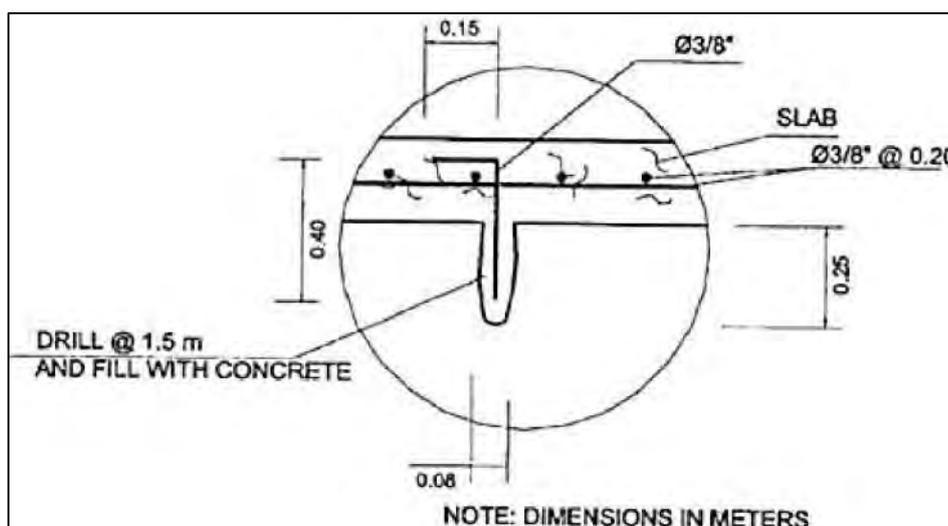


Figura 2.30 Detalle del acero de refuerzo en placa de alta resistencia del nuevo diseño.

Fuente: Universidad de Piura (2005).

Características de operación

La bocatoma, ubicada a 50 m aguas arriba de la quebrada Jacopa, fue diseñada inicialmente para generar un tirante de agua para facilitar su captación a través de un canal de aducción. Es una obra de concreto armado cuya resistencia es de 280 kg/cm^2 y, como ya se ha mencionado, está compuesta por las siguientes estructuras:

- Bocal
- Tuberías de conducción
- Aliviadero móvil
- Vertedero fijo
- Canal de limpia o purga

Bocal

El bocal o estructura de toma, diseñado para captar un caudal de aproximadamente $6 \text{ m}^3/\text{s}$, se encuentra ubicado en el margen izquierdo del cauce del río Quiroz y su principal función es la de captar y dirigir el agua mediante dos conductos empotrados hacia el canal de derivación.

Cuenta con cuatro aberturas provistas de rejillas de protección, con la posibilidad de colocar compuertas planas deslizantes de regulación de 1.80 m de ancho y 2 m de alto; además cuenta con equipo hidromecánico que permite la limpieza de material flotante.

El bocal propiamente dicho consta de dos compuertas planas de $1.25 \times 1.25 \text{ m}$ que permiten regular el caudal de agua captado mediante mecanismos manuales ubicados en la caseta de control. (Universidad de Piura, 2002)

Tuberías de conducción

Son dos tubos de acero, diseñados para trabajar a presión, ubicadas entre el bocal y el desgravador, permitiendo la conexión de estos dos elementos.

Aliviadero móvil

Esta estructura tiene 8 m de ancho y está ubicada en la margen derecha de la bocatoma, está separada del vertedero fijo y del canal de limpia por muros divisores de 0.60 m de ancho.

La losa horizontal de 0.80 m de espesor que la conforma está protegida contra la abrasión mediante una capa de concreto Fondag, mientras que aguas arriba y aguas abajo de dicha losa se ha colocado una capa de material rocoso con un recubrimiento de concreto armado de 15 cm de espesor (Figura 2.31).

Además, en el aliviadero móvil se encuentra la compuerta – presa inflable obermeyer de 8 m de largo y 2 m de altura.

Esta compuerta es de regulación y sirve para mantener el tirante de agua necesario para el funcionamiento del bocal. Puede ser operada en la modalidad manual y automática. En el caso de avenidas la compuerta se desinfla hasta ocupar una posición horizontal sobre el piso del vano; teniendo en cuenta que las avenidas traen bastante material de arrastre, esta posición corresponde al caso de máxima abrasión del escudo protector de la compuerta.

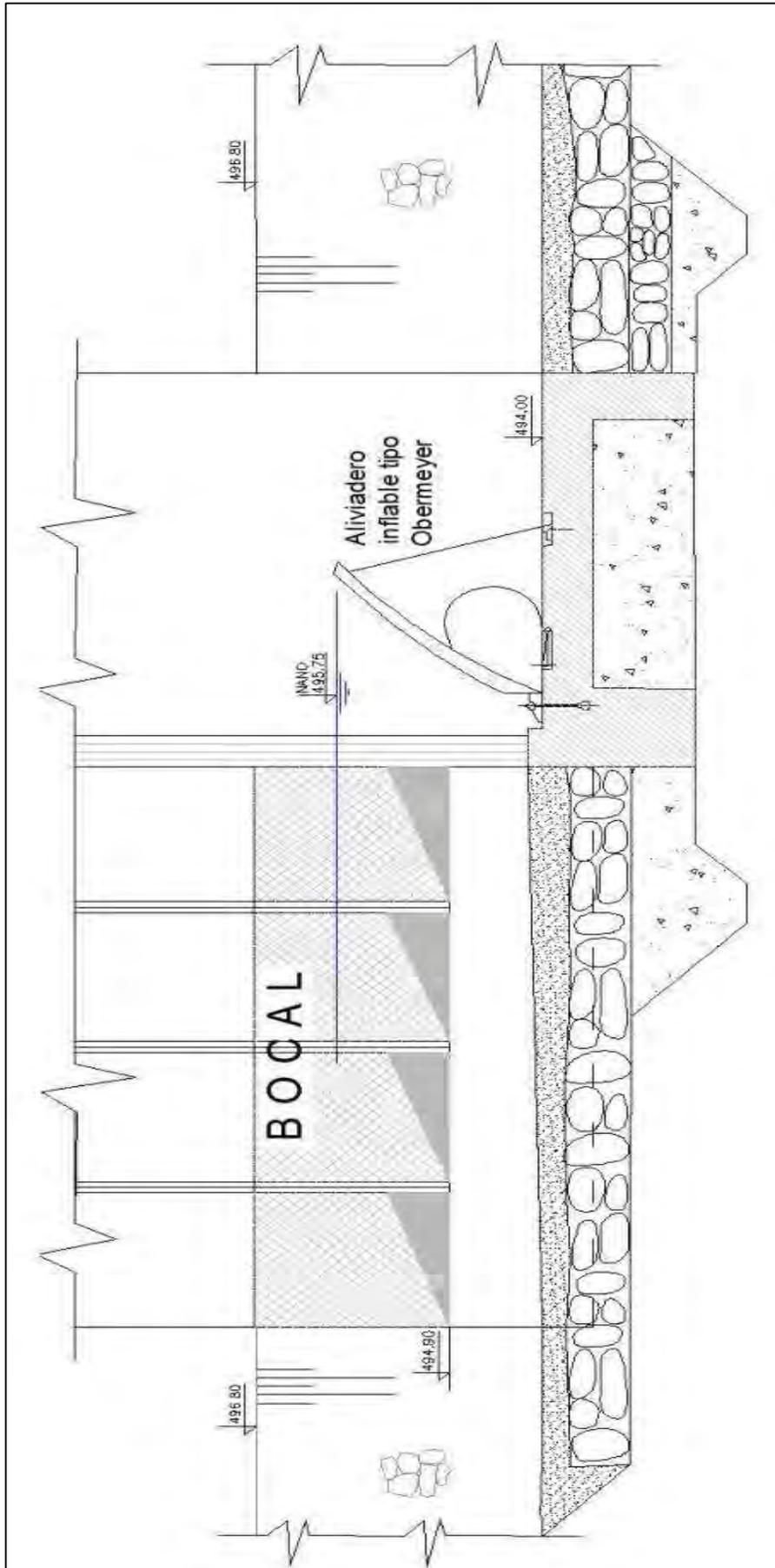


Figura 2.31 Perfil del diseño original del aliviadero móvil y bocal de la bocatoma Quiroz.

Fuente: *Universidad de Piura (2002)*.

La capacidad de evacuación del aliviadero móvil con la compuerta obermeyer completamente bajada – desinflada y con la cota de aguas arriba de 497.20 m.s.n.m. es de 90 m³/s y con la cota 500 m.s.n.m. de 235 m³/s⁵ (ITD S.A.C., 2005).

Vertedero fijo

El vertedero fijo está previsto para evacuar las avenidas del río Quiroz y para generar el embalse en el periodo de estiaje en conjunto con el aliviadero móvil. Su capacidad de evacuación con la cota del tirante de agua de 497.20 m es de 131.45 m³/s y con la cota de 500.00 m de 800 m³/s.⁶

El vertedero fijo se extiende en el lado derecho del barraje en una longitud de 37.7 m desde el muro divisorio, encajando su estribo derecho en el talud natural de la orilla derecha del río Quiroz. En la Figura 2.32 se puede observar su perfil transversal.

Tiene un nivel de coronación de 495.75 m.s.n.m., por encima del cual rebasará el agua cuando los caudales en el río Quiroz sean mayores de los que pueden descargarse a través del bocal, salida de purga y aliviadero móvil. De acuerdo con el cálculo hidráulico, las tres estructuras mencionadas pueden evacuar 45.0 m³/s.⁷

El vertedero fijo está construido de concreto ciclópeo, cubierto con losa de concreto armado. La losa está revestida con placas de piedra laja 40 x 40 x 20 cm, asentadas mediante mortero con aditivo imprimante y fijadas con anclajes de acero en forma intercalada. (ITD S.A.C., 2005)

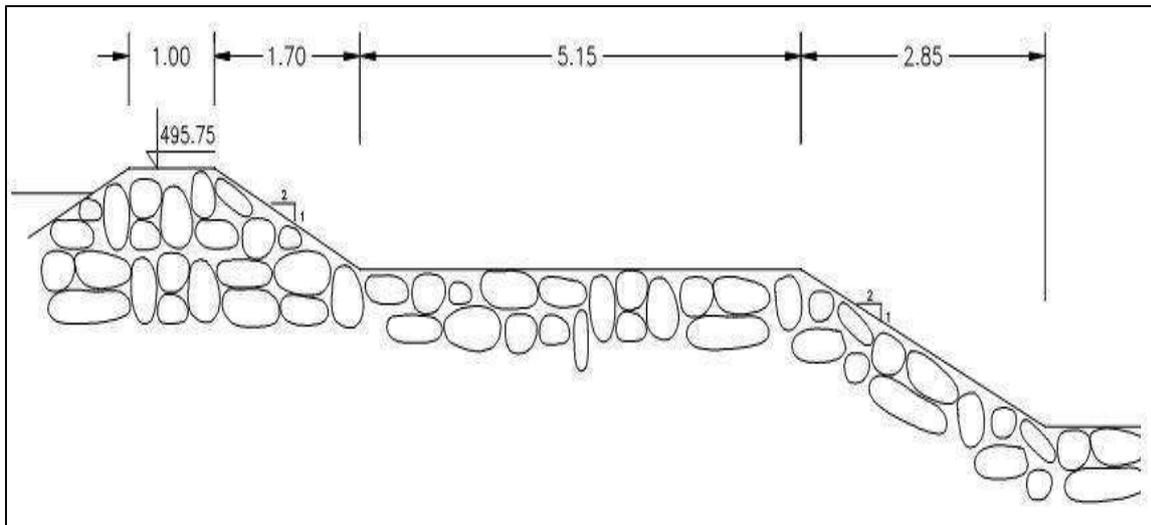


Figura 2.32 Perfil del aliviadero fijo.

Fuente: Universidad de Piura (2002).

⁵ Valores correspondientes al nuevo diseño.

⁶ *Ibíd.*

⁷ *Ibíd.*

Canal de limpia o purga

El canal de limpia, ubicado entre el aliviadero móvil y el bocal, tiene como principal función la de evacuar el material de arrastre traído y acumulado delante del bocal. El canal presenta una compuerta deslizante de abertura libre de 1.00 x 1.20 m de ancho y alto respectivamente.

2.2 Río Quiroz

2.2.1 Características generales

El río Quiroz pertenece al sistema hidrográfico del río Chira y tiene sus orígenes en las alturas de los Cerros Misal, Muchcapán y Viejos, sobre los 4000 m.s.n.m. Nace con el nombre de río Shiantaco; posteriormente adopta los nombres de Palo Blanco, San Pablo, Santa Rosa y, a partir de su confluencia con el río Tulumán, toma el nombre de río Quiroz.

La cuenca del río Quiroz se extiende a lo largo del departamento de Piura, en las provincias de Ayabaca, Morropón y Huancabamba, siendo la primera de éstas donde alcanza su máxima extensión.

La cuenca del río Quiroz cuenta con un área de drenaje total de 3100 km² hasta su desembocadura en el río Chira. Debido a sus características topográficas presenta una longitud máxima de recorrido de 165 km y una pendiente promedio de 2.3%. El aprovechamiento hidráulico más importante, desde el punto de vista hidrológico, es la derivación del río Quiroz hacia la irrigación de San Lorenzo, por medio del Canal Quiroz.

La captación se ubica en las proximidades de su confluencia con la quebrada de Zamba, aproximadamente a 5 Km aguas abajo de la bocatoma de la central hidroeléctrica María Auxiliadora de Quiroz. Este sistema de derivación se encuentra en operación desde 1954 y tiene una capacidad máxima de 60 m³/s (Paulini, 2005).

2.2.2 Hidrología

El río Quiroz muestra un régimen muy irregular a lo largo del tiempo, las variaciones existentes pueden generar que en algunas oportunidades el caudal diario alcance y supere los 300 m³/s.

La mayor variabilidad de los caudales se encuentra en el primer semestre del año, que corresponde a la época de lluvias. Históricamente en el segundo semestre, los caudales mensuales no han superado los 35 m³/s, excepto en diciembre de 1982 que coincide con el inicio del Fenómeno El Niño. En la Tabla 2.1 se pueden observar los caudales medios mensuales medidos en Paraje Grande entre 1938 y 1998.

Tabla 2.1 Caudales promedios mensuales naturalizados en el río Quiroz en Paraje Grande entre 1938 y 1998 (en m³/s).

Año hidrológico	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
1938/1939	14.6	11.3	5.9	12.5	44.6	89.7	244.4	185.4	46.3	37.8	17.5	13.0
1939/1940	6.6	7.2	9.0	22.8	36.9	50.2	37.9	115.4	46.2	21.2	13.8	15.0
1940/1941	14.6	14.2	10.8	26.9	47.9	103.9	144.9	144.3	72.2	37.3	15.8	8.7
1941/1942	13.0	16.6	14.5	21.9	22.6	52.1	45.3	40.9	34.8	22.4	9.8	11.6
1942/1943	10.8	9.5	6.8	9.9	23.0	41.1	46.5	80.4	31.7	17.8	13.3	15.6
1943/1944	12.8	18.1	18.7	16.8	42.0	51.9	70.2	61.5	57.5	8.4	9.6	6.4
1944/1945	16.7	8.6	5.4	27.1	45.0	44.7	42.0	71.0	20.1	16.9	19.8	23.6
1945/1946	23.1	5.8	8.5	9.8	26.2	67.9	80.1	60.7	37.5	46.2	18.4	17.7
1946/1947	17.1	17.1	10.2	15.8	19.6	27.5	24.7	23.7	20.9	15.6	12.5	10.1
1947/1948	8.9	12.7	20.4	26.3	36.9	33.7	50.7	77.1	38.7	27.6	15.8	8.3
1948/1949	7.4	11.7	10.0	8.8	11.0	32.5	75.1	69.7	24.6	34.5	23.6	14.9
1949/1950	15.1	11.3	5.9	9.3	14.1	39.1	74.4	51.2	35.0	53.1	68.4	31.0
1950/1951	22.4	20.4	16.1	34.6	67.7	64.8	81.7	87.4	45.1	42.7	41.2	13.5
1951/1952	11.6	35.0	37.8	62.8	93.9	103.6	155.3	154.8	101.1	88.3	44.1	48.0
1952/1953	10.0	10.4	6.8	8.4	20.7	65.9	95.8	139.5	58.7	48.9	29.3	14.4
1953/1954	12.4	14.1	24.8	22.5	19.7	35.3	57.2	49.2	27.9	16.4	12.8	11.5
1954/1955	9.6	21.0	14.2	24.5	54.8	29.4	68.4	54.7	36.3	24.4	18.8	14.0
1955/1956	12.7	7.0	7.2	13.0	17.4	49.6	89.4	43.3	26.4	32.8	20.6	13.0
1956/1957	15.7	16.4	9.3	6.2	14.3	29.0	72.6	106.5	37.2	16.3	10.1	11.0
1957/1958	9.7	8.6	17.0	7.8	33.0	39.3	40.7	45.7	39.6	20.2	14.8	13.4
1958/1959	12.4	11.9	10.9	4.2	7.8	21.8	27.6	35.3	23.7	16.0	22.3	11.7
1959/1960	14.0	11.8	14.1	22.8	20.3	44.2	36.9	43.8	32.2	18.8	10.9	10.7
1960/1961	13.4	7.5	8.4	7.3	15.8	14.5	41.3	38.5	36.5	17.7	13.7	9.4
1961/1962	8.8	12.1	5.3	11.5	23.9	61.7	76.6	43.3	31.1	17.7	16.5	10.7
1962/1963	14.7	11.2	10.0	13.7	17.0	24.5	43.0	36.4	22.1	20.4	12.3	6.8
1963/1964	4.8	7.9	8.7	20.8	16.0	20.0	23.5	28.2	25.4	20.4	11.0	14.7
1964/1965	16.4	18.0	11.5	6.1	11.9	18.9	30.4	59.3	50.5	39.2	20.6	12.5
1965/1966	14.6	10.9	15.9	11.5	22.6	22.9	30.1	32.5	21.6	11.0	12.6	7.7
1966/1967	6.2	9.2	6.0	5.8	23.9	32.2	32.6	31.0	19.3	14.0	21.2	15.0
1967/1968	6.6	10.4	6.5	9.0	16.3	8.5	34.6	22.0	8.7	6.4	17.2	10.2
1968/1969	8.0	8.9	5.3	2.7	11.3	22.2	23.0	44.2	16.0	8.3	8.5	13.7
1969/1970	9.1	4.7	8.7	16.4	32.6	33.9	39.1	27.7	32.1	38.8	16.6	13.6
1970/1971	10.7	12.9	13.9	23.7	27.1	36.9	99.6	80.3	31.1	32.6	21.5	18.9
1971/1972	18.0	15.7	9.7	10.5	25.8	16.5	51.9	37.3	24.2	21.6	20.1	9.9
1972/1973	16.5	8.2	10.0	17.7	27.4	30.9	35.5	82.5	32.5	20.2	16.4	14.1
1973/1974	13.4	7.6	10.5	20.7	25.5	50.8	41.0	23.1	20.0	18.0	29.2	14.1
1974/1975	11.2	14.7	15.6	34.6	36.7	51.2	74.8	74.2	37.4	56.5	25.8	25.9
1975/1976	18.4	13.7	12.9	6.3	28.8	50.2	75.5	69.6	36.2	36.1	23.7	26.9
1976/1977	12.2	5.9	12.1	10.7	25.5	48.1	55.4	77.4	32.6	29.5	21.2	13.6
1977/1978	9.3	9.6	6.5	10.8	10.2	14.1	32.3	27.3	16.0	19.5	13.3	11.8
1978/1979	8.9	14.9	4.1	6.9	12.3	11.5	54.1	32.1	16.7	13.3	12.3	5.8
1979/1980	5.2	8.4	3.0	7.1	8.5	23.6	28.4	38.9	20.0	18.9	15.9	3.3
1980/1981	3.4	8.7	5.3	11.1	8.3	27.7	61.9	4.5	16.3	16.4	10.2	4.3
1981/1982	3.9	5.4	4.8	12.6	11.4	22.6	14.4	27.4	13.1	6.8	9.2	8.0
1982/1983	8.2	10.4	10.4	39.4	73.5	80.7	107.1	113.8	114.3	71.6	34.4	22.3
1983/1984	22.0	30.9	21.0	35.8	27.3	97.2	113.1	92.4	43.3	53.5	30.0	20.6
1984/1985	8.9	12.4	23.5	26.4	23.9	27.9	23.3	19.0	26.6	20.0	14.8	13.7
1985/1986	7.9	7.5	5.5	9.8	20.4	35.8	27.2	43.1	28.1	9.6	14.3	7.4
1986/1987	7.6	7.0	8.8	15.2	26.8	34.4	30.3	41.0	36.4	14.6	26.4	8.6
1987/1988	6.3	5.7	4.9	9.5	17.3	33.9	25.1	27.3	14.7	7.8	11.5	6.9
1988/1989	6.1	7.1	9.3	9.6	35.4	75.0	68.6	69.5	38.2	24.2	15.0	9.9
1989/1990	9.3	16.9	8.0	6.1	19.2	22.5	31.4	38.2	24.3	28.0	14.1	9.6
1990/1991	6.8	7.8	8.5	14.6	11.7	33.3	55.7	32.2	20.6	15.3	15.0	12.6
1991/1992	10.6	7.9	8.3	8.2	14.2	14.4	27.3	56.9	22.4	22.6	15.0	16.8
1992/1993	13.2	8.8	10.2	13.0	14.8	44.7	99.9	109.6	43.1	38.6	10.2	7.9
1993/1994	8.0	9.6	12.2	24.2	40.3	68.4	62.6	93.9	42.8	37.3	26.1	20.7
1994/1995	15.0	10.3	10.8	19.7	19.9	17.8	30.0	26.5	21.5	11.6	12.5	5.4
1995/1996	4.8	4.4	12.6	15.0	21.4	31.6	59.0	26.9	18.3	12.1	11.8	11.9
1996/1997	7.8	10.2	7.3	8.8	9.7	33.8	32.0	25.6	22.2	9.6	12.5	9.5
1997/1998	7.6	6.7	14.0	21.7	21.4	45.0	148.9	170.7	119.2	38.5	19.8	13.5

Fuente: Paulini (2005).

Al realizar un análisis de estas descargas medias mensuales en Paraje Grande, se puede observar que la masa media anual de la cuenca alta del río Quiroz es de 712 MMC, dividiéndose el 74% y 26% de la misma entre el primer y segundo semestre de año. En la Figura 2.29 se observa esta distribución expresada en valores característicos de los caudales

medios mensuales, entre los años 1954 y 1998, en los cuales se alcanza un valor máximo cercano a $175 \text{ m}^3/\text{s}$.

Adicionalmente, en la Figura 2.30 se observa que del análisis de descargas medias mensuales se deduce que para un período de retorno de 10 años es posible alcanzar caudales medios mensuales que superen los $90 \text{ m}^3/\text{s}$ entre los meses de marzo y abril. Para periodos de retornos de 50 y 100 años, se alcanzan caudales medios mensuales máximos cercanos a 150 y $175 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Se debe tener muy en cuenta que estas proyecciones corresponden a caudales naturalizados, es decir, incluyen el agua derivada por el Canal Quiroz y el caudal biológico que se debe dejar pasar por el río aguas abajo de Zamba (Paulini, 2005).

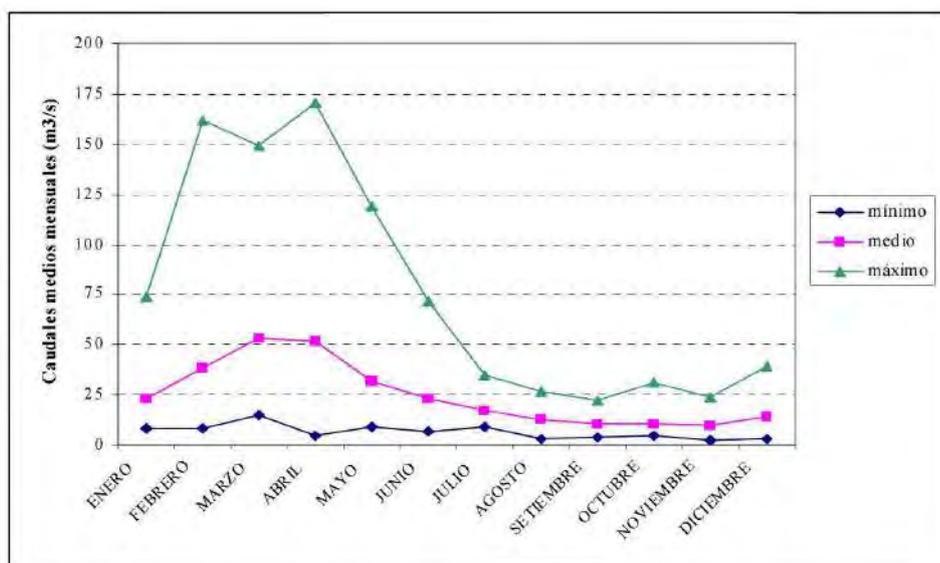


Figura 2.29 Distribución de caudales medios mensuales observados en el río Quiroz en Paraje Grande entre 1954 y 1998.

Fuente: Paulini (2005).

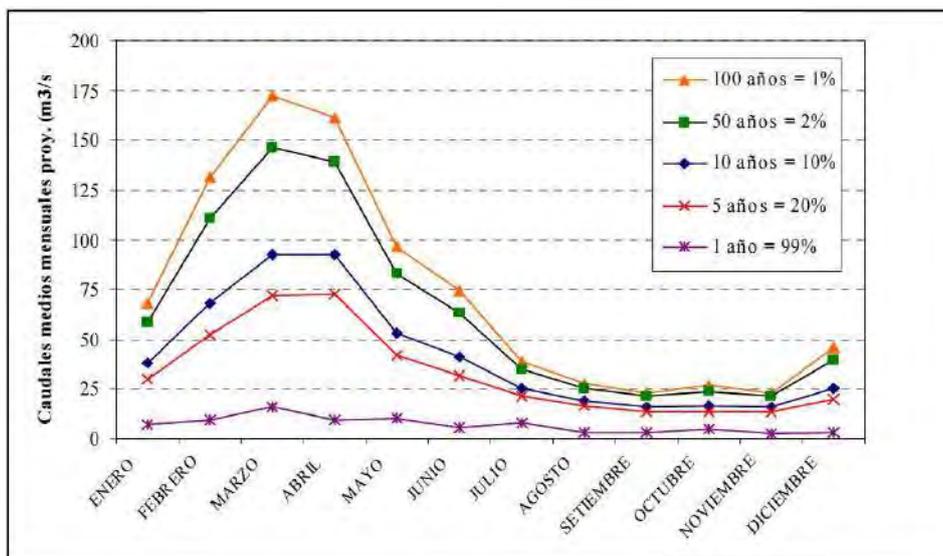


Figura 2.30 Proyección de caudales medios mensuales del río Quiroz para distintos períodos de retorno.

Fuente: Paulini (2005).

Analizando los datos de caudales promedios mensuales observados y naturalizados en el río Quiroz en Paraje Grande entre 1938 y 1998, se puede apreciar que valor máximo alcanzado es muy cercano a $250 \text{ m}^3/\text{s}$. Sin embargo, al momento de realizar el análisis considerado en la Figura 2.29 y Figura 2.30, solamente se consideran los años posteriores a 1954 debido a que a partir de enero de ese año, el régimen hídrico del río Quiroz se vio alterado por la puesta en operación de la Bocatoma de Zamba con la consecuente derivación de las aguas de este río mediante el Canal Quiroz al sistema hidráulico del valle de San Lorenzo.

En el desarrollo de la modelación numérica de la presente tesis, se consideraron dos valores característicos para la realización de las simulaciones: el caudal promedio ($50 \text{ m}^3/\text{s}$), correspondiente al doble del valor medio de los caudales analizados anteriormente, y el caudal máximo ($300 \text{ m}^3/\text{s}$), valor correspondiente al máximo caudal diario observado en el río Quiroz.

Capítulo 3

Métodos numéricos

3.1 Dinámica de fluidos computacional - CFD

3.1.1 Comportamiento básico de los fluidos

Los fluidos son sustancias cuyas estructuras moleculares no ofrecen resistencia alguna a esfuerzos de corte externos, incluso la más pequeña de las fuerzas es capaz de generar deformación en su estructura. Todos los fluidos tienen comportamiento similar, no obstante, bajo la acción de fuerzas, sus propiedades macroscópicas varían considerablemente.

Para estudiar correctamente el movimiento de estos fluidos es necesario conocer dichas propiedades, entre las más importantes están la densidad y la viscosidad. Otras, como el número de Prandtl, el calor específico y la tensión superficial, afectan al flujo solamente bajo ciertas condiciones, como por ejemplo, cuando existen grandes diferencias de temperatura.

Una variable que influye bastante en el comportamiento de los fluidos, es la velocidad de flujo. Mientras menor sea su valor, la influencia de la inercia también lo será, por ello, a medida que se incrementa la velocidad se distinguen distintos tipos de flujo, tales como el laminar y el turbulento; siendo éste último producido por incrementos altos en la velocidad que pueden conducir eventualmente a la inestabilidad del fluido.

Muchos flujos son considerados como no viscosos debido a que el efecto de su viscosidad solamente es apreciable en los extremos del fluido, es decir, la mayor parte de su dominio no se ve afectada por esta variable.

Los fluidos a los cuales se hace referencia en la presente explicación se rigen bajo la ley de la viscosidad de Newton, los cuales son llamados fluidos newtonianos; estos fluidos se caracterizan por presentar una viscosidad invariable en el tiempo.

Existen muchos otros fenómenos que afectan al flujo, entre ellos está la diferencia de temperatura, la cual conduce a la transferencia de calor y, la diferencia de densidad, que da lugar a la flotabilidad. Estos fenómenos, pueden afectar al flujo significativamente o incluso ser la única causa de la corriente. Los cambios de fase como la ebullición, condensación, fusión y congelación pueden generar modificaciones importantes y dar lugar a flujos multifásicos. Variaciones de otras propiedades tales como, viscosidad, tensión superficial,

etc., también tienen un rol importante en la determinación de la naturaleza del flujo. (Ferziger, 2002)

3.1.2 Principios de conservación

Las leyes o principios de conservación se aplican para propiedades extensivas, tales como la masa, momentum y energía. Estas leyes relacionan la variación entre la cantidad de dicha propiedad en una cantidad de masa o control de masa (CM) para determinar los efectos externos.

En la dinámica de fluidos, se trabaja con el flujo existente dentro de una región espacial conocida como control de volumen (CV), ya que es complicado realizar el seguimiento de una determinada cantidad de materia.

En los flujos de interés para la ingeniería, la masa no se crea ni se destruye, es decir, que la variación de la cantidad de masa en el tiempo es igual a cero (ecuación 3.1). Por otro lado, para el momentum se toma como referencia la segunda ley de Newton del movimiento (ecuación 3.2), ya que éste presenta una variación debido a la influencia de fuerzas actuantes dentro del CM.

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{d(mv)}{dt} = \sum f \quad (3.2)$$

Donde t es el tiempo, m la masa, v la velocidad y, f son las fuerzas actuantes en el control de masa.

Para que las propiedades extensivas se conviertan en intensivas, éstas deben expresarse de manera independiente a la cantidad de materia considerada; para lograr esto se modifican las leyes de conservación y se expresan en forma de control de volumen.

Si definimos a ϕ como cualquier propiedad intensiva conservadora (para la conservación de masa $\phi = 1$; para la conservación de momentum $\phi = v$; para la conservación de un escalar, ϕ representa la propiedad conservativa por unidad de masa), su correspondiente propiedad extensiva Φ puede ser expresada como:

$$\Phi = \int_{\Omega_{CM}} \rho \phi d\Omega \quad (3.3)$$

Donde Ω_{CM} es el volumen ocupado por el control de masa. Usando ésta definición, la parte izquierda de toda ecuación de conservación para un control de volumen puede ser expresada como:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega_{CM}} \rho \phi d\Omega = \frac{d}{dt} \int_{\Omega_{CV}} \rho \phi d\Omega + \int_{S_{CV}} \rho \phi (v - v_b) \cdot n dS \quad (3.4)$$

Donde Ω_{CV} es el volumen del CV, S_{CV} es la superficie que encierra el CV, n es el vector unitario ortogonal a S_{CV} y direccionado hacia afuera, v es la velocidad del fluido y v_b es la velocidad con la cual la superficie del CV se está moviendo. Para un valor fijo de CV, se

considerará en la mayoría de los casos como $v_b = 0$, además, la primera derivada en el lado derecho se convierte en una derivada local o parcial.

La ecuación 3.4 establece que la tasa de cambio de la cantidad de propiedad en el control de masa (Φ) sea equivalente a la tasa de cambio de la propiedad dentro del control de volumen, más el flujo neto de ésta a través de la frontera del CV debido al movimiento relativo del fluido sobre el mismo. Este último término es usualmente llamado flujo convectivo (o algunas veces, advectivo) de Φ a través del CV límite. Si el CV se mueve, quiere decir que su límite coincide con el del control de masa, entonces $v = v_b$ y éste término se vuelve cero según sea necesario (Ferziger, 2002).

El análisis matemático de la conservación de masa y la conservación de momentum se encuentra explicado detalladamente en el Anexo A.

3.1.3 Introducción a la mecánica de fluidos computacional

Como se ha observado en lo mencionado anteriormente, los fluidos y sus fenómenos relacionados puede ser descritos por ecuaciones diferenciales parciales o integro-diferenciales. Sin embargo, o se puede encontrar una solución a estas ecuaciones mediante un desarrollo analítico.

No obstante, en algunos casos especiales se recurre al método de discretización para obtener soluciones numéricas aproximadas. A través de aproximaciones, este método convierte las ecuaciones diferenciales a un sistema de ecuaciones algebraicas que pueden ser desarrolladas en una computadora. La exactitud de las soluciones numéricas dependerá de la calidad de las discretizaciones usadas.

Los contenidos dentro del amplio campo de la dinámica de fluidos computacional (CFD), cubren todo el alcance de la automatización de los bien establecidos métodos de diseño de ingeniería, para el uso de las soluciones detalladas de las ecuaciones de Navier-Stokes como sustitutos de la investigación experimental sobre la naturaleza de los flujos complejos. En un extremo, se pueden obtener paquetes de diseño de sistemas de tuberías que resuelvan problemas en cuestión de segundos en computadores personales; por el otro, existen códigos que requieren cientos de horas de trabajo en grandes supercomputadores. El rango es tan extenso como el campo de la mecánica de fluidos en sí, por lo que resulta imposible colocar todos los CFD en un solo lugar. (Ferziger, 2002)

3.2 Métodos de solución numéricos

3.2.1 Componentes

3.2.1.1 Modelo matemático

El modelo matemático es el punto de partida de todo método de solución numérico. Este se escoge según los requerimientos y las características del fluido que se vayan a analizar (viscosidad, compresibilidad, entre otros) y puede incluir simplificaciones en las leyes de conservación, como se mencionó anteriormente.

Los modelos matemáticos tienen un bajo rango de aplicación, es decir, que no se puede crear un método de solución general que aplique para todo tipo de flujos; más bien, el método de solución usualmente se diseña para un conjunto particular de ecuaciones.

3.2.1.2 Método de discretización

Después de seleccionar el modelo matemático, uno tiene que escoger un método de discretización adecuado, por ejemplo, el método de aproximación de las ecuaciones

diferenciales a un sistema de ecuaciones algebraicas de las variables, en algún conjunto de ubicaciones discretas en el espacio y en el tiempo. Hay muchos enfoques, pero los más importantes entre ellos son: el método de diferencias finitas (FD), de volúmenes finitos (FV), y de elementos finitos (FE). Otros métodos, como esquemas espectrales y métodos de elementos de contorno se utilizan en CFD, pero su uso se limita a problemas en particular. (Ferziger, 2002)

Algunos métodos son más adecuados que otros para alguna clase de problemas. La preferencia es a menudo determinada por la actitud del desarrollador.

3.2.1.3 Sistemas de vectores coordenados y de base

Existen varias formas de expresar las ecuaciones de conservación, esto depende del sistema de coordenadas y tipo de vectores base escogidos (fijos o variables, covariantes o contravariantes, etc.) (Figura 3.35).

Según la elección que se realice, el método de discretización y el tipo de malla se pueden ver afectados. Además, según el tipo de vectores base seleccionado, el vector de velocidad y el esfuerzo tensor pueden ser expresados en términos cartesianos, covariantes o contravariantes, componentes físicos o no físicos con coordenadas orientadas, entre otros.

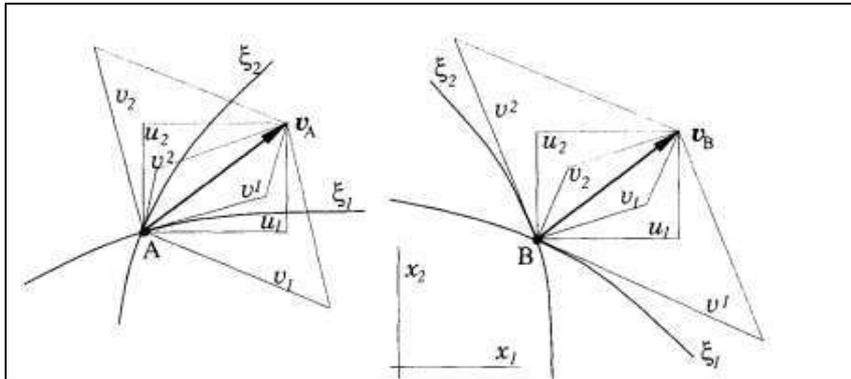


Figura 3.31 Representación de un vector a través de distintas componentes: \mathbf{u}_i – componentes cartesianos; \mathbf{v}^i – componentes contravariantes; \mathbf{u}_i – componentes covariantes. [$\mathbf{v}_A = \mathbf{v}_B$, $(\mathbf{u}_i)_A = (\mathbf{u}_i)_B$, $(\mathbf{v}^i)_A \neq (\mathbf{v}^i)_B$, $(\mathbf{v}_i)_A \neq (\mathbf{v}_i)_B$]
Fuente: Ferziger (2002).

3.2.1.4 Malla numérica

Las mallas numéricas son utilizadas para dividir el dominio en un número finito de subdominios (elementos, volumen de control, etc.). Estos subdominios son ubicaciones discretas donde se calculan las variables, es decir, son básicamente una representación de la geometría del dominio sobre la cual se resuelve el problema.

Los principales tipos de mallas son: **malla estructural (regular)**, **malla de bloques estructurados**, y **mallas no estructuradas**.

Malla estructurada (regular): las mallas estructuradas o regulares consisten en familias de líneas en una cuadrícula con la propiedad de que los miembros de una misma familia no se cruzan entre sí y solamente una vez con miembros de otras familias. Esta es la estructura de malla más simple, ya que lógicamente es equivalente a una cuadrícula cartesiana. Un ejemplo de una estructura 2D es mostrado en la Figura 3.32.

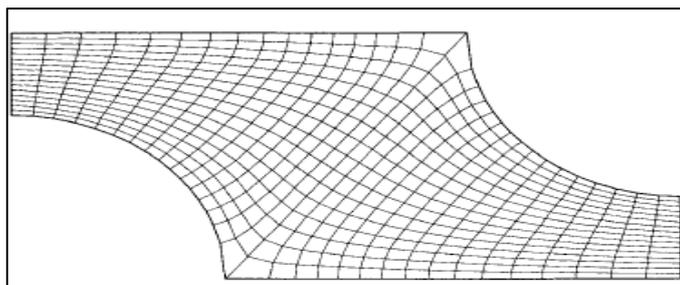


Figura 3.32 Ejemplo de una malla no ortogonal 2D estructurada.

Fuente: Ferziger (2002).

Las mallas estructuradas pueden ser del tipo H, tipo O y del tipo C; los nombres provienen de las formas de las líneas de las cuadrículas. En la Figura 3.32 se muestra una malla tipo H la cual, cuando se proyecta sobre un rectángulo tiene distintas condiciones de borde en sus cuatro lados.

Malla de bloques estructurados: En una malla de bloques estructurados, hay dos (o más) niveles de subdivisión del dominio de solución. En el nivel grueso, hay bloques que son grandes segmentos del dominio; su estructura puede ser irregular y pueden o no solaparse. En el nivel fino (en el interior de cada bloque), se define una malla estructurada y es necesario un tratamiento especial en la interfase entre bloques.

En la Figura 3.33, se muestra una malla de bloques estructurados con interfases coincidentes; éste está diseñado para el cálculo de un flujo en 2D alrededor de un cilindro en un canal y presenta tres bloques.

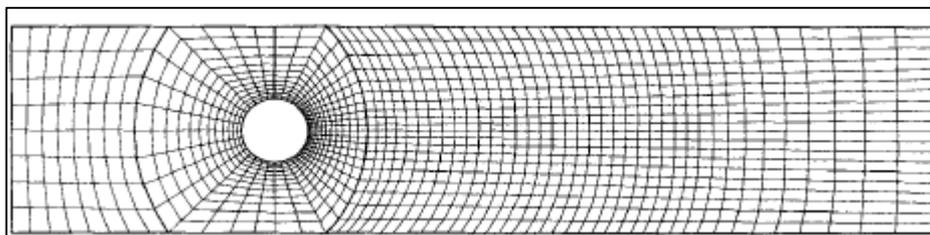


Figura 3.33 Ejemplo de una malla 2D de bloques estructurados con interfases coincidentes.

Fuente: Ferziger (2002).

En la Figura 3.34 se observa una malla de bloques estructurados con interfases no coincidentes, la cual fue utilizada para calcular el flujo alrededor de un hidropilano sumergido. Este tipo de malla es más flexible que el anterior, ya que permite el uso de cuadrículas más finas en regiones donde se requieren mayores resoluciones.

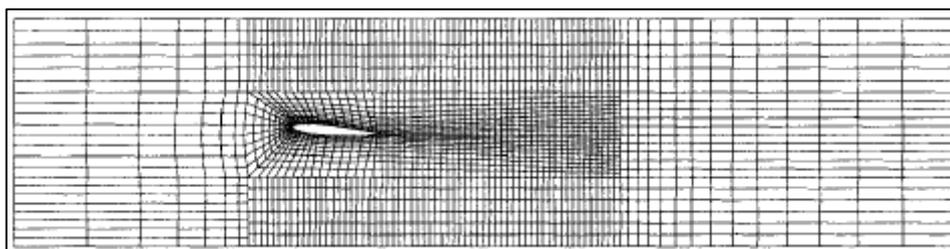


Figura 3.34 Ejemplo de una malla 2D de bloques estructurados con interfases no coincidentes.

Fuente: Ferziger (2002).

Existen mallas de bloques estructurados superpuestos, conocidos como redes Chimera o compuestas, cuya principal característica es que las condiciones de borde de un bloque se obtiene a través de la interpolación de la solución de otro bloque superpuesto. Este tipo de malla no es utilizado debido a que es difícil mantener la conservación en las fronteras de los bordes de los bloques (Figura 3.39).

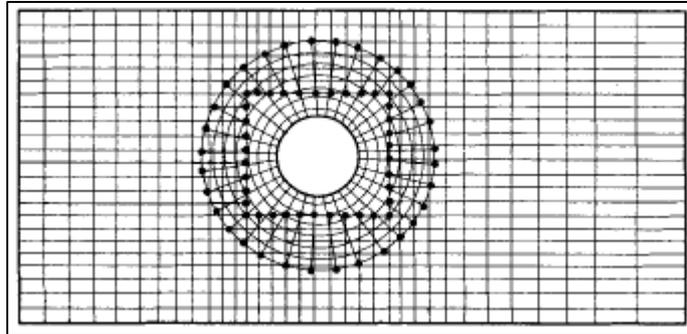


Figura 3.35 Ejemplo de una malla 2D de bloques estructurados compuesta.

Fuente: Ferziger (2002).

Mallas no estructuradas: Este tipo de malla es el más flexible y el más adecuado para geometrías muy complejas debido a la facilidad que tiene para encajar en la frontera del dominio de la solución arbitraria. Los elementos o control de volumen pueden tener cualquier forma; no hay una restricción en el número de elementos o nodos vecinos. En la práctica las más utilizadas son las mallas formadas por triángulos o cuadriláteros en 2D, y por tetraedros o hexaedros en 3D (Figura 3.36).

Las mallas no estructuradas usualmente trabajan con métodos de elementos finitos y cada vez se utilizan más en métodos de volúmenes finitos. Además los códigos informáticos utilizados en este tipo de mallas no necesitan ser cambiados cuando la malla se refina a nivel local o cuando se utilizan elementos o controles de volumen de distinta forma. Sin embargo, la generación del mallado y el pre-procesamiento son relativamente más complicados. (Ferziger, 2002)

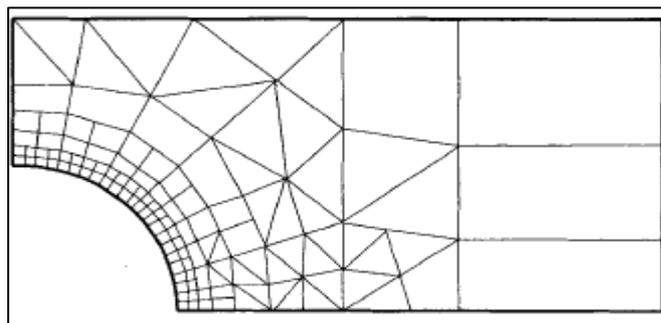


Figura 3.36 Ejemplo de una malla 2D no estructurada.

Fuente: Ferziger (2002).

3.2.1.5 Aproximaciones finitas

Posteriormente a la elección del tipo de malla, se escogen las aproximaciones que se usarán en el proceso de discretización según el tipo de método utilizado.

En el método de diferencias finitas, se escogen las aproximaciones para las derivadas en los nodos de la malla. Para el método de volúmenes finitos, se selecciona el método de

aproximación de integrales de superficie. Finalmente, en el método de elementos finitos, se escogen las funciones de fondo y las de ponderación (Ferziger, 2002).

Hay muchas posibilidades para escoger, y la elección de uno u otro método influyen en la precisión de la aproximación. Las aproximaciones más precisas incluyen mayor cantidad de nodos y dan matrices de coeficiente más completas. El alto requisito de memoria puede requerir el uso de mallas gruesas, compensando parcialmente la ventaja de obtener una mayor precisión.

3.2.1.6 Método de solución

El método de solución depende del problema. Para flujos inestables, se utilizan métodos basados en problemas de valores iniciales para las ecuaciones diferenciales ordinarias (que varían en el tiempo).

En flujos estables, los problemas son usualmente resueltos por un supuesto avance en el tiempo o un esquema de iteración equivalente; dado que las ecuaciones son no lineales, se utiliza dicho esquema para resolverlas.

Estos métodos utilizan la linealización sucesiva de las ecuaciones y, por lo tanto, los sistemas lineales resultantes son casi siempre resueltos por técnicas iterativas. La elección del solucionador depende del tipo de malla y el número de nodos involucrados en las ecuaciones algebraicas (Ferziger, 2002).

3.2.1.7 Criterio de convergencia

Finalmente, el usuario es el encargado de detener el proceso iterativo según la precisión y eficiencia requerida. Dado que la respuesta que se obtiene es una aproximación, se debe establecer un criterio de convergencia del método iterativo.

Existen dos niveles de iteración, uno interno que resuelve las ecuaciones lineales y otro nivel externo que se encarga de desarrollar la no linealidad y el acoplamiento de las ecuaciones.

3.2.2 Propiedades

En la mayoría de los casos, no es posible analizar completamente el método de solución. Cuando se analizan los componentes del método, si estos no presentan las propiedades deseadas, tampoco las presentará el método completo; lo opuesto no es necesariamente cierto. Las características más importantes se explicarán de forma breve a continuación y con más detalle en el Anexo B.

3.2.2.1 Consistencia

Un método de solución numérico es considerado como consistente, si la diferencia existente entre la ecuación de discretización y la ecuación exacta se convierte en cero cuando en una aproximación en la malla, el lapso de tiempo y/o espaciado tiende a cero ($\Delta t \rightarrow 0$ y/o $\Delta x_i \rightarrow 0$). A la diferencia existente entre la ecuación de discretización y la ecuación exacta se le conoce como error de truncamiento.

3.2.2.2 Estabilidad

Se dice que un método de solución numérica es estable si no magnifica los errores que aparecen a lo largo del proceso de la solución.

Para métodos iterativos, un método estable es uno en el que no haya divergencia. El enfoque más utilizado para el estudio de la estabilidad de los esquemas numéricos es el método de Von Neumann.⁸

3.2.2.3 Convergencia

Se dice que un método numérico es convergente si la solución de las ecuaciones discretizadas tiende a la solución exacta de la ecuación diferencial cuando el espaciado de la malla tiende a cero. Obviamente, un esquema consistente es inútil a menos que el método de solución converja.

La convergencia es usualmente comprobada utilizando experimentos numéricos. Si el método es estable y todas las aproximaciones utilizadas en el proceso de discretización son consistentes, usualmente se encuentra que la solución converge en una solución independiente de la malla.

3.2.2.4 Conservación

Para que un esquema numérico respeta las leyes de la conservación tanto a nivel local como global se debe cumplir que, en un estado estable y ante la ausencia de fuentes, la suma de cantidades que ingresan a un volumen de control sea equivalente a la suma de cantidades que salen del mismo.

El tratamiento de las fuentes y salidas deben ser consistentes de manera que el total de éstas en el dominio sea igual al flujo neto de la cantidad conservada a través de los límites.

3.2.2.5 Acotamiento

Las soluciones numéricas deben estar dentro de los límites adecuados. Cantidades físicamente no negativas (densidad, energía cinética de turbulencia, etc.) deben ser siempre positivas; otras cantidades, como la concentración, deben de estar entre 0% y 100%. En la ausencia de fuentes, algunas ecuaciones requieren que los valores mínimos y máximos de la variable se encuentren dentro de los límites del dominio.

3.2.2.6 Realizabilidad

Se debe asegurar que, para los fenómenos más complejos (turbulencia, combustión y flujos multifásico), se diseñe un tipo de modelo que permita obtener soluciones físicamente posibles.

3.2.2.7 Precisión

Las soluciones numéricas de problemas de flujo de fluido y transferencia de calor son solamente soluciones aproximadas. Además de los errores que pueden surgir en el transcurso del desarrollo del algoritmo de solución, en la programación o configuración de condiciones de borde, las soluciones numéricas siempre incluyen tres tipos de errores sistemáticos:

- Errores de modelación: los cuales se definen como la diferencia entre el flujo real y la solución exacta del modelo matemático.
- Errores de discretización: definidos como la diferencia entre la solución exacta de las ecuaciones de conservación y la solución exacta del sistema de ecuaciones algebraicas obtenidas por discretizar dichas ecuaciones.
- Errores de iteración: definidos como la diferencia entre la solución iterativa y la solución exacta del sistema algebraico de ecuaciones (Ferziger, 2002).

⁸ Gracias al análisis de von Neumann, es fácil estudiar también la estabilidad de los métodos semi-discretos y que permite comprobar la existencia métodos consistentes y no estables y, por tanto, no convergentes.

3.2.3 Posibilidades y limitaciones

Muchos fenómenos complejos en la realidad pueden ser simulados con total facilidad en un programa CFD. Éste se basa en la resolución de las ecuaciones tridimensionales inestables de Navier-Stokes para conseguir un conjunto completo de datos en el que cualquier variable física puede ser derivada. Es necesario recordar que los resultados obtenidos de la solución de las ecuaciones son simplemente aproximaciones.

Existen razones para diferenciar entre los resultados calculados y los reales, tales como:

- Las ecuaciones diferenciales pueden contener aproximaciones o idealizaciones.
- Las aproximaciones están hechas en los procesos de discretización.

En la solución de las ecuaciones se utilizan métodos iterativos. A menos que ellos trabajen por un periodo de tiempo muy prolongado, la solución exacta de las ecuaciones no podría ser generada.

Para fenómenos sencillos (fluidos newtonianos incompresibles), donde las ecuaciones gobernantes son conocidas, se pueden obtener soluciones reales según lo requerido. Sin embargo, en fenómenos más complejos (turbulencia, combustión y fluidos multifásicos), las ecuaciones no están completamente definidas. Inclusive la solución de dichas ecuaciones puede que no refleje fielmente a la realidad.

Con el fin de validar los modelos, se tiene que confiar en la información experimental. Incluso cuando el tratamiento exacto es posible, los modelos a menudo son necesarios para reducir los costos.

Para minimizar los errores de discretización se recurre al uso de interpolaciones o aproximaciones más precisas, o a la reducción de las regiones utilizadas. Esto acarrearía un incremento significativo en el tiempo y costo de la obtención de la solución.

Los solucionadores directos, que obtienen respuestas más precisas generalmente no son muy utilizados por sus costos elevados. Los métodos iterativos son más comunes, pero los errores generados en el proceso de iteración deben ser tomados en cuenta.

Los recursos de visualización de soluciones numéricas en los flujos inestables, tales como, vectores, superficies de contorno, líneas de corriente, vídeos, entre otros, son importantes para la interpretación de resultados. Estos son por mucho, los medios más eficaces para interpretar la enorme cantidad de información producida por los cálculos. Sin embargo, existe el riesgo de que soluciones erróneas aparenten ser correctas aunque no correspondan con los valores reales de las condiciones de borde, propiedades de flujo, entre otros (Ferziger, 2002).

3.2.3.1 Eficiencia y precisión

La mejor forma de medir la eficiencia en un método de solución es a través del esfuerzo computacional que se requiere para lograr la precisión deseada. Existen muchos métodos para el mejoramiento de la eficiencia y la precisión de los métodos de CFD; a continuación, se describirán los tipos de errores más comunes.

Errores de modelación

Los procesos de los fluidos pueden ser representados por ecuaciones diferenciales integrales o parciales que cumplan con las leyes de conservación. Estas ecuaciones, que representan

un modelo matemático del problema y pueden considerarse exactas, presentan soluciones imposibles en fluidos de interés ingenieril.

Algunos fenómenos complejos, como la turbulencia y la combustión, pueden requerir una gran demanda de recursos computacionales y son difíciles de representar con exactitud; para su simplificación, se recurre frecuentemente a la utilización de aproximaciones de modelado. Incluso si el modelo matemático utilizado es casi exacto, existen propiedades particulares del fluido que no se conocen con exactitud, dando lugar a que se generen errores adicionales de modelación.

El error de modelación viene a ser la diferencia entre el comportamiento del flujo real y la solución exacta del modelo matemático.

Errores de discretización

En su mayoría las ecuaciones que representan los fenómenos con exactitud son difíciles de solucionar. Por ello se recurre a un proceso de discretización (aproximaciones) que transforman dichas ecuaciones en un sistema de ecuaciones algebraicas que puedan ser solucionadas fácilmente por un ordenador.

El uso de mejores aproximaciones puede mejorar la precisión; sin embargo, estas necesitan un mayor tiempo de computación y almacenamiento, y pueden ser difíciles de aplicar en geometrías complejas. La resolución de la malla espacial y temporal son los únicos parámetros que el usuario controla con exactitud. La misma aproximación puede ser precisa en una parte del fluido pero inexacta en otros lugares. Las variaciones bruscas del flujo de manera local pueden provocar variaciones pequeñas que generarán errores de igual magnitud (Ferziger, 2002).

Por ello, los errores en los resultados pueden diferir en un orden o más de magnitud. El error de discretización quedaría definido como la diferencia entre la solución exacta de las ecuaciones que gobiernan y la solución exacta de la aproximación discreta.

Errores de iteración

Las ecuaciones algebraicas obtenidas del proceso de discretización, son ecuaciones linealizadas que se resuelven a través de un método de iteración. Este proceso iterativo necesita ser interrumpido eventualmente para obtener una solución, a la cual se le conoce como solución de las ecuaciones iterativas discretizadas.

Aunque el proceso de solución sea convergente y el tiempo de iteración adecuado, nunca se obtendrán los valores exactos de la solución de las ecuaciones discretizadas. Se define al error de iteración como la diferencia entre la solución exacta y la solución de las ecuaciones iterativas discretizadas.

Errores de programación y de usuario

Los errores de programación son inherentes a las computadoras y muchas veces difíciles de localizar mediante un estudio del código. Por este motivo, se diseñan problemas de prueba para poder detectar dichos errores.

Una parte crítica del código son las condiciones de frontera. Los resultados deben ser comprobados para observar si realmente se satisfacen dichas condiciones, es común encontrar que esto no suele ser así.

Es importante distinguir entre los errores sistemáticos, que están inherentemente presentes en todo el método y los errores evitables, que son debido al uso inadecuado o indebido del código. Muchos errores de usuario se deben al ingreso incorrecto de los datos, a menudo el error se encuentra solo después de que muchos cálculos se han realizado y en algunos casos, nunca se encuentran. Estos errores frecuentes se deben a una mala selección de la escala de la geometría o de la elección de parámetros (Ferziger, 2002).

3.3 Modelos numéricos

Existen muchos problemas de ingeniería hidráulica relacionados con el movimiento del agua en flujos turbulentos, estos son muy importantes y de gran interés en la ingeniería civil para el proceso constructivo de diversas estructuras hidráulicas como bocatomas, desarenadores, canales, entre otros.

Debido al alto grado de dificultad al momento de analizar la dinámica del movimiento del agua es que se ha recurrido durante mucho tiempo a la construcción a escala de modelos físicos que permitan un mejor estudio de las estructuras hidráulicas. No obstante, el gran incremento de desarrollo computacional que ha aparecido en los últimos años ha permitido un avance importante en el ámbito de los modelos numéricos de simulación de flujo.

3.3.1 Características

Muchas veces es necesario hacer uso de expresiones matemáticas muy complejas para describir los flujos presentes en las estructuras hidráulicas; dichas expresiones a menudo requieren de métodos de solución sofisticados, los cuales solamente podían resolverse en tiempo relativamente grandes y con ordenadores de gran capacidad, disponibles únicamente en algunos centros de investigación, fuera del alcance de la mayoría de ingenieros.

Es por esta razón, que los modelos físicos a escala fueron el único recurso disponible en el estudio de problemas de flujos durante mucho tiempo; sin embargo el gran desarrollo tecnológico ha aumentado el acceso a una gran cantidad de usuarios a los modelos numéricos.

Se suele ver a estos como un reemplazo de los modelos físicos a escala; sin embargo, este pensamiento es erróneo ya que ambos métodos pueden ser utilizados como complemento del otro. Para lograr un mejor aprovechamiento de esta complementariedad se debe pensar a futuro en la implementación de modelos combinados físico-numéricos cuyos resultados optimicen la relación entre el beneficio y el costo. Un ejemplo de esto se daría en la modelación de tramos largos de ríos, su gran extensión imposibilitaría el uso de un modelo puramente físico, por lo que en este caso se tendría que recurrir a la modelación numérica de todo el largo del río y como recurso opcional, la modelación física del tramo donde se ubicarían las estructuras hidráulicas presentes en el río.

Se espera que en un futuro esta combinación de modelos permita optimizar el proceso de modelación de algunas estructuras hidráulicas, con la simulación numérica se podría evaluar distintas variantes de diseño y se analizaría la mejor opción mediante una modelación física a escala. Este proceso podría reducir cuantitativamente costos y tiempo de investigación en varias semanas e incluso meses.

3.3.2 Tipos de modelos numéricos

En un inicio se recurría al uso de modelos numéricos para solucionar problemas enfocados en una característica en particular, generalmente del flujo del agua. Hoy en día estos modelos están estandarizados y son capaces de solucionar, para flujos con condiciones similares,

problemas relacionados a fenómenos de transporte de sedimento, erosión de obras hidráulicas, calidad de agua, entre otros. Los modelos numéricos se pueden categorizar según distintos criterios, a continuación se presentarán algunos de ellos (Vásquez, 2003).⁹

3.3.2.1 Dimensionalidad

Según el criterio de dimensionalidad, se pueden obtener los modelos 1D, 2D o 3D dependiendo de la importancia asignada a las dimensiones de un cuerpo o una estructura hidráulica (Figura 3.37).

Los modelos unidimensionales (1D) son comúnmente aplicados en el estudio de canales o de ríos de gran extensión, en este tipo de modelos una de las tres dimensiones prevalece sobre las demás, dicha dimensión es la longitud a lo largo de un canal o de un río.

La información es introducida como valores promedios de una sección transversal, es decir, que para cada sección se trabaja con un único valor de tirante y de velocidad. Por esta razón, no se consideran las variaciones de velocidad tanto de modo horizontal como vertical. Además, el modelo asume que el valor de velocidad ingresado es perpendicular a la sección transversal analizada. Estas simplificaciones limitan su capacidad de uso y de aplicación, por lo que solamente son utilizados en tramos de ríos y canales cuya relación entre largo y ancho es mayor a 20 y en problemas donde se necesita conocer niveles máximos de agua.

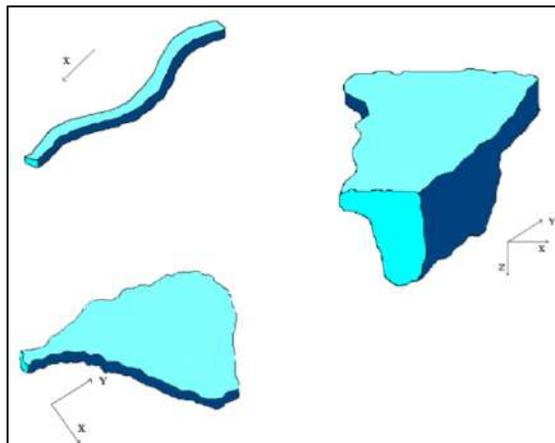


Figura 3.37 Esquema de modelos hidráulicos unidimensional, bidimensional y tridimensional.

Fuente Vásquez (2003).

En los modelos bidimensionales (2D) la información es trabajada en un plano horizontal. Los valores de velocidad o cualquier otra variable de interés en un plano vertical son promediados y se consideran como valores puntuales.

Este tipo de modelos suelen ser utilizados en cuerpos de agua de gran extensión y poca profundidad, como lagos, estuarios, entre otros; a este tipo de elementos se les conoce como aguas someras o poco profundas.

Por lo general no es recomendable su uso en situaciones donde exista una variación vertical relativamente considerable; sin embargo, se pueden aplicar en este tipo de modelación a través del uso de expresiones empíricas u otras simplificaciones.

⁹ Clasificación según M. Ing. José Vásquez Ojeda, autor de la publicación “*Modelación numérica en hidráulica*”

Finalmente, los modelos tridimensionales (3D) sirven para simular el estado más avanzado del flujo, pues permite realizar los cálculos competentes a las tres componentes espaciales de la velocidad. Este tipo de modelos son aplicables a cualquier problema práctico debido a su alta complejidad (Vásquez, 2003).

3.3.2.2 Método de cálculo

Para lograr un mejor análisis del fluido se recurre a la división del mismo en pequeños elementos de tamaño finito, estos son más prácticos y las computadoras son capaces de manejarlas.

Para flujos sencillos en una sola dimensión, el proceso de discretización se realiza por niveles en las secciones transversales y el método de cálculo se da por etapas. En caso de existir problemas de convergencia en alguna de las secciones, se asume un valor de tirante crítico y se continúa con el proceso hasta finalizar. Por esta razón, se puede afirmar que para casos unidimensionales los programas son rápidos, y numéricamente confiables. Para flujos más complejos, tanto en 2D y 3D, es necesario resolver una serie de ecuaciones diferenciales, por lo que se requiere hacer uso de mallas para lograr un proceso de discretización más fino.

Los principales métodos de cálculo son el de diferencias finitas, de elementos finitos y de volúmenes finitos; todos estos métodos utilizan un conjunto finito de puntos discretos presentes en un dominio continuo para dar solución a las ecuaciones de dicho dominio. Cuando se consiguen los valores deseados en los puntos discretos, se puede hacer uso de la interpolación para hallar la solución en cualquier otro punto.

Estos métodos presentan gran facilidad para manejar datos de condiciones iniciales y de frontera complejas con bastante detalle y precisión en muchos problemas en los cuales no existen soluciones analíticas. Sin embargo, el requerimiento de una solución simultánea de todos los nodos del dominio en la mayoría de estos métodos, aumenta la carga de las computadoras por lo que el proceso se vuelve más lento.

Además de estas consideraciones, en este tipo de métodos también existe el riesgo de que se presenten problemas de convergencia numérica, lo que da a lugar a soluciones inexistentes o irreales, es por este motivo que el usuario o programador debe tener un buen criterio al momento de analizar las respuestas.

Los tres métodos mencionados anteriormente son buenos para distintos problemas y no existe un ordenamiento sobre cuál es mejor; por lo general, se utiliza el método de diferencias finitas para geometrías simples pues es más rápido y efectivo. En el caso de geometrías complejas que exigen mallas más completas es mejor el uso de los métodos de elementos finitos o volúmenes finitos (Vásquez, 2003).

3.3.2.3 Regímenes de flujo

Según el régimen de flujo se tienen programas de modelación capaces de modelar o no un determinado fluido. Los flujos subcríticos (Número de Froude < 1) son más sencillos y cualquier programa puede modelarlo con facilidad; en cambio los flujos supercríticos (Número de Froude > 1) presentan una mayor complejidad para muchos modelos numéricos debido a la formación de ondas de choque o saltos hidráulicos en las zonas de transición donde existe cambio en el tipo de flujo.

Este problema de formación de resaltos hidráulicos solamente ocurre en flujos supercríticos de tramos muy largos para canales revestidos, pues en el caso de los ríos, ocurre un proceso de erosión en el fondo que estabiliza dicha turbulencia a través de un escalonamiento

sucesivo conformado por pozas y rápidas, además de una alternancia de flujos entre subcrítico y supercrítico, este fenómeno es muy difícil de modelar con precisión con programas numéricos (Vásquez, 2003).

3.3.2.4 Variaciones en el tiempo

Cuando se considera el cambio o no de las variables del flujo en el tiempo se tienen los flujos permanentes y transitorios, respectivamente. En los flujos permanentes se asumen que las magnitudes hidráulicas de interés son constantes en el tiempo; la mayoría de modelos numéricos presentan esta opción por defecto.

Para flujos transitorios o impermanentes algunas magnitudes como la velocidad o el tirante puede variar en el tiempo, como en la mayoría de flujos turbulentos. Existen algunos programas que tienen la capacidad de modelar estos regímenes impermanentes y son útiles cuando se tiene interés en el estudio de transporte de sedimentos, procesos de erosión y sedimentación, entre otros. No obstante, existen problemas más complejos como los de flujos impermanentes muy bruscos originados por roturas de presa, estos necesitan de tratamientos especiales (Vásquez, 2003).

3.3.2.5 Contornos de cauce

En la modelación numérica se debe distinguir entre las expresiones hidráulicas relacionadas con las condiciones de contorno o de frontera del canal; se puede trabajar con un lecho rígido indeformable cuando se tratan de estructuras artificiales o de lechos móviles para cauces aluviales.

Para los ríos aluviales de lecho fino es necesario establecer las condiciones de lecho móvil y flujo impermanente para reproducir correctamente los cambios reales del fondo durante una modelación. El fenómeno de deformación de un cauce durante una avenida es muy complicado de representar a través de los modelos numéricos; sin embargo, existen algunos que permiten calcular la erosión y la sedimentación, ya sea local o general, aunque a menudo estos requieren ser calibrados con datos reales medidos en campo, lo cual los vuelve muy limitados (Vásquez, 2003).

3.4 Turbulencia

Taylor y Karman (1937), citado por Wilcox (1994), propusieron la siguiente definición de turbulencia: “La turbulencia es un movimiento irregular que por lo general se da tanto en fluidos gaseosos como líquidos y se produce por el paso de éste sobre superficies de frontera, o por el flujo de las capas del fluido a diferentes velocidades que se mueven unas encima de otras”.

La turbulencia es un fenómeno que se da en los flujos con naturaleza fluctuante y supuestamente aleatoria. Prácticamente todos los flujos de interés en la ingeniería práctica son turbulentos; los cuales surgen debido a números de Reynolds muy grandes. Un análisis cuidadoso de las soluciones a la ecuación de Navier-Stokes, muestra que la turbulencia se desarrolla como una inestabilidad del flujo laminar; el número de Reynolds establece los límites de este cambio de estabilidad, pues existe cierto valor crítico para el cual ocurre esta variación en la estructura del flujo de fluido.

Se sabe que el número de Reynolds es una representación de la magnitud relativa de los esfuerzos inerciales con respecto a los efectos viscosos. Por lo tanto, un flujo en el cual predominan los esfuerzos viscosos es considerado laminar, y la pérdida de esta laminaridad es conocida como turbulencia. Ésta aparece, por lo general, debido a que los flujos se vuelven

inestables bajo la presencia de perturbaciones, en especial si los esfuerzos inerciales predominan frente a los viscosos.

3.4.1 Características de la turbulencia

En los flujos turbulentos se puede apreciar un desplazamiento tridimensional e inestable del movimiento de sus partículas. Las distintas capas que conforman el fluido se cruzan y se mezclan de manera aparentemente aleatoria a través del tiempo. Por esta razón es que es difícil describir matemáticamente el comportamiento de un flujo turbulento.

En la naturaleza, la mayoría de flujos de aplicación ingenieril son de tipo turbulento. Y a pesar de que dichos flujos son fácilmente observables, no es fácil definir con exactitud y precisión el comportamiento de la turbulencia; ésta, al ser dependiente del tiempo requiere gran cantidad de información para describir correctamente el comportamiento de un flujo turbulento. No obstante, distintos autores coinciden en que éste presenta una serie de características predominantes, tales como:

3.4.1.1 Aleatoriedad

Este tipo de característica es la más apreciable en este tipo de flujos, las alteraciones de las distintas variables fluidodinámicas se manifiestan a diferentes escalas debido a su irregularidad.

En otras palabras, el movimiento es imposible de determinar con precisión en el tiempo y el espacio debido a la gran aleatoriedad que se presenta. A pesar de ser un fenómeno determinista, la impredecibilidad hace que muchas veces se consideren métodos estadísticos al momento de su análisis.

3.4.1.2 Tridimensionalidad

Algunas variables de los flujos turbulentos pueden ser trabajadas mediante promedios en el tiempo, lo que permite trabajarlos esencialmente en un ámbito bidimensional. Además, estos pueden tener un comportamiento aparentemente en dos dimensiones cuando se tienen grandes escalas. Sin embargo, cuando se disminuyen el tamaño de las escalas en este tipo de flujos, se puede apreciar que el movimiento característico tiene un comportamiento tridimensional.

Para un flujo real, las inestabilidades son el resultado de la interacción entre los términos inerciales no lineales de las ecuaciones de Navier-Stokes y los términos viscosos; esta interacción es muy compleja debido a su naturaleza rotacional, tridimensional y dependiente del tiempo.

3.4.1.3 Difusividad

Según esta característica, las fluctuaciones del movimiento turbulento amplifican los fenómenos de transporte de masa, momentum y energía de manera notable. La difusividad también genera una mezcla rápida de cualquier propiedad o sustancia del fluido.

3.4.2 Descripción física del fenómeno

Aunque con las teorías lineales se puede lograr un cierto grado de éxito en la predicción de la aparición de inestabilidades que conducen a la turbulencia; la no linealidad inherente de las ecuaciones de Navier-Stokes imposibilita una descripción analítica completa del proceso de transición real.

En principio, la ecuación tridimensional de Navier-Stokes, la cual depende del tiempo, contiene toda la física de un flujo turbulento dado. Esto es cierto ya que se deduce del hecho

de que la turbulencia es un fenómeno continuo. La turbulencia desarrollada puede describirse físicamente, según el Dr. Roberto Zenit Camacho, por las siguientes propiedades:

- **Naturaleza fluctuante:** Tanto la presión como la velocidad fluctúan alrededor de un valor medio. Dichas fluctuaciones son de naturaleza tridimensional.
- **Aparición de remolinos:** Las capas de fluido están acomodadas en estructuras coherentes llamadas remolinos o vórtices. Los vórtices tienen una amplia distribución de tamaños, que van desde la dimensión del flujo (tamaño del contenedor) hasta el tamaño en el cual se disipa el movimiento bajo la acción de la viscosidad (escala de Kolmogorov¹⁰). Esta característica se puede observar en la Figura 3.42:

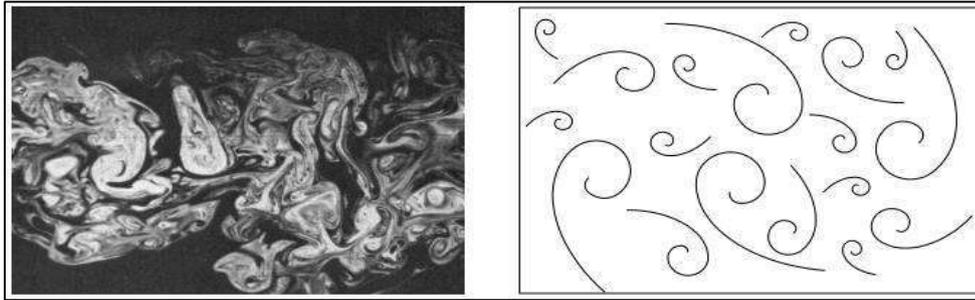


Figura 3.38 Aleatoriedad en la aparición de remolinos.

Fuente: Puentes (2007).

- **Mantenimiento autónomo:** Un flujo turbulento puede mantenerse turbulento a sí mismo. Los remolinos grandes generan remolinos pequeños.
- **Disipación:** Puesto que el flujo es autónomo, la ruptura sucesiva de vórtices a escalas más pequeñas, llevará eventualmente a la generación de vórtices del tamaño de la escala de Kolmogorov. Una vez alcanzado este tamaño, el movimiento se disipa por el efecto de la viscosidad. En otras palabras, un flujo turbulento decaerá progresivamente a menos que exista un mecanismo de entrada de energía.

3.4.3 Modelos de turbulencia

Las ecuaciones de Navier-Stokes y de Reynolds son el principal recurso al momento de estudiar los problemas relacionados con el comportamiento de flujos turbulentos, pues estos generan un sistema de ecuaciones de derivadas parciales al cual se le busca dar una solución a través de los métodos numéricos, y así encontrar una respuesta a los fenómenos estudiados.

Inicialmente eran pocos los programas que analizaban la mecánica de los fluidos, y estos presentaban herramientas que solamente se enfocaban en alguna característica en específico. Fue a mediados de la década del setenta, que se comenzó a utilizar de manera más eficiente algoritmos matemáticamente complejos que se utilizaban para resolver problemas más generales, a estos se les denominó Computational Fluid Dynamics (CFD) o Mecánica de Fluidos Computacional.

Las primeras herramientas de solución requerían computadoras de gran potencia y capacidad, además de un elevado conocimiento en la dinámica de fluidos, por lo que en un inicio el análisis computacional de fluidos estaba únicamente destinado a laboratorios de investigación. En la actualidad, el requerimiento de gran capacidad computacional se ve solventado gracias a la opción del trabajo en paralelo, lo cual divide el proceso de solución y la memoria requerida entre varios ordenadores.

¹⁰ La escala de Kolmogorov, es la escala más pequeña que puede existir sin que sea destruida por la viscosidad.

Además, el gran avance que ha habido en la última década en la potencia de los computadores, ha permitido que el proceso de modelación en CFD y sus respectivos análisis de resultados resulten menos trabajosos y más veloces. Es decir, ahora se cuentan con programas de solución más avanzados que cuentan con algoritmos capaces de estudiar el comportamiento de un flujo en un tiempo relativamente razonable.

La metodología CFD permite obtener grandes cantidad de información de los fenómenos físicos de los fluidos, incluso de manera más rápida y confiable que los obtenidos de manera experimental. Si se aplica de manera adecuada, esta metodología podría incluso fácilmente reemplazar a los modelos físicos. Esta metodología implementada, como ya se mencionó, se basa en la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes y promediado de Reynolds.

3.4.3.1 Ecuaciones de Navier-Stokes

Son un conjunto de ecuaciones de derivadas parciales no lineales utilizadas para describir el movimiento de un fluido. Estas rigen el comportamiento de cualquier fenómeno que presente fluidos del tipo newtoniano.

Dichas ecuaciones surgen al aplicar los principios de conservación de la mecánica y termodinámica a los fluidos, obteniéndose la conocida formulación integral de las ecuaciones. Para la resolución de problemas relacionados con la mecánica de fluidos es más conveniente utilizar la formulación diferencial, estas se obtienen considerando varios factores, entre ellos la linealidad entre los esfuerzos tangenciales y el gradiente de velocidad (Ley de viscosidad de Newton) y, la conservación de masa junto con la incompresibilidad. La combinación de estos principios da como resultado la siguiente ecuación:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[2\mu \left(D_{ij} - \frac{\Delta \delta_{ij}}{3} \right) \right] \quad (3.5)$$

Donde ρ representa la densidad, u_i para $(i = 1, 2, 3)$ son las componentes cartesianas de la velocidad, F_i las fuerzas externas aplicadas sobre el cuerpo, P es la presión del fluido y μ es la viscosidad dinámica. Además, Δ representa la divergencia del fluido y δ_{ij} es la delta de Kronecker.

Esta expresión, al aplicarse para cada uno de los componentes cartesianos genera un sistema de ecuaciones cuya característica de no linealidad supone la aparición de derivadas de segundo orden, dando como resultado que las ecuaciones de Navier-Stokes sean consideradas como de derivadas parciales no lineales, como ya se ha mencionado.

Al ser un conjunto de ecuaciones no lineales, no existe una única solución general para este conjunto de ecuaciones; solamente bajo ciertas condiciones o situaciones muy concretas se puede hallar una solución analítica. En muchas ocasiones es necesario recurrir a métodos numéricos para determinar una solución aproximada.

3.4.3.2 Experimento de Reynolds

En 1883, Osborne Reynolds fue de los primeros en identificar la transición de un flujo laminar a uno turbulento. El experimento que realizó consistía en la inyección de tinta en el flujo de un fluido que pasaba a través de una tubería.

Reynolds pudo observar cómo se daba esta transición simplemente variando de manera controlada los distintos parámetros involucrados en el proceso. Finalmente, llegó a la conclusión de que el tipo de flujo dependía de una variable adimensional conformada por la velocidad, la viscosidad, la densidad y el diámetro de la tubería o la longitud característica.

Valores por debajo de 2000 el flujo se comportaba de manera laminar, mientras que por encima de este valor el fluido se caracterizaba por breves alternancias entre laminaridad y turbulencia, llegando a la conclusión de que la transición no se da de manera abrupta sino de forma progresiva. A esta relación adimensional se le conoce hoy en día como el Número de Reynolds.

3.4.3.3 Ecuaciones promediadas de Reynolds

El sistema de ecuaciones RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) son ecuaciones promediadas en el tiempo del movimiento del flujo del fluido. La idea detrás de estas ecuaciones es la descomposición de Reynolds, en el que una cantidad instantánea se descompone en sus cantidades promediadas en el tiempo, una idea propuesta por primera vez por Osborne Reynolds.

Las ecuaciones RANS se utilizan principalmente para describir los flujos turbulentos. Estas ecuaciones se pueden utilizar con aproximaciones basadas en el conocimiento de las propiedades de la turbulencia del flujo, para dar en un tiempo promedio soluciones aproximadas a las ecuaciones de Navier-Stokes. Para un fluido newtoniano estacionario incompresible, estas ecuaciones pueden escribirse según la notación de Einstein como:

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (3.6)$$

El lado izquierdo de la ecuación representa el cambio medio de momentum del fluido debido a la inestabilidad en el flujo promedio y su convección. Este cambio se equilibra con la fuerza media del cuerpo, la tensión isotropa debido a la presión de campo promedio, los esfuerzos viscosos y el esfuerzo aparente ($-\rho \overline{u'_i u'_j}$) debido a la velocidad fluctuante de campo, generalmente referida al esfuerzo de Reynolds. Este término no lineal requiere modelado adicional para cerrar la ecuación RANS para su resolución, lo que ha generado la creación de muchos modelos de turbulencia diferentes.

3.4.3.4 Tipos de modelos de turbulencia para CFD

Existen distintos tipos de clasificar los modelos de turbulencia utilizados en mecánica de fluidos. Aquellos que están enfocados a propósitos generales de CFD deben ser invariables, es decir, independientes de cualquier sistema de coordenadas en particular.

De esta manera, los flujos turbulentos se pueden calcular o bien mediante la resolución de las ecuaciones RANS con modelos adecuados o calculando directamente las cantidades fluctuantes. Con esta consideración, se puede tener la siguiente clasificación¹¹:

Modelos RANS

- Modelos lineales de viscosidad de remolino (EVM)
 - El esfuerzo de turbulencia es proporcional a la deformación media.
 - Viscosidad de remolino basada en escalares de turbulencia (usualmente k y otra variable), determinada por la resolución de ecuaciones de transporte.
- Modelos no lineales de viscosidad de remolino (NLEVM)
 - El esfuerzo de turbulencia es una función no lineal de la deformación media y la vorticidad.

¹¹ Clasificación según Apsley D., "Advanced turbulence modelling"

- Los coeficientes dependen de escalares de turbulencia (usualmente k y otra variable), determinada por la resolución de ecuaciones de transporte.
- Modelos de esfuerzo diferencial (DSM)
 - Modelo de transporte de tensiones de Reynolds (RSTM) o cierre de segundo orden (SOC).
 - Resuelve ecuaciones de transporte para todos los flujos turbulentos.

Modelos de cálculo de cantidades fluctuantes

- Simulación de grandes viscosidades (LES)
 - Calcula en el tiempo las variaciones de fluctuación.
- Simulación numérica directa (DNS)
 - No modela, resuelve las escalas más pequeñas del flujo.

Para el caso de fluidos multifásicos, la metodología de dinámica de fluidos computacional se puede agrupar en dos tipos generales¹²: el modelo Euleriano y el modelo de transporte de partículas de Lagrange. El modelo Euleriano multifásico consta de dos sub-modelos: el modelo homogéneo y el modelo de transferencia interfluido o modelo inhomogéneo. En este tipo de modelo, cada fluido tiene su propio campo e interactúan en la interfase a través de términos de transferencia, existiendo de esta forma un campo de solución para cada fase.

Modelo de turbulencia k-Épsilon

El modelo de turbulencia k-epsilon es el modelo más común en dinámica de fluidos computacional para simular las características medias del flujo para condiciones de flujo turbulento. Es un modelo de dos ecuaciones el cual da una descripción general de la turbulencia por medio de dos ecuaciones de transporte (PDEs¹³). El objetivo inicial del modelo k-epsilon era mejorar el modelo de longitud de mezcla, así como encontrar una alternativa para prescribir algebraicamente escalas de longitud de turbulencia, de moderada a alta complejidad de flujo.

La primera variable de transporte determina la energía en la turbulencia y es llamada energía cinética de turbulencia (k). La segunda es la disipación de turbulencia (ϵ) la cual determina la tasa de disipación de la energía cinética de turbulencia.

A diferencia de los modelos de turbulencia más antiguos, el modelo k- ϵ se enfoca en los mecanismos que afectan la energía cinética turbulenta. El modelo de longitud de mezcla carece de este tipo de generalidad. La suposición subyacente de este modelo es que la viscosidad turbulenta es isotrópica, es decir, la relación entre el esfuerzo de Reynolds y la media de la tasa de deformaciones es la misma en todas las direcciones.

Aplicaciones

El modelo k- ϵ ha sido diseñado especialmente para capas planas de corte y flujos de recirculación. Este modelo de turbulencia es el más utilizado y validado con aplicaciones que van desde los flujos industriales hasta los ambientales, en los cuales es más popular. Por lo general es útil para la capa libre de corte que fluye con gradientes de presión relativamente pequeños, así como en flujos confinados donde las tensiones tangenciales de Reynolds son

¹² Clasificación según Luis Castillo y José Carrillo. “*Simulación numérica y validación de las acciones hidrodinámicas en cuencos de disipación de energía*”. Universidad Politécnica de Cartagena.

¹³ *Partial Differential Equations*

más importantes. También se puede afirmar que es el modelo de turbulencia más simple, el cual solo necesita ser suministrado con condiciones iniciales y/o condiciones de borde.

Sin embargo, es más costoso en términos de memoria que el modelo de longitud de mezcla, ya que requiere dos ecuaciones de transporte (PDEs) adicionales. Además, trabaja de forma ineficiente en casos importantes, tales como en flujos no confinados, capas límites curvas, flujos de rotación y flujos en conductos no circulares.

Modelo de turbulencia estándar k- ϵ

Las ecuaciones exactas k- ϵ contiene muchos términos desconocidos y no medibles. Para un enfoque mucho más práctico, Launder y Spalding (1972), citados por Wilcox (1994), utilizan el modelo de turbulencia k- ϵ estándar para comprender mejor los procesos involucrados, minimizando así la cantidad de incógnitas y la presentación de un conjunto de ecuaciones que pueden utilizarse en un gran número de aplicaciones de turbulencia.

Para la energía cinética de turbulencia k:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2u_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \quad (3.7)$$

Para la disipación ϵ :

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2u_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.8)$$

En otras palabras, tanto para la variable k como para ϵ , la expresión de la ecuaciones 3.7 y 3.8 expresan que: “El ratio de cambio más el transporte por convección equivalen al transporte por difusión más el ratio de producción menos el ratio de destrucción”.

Donde:

u_i Representa el componente de la velocidad en la dirección correspondiente.

E_{ij} Representa el componente de la tasa de deformación.

u_t Es la viscosidad de remolino y es equivalente a:

$$u_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.9)$$

La ecuación también consiste en ajustar algunas variables como σ_k , σ_ϵ , $C_{1\epsilon}$ y $C_{2\epsilon}$. Los valores de estas constantes se han conseguido por numerosas iteraciones de datos apropiados para una amplia gama de flujos turbulentos. Estos son los siguientes:

$$C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.00, \quad \sigma_\epsilon = 1.30, \quad C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92 \quad (3.10)$$

Modelo k-omega

Es uno de los modelos de turbulencia de dos ecuaciones mayormente utilizados. Éste incluye dos ecuaciones adicionales para representar las propiedades de turbulencia del flujo; esto

permite contar con un historial de los efectos causados por la convección y difusión de la energía turbulenta.

La primera variable de transporte es la energía cinética de turbulencia (k) y la segunda es la disipación específica (ω). Estas variables determinan la energía y la escala en la turbulencia, respectivamente (Wilcox, 1994).

Modelo de Kolmogorov

Kolmogorov (1942), citado por Wilcox (1994), fue el primero en proponer un modelo de dos ecuaciones. Él eligió la energía cinética de la turbulencia (k) como uno de sus parámetros, el segundo fue la disipación por unidad de turbulencia de energía cinética (ω). En su modelo k - ω , ω satisface una ecuación diferencial similar a la ecuación para k .

El desarrollo del modelo de Kolmogorov (1942) es bastante breve y ni siquiera presentaba valores establecidos de todos los coeficientes de cierre. Además, dado al pequeño desarrollo formal de las ecuaciones y al hecho de que nunca hizo referencias exactas en ninguna de sus ecuaciones, parece poco probable que haya intentado relacionar la ecuación de k o cualquiera de las ecuaciones de Navier-Stokes término por término. Más bien, dado que Kolmogorov era un gran creyente del análisis dimensional, se cree que se valió de este mecanismo para encontrar expresiones a las correspondientes variables de su modelo de dos ecuaciones.

Desde que apareció k en un postulado de relación constitutiva (ecuación 3.11) era observable la proporcionalidad entre la viscosidad cinemática y la energía cinética de turbulencia ($\nu_t \propto k$).

$$\tau_{ij} = 2\mu D_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \quad (3.11)$$

Las dimensiones que presenta la viscosidad cinemática (ν_t) son L^2/T y la de la energía cinética de turbulencia (k), L^2/T^2 ; además, la disipación de turbulencia (ϵ) presenta dimensiones de L^2/T^3 . Las relaciones entre estas variables, como ν_t/k y ϵ/k , presentaban dimensiones de T y $1/T$, respectivamente. Esto permitía relacionar las ecuaciones 3.11 y 3.12 simplemente introduciendo cualquiera de estas dos variables en dichas ecuaciones.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_T/\sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.12)$$

El siguiente paso fue postular una ecuación para ω . Para lograrlo, el camino que tomó Kolmogorov fue reconocer que existe una pequeña cantidad de procesos físicos comúnmente observables en el movimiento de un fluido.

Los procesos más comunes son la inestabilidad, convección (a menudo referida como advección), difusión, disipación, dispersión y producción. Al aplicar la combinación del razonamiento físico con el análisis dimensional, Kolmogorov llega a la siguiente expresión para ω :

En la notación utilizada en esta ecuación aparecen dos términos nuevos, β y σ . Dicha ecuación presenta algunas características particularmente notables. En primer lugar, no hay un término de producción análogo a las ecuaciones de turbulencia de k ; la ausencia de un término de producción es consistente con la noción de Kolmogorov ya que ω está asociada con las escalas más pequeñas de turbulencia, y así no tiene interacción directa con el

movimiento en general. Se debe tener en cuenta que esta lógica utilizada en el tema de escalas es errónea, los remolinos portadores de energía son los encargados de determinar las escalas de tiempo más apropiadas para la turbulencia y su disipación.

En segundo lugar, se puede observar que la ecuación está expresada en términos de ω en lugar de ω^2 . Por último, se aprecia que no hay un término de difusión molecular, por lo que la ecuación se aplica estrictamente a flujos que presenten un número de Reynolds bastante grande, y ésta no puede integrarse a través de la capa viscosa tal como está (Wilcox, 1994).

Modelo de Wilcox

En esfuerzos de desarrollo posteriores, la interpretación del comportamiento de ω ha sido muy variada. Saffman (1970), citado por Wilcox (1994), la describió como “una característica de frecuencia del proceso de descomposición continua bajo su autointeracción”. Además, añadió que “la idea aproximada es que ω^2 es la vorticidad cuadrada media de la ‘energía contenida en los remolinos’ y k es la energía cinética del movimiento inducido por dicha vorticidad”.

En 1972, Spalding, Wilcox y Alber identificaron a ω como la raíz media cuadrada de las fluctuaciones de vorticidad, que también se conoce como enstrofía¹⁴. En la década del ochenta, Wilcox, Rubesin y Speziale relacionaron a ω como la relación entre ε y k , es decir, la relación de disipación de turbulencia por unidad de energía cinética.

La forma de la ecuación de ω ha cambiado en las últimas cinco décadas en el modelo $k-\omega$; se ha añadido un término de producción en todos los modelos posteriores al de Kolmogorov. Al igual que él, Wilcox (1994) y Speziale (1990) también escribieron las ecuaciones de disipación por unidad de turbulencia de energía cinética en términos de ω ; siendo el primero de estos dos uno de los modelos k -omega más conocidos hoy en día (Wilcox, 1994).

Las ecuaciones 3.13 – 3.17 pertenecen al modelo k -omega propuesto por Wilcox:

Viscosidad de remolino:

$$\mu_T = \rho k / \omega \quad (3.13)$$

Energía cinética de turbulencia:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.14)$$

Ratio de disipación específica:

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (3.15)$$

Coefficientes de cierre:

¹⁴ Del inglés *enstrophy*, en dinámica de fluidos puede ser interpretada como una densidad potencial o, más concretamente, como la cantidad directamente relacionada a la energía cinética en los modelos de flujo correspondientes a los efectos de disipación en el fluido.

$$\alpha = 5/9, \quad \beta = 3/40, \quad \beta^* = 9/100, \quad \sigma = 1/2, \quad \sigma^* = 1/2 \quad (3.16)$$

Relaciones auxiliares:

$$\epsilon = \beta^* \omega k \quad (3.17)$$

3.5 Programas para el análisis de CFD

3.5.1 CFX

El software ANSYS-CFX es un programa de alto rendimiento y de estudio general de la dinámica de fluidos que ha sido aplicado para resolver un amplio rango de problemas de flujo de fluidos por más de 20 años. La esencia del ANSYS-CFX es su avanzada tecnología de solución, la cual es clave para lograr soluciones fiables y precisas de manera rápida. El solucionador, moderno y altamente paralelizado, es la base para una amplia cantidad de modelos físicos para capturar prácticamente cualquier tipo de fenómeno relacionado con los fluidos y su flujo.

El solucionador y sus muchos modelos físicos están envueltos en un entorno gráfico moderno, intuitivo y flexible, con amplias capacidades de personalización y automatización usando archivos de sesión, secuencias de comandos y un lenguaje de expresión de gran alcance.

Sin embargo, ANSYS-CFX es más que un poderoso código de CFD. La integración del ANSYS DesignModeler y ANSYS Meshing a la plataforma de trabajo permiten una gran facilidad de modificación de la geometría a gran alcance, incluyendo conexiones bidireccionales superiores a la de los sistemas CAD (ANSYS, 2015).

3.5.2 SSIIM

SSIIM (*Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option*), es un programa desarrollado por la Universidad de Trondheim en Noruega para usarse en Ingeniería Hidráulica, de Ríos, de Sedimentación, y Ambiental. (Vásquez, 2003)

El programa resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes en una malla no ortogonal de tres dimensiones utilizando el modelo de turbulencia k- ϵ y, el método simple para calcular la presión. Además, soluciona ecuaciones de convección y difusión para calcular el transporte de sedimentos y de varios componentes de calidad de agua, incluyendo contaminantes, sedimentos, temperatura, algas y nutrientes.

Los cambios dependientes del tiempo en la capa de fondo y en la superficie del agua también pueden ser calculados, gracias a que el programa se basa en el método de volúmenes finitos y trabaja con un mallado tridimensional. En la figura 3.43 se puede observar una de las aplicaciones para este programa.

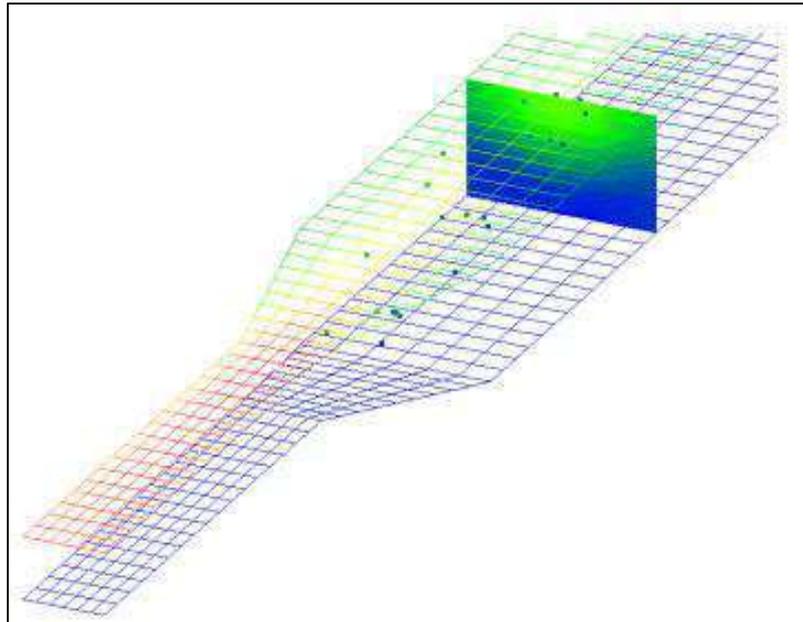


Figura 3.39 Resultados de un modelo numérico 3D de un desarenador usando SSIIM.

Fuente Universidad de Piura (2003).

3.5.3 FLUENT

El *software* ANSYS FLUENT contiene amplias características para modelar flujos, turbulencias, transferencias de calor y reacciones para aplicaciones industriales.

Hoy en día, cientos de empresas de todo el mundo se benefician del uso del software ANSYS FLUENT en la parte integral del diseño y en las fases de optimización del desarrollo de su producto. La avanzada tecnología de los solucionadores ofrece resultados CFD rápidos y precisos, mallas flexibles en movimiento y deformables, y una escalabilidad en paralelo de primera clase. Las funciones definidas por el usuario permiten la implementación de nuevos modelos y una amplia personalización de los existentes.

Las características interactivas de ajuste, solución y post-procesado del solucionador del ANSYS FLUENT facilitan el pausado durante el cálculo para examinar los resultados, realizar cambios o ajustes, y después retomar el cálculo utilizando la misma aplicación (ANSYS, 2015).

3.5.4 FLOW-3D

Flow-3D es un paquete de alta precisión en modelos multifísicos de dinámica de fluidos computacional que ha sido distribuido mundialmente desde 1985. Este programa proporciona información valiosa sobre muchos procesos físicos del flujo, incluyendo soluciones acopladas a la transferencia de energía térmica, interacción fluido-sólido con seis grados de libertad y, análisis de esfuerzos térmicos y mecánicos. Estas capacidades, combinadas con TruVOF, un algoritmo avanzado para el seguimiento de flujos de superficie libre, hacen a Flow-3D un software de simulación ideal para usar en investigación, en fases de diseño y en la mejora de procesos de producción.

Este programa no necesita módulos adicionales tanto en la configuración de la simulación como en el post-procesamiento; además, su mallado es muy avanzado y fácil de realizar.

3.5.5 HEC-RAS

HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center-River Analysis System*), es un sistema de análisis de ríos a través de un modelo numérico para flujo unidimensional impermanente, sin transporte de sedimentos y con capacidad para trabajar con flujos mixtos, subcríticos y supercríticos.

Debido a su simplicidad, se puede calcular la erosión local en pilares de puentes y modelar estructuras fluviales como diques, puentes, alcantarillas y barrajes. Sin embargo, su principal limitación radica en asumir lecho rígido y flujo unidireccional, por lo que debe ser aplicado con cuidado en ríos aluviales muy erosionables o muy meandriformes; en estos casos puede ser recomendable recurrir a otro tipo de modelo más sofisticado. (Vásquez, 2003)

3.5.6 FESWSW-2DH

FESWMS-2DH (*Finite Element Surface-Water Modeling System*) es un conjunto modular de programas de computación que permite simular flujos de profundidad integrada y superficies de agua en dos dimensiones. Estos programas han sido desarrollados para analizar el comportamiento del flujo en el cruce de puentes donde las condiciones hidráulicas existentes son complicadas; aunque también pueden ser aplicados a muchos tipos de problemas de flujo estacionario e inestable. Ríos poco profundos, llanuras de inundación, estuarios y mares costeros son algunos ejemplos de cuerpos de aguas superficiales en el cual el flujo puede ser trabajado esencialmente en dos dimensiones en un plano horizontal. En la Figura 3.40 se puede observar una de las aplicaciones para este programa.

Este modelo ha sido desarrollado por el FHWA y trabaja con un método de elementos finitos de flujos bidimensionales; se utiliza mayormente para la modelación de condiciones hidráulicas complejas de estructuras donde los cálculos unidimensionales no proporcionan suficiente nivel de detalle para los objetivos de estudio (Vásquez, 2003).

3.5.7 RIVER-2D

RIVER-2D, un modelo hidrodinámico bidimensional promediado en profundidad mediante elementos finitos desarrollado por la Universidad de Alberta en Canadá (Steffler, 2002). Posee características únicas como su capacidad de trabajar con flujo transcrito; es decir subcrítico y supercrítico. Algoritmos especiales de agua subterránea permiten una transición gradual entre agua superficial y subterránea en los bordes del río, que evitan quiebres bruscos en las fronteras.

Emplea el método de elementos finitos de Petrov-Galerkin que es numéricamente mucho más estable que el empleado por otros modelos. Se están realizando investigaciones para mejorar River2D e incorporar capacidades para transporte de sedimentos y eventualmente modelación morfológica de ríos, como la migración de meandros. (Vásquez, 2003)

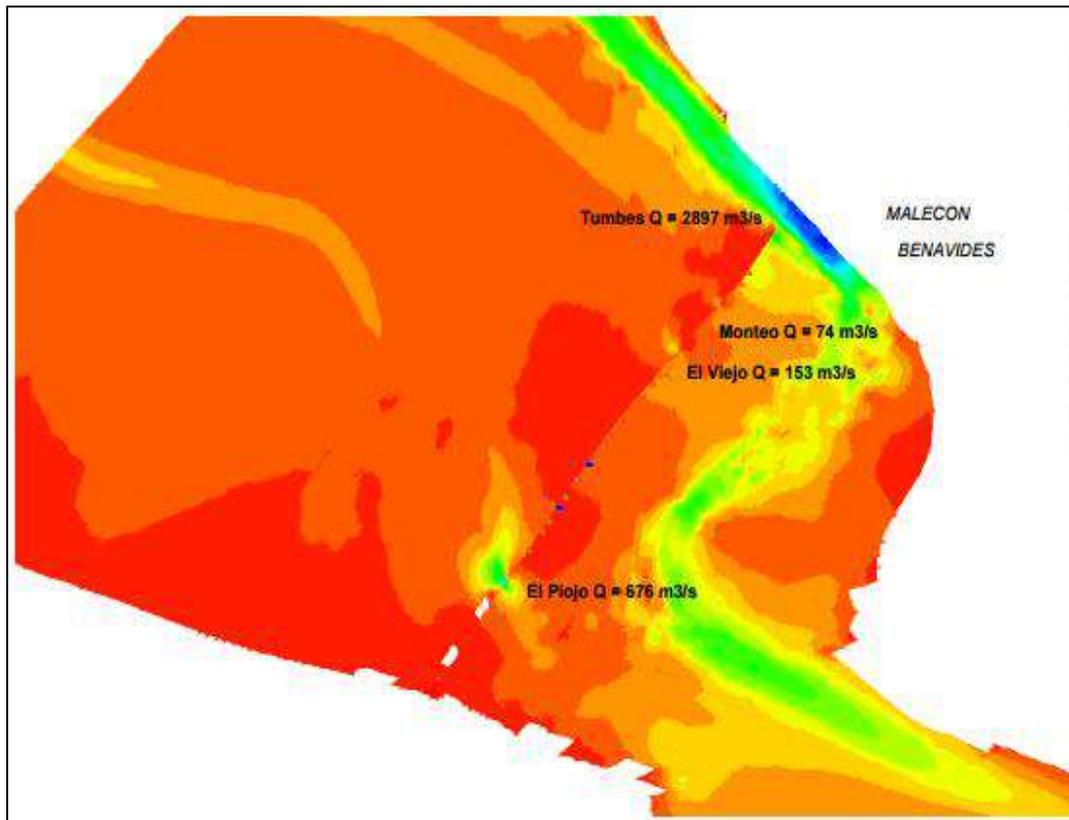


Figura 3.40 Velocidades en el río Tumbes calculados con FESWMS.

Fuente Universidad de Piura (2003).

3.6 Programa escogido: ANSYS-CFX

3.6.1 Características

ANSYS-CFX contiene una amplia gama de modelos y tecnología avanzada, con la cual seremos capaces de predecir, con seguridad, el impacto del comportamiento de los fluidos. Entre las principales características de este programa tenemos las siguientes:

3.6.1.1 Modelado de turbulencia

La gran mayoría de flujos industriales son turbulentos, por ello, el programa ANSYS-CFX siempre ha tenido énfasis en buscar modelos de turbulencia capaces de representar con precisión y eficiencia su comportamiento.

Para modelos de turbulencia estadísticos, ANSYS-CFX presenta un gran número de modelos de dos ecuaciones y de esfuerzo de Reynolds. Sin embargo, presta especial atención en el modelo de turbulencia de esfuerzo cortante de transporte (SST¹⁵) ya que ofrece ventajas significativas para flujos no equilibrados de capa límite turbulenta y predicciones en la transferencia de calor.

ANSYS-CFX también presenta capacidades de innovación en el ámbito de la modelación de la transición de flujo laminar a turbulento; mediante el uso del CFD se predice la ubicación exacta donde ocurre este cambio, esto es fundamental para mejorar la eficiencia y la vida útil de distintos equipos.

¹⁵ *Shear Stress Transport*

Adicionalmente, este programa ofrece una serie de modelos de turbulencia de resolución a escala como los de simulación de separación de remolinos (LES y DES).

3.6.1.2 Flujos multifásicos

Muchas aplicaciones en CFD requieren el uso de flujos de múltiples fases, ANSYS-CFX presenta grandes avances de tecnología en lo que respecta al modelado multifásico. Sus variadas características permiten capturar la interacción entre distintas fases fluidas, como gases y líquidos.

Además, la opción de flujo de superficie libre que presenta este programa, permite realizar simulaciones de flujos en canales abiertos, flujos alrededor de estructuras, llenados de tanques y muchas otras situaciones.

El modelo de transporte de partículas lagrangiano ofrece la posibilidad de simular fases dispersas discretamente distribuidas en una fase continua. En cambio, en los modelos multifásicos eulerianos se cuenta con una gran cantidad de opciones para capturar el intercambio de masa, momentum y energía.

3.6.1.3 Interacción fluido-estructura

El efecto del flujo del fluido sobre el movimiento del sólido puede ser modelado mediante una herramienta externa al ANSYS-CFX conocida como ANSYS soluciones de mecánica estructural. Ésta permite utilizar un entorno de usuario unificado para configurar con simplicidad la interacción entre el fluido y la estructura.

3.6.2 Capacidades y limitaciones

Como se ya se ha mencionado anteriormente, ANSYS-CFX es un programa de gran rendimiento que ha permitido estudiar de manera general el comportamiento y la dinámica de los fluidos por mucho tiempo. Gracias a su avanzada tecnología, este programa permite obtener, de manera rápida y precisa, soluciones de una gran cantidad de fenómenos relacionados con los fluidos y su flujo.

En ANSYS-CFX se pueden realizar las simulaciones del comportamiento del flujo del fluido y su interacción con varias estructuras hidráulicas tales como reservorios, tanques, presas, canales, aliviaderos, entre otros. Su entorno gráfico, moderno y flexible, ofrece amplias capacidades de personalización y automatización que facilitan el procesamiento.

Sin embargo, debido a la gran cantidad de facilidades que ofrece el programa para obtener soluciones precisas y exactas, el tiempo de trabajo del solucionador y el procesador puede llegar a ser muy elevado; es decir, el programa necesitará mayores requerimientos de memoria, tiempo y capacidad a medida que sea mayor la exactitud que se busque en las soluciones deseadas.

Esto se amplifica cuando se realizan simulaciones numéricas de flujos en tres dimensiones, pues en estos casos, se debe considerar la gran cantidad de elementos generados para realizar el análisis y la aparición de fenómenos que no existen en simulaciones bidimensionales o unidimensionales

Capítulo 4

Simulación numérica de la bocatoma Quiroz

4.1 Simulación del diseño original de la bocatoma

En el presente capítulo se lleva a cabo la modelación numérica tridimensional del comportamiento hidráulico de la bocatoma de la central hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz. Para desarrollar esta simulación se ha usado uso del programa ANSYS-CFX, el cual permite realizar análisis de dinámica de fluidos computacional.

Mediante el uso de este programa se busca obtener los valores de velocidad de flujo y esfuerzo de corte que produjeron la erosión en la bocatoma como resultado de la interacción entre el fluido y la estructura.

El proceso de simulación consta de varias etapas que van desde el pre-procesamiento hasta el post-procesamiento e incluyen la generación de la geometría y malla estructural, el ingreso y análisis de datos, y finalmente, la interpretación de los resultados.

4.1.1 Generación de la geometría de la bocatoma

Para poder realizar este paso es necesario tener los datos de la geometría de las estructuras de la CHMAQ correctamente digitalizados; sin embargo, por su relativa antigüedad, solamente se tiene a disposición los planos físicos según lo construido.

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, estos planos fueron realizados en el 2001 por la empresa Cesar Wiese y Cia S.R. Ltda., encargada de la construcción de las obras civiles para el mejoramiento de la CHMAQ.

Entre estos se tiene información según lo construido de:

- Planos topográficos
- Bocal estructura de entrada
- Represa obermeyer y canal de limpia
- Conducto de acero
- Desgravador

- Desarenador
- Grupos Varios

4.1.1.1 Digitalización de planos

A través del programa AutoCAD se procede a realizar una versión digital de los planos más importantes mencionados anteriormente para facilitar su uso durante su aplicación en el programa ANSYS-CFX.

Desde la Figura 4.45 hasta la Figura 4.50 se muestra la versión digital de algunos planos, debidamente acotados, que servirán para la generación de la geometría de la bocatoma en el programa ANSYS-CFX.

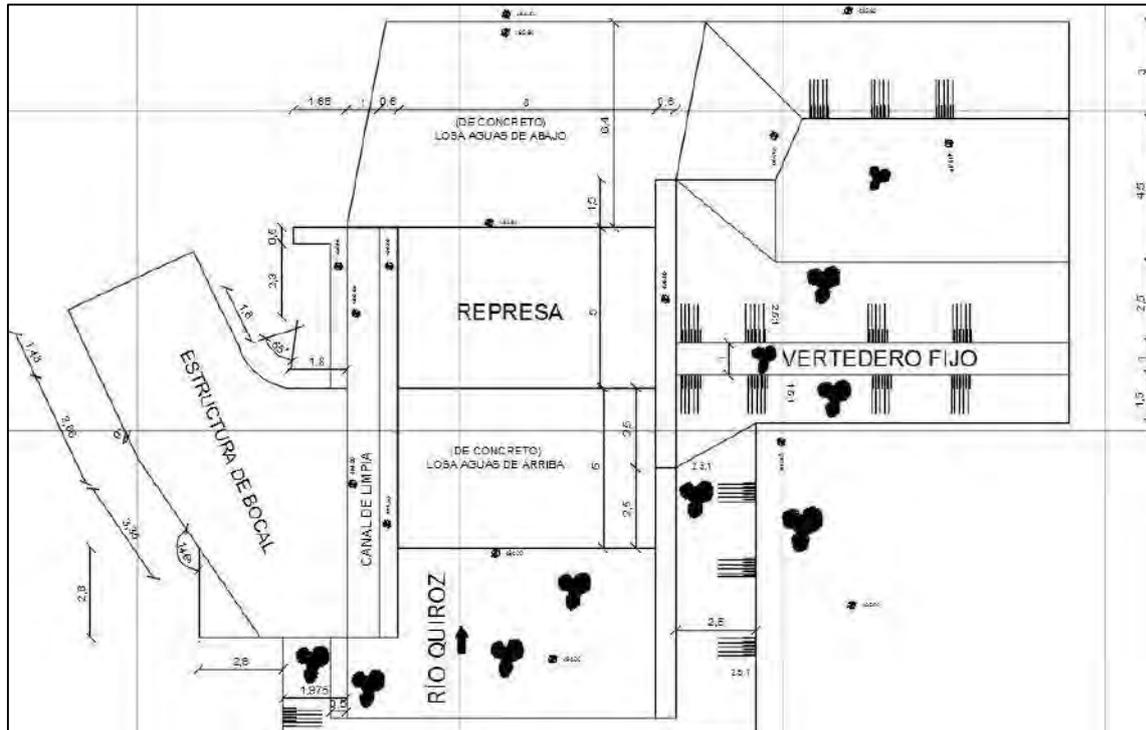


Figura 4.45 Vista en planta de la represa obermeyer y vertedero fijo. (Versión digital)

Fuente: Elaboración propia (2015).

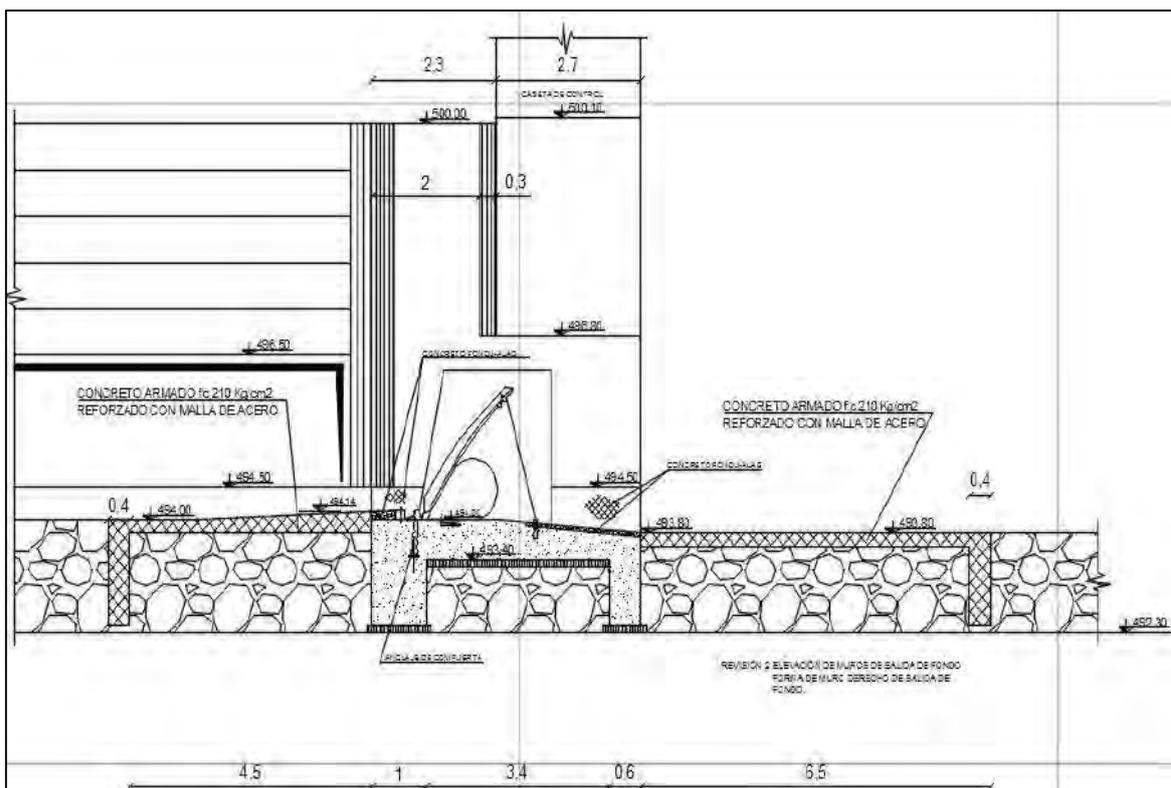


Figura 4.49 Vista de elevación longitudinal de la represa obermeyer. (Versión digital)

Fuente: Elaboración propia (2015).

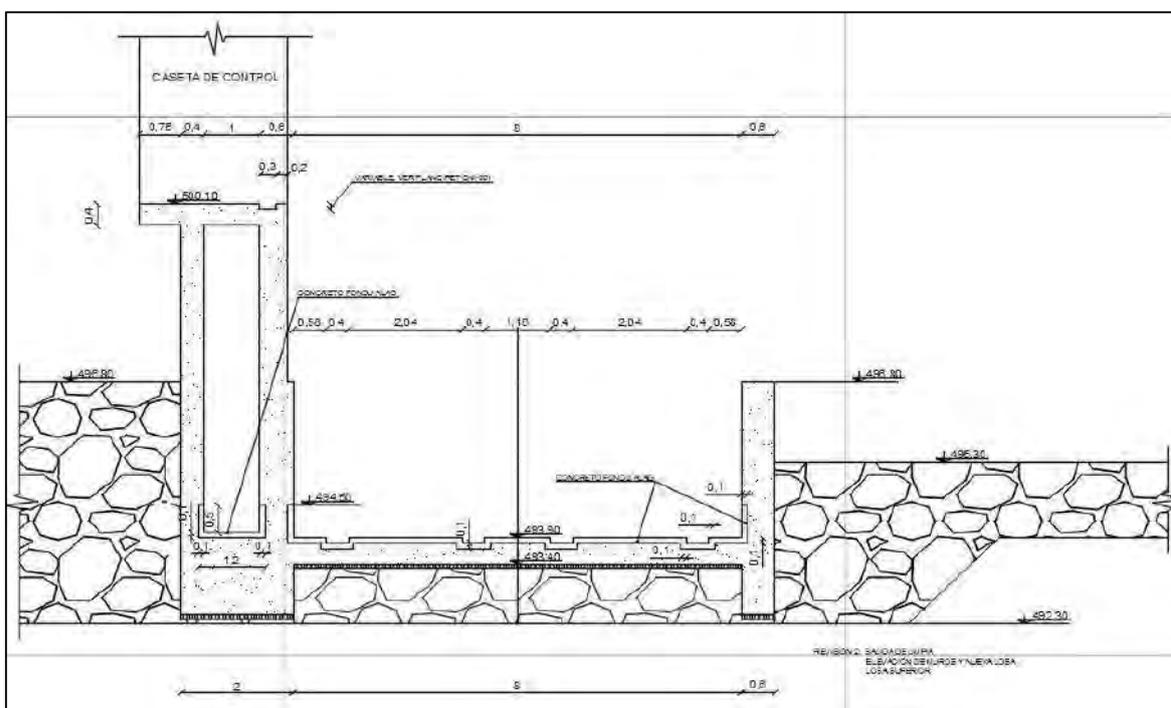


Figura 4.50 Vista de elevación transversal de la represa obermeyer y canal de limpia. (Versión digital)

Fuente: Elaboración propia (2015).

4.1.1.2 Creación del espacio de trabajo

Para proceder con la generación de la geometría de las estructuras de la CHMAQ se utilizó el subprograma llamado DesignModeler.

Ésta es una herramienta que permite trabajar hasta en tres dimensiones con gran facilidad. Presenta dos espacios de trabajo principales claramente definidos, el *sketching* y el *modeling*; el primero de ellos es el lugar donde se realizan los *sketches*, los cuales son las bases o representaciones planas de los cuerpos geométricos a los cuales se les aplicarán las transformaciones que se llevarán a cabo en el segundo espacio mencionado.

En la Figura 4.51 se puede observar el primer espacio de trabajo o sketching, el cual presenta tres zonas distinguidas: la caja de herramientas (*sketching toolbox*), lugar donde están todos los elementos necesarios para generar los sketches; la vista de detalles (*details view*), zona que muestra todas las características del sketch creado; y el gráfico (*graphics*), que es el espacio donde se realizan los sketches. En esta misma figura, para una mejor representación de los espacios mencionados, se ha generado un hexágono regular de 10 m de lado.

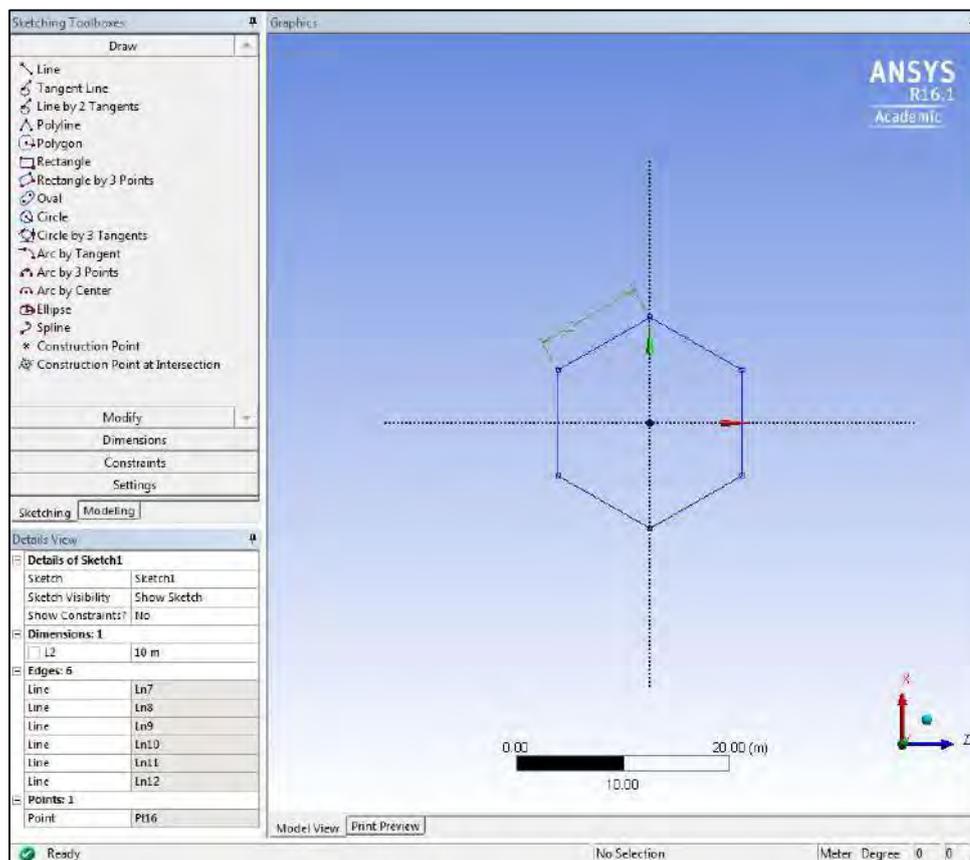


Figura 4.51 Distribución del área de trabajo del sketching.

Fuente: Elaboración propia (2015).

El modeling, al igual que el sketching, está dividido en tres zonas: el esquema (*tree outline*), lugar donde se muestran todos los planos y cuerpos generados a partir de los sketches; la vista de detalles y el gráfico, las cuales tienen las mismas características que las mencionadas en el párrafo anterior.

En la Figura 4.52 se muestra una de las diferentes opciones de modelado que ofrece esta herramienta, la extrusión; con ella se ha generado un cuerpo sólido a partir del hexágono

creado anteriormente. Ésta es una de las herramientas que más se ha utilizado para la creación de la geometría de las estructuras de la CHMAQ.

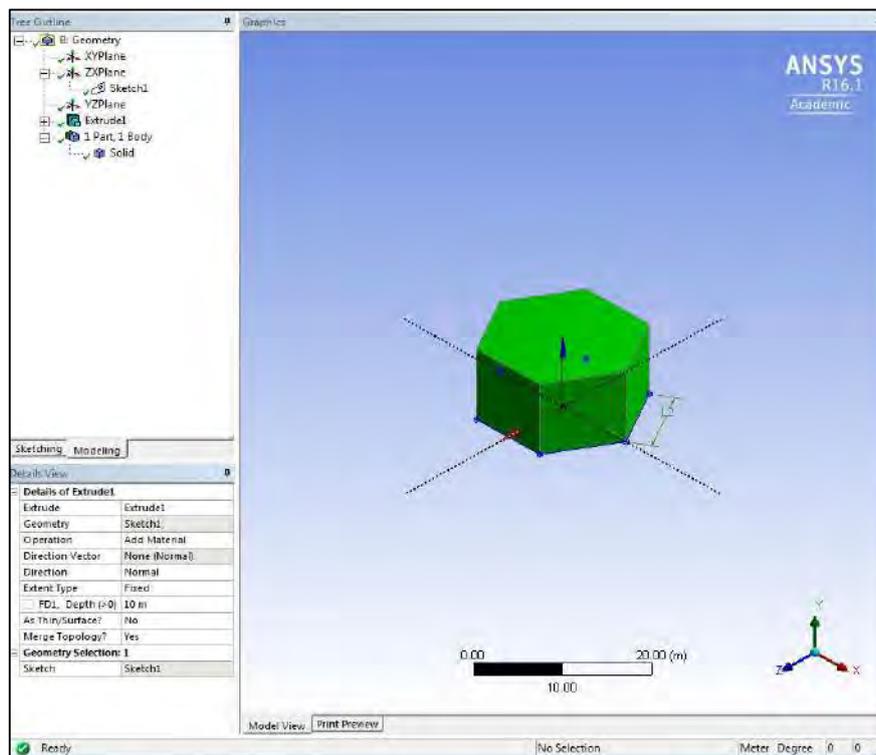


Figura 4.52 Distribución del área de trabajo del modeling.

Fuente: Elaboración propia (2015).

El espacio de trabajo considerado inicialmente constaba de una base de 93 x 56 m sobre las cuales se ubicarían todas las estructuras de la CHMAQ, posteriormente estas serían utilizadas para la creación del cuerpo del fluido. Por motivos de simplificación, y para lograr una reducción del tiempo de análisis y el número de elementos generados, la base cambiará sus dimensiones a un tamaño de 51 x 49 m.

En la Figura 4.53 se puede apreciar, la primera base diseñada con todos los distintos sketches generados a partir de los datos observados en los planos digitalizados.

Con los distintos sketches generados, se procedió a utilizar las herramientas de modelado para generar la geometría tridimensional de las estructuras; entre las más destacadas están: la extrusión (extrude) y el rebanado o corte (slice).

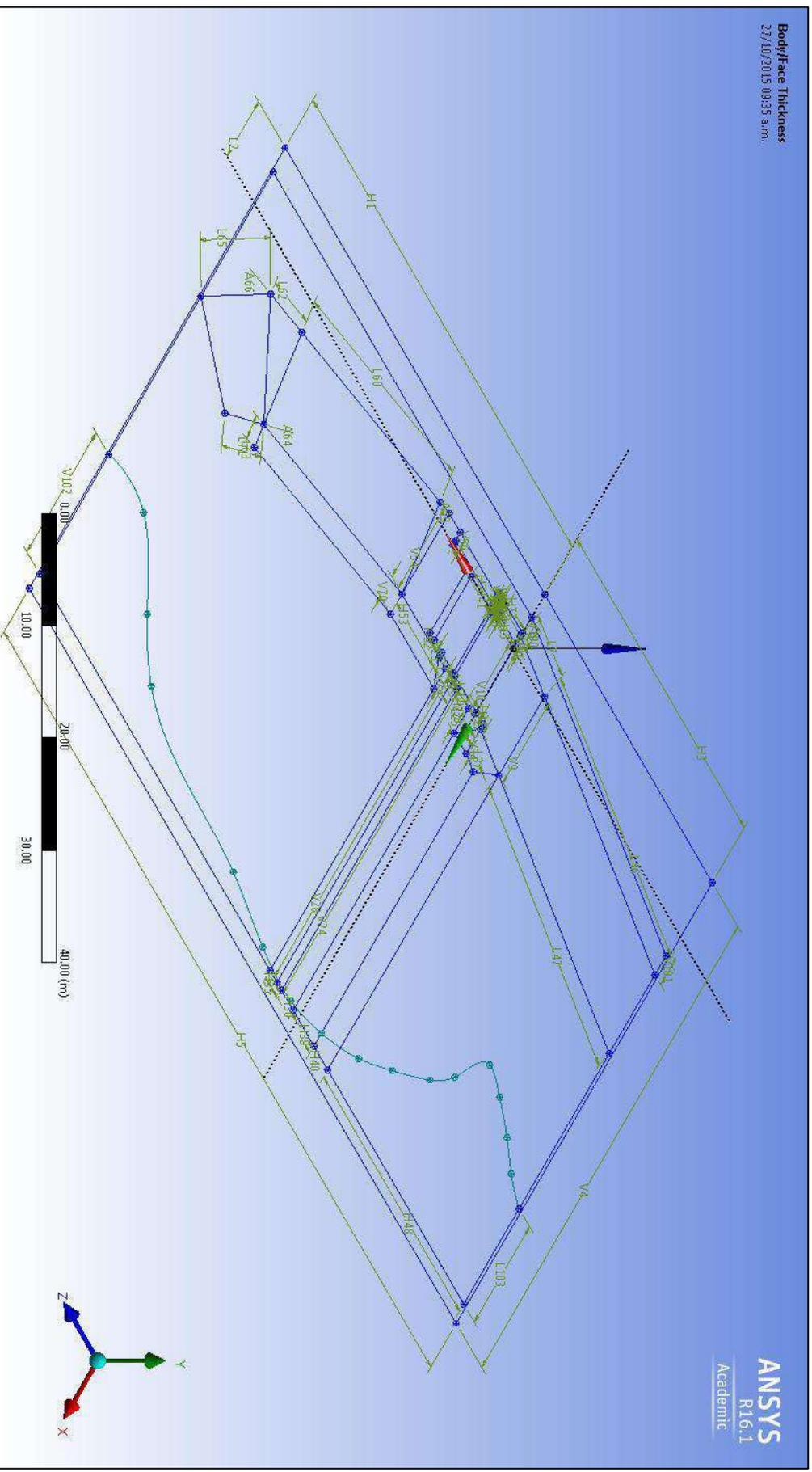


Figura 4.53 Distribución de sketches de las estructuras de la CHMAQ.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Condición de compuertas abiertas

La geometría generada se observa en la Figura 4.54, Figura 4.55 y Figura 4.56.

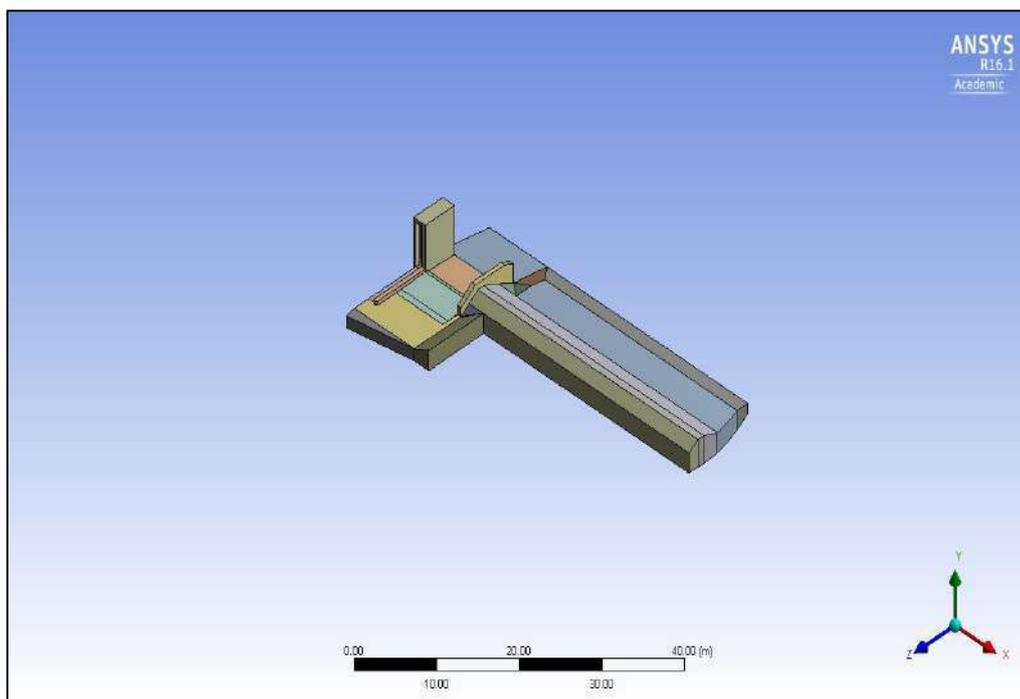


Figura 4.54 Geometría de la represa obermeyer y vertedero fijo. Compuertas abiertas.

Fuente: Elaboración propia (2015).

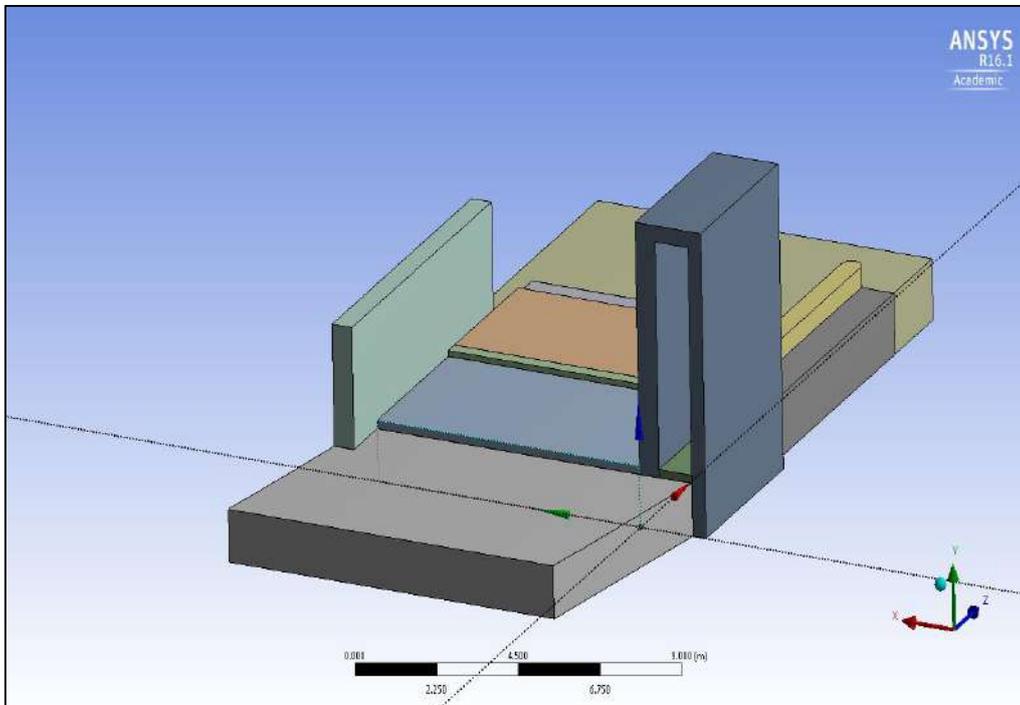


Figura 4.55 Geometría de la represa obermeyer y canal de limpieza. Compuertas abiertas.

Fuente: Elaboración propia (2015).

En esta geometría no se ha representado las compuertas ya que al estar abiertas, es decir, en posición horizontal, se considera como si se tratase de un canal totalmente abierto.

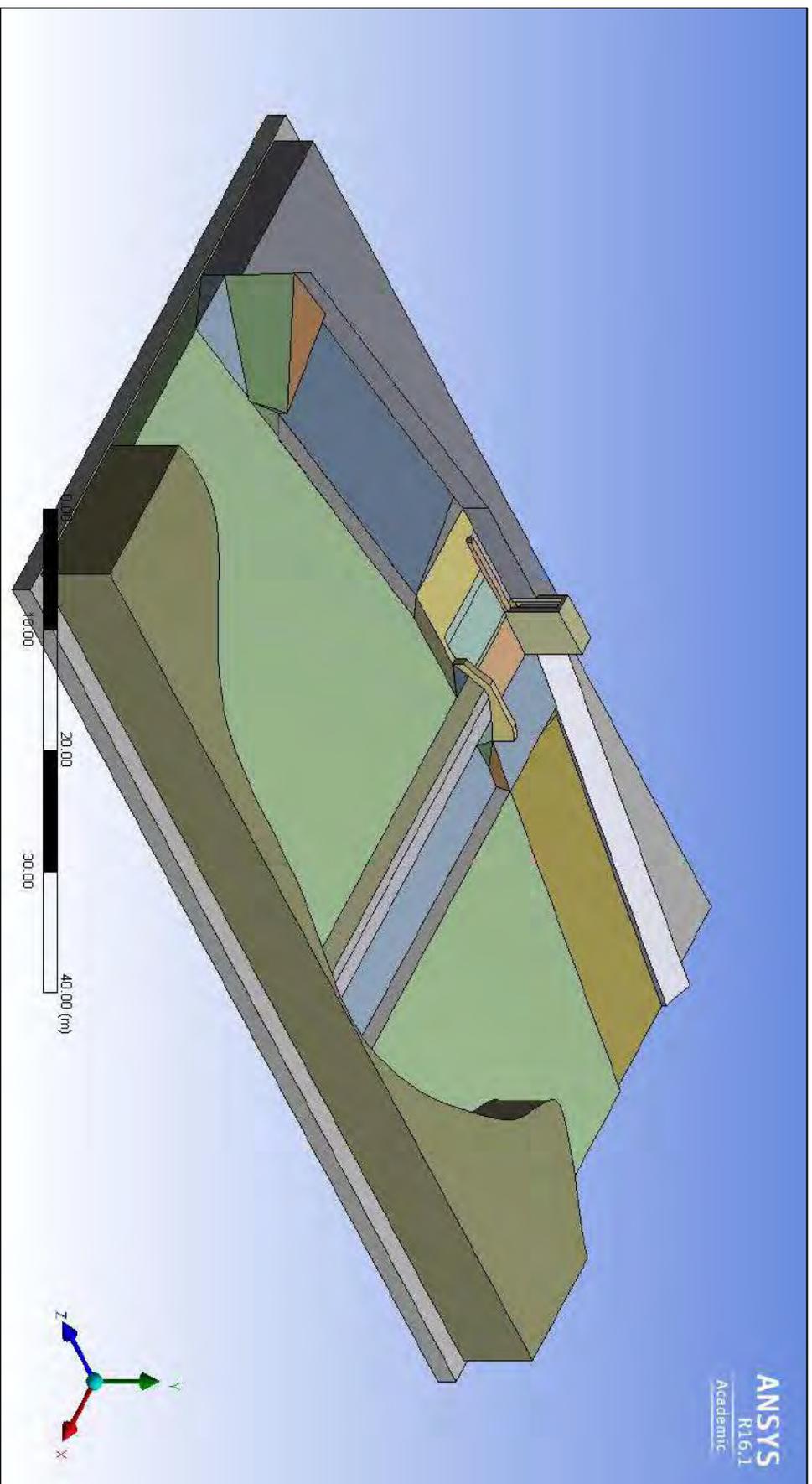


Figura 4.56 Geometría de todas las estructuras de la CHMAQ. Sin compuertas.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Condición de compuertas cerradas

La geometría generada se observa en la Figura 4.57 Figura 4.58 y Figura 4.59. La única diferencia es la presencia de la compuerta obermeyer de 2 m de alto y 8 m de ancho.

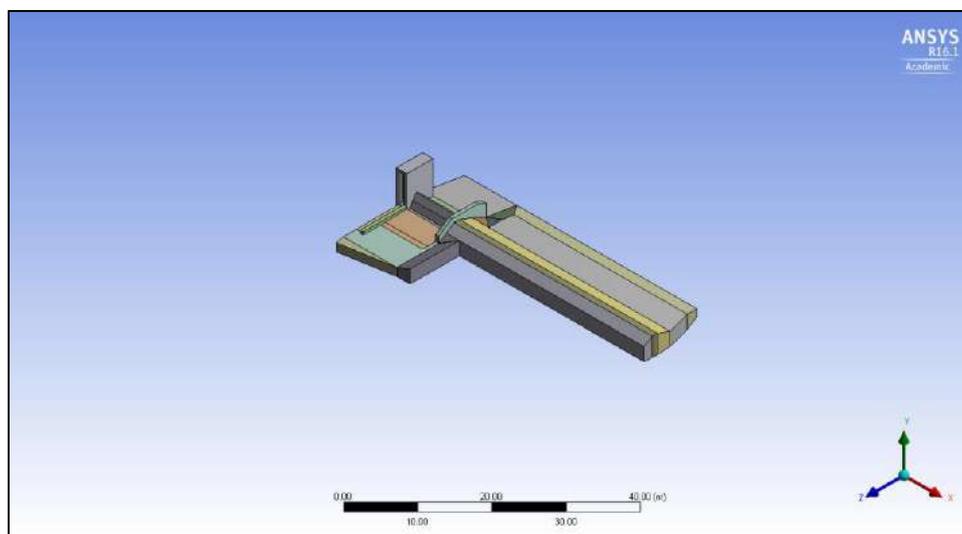


Figura 4.57 Geometría de la represa obermeyer y vertedero fijo. Compuertas cerradas.

Fuente: Elaboración propia (2015).

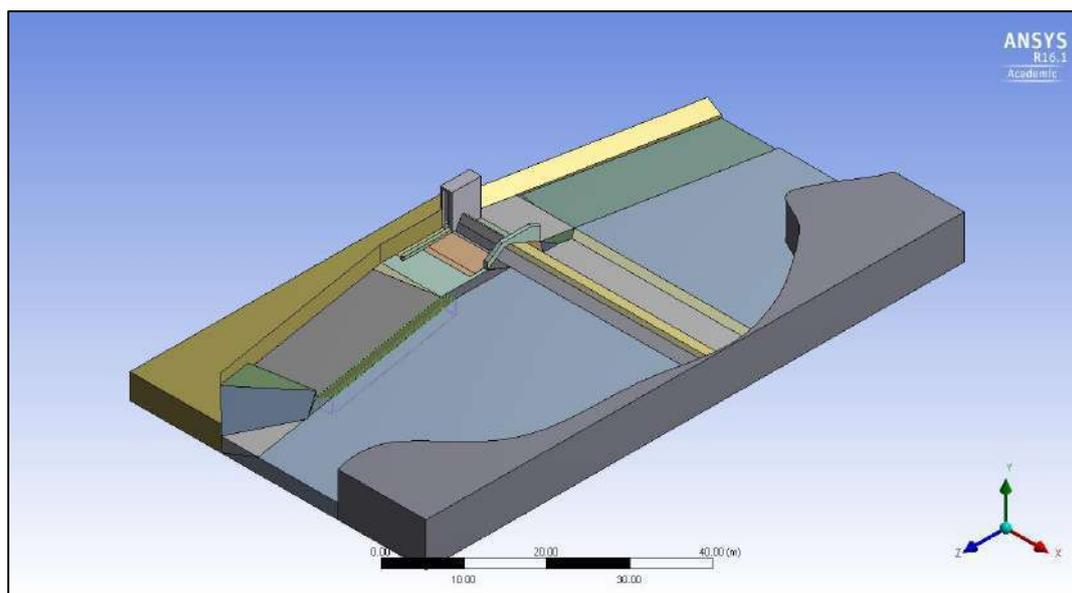


Figura 4.58 Geometría de todas las estructuras de la CHMAQ. Compuertas cerradas.

Fuente: Elaboración propia (2015).

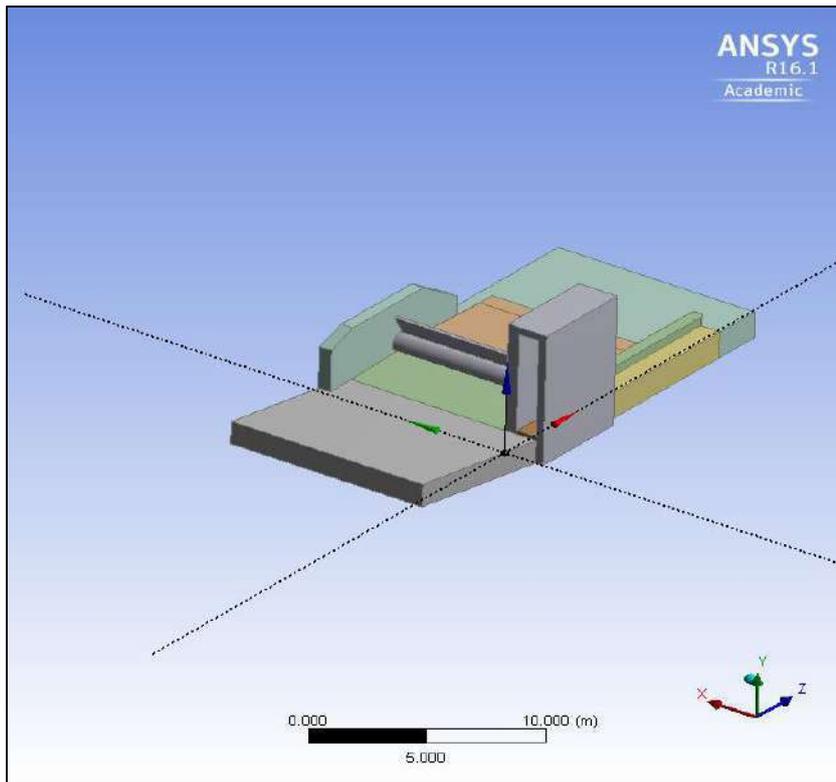


Figura 4.59 Geometría de la represa obermeyer y canal de limpia. Compuertas cerradas.

Fuente: Elaboración propia (2015).

En la Figura 4.60 se observa el sketch utilizado para la realización de la compuerta y el sólido generado.

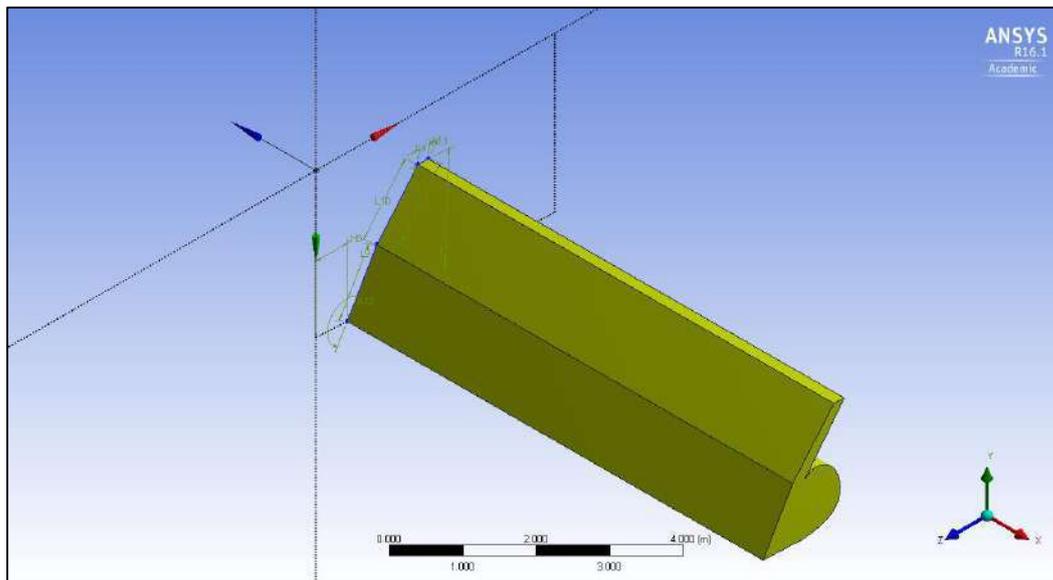


Figura 4.60 Sketch y sólido de la compuerta obermeyer.

Fuente: Elaboración propia (2015).

4.1.1.3 Creación del cuerpo del fluido

Al hablar de cuerpo del fluido se hace referencia al espacio por donde puede desplazarse el fluido.

Condición de compuertas abiertas

Para la creación del cuerpo del fluido se ha tomado como base la geometría tridimensional de las estructuras de la CHMAQ.

Por tratarse de una condición de compuertas abiertas, los tirantes existentes no son muy elevados y, se ha seleccionado como altura máxima del cuerpo del fluido a la cota de 496.80 m.s.n.m. De esta manera se obtuvo la geometría mostrada desde la Figura 4.61 hasta la Figura 4.63.

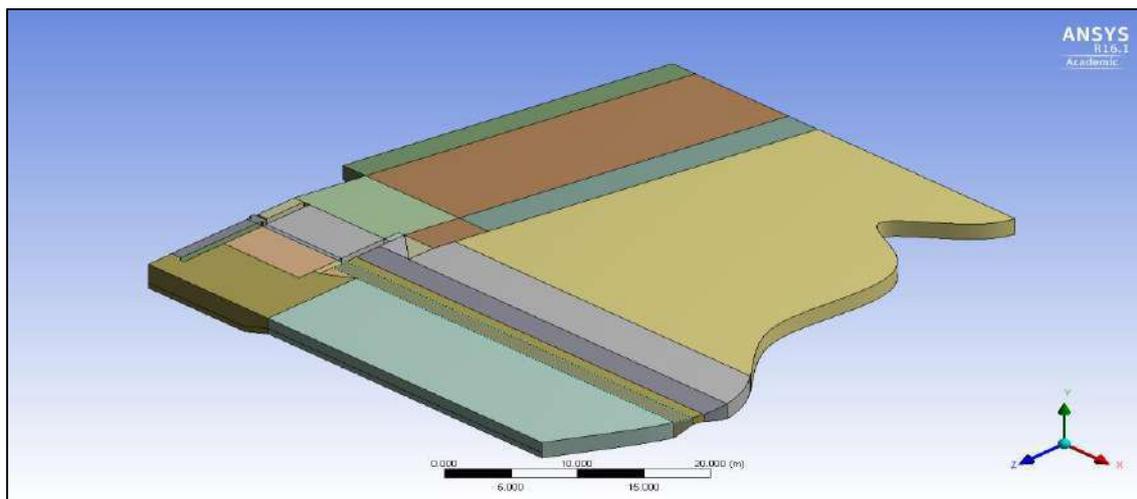


Figura 4.61 Vista isométrica del cuerpo del fluido.

Fuente: Elaboración propia (2015).

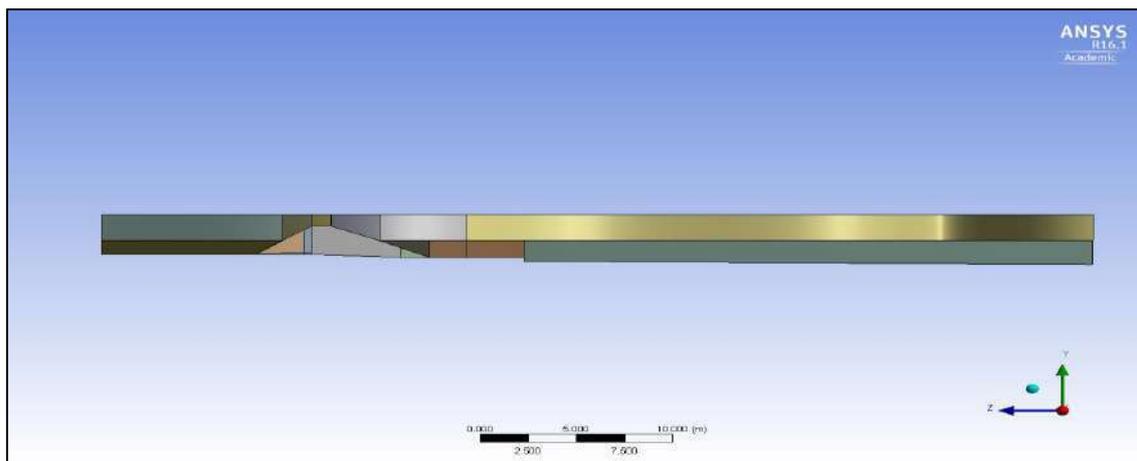


Figura 4.62 Vista de elevación del cuerpo del fluido. Compuertas abiertas.

Fuente: Elaboración propia (2015).

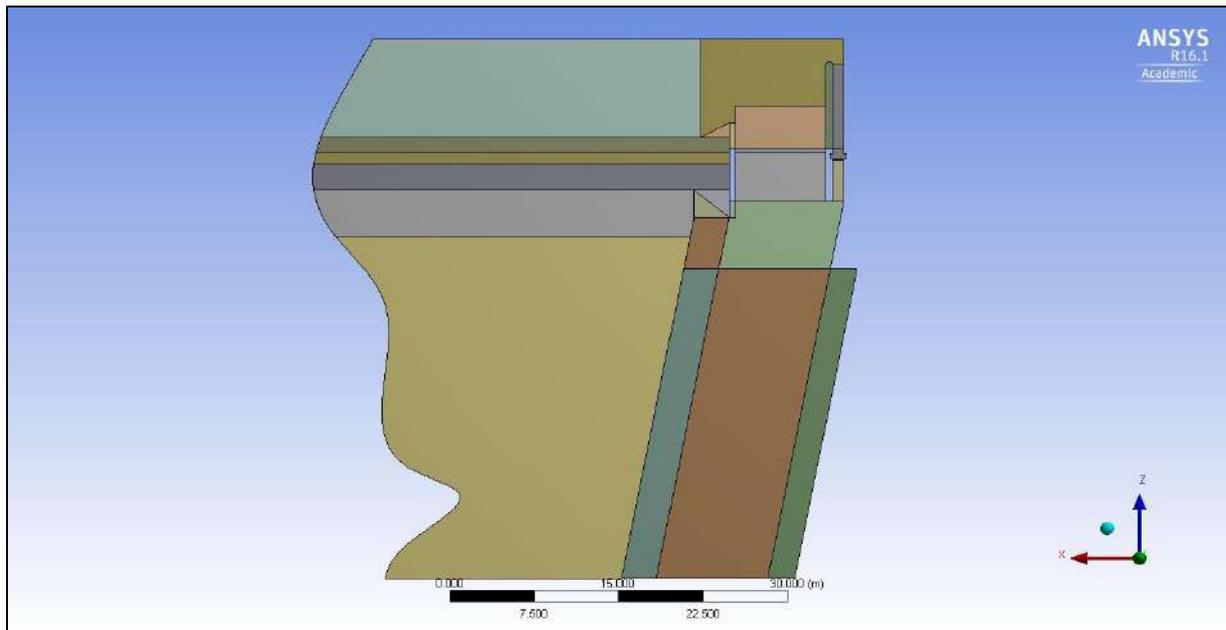


Figura 4.63 Vista en planta del cuerpo del fluido.

Fuente: Elaboración propia (2015).

En este paso ya se ha aplicado la reducción de las dimensiones de la geometría de 93 x 56 m a 51 x 49 m.

Condición de compuertas cerradas

En estas condiciones, la vista isométrica y la vista en planta son las mismas que las de la Figura 4.61 y Figura 4.63. La vista de elevación correspondiente es mostrada en la Figura 4.64.

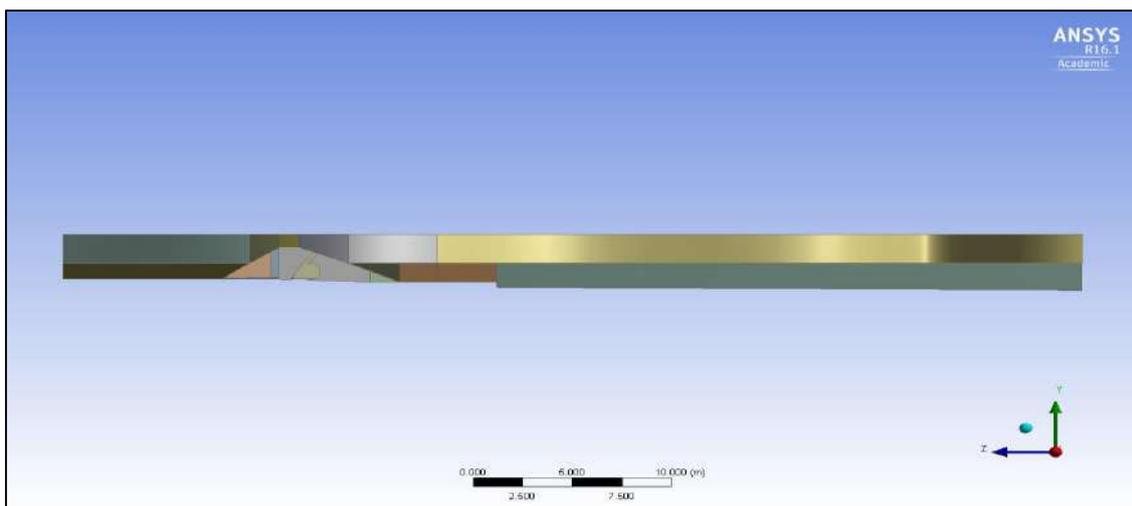


Figura 4.64 Vista de elevación del cuerpo del fluido. Compuertas cerradas.

Fuente: Elaboración propia (2015).

4.1.2 Generación de la malla

4.1.2.1 Creación de la malla computacional

En esta etapa del pre-procesamiento se realizó la generación del mallado del cuerpo del fluido siguiendo una serie de características que permitieran optimizar el análisis y el procesamiento de datos.

Este proceso se lleva a cabo gracias a una herramienta o subprograma del ANSYS-CFX llamada Meshing; el cual presenta las mismas características que el DesignModeler pero direccionadas a la generación de una malla computacional.

Condición de compuertas abiertas

Según la topografía del terreno aguas arriba de la bocatoma, y en condiciones de compuertas abiertas, el tirante del cuerpo de agua generado está ubicado entre 0.4 y 0.6 m.

Por este motivo, en la presente tesis se realizarán simulaciones para los tirantes de 0.4, 0.5 y 0.6 m para los caudales promedio y de máxima avenida vistos en el Capítulo 2. Las velocidades aproximadas serán calculadas a partir de estos datos y con la siguiente ecuación:

$$Q = V \cdot A \quad (4.1)$$

Donde:

Q = Caudal del canal.

V = Velocidad del cuerpo de agua.

A = Área de la sección transversal en la zona límite de la geometría generada.

A continuación, en la Figura 4.65 se muestran las configuraciones realizadas en la generación del mallado sobre la geometría a analizar, las cuales son las mismas para los tres tirantes. Las características más importantes son:

- Alta relevancia de la malla.
- Mejor dimensionamiento en zonas de proximidad y curvatura.
- Centro de relevancia fino.
- Suavizado alto.
- Tamaño mínimo de mallado 0.005 m.

Todas estas características permiten obtener una malla adecuadamente refinada, la cual asegurará un mejor análisis gracias a la gran cantidad de elementos finitos que componen dicha malla.

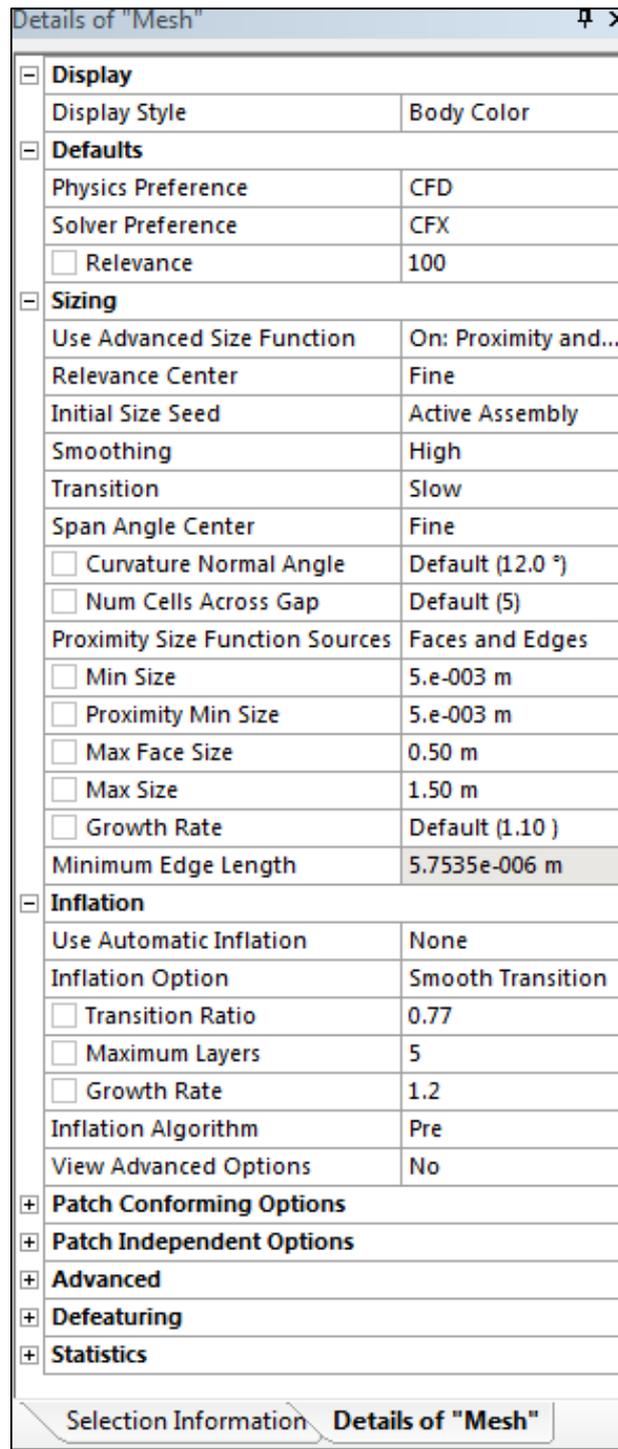


Figura 4.65 Detalles de la malla.

Fuente: Elaboración propia (2015).

La información referida con el número de nodos y de elementos contenidos en la malla es mostrada para los distintos tirantes de agua en la Tabla 4.1. Estos varían debido a la generación de un mayor número de elementos al modificar la superficie o zona de interés que tendrá la función de entrada de agua, la cual será explicada con mayor detalle más adelante.

Tabla 4.1 Cantidad de elementos y nodos en el mallado.

Altura de tirante	0.4 m	0.5 m	0.6 m
Número de nodos	707892	687459	666481
Número de elementos	1606574	1565841	1500969

Fuente: Elaboración propia (2015).

El resultado de aplicar todas estas características a la generación de la malla computacional se puede observar en la Figura 4.66.

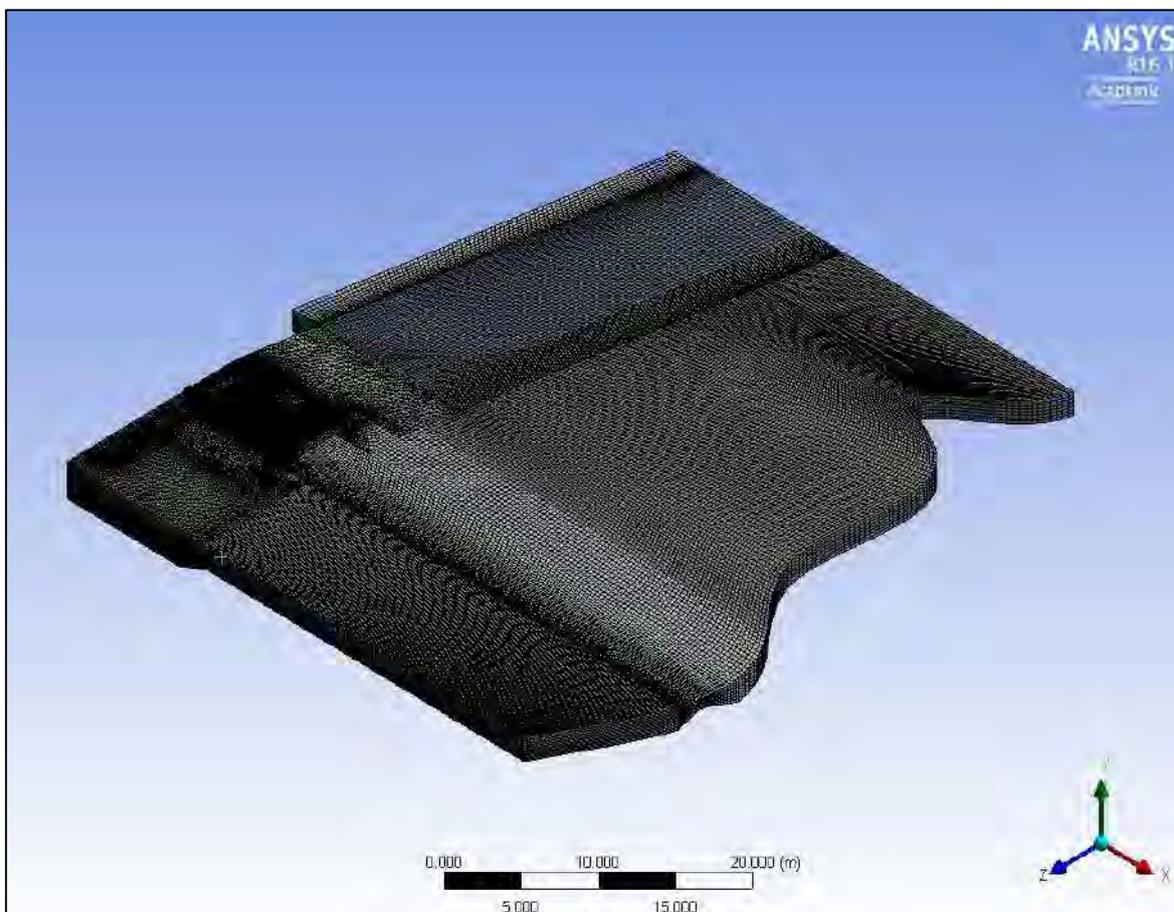


Figura 4.66 Vista isométrica de la malla computacional sobre el cuerpo del fluido.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Condición de compuertas cerradas

En estas condiciones la altura del tirante está delimitada por la de la compuerta obermeyer inflada, lo cual corresponde a 2 metros de elevación. Por lo que solamente habrá que realizar una simulación para cada tipo de caudal, tanto para el promedio como el de máxima avenida.

4.1.2.2 Asignación de zonas de interés

Condición de compuertas abiertas

Para continuar con el pre-procesamiento y finalizar con el proceso de la generación del mallado, es necesario asignar a ciertas superficies del cuerpo del fluido ciertos nombres característicos que permitan brindarles ciertas propiedades posteriormente. De esta manera, tenemos la entrada de agua (inlet), la salida de agua (outlet), la superficie libre (free) y la zona donde serán evaluadas las distintas variables, a la cual se le ha asignado el nombre de superficie de análisis.

En la Figura 4.67 se puede observar la superficie correspondiente a la entrada de agua para el tirante de 0.5 m, la cual presenta un área de 21.031 m².

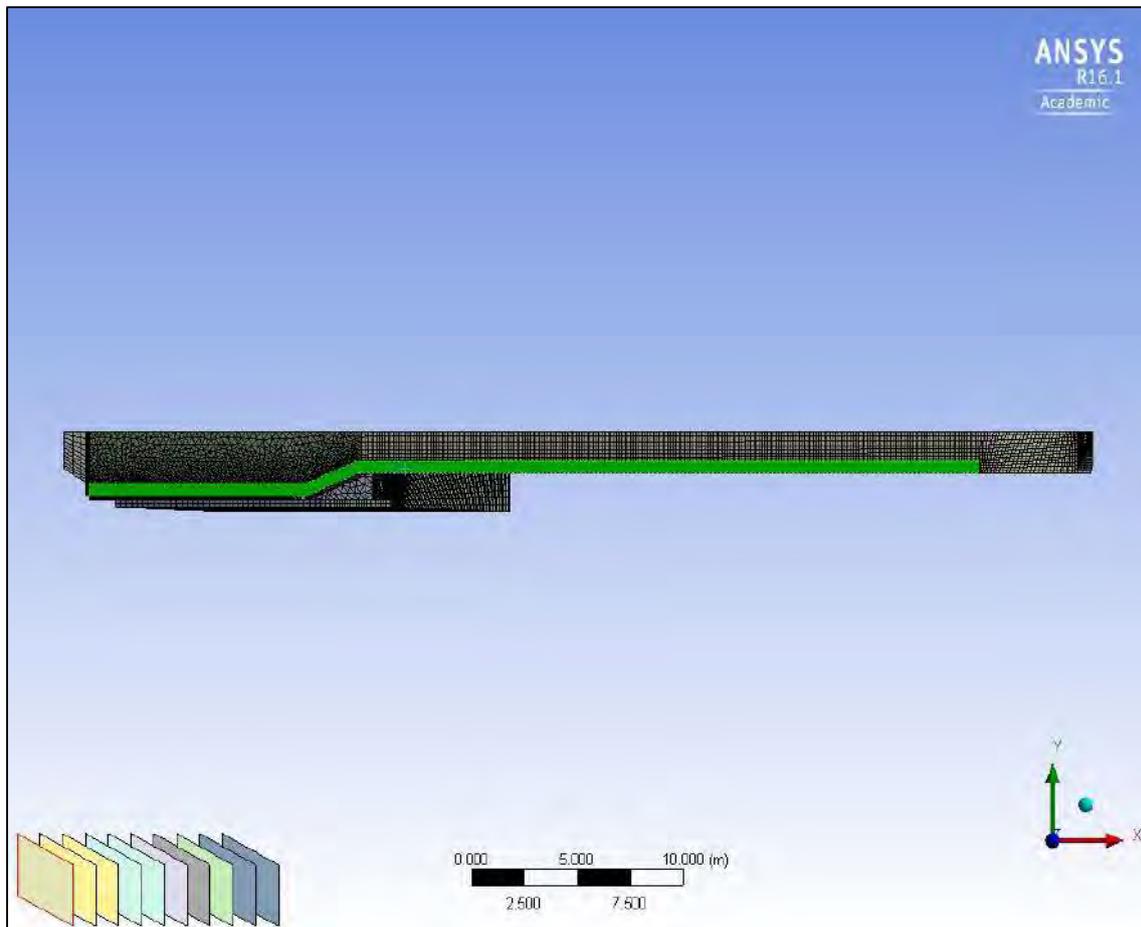


Figura 4.67 Zona de interés: inlet o entrada de agua.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Los valores de área transversal para estas superficies para los distintos tirantes de agua analizados se presentan en la Tabla 4.2. Los datos correspondientes a estas áreas serán utilizados en la ecuación 4.1 para realizar el respectivo cálculo de las velocidades de flujo.

Tabla 4.2 Áreas de la superficie de entrada de agua.

Altura de tirante	0.4 m	0.5 m	0.6 m
Área de la sección transversal	16.825 m ²	21.031 m ²	25.238 m ²

Fuente: Elaboración propia (2015).

En la Figura 4.68 se muestra las superficies que conforman la zona designada para la superficie libre, la cual es necesaria para facilitar un correcto análisis y visualización del comportamiento del fluido y su interacción con el aire.

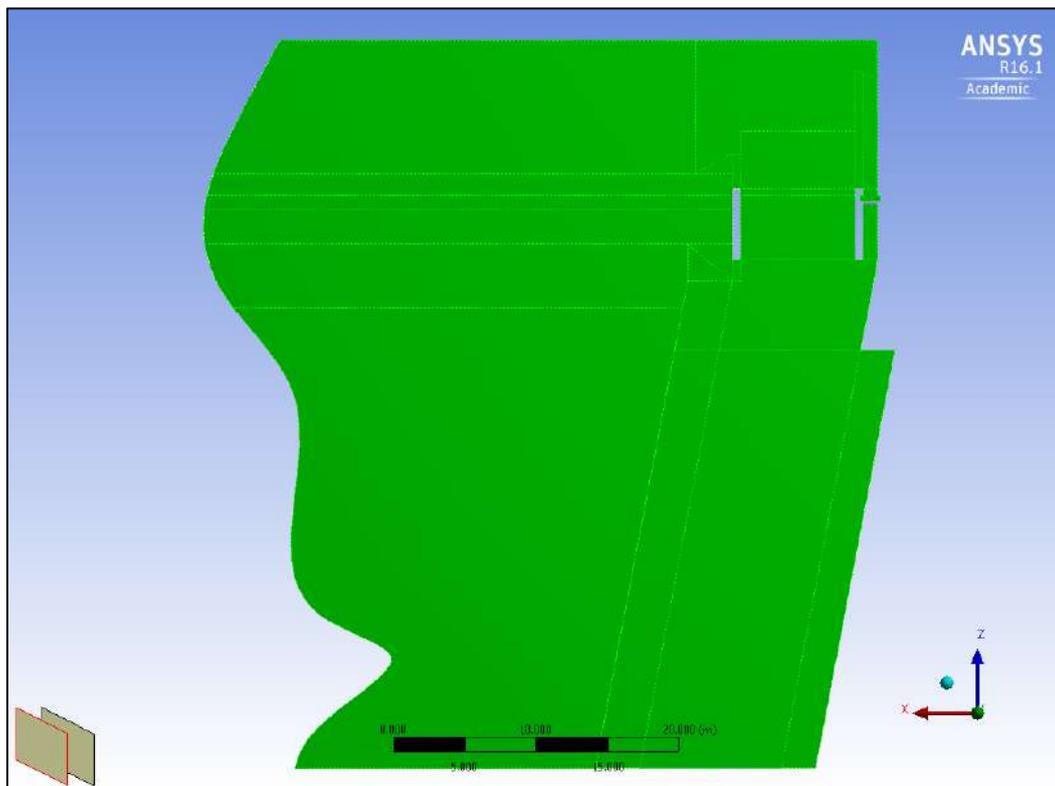


Figura 4.68 Zona de interés: free o superficie libre.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Asimismo, en la Figura 4.69 se observa el conjunto de superficies correspondiente a la salida del fluido o outlet, la cual es necesaria para mantener un equilibrio en el sistema entre la cantidad de fluido que ingresa y sale del mismo.

Finalmente, en la Figura 4.70 se puede observar la superficie asignada para el área de análisis. Esta zona es importante porque permite realizar un estudio más específico sobre los efectos del fluido sobre la estructura, además, es en esta zona donde se han observado los mayores desgastes provocados por la fuerza erosiva del cuerpo de agua, como los observados en la Figura 4.71.

Condición de compuertas cerradas

En estas condiciones se mantienen la mayoría de zonas de interés asignadas cuando se tienen las compuertas abiertas; el único cambio o modificación realizado es el de la entrada de agua, pues el tirante de agua varía de 0.5 a 2 m de altura.

En la Figura 4.72 se muestra que la zona de interés conocida como inlet o entrada de agua, la cual cuenta con un área transversal equivalente a 53.316 m².

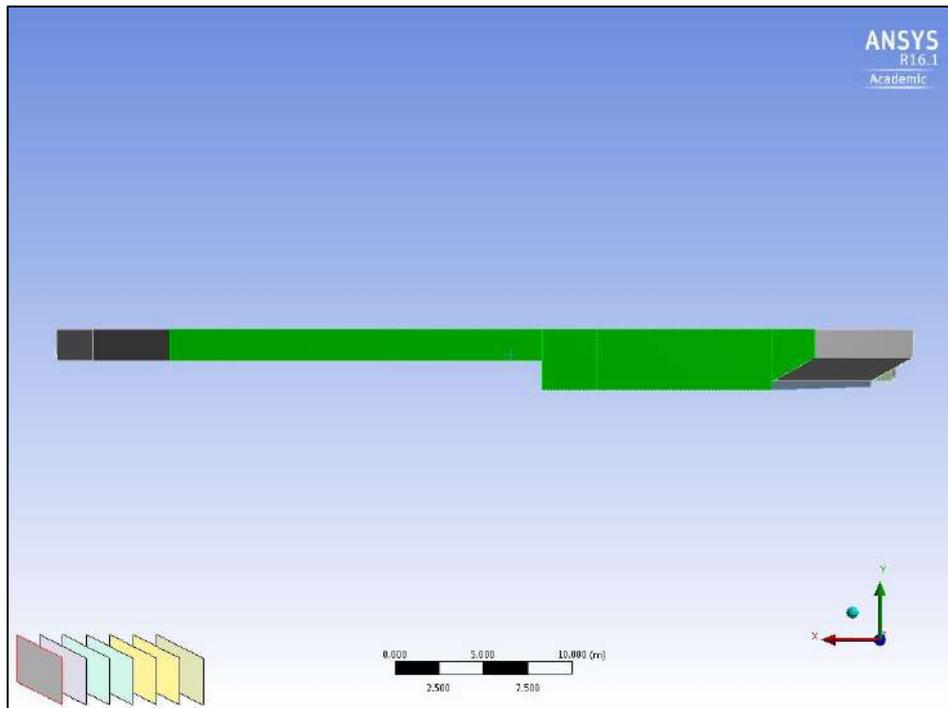


Figura 4.69 Zona de interés: outlet o salida de agua.

Fuente: Elaboración propia (2015).

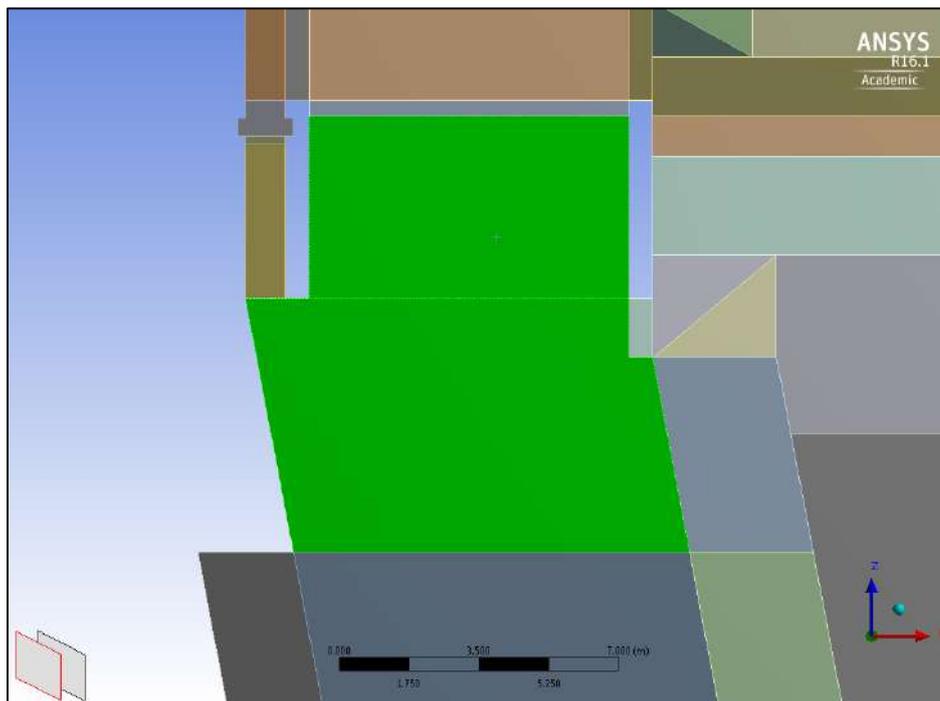


Figura 4.70 Zona de interés: superficie de análisis.

Fuente: Elaboración propia (2015).

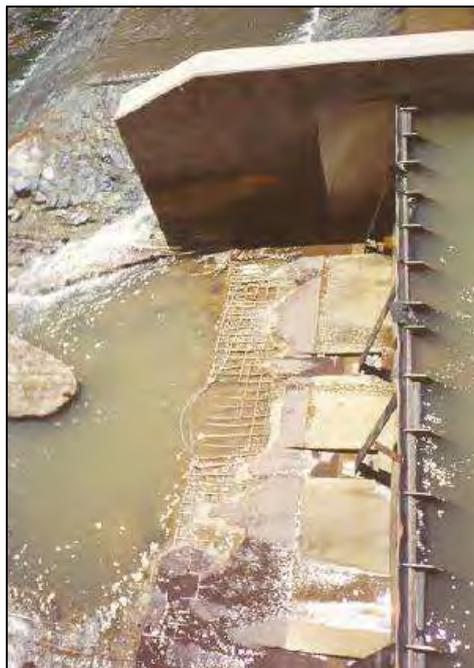


Figura 4.71 Losa aguas abajo de la compuerta obermeyer correspondiente con la zona de interés nombrada superficie de análisis.

Fuente: Universidad de Piura (2005).

4.1.3 Ingreso de datos

Para concluir con el pre-procesamiento, es necesario realizar el ingreso de la información necesaria para el análisis, esto se hará a través de la herramienta o subprograma CFX-Pre. Este subprograma presenta opciones para configurar distintas variables tales como: las condiciones de borde, el tipo de análisis, los materiales a utilizar, las expresiones generadas, el control de la simulación, entre otros.

Visualmente se divide en dos ventanas de trabajo, el esquema (outline) y la zona del gráfico (view), donde se observan todas las configuraciones realizadas a la estructura a analizar y los posibles errores o faltas de información. Estas características nombradas pueden observarse en la Figura 4.73.

4.1.3.1 Generación del dominio

El CFX-Pre utiliza el concepto de dominio para definir el tipo de región y sus propiedades correspondientes, tanto para fluidos y sólidos. Los dominios son regiones de espacio donde se resuelven las ecuaciones del flujo del fluido o de la transferencia de calor, según sea necesario.

En la Tabla 4.3 se muestran las consideraciones que se deben tener en cuenta al momento de configurar dichos dominios.

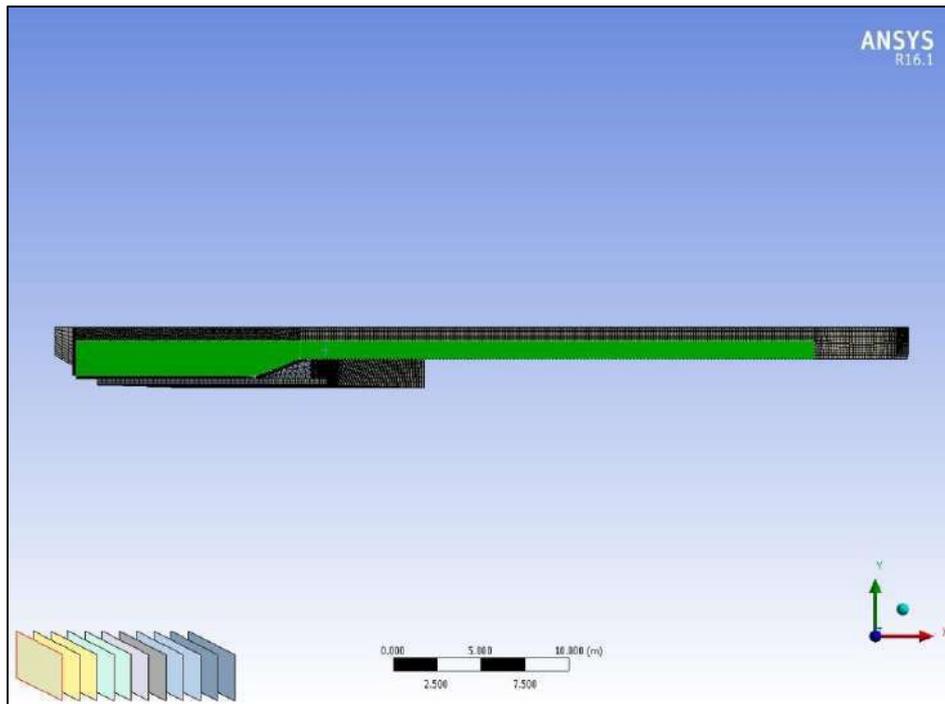


Figura 4.72 Zona de interés: inlet o entrada de agua.

Fuente: Elaboración propia (2015).

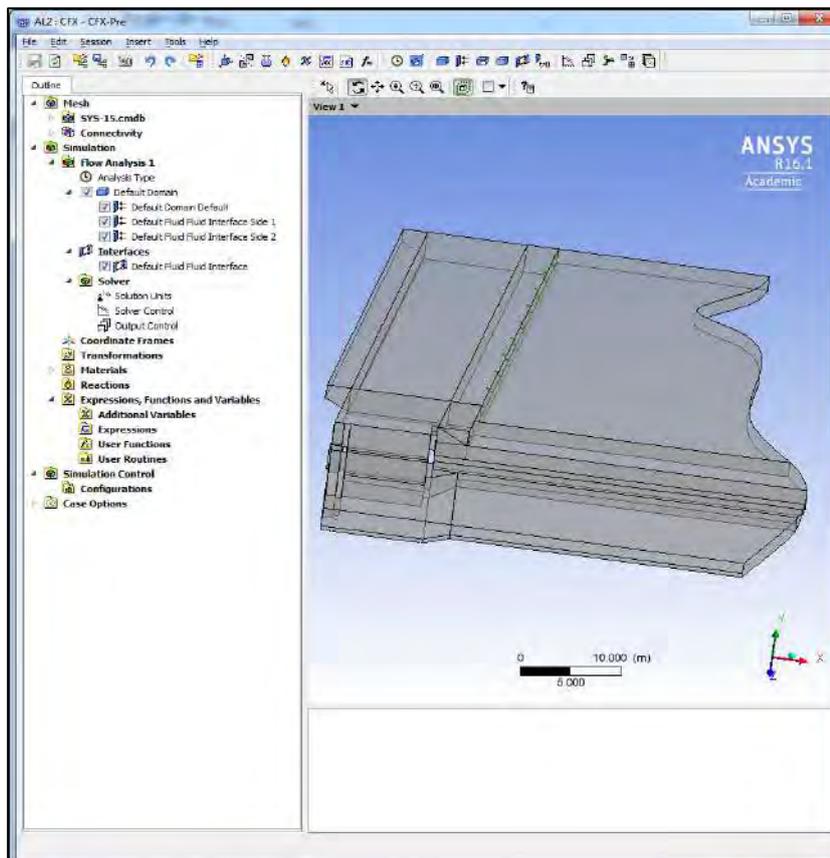


Figura 4.73 Distribución del espacio de trabajo del CFX-Pre.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Tabla 4.3 Resumen de parámetros para configuración del dominio.

Característica	Descripción
Tipo de fluido	Agua :Incompresible, continuo, newtoniano
	Aire: Compresible, continuo, newtoniano
Tipo de flujo	Turbulento
Tipo de régimen	Estacionario
Tipo de dominio	Dominio Fluido
Modelo multifásico	Homogéneo
Fuerza gravitacional	Sí
Tipo de modelo de turbulencia	k-ε
Transmisión de calor	No
Presión de referencia	1 atm
Densidad de referencia	1.2 kg/m ³
Coefficiente de tensión superficial	0.072 N m ⁻¹
Modelo de tensión superficial	Superficie continua
Transferencia en interfaces	Superficie libre
Transferencia de masa	No
Método de resolución	Método de volúmenes finitos.

Fuente: Elaboración propia (2015).

En la Tabla 4.4 se puede observar las propiedades de interés del aire y del agua. Mientras que en la Figura 4.76, Figura 4.75 y Figura 4.76 se han aplicado estas características al CFX-Pre para la respectiva configuración del dominio y de la interfaz.

Ésta se ha generado debido a la no unicidad de conexión entre todos los elementos que conforman el cuerpo del fluido; por este motivo, para evitar problemas de generación de estructuras sólidas en el interior del fluido se genera un dominio de interfaz tipo fluido/fluido, lugar donde ocurre esta interacción.

Tabla 4.4 Propiedades del aire y del agua.

Fluido: Aire	
Densidad	1.2 kg/m ³
Masa molar	28.96 kg/kmol
Viscosidad dinámica	1.831 E-5 kg/m s
Fluido: Agua	
Densidad	997.0 kg/m ³
Masa molar	18.02 kg/kmol
Viscosidad dinámica	8.899 E-4 kg/m s

Fuente: Elaboración propia (2015).

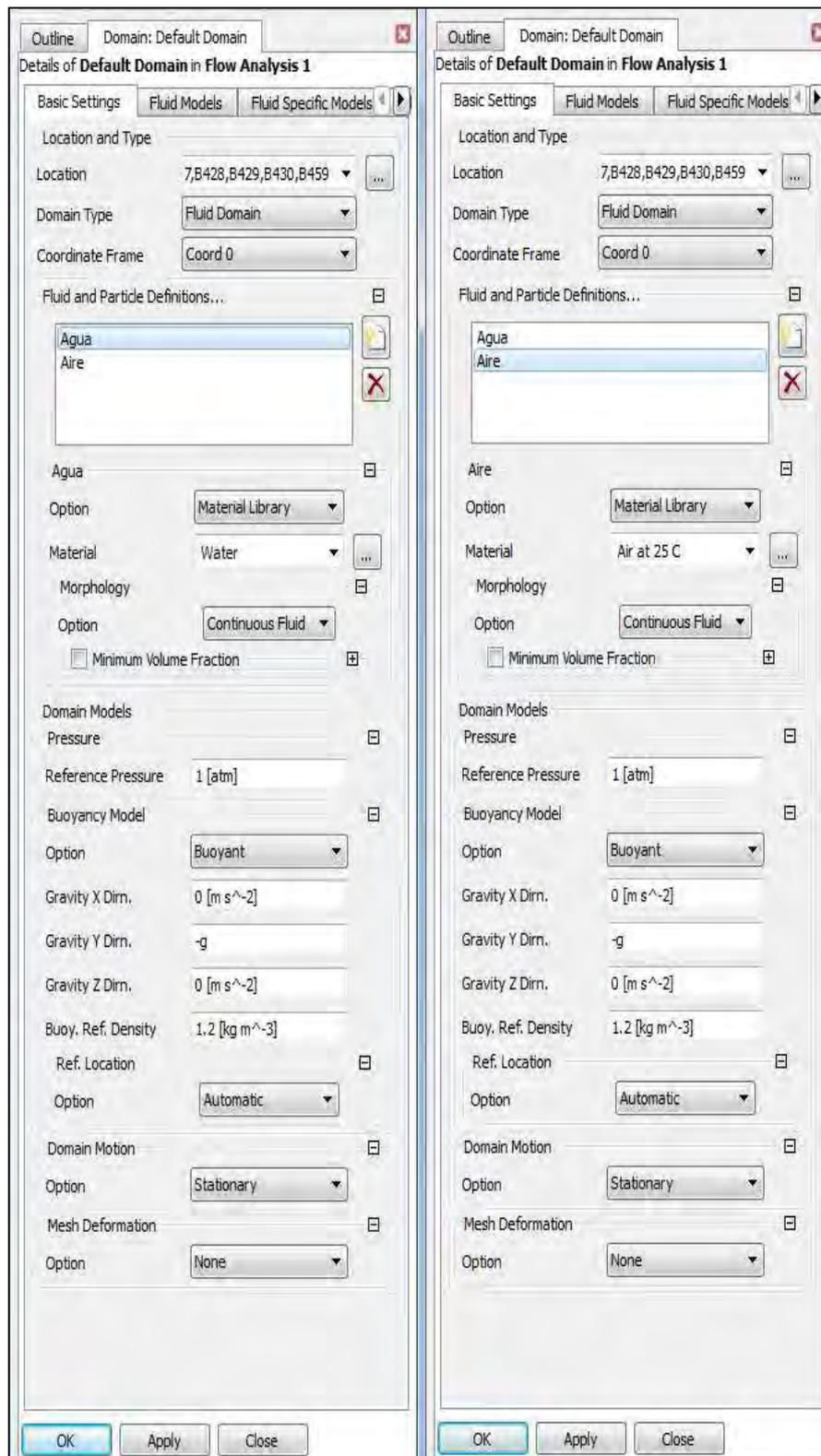


Figura 4.76 Configuración básica del tipo de dominio, características de los fluidos, presión, flotabilidad y densidad de referencia.

Fuente: Elaboración propia (2015).

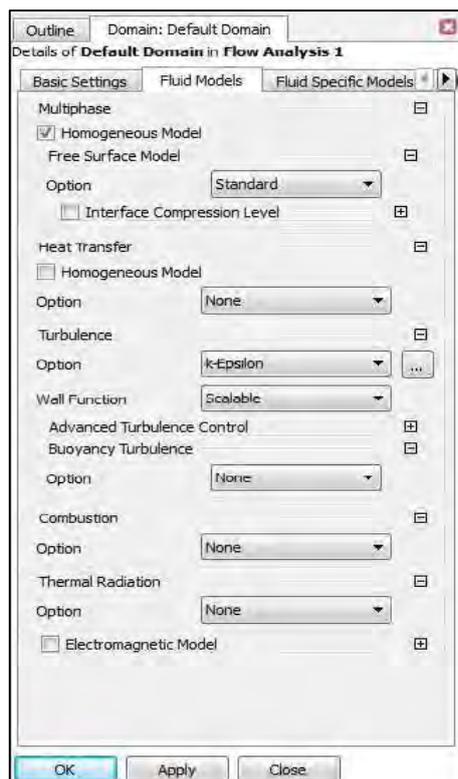


Figura 4.75 Configuración de modelo multifásico, transferencia de calor y de turbulencia.

Fuente: Elaboración propia (2015).

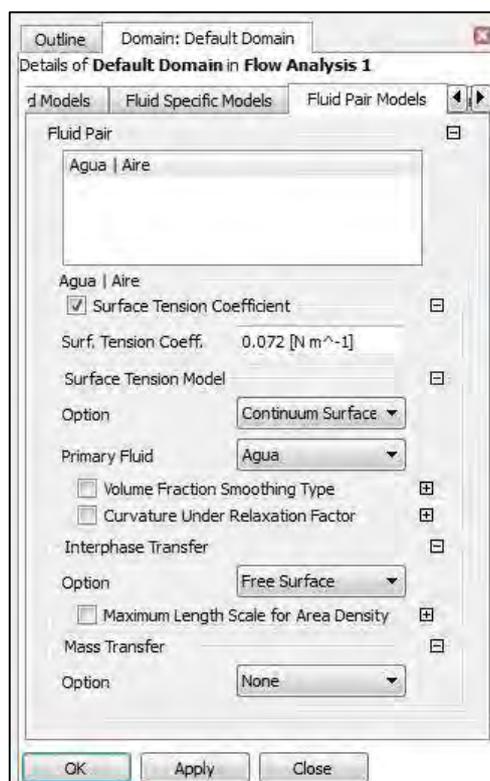


Figura 4.76 Configuración de la interacción entre fluidos.

Fuente: Elaboración propia (2015).

4.1.3.2 Configuración de las condiciones de borde

Las condiciones de borde o de frontera son elementos que permiten establecer el comportamiento que debe tener la estructura a analizar; se puede definir el comportamiento del tipo de entrada, salida, simetría, límite, entre otros.

En la presente tesis, como se ha hecho mención anteriormente, se realizarán una serie de simulaciones para distintos caudales de agua y distintos tirantes; todos ellos mantendrán las mismas condiciones de frontera con la excepción de la velocidad de flujo en la entrada.

Condición de compuertas abiertas

En la Tabla 4.5 se muestra la información resumida de las velocidades para los distintos caudales y tirantes.

Tabla 4.5 Velocidades en la zona de entrada para distintos caudales y tirantes.

Caudal promedio $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$	
Tirante	Velocidad
0.4 m	2.97 m/s
0.5 m	2.38 m/s
0.6 m	1.98 m/s
Caudal máximo $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$	
Tirante	Velocidad
0.4 m	17.83 m/s
0.5 m	14.31 m/s
0.6 m	11.88 m/s

Fuente: Elaboración propia (2015).

En la Figura 4.77, Figura 4.78 y Figura 4.79 se muestra la configuración aplicada al dominio generado en la estructura correspondientes a la condición de caudal promedio y un tirante de agua de 0.4 m.

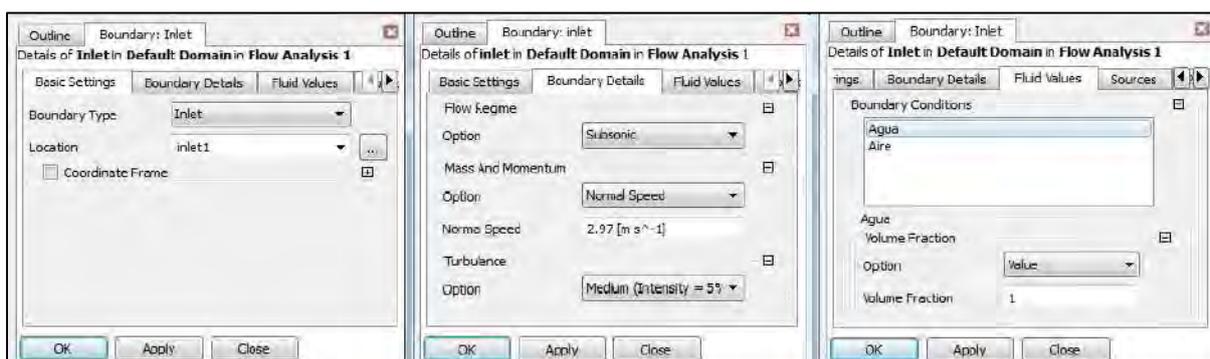


Figura 4.77 Configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera y valores de fluidos en la entrada de agua. Caudal promedio y tirante de 0.4 m.

Fuente: Elaboración propia (2015).

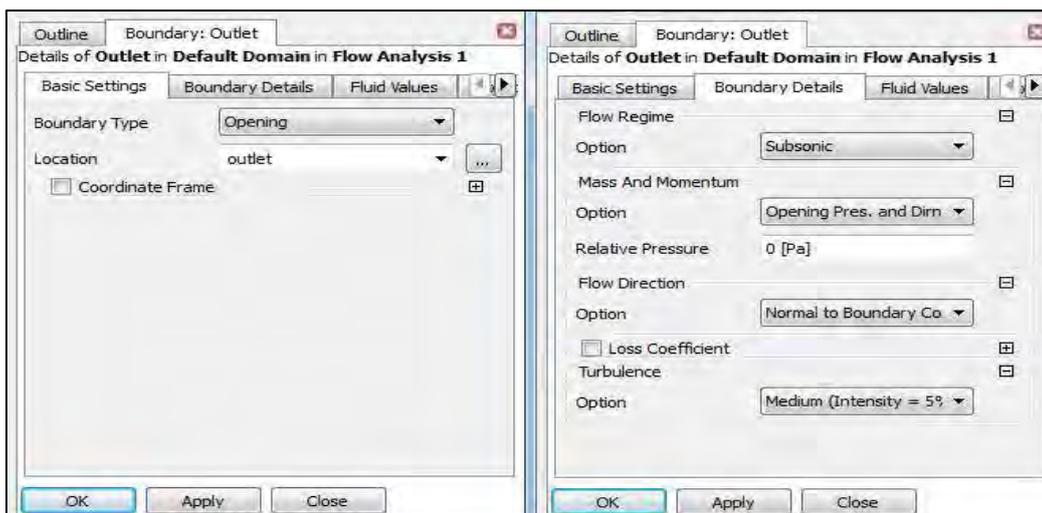


Figura 4.78 Configuración de las condiciones básicas y detalles de frontera en la salida de agua.

Fuente: Elaboración propia (2015).

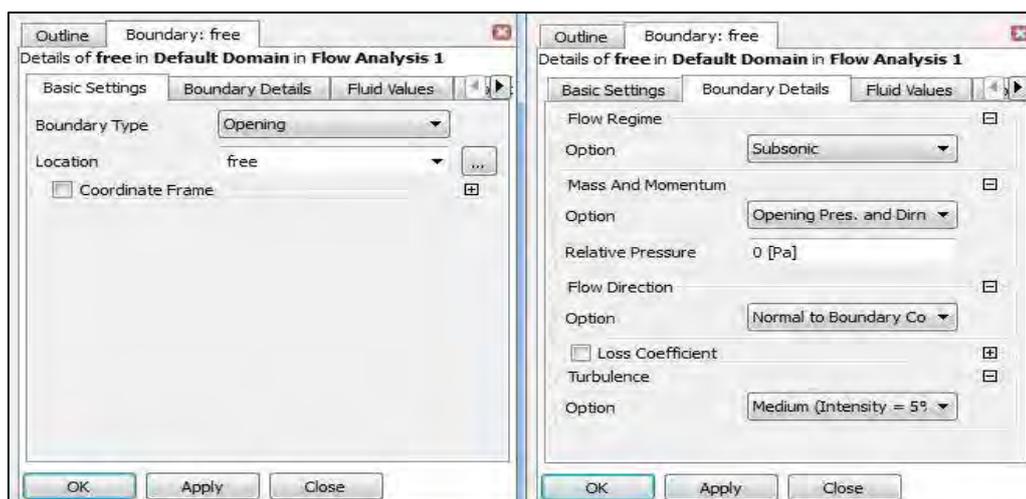


Figura 4.79 Configuración de las condiciones básicas y detalles de frontera en la superficie libre.

Fuente: Elaboración propia (2015).

El resultado de aplicar todas estas configuraciones en la estructura de análisis se puede observar en la Figura 4.80, en la cual están representadas en forma de vectores normales las condiciones de entrada, salida y abertura según los valores asignados de velocidad y presión.

Para las siguientes condiciones de caudal y tirante solamente se mostrará la figura correspondiente a la configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera y valores de fluidos en la entrada de agua, pues es la única que presentará variaciones. De esta manera, de la Figura 4.81 a la Figura 4.85 se muestran dichas configuraciones para las distintas condiciones.

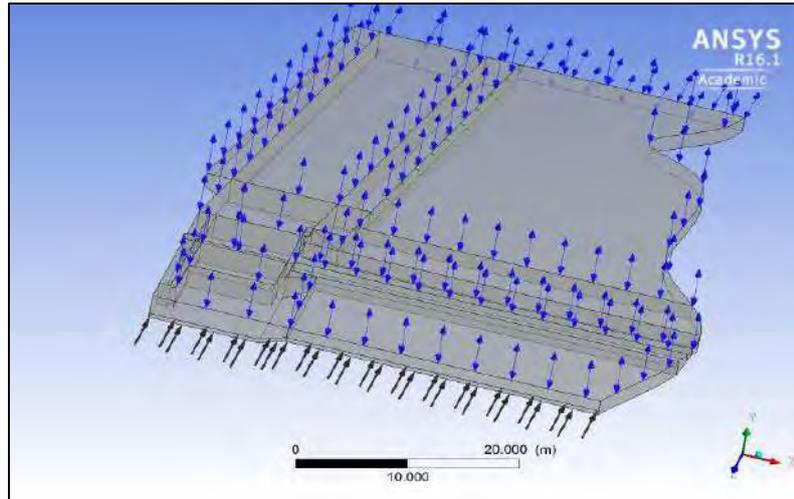


Figura 4.80 Representación final de la estructura con los datos ingresados.

Fuente: Elaboración propia (2015).

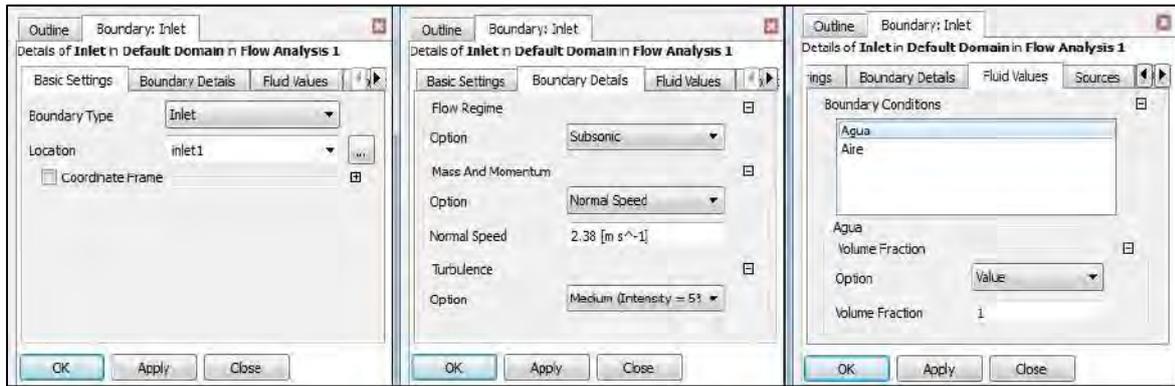


Figura 4.81 Configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera y valores de fluidos en la entrada de agua. Caudal promedio y tirante de 0.5 m.

Fuente: Elaboración propia (2015).

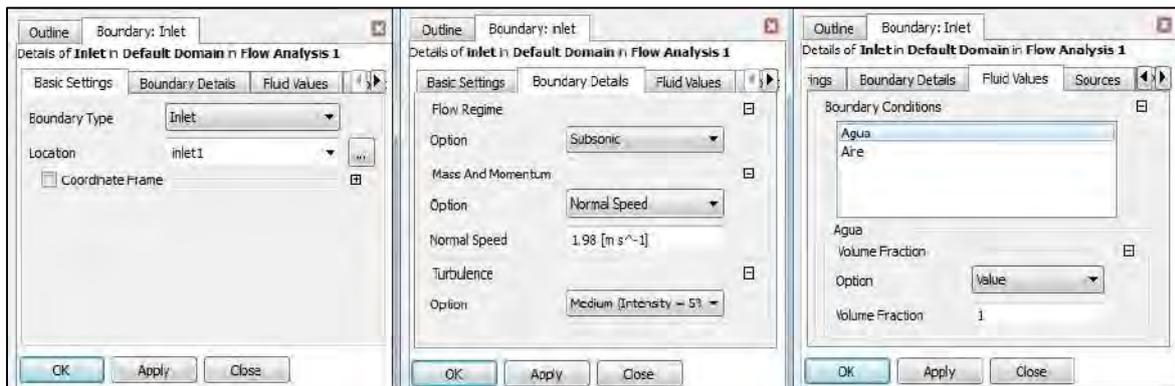


Figura 4.82 Configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera y valores de fluidos en la entrada de agua. Caudal promedio y tirante de 0.6 m.

Fuente: Elaboración propia (2015).

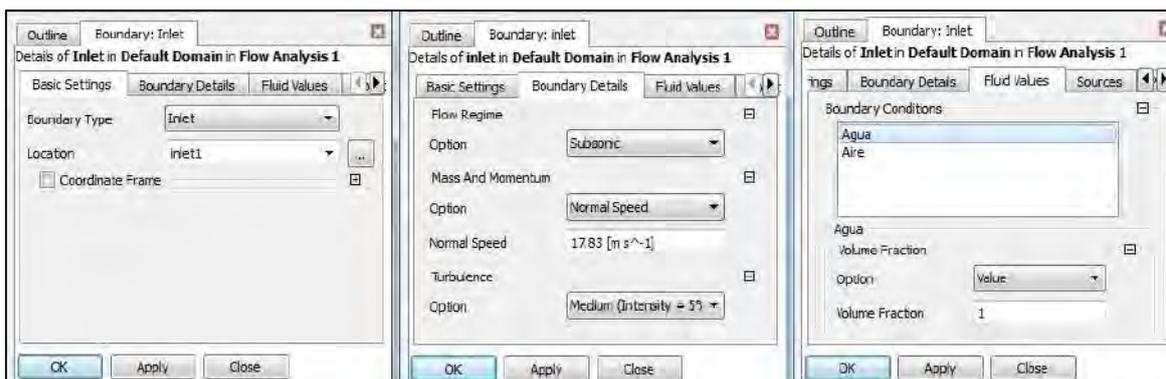


Figura 4.83 Configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera y valores de fluidos en la entrada de agua. Caudal máximo y tirante de 0.4 m.

Fuente: Elaboración propia (2015).

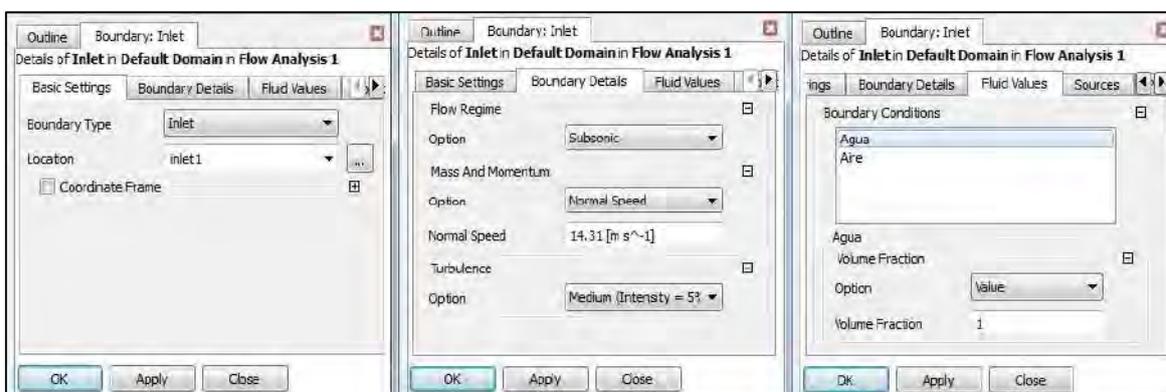


Figura 4.84 Configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera y valores de fluidos en la entrada de agua. Caudal máximo y tirante de 0.5 m.

Fuente: Elaboración propia (2015).

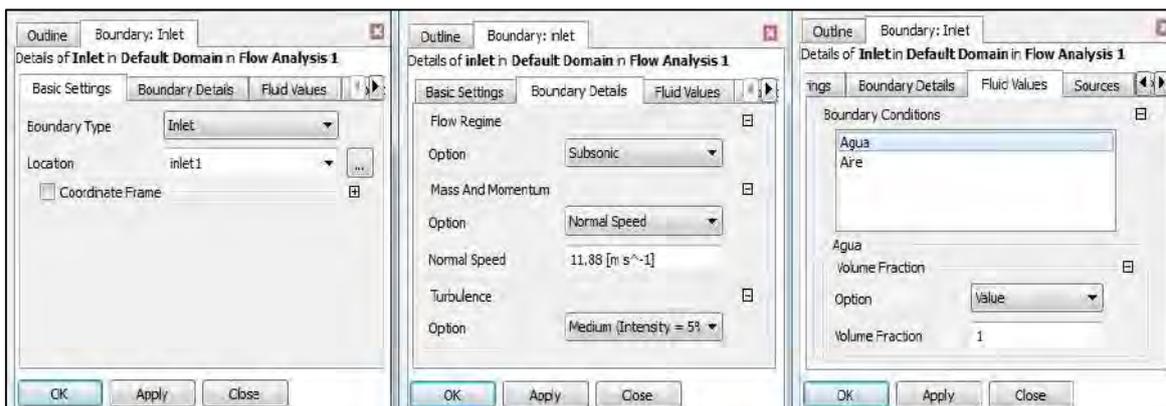


Figura 4.85 Configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera y valores de fluidos en la entrada de agua. Caudal máximo y tirante de 0.6 m.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Condición de compuertas abiertas

En la Figura 4.864186 y Figura 4.4287, las cuales corresponden a las condiciones de caudal promedio y caudal máximo para compuertas cerradas, al igual que para las condiciones anteriores solamente se mostrarán los datos de interés referidos a la velocidad normal del flujo en la entrada.

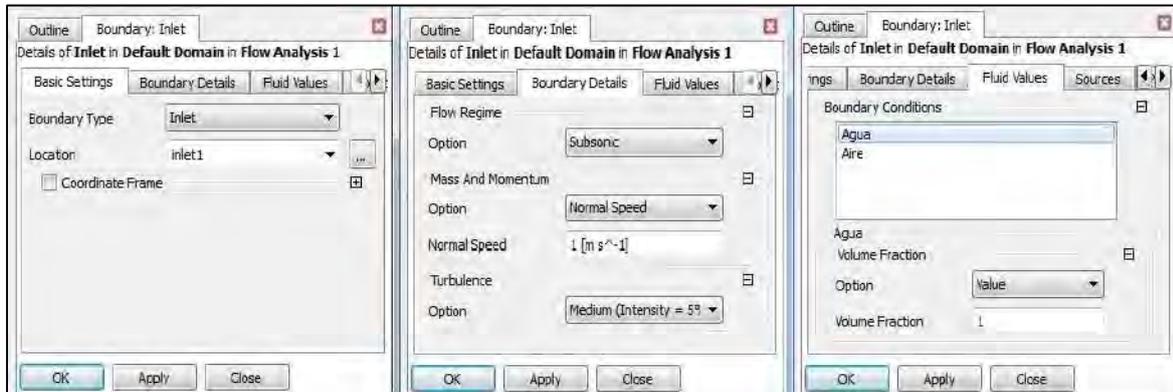


Figura 4.8641 Configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera y valores de fluidos en la entrada de agua. Caudal promedio.

Fuente: Elaboración propia (2015).

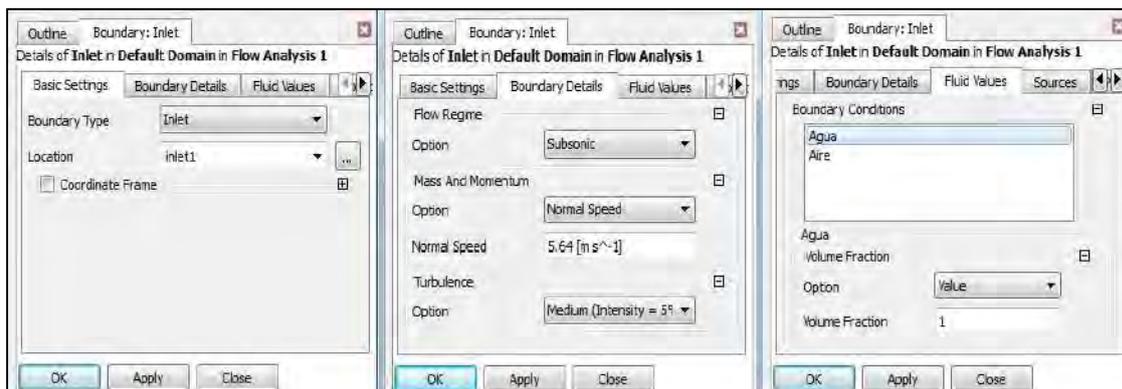


Figura 4.42 Configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera y valores de fluidos en la entrada de agua. Caudal máximo.

Fuente: Elaboración propia (2015).

4.1.3.3 Configuración del tipo de análisis

Finalmente, en la Figura 4.88 se muestran las características básicas del control del solucionador, las cuales serán las mismas para todas las simulaciones a realizar.

En el proceso de análisis se ha colocado como número límite la cantidad de 200 iteraciones, sin embargo la convergencia puede alcanzarse en un momento anterior o posterior a este número fijado. El análisis se detendrá por parte del usuario cuando se observe una gran tendencia a la invariabilidad de los datos entre iteraciones continuas, es decir, cuando no exista mucha variación gráfica y cuantitativa entre ellas.

Por otra parte, el proceso de análisis se detendrá automáticamente cuando todas las variables analizadas presenten una variación de residuo tipo RMS¹⁶ menor a 0.0001.

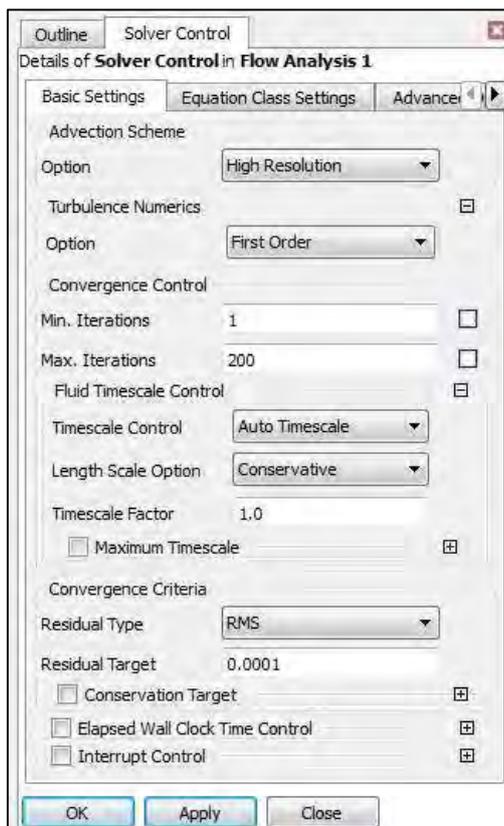


Figura 4.88 Configuración de las características básicas del solucionador.

Fuente: Elaboración propia (2015).

4.1.4 Procesamiento

El procesamiento es el cuarto paso principal de la simulación, el cual consiste en el análisis del programa hasta conseguir la convergencia de las variables estudiadas, es decir, que dichos valores lleguen a un único resultado.

Este paso se realiza a través del solucionador, el cual es un subprograma conocido como CFX-Solver Manager.

4.1.4.1 Análisis de datos

En el solucionador se llevará a cabo un proceso iterativo cuyo principal objetivo es alcanzar la estabilidad y convergencia de los datos a analizar; esto se consigue gracias al cálculo matemático realizado por los algoritmos del programa, del cual se obtiene la solución numérica deseada.

Esta parte del procesamiento es automático y finalizará, como ya se ha mencionado anteriormente, cuando se alcance el número límite de iteraciones impuesto por el usuario, el cual corresponde a 200. No obstante, el proceso puede finalizar antes si es que se consigue llegar a la convergencia antes de dicha cantidad de iteraciones.

¹⁶ *Root mean square*

4.1.4.2 Convergencia y estabilidad

La convergencia se interpreta como tendencia de cada una de las variables de estudio a un único resultado. Estos se expresan en un gráfico que relaciona los residuos tipo RMS de cada ecuación con el número de iteraciones realizadas, el cual se puede observar en una de las ventanas del espacio de trabajo del CFX-SolverManager. En la Figura 4.89 se puede observar el gráfico mencionado.

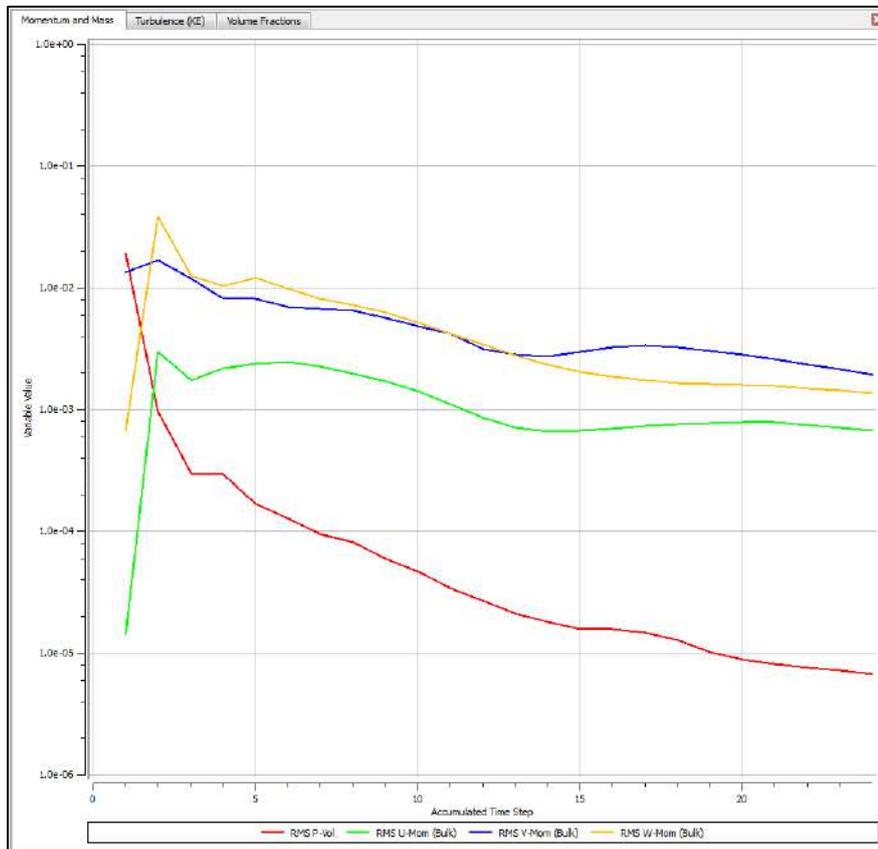


Figura 4.89 Curva de convergencia del CFX-SolverManager.

Fuente: Elaboración propia (2015).

A lo largo de este proceso iterativo los residuos mostrados se van reduciendo cada vez más hasta un punto donde las variaciones entre dos residuos contiguos son muy pequeñas, esto implica un mayor requerimiento de iteraciones para conseguir la convergencia, y por lo tanto, una mayor demanda de tiempo. Sin embargo, se puede interpretar como convergencia cuando la variación entre dos residuos tipo RMS es menor al orden de 10^{-4} .

Se puede observar, a medida que se realizan las iteraciones, si se está logrando una convergencia cuando se aprecia que los residuos van reduciendo, de lo contrario, si estos van aumentando se entiende que están divergiendo.

En cuanto a la estabilidad de los métodos iterativos, se dice que estos son estables cuando no hay divergencia. Como se ha mencionado en el Capítulo 3, la estabilidad puede ser difícil de investigar, especialmente cuando se tienen presente las condiciones de contorno y la no linealidad. Es por este motivo que es común investigar la estabilidad de un método para problemas lineales con coeficientes constantes sin condiciones de borde.

Los resultados del procesamiento se pueden encontrar en el anexo C.

Como se puede apreciar en las figuras mostradas de dicho anexo, en la mayoría de los casos los valores de residuo tipo RMS se encuentran por debajo del orden correspondiente a 10^{-4} después de completar las 200 iteraciones del proceso iterativo.

Para conseguir este objetivo se necesitaría una cantidad mayor de iteraciones, y por ende mayor tiempo de análisis. Al tratarse de un modelo tridimensional este incremento de tiempo puede llegar a ser considerablemente alto; llegando a alcanzar varias semanas de duración.

4.1.5 Resultados

El análisis e interpretación de los resultados forman parte del quinto y último paso de la simulación, el cual es conocido como post-procesamiento. El programa ANSYS-CFX presenta un subprograma llamado CFD-Post el cual permite una adecuada visualización de estas variables analizadas gracias a las múltiples herramientas que presenta.

Al igual que los anteriores subprogramas, el espacio de trabajo está dividido en ventanas de trabajo, en este caso se cuenta con la zona del gráfico (view) y el esquema (outline); en éste es donde se encuentran todas las herramientas creadas por el usuario para la correcta visualización de los datos y de las variables estudiadas, además de los detalles para la configuración de dichas herramientas. Estas características nombradas pueden observarse en la Figura 4.90.

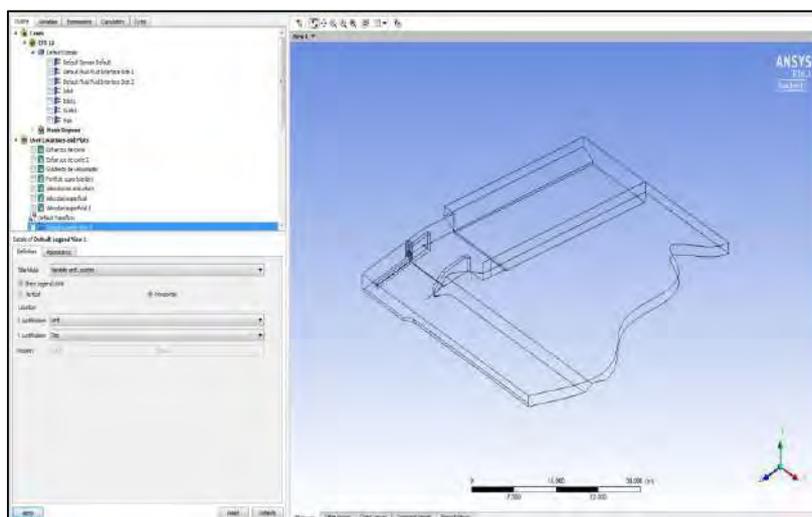


Figura 4.90 Distribución del espacio de trabajo del CFD-Post.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Las variables de interés estudiadas en la presente tesis son aquellas relacionadas con la erosión de la estructura, entre ellas se tiene: los esfuerzos de corte, las velocidades superficiales y, para una mejor visualización, la trayectoria de las líneas de corriente a través del aliviadero.

4.1.5.1 Velocidades de flujo

Las variables referidas a la velocidad del flujo serán expuestas visualmente para cada tipo de condición de caudal y altura de agua, desde la Figura 4.91 hasta la Figura 4.125.

Compuertas abiertas, caudal promedio y tirante de 0.40 m

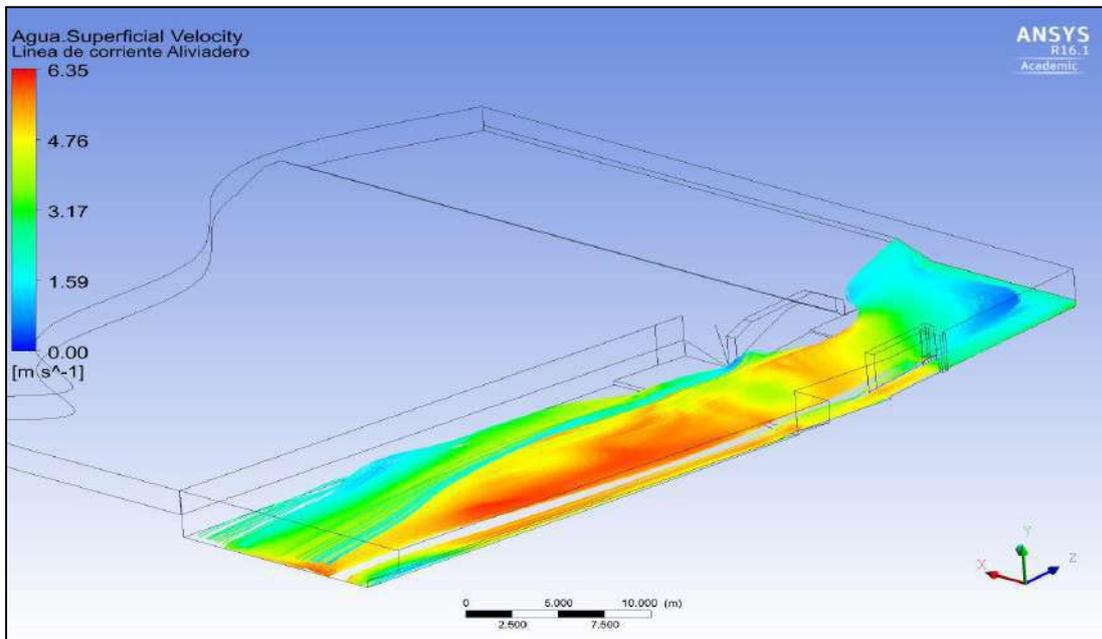


Figura 4.91 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el aliviadero.

Fuente: Elaboración propia (2015).

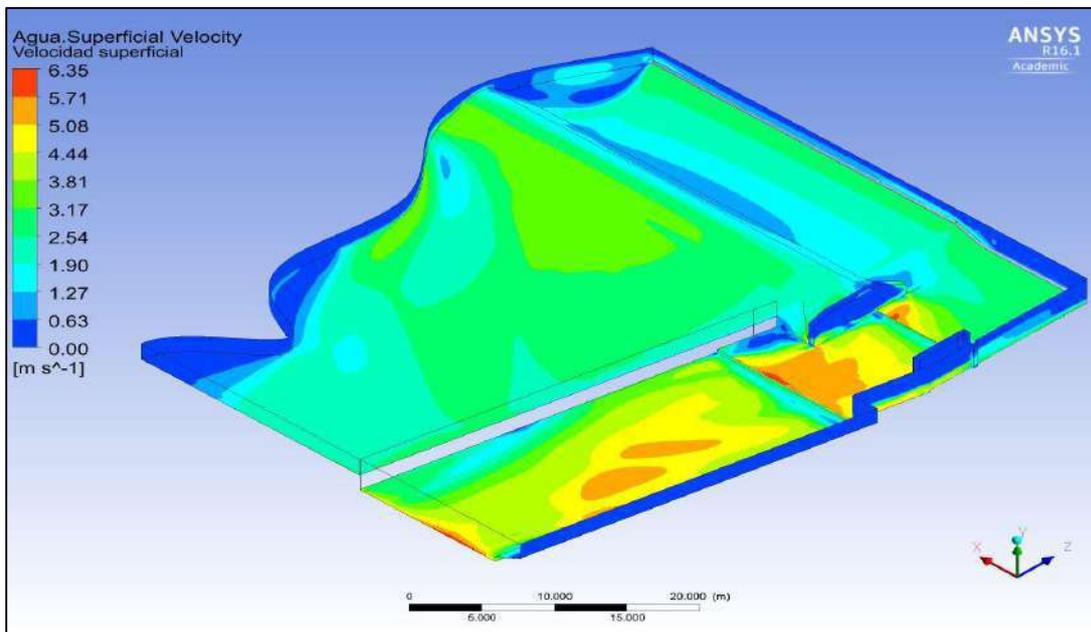


Figura 4.92 Velocidad superficial en la estructura.

Fuente: Elaboración propia (2015).

En la Figura 4.94 se puede observar la variación de la velocidad superficial a lo largo del aliviadero móvil a través de distintas secciones transversales; éstas comienzan a 2 metros desde la base de las compuertas y se extienden hasta una distancia de 6 metros en la losa aguas abajo (Figura 4.93).

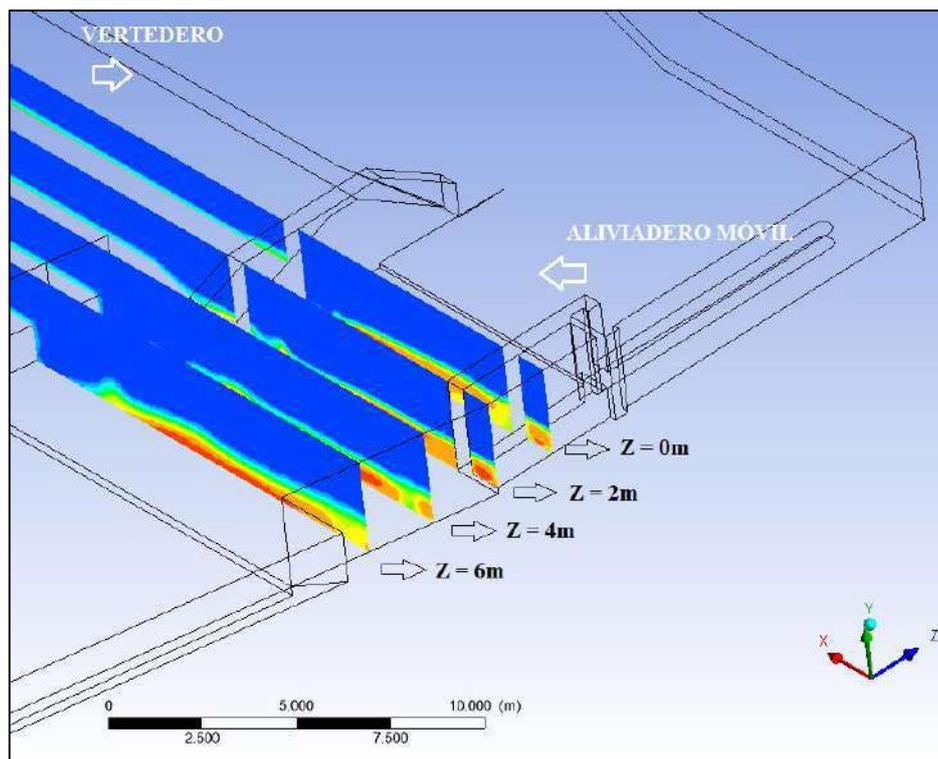


Figura 4.93 Secciones transversales para el análisis de velocidad de flujo en el aliviadero móvil.

Fuente: Elaboración propia (2015).

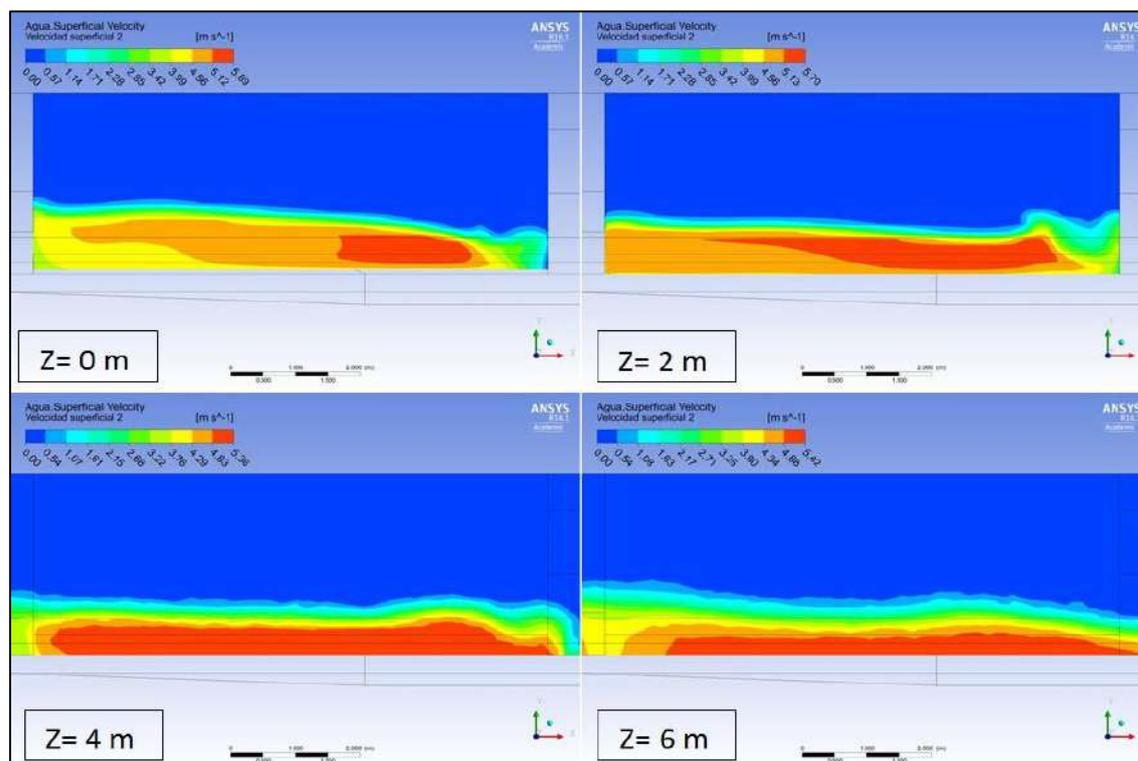


Figura 4.94 Velocidades superficiales a lo largo del aliviadero móvil.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Compuertas abiertas, caudal promedio y tirante de 0.50 m

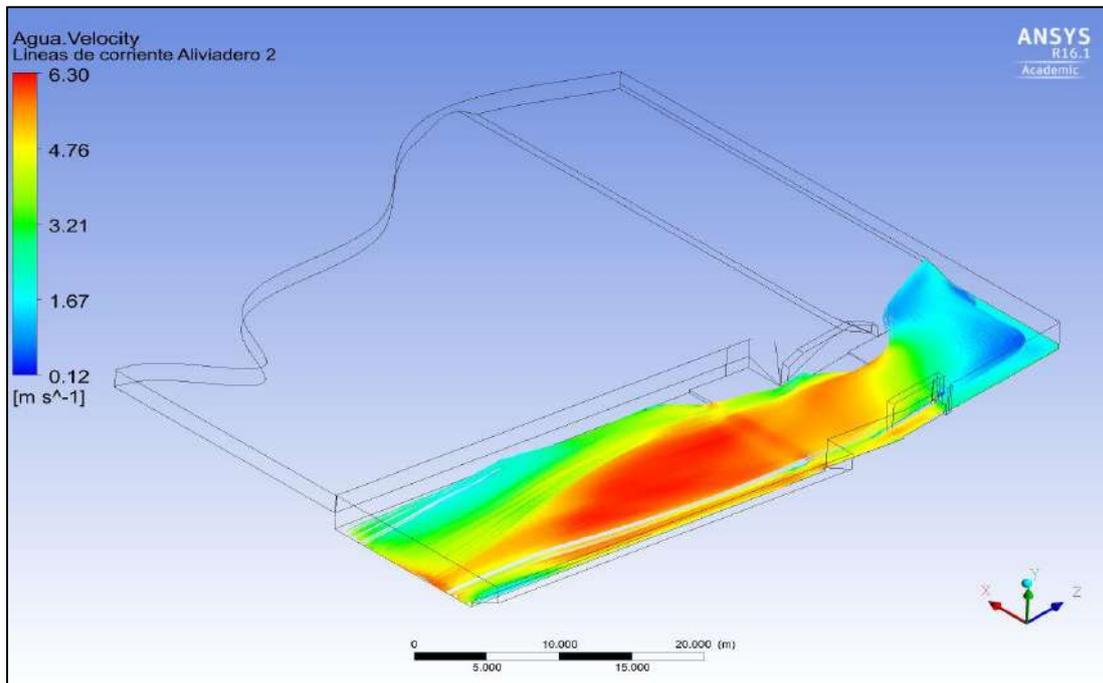


Figura 4.95 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el aliviadero.

Fuente: Elaboración propia (2015).

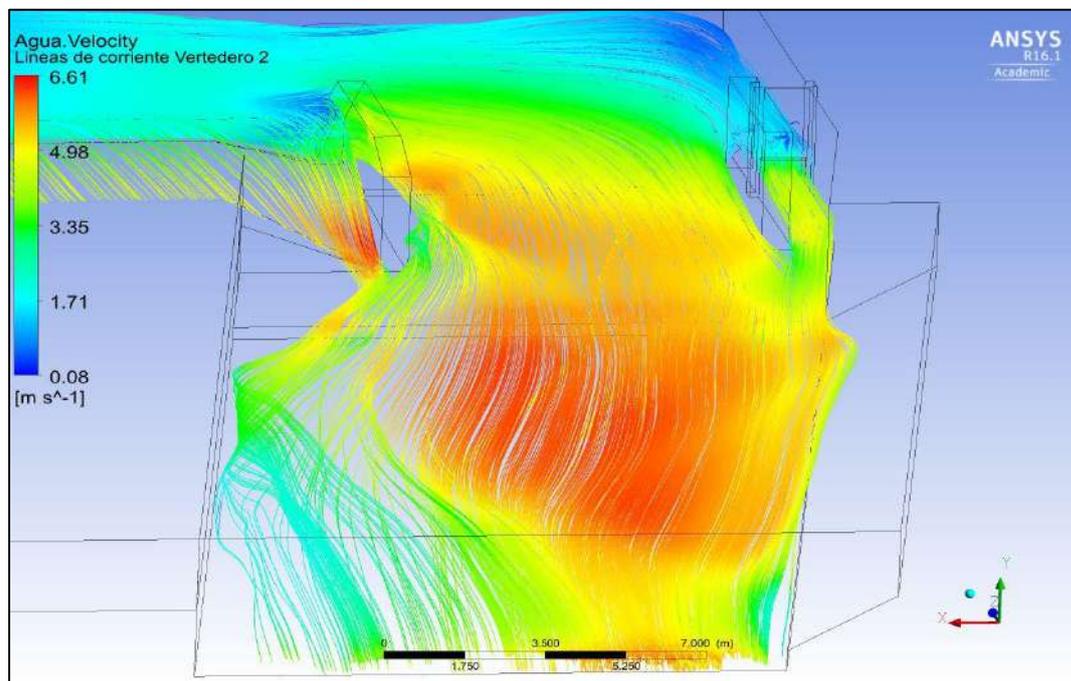


Figura 4.96 Incremento de velocidad en la zona de la grada debido al flujo del vertedero fijo.

Fuente: Elaboración propia (2015).

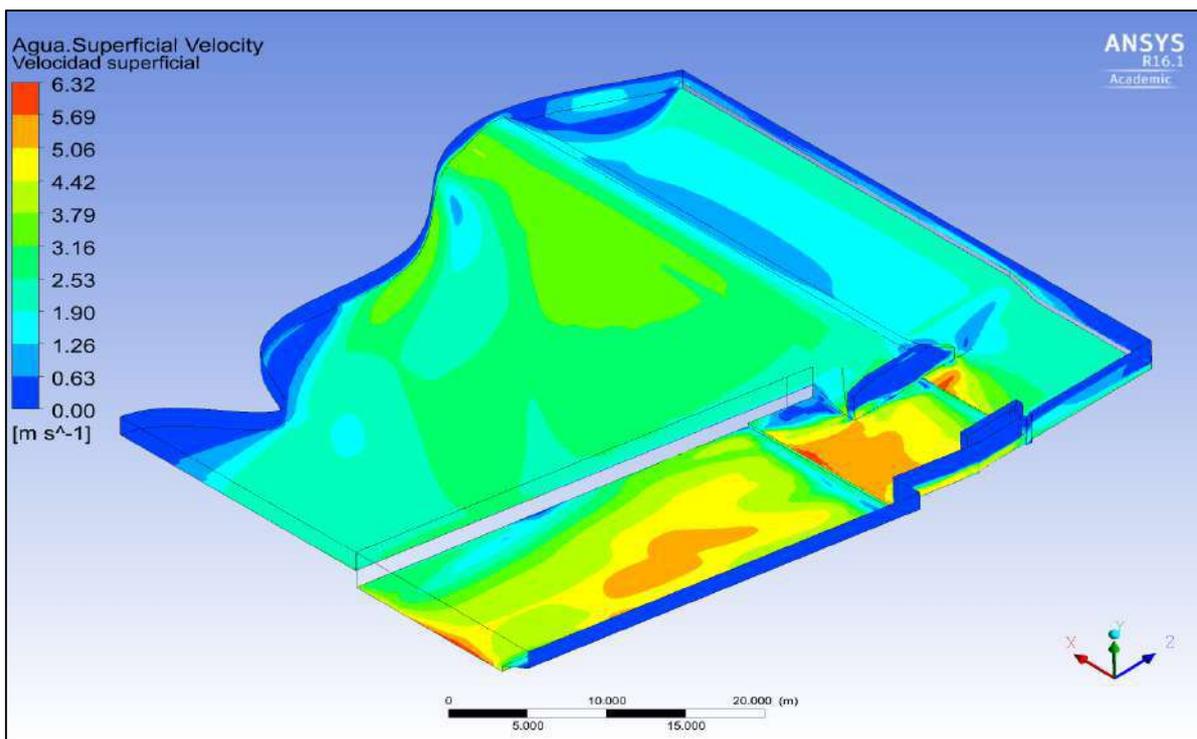


Figura 4.97 Velocidad superficial en la estructura.

Fuente: Elaboración propia (2015).

En la Figura 4.98 se puede observar la variación de la velocidad superficial a lo largo del aliviadero móvil a través de distintas secciones transversales mostradas en la Figura 4.93.

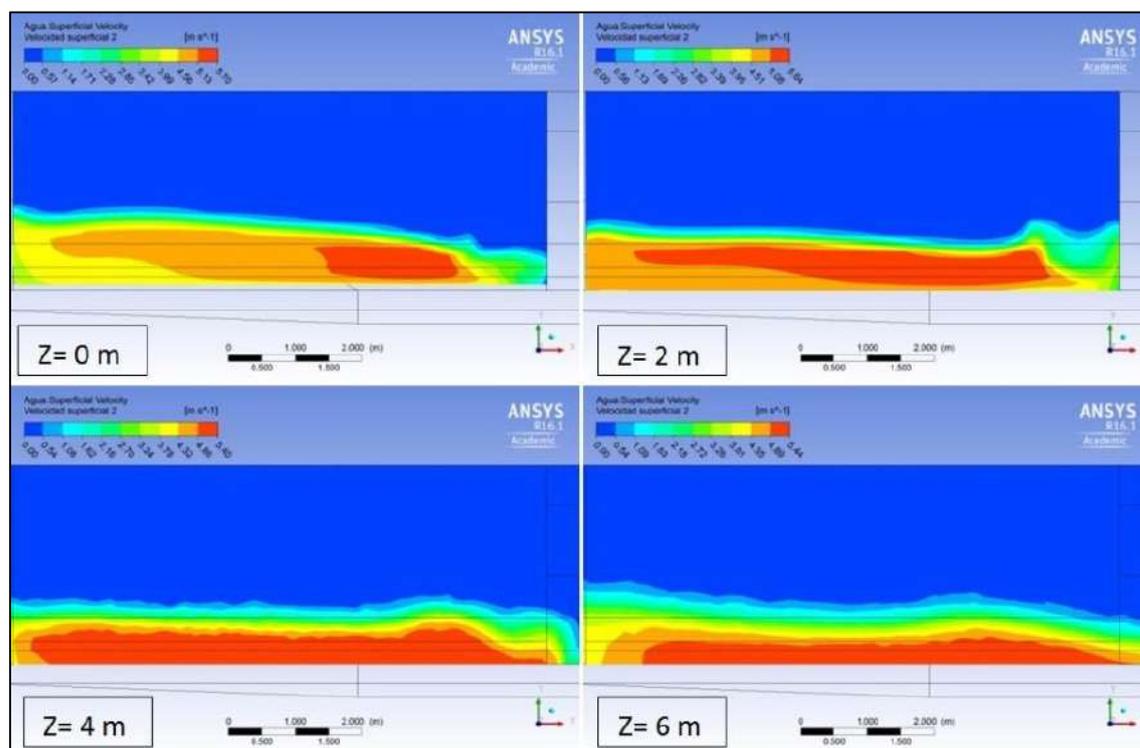


Figura 4.98 Velocidades superficiales a lo largo del aliviadero móvil.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Compuertas abiertas, caudal promedio y tirante de 0.60 m

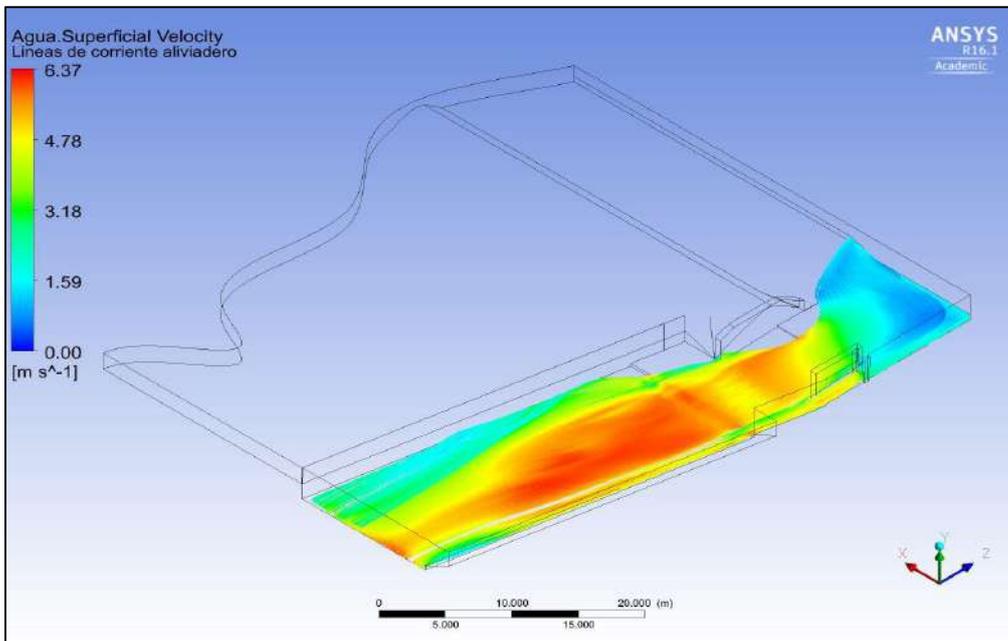


Figura 4.99 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el aliviadero.

Fuente: Elaboración propia (2015).

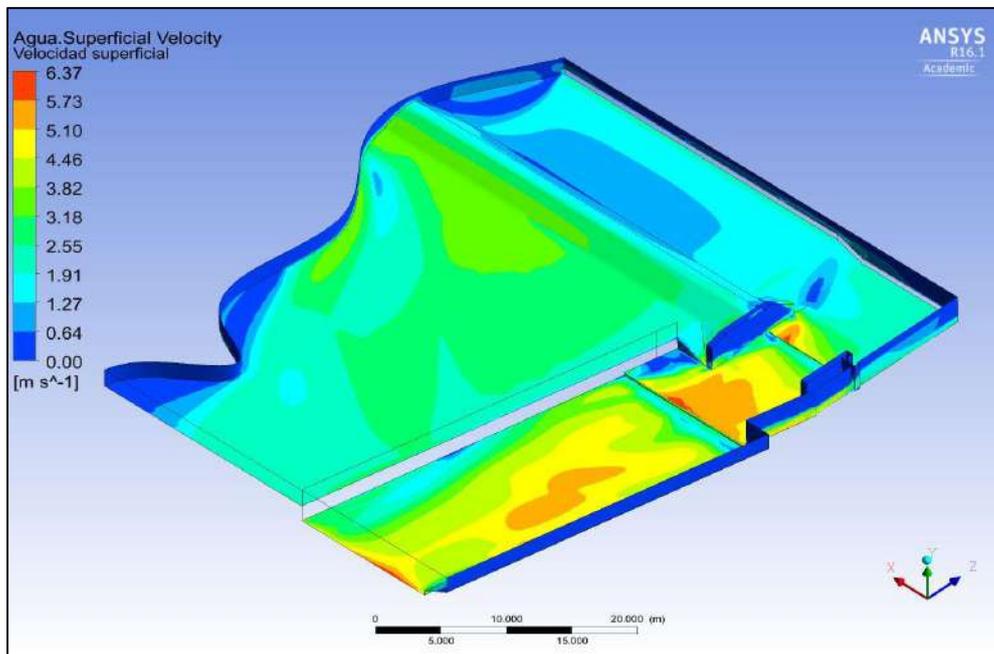


Figura 4.100 Velocidad superficial en la estructura.

Fuente: Elaboración propia (2015).

En la Figura 4.101 se puede observar la variación de la velocidad superficial a lo largo del aliviadero móvil a través de distintas secciones transversales mostradas en la Figura 4.93.

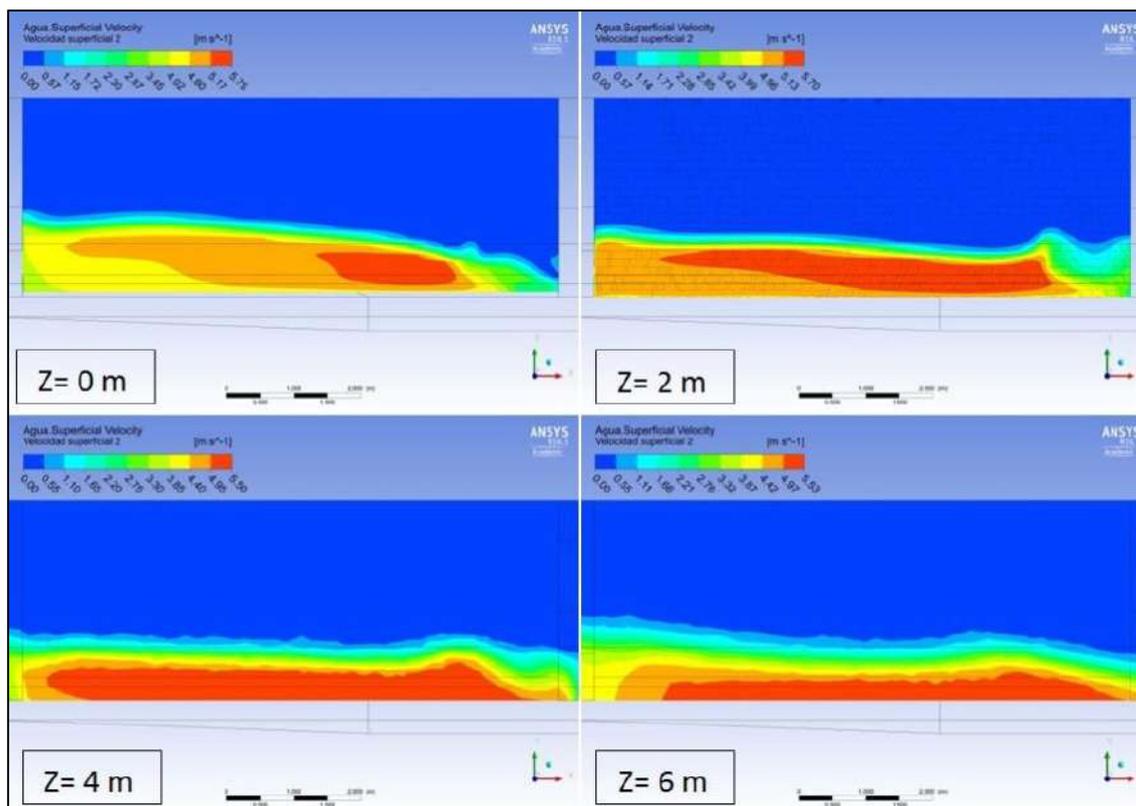


Figura 4.101 Velocidades superficiales a lo largo del aliviadero móvil.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Compuertas abiertas, caudal máximo y tirante de 0.40 m

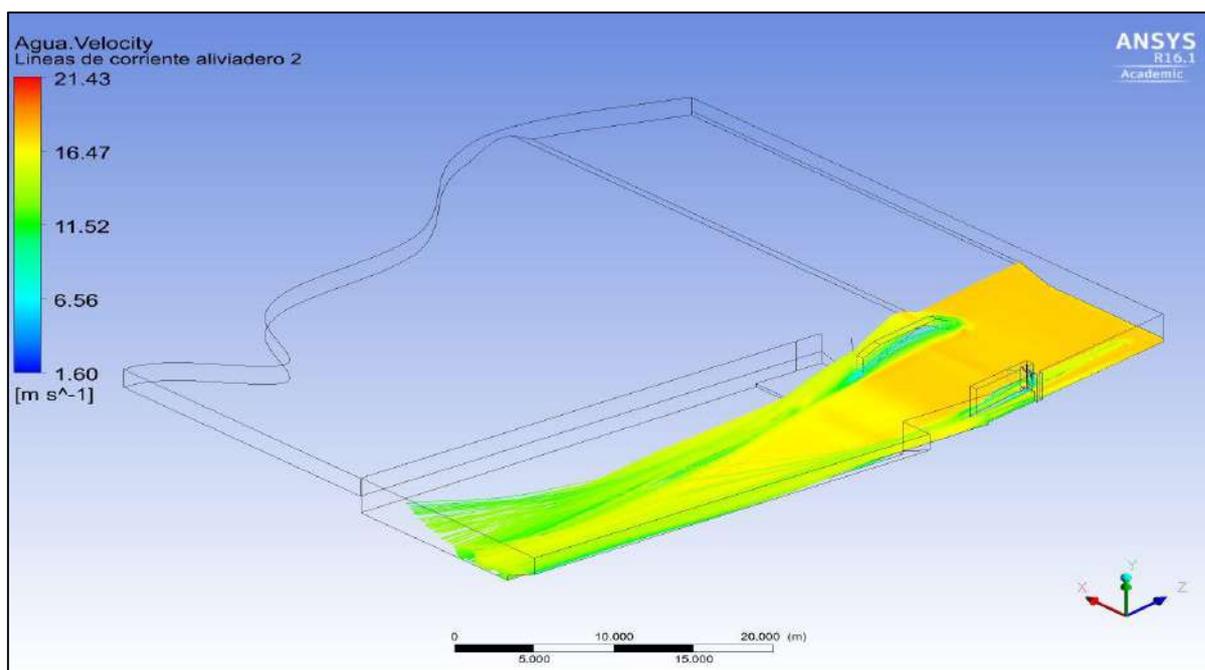


Figura 4.102 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el aliviadero.

Fuente: Elaboración propia (2015).

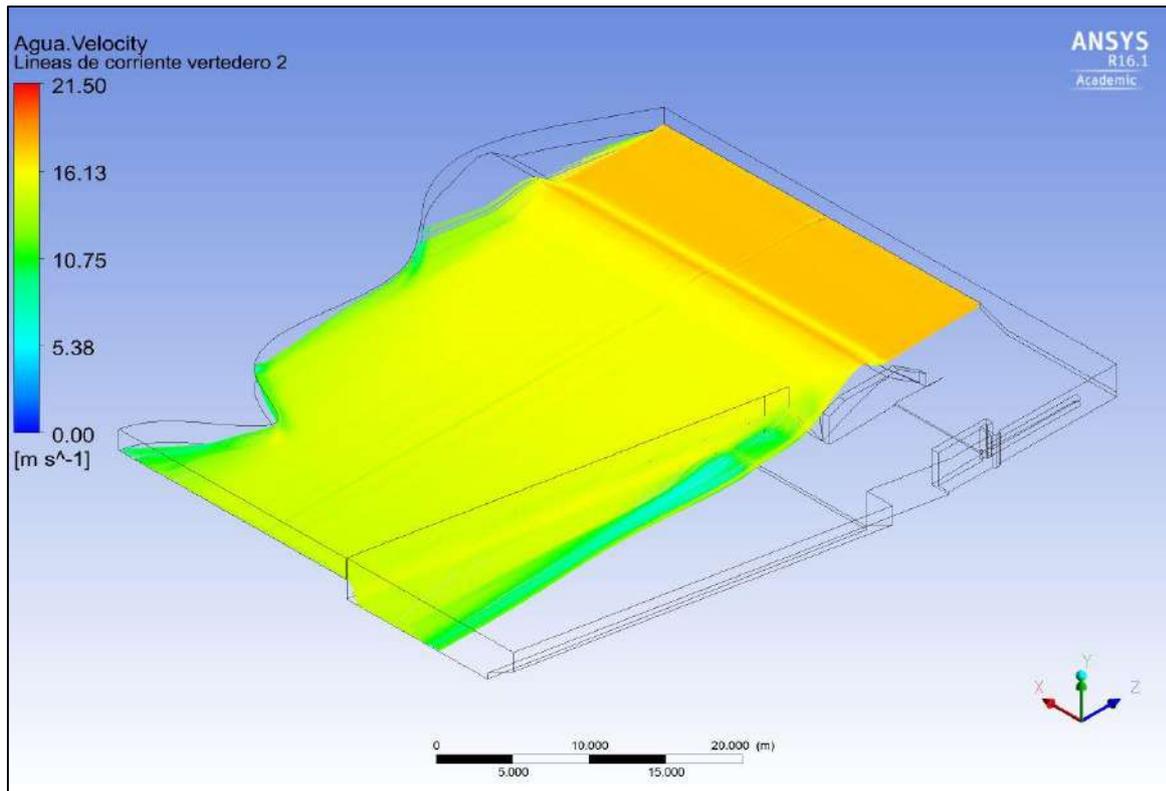


Figura 4.103 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el vertedero.

Fuente: Elaboración propia (2015).

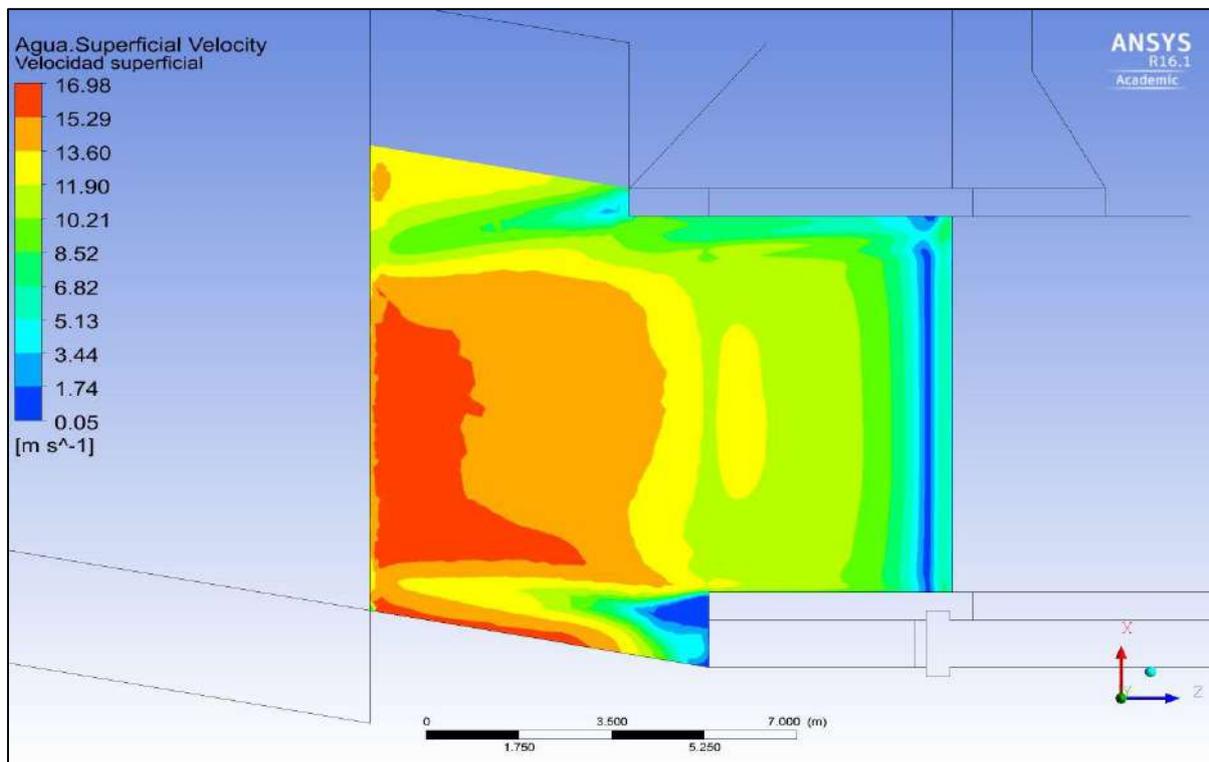


Figura 4.104 Velocidad superficial en la superficie de análisis.

Fuente: Elaboración propia (2015).

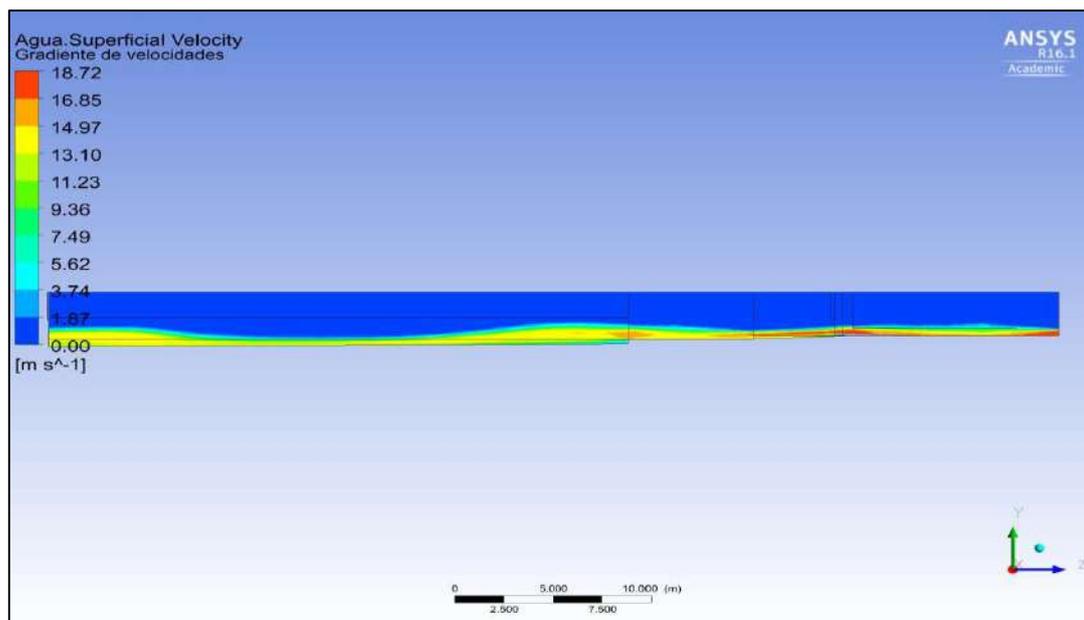


Figura 4.105 Gradiente de velocidades en perfil de superficie libre.

Fuente: Elaboración propia (2015).

En la Figura 4.106 se puede observar la variación de la velocidad superficial a lo largo del aliviadero móvil a través de distintas secciones transversales mostradas en la Figura 4.93.

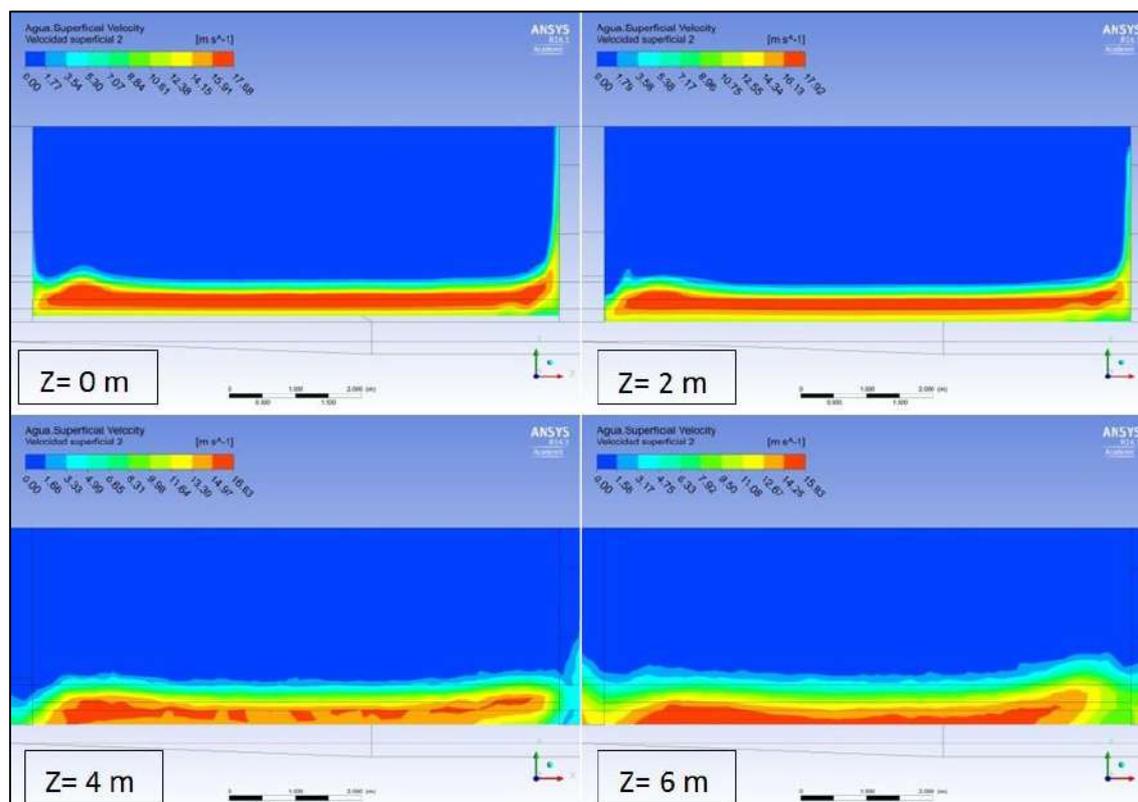


Figura 4.106 Velocidades superficiales a lo largo del aliviadero móvil.

Fuente: Elaboración propia (2015).

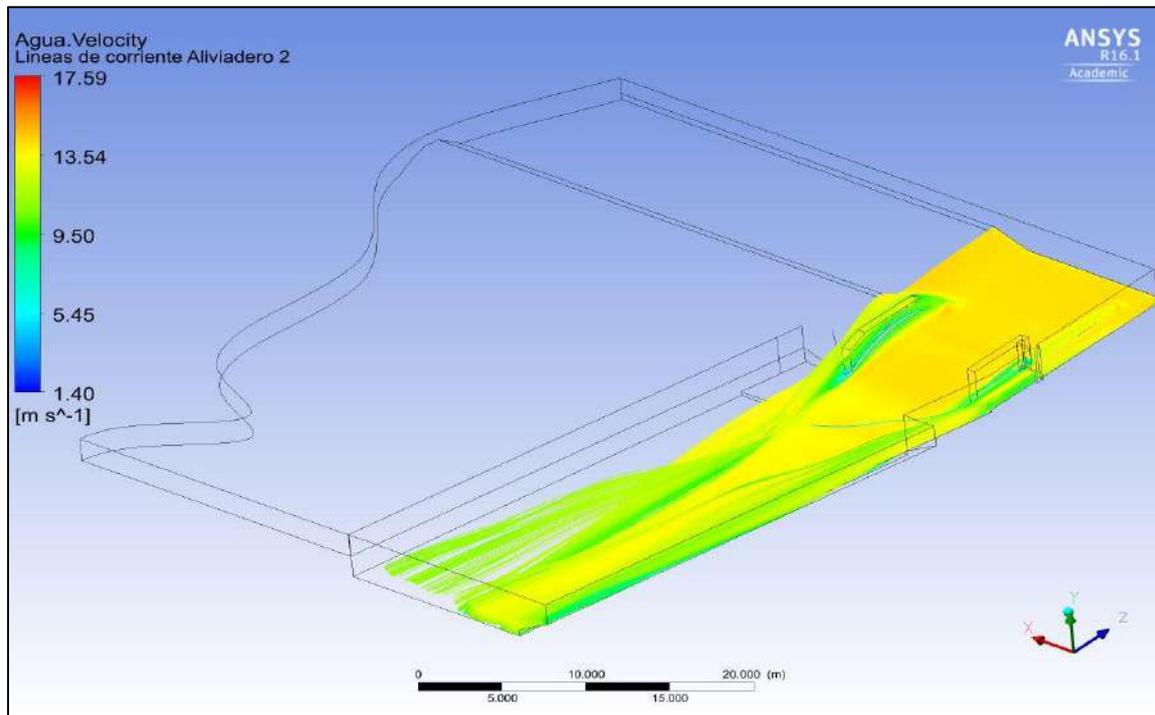
Compuertas abiertas, caudal máximo y tirante de 0.50 m

Figura 4.107 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el aliviadero.

Fuente: Elaboración propia (2015).

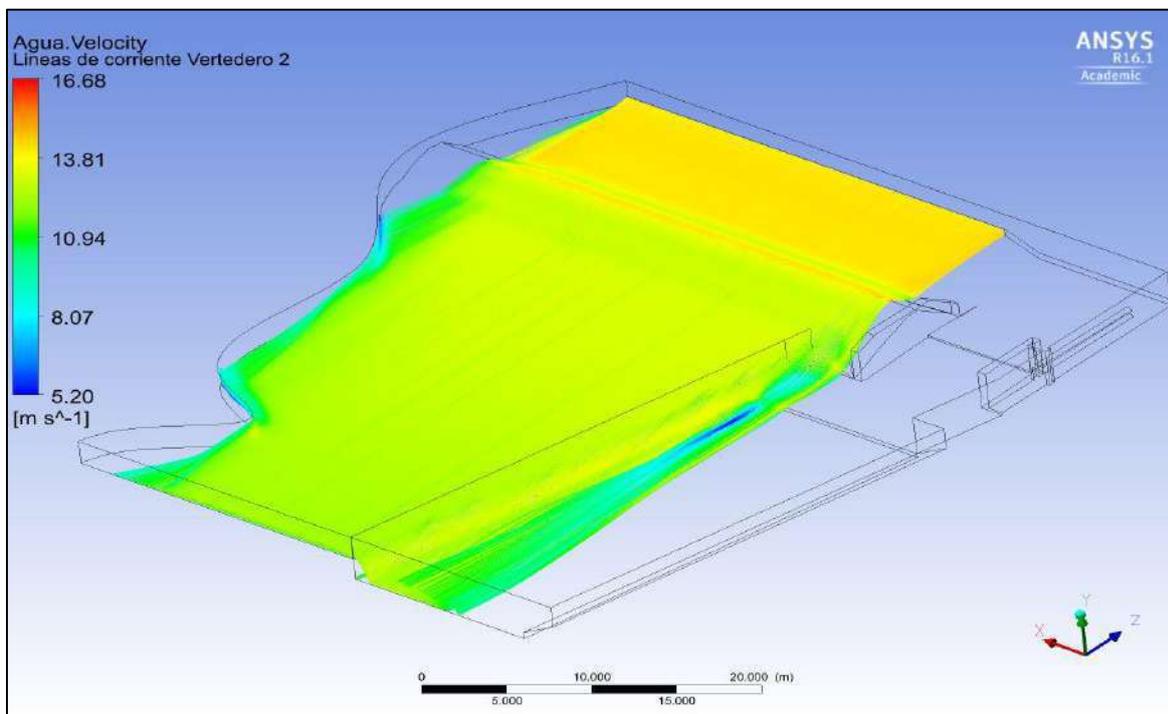


Figura 4.108 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el vertedero.

Fuente: Elaboración propia (2015).

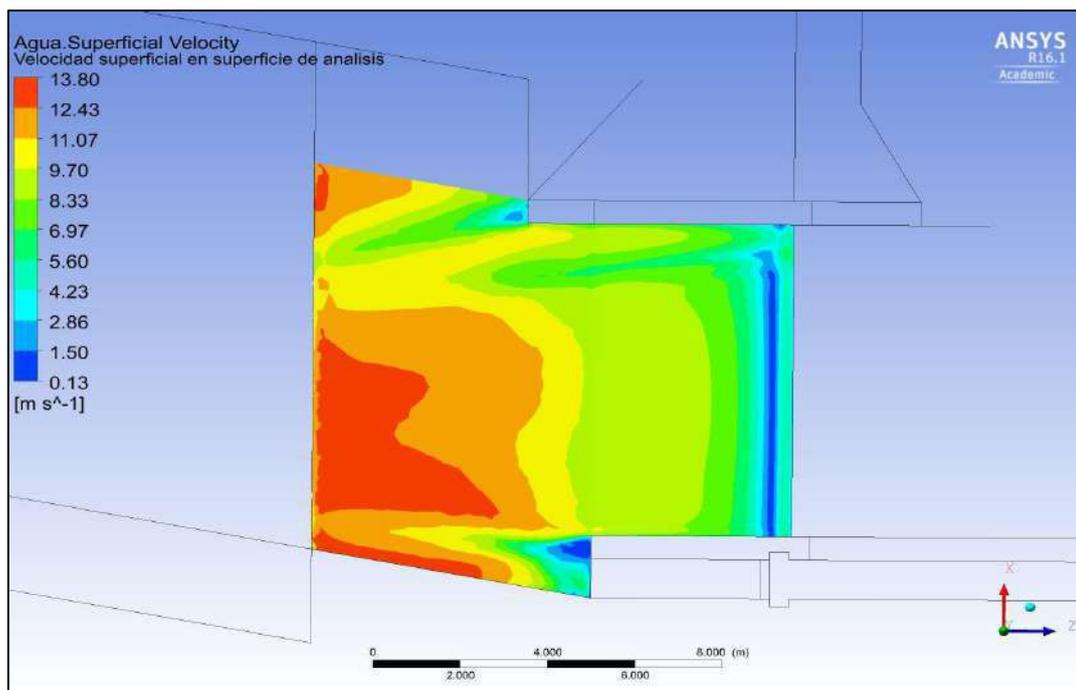


Figura 4.109 Velocidad superficial en la superficie de análisis.

Fuente: Elaboración propia (2015).

En la Figura 4.110 se puede observar la variación de la velocidad superficial a lo largo del aliviadero móvil a través de distintas secciones transversales mostradas en la Figura 4.93.

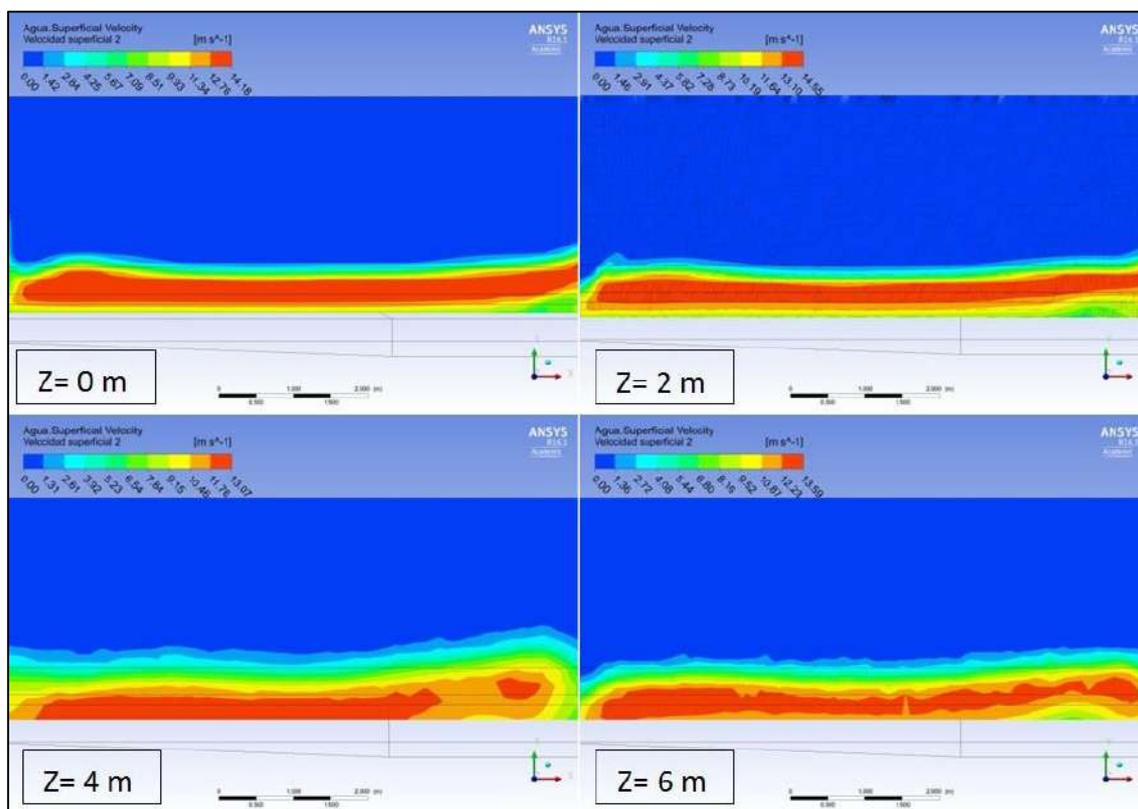


Figura 4.110 Velocidades superficiales a lo largo del aliviadero móvil.

Fuente: Elaboración propia (2015).

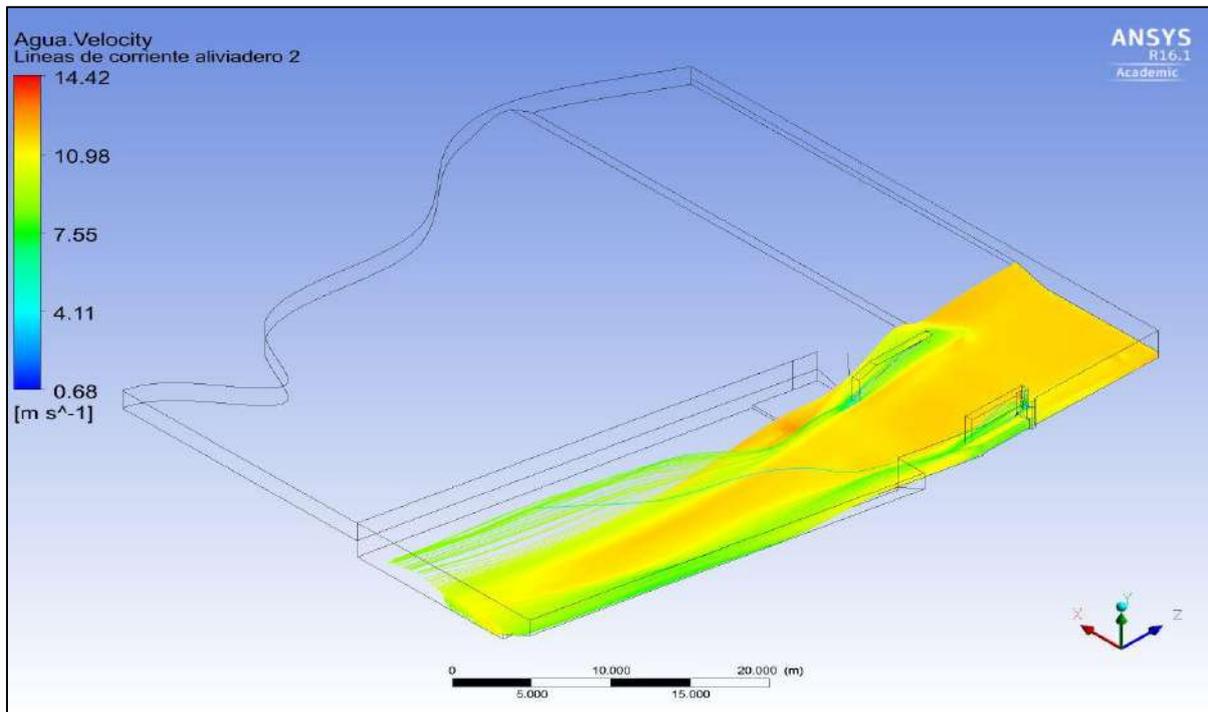
Compuertas abiertas, caudal máximo y tirante de 0.60 m

Figura 4.111 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el aliviadero.

Fuente: Elaboración propia (2015).

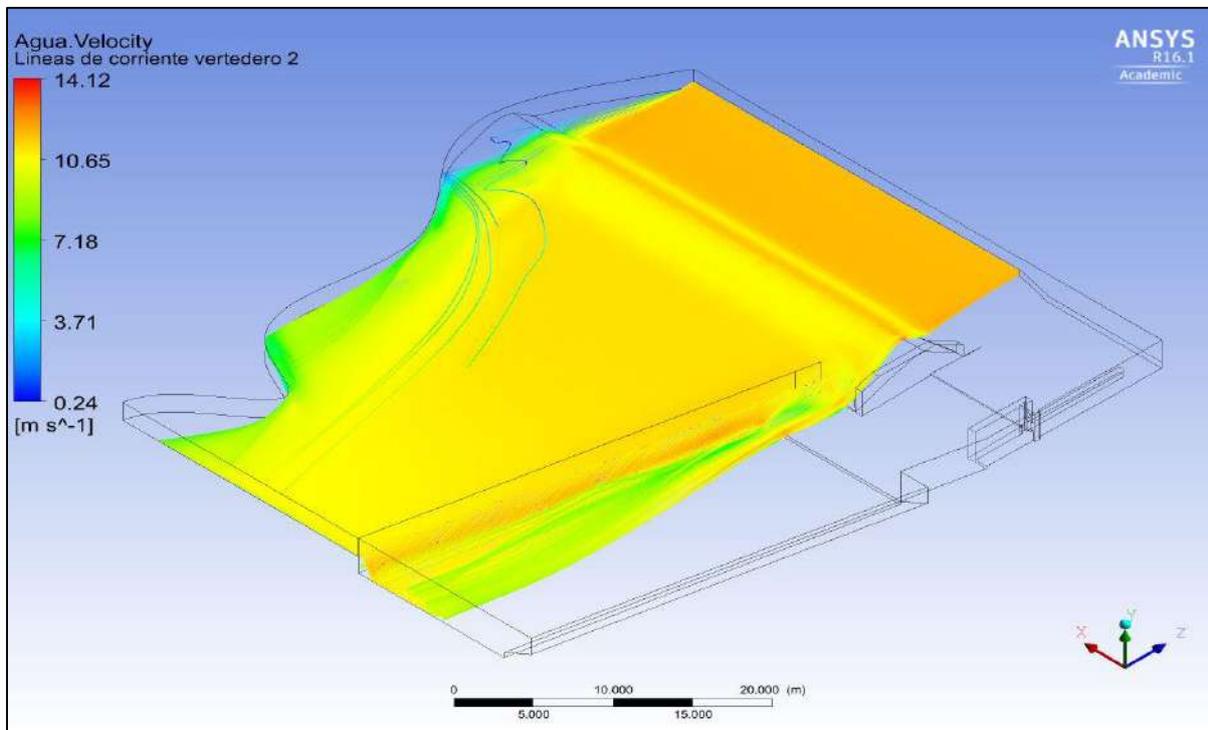


Figura 4.112 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el vertedero.

Fuente: Elaboración propia (2015).

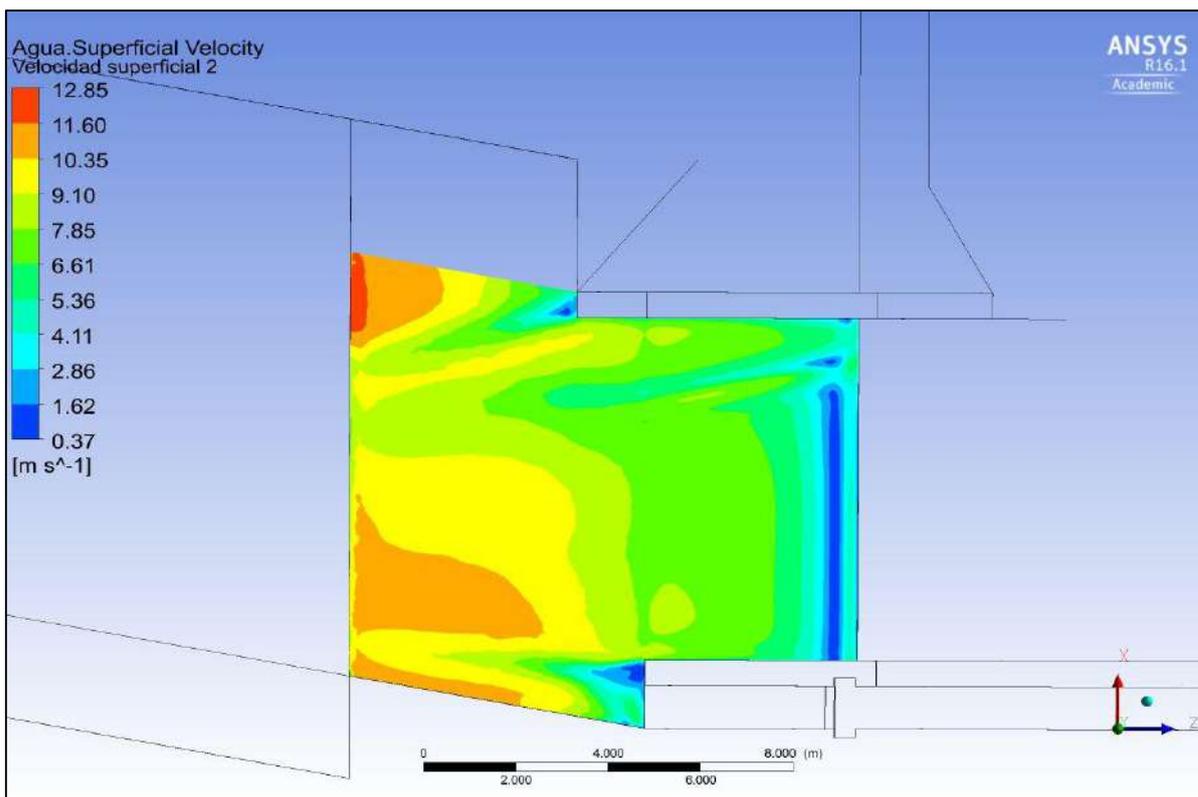


Figura 4.113 Velocidad superficial en la superficie de análisis.

Fuente: Elaboración propia (2015).

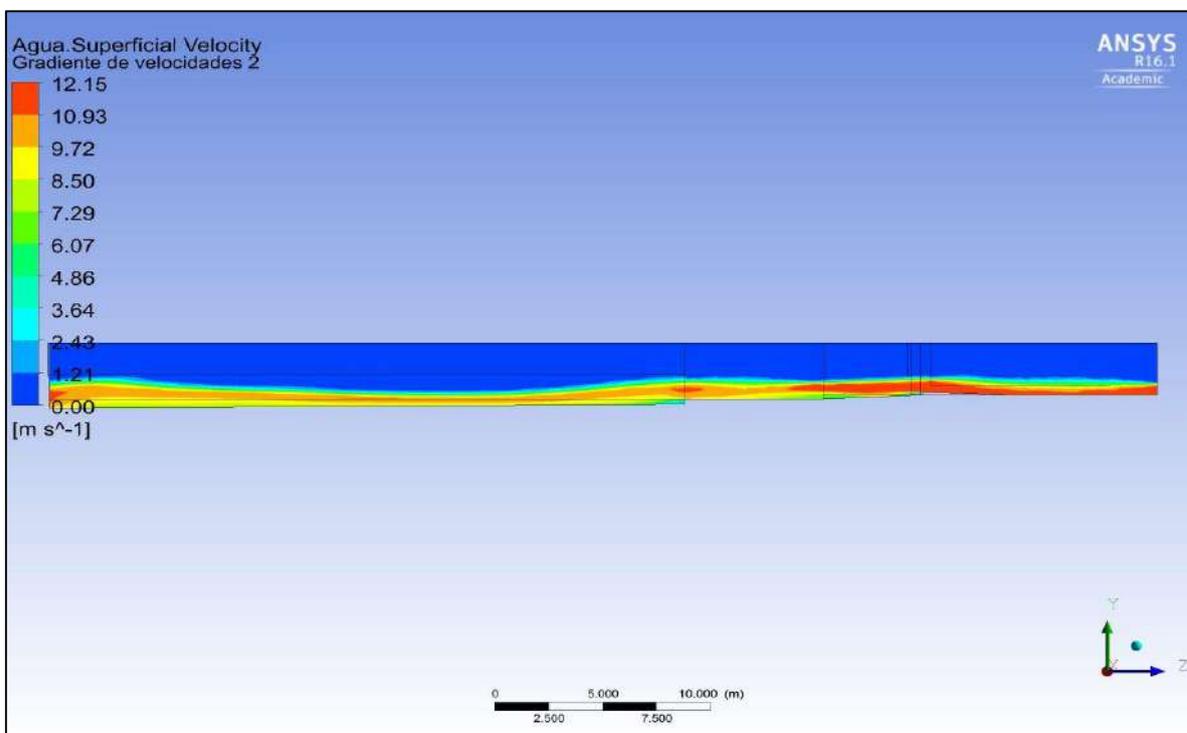


Figura 4.114 Gradiente de velocidades en perfil de superficie libre.

Fuente: Elaboración propia (2015).

En la Figura 4.115 se puede observar la variación de la velocidad superficial a lo largo del aliviadero móvil a través de distintas secciones transversales mostradas en la Figura 4.93.

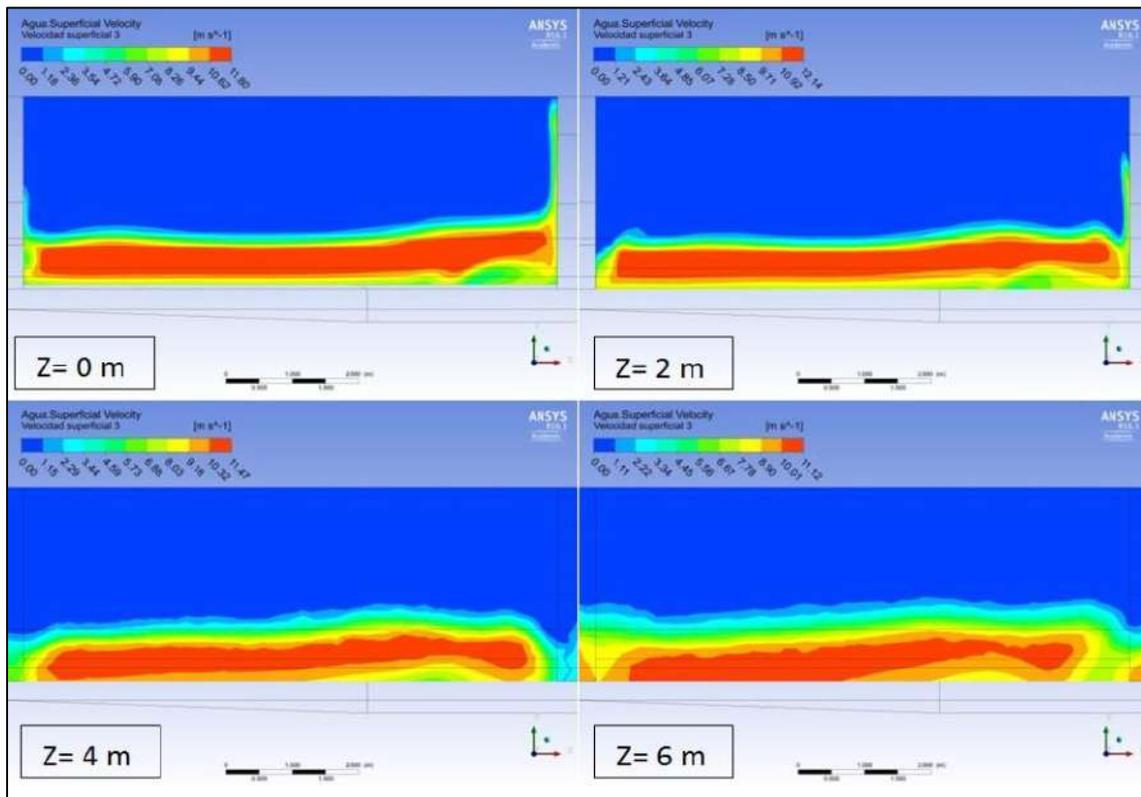


Figura 4.115 Velocidades superficiales a lo largo del aliviadero móvil.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Compuertas cerradas y caudal promedio.

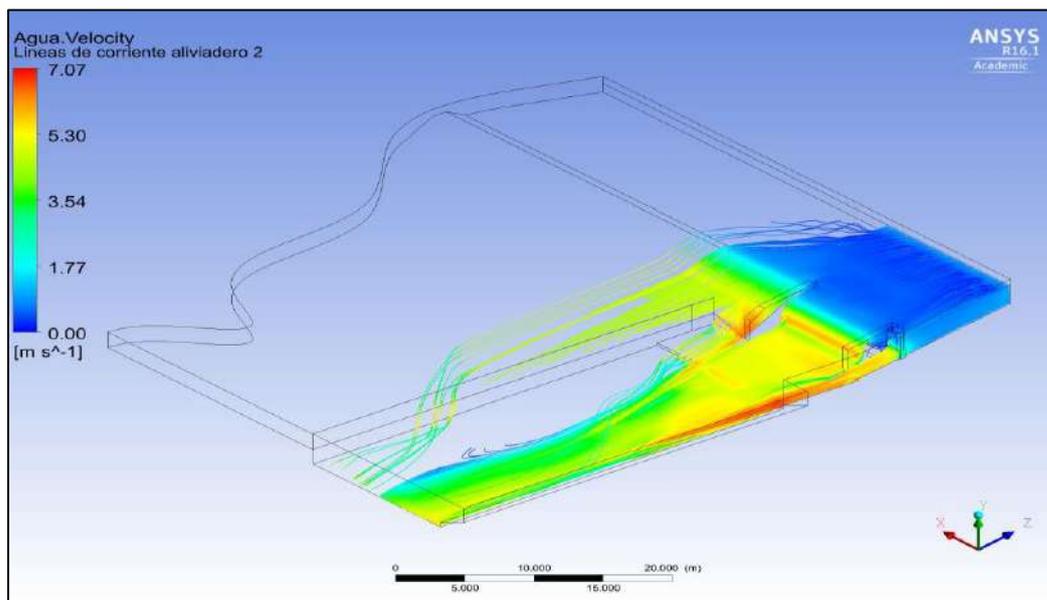


Figura 4.116 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el aliviadero. Vista isométrica.

Fuente: Elaboración propia (2015).

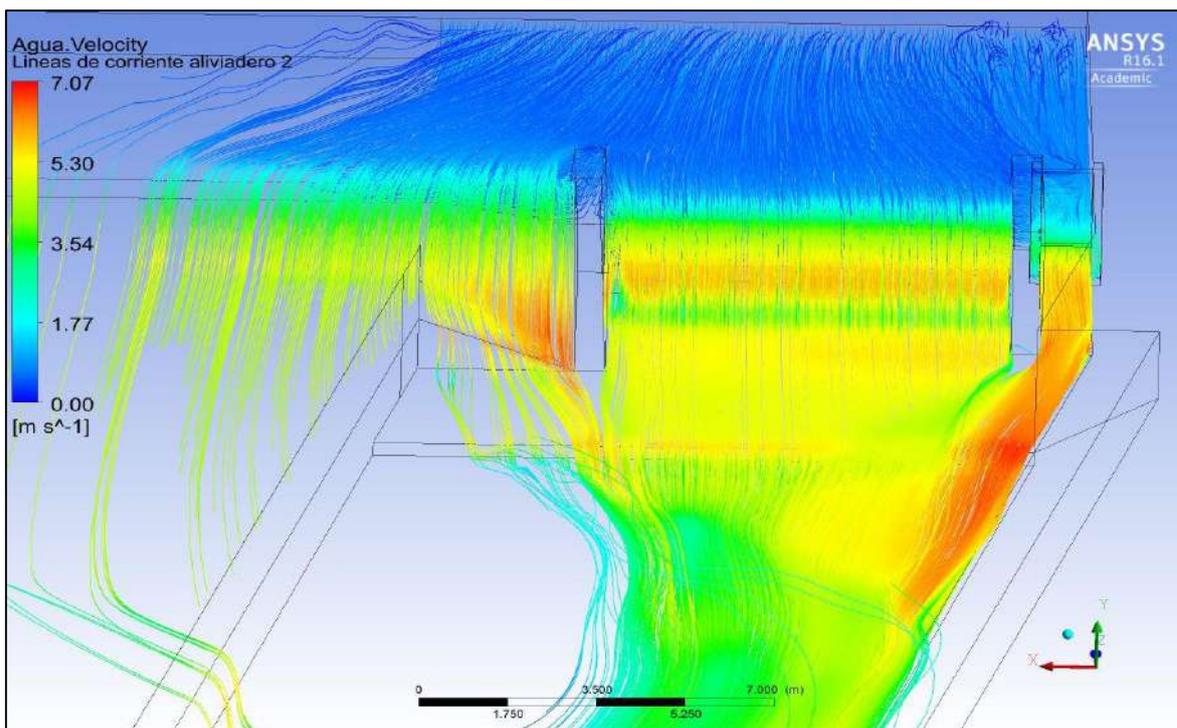


Figura 4.117 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el aliviadero. Vista frontal.

Fuente: Elaboración propia (2015).

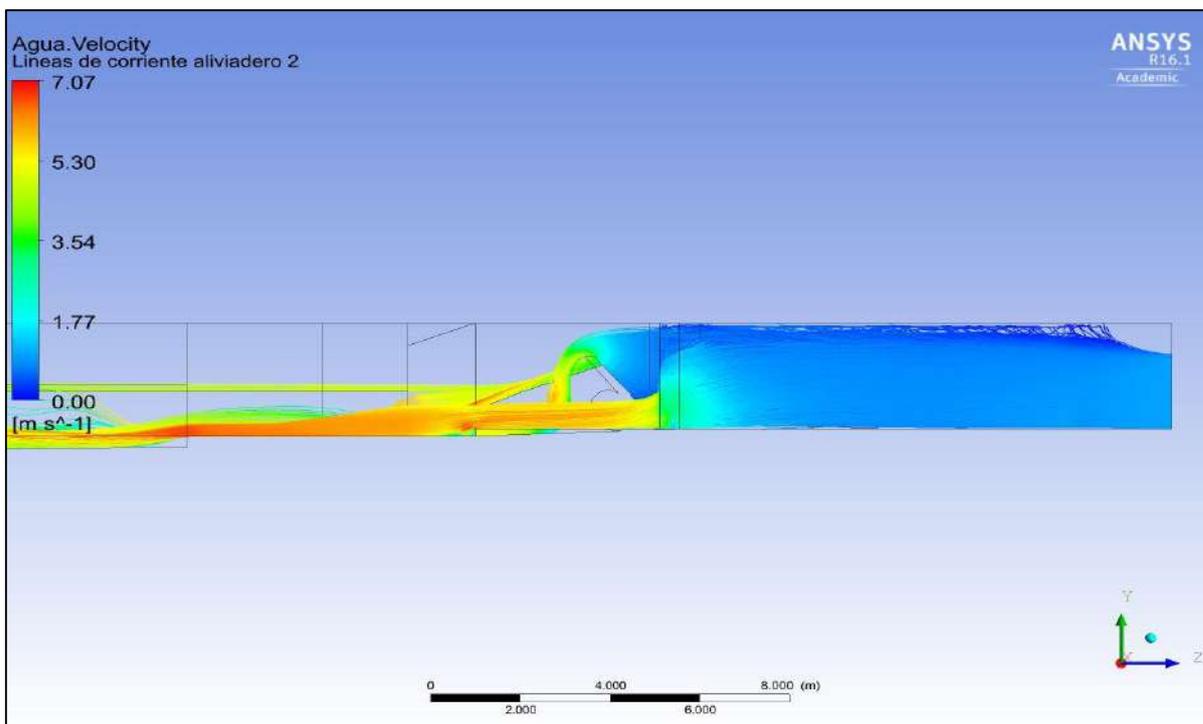


Figura 4.118 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el aliviadero. Vista en elevación.

Fuente: Elaboración propia (2015).

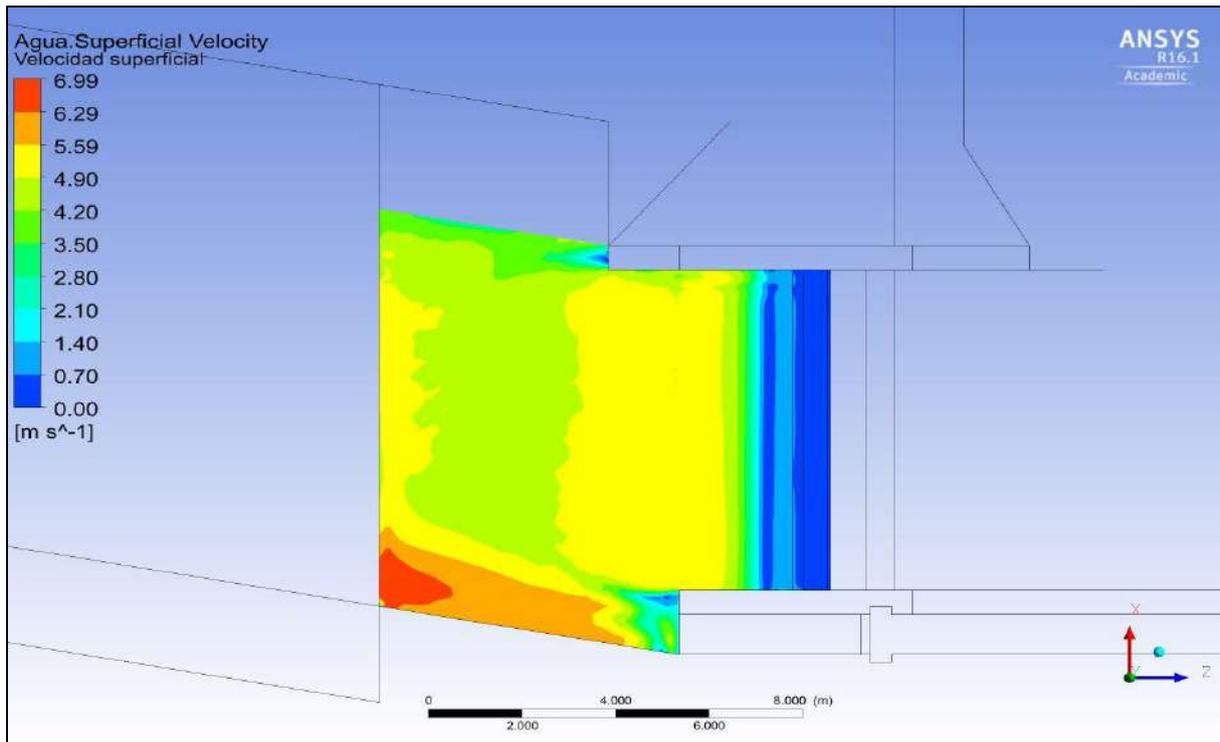


Figura 4.119 Velocidad superficial en la superficie de análisis.

Fuente: Elaboración propia (2015).

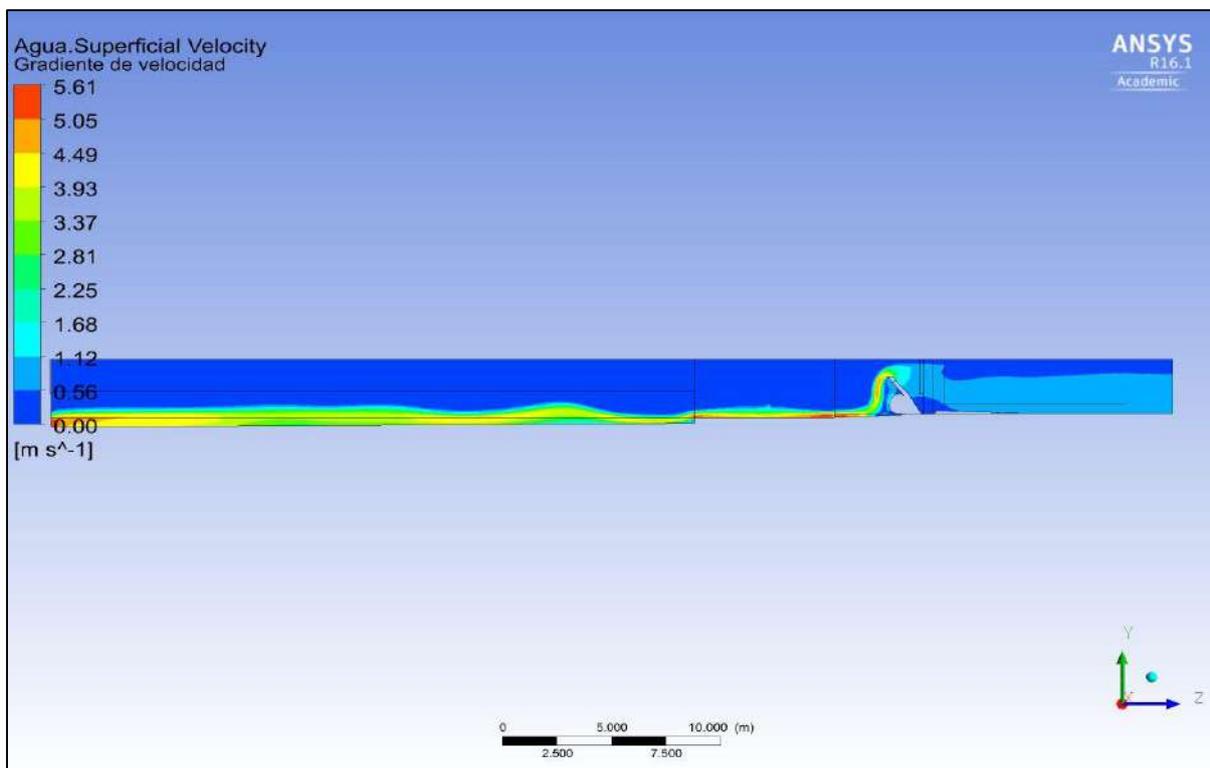


Figura 4.120 Gradiente de velocidades en perfil de superficie libre.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Compuertas cerradas y caudal máximo.

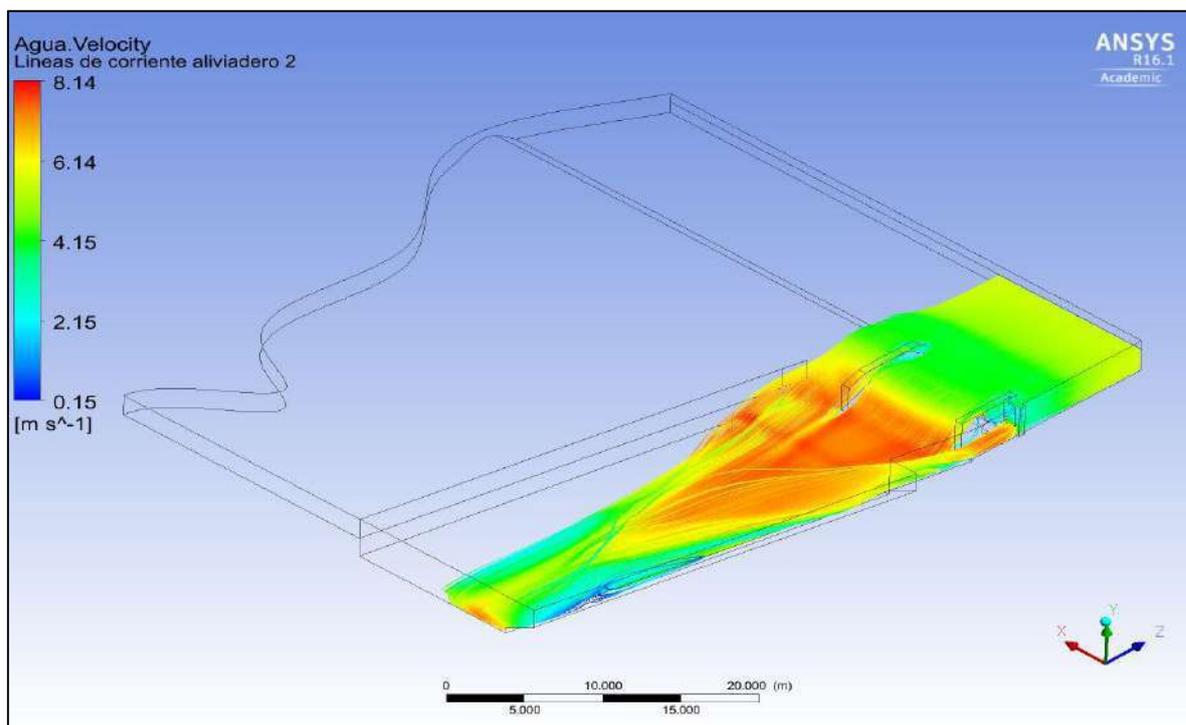


Figura 4.121 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el aliviadero. Vista isométrica.

Fuente: Elaboración propia (2015).

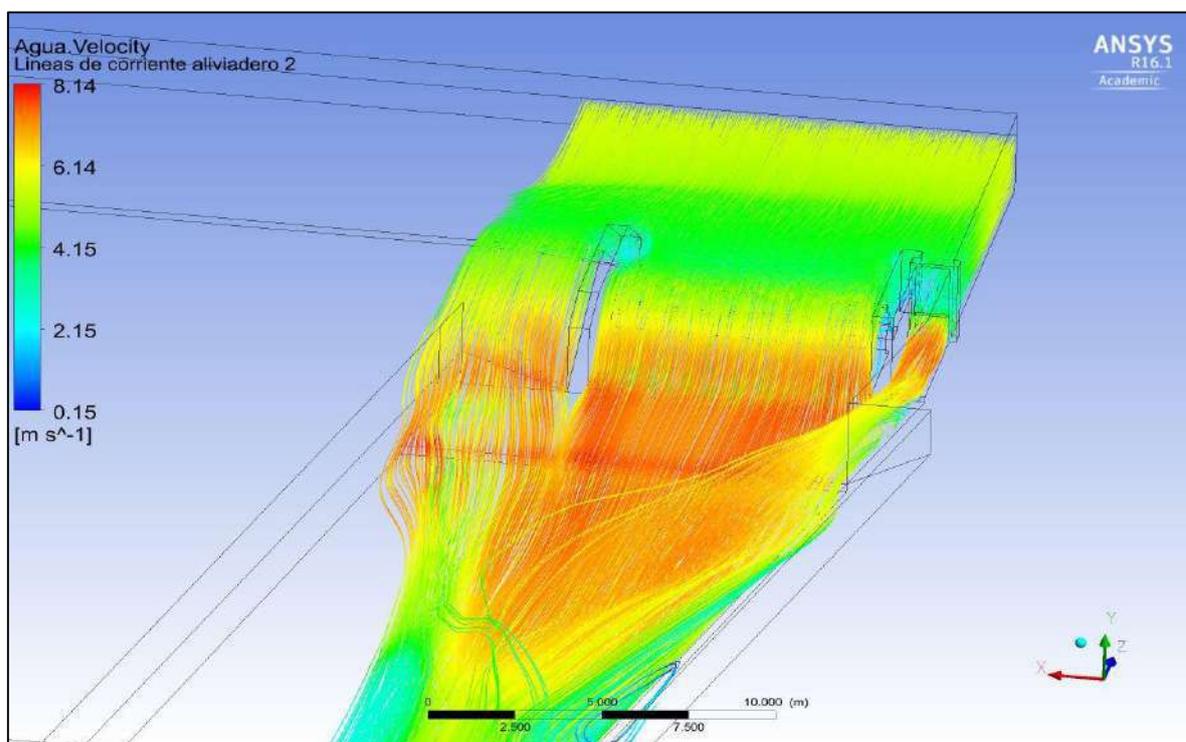


Figura 4.122 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el aliviadero. Vista frontal.

Fuente: Elaboración propia (2015).

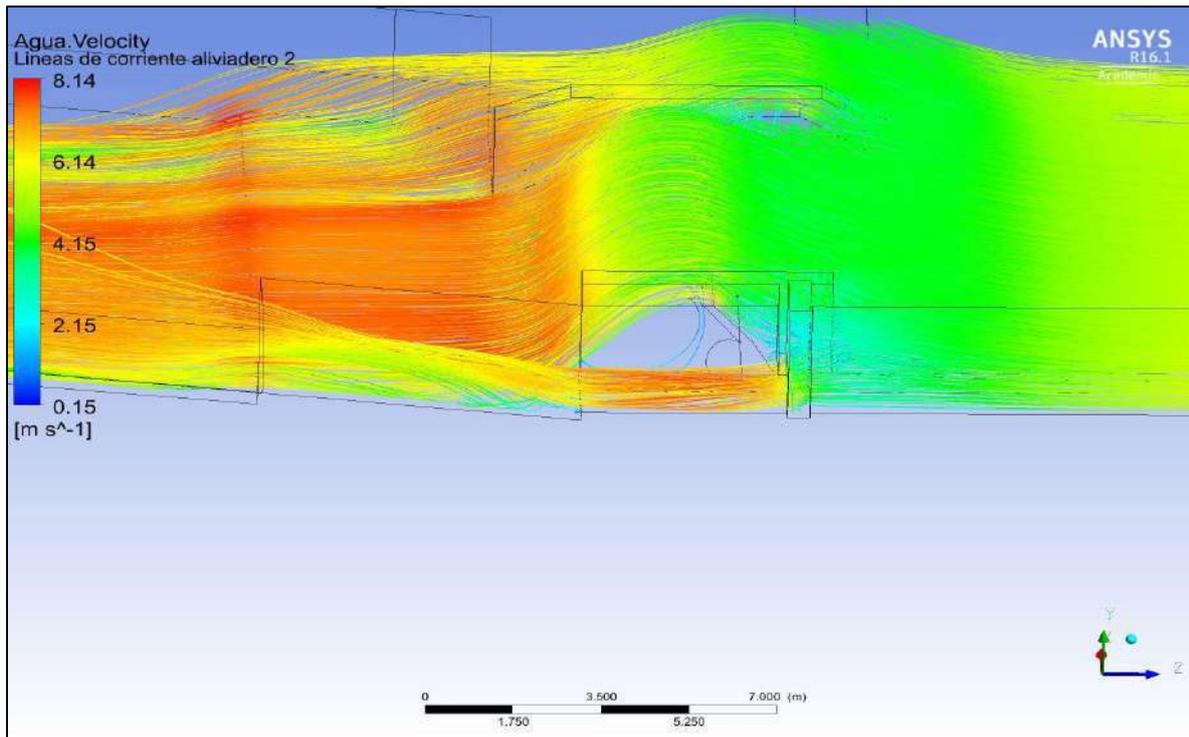


Figura 4.123 Velocidad superficial de las líneas de corriente en el alviadero. Vista en elevación.

Fuente: Elaboración propia (2015).

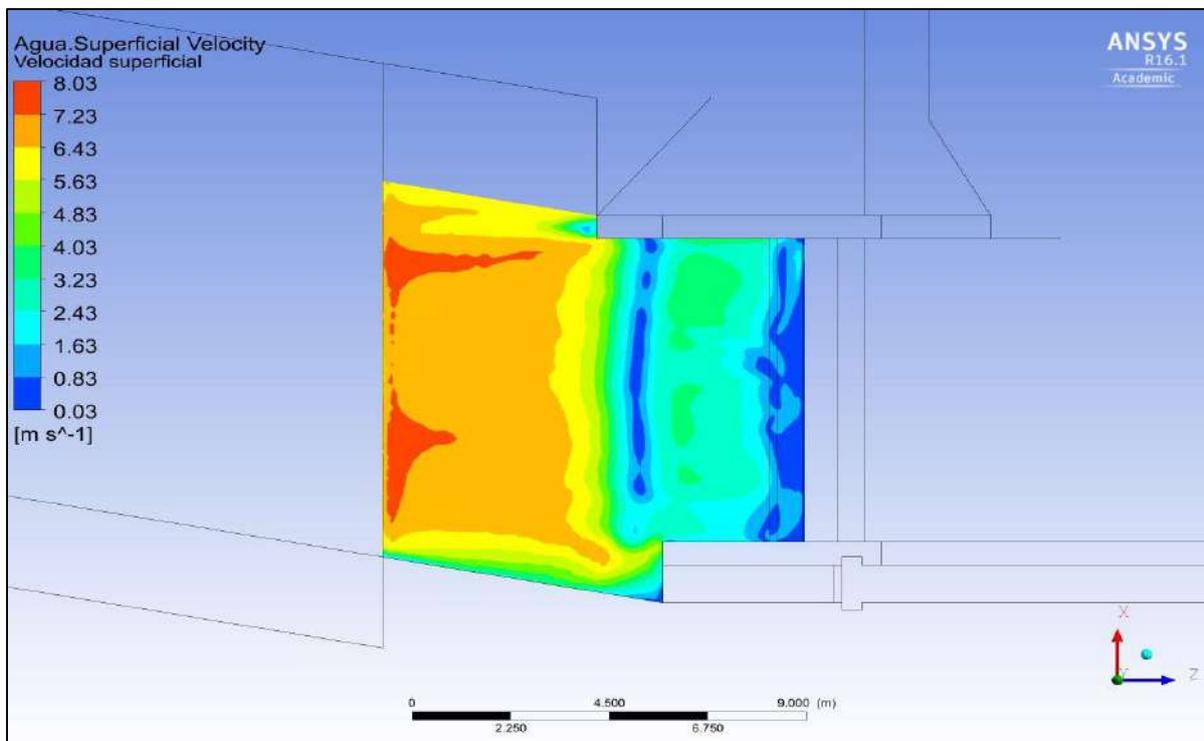


Figura 4.124 Velocidad superficial en la superficie de análisis.

Fuente: Elaboración propia (2015).

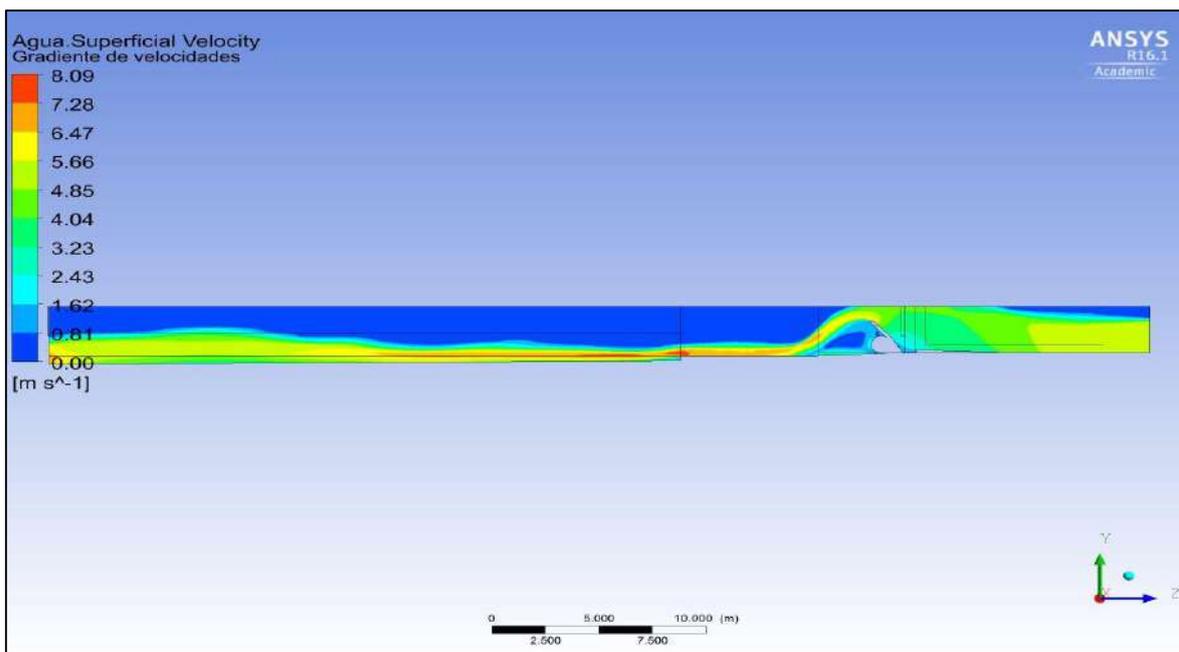


Figura 4.125 Gradiente de velocidades en perfil de superficie libre.
Fuente: Elaboración propia (2015).

En la Tabla 4.6 y Tabla 4.7 se encuentran los datos resumidos de las velocidades expuestas en los gráficos anteriores.

Tabla 4.6 Velocidades máximas del flujo en la zona de superficie de análisis.

Condición	Sección	Tirante	Velocidad máxima (m/s)	
			En Qprom	En Qmáx
Compuertas abiertas	Z = 0 m	h = 0.4 m	4.47	11.36
		h = 0.5 m	4.22	9.05
		h = 0.6 m	4.26	7.38
Compuertas abiertas	Z = 2 m	h = 0.4 m	4.61	11.68
		h = 0.5 m	4.66	9.25
		h = 0.6 m	4.68	7.46
Compuertas abiertas	Z = 4 m	h = 0.4 m	5.1	14.88
		h = 0.5 m	5.14	12.47
		h = 0.6 m	5.22	9.29
Compuertas abiertas	Z = 6 m	h = 0.4 m	5.23	15.04
		h = 0.5 m	5.29	11.88
		h = 0.6 m	5.38	10.04
Compuertas cerradas	-	-	4.95	6.65

Fuente: Elaboración propia (2015).

Tabla 4.7 Velocidades máximas del flujo en la zona del aliviadero móvil.

Condición		Velocidad máxima (m/s)	
		En Q_{prom}	En $Q_{máx}$
Compuertas abiertas	h = 0.4 m	6.35	17.52
	h = 0.5 m	6.30	14.13
	h = 0.6 m	6.37	11.68
Compuertas cerradas		5.28	8.14

Fuente: Elaboración propia (2015).

Los datos mostrados en dichas tablas serán utilizados más adelante para realizar el cálculo de la erosión de la losa de concreto aguas abajo mediante la estimación de la potencia de flujo generada a estas velocidades.

4.1.5.2 Esfuerzos de corte

Las variables referidas a los esfuerzos de corte serán expuestas visualmente en el anexo D para cada tipo de condición de caudal y altura de agua.

Los gráficos de esfuerzo de corte mostrados en dicho anexo solo se utilizarán como representación visual de las zonas más afectadas por el flujo del fluido y por el arrastre de los sedimentos.

No se realizarán cálculos de erosión relacionados con el esfuerzo de corte debido a los bajos valores obtenidos y a la gran resistencia frente al esfuerzo cortante que presentan los concretos de alta resistencia.

4.1.5.3 Efectos de erosión

La erosión de la roca y el suelo es una verdadera preocupación cuando se trabaja con muros de contención de tierra, vertederos sin revestimiento y otras características de proyectos de control de agua.

Muchos proyectos de presas no son diseñados de manera apropiada ante eventos que suponen un aumento en la cantidad de flujo y genera un desbordamiento que puede desencadenar en problemas mayores de erosión, incluso en proyectos en los cuales se utilicen materiales más resistentes.

Cuando se consideran los diversos modos de falla potencial producto de la erosión, es importante determinar los distintos grados que presenta y su probabilidad de ocurrencia. Algunos de estos modos de falla potencial son:

- Erosión por rozamiento o esfuerzos de corte.
- Erosión por desbordamiento en una presa de concreto.
- Erosión producida por potencia de flujo.
- Erosión de la base de un vertedero con losas dañadas.

Erosión por esfuerzos de corte

Los esfuerzos de corte pueden ser utilizados para determinar si un vertedero o terraplén presenta erosión debido al agua que fluye a través de ellos. El esfuerzo cortante de un canal abierto puede ser calculado usando la siguiente expresión:

$$\tau_b = \gamma R_b S_e \quad (4.2)$$

Donde S_e es la pendiente energética, R_b es el radio hidráulico del lecho, y γ es el peso específico del agua.

Una vez que los esfuerzos de corte del flujo en un sistema son conocidos, es posible compararlo con valores de esfuerzo de corte crítico para distintos materiales y se puede hacer una determinación de la erosión producida.

Erosión por desbordamiento

Una vez que se empieza a rebasar el nivel de la presa o aliviadero, se puede observar que el flujo más erosivo ocurre en la parte aguas abajo de la estructura. En esta zona, las velocidades existentes son normalmente más altas y la misma pendiente favorece el arrastre de partículas sólidas de transporte.

El proceso erosivo de un terraplén o aliviadero ocurre en cuatro fases distintas. Estas fases son:

- Erosión superficial.
- Erosión concentrada por el flujo.
- Avance de la erosión.
- Formación de grietas.

Durante una caída significativa, el chorro de agua que cae se irá “rompiendo” por efecto del aire, lo que reduce su energía y el potencial erosivo. Sin embargo, como simplificación conservadora se puede asumir que toda la energía cinética de un chorro cayendo se mantiene intacta durante su recorrido y se disipa de manera total en el momento del impacto con la superficie.

De esta manera, la potencia de flujo (P) producto del potencial erosivo del impacto del chorro de agua puede ser estimada (en KW/m^2) con la siguiente expresión:

$$P = \gamma qH/d \quad (4.3)$$

Donde γ es el peso específico del agua (9.81 KN/m^3), q es la descarga unitaria en una zona de la superficie analizada ($\text{m}^3/\text{s/m}$), H es la altura de la caída de agua (m), y d es el espesor de la caída de agua en la zona de impacto con la superficie (m).

Erosión por potencia de flujo

Aunque se deben realizar estudios hidráulicos detallados para estimar si la erosión producida por la potencia de flujo se convierte en un tema crítico, algunas suposiciones conservadoras se pueden hacer para determinar la potencia de flujo para evaluaciones iniciales.

Para el flujo a través de una pendiente, la potencia de flujo por unidad de área de superficie (P) es una función de la pendiente de energía y, de la profundidad y velocidad del flujo. Ésta expresión es la siguiente:

$$P = \gamma U h S \quad (4.4)$$

Donde γ es el peso específico del agua (9.81 KN/m^3), U es la velocidad del flujo (m/s), h es el tirante del agua (m), y S es la pendiente energética hidráulica. La tasa de disipación de energía es pequeña en la zona donde el flujo es lento, no obstante, la tasa aumenta a medida que la velocidad del agua también aumenta (U.S. Bureau of Reclamation, 2012).

Existen otras expresiones para realizar el cálculo de la potencia de flujo, tal como:

$$P = \gamma Q \left(y + \frac{V^2}{2g} \right) \quad (4.5)$$

Donde γ es el peso específico del agua (9.81 KN/m^3), Q es el caudal del flujo (m^3/s), y es el tirante del agua (m), y V es la velocidad del flujo en la superficie de análisis (m/s). Esta expresión, a diferencia de las anteriores, expresa la potencia de flujo total y no por unidad de superficie (Mur, 2002).

Potencial erosivo

Para hablar del potencial erosivo es necesario introducir el término conocido como índice de erodabilidad, el cual es un índice geo-mecánico que cuantifica la habilidad relativa de los materiales de tierra a resistir la erosión (Caminati, 2003)

Annandale (1995), citado por U.S. Bureau of Reclamation (2012), revisó cerca de 150 observaciones de campo de canales de aliviaderos y pozas de inmersión para desarrollar una curva que define el umbral de erosión en función de la potencia de flujo y el índice de erodabilidad. En esta curva, Annandale combinó el índice de erodabilidad y la potencia de flujo para estimar el potencial erosivo. En la Figura 4.126 se puede observar dicha curva, en ésta se observa una línea entre cortada que representa el umbral inicial de la erosión.

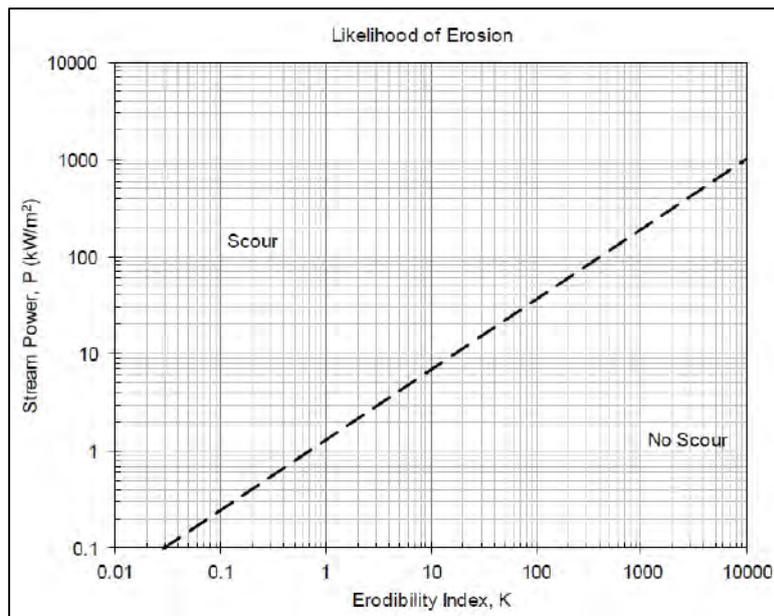


Figura 4.126 Gráfico de probabilidad de erodabilidad según Annandale (1995).

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation (2012)

Wibowo et al. (2005), citados por U.S. Bureau of Reclamation (2012), utilizaron la misma data que Annandale y realizaron una regresión logarítmica con los datos obtenidos. De esta manera obtuvieron una versión modificada de la curva propuesta por Ananndale. En la Figura 4.127 se observan tres líneas, la línea roja superior representa una probabilidad de 99% de comienzo de la erosión; la línea verde inferior representa la probabilidad del 1% y la línea azul central representa el 50% de probabilidad de inicio de la erosión.

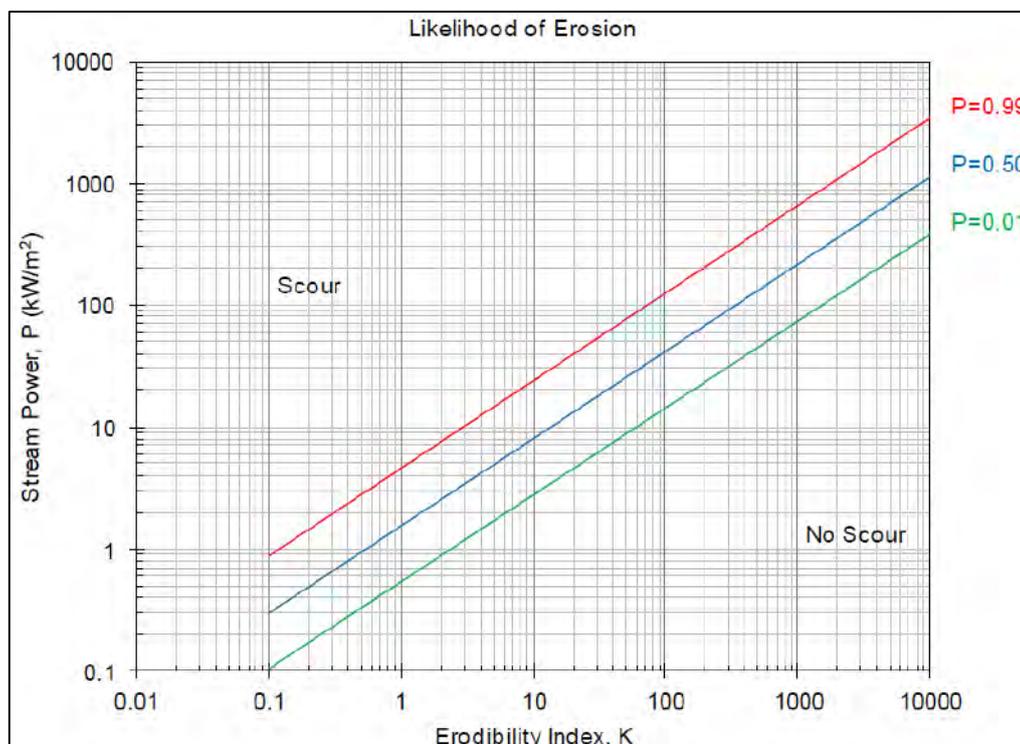


Figura 4.127 Gráfico del umbral de erodabilidad según Wibowo et al (2005).

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation (2012).

Cálculos de erosión

Para realizar el cálculo de la erosión en la estructura se hará uso de los resultados obtenidos del programa ANSYS-CFX durante el análisis del funcionamiento hidráulico del diseño original de la bocatoma Quiroz.

Se debe aclarar que los cálculos realizados son estimaciones, debido a que la erosión es un tema muy amplio y depende de muchos factores; por lo que para obtener valores más exactos, es necesario realizar una serie de estudios hidráulicos más complejos.

De esta manera, en la presente tesis se utiliza los datos obtenidos anteriormente en combinación con las ecuaciones de potencia de flujo y los gráficos de potencial de erodabilidad de Wibowo et al (2005), para realizar dichas estimaciones.

Erosión por potencia de flujo por caída de agua

En este parte solamente se utilizarán los datos relacionados con las simulaciones de compuerta cerrada, debido a que en estas condiciones es que puede ocurrir el desbordamiento de agua por encima de las compuertas.



Figura 4.128 Desbordamiento de agua en el aliviadero móvil con compuertas cerradas.

Fuente: Google Earth (2007).

Este problema no debería ocurrir al estar las compuertas cerradas, sino más bien que cualquier exceso de flujo debería ser eliminado a través del vertedero de excedencias; sin embargo, se ha podido apreciar en los resultados de la simulación que sí ocurre un desbordamiento en la zona de las compuertas, generando una caída de agua de hasta 2 metros de altura. En la Figura 4.128 se puede observar la ocurrencia de dicha problemática en la realidad.

Para realizar los cálculos de erosión, se hará uso de la ecuación 4.3 mencionada anteriormente, la cual está en función del peso específico del agua, el flujo lineal, la altura de caída y el espesor del chorro de agua al momento del impacto.

El peso específico del agua es un valor fijo, el cual con la conversión respectiva de unidades para nuestro interés, es equivalente a 9.81 KN/m^3 . La segunda variable necesaria, el flujo lineal, es la representación de la variación del caudal a través de una de las dimensiones del fluido; en este caso dicha variable corresponde al ancho del aliviadero, ya que de esta manera se puede apreciar el efecto del caudal a lo largo de la superficie de análisis. De esta manera se obtiene lo siguiente:

Para caudal promedio:

$$q = \frac{(50 \text{ m}^3/\text{s})}{8 \text{ m}} = 6.25 \text{ m}^2/\text{s}$$

Para caudal máximo:

$$q = \frac{(300 \text{ m}^3/\text{s})}{8 \text{ m}} = 37.5 \text{ m}^2/\text{s}$$

La tercera variable también es un valor fijo, ya que corresponde a la distancia existente entre el punto más alto de la compuerta hasta su impacto con la losa aguas abajo, este valor equivale a los 2 metros de distancia que recorrería el agua durante su caída. No obstante, se puede tomar este valor como variable al considerar el aumento de la caída a medida que incrementa la profundidad de las grietas en la losa aguas abajo producto de la erosión. En los cálculos realizados se ha tomado un valor fijo de 2 metros, sin embargo, en la realidad debería amplificarse progresivamente según lo ya mencionado.

Finalmente, el espesor del chorro de agua al momento del impacto se ha calculado a través de la medición manual en la Figura 4.120 y Figura 4.125, correspondientes a las vistas de perfil de la superficie libre. Los valores obtenidos corresponden a 1.46 m y 0.89 m para las condiciones de caudal máximo y promedio, respectivamente.

Todas las variables mencionadas se presentan resumidas para las distintas condiciones en la Tabla 4.8 Datos para el cálculo de potencia de flujo por caída de agua en condición de compuertas cerradas.:

Tabla 4.8 Datos para el cálculo de potencia de flujo por caída de agua en condición de compuertas cerradas.

Condición	Variables			
	q (m ³ /s/m)	H (m)	γ (KN/m ³)	d (m)
Qprom	6.25	2	9.81	0.89
Qmáx	37.5	2	9.81	1.46

Fuente: Elaboración propia (2015).

Los cálculos realizados para estimar la potencia de flujo son los siguientes:

Para caudal promedio:

$$P = \frac{\left(6.25 \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}}\right) \times (2 \text{ m}) \times \left(9.81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}\right)}{0.89 \text{ m}} = 137.8 \text{ KW}/\text{m}^2$$

Para caudal máximo:

$$P = \frac{\left(37.5 \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}}\right) \times (2 \text{ m}) \times \left(9.81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}\right)}{1.46 \text{ m}} = 503.9 \text{ KW}/\text{m}^2$$

Estos valores de potencia de flujo están expresados por unidad de superficie para utilizarlos posteriormente, en combinación con el índice de erodabilidad, para calcular el potencial erosivo del flujo en la estructura.

Erosión por potencia de flujo

De manera complementaria, en esta parte se analizará el efecto de la erosión producto de la acción del flujo sobre la bocatoma en la condición de compuertas abiertas, pues es en esta

situación que se alcanzan los mayores valores de velocidades en la losa ubicada aguas abajo de las compuertas.

Para realizar los cálculos de erosión, se hará uso de la ecuación 4.5 referida a la potencia de flujo. Ésta se encuentra en función del peso específico del agua, el caudal del flujo, el tirante de agua y la velocidad del flujo en la zona de análisis.

Al igual que en el cálculo de la potencia de flujo por caída de agua, el peso específico del agua es un valor fijo equivalente a 9.81 KN/m^3 . La segunda variable también toma dos valores fijos según la condición que se esté analizando, de esta forma se tendrán valores de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ y $300 \text{ m}^3/\text{s}$ según se considere el caudal promedio o el caudal máximo, respectivamente.

Para obtener los valores de los tirantes de agua se ha seguido el siguiente procedimiento:

- Se delimitó la zona de interés denominada anteriormente como superficie de análisis, lugar donde ocurre de manera más intensificada el proceso erosivo.
- Dicha zona se dividió en una serie de secciones representativas con un espaciamiento equitativo de 2 metros.
- Se midió de manera gráfica la altura de agua en cada una de las secciones.
- Finalmente se promediaron los valores de tirante de agua para cada una de las condiciones.

Este proceso se repitió para los dos tipos de caudales analizados, así como para los tres tirantes establecidos inicialmente al realizar la simulación. Los resultados obtenidos de los tirantes de agua promedio se resumen en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Tirantes promedio en la superficie de análisis en condición de compuertas abiertas.

Condiciones		Tirante promedio y (m)
Caudal	Tirante (m)	
Qprom	0.4	0.706
	0.5	0.789
	0.6	0.797
Qmáx	0.4	0.825
	0.5	0.84
	0.6	0.854

Fuente: Elaboración propia (2015).

Los valores de las velocidades se han tomado de la Tabla 4.6 y la Tabla 4.7, en esta se muestran las velocidades máximas de las cuatro secciones que conforman la superficie de análisis y las velocidades máximas en el aliviadero móvil. Para el caso de las velocidades tomadas de la Tabla 4.6 se ha escogido un valor representativo equivalente al promedio de dichos valores.

En la Tabla 4.10 se muestran la media de las velocidades máximas para cada condición.

Tabla 4.10 Velocidades promedio en la superficie de análisis en condición de compuertas abiertas.

Condiciones		Velocidad promedio V (m/s)
Caudal	Tirante (m)	
Qprom	0.4	4.853
	0.5	4.828
	0.6	4.885
Qmáx	0.4	13.24
	0.5	10.663
	0.6	9.338

Fuente: Elaboración propia (2015).

A manera de resumen, las variables mencionadas están organizadas en la Tabla 4.11:

Tabla 4.11 Datos para el cálculo de potencia de flujo en condición de compuertas abiertas.

Condiciones		Variables			
Caudal	Tirante (m)	Q (m ³ /s)	γ (KN/m ³)	γ (m)	V (m/s)
Qprom	0.4	50	9.81	0.706	4.853
	0.5	50	9.81	0.789	4.828
	0.6	50	9.81	0.797	4.885
Qmáx	0.4	300	9.81	0.825	13.24
	0.5	300	9.81	0.84	10.663
	0.6	300	9.81	0.854	9.338

Fuente: Elaboración propia (2015).

Los cálculos realizados para estimar la potencia de flujo para cada uno de los tirantes son los siguientes:

Para caudal promedio:

$$P = \left(9.81 \frac{KN}{m^2}\right) \times \left(50 \frac{m^3}{s}\right) \times \left(0.706 m + \frac{(4.853 m/s)^2}{2 \times 9.81 m^2/s}\right) = 935.1 KW$$

$$P = \left(9.81 \frac{KN}{m^2}\right) \times \left(50 \frac{m^3}{s}\right) \times \left(0.789 m + \frac{(4.828 m/s)^2}{2 \times 9.81 m^2/s}\right) = 969.7 KW$$

$$P = \left(9.81 \frac{KN}{m^2}\right) \times \left(50 \frac{m^3}{s}\right) \times \left(0.797 m + \frac{(4.885 m/s)^2}{2 \times 9.81 m^2/s}\right) = 987.5 KW$$

Para caudal máximo:

$$P = \left(9.81 \frac{KN}{m^2}\right) \times \left(300 \frac{m^3}{s}\right) \times \left(0.825 m + \frac{(13.240 m/s)^2}{2 \times 9.81 m^2/s}\right) = 28722.6 KW$$

$$P = \left(9.81 \frac{KN}{m^2}\right) \times \left(300 \frac{m^3}{s}\right) \times \left(0.840 m + \frac{(10.663 m/s)^2}{2 \times 9.81 m^2/s}\right) = 19527.1 KW$$

$$P = \left(9.81 \frac{KN}{m^2}\right) \times \left(300 \frac{m^3}{s}\right) \times \left(0.854 m + \frac{(9.338 m/s)^2}{2 \times 9.81 m^2/s}\right) = 15593.1 KW$$

Estos valores obtenidos, a diferencia de los calculados por caída de agua, no están expresados por unidad de superficie; para darles una forma equivalente es necesario dividir estos valores entre el área de la superficie de análisis donde ocurren los mayores problemas por erosión.

Dicha área, la cual va desde el final de las compuertas obermeyer hasta la mitad de la losa aguas abajo, presenta un área equivalente a 49.49 m². Por lo tanto los valores de potencia de flujo por unidad de superficie se presentan resumidos en la Tabla 4.12:

Tabla 4.12 Valores de potencia de flujo por unidad de superficie en condición de compuertas abiertas.

Condiciones		Variable	
Caudal	Tirante	P (KW)	P (KW/m ²)
Qprom	0.4	935	18.9
	0.5	970	19.6
	0.6	988	20.0
Qmáx	0.4	28723	580.4
	0.5	19567	395.4
	0.6	15593	315.1

Fuente: Elaboración propia (2015).

Índice de erodabilidad y cálculos de erosión

Como ya se mencionó, el índice de erodabilidad es un índice geo-mecánico que cuantifica la habilidad relativa de los materiales de tierra a resistir la erosión.

Según Caminati (2003), las principales propiedades geométricas del suelo que determina la resistencia de la erosión de los distintos materiales de tierra son:

- La resistencia del suelo.
- El tamaño de los bloques o partículas.
- La resistencia al esfuerzo cortante de los enlaces inter-partícula o de las discontinuidades.
- La estructura del suelo.

El índice de erodabilidad es el producto escalar de los parámetros que representan el rol correspondiente de cada una de estas propiedades.

$$K_b = M_s K_b K_d J_s$$

Donde:

K_b = Índice de erodabilidad.

M_s = Parámetro de resistencia del terreno.

K_b = Parámetro del tamaño bloque/partícula.

K_d = Parámetro de la resistencia al cortante de los enlaces inter-partículas o de las discontinuidades.

J_s = Parámetro de la estructura del suelo.

Como se puede apreciar, el índice de erodabilidad es un término utilizado para materiales naturales, como tierra y roca; por lo que para el caso del concreto no existen valores determinados para este índice.

No obstante, en el año 2009, Flood Control District of Maricopa County (FCDMC) realizó una serie de ensayos al concreto durante el modelado de un vertedero de emergencia en el proyecto “White Tanks FRS No. 3”. En estos, se llegó a la conclusión de que un concreto de 2400 kg/m³ presenta un valor equivalente de índice de erodabilidad aproximado a 12000 unidades.

Debido a la gran variabilidad de tipos de concreto, en la presente tesis se aplicará un factor de seguridad correspondiente al 75% del valor mencionado. De esta manera, al momento de relacionar la potencia de flujo y el índice de erodabilidad para calcular el potencial erosivo del flujo, se trabaja con un $K_b = 9000$ para el concreto.

Combinando este valor con los de potencia de flujo, calculados anteriormente, y utilizando los gráficos de erodabilidad según Wibowo et al.(Figura 4.127), se obtienen los resultados mostrados en la Figura 4.129 y Figura 4.130, tanto para la erosión por caída libre con compuertas cerradas, como para la erosión por potencia de flujo con compuertas abiertas.

Al analizar los resultados mostrados en dichas figuras se observan algunos puntos dentro del umbral de probabilidad de erosión. Mediante un proceso de interpolación se puede estimar que la probabilidad de ocurrencia de erosión máxima es de 25.2% y de 17.2% para la erosión por potencia de flujo con compuertas abiertas y erosión por caída de agua con compuertas cerradas, respectivamente.

Sin embargo, en las ecuaciones utilizadas para calcular la potencia de flujo no se incluyen variables relacionadas con la posible presencia de sedimentos que puedan amplificar el efecto erosivo de la losa de concreto aguas abajo

Por dicho motivo, y para mantener valores más conservadores se necesita aplicar factores de amplificación a la potencia de flujo; los más importantes son aquellos relacionados con el arrastre de sedimentos y la duración del fenómeno.

Vale aclarar que es necesario llevar a cabo una gran cantidad de ensayos hidráulicos y pruebas para obtener los valores reales del efecto que tiene la presencia de sedimentos y la duración del fenómeno en la potencia de flujo.

Debido a la falta de información estadística relacionada con el tema, en la presente tesis se asumen los valores a dichos factores para brindar un margen de seguridad a los cálculos realizados.

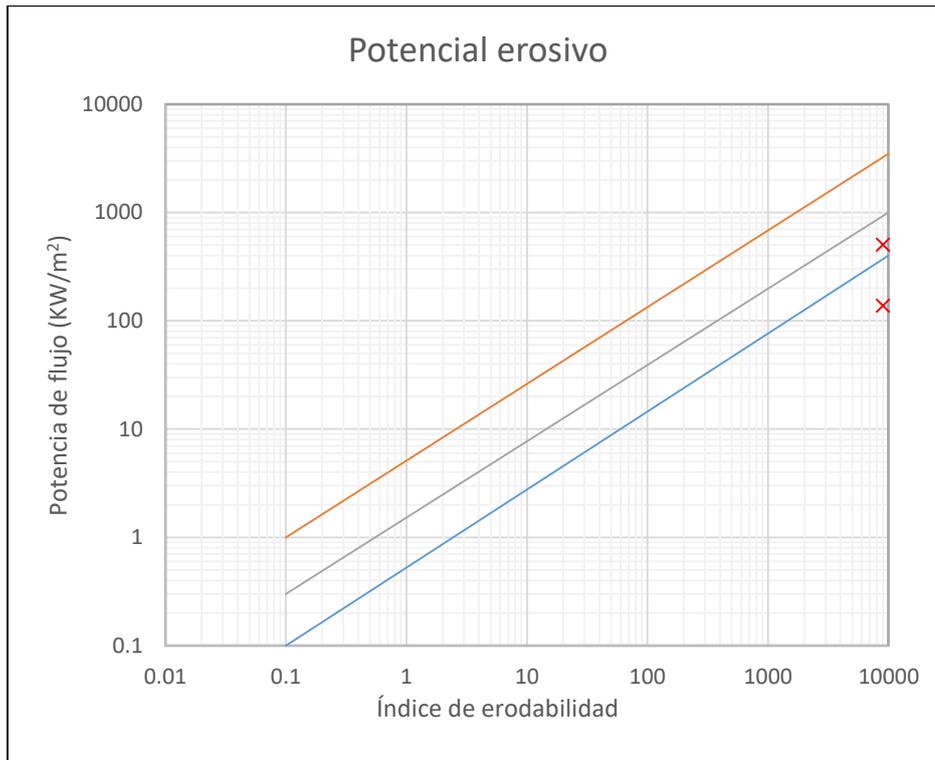


Figura 4.129 Potencial erosivo por caída de agua.

Fuente: Elaboración propia (2015).

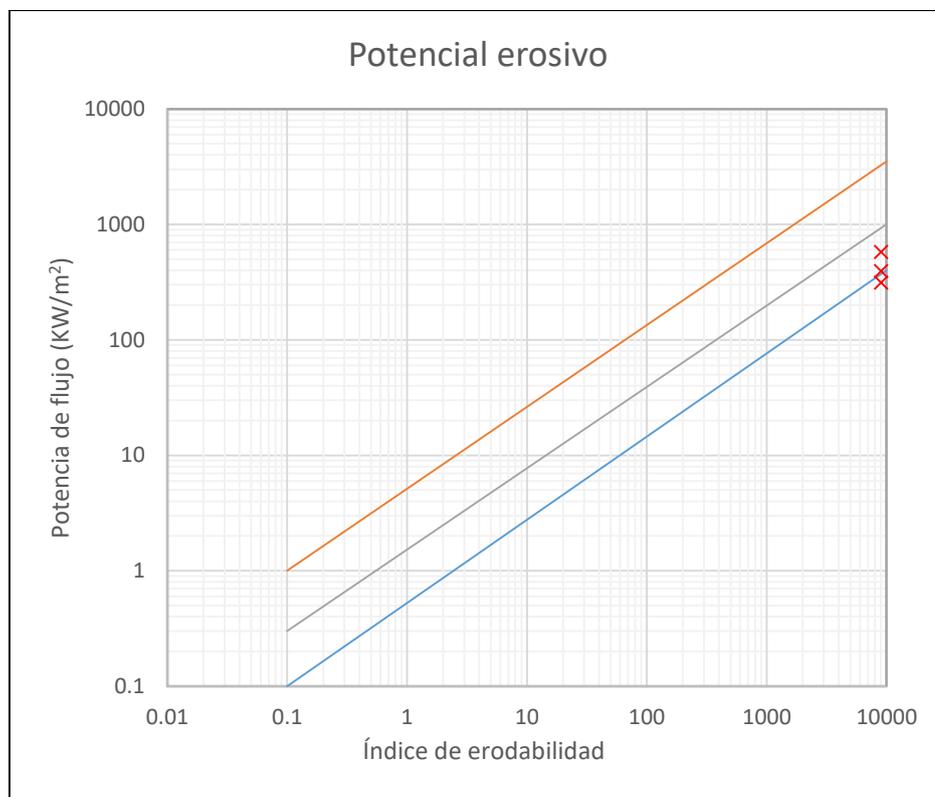


Figura 4.130 Potencial erosivo por potencia de flujo.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Los valores asumidos corresponderán a un aumento del 30% de la potencia de flujo debido al arrastre de sedimentos y del 15% debido a la duración. Por lo tanto, se tendrá que el factor global de seguridad corresponde a:

$$FS_N = 1.30 \times 1.15 \cong 1.50$$

Con este dato, se procederá a amplificar los valores de potencia de flujo (P^*) para compuertas abiertas y cerradas. Los resultados están resumidos en la Tabla 4.13 y los cálculos de potencial erosivo se muestran en la Figura 4.131 y la Figura 4.132.

Con la aplicación del factor de seguridad, las probabilidades de erosión máxima aumentan a 45.83% para la erosión por potencia de flujo con compuertas abiertas, y a 39.63% para la erosión por caída de agua con compuertas cerradas.

Tabla 4.13 Valores de potencia de flujo amplificada por unidad de superficie.

Condiciones			Variables	
Compuertas	Caudal	Tirante (m)	P (KW/m ²)	P*(KW/m ²)
Cerradas	Qprom	2	138	207
	Qmáx	2	504	756
Abiertas	Qmáx	0.4	580	871
		0.5	395	593
		0.6	315	473

Fuente: Elaboración propia (2015).

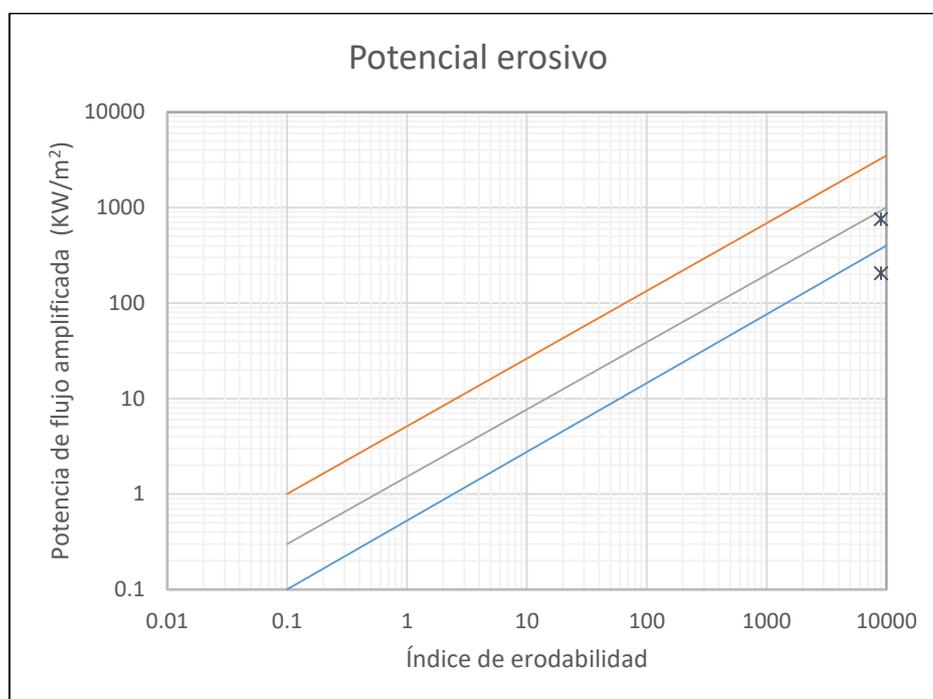


Figura 4.131 Potencial erosivo amplificado por caída de agua.

Fuente: Elaboración propia (2015).

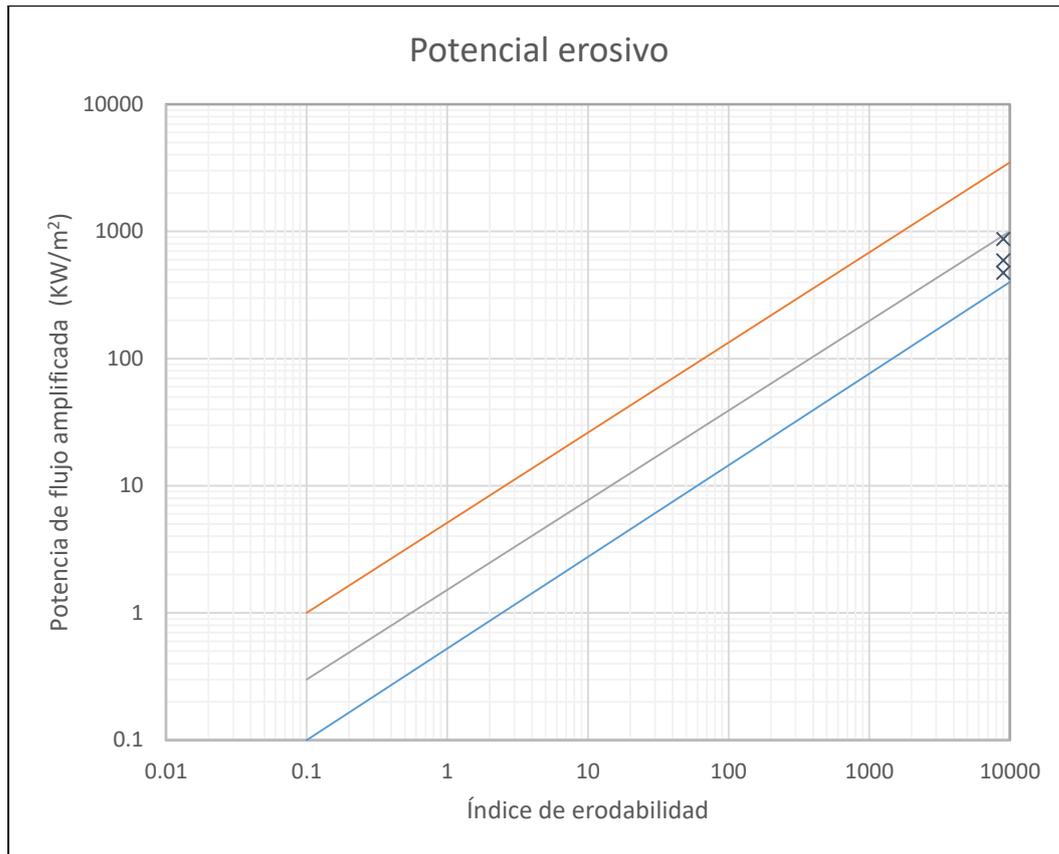


Figura 4.132 Potencial erosivo amplificado por potencia de flujo.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- La posibilidad de ocurrencia de erosión en la losa aguas abajo del aliviadero móvil de la bocatoma de la C.H. María Auxiliadora de Quiroz es de un valor máximo de 25.2% cuando se presenten caudales de máxima avenida, según el enfoque de cálculo de erosión por potencia de flujo utilizado.
- Los valores de posibilidad de ocurrencia de erosión aumentan a 45.83% al considerar un mecanismo más conservador que involucra el uso de factores de amplificación a los resultados de potencia de flujo obtenidos. Estos factores se aplican para incluir el efecto producido por el arrastre de sedimentos.
- Para caudales menores, la losa aguas abajo del aliviadero móvil no presenta problemas de ocurrencia de erosión. No obstante, éstos pueden generar un proceso de desprendimiento continuo del concreto presente en la losa, debido a la presencia de grietas formadas anteriormente por caudales altos.
- La losa aguas abajo del aliviadero móvil no presenta problemas de erosión por rozamiento o esfuerzos de corte debido a la alta resistencia frente al cortante que tienen los concretos de alta resistencia.
- Los resultados obtenidos de la modelación numérica muestran que la losa aguas abajo del aliviadero móvil es la zona más propensa a ser afectada por la interacción entre el flujo y la estructura, lo cual se puede verificar en la realidad al observar la severa erosión formada en esa zona.

Recomendaciones

En relación a la modelación numérica:

- Realizar la modelación numérica de la bocatoma de la C.H. María Auxiliadora de Quiroz con el nuevo diseño adoptado y realizar una comparación entre los valores de velocidad y potencia de flujo obtenidos.

En relación a la bocatoma Quiroz:

- Mejorar la frecuencia y calidad de mantenimiento de las compuertas obermeyer para asegurar su correcto funcionamiento y evitar que se presenten problemas por filtración y por rebasamiento del flujo como los explicados en la presente tesis.

- Realizar un análisis del diseño implementado en el vertedero fijo de excedencias y, de ser posible, realizar las modificaciones necesarias para asegurar que el flujo excedente sea eliminado por el vertedero fijo y no ocurra rebasamiento de flujo en el aliviadero móvil.
- Implementar algún mecanismo de control de sedimentos para reducir los problemas de erosión producidos por el arrastre de estos.

Bibliografía

ANSYS® Academic Research. Reference Guide. Release 16.0.

Apsley, D. (s.f.), *Advanced turbulence modelling*. Recuperado en 2015 de: <http://personalpages.manchester.ac.uk/staff/david.d.apsley/lectures/comphydr/turbadvanced.pdf>.

Bacchiega, J. (2009). *Modelación física de estructuras hidráulicas en el laboratorio de hidráulica del INA*. Instituto Nacional del Agua. Argentina. Recuperado el 2015 en: <http://www.ina.gov.ar/pdf/LH-PHInd-presiones.pdf>.

Caminati Briceño, M. (2003). *Método del índice de erodabilidad en el cálculo de la erosión en pilares de puentes*. Tesis de título. Piura: Universidad de Piura.

Castillo, L. & Carrillo, J. (s.f.). *Simulación numérica y validación de las acciones hidrodinámicas en cuencos de disipación de energía*. Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia.

CEMEX. (s.f.). *Concreto de alta resistencia*. Recuperado el 2015 de: <http://www.cemexcolombia.com/SolucionesConstructor/files/AltaResistencia.pdf>.

CFD online. (1994 – 2013). *Online center for Computational Fluid Dynamics*. En línea. Accesible en <http://www.cfd-online.com/>.

Chow, V. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá: McGRAW-HILL

Electronoroeste S.A. (s.f.), *Diagnóstico de Central Hidroeléctrica Quiroz*.

Empresa de Ingeniería, Tecnología y Desarrollo S.A.C. (2005) *Elaboración del expediente técnico de licitación para la ingeniería de detalle y la fabricación, suministro y montaje de las compuertas planas para la bocatoma de la C.H. María Auxiliadora de Quiroz*.

Ferziger M. Peric, J. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. (3ª ed.). Berlín: Springer-Verlag.

Hilerio, I. & Gonzáles, F. (2003). *Abrasión en concreto de alta resistencia*. *Revista Ciencia e Ingeniería*, pág. 26.

KERNEOS INC. (s.f.). *Ciment fondu*. Recuperado el 2015 de: <http://kerneos.com/content/en/Our-solutions/Products/CIMENT-FONDU/>.

Ingeniería Civil Info. (s.f.). *Resalto Hidráulico*. Recuperado el 2015 de: <http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/06/el-rapidamente-variado-el-cual-va.html>.

Lafarge Aluminates. (s.f.). *Ciment Fondu Lafarge ficha comercial*. Recuperado el 2015 de: [http://www.sudametal.com/info/Ciment%20Fondu%20Lafarge%20\(R\).pdf](http://www.sudametal.com/info/Ciment%20Fondu%20Lafarge%20(R).pdf).

Mur Abad, M. (2002). *Estudio de la influencia de la geometría sobre la capacidad de captación de una reja/imbornal*. Tesis para título. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Orrego, S. (2009). *Simulación de fluidos utilizando computadores: una moderna herramienta para el estudio y análisis de fluidos*. Recuperado el 2015 de: http://mecanica.eafit.edu.co/~sorrego/IntroCFD_Mecapl.pdf

Paulini Palacios, A. (2005). *Evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico en la Cuenca alta del Río Quiroz*. Tesis de título. Piura: Universidad de Piura.

Puentes Palma, N. (2007). *Estudio experimental de la dinámica de sedimentos cohesivos en suspensión en un flujo turbulento*. Tesis para título. Universidad de Chile, Chile.

Rocha, Luis. (2009). *Concretos en la construcción. Compilación de artículos de investigación*. Red académica internacional UADY, UAM, WPI.

Universidad de Piura (2002). *Diagnóstico de la situación y recomendaciones para el funcionamiento adecuado y para una futura ampliación de la infraestructura de la C.H. María Auxiliadora – Quiroz*.

U.S. Bureau of Reclamation (2012). *Erosion of Rock and Soil*. Recuperado en 2015 de: <https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/BestPractices/Chapters/IV-1-20150618.pdf>.

Van Heerde, D.; Fryda, H. & Saucier, F. (2005, diciembre). *Elements for effective design of abrasión resistant concretes*. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, págs. 771-772

Vásquez Ojeda, J. (2003). *Modelación numérica en hidráulica*. Recuperado el 2015 de: <http://www.oocities.org/hidropiura/ModelNum.pdf>.

Vegas Merino, S., Reyes Salazar, J., & Schexnayder, C. (2005). *Use of rock blocks to protect the downstream zone of a hydraulic discharge structure. Practice periodical on structural design and construction*, 10(1), 63-69. Doi: 10.1061/(ASCE)1084-0680(2005)10:1(63)

Villamarín Paredes, S. (2013). *Manual básico de diseño de estructuras de disipación de energía hidráulica*. Tesis de título. Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador.

Wilcox, D. (1994). *Turbulence Modeling for CFD*. California: Griffing Printing.

Zamorano, R. (2014). *Modelación numérica 3D aplicada al diseño de las obras hidráulicas de la Central Baker 1, región de Aysén*. Tesis para título. Universidad de Chile, Chile.

Anexo A

Principios de conservación de masa y momentum

Principios de conservación

Por conveniencia, se considerará un valor fijo de CV (Control de volumen) para las siguientes explicaciones, además Ω representará el volumen en el CV y S su superficie.

Conservación de masa

La forma integral de la ecuación de conservación de masa se desprende directamente de la ecuación de control de volumen, considerando $\phi = 1$ se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho v \cdot ndS = 0 \quad (\text{A.1})$$

Aplicando el teorema de la divergencia de Gauss al término de convección, podemos transformar una integral de superficie en una integral de volumen:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0 \quad (\text{A.2})$$

Esta puede ser expresada en una forma específica de un sistema de coordenadas que proporcione una expresión dada para el operador divergencia. Entre estos sistemas, se tiene el cartesiano, el cilíndrico y el esférico. En esta explicación se presentará la forma cartesiana y se adoptará la convención de Einstein, la cual implica que cada vez que el mismo índice aparezca dos veces en cualquier término, la suma en el rango de ese índice implica lo siguiente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (\text{A.3})$$

Donde x_i ($i = 1,2,3$ o x, y, z) son las coordenadas cartesianas y u_i o (u_x, u_y, u_z) son los componentes cartesianos del vector velocidad v .

Conservación de momentum

Hay muchas maneras de derivar la ecuación de la conservación de momentum. Un enfoque es la aplicación del método de control de volumen explicado anteriormente; en este método se utilizan las ecuaciones 3.2, 3.3 y 3.4, y se reemplaza ϕ por v , por ejemplo, para un fluido fijo contenido en un espacio de volumen se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho v d\Omega + \int_S \rho v v \cdot n dS = \sum f \quad (\text{A.4})$$

Para expresar el miembro derecho en términos de propiedades intensivas, uno debe considerar las fuerzas que puedan actuar sobre el fluido en un CV:

- Fuerzas de superficie (presión, esfuerzo normal, esfuerzo cortante, tensión superficial, etc.)
- Fuerzas de cuerpo (gravedad, fuerza centrífuga, fuerza de Coriolis, fuerzas electromagnéticas).

Las fuerzas de superficie debido a la presión y esfuerzos son, desde un punto de vista molecular, flujos de momentum microscópicos a través de una superficie. Si estos flujos no pueden ser expresados en términos de las propiedades de densidad y velocidad, el sistema de ecuaciones no está cerrado, es decir, hay menos ecuaciones que variables dependientes y la solución no es posible. Esta situación se puede evitar haciendo ciertas suposiciones; la más simple es asumir que el fluido es newtoniano, el cual se aplica a muchos modelos reales de fluidos.

Para los fluidos newtonianos, el esfuerzo tensor T , el cual es la tasa molecular de transporte de momentum, puede expresarse como:

$$T = -\left(p + \frac{2}{3}\mu \operatorname{div} v\right) I + 2\mu D \quad (\text{A.5})$$

Donde μ es la viscosidad dinámica, I es la unidad de tensión, p es la presión estática y D es la tasa de deformación tensora, esta última se puede expresar como:

$$D = \frac{1}{2} [\operatorname{grad} v + (\operatorname{grad} v)^T] \quad (\text{A.6})$$

Estas dos ecuaciones pueden ser escritas en la notación de índice de coordenadas cartesianas, de la siguiente manera:

$$T_{ij} = -\left(p + \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right) \delta_{ij} + 2\mu D_{ij} \quad (\text{A.7})$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{A.8})$$

Donde δ_{ij} es el símbolo de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$, si $i = j$; y $\delta_{ij} = 0$, de cualquier otra manera).

Para flujos incompresibles, el segundo término del paréntesis en la ecuación A.7 es cero en virtud de la ecuación de la continuidad. La siguiente notación es usada a menudo para describir la parte viscosa del esfuerzo tensor:

$$\tau_{ij} = 2\mu D_{ij} - \frac{2}{3}\mu\delta_{ij}\text{div}v \quad (\text{A.9})$$

Para fluidos no newtonianos, la relación entre el esfuerzo tensor y la velocidad está definida por un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales, y el problema en general se vuelve más complicado. De hecho, entre diferentes tipos de fluidos no newtonianos se necesitan diferentes ecuaciones constitutivas que pueden requerir distintos métodos de solución.

Con las fuerzas de cuerpo (por unidad de masa) siendo representadas por \mathbf{b} , la forma integral de la conservación de momentum queda definida como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho v d\Omega + \int_S \rho v v \cdot n dS = \int_S T \cdot n dS + \int_{\Omega} \rho \mathbf{b} d\Omega \quad (\text{A.10})$$

Una forma coordinada de vector libre de la ecuación de conservación del momentum (ecuación A.10) se obtiene fácilmente aplicando el teorema de la divergencia de Gauss a los términos de flujo convectivo y difusivo:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v v) = \text{div}T + \rho \mathbf{b} \quad (\text{A.11})$$

La correspondiente ecuación para la i -ésima componente cartesiana es:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i v) = \text{div} t_i + \rho b_i \quad (\text{A.12})$$

Dado que el momentum es un cantidad vectorial, sus flujos convectivos y difusivos a través de un CV límite son productos escalares tensores de segundo rango ($\rho v v$ y T) con el vector de superficie $n dS$. La forma integral de las ecuaciones mencionadas es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho u_i d\Omega + \int_S \rho u_i v \cdot n dS = \int_S t_i \cdot n dS + \int_{\Omega} \rho b_i d\Omega \quad (\text{A.13})$$

Reemplazando las ecuaciones A.7 y A.8 se obtiene:

$$\mathbf{t}_i = \mu \text{grad} u_i + \mu (\text{grad} v)^T \cdot \mathbf{i}_i - \left(p + \frac{2}{3}\mu \text{div}v \right) \mathbf{i}_i = \tau_{ij} \mathbf{i}_j - p \mathbf{i}_i \quad (\text{A.14})$$

Aquí \mathbf{b}_i representa la i -ésima componente de la fuerza de cuerpo, el superíndice T significa transposición e \mathbf{i}_i es el vector unitario cartesiano en la dirección de la coordenada x_i . En coordenadas cartesianas se puede escribir la expresión anterior como:

$$\mathbf{t}_i = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \mathbf{i}_j - \left(p + \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \mathbf{i}_i \quad (\text{A.15})$$

Un campo vectorial puede ser representado de maneras distintas. Los vectores de la base en los cuales está definido pueden ser locales o globales. En sistemas de coordenadas curvilíneas, que a menudo se requieren cuando los límites son complejos, se puede escoger entre una base covariante o contravariante (Figura A.1). El primero expresa un vector en términos de sus componentes a lo largo de las coordenadas locales, el otro usa las proyecciones normales para coordinar superficies; en un sistema cartesiano, las dos se vuelven idénticas. Además, los vectores de la base pueden ser o no adimensionales. Incluyendo todas estas opciones, se tiene más de 70 opciones posibles para las ecuaciones de momentum. Matemáticamente todas serían equivalentes, pero desde un punto de vista numérico, algunas son mucho más difíciles de trabajar que otras.

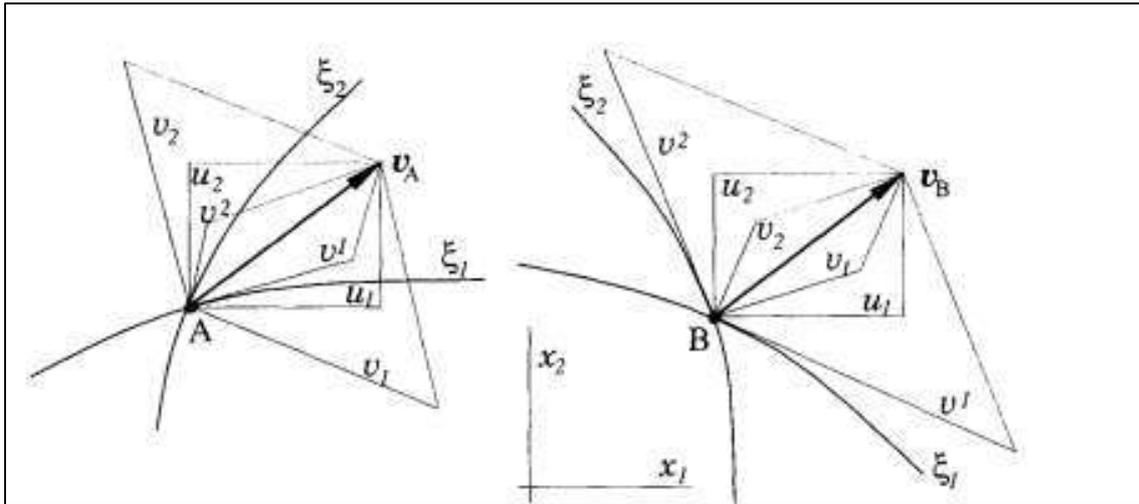


Figura A.1 Representación de un vector a través de distintas componentes: u_i – componentes cartesianas; v^i – componentes contravariantes; u_i – componentes covariantes. [$v_A = v_B$, $(u_i)_A = (u_i)_B$, $(v^i)_A \neq (v^i)_B$, $(v_i)_A \neq (v_i)_B$]

Fuente: Ferziger (2002).

Anexo B

Propiedades de los métodos de solución numéricos

Consistencia

Cuando el espaciado de la malla tiende a cero, la discretización tiende a la solución exacta. A la diferencia entre la ecuación discretizada y la exacta se le conoce como error de truncamiento. Este es usualmente estimado mediante el reemplazo total de los valores nodales en la aproximación discreta por un desarrollo de las series de Taylor sobre un punto simple. Como resultado se obtiene la ecuación diferencial original más un residuo que representa el error de truncamiento.

Para que un método sea consistente, el error de truncamiento debe convertirse en cero cuando en la malla el lapso de tiempo y/o el espaciado de la malla tiende a cero ($\Delta t \rightarrow 0$ y/o $\Delta x_i \rightarrow 0$). Este error es normalmente proporcional a una potencia del Δx_i y/o Δt . Si el término más importante es proporcional a $(\Delta x)^n$ o $(\Delta t)^n$, llamamos al método una aproximación de n -ésimo orden; es necesario para la consistencia que el valor de n sea mayor a cero. Idealmente, todos los términos deben ser discretizados con aproximaciones del mismo orden de precisión; sin embargo, algunos términos pueden ser dominantes en un flujo particular y resulta razonable tratarlos con mayor precisión que otros.

Algunos métodos de discretización conducen a errores de truncamiento que son funciones de la relación de Δx_i hasta Δt o viceversa. En tal caso, el requisito de consistencia solamente se cumple condicionalmente: Δx_i y Δt deben ser reducidos en un modo que permita una relación adecuada para alcanzar el cero.

Incluso si las aproximaciones son consistentes, esto no quiere decir necesariamente que la solución del sistema de ecuaciones discretizadas se convierta en una solución exacta de la ecuación diferencial en un límite de paso de tamaño pequeño. Para que esto ocurra, el método de solución debe ser estable.

Estabilidad

Se dice que un método de solución numérica es estable si no magnifica los errores que aparecen a lo largo del proceso de la solución. Para problemas temporales, la estabilidad garantiza que el método produzca una solución acotada cada vez que ésta se limite a la ecuación exacta.

Para métodos iterativos, un método estable es uno en el que no haya divergencia. La estabilidad puede ser difícil de investigar, especialmente cuando se tienen presente las condiciones de contorno y la no linealidad. Es por este motivo que es común investigar la estabilidad de un método para problemas lineales con coeficientes constantes sin condiciones de borde. La experiencia muestra que los resultados obtenidos de esta manera pueden a menudo ser aplicadas a problemas más complejos, aunque existen excepciones. El enfoque más utilizado para el estudio de la estabilidad de los esquemas numéricos es el método de Von Neumann.¹⁷

Sin embargo, cuando se resuelven ecuaciones no lineales y acopladas con condiciones de contorno complicadas hay pocos resultados de estabilidad, por lo que se debe confiar en la experiencia y en la intuición.

Convergencia

Se dice que un método numérico es convergente si la solución de las ecuaciones discretizadas tiende a la solución exacta de la ecuación diferencial cuando el espaciado de la malla tiende a cero. Para un problema de valores iniciales lineales, el teorema de equivalencias de Lax afirma que: “dado un valor inicial lineal debidamente planteado y una aproximación de diferencia finita que satisface la condición de consistencia, la estabilidad es una condición necesaria y suficiente para lograr la convergencia”. Obviamente, un esquema consistente es inútil a menos que el método de solución converja.

Para problemas no lineales los cuales son fuertemente influenciados por las condiciones de borde; la estabilidad y la convergencia de un método resulta difícil de demostrar. Por lo tanto, la convergencia es usualmente comprobada utilizando experimentos numéricos, por ejemplo, la repetición del cálculo de una serie de mallas sucesivamente refinadas. Si el método es estable y todas las aproximaciones utilizadas en el proceso de discretización son consistentes, usualmente se encuentra que la solución converge en una solución independiente de la malla. Para mallas de tamaño suficientemente pequeño, la tasa de convergencia es gobernada por el orden del componente principal del error de truncamiento; esto nos permite estimar el error en la solución.

Conservación

Dado que las ecuaciones a resolver cumplen las leyes de la conservación, el esquema numérico también debe respetar dichas leyes, tanto a nivel local como global. Esto significa que, en un estado estable y ante la ausencia de fuentes, la suma de cantidades que dejan un volumen cerrado es igual a las que ingresan al mismo.

Otros métodos de discretización se pueden considerar conservativos si se tiene cuidado en la elección de las aproximaciones. El tratamiento de las fuentes y salidas deben ser consistentes de manera que el total de éstas en el dominio sea igual al flujo neto de la cantidad conservada a través de los límites.

Esta es una propiedad importante, dado que impone restricciones al error de solución. Si se aseguran la conservación de la masa, momentum y energía; el error puede ser la distribución inadecuada de esas cantidades sobre el dominio de la solución. Esquemas no conservativos pueden producir fuentes y salidas artificiales, cambiando así el equilibrio tanto a nivel local como global; sin embargo, estos esquemas pueden ser consistentes y estables y, por lo tanto,

¹⁷ Gracias al análisis de von Neumann, es fácil estudiar también la estabilidad de los métodos semi-discretos y que permite comprobar la existencia métodos consistentes y no estables y, por tanto, no convergentes.

dar lugar a soluciones correctas en el límite de mallas muy finas. Los errores producidos por la conservación no son muy apreciables en la mayoría de los casos, salvo en mallas relativamente gruesas; el problema es determinar en qué malla los errores son lo suficientemente insignificantes, por lo tanto se prefieren regímenes conservativos.

Acotamiento

Las soluciones numéricas deben estar dentro de los límites adecuados. Cantidades físicamente no negativas (densidad, energía cinética de turbulencia, etc.) deben ser siempre positivas; otras cantidades, como la concentración, deben de estar entre 0% y 100%. En la ausencia de fuentes, algunas ecuaciones requieren que los valores mínimos y máximos de la variable se encuentren dentro de los límites del dominio.

La acotación es difícil de garantizar, solamente algunos esquemas de primer orden garantizan esta propiedad; los de orden superior pueden producir soluciones ilimitadas, afortunadamente esto ocurre solamente en mallas muy gruesas, lo que significa que la malla necesita mayor refinamiento por lo menos a nivel local.

Realizabilidad

Los modelos de fenómenos que son demasiado complejos de tratar directamente, como los de turbulencia, combustión o flujo multifásico, deben diseñarse para garantizar soluciones físicamente realistas. Esto no es un problema numérico en sí, pero se debe tener cuidado de que los modelos que no permiten esta realización, pues pueden resultar en soluciones físicamente imposibles o causar métodos numéricos que diverjan.

Precisión

Las soluciones numéricas de problemas de flujo de fluido y transferencia de calor son solamente soluciones aproximadas. Además de los errores que pueden surgir en el transcurso del desarrollo del algoritmo de solución, en la programación o configuración de condiciones de borde, las soluciones numéricas siempre incluyen tres tipos de errores sistemáticos:

- Errores de modelación: los cuales se definen como la diferencia entre el flujo real y la solución exacta del modelo matemático.
- Errores de discretización: definidos como la diferencia entre la solución exacta de las ecuaciones de conservación y la solución exacta del sistema de ecuaciones algebraicas obtenidas por discretizar dichas ecuaciones.
- Errores de iteración: definidos como la diferencia entre la solución iterativa y la solución exacta del sistema algebraico de ecuaciones.

Los errores de iteración son a menudo llamados errores de convergencia. Sin embargo, el término convergencia no es usado solamente en conjunción con la reducción de errores en los métodos de solución iterativos, sino que también es usualmente asociada con la convergencia de las soluciones numéricas hacia una solución independiente de la malla, en cuyo caso está estrechamente vinculada al error de discretización.

Es importante ser consciente de la existencia de estos errores, e incluso saber distinguirlos. Varios errores pueden cancelarse entre sí, por lo que a veces una solución obtenida sobre una malla gruesa podría ser experimentalmente más conveniente que una obtenida en una malla más fina, que por definición, debería ser más precisa.

Los errores de modelación dependen de las suposiciones hechas en la derivación de las ecuaciones de transporte para las variables. Estos pueden considerarse despreciables cuando se investigan flujos laminares, ya que las ecuaciones de Navier-Stokes representan un

modelo suficientemente preciso del flujo. Sin embargo, para flujos turbulentos, flujos de dos fases, combustión, etc., los errores de modelación pueden ser muy grandes y la solución exacta de las ecuaciones del modelo puede estar cualitativamente mal. Los errores de modelación también aparecen por la simplificación de la geometría del dominio de solución mediante las simplificaciones de las condiciones de contorno, entre otras cosas. Estos errores no se conocen a priori y solo pueden ser evaluados mediante la comparación de soluciones en las cuales los errores de discretización y de convergencia son insignificantes, con información experimental precisa o con datos obtenidos de modelos más precisos, por ejemplo datos de simulación directa de la turbulencia. Es esencial controlar y estimar los errores de discretización y de convergencia antes de juzgar los modelos físicos.

Anexo C

Curvas de convergencia de la modelación numérica

En el presente anexo se mostrarán los resultados de las iteraciones internas, obtenidos por el programa Ansys-CFX, al momento de resolver el sistema de ecuaciones de Navier-Stokes.

Estas curvas, mostradas desde la Figura C.1 hasta la Figura C.8, representan los cálculos internos desarrollados por el software para alcanzar la estabilidad y convergencia de los datos analizados; como ya se ha mencionado, al alcanzar dichas características el usuario asegura que los resultados finales obtenidos representen fielmente la realidad del fenómeno.

La convergencia y estabilidad de los datos se consigue al alcanzar valores de residuos tipo RMS, para cada variable analizada, menores a un límite establecido por el usuario. En las simulaciones desarrolladas se estableció un valor límite de 0.0001 para los residuos RMS y una cantidad máxima de 200 iteraciones, por este motivo, no todas las figuras mostradas presentan la misma cantidad de iteraciones, pues esta varía según la rapidez con que se obtenga la convergencia.

En aquellas simulaciones cuya variación entre los valores de los residuos no es muy significativa se puede asumir que se ha alcanzado la convergencia, pues los resultados obtenidos no variarán mucho con respecto a los finales, los cuales tomarán una gran cantidad de tiempo en ser calculados.

De esta manera, se presentan las curvas de convergencia para cada condición de compuerta y para los distintos caudales en las siguientes figuras.

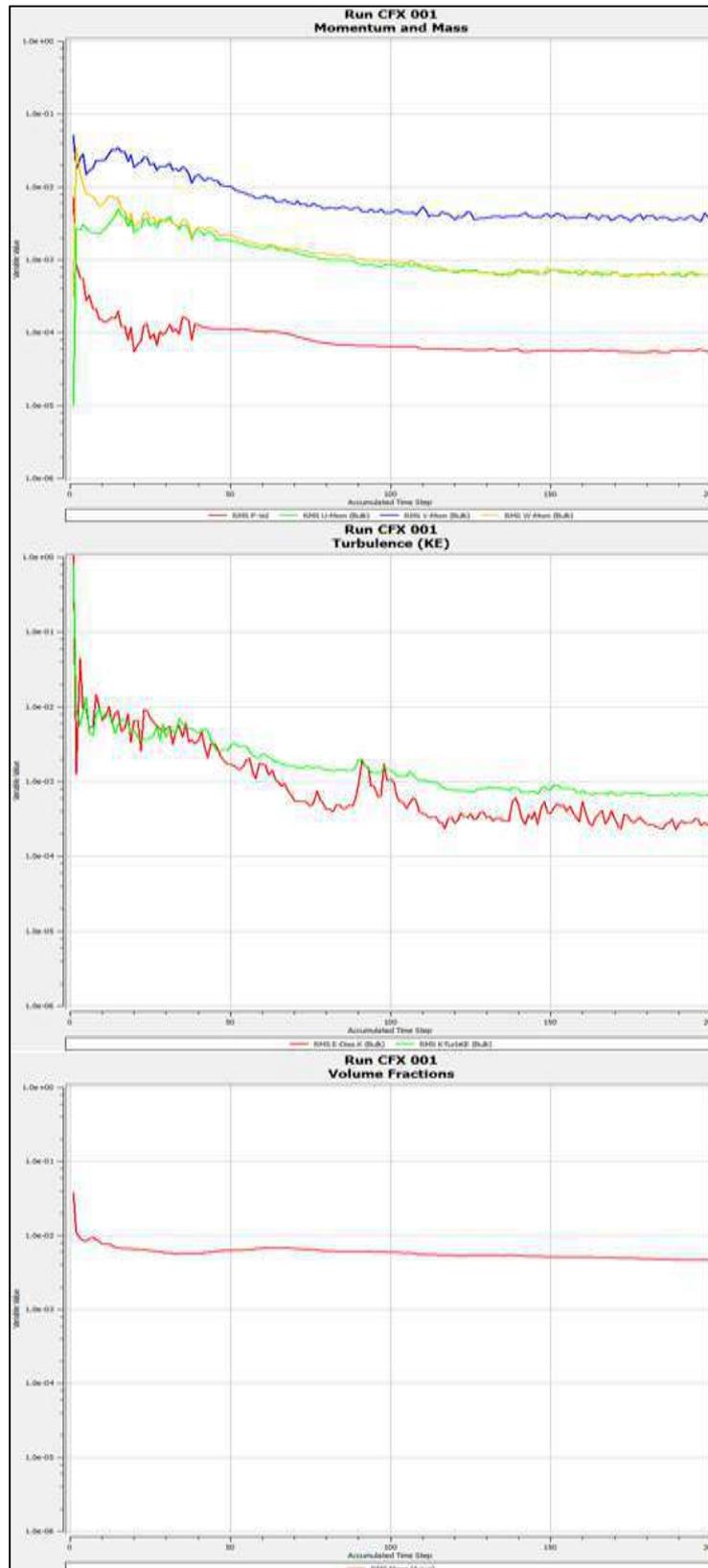


Figura C.1 Curva de convergencia para la condición compuertas abiertas, caudal promedio y tirante de 0.4 m

Fuente: Elaboración propia (2015).

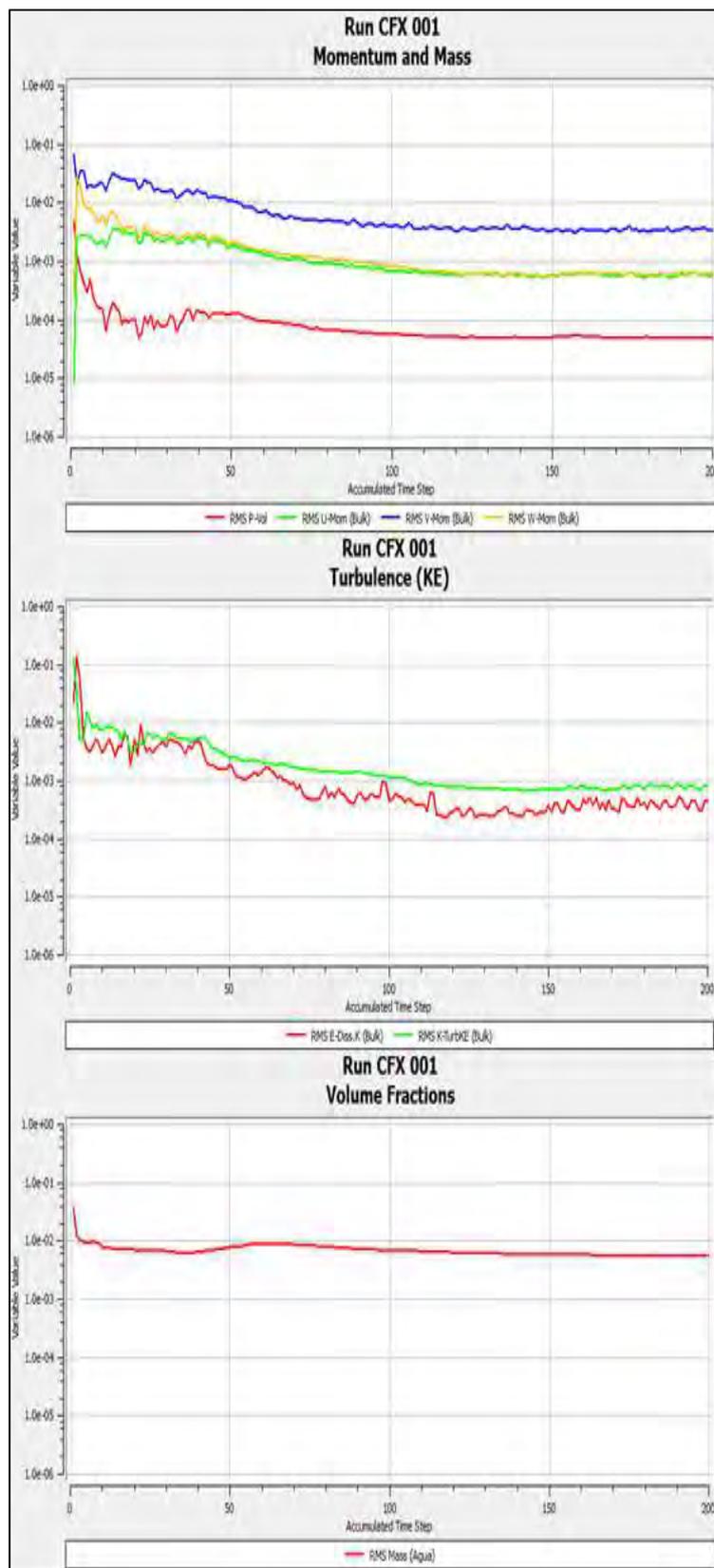


Figura C.2 Curva de convergencia para la condición compuertas abiertas, caudal promedio y tirante de 0.5 m.

Fuente: Elaboración propia (2015).

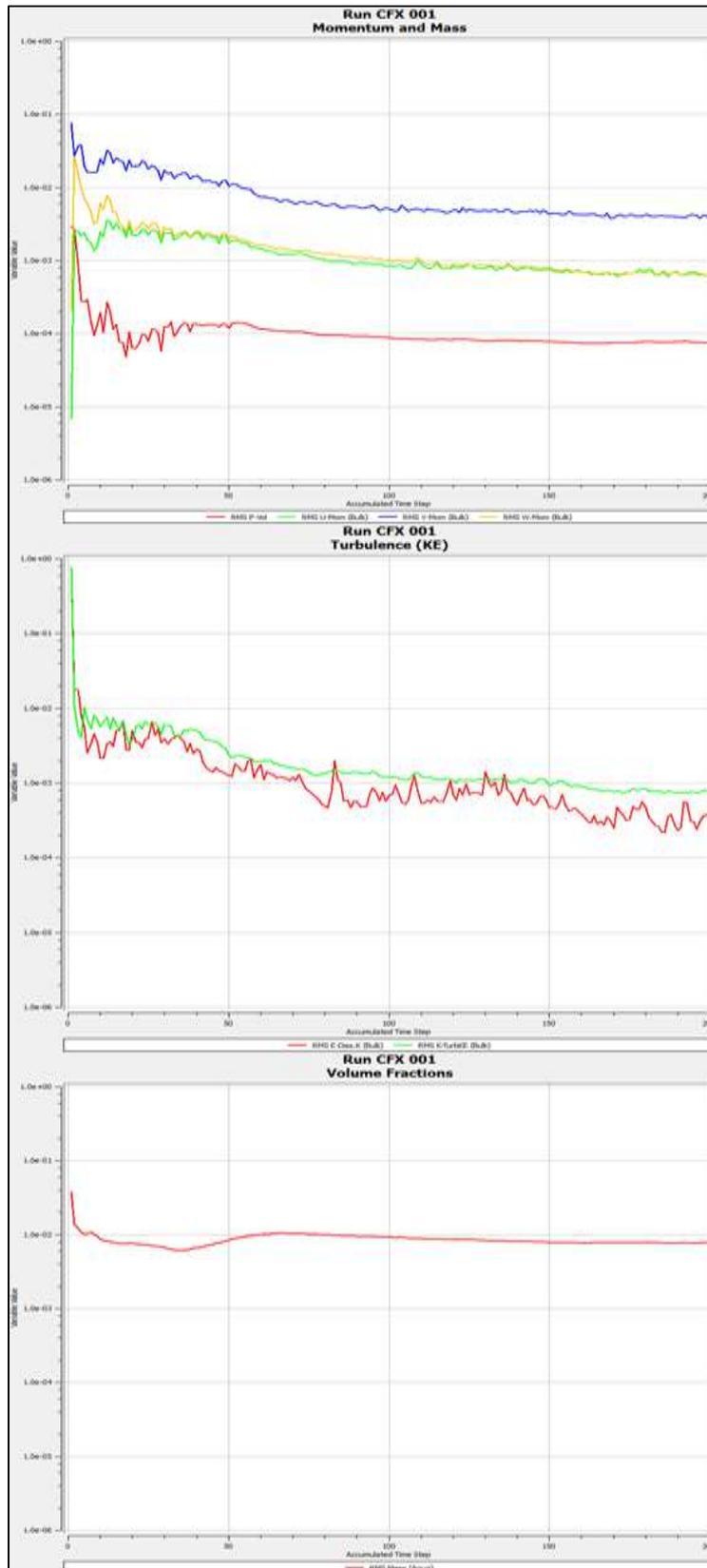


Figura C.3 Curva de convergencia para la condición compuertas abiertas, caudal promedio y tirante de 0.6 m.

Fuente: Elaboración propia (2015).

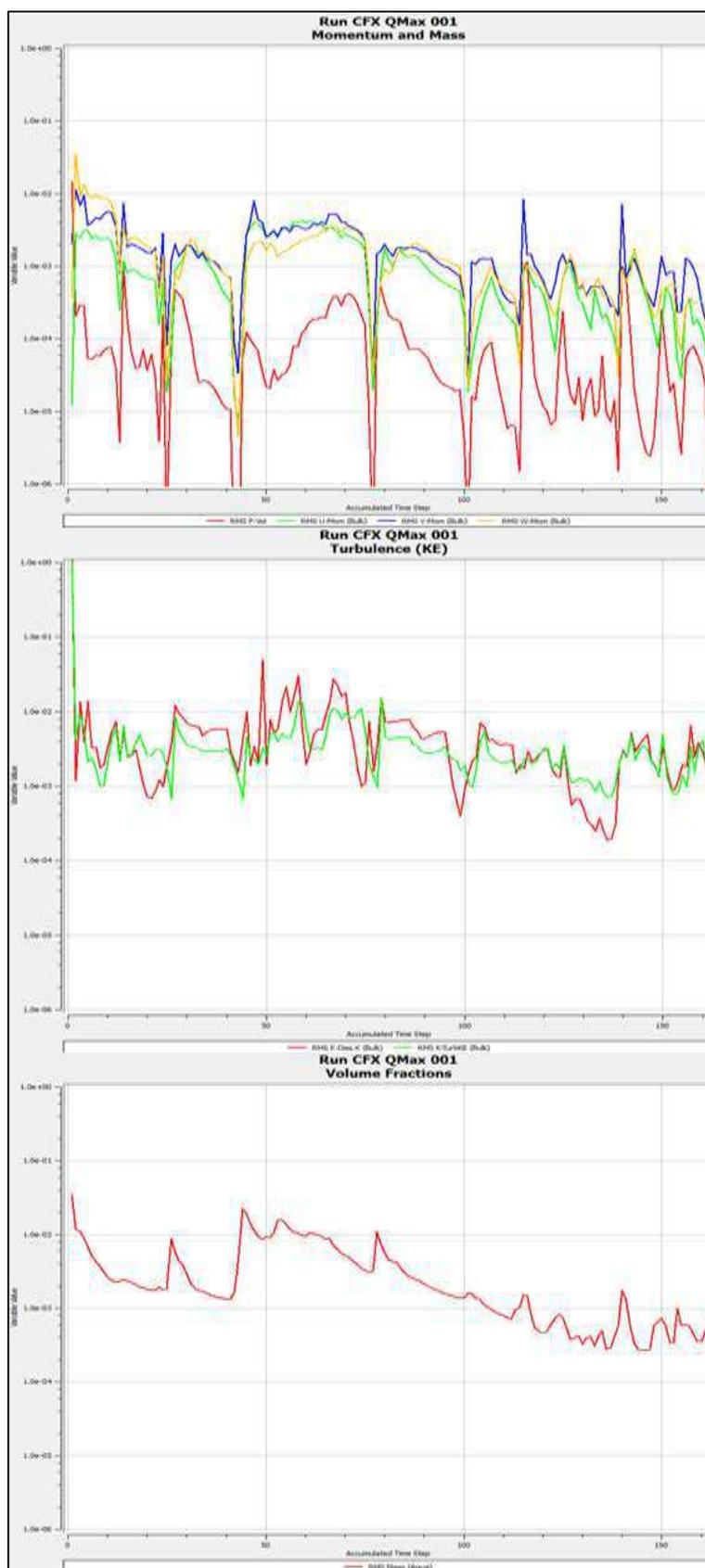


Figura C.4 Curva de convergencia para la condición compuertas abiertas, caudal máximo y tirante de 0.4 m.

Fuente: Elaboración propia (2015).

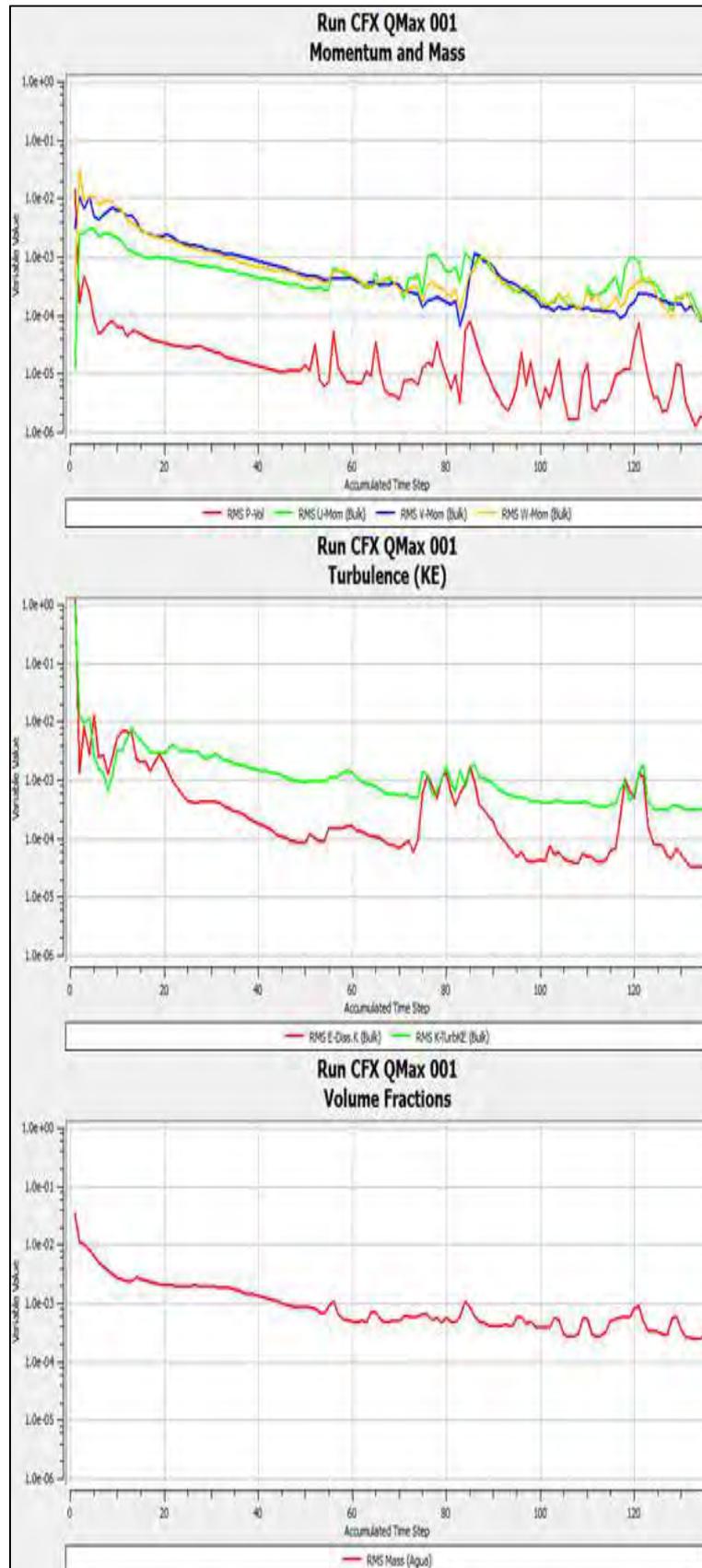


Figura C.5 Curva de convergencia para la condición compuertas abiertas, caudal máximo y tirante de 0.5 m.

Fuente: Elaboración propia (2015).

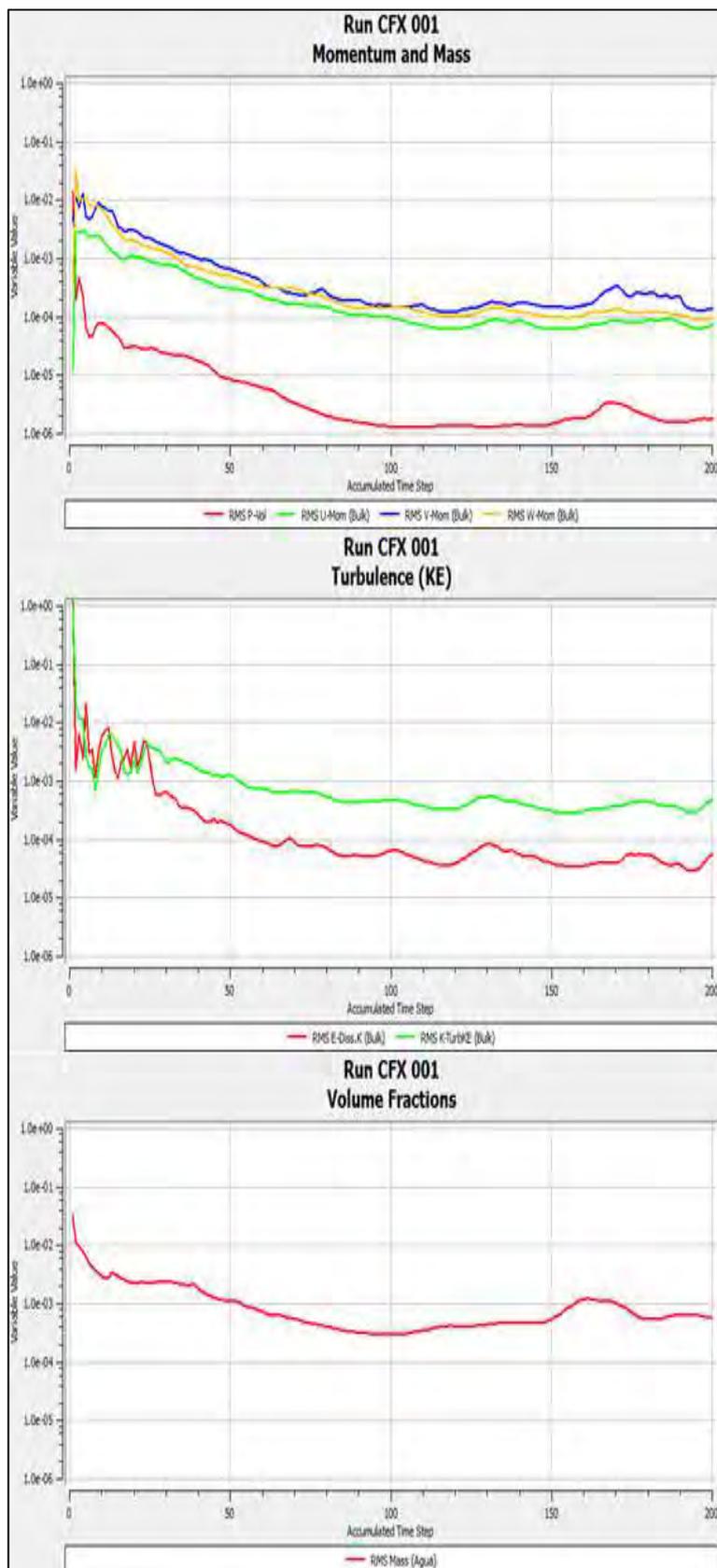


Figura C.6 Curva de convergencia para la condición compuertas abiertas, caudal máximo y tirante de 0.6 m.

Fuente: Elaboración propia (2015).

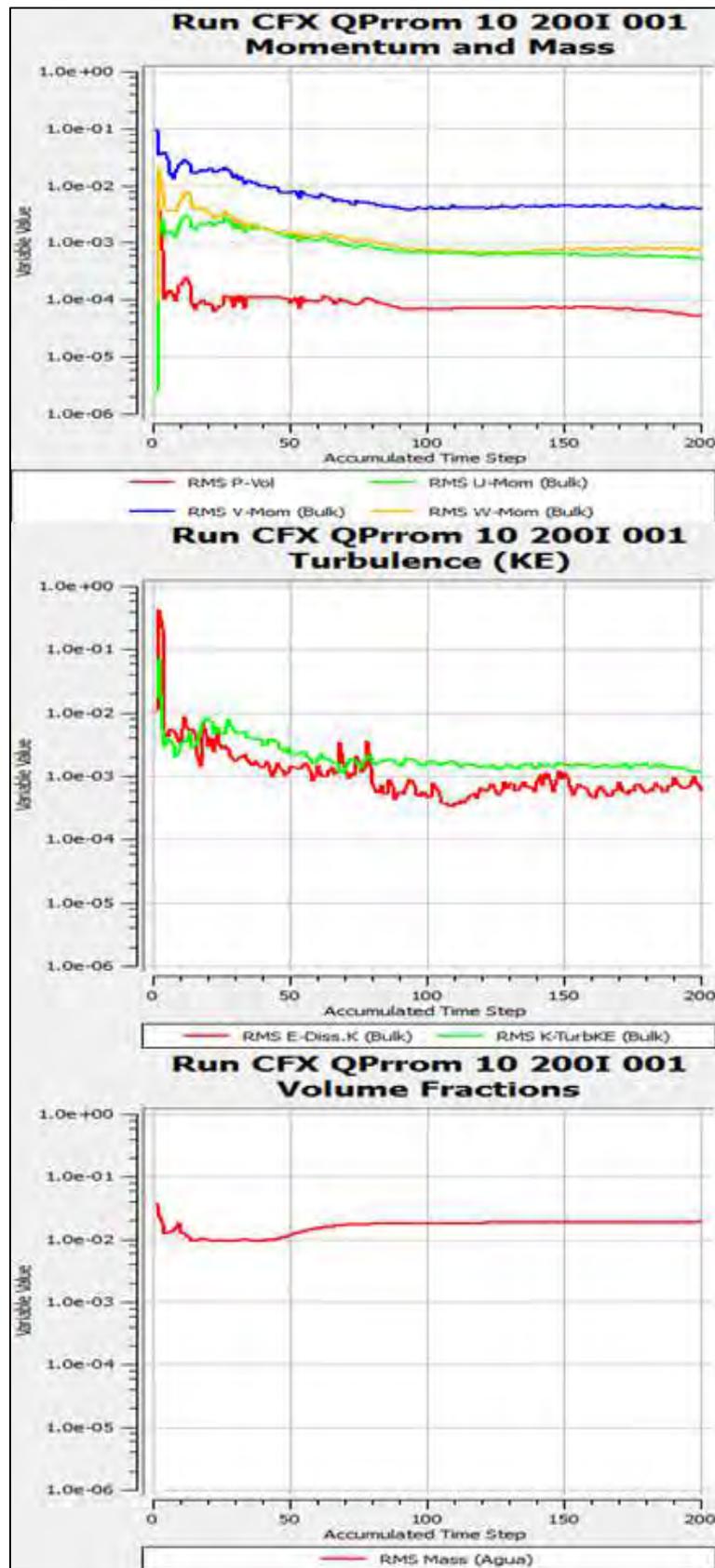


Figura C.7 Curva de convergencia para la condición compuertas cerradas y caudal promedio.

Fuente: Elaboración propia (2015).



Figura C.8 Curva de convergencia para la condición compuertas cerradas y caudal máximo.

Fuente: Elaboración propia (2015)

Anexo D

Esfuerzos de corte de la modelación numérica

En la última etapa de la modelación numérica, que corresponde al post-procesamiento, es donde se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones. En este anexo se presentarán, desde la Figura D.1 hasta la Figura D.16, los gráficos de esfuerzo de corte en la bocatoma para cada una de las condiciones de compuerta y caudal.

Si bien los valores hallados no presentan un problema severo debido a la gran resistencia que presentan los concretos de alta resistencia frente a los esfuerzos cortantes, los gráficos mostrados muestran las zonas de la estructura más vulnerables que pueden ser afectadas por la erosión por potencia de flujo.

Compuertas abiertas, caudal promedio y tirante de 0.40 m

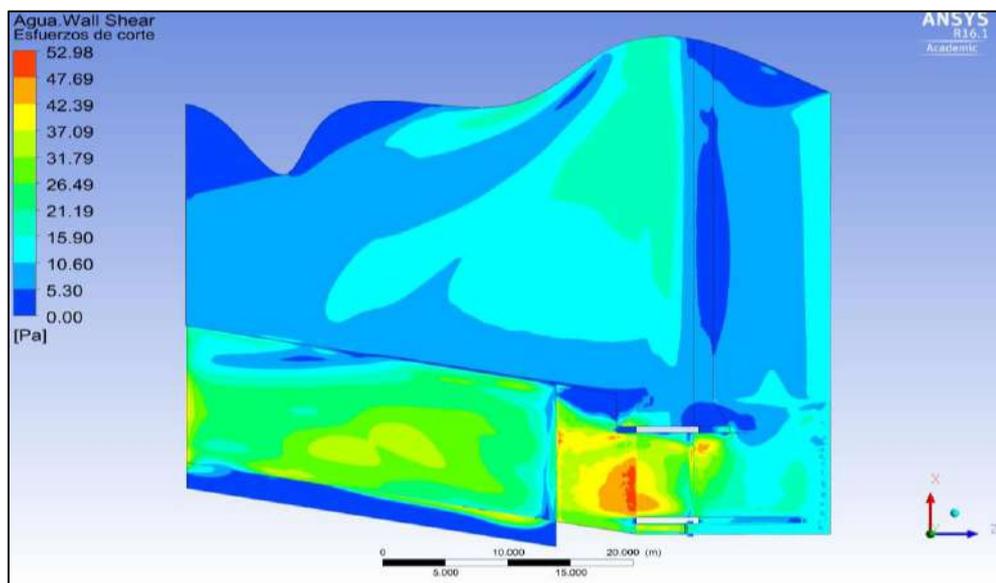


Figura D.1 Vista general de los esfuerzos de corte en la estructura.

Fuente: Elaboración propia (2015).

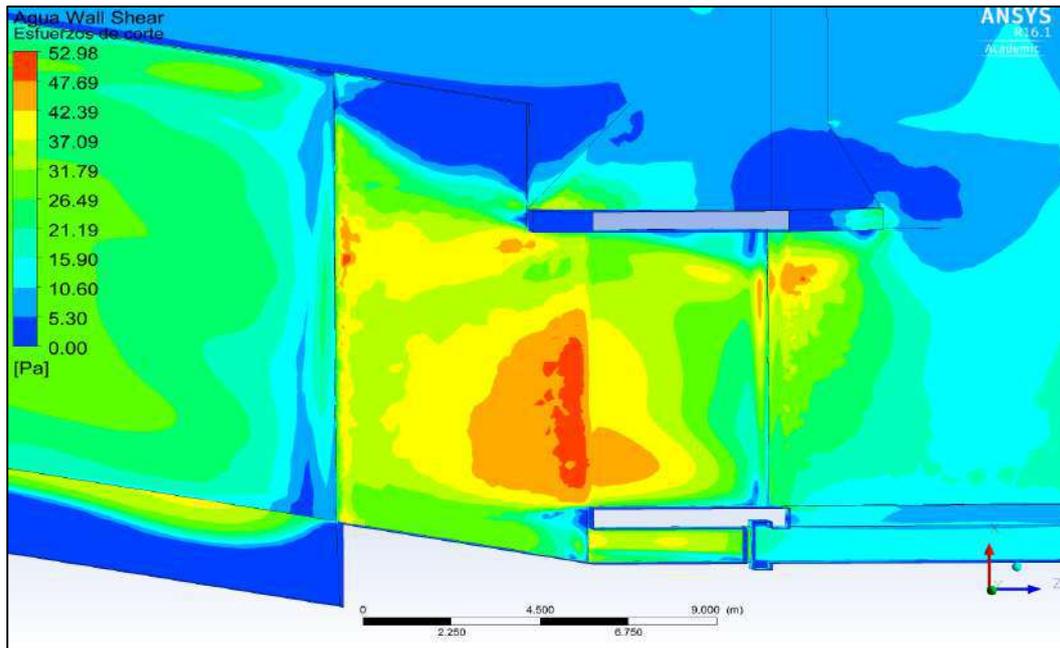


Figura D.2 Esfuerzos de corte en superficie de análisis.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Compuertas abiertas, caudal promedio y tirante de 0.50 m

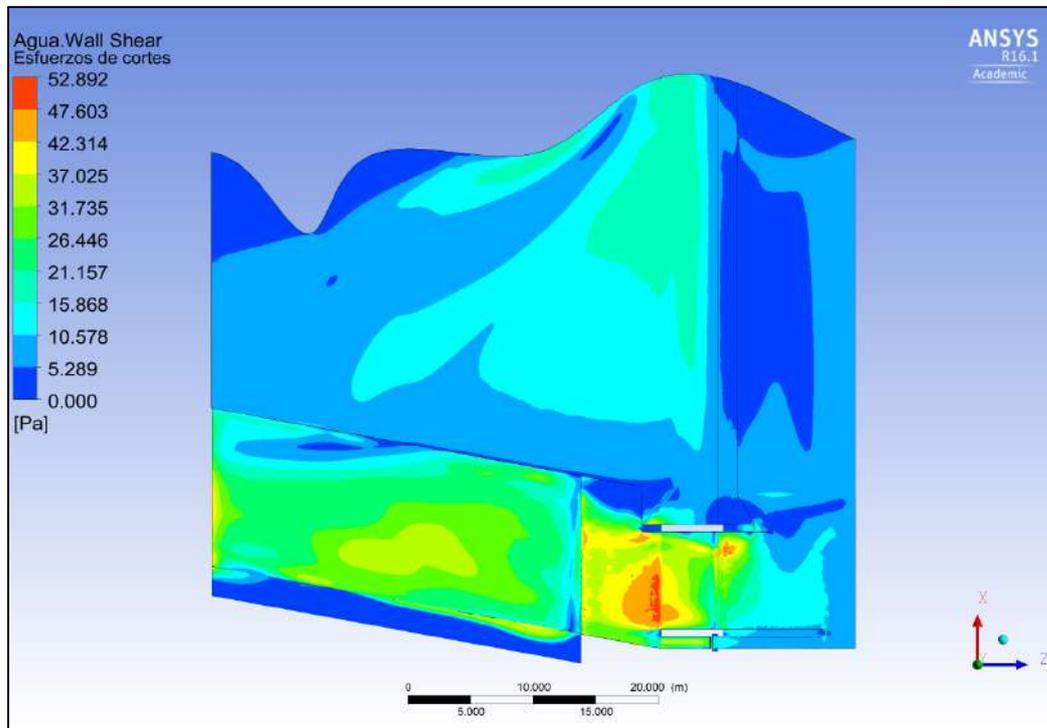


Figura D.3 Vista general de los esfuerzos de corte en la estructura.

Fuente: Elaboración propia (2015).

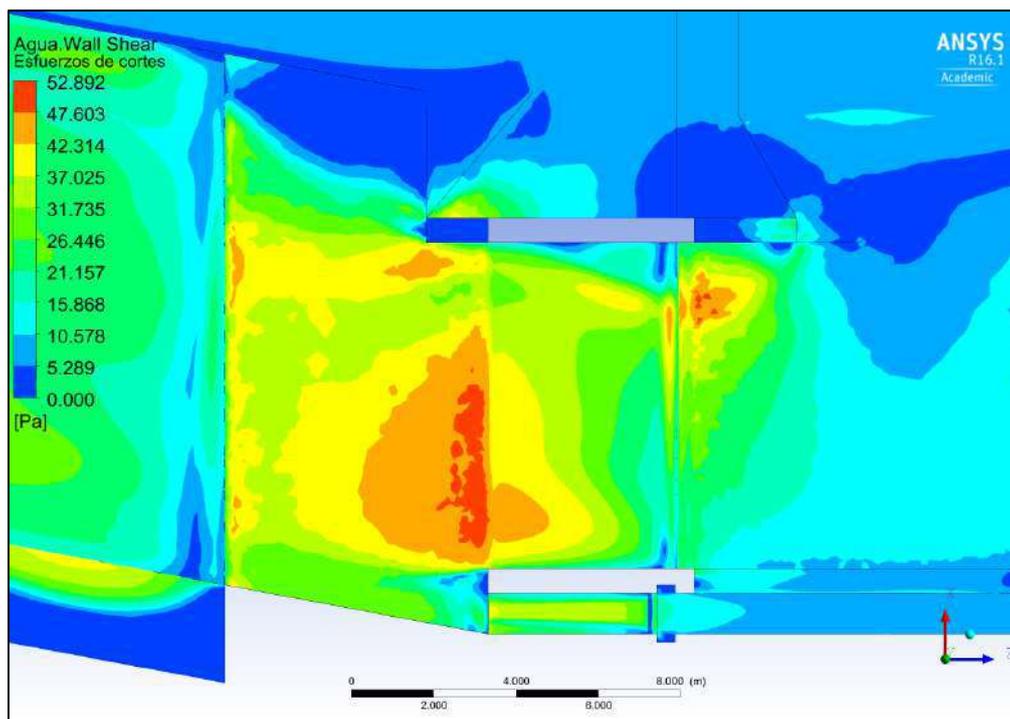


Figura D.4 Esfuerzos de corte en superficie de análisis.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Compuertas abiertas, caudal promedio y tirante de 0.60 m

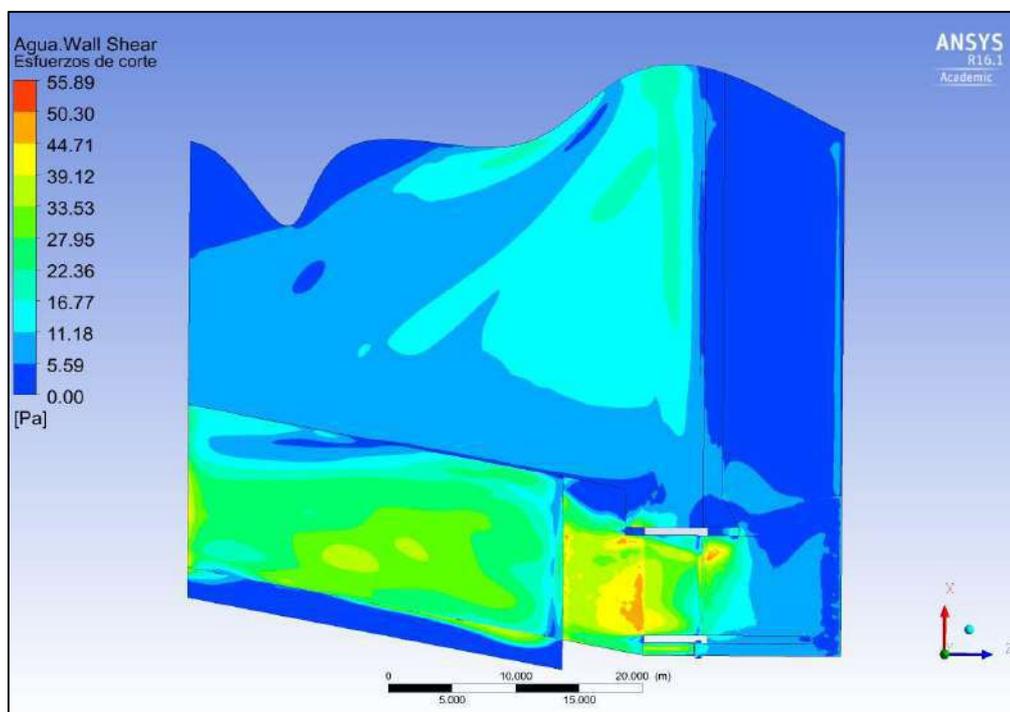


Figura D.5 Vista general de los esfuerzos de corte en la estructura.

Fuente: Elaboración propia (2015).

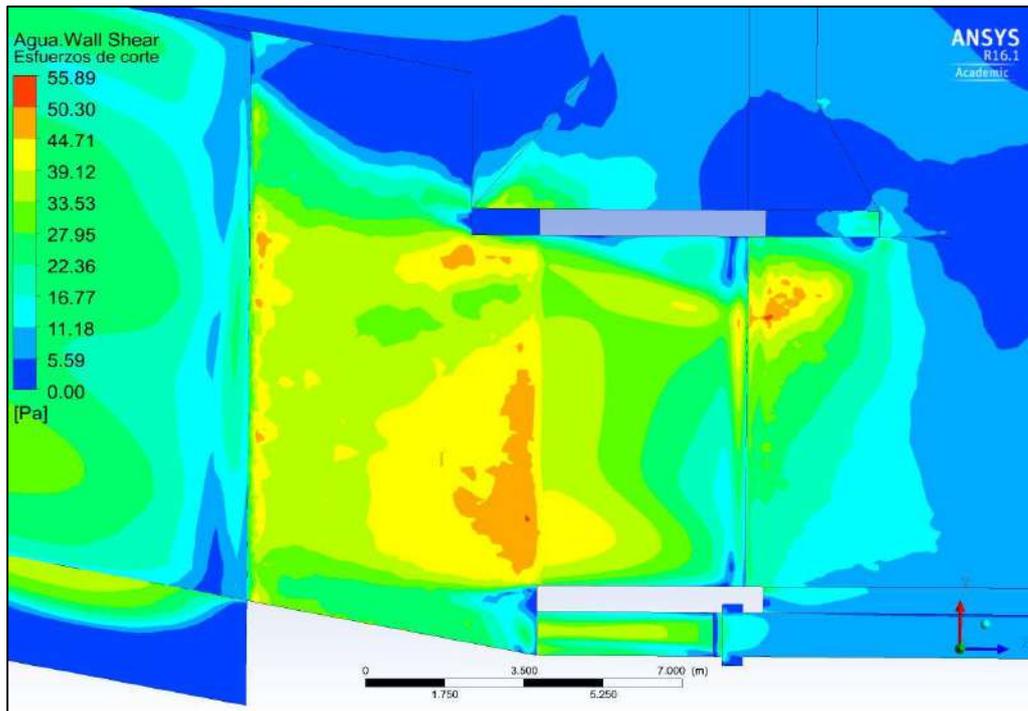


Figura D.6 Esfuerzos de corte en superficie de análisis.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Compuertas abiertas, caudal máximo y tirante de 0.40 m

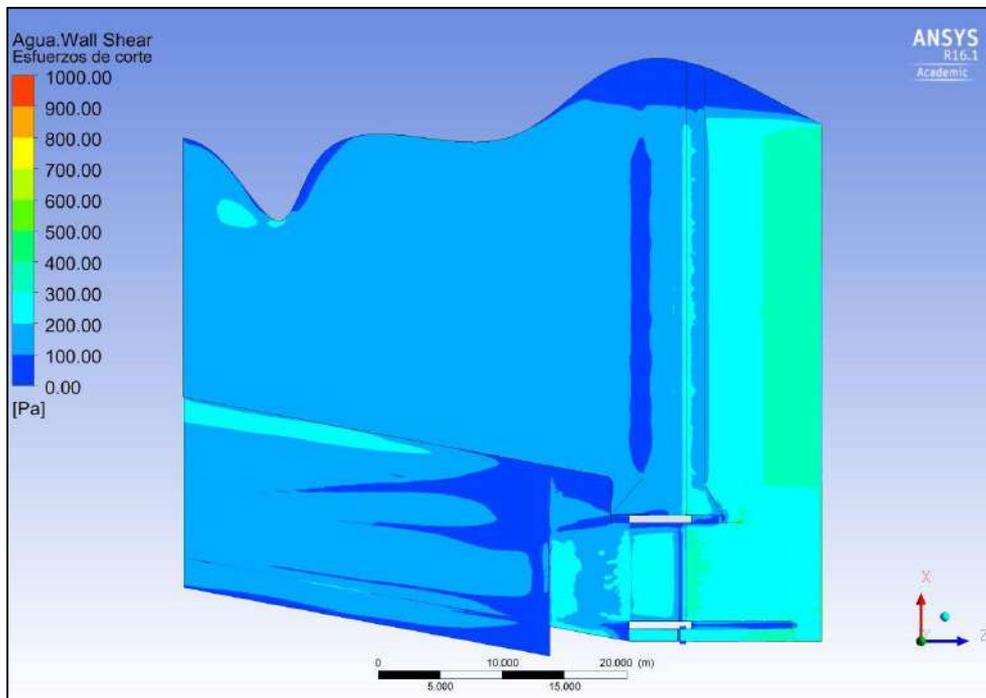


Figura D.7 Vista general de los esfuerzos de corte en la estructura.

Fuente: Elaboración propia (2015).

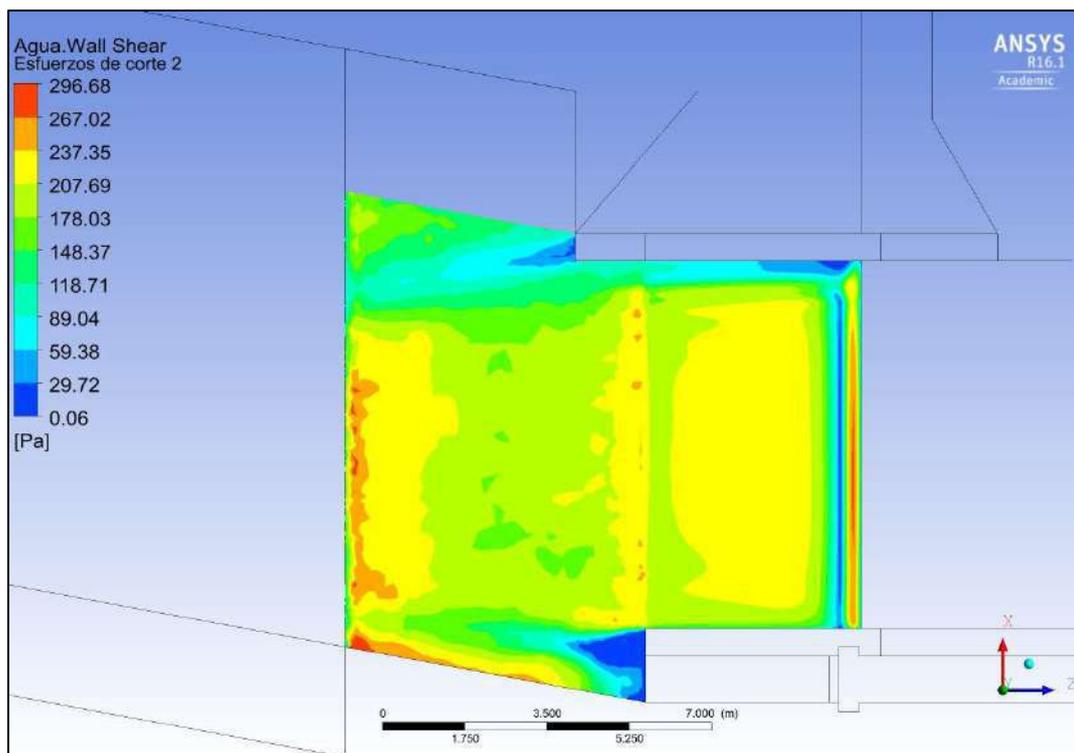


Figura D.8 Esfuerzos de corte en superficie de análisis.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Compuertas abiertas, caudal máximo y tirante de 0.50 m

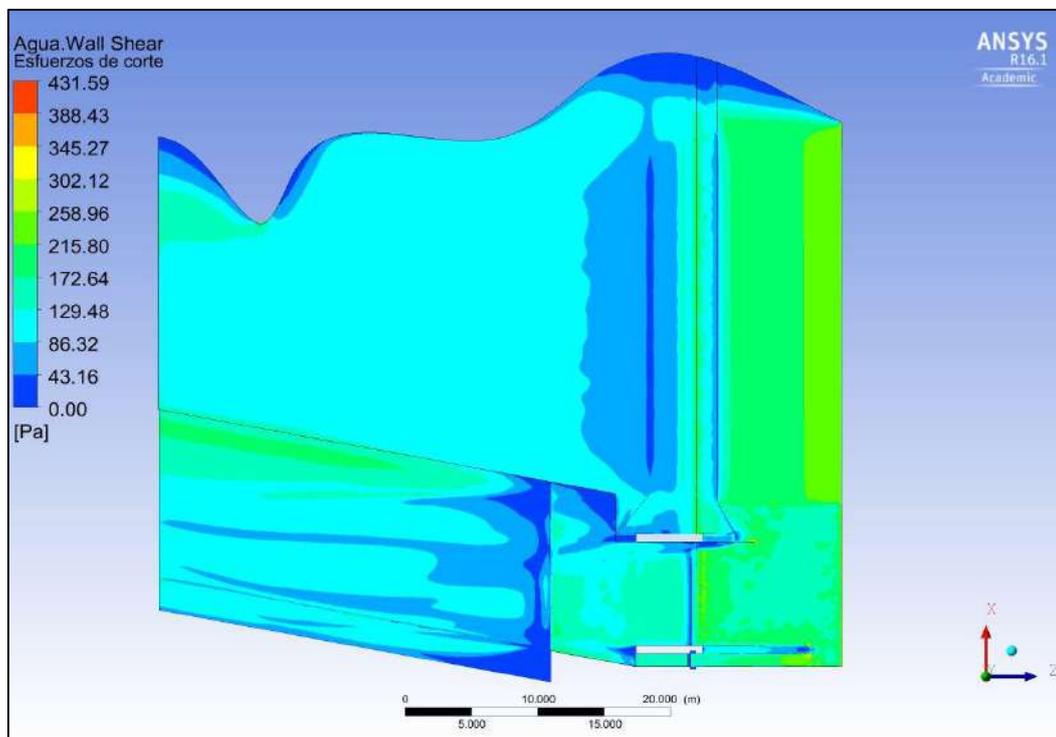


Figura D.9 Vista general de los esfuerzos de corte en la estructura.

Fuente: Elaboración propia (2015).

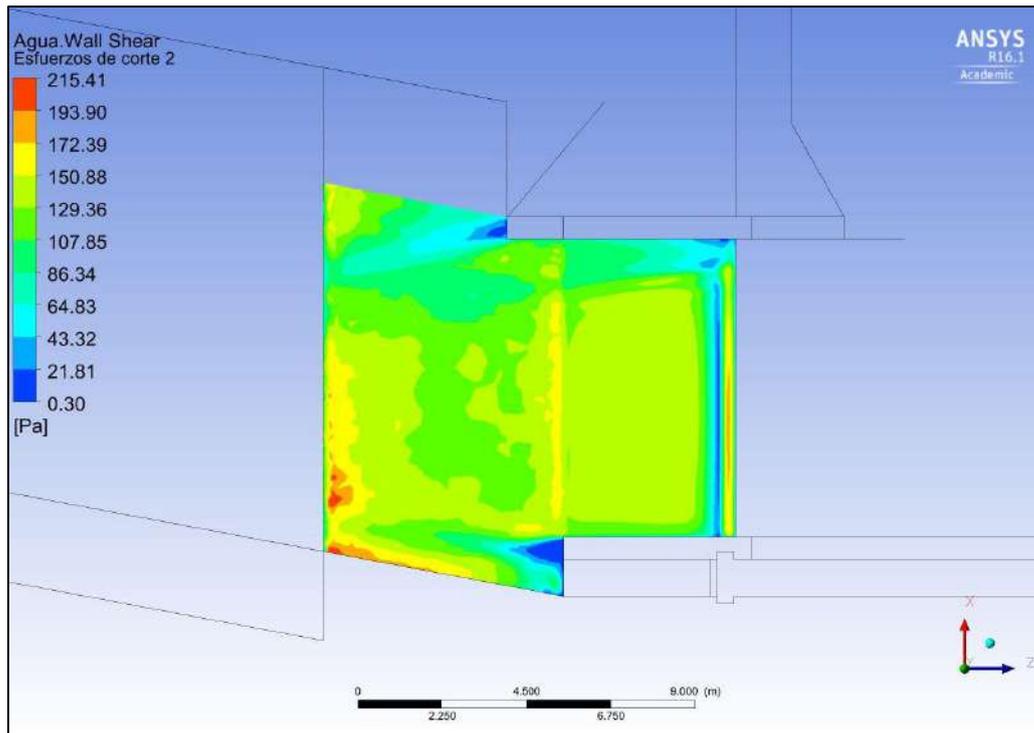


Figura D.10 Esfuerzos de corte en superficie de análisis.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Compuertas abiertas, caudal máximo y tirante de 0.60 m

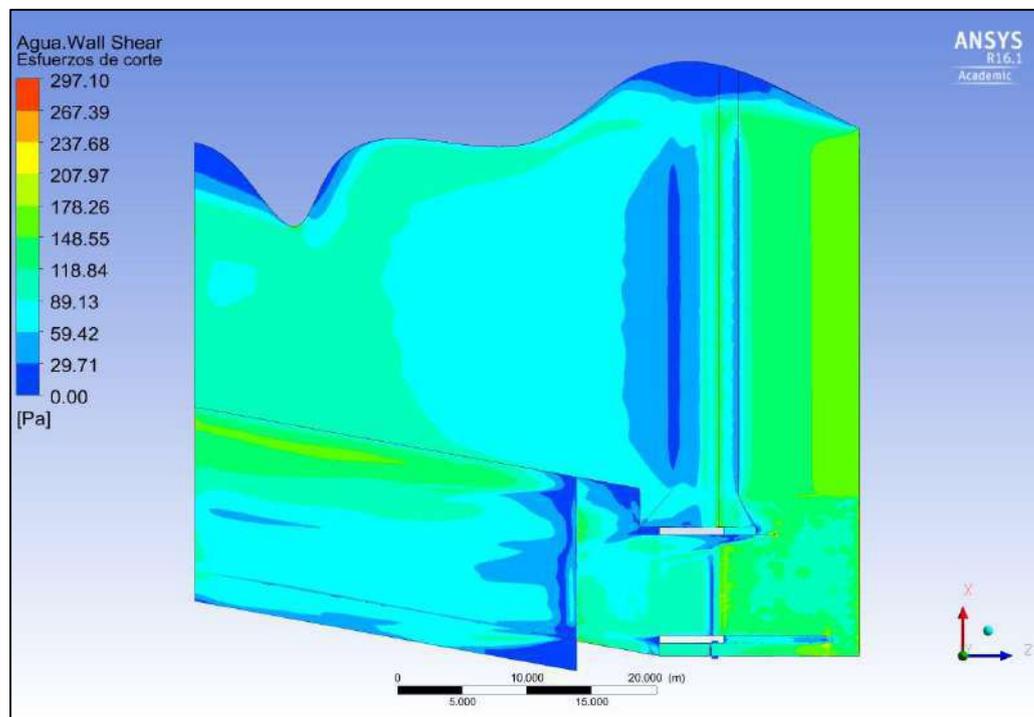


Figura D.11 Vista general de los esfuerzos de corte en la estructura.

Fuente: Elaboración propia (2015).

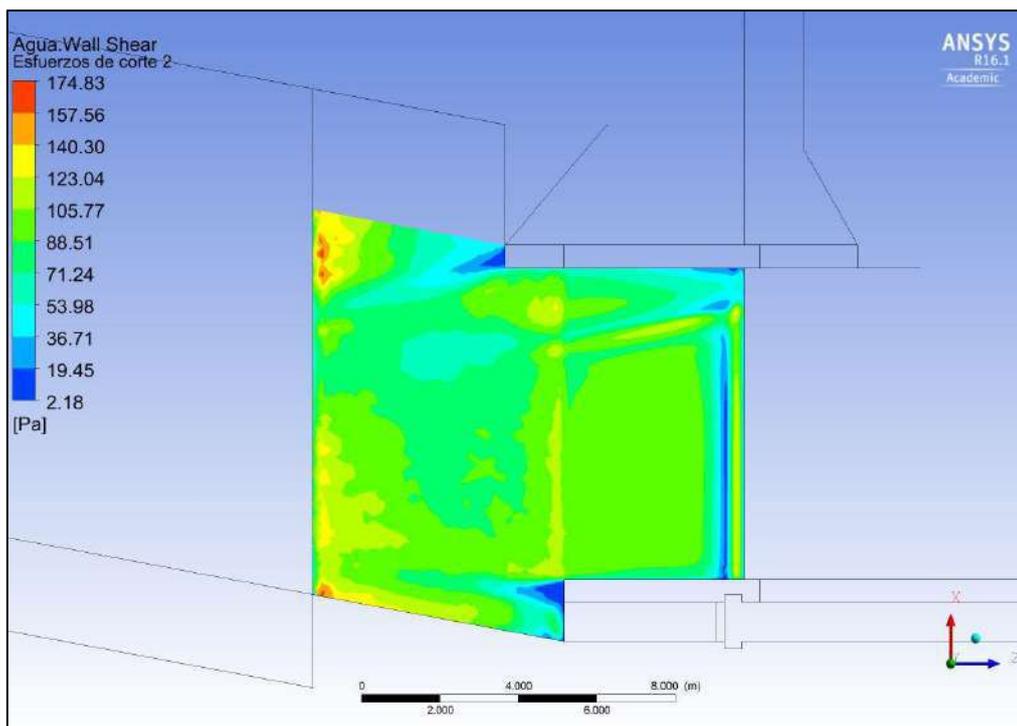


Figura D.12 Esfuerzos de corte en superficie de análisis.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Compuertas cerradas y caudal promedio.

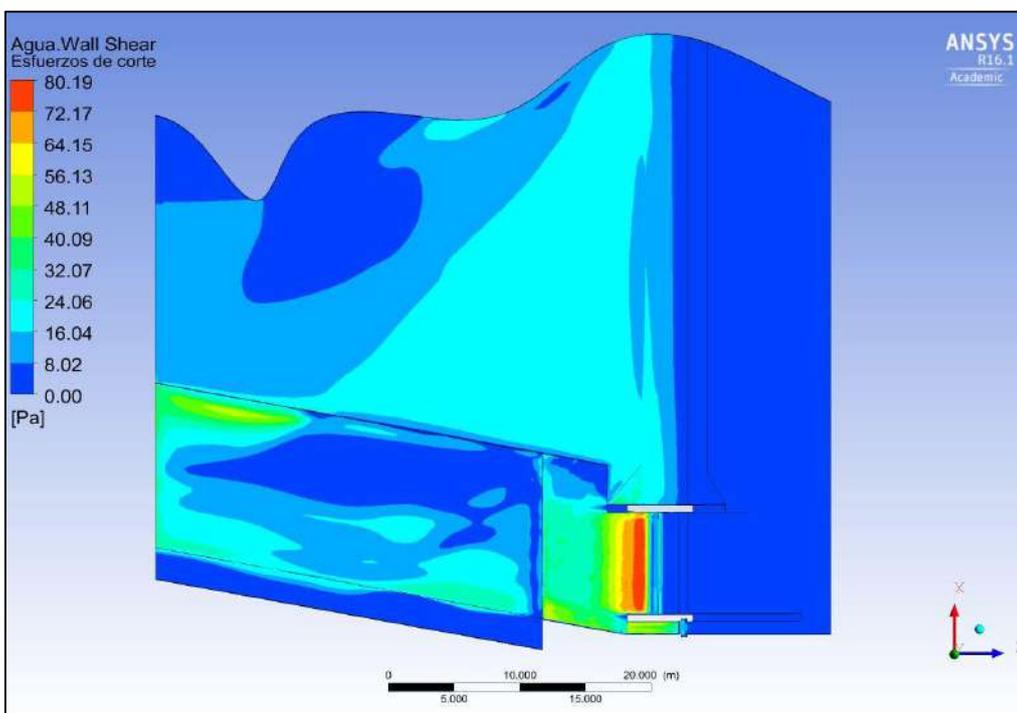


Figura D.13 Vista general de los esfuerzos de corte en la estructura.

Fuente: Elaboración propia (2015).

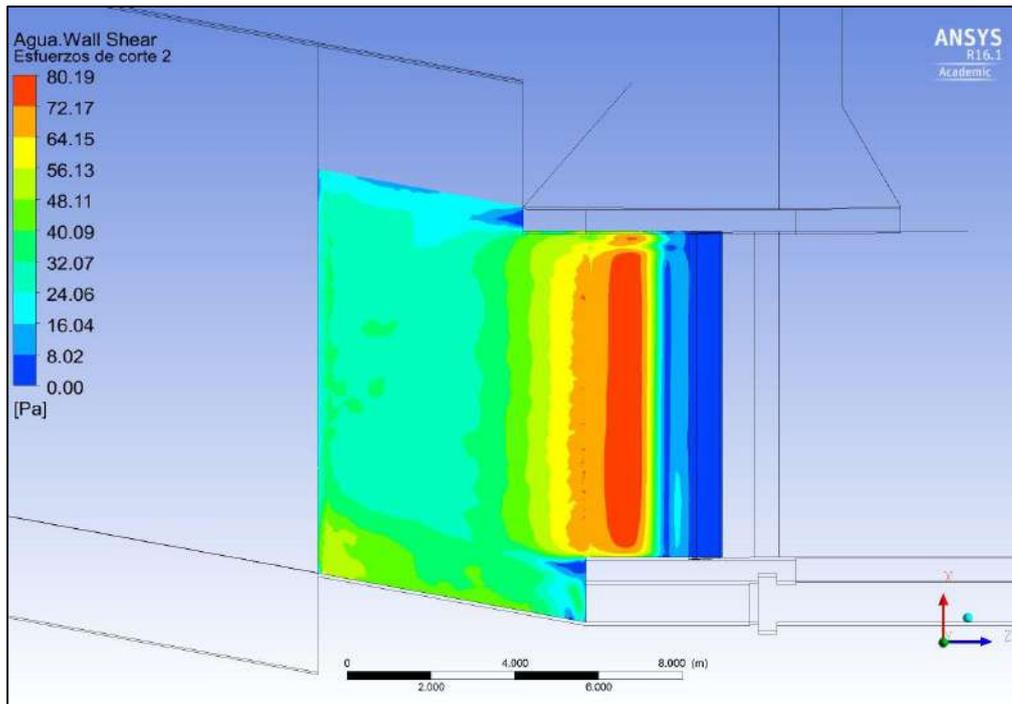


Figura D.14 Esfuerzos de corte en superficie de análisis.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Compuertas cerradas y caudal máximo.

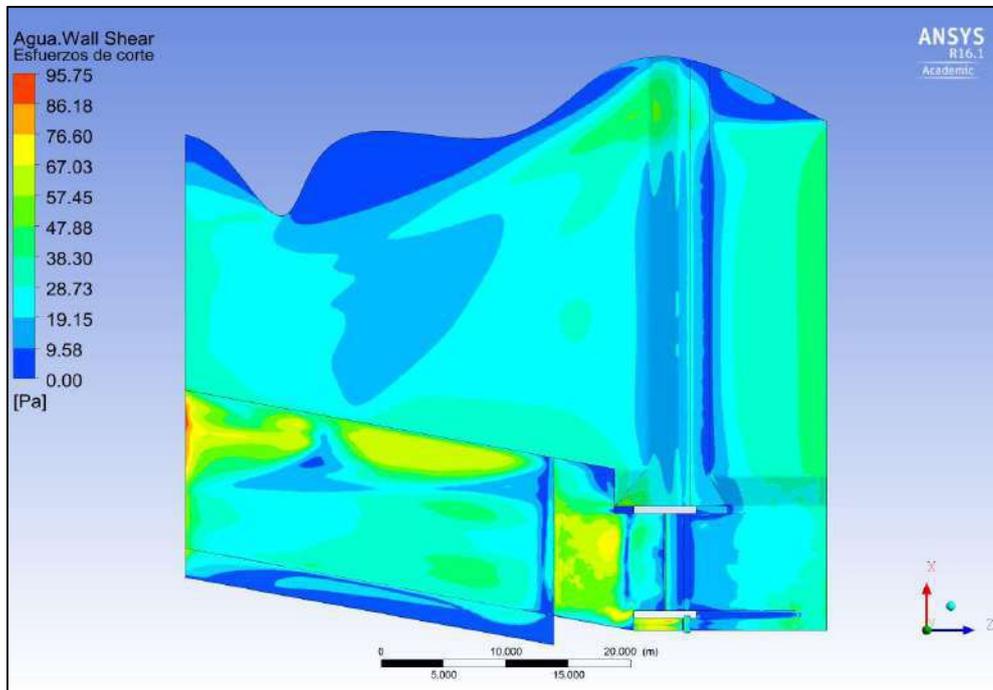


Figura D.15 Vista general de los esfuerzos de corte en la estructura.

Fuente: Elaboración propia (2015).

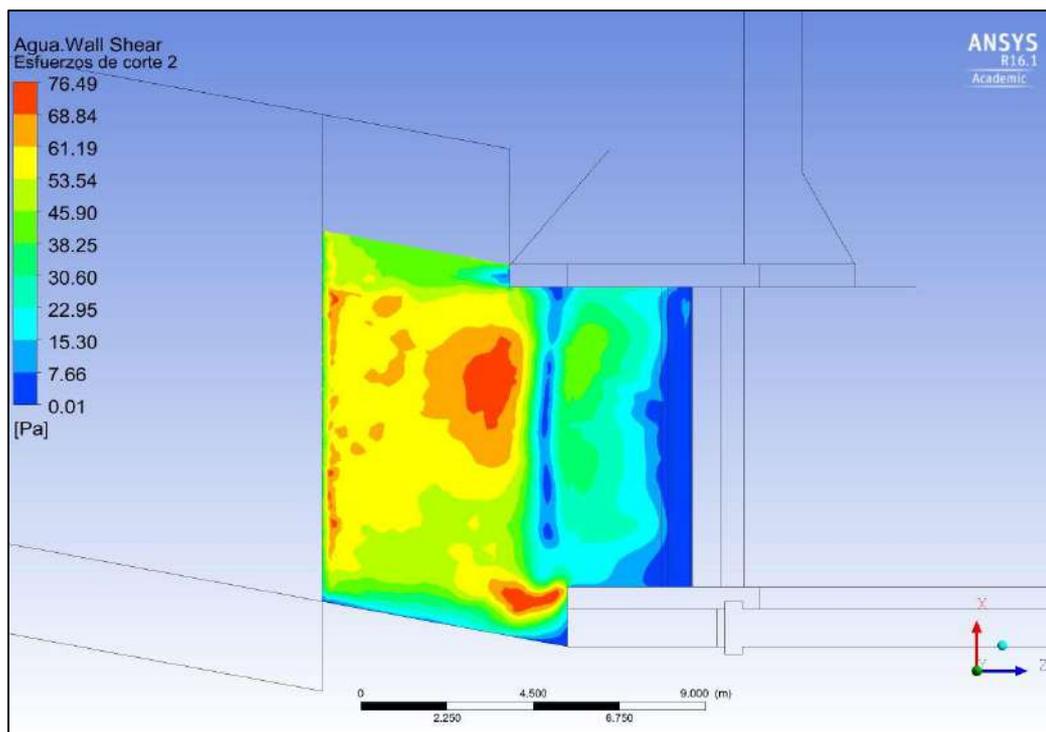


Figura D.16 Esfuerzos de corte en superficie de análisis.

Fuente: Elaboración propia (2015).

Anexo E

Manual básico del uso del ANSYS

E.1 Presentación del espacio de trabajo

E.1.1 ANSYS Workbench

ANSYS Workbench es una herramienta de gestión que permite administrar los proyectos de simulación y se encarga de la comprobación gráfica del desarrollo de estos. Ésta presenta una interfaz de nivel superior que unifica las herramientas pertenecientes a distintos softwares en un solo programa.

ANSYS Workbench administra el paso de la información de la geometría, mallado, solucionador y post-procesamiento a través de los distintos programas que pertenecen al ANSYS.

La interfaz que presenta el ANSYS Workbench se muestra en la figura E.1, en ella se pueden observar los distintos espacios de trabajo que se explicarán a continuación.

- **Toolbox (Caja de herramientas)**

Es el lugar donde encontramos los distintos programas o softwares que nos permiten realizar las simulaciones de dinámica de fluidos, estructuras mecánicas, electromagnéticas y sistemas multifísicos.

En esta zona se encuentran varias pestañas, entre las más destacables están: *Analysis Systems* (sistemas de análisis), que son “paquetes” que incluyen todas las distintas herramientas que conforman el esquema del proyecto; y *Component Systems* (sistemas de componentes), lugar donde se encuentran las herramientas mencionadas anteriormente de manera individual, el usuario es el encargado de entrelazarlas para darle forma al esquema del proyecto.

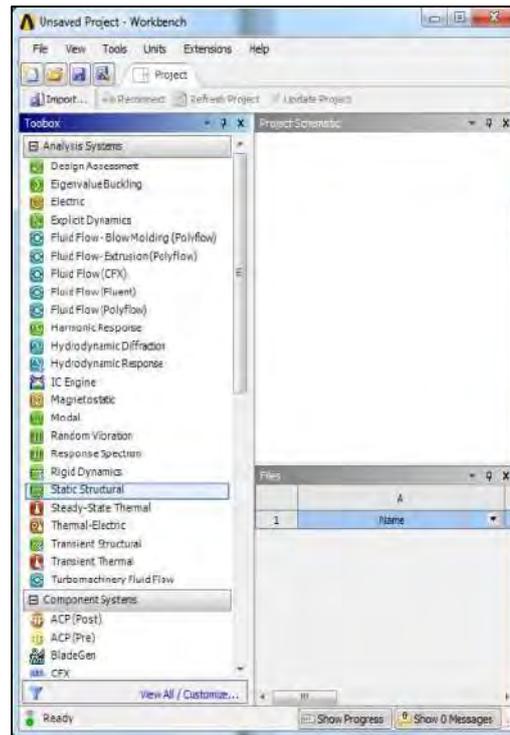


Figura E.1 Interfaz ANSYS Workbench

Fuente: Elaboración propia (2016).

- **Project Schematic (Esquema del proyecto)**

Es el lugar en el cual son colocados los sistemas de análisis y de componentes para llevar a cabo el proyecto.

Se debe arrastrar un paquete ya estructurado de herramientas desde la pestaña “Analysis Systems” o se puede establecer una cadena de trabajo con las distintas herramientas individuales que se encuentran en la pestaña de “Component Systems”; ambas formas permiten realizar un análisis típico de un proyecto. En la figura E.2 Se pueden observar estas dos opciones mencionadas.



Figura E.2 Zona de esquema del proyecto (Project Schematic)

Fuente: Elaboración propia (2016).

Una vez colocadas las herramientas a utilizar dentro del esquema del proyecto se puede observar que aparecen unos símbolos al lado derecho de sus respectivos nombres, estos símbolos son conocidos como estados de celda que, como explica su nombre, sirven para describir o exponer el estado en el que se encuentran cada una de las etapas o herramientas.

Tabla E.1 Significado de los símbolos de las celdas de estado

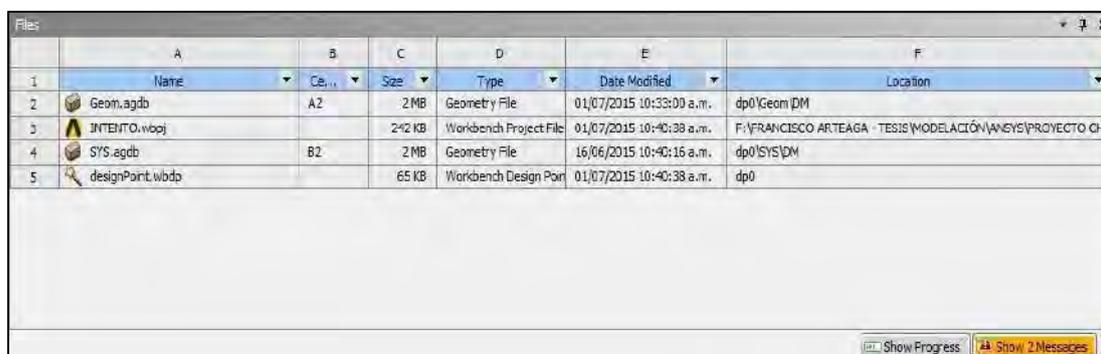
Símbolo	Significado
	Actualizado. Se ha comprobado sin problemas.
	Requiere actualizar. Existen cambios en los datos subidos.
	Requiere actualizar. Existen cambios en los datos locales.
	Sin rellenar. No se ha subido información.
	Requiere atención.
	Solucionando.
	Actualización fallida.
	Actualización interrumpida.
	Cambios pendientes. Estaba actualizado pero se cambió la información

Fuente: Elaboración propia (2016).

Ubicación de archivos en el disco

Se puede habilitar la visualización de los archivos creados en el menú *View* → *Files*, para identificar cada uno de los archivos individuales creados en cada uno de las etapas del proyecto.

La referencia a estos archivos se muestra en un cuadro donde indica el nombre del archivo, la referencia cruzada de la celda, su tamaño localización, entre otros, tal como muestra la Figura E.3.



	A	B	C	D	E	F
	Name	Cell	Size	Type	Date Modified	Location
1	Geom.agdb	A2	2 MB	Geometry File	01/07/2015 10:33:00 a.m.	dp0\Geom\DM
2	INTEMITO.wboj		242 KB	Workbench Project File	01/07/2015 10:40:38 a.m.	F:\FRANCISCO ARTEAGA - TESIS\MODELACIÓN\ANEJOS\PROYECTO CHM
4	SYS.agdb	B2	2 MB	Geometry File	16/06/2015 10:40:15 a.m.	dp0\SYS\DM
5	designPoint.wbdp		65 KB	Workbench Design Port	01/07/2015 10:40:38 a.m.	dp0

Figura E.3 Ventana de visualización de archivos.

Fuente: Elaboración propia (2016).

E.1.2 Geometría: DesignModeler

Para realizar la creación de la geometría a modelar es necesario el uso de la herramienta o subprograma incluido en el ANSYS conocida como *DesignModeler*, al cual podemos acceder al hacer doble click en la celda *Geometry* o mediante la primera opción del cuadro que aparece al hacer click derecho en la misma celda. (Figura E.4)

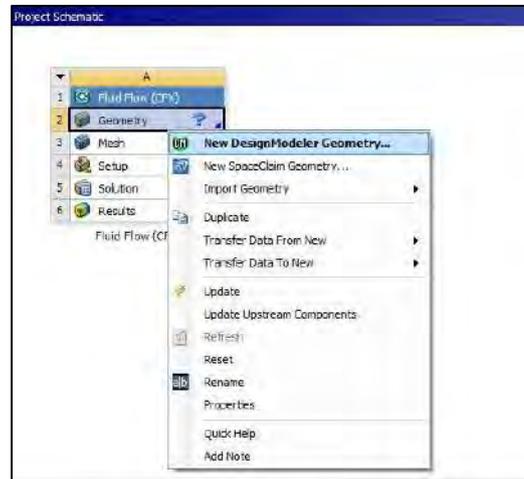


Figura E.4 Forma de ingreso al DesignModeler

Fuente: Elaboración propia (2016).

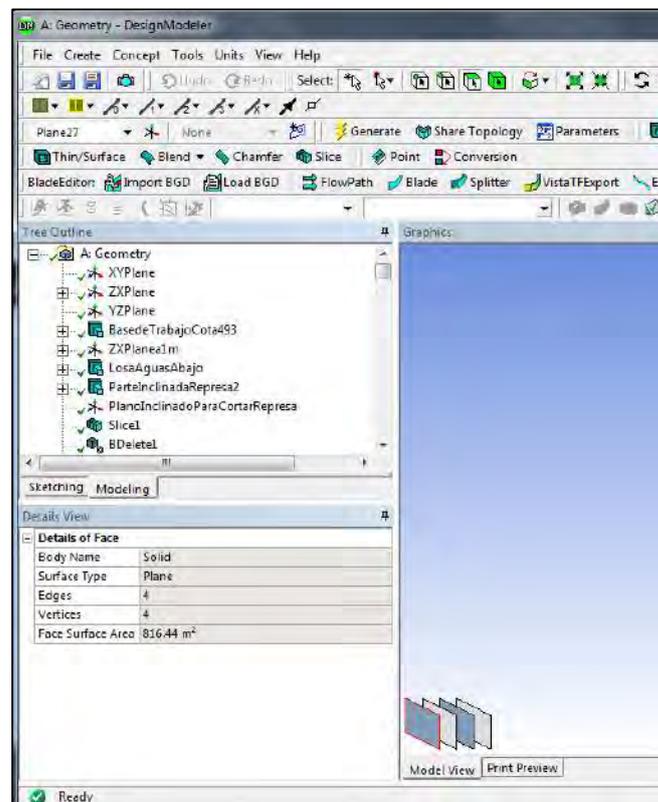


Figura E.5 Interfaz del DesignModeler

Fuente: Elaboración propia (2016).

DesignModeler es una herramienta que permite:

- Importar modelos CAD para el pre-procesamiento.
- Simplificar o modificar la geometría y prepararla para el posterior mallado.
- El modelado paramétrico basado en funciones.

La interfaz que presenta el DesignModeler se muestra en la Figura E.5, en ella se pueden observar los distintos espacios de trabajo que se explicarán a continuación.

- **Tree Outline**

Es el lugar donde se visualizan las operaciones de función realizadas en la creación de la geometría. En un inicio solamente aparecen los tres planos principales de coordenadas, es en los planos donde el usuario crea los *sketches* (bocetos) que utilizará.

Las funciones de modelación se colocan en esta zona de manera secuencial, estas pueden modificarse o eliminarse posteriormente.

Los cuerpos (*bodies*) y partes (*parts*) que se crean producto de las funciones de modelación se enumeran debajo de ellas.

- **Details View**

Lugar donde se muestran los detalles de entrada de cada una de las funciones. Consta de dos columnas, la segunda de ellas contiene los cuadros de entrada de valores o secciones por parte del usuario.

Los cuadros de entrada que requieran la sección de algún elemento (boceto, geometría, etc) tendrá la opción de Aplicar/Cancelar. Además, los cuadros que estén resaltados de color amarillos indican que se requiere la entrada o selección de datos. (Figura E.6)

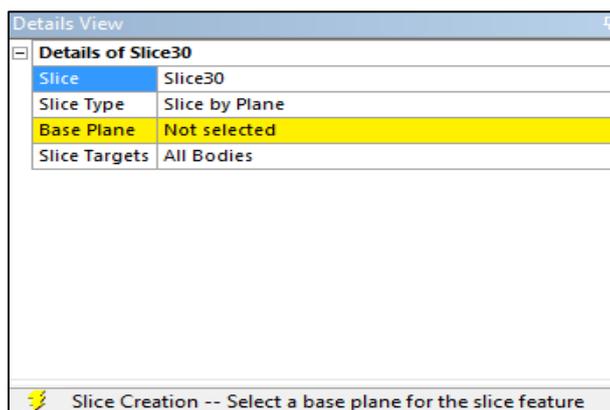


Figura E.6 Vista de la ventana Details View.

Fuente: Elaboración propia (2016).

Concepto de creación de planos y sketches

Los planos son necesarios para la creación de sketches en 2D, además, son requeridos para realizar algunas operaciones de modelado. En el proceso de la creación de la geometría bidimensional y tridimensional se pueden usar los sketches como bases.

En el caso de la geometría en 3D se deben seguir los siguientes pasos:

- Crear o seleccionar un plano existente.
- Crear un sketch en el plano seleccionado.
- Aplicar una operación de modelado al sketch.

Creación de planos

Al iniciar un proyecto y abrir el DesignModeler se muestran los planos XY, YZ y ZX, en los cuales se pueden crear los respectivos sketches (Figura E.7). Sin embargo, se pueden crear nuevos planos que también contendrán sketches.

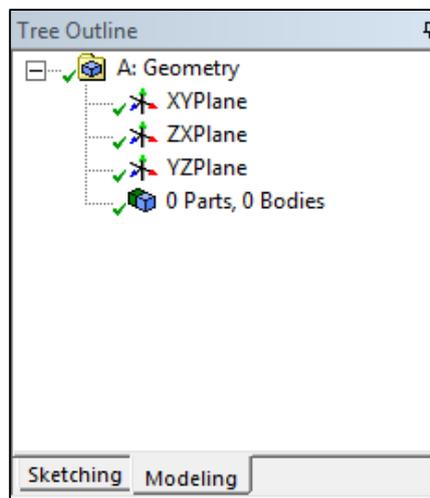


Figura E.7 Vista del Tree Outline y los planos de coordenadas principales.

Fuente: Elaboración propia (2016).

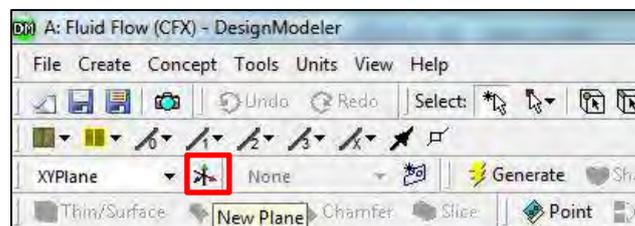


Figura E.8 Forma de creación de un nuevo plano.

Fuente: Elaboración propia (2016).

En la Figura E.8 se puede observar la opción para crear un plano, al darle click se mostrará en la zona de *Details View* las diversas opciones que pueden escogerse para realizar la creación del nuevo plano. Por ejemplo, pueden crearse planos a partir de transformaciones

como el desplazamiento o rotación de algunos ya existentes o crearlos a partir de algunas de las caras o superficies de otros cuerpos. Se pueden aplicar de manera opcional de una a más transformaciones geométricas (Figura E.9).

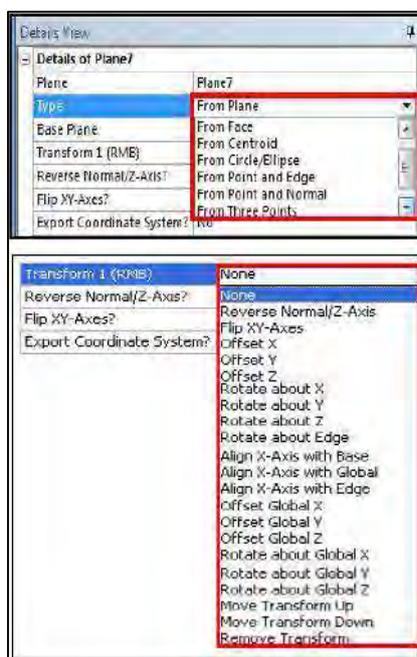


Figura E.9 Transformaciones disponibles en la creación de planos.

Fuente: ANSYS® Academic Research. Reference Guide. Release 16.0. (2016).

Creación de sketches

La opción mostrada en la Figura E.10, puede utilizar para crear un sketch en el plano que esté seleccionado o activo. Los sketches creados se colocan en el *Tree Outline* debajo del plano al que estén asociados.



Figura E.10 Forma de creación de un nuevo boceto (sketch).

Fuente: Elaboración propia (2016).

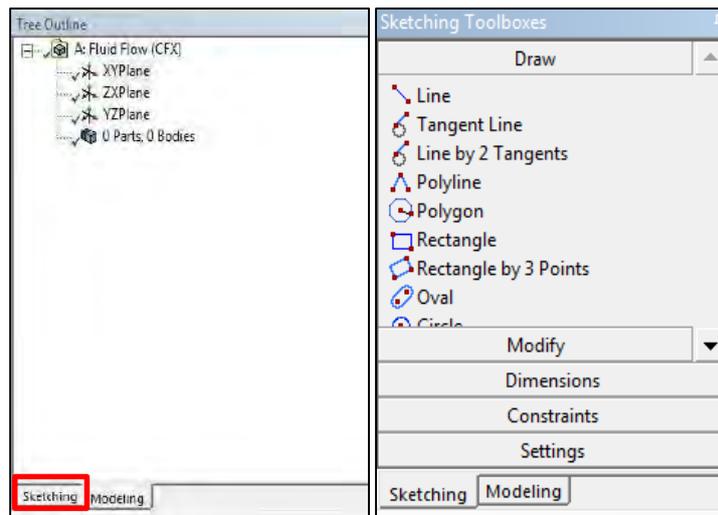


Figura E.11 Visualización del modo Sketching.

Fuente: Elaboración propia (2016).

Los sketches solamente pueden crearse en el modo *Sketching* (Figura E.11), el cual presenta las siguientes opciones:

- **Draw Toolbox (Figura E.12)**

- Muchas de las opciones son fáciles de entender y de usar.
- La barra de estado, ubicada debajo del recuadro de Details View, provee de las instrucciones necesarias para completar cada operación.
- Algunas operaciones presentan opciones adicionales al hacer click derecho en el espacio del gráfico.

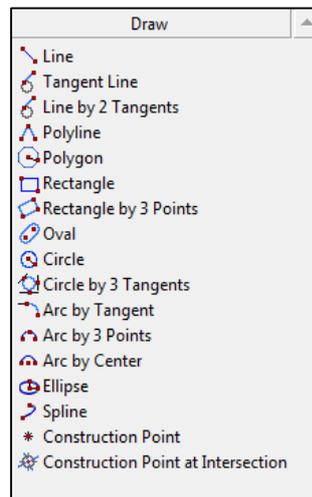


Figura E.12 Herramientas del Draw Toolbox.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- **Modify Toolbox (Figura E.13)**

- Puede utilizarse para agregar, remover o editar elementos en un sketch existente mediante recorte de sketches, chaflanes, añadido de bordes de división, entre otros.
- Se pueden crear nuevos sketches con las herramientas de cortado, copiado, duplicado, etE., no obstante, estos pertenecerán a un mismo plano.

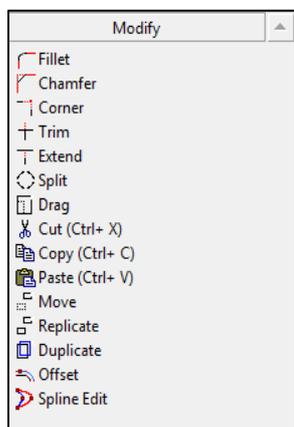


Figura E.13 Herramientas del Modify Toolbox.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- **Dimensions Toolbox (Figura E.14)**

- Se utiliza para definir las dimensiones de los elementos que conforman el sketch.
- El usuario puede seleccionar el tipo de medición que quiere aplicar o seleccionar la opción “General” que elegirá la opción más apropiada según el elemento escogido.

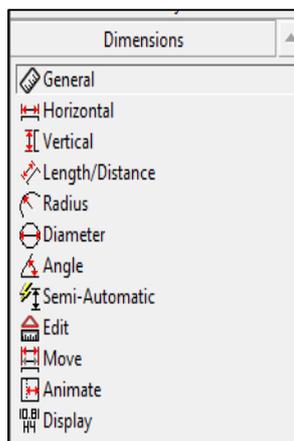


Figura E.14 Herramientas del Dimensions Toolbox

Fuente: Elaboración propia (2016).

- **Constraints Toolbox (Figura E.15)**

- En estas opciones el usuario es capaz de añadir restricciones a los elementos de los sketches que no sean del tipo dimensional. Estos pueden aplicarse manualmente o de forma automática.

- Los colores expresan el estado de restricción de los elementos: azul verdoso, faltan restricciones; azul, bien definido; rojo, muy restringido; y gris, inconsistente o desconocido.
- Cuando un elemento se encuentre sobre-restringido aparecerá un mensaje de advertencia en la pantalla.

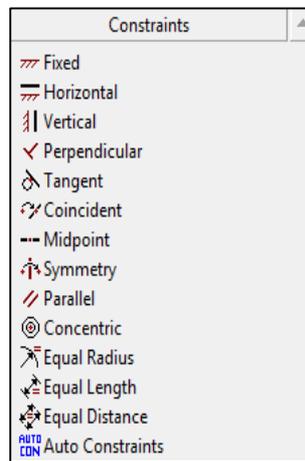


Figura E.15 Herramientas del Constraints Toolbox.

Fuente: Elaboración propia (2016).

Otros conceptos importantes del DesignModeler

Existen tres tipos de cuerpo: de línea, de superficie y sólido. Estos a su vez pueden presentarse en dos estados característicos: activo y congelado.

En el estado activo, los cuerpos que presenten esta característica se combinan automáticamente entre sí si se encuentran en contacto. Por defecto el DesignModeler crea objetos con estas características. El otro estado, *frozen* (congelado), permite a los cuerpos creados mantenerse independientes.

Los principales propósitos para utilizar el estado frozen son: si el mallado requiere cuerpo que se encuentren descompuestos o, si el solucionador requiere diferentes condiciones de borde y continuidad para aplicarlas a distintas áreas del modelo.

Finalmente, están las operaciones tridimensionales, las cuales son herramientas para la creación de nuevos cuerpos o la modificación de los ya existentes. En la Figura E.16 se muestran las principales operaciones de modelación.

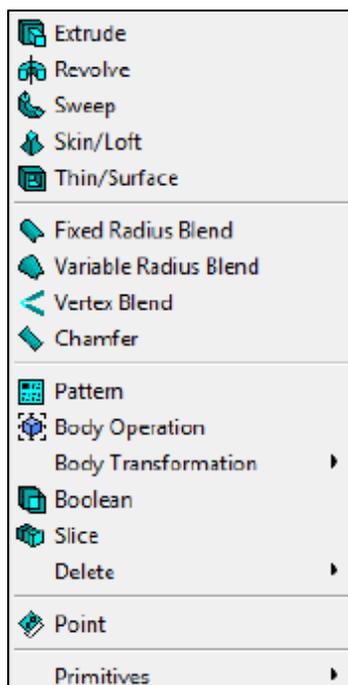


Figura E.16 Principales opciones de modelación.

Fuente: Elaboración propia (2016).

E.1.3 Mallado: Meshing

ANSYS Meshing es un componente del ANSYS Workbench que permite la adaptación y creación de nuevas mallas para distintos modelos físicos y solucionadores.

El propósito del mallado es la creación de una serie de elementos (nodos/celdas) que permitirán resolver las ecuaciones de análisis. Para optimizar el proceso de mallado es necesario la implementación de dominios, de los cuales se hablará más adelante.

Para asegurar la eficiencia y precisión del mallado se debe realizar un refinamiento de la malla para obtener altos gradientes de solución y geometrías más finas; lo mismo ocurre con la calidad del mallado, para no perder la calidad y estabilidad de la solución se deben trabajar con formas de celdas que no se alejen de las formas ideales.

Presenta la misma forma de acceso que el DesignModeler aplicado esta vez a la celda *Mesh*. La interfaz que presenta el Meshing se muestra en la Figura E.17, en ella se pueden observar los distintos espacios de trabajo que se explicarán a continuación.

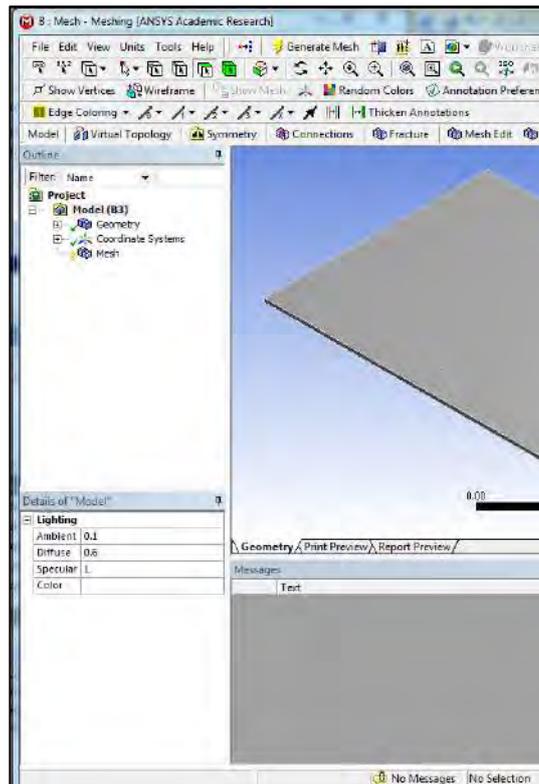


Figura E.17 Interfaz del Meshing.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- **Outline**

Presenta tres secciones por defecto:

- *Geometry*: donde se visualizan los elementos o cuerpos que conforman la geometría creada.
- *Coordinate System*: lugar donde se muestra el sistema de coordenadas global y los creados por el usuario.
- *Mesh*: muestra las operaciones de mallado (métodos y controles) en el orden en el que se realizan.

- **Details View**

Parte del ANSYS Meshing donde se muestran las características y configuraciones que pueden ser aplicados a los distintos elementos presentes en el Outline.

Entre las principales configuraciones mostradas para la malla están las del tipo de análisis a desarrollar (tipo de solucionador) y las de configuraciones del tamaño y distribución de las celdas que conforman la malla.

Estas dos secciones descritas se pueden observar en la Figura E.18

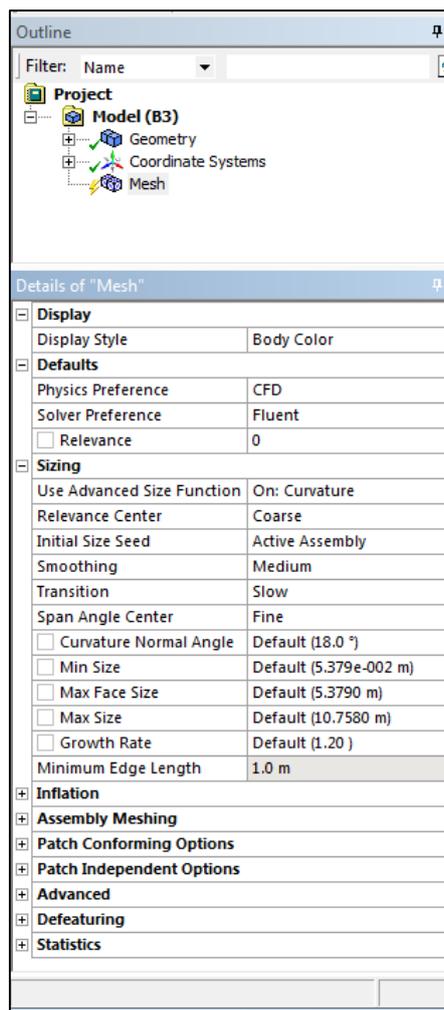


Figura E.18 Vista de la ventana Outline y Details View.

Fuente: Elaboración propia (2016).

E.1.4 Pre-procesamiento: CFX-Pre

CFX-Pre es un subprograma del ANSYS que permite realizar análisis de dinámica de fluidos computacional o CFD por sus siglas en inglés, al cual se ingresa al hacer doble clic sobre la celda *Setup*.

El CFD es la ciencia de predicción del comportamiento del flujo del fluido, la transferencia de masa o calor, reacciones químicas y fenómenos relacionados.

En lo que respecta a los solucionadores incluidos en ANSYS, estos están basados en el método de volúmenes finitos, el cual presenta las siguientes características en su proceso de solución:

- El dominio está discretizado en una serie de volúmenes de control.
- Las ecuaciones generales de conservación o transporte de masa, cantidad de movimiento, energía, entre otros, se solucionan en este conjunto de volúmenes de control.

- Las ecuaciones diferenciales parciales están discretizadas en un sistema de ecuaciones algebraicas, las cuales se solucionan numéricamente para alcanzar una solución.

La interfaz que presenta el CFX-Pre se muestra en la figura E.19, en ella se pueden observar el principal espacio de trabajo que se explicará a continuación.

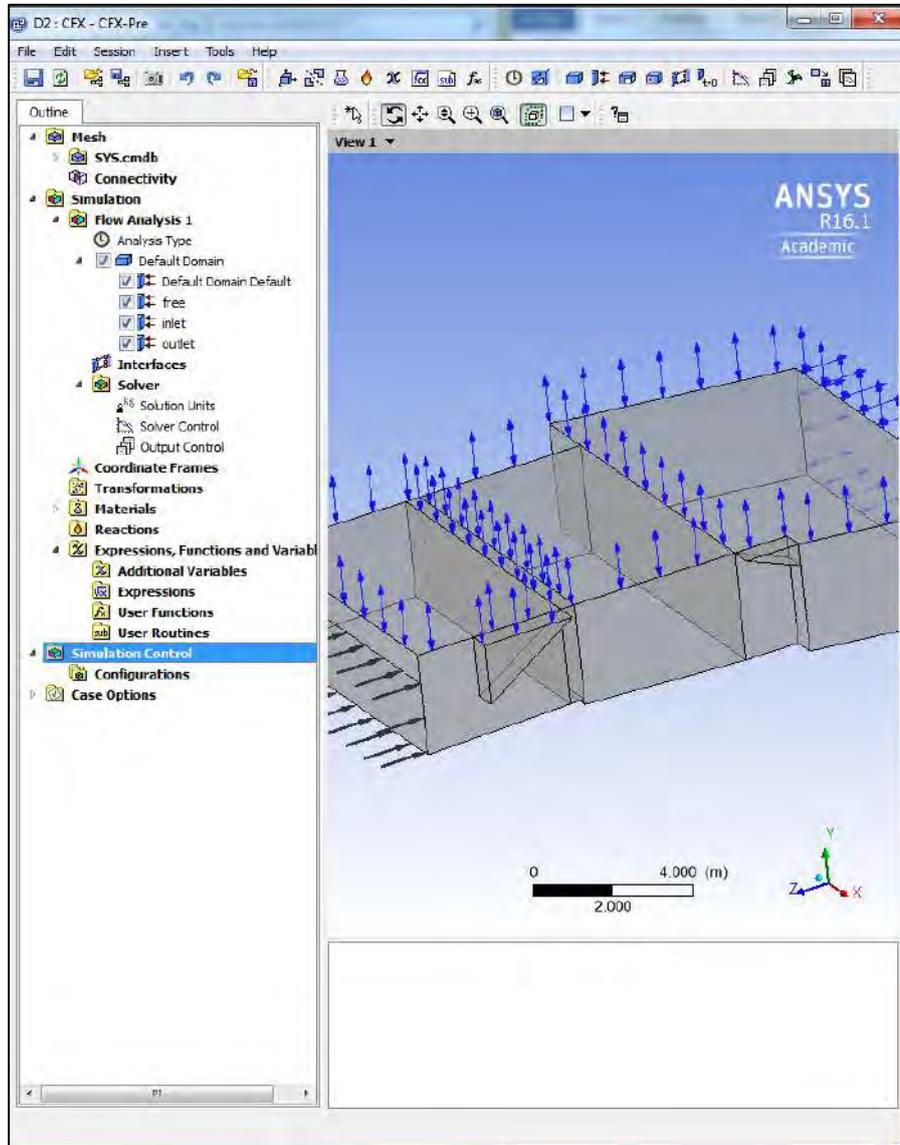


Figura E.19 Interfaz del CFX-Pre.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- **Outline**

Espacio de trabajo donde se encuentran esquematizadas todas las opciones de configuración del análisis a desarrollar y del solucionador a utilizar. Entre las más importantes se encuentran:

- *Mesh*: Aquí se muestran todas las regiones que conforman la geometría analizada y su conectividad o forma en que están conectadas.

- *Simulation*: Espacio del esquema que incluye la creación y modificación de los dominios a utilizar, la selección del tipo de análisis, los materiales y expresiones a usar, la configuración general del solucionador para llevar a cabo el procesamiento, entre otros.

Conceptos de dominios

Los dominios son regiones de espacio en las cuales las ecuaciones de flujo y transferencia de calor del fluido son desarrolladas.

Configuración de dominios (Figura E.20)

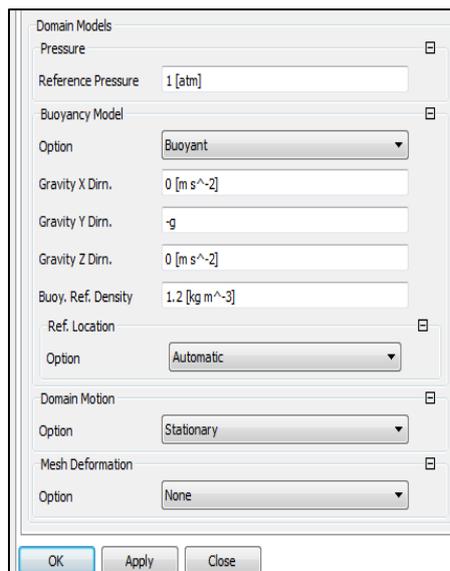


Figura E.20 Opciones básicas de configuración de dominio.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- **Pressure (Presión de referencia)**

La configuración de presión de referencia se utiliza para evitar errores de redondeo que se producen cuando las diferencias de presión locales en un fluido son pequeñas en comparación con el nivel de la presión absoluta.

- **Bouyancy (Flotabilidad)**

La opción de flotabilidad es utilizada cuando se toma en cuenta la gravedad que actúa sobre las regiones del fluido con diferencias en la densidad, es decir, surge una fuerza de flotabilidad.

- **Domain Motion (Movimiento del dominio)**

Usado cuando el dominio se encuentra rotando alrededor de un eje. El *CFX-Solver*, calcula los términos de momentum centrífugos y de Coriolis de manera apropiada y resuelve una ecuación de energía total del sistema rotatorio.

- **Mesh Deformation (Deformación de la malla)**

Esta característica es utilizada en problemas que incluyen el movimiento de las condiciones de borde o de contorno. El movimiento de la malla puede imponerse o surgir como una parte implícita de la solución.

Tipos de dominios

Se puede escoger principalmente entre dominios fluidos, dominios sólidos y dominios porosos; cada uno de ellos tendrá sus propias características para configurar.

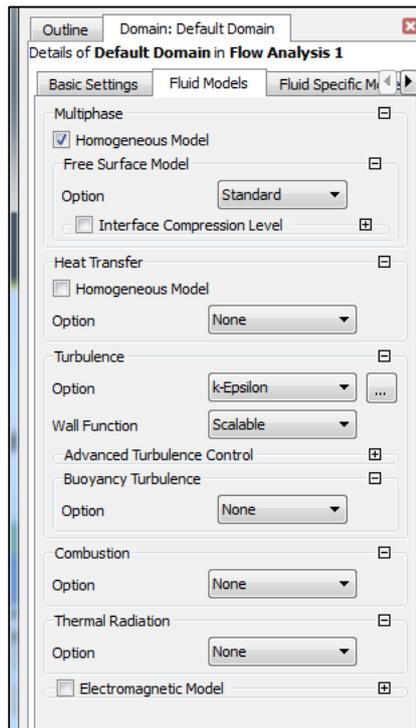


Figura E.21 Opciones de modelos de fluido en la configuración del dominio.

Fuente: Elaboración propia (2016).

Por ejemplo, en el dominio fluido se pueden modificar o configurar la transferencia de calor, el modelo de turbulencia, la combustión y la radiación térmica, como se observa en la Figura E.21.

Conceptos de condiciones de borde

Para definir las condiciones de borde se requiere identificar la localización y el tipo de contorno (entrada, salida, abertura, etc.) y especificar los valores que definen las cantidades que están presentes. Las principales condiciones de borde o contorno son:

- **Inlet/Outlet**

Los *inlets* son las regiones en donde se espera un flujo de entrada. Se pueden especificar los valores de velocidad en estos cuando se está trabajando con flujos incompresibles. Los

valores de presión y flujo másico se utilizan tanto como para flujos compresibles e incompresibles. Estos mismos conceptos se aplican para los *outlets*.

- **Openings**

Las condiciones de *opening* permiten tanto la toma como la salida de flujo. El usuario tiene que proporcionar información sobre las condiciones, por ejemplo, la temperatura, turbulencia, composición, etE., que se aplica al fluido que fluye a través del dominio.

- **Symmetry**

Esta característica reduce el esfuerzo computacional y no requiere de ingreso de datos. Se utiliza cuando se está trabajando con geometría simétrica.

Configuración del solucionador

El panel de control del solucionador contiene varias opciones que influyen en el comportamiento durante el procesamiento.

Estos controles son importantes para la precisión de la solución, la estabilidad del solucionador y la duración del tiempo que toma obtener la solución final.

- **Convergence Control (Control de convergencia)**

El solucionador terminará de realizar las iteraciones cuando se alcance el valor máximo configurado en esta parte.

Siempre que el solucionador finalice su trabajo es obligatorio revisar el motivo por el cual ha finalizado.

- **Fluid Timescale Control (Control de la escala de tiempo)**

En esta zona el usuario puede configurar la duración y las divisiones que presentarán las iteraciones que se realizarán durante el procesamiento.

- **Convergence Criteria (Criterio de convergencia)**

El criterio de convergencia determina cuándo la solución está considerada como convergente y por lo tanto el solucionador debe detener las iteraciones que realiza (asumiendo que no se ha alcanzado el límite establecido).

Los residuos son una medida de qué tan preciso es el proceso de solución de las ecuaciones. Cabe resaltar que al existir residuo entre iteraciones consecutivas, el solucionador nunca será capaz de alcanzar la solución exacta; no obstante, residuos pequeños significan que los valores obtenidos son muy próximos a la solución real.

Todas las características mencionadas anteriormente se encuentran en una pestaña que se abre al hacer doble click a *Solver Control*, el cual está localizado en el Outline. Estas características se pueden observar en la Figura E.22

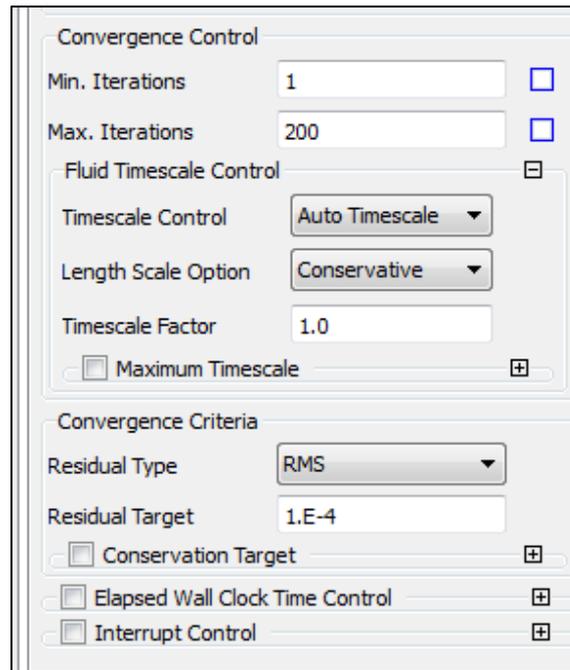


Figura E.22 Opciones de configuración del solucionador.

Fuente: Elaboración propia (2016).

E.1.5 Procesamiento: CFX-Solver Manager (Figura E.23)

El *CFX-Solver Manager* es una interfaz gráfica para el usuario utilizada para:

- Definir el inicio del procesamiento (*run*)
- Controlar la interactividad con el solucionador.
- Ver la información en tiempo real de las iteraciones realizadas y su solución.
- Exportar información.

Se accede a esta herramienta desde el ANSYS Workbench al realizar doble click sobre la celda correspondiente a *Solution*.

Configuración del procesamiento

Al definir una nueva “run” se puede escoger entre distintas opciones, como:

- **Double Precision**

Esta opción es utilizada cuando el error de redondeo puede ser un problema si las variaciones pequeñas de alguna variable son muy importantes y, cuando se requiere el uso del doble de memoria para realizar el procesamiento.

- **Run Mode**

Por defecto se escogerá la opción de análisis en serie, utilizable para procesos sencillos del solucionador en una sola computadora.

También se puede establecer el análisis en paralelo para trabajar con varios procesadores. Esto permite dividir grandes problemas de CFD en particiones más pequeñas para acelerar el proceso de análisis.

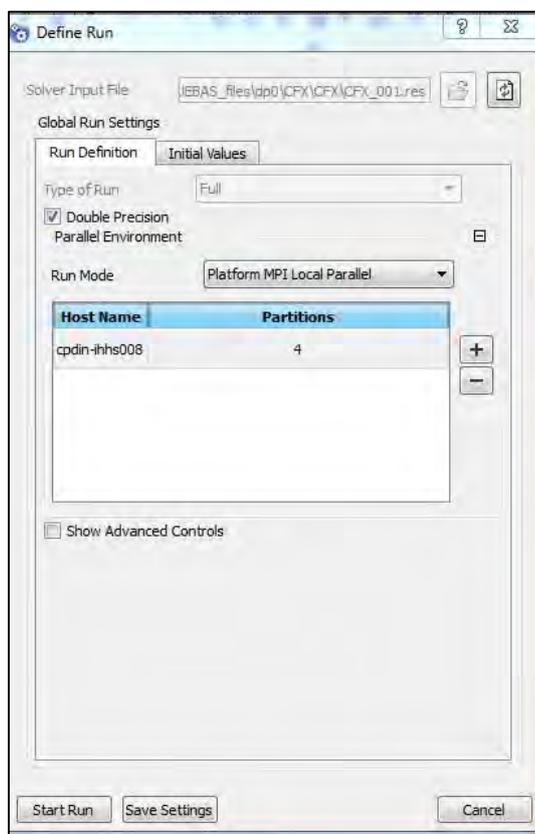


Figura E.23 Opciones de configuración de una nueva Run.

Fuente: Elaboración propia (2016).

E.1.6 Post-procesamiento: CFD-Post

El propósito principal del post-procesamiento es obtener información de manera cuantitativa y/o cualitativa sobre el comportamiento del flujo del fluido en el sistema. Por este motivo, la herramienta *CFD-Post* permite, a través de distintas herramientas de visualización, cumplir con dicho propósito.

Para ingresar al CFD-Post se debe hacer doble click en la celda correspondiente a *Results*. En la Figura E.24 se observa la interfaz que presenta este subprograma; al igual que los anteriores también presenta dos zonas características como los son *Outline* y *Details*.

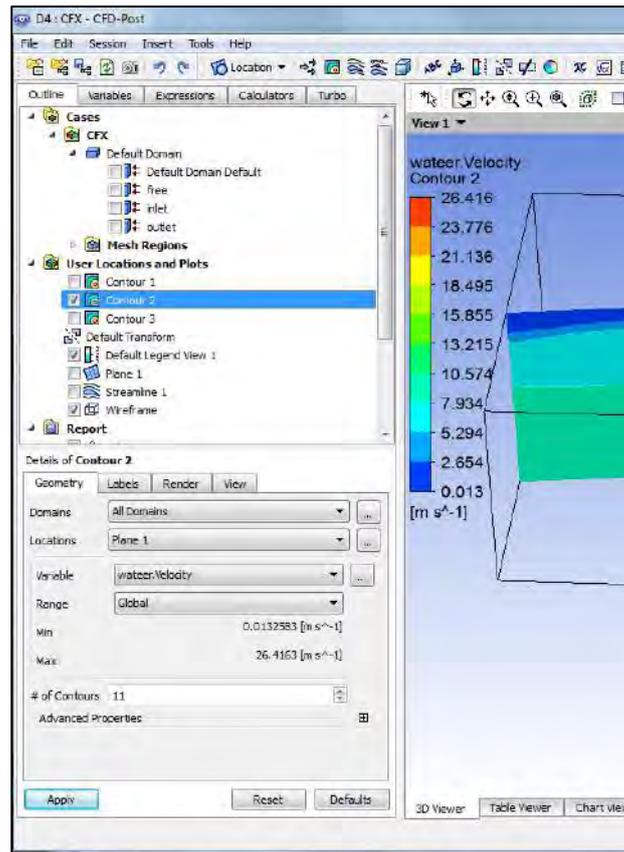


Figura E.24 Interfaz del CFD-Post.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- **Outline**

CFD-Post presenta muchas herramientas de visualización para analizar los resultados de mecánica de fluidos, entre los que más destacan se encuentran:

- *Isosurfaces*: Superficies que representan una misma característica del fluido analizado. (Figura E.25)

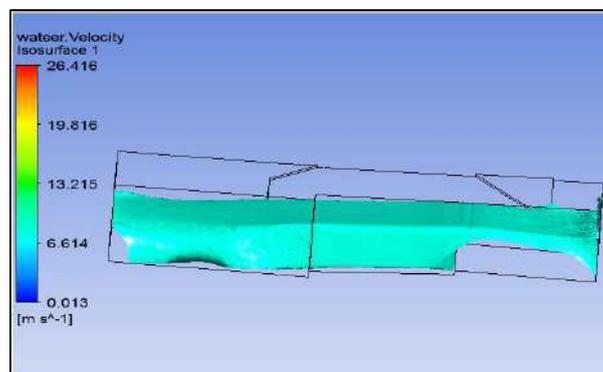


Figura E.25 Visualización de la herramienta Isosurface para una velocidad de 8 m/s.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- *Streamlines*: Líneas de flujo que muestran el recorrido del fluido. (Figura E.26)

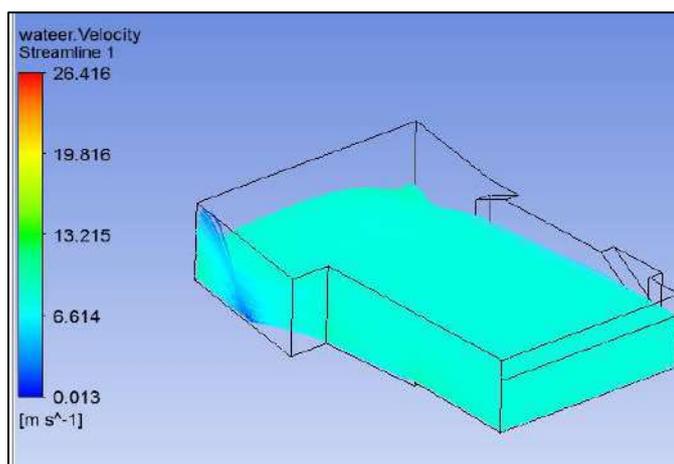


Figura E.26 Visualización de las líneas de flujo con la herramienta Streamline.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- *Contour*: Superficies que pueden asignarse a distintas regiones de la geometría y obtener valores de distintas variables. (Figura E.27)

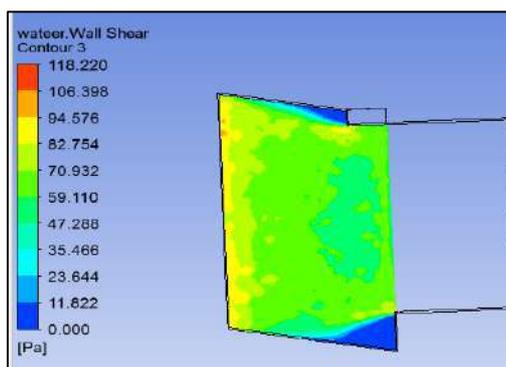


Figura E.27 Visualización de los esfuerzos de corte con la herramienta Contour.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- **Details**

En esta zona el usuario es capaz de configurar las distintas herramientas de visualización que ofrece el CFD-Post para observar las distintas variables de interés. Entre las características más destacables están: la selección de la variable a analizar, el rango o escala que se quiere utilizar, la representación que tendrá (colores, forma, luminosidad), entre otros.

E.2 Guía del desarrollo de la modelación numérica

- Iniciar el programa *ANSYS Workbench*.
- Arrastrar desde *Toolbox* → *Components Systems* la opción de *Mesh* (mallado), la cual incluye tanto la geometría como la malla, y colocarla en el espacio de *Project SchematiE*. (Figura E.28)

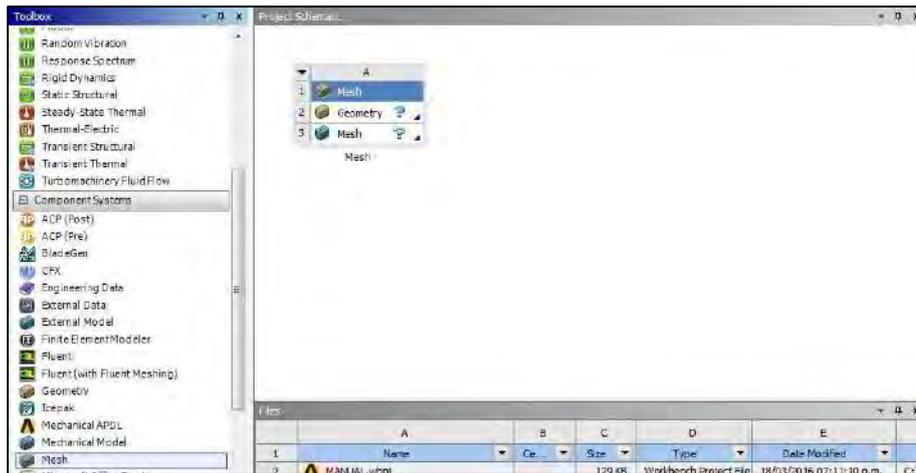


Figura E.28 Colocación de la herramienta *Mesh* en el espacio del proyecto.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Al guardar el proyecto se crearán automáticamente los archivos que se van generando según desarrollemos las distintas etapas del proyecto; estos se pueden ver en *View* → *Files*.
- Abrir el subprograma *DesignModeler* mediante un doble click en la celda *Geometry* o al hacer click derecho y seleccionar la opción *New DesignModeler Geometry*. (Figura E.29)

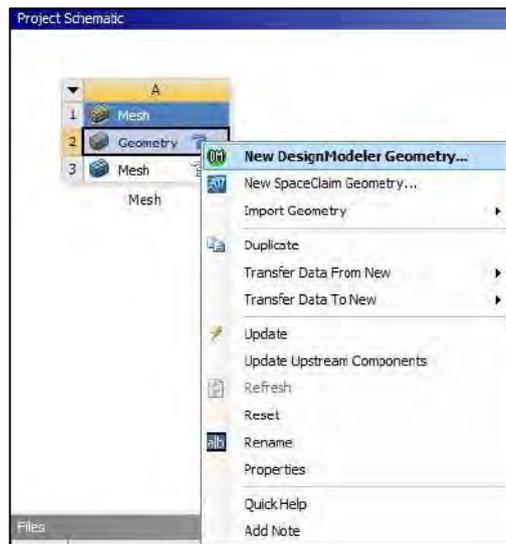


Figura E.29 Forma de ingreso al *DesignModeler*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Crear un nuevo plano a partir del *ZXPlane* (Plano horizontal) para empezar a crear los *sketches*. Este paso se realiza para trabajar posteriormente con planos que se ubiquen en distintas elevaciones.
- Seleccionar las características del plano en la zona llamada *Details View* y hacer click en *Generate*. (Figura E.30)

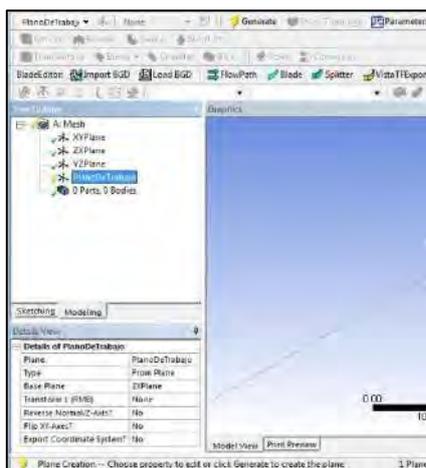


Figura E.30 Configuración de las características de un nuevo plano.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- En el plano creado se crearán los *sketches* respectivos para la creación de la geometría.
- En las cajas de herramientas (*toolbox*) *Draw*, *Modify* y *Dimensions*, las cuales se pueden encontrar en el modo *Sketching*, estarán las herramientas necesarias para la creación de las bases de la geometría. Las opciones de dimensionamiento también sirven para restringir los *sketches*. (Figura E.31)

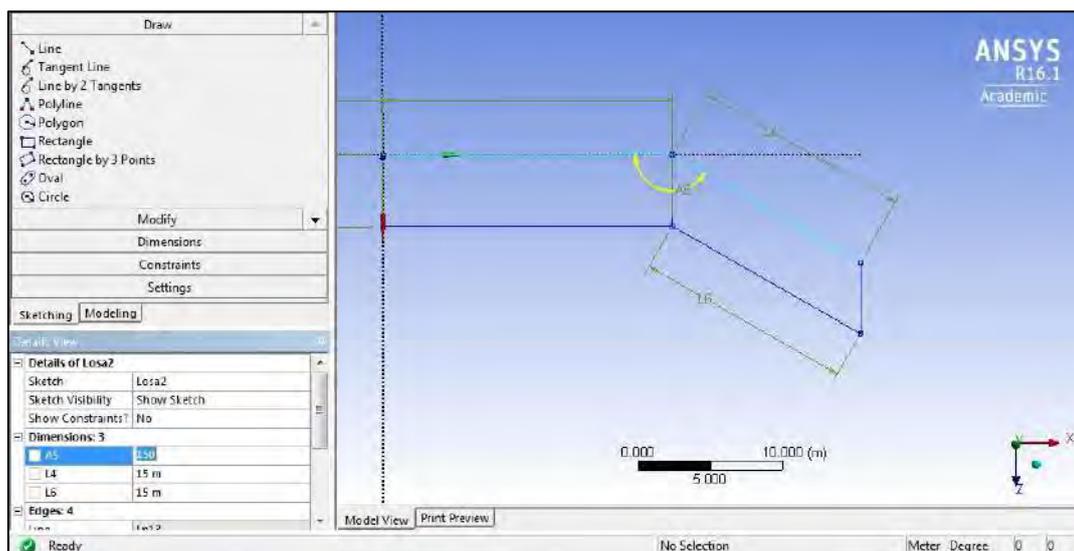


Figura E.31 Aplicación del dimensionamiento en la creación de un *sketch*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- El usuario debe crear los *sketches* a partir de la información mostrada en los planos de la estructura a modelar. Al finalizar con la implementación de las herramientas anteriormente mencionadas, se tendrá en pantalla un conjunto de *sketches* que representen la geometría de la estructura vista en planta. (Figura E.32)

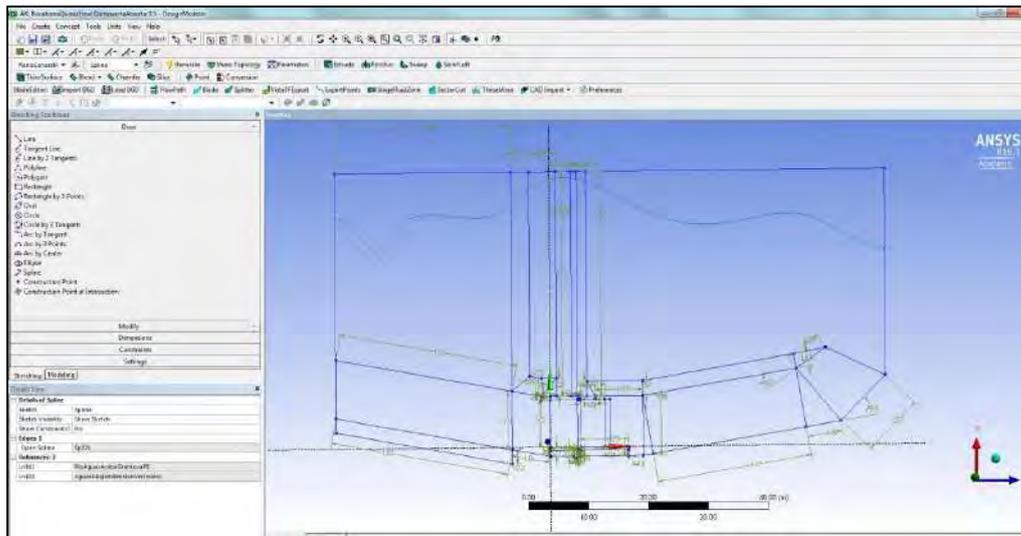


Figura E.32 Visualización de todos los *sketches* que conforman la geometría.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- El conjunto de los *sketches* creados se encontrarán listados dentro del plano al cual pertenecen. (Figura E.33)

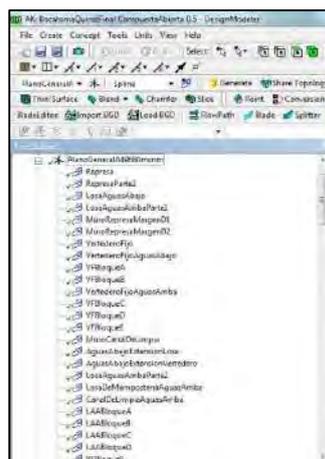


Figura E.33 Listado de los *sketches* creados en su plano correspondiente.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Una vez finalizada la creación de los *sketches*, se pasa a la generación de las estructuras 3D que conforman la estructura con las opciones de modelación.
- Se escoge desde el modo *Modelling* al *sketch* al cual se le quiere aplicar una operación 3D.
- Con el *sketch* seleccionado nos dirigimos a *Create* → *Extrude*, para darle volumen a la base. (Figura E.34)

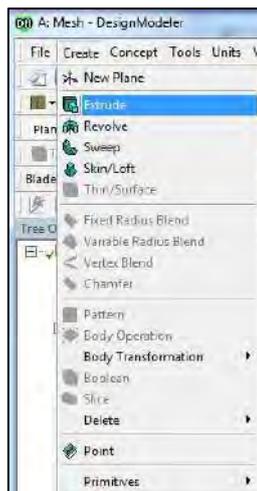


Figura E.34 Ubicación de la herramienta de modelado *Extrude*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- En la ventana de *Details View* se mostrarán las opciones de creación (Figura E.35):
 - *Geometry*: seleccionar el *sketch* al que queremos extruir.
 - *Operation*: seleccionar *Add Frozen* para trabajar con elementos individuales.
 - *Direction Vector*: si se quiere que la extrusión sea en la dirección de la normal del plano se deja la opción que aparece por defecto.
 - *Direction*: escoger *Normal* si se desea que la extrusión en el eje positivo, *Reversed* para el plano negativo, y *Both* para ambos ejes.
 - *Depth*: introducir el valor de la altura que se desea extruir.

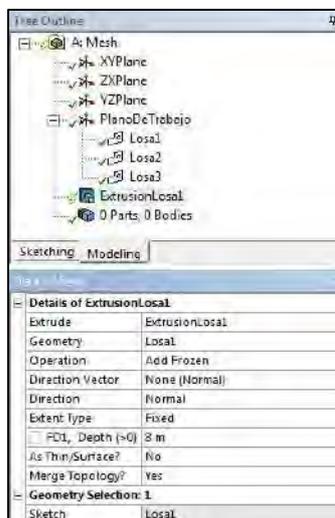


Figura E.35 Características de la herramienta *Extrude*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Una vez escogidas las características, hacer click en *Generate*.
- Para modelar las geometrías creadas, generalmente realizar los cortes para darle forma, se deben crear nuevos planos y utilizar la opción *Slice* para realizar el corte al elemento.

- En la creación del plano se deben aplicar las transformaciones de traslación y rotación respectivas para ubicarlo en el punto donde se generará el plano de corte. (Figura E.36)

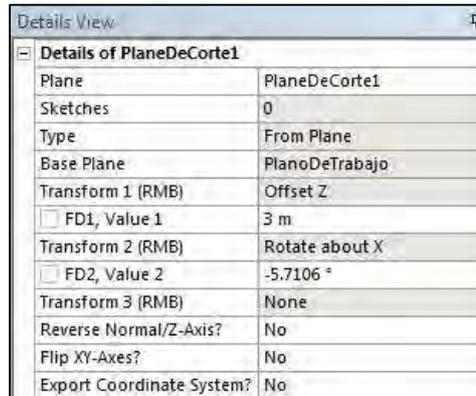


Figura E.36 Características de la creación del plano de corte.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Para ejecutar la opción de corte nos dirigimos a *Create* → *Slice*. (Figura E.37)

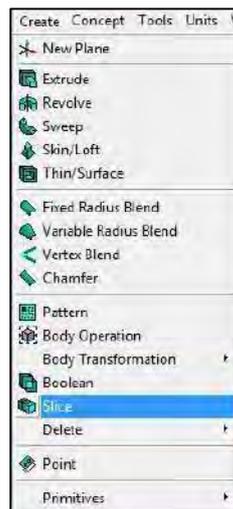


Figura E.37 Ubicación de la herramienta *Slice*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- En la ventana de *Details View* se mostrarán las opciones de creación:
 - *Slice Type*: seleccionar *Slice by plane* para hacer el corte a partir del plano creado.
 - *Base Plane*: seleccionar el plano creado y hacer click en *Apply*.
 - *Slice Targets*: seleccionar los objetos a los que se realizará el corte.
- El cuerpo cortado queda dividido en dos partes, por lo que se debe eliminar la que no se utilizará.
- En la barra de herramientas seleccionamos la opción *Selection Filter: Bodies*. (Figura E.38)

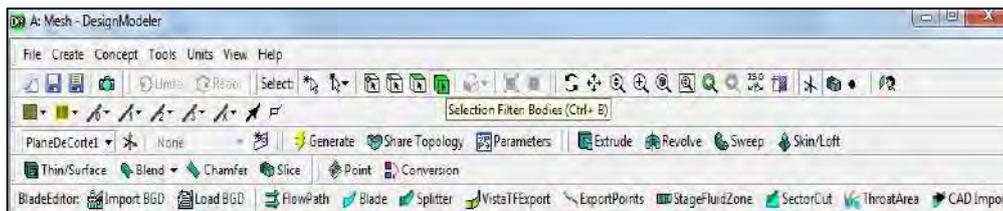


Figura E.38 Ubicación de la herramienta *Selection Filter: Bodies*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Seleccionamos el cuerpo que se desea eliminar y nos dirigimos a *Create* → *Delete* → *Body Delete*. (Figura E.39)

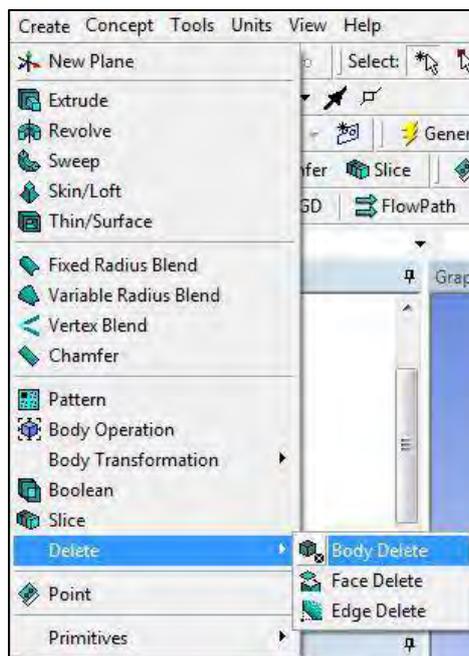


Figura E.39 Ubicación de la herramienta *Body Delete*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- En la ventana de *Details View* seleccionamos el cuerpo y hacemos click en *Apply*, luego en *Generate*.
- Se prosigue con las mismas operaciones de creado de plano, corte y eliminado de cuerpos para terminar el resto de la geometría.
- Todas las opciones de modelado se mostrarán de manera listada según su creación en la ventana *Tree Outline*. (Figura E.40)



Figura E.40 Listado de las herramientas de modelación utilizadas.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Antes de proseguir con el mallado, se debe definir la región de entrada de flujo y su tirante. Para ellos seleccionamos la superficie por donde ingresará el fluido con la opción *Selection Filter: Faces* ubicado en la barra de herramientas. (Figura E.41)

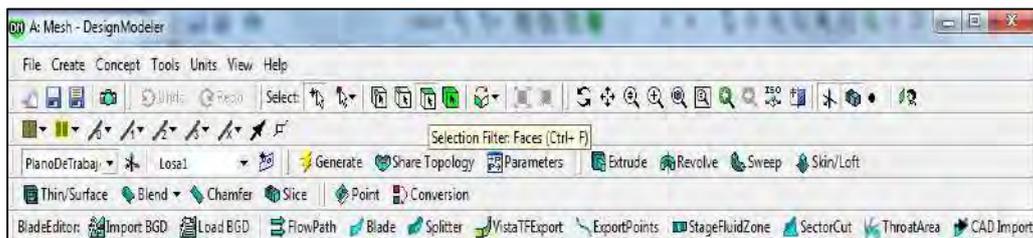


Figura E.41 Ubicación de la herramienta *Selection Filter: Faces*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Una vez seleccionado creamos un plano y, en la opción de la ventana *Details View* que corresponde a *Type*, comprobar que se escoge *From Face* y hacer click en *Generate*. (Figura E.42)

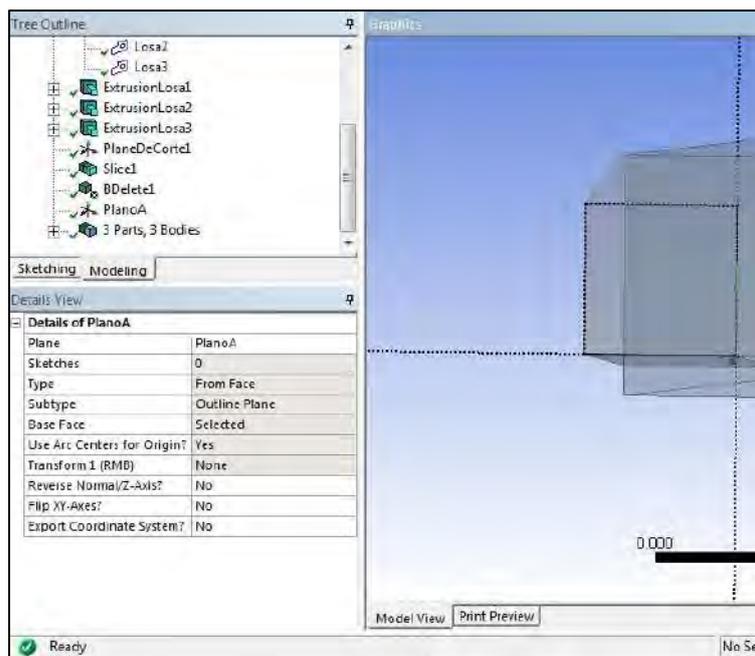


Figura E.42 Configuración de la creación del plano a partir de una superficie.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Dentro del plano creado, creamos un *sketch* que consista en una línea horizontal a la altura donde estará ubicado el tirante del flujo de entrada. (Figura E.43)

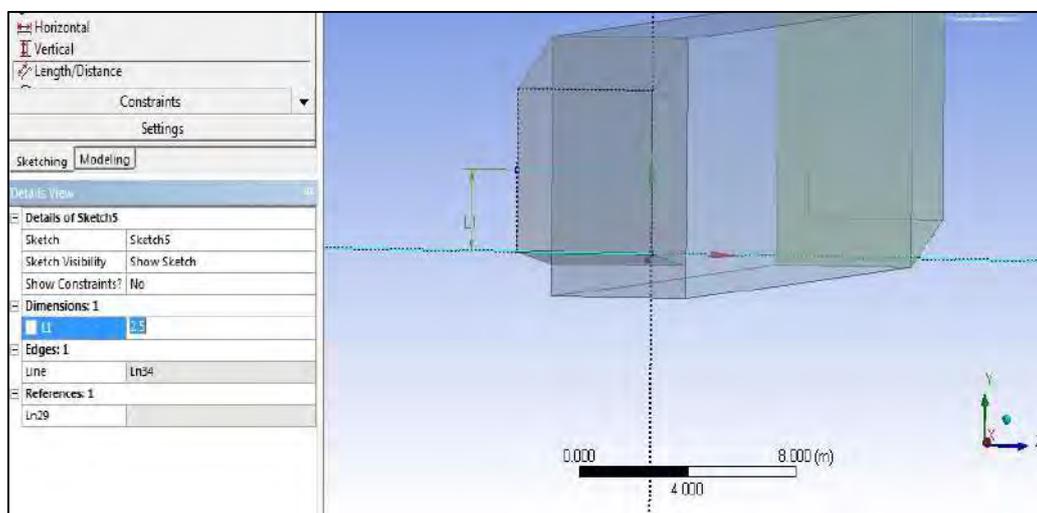


Figura E.43 Creación de una línea horizontal que corresponda a la altura del tirante.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Regresar al modo *Modelling* y seleccionar nuevamente la superficie o cara donde se ubica la entrada de flujo y dirigirse a *Tool* → *Face Split* (Figura E.44). Dentro de las opciones que aparecen se escogen las siguientes:
 - *Target Face*: seleccionar la superficie y hacer click en *Apply*.
 - *Tool Geometry*: escoger la línea horizontal creada mediante la selección de sus extremos, hacer click en *Apply*, luego en *Generate*.

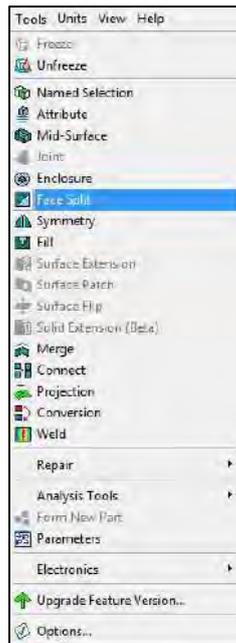


Figura E.44 Ubicación de la herramienta *Face Split*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- La superficie se encontrará dividida en dos partes como se muestra en la Figura E.45.

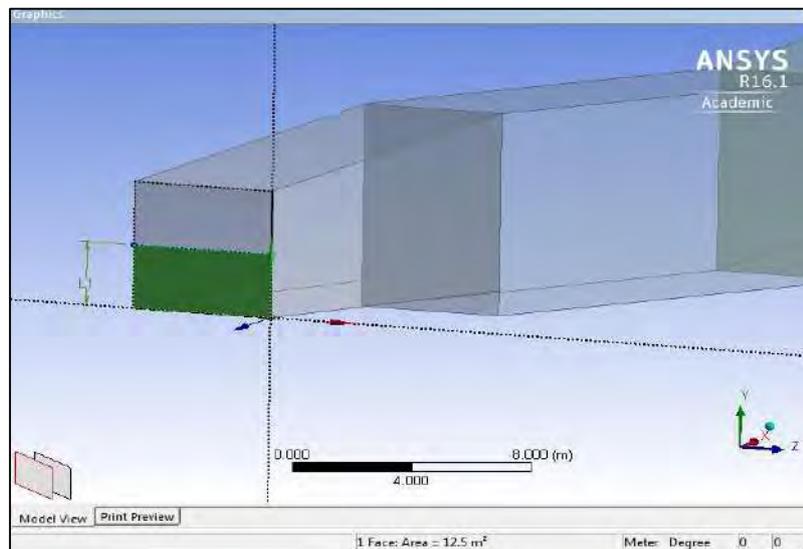


Figura E.45 Visualización de la superficie dividida en dos partes.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Para unificar todas las geometrías creadas se realiza una selección múltiple, le damos click derecho a la ventana del gráfico y escogemos la opción *Form New Part*. (Figura E.46)

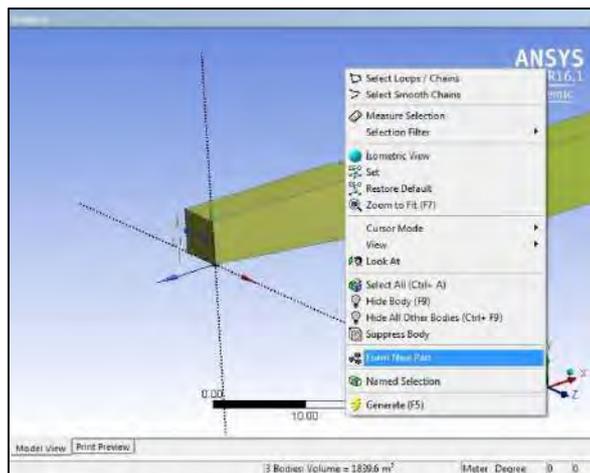


Figura E.46 Ubicación de la herramienta *Form New Part*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- En el *ANSYS Workbench*, se procede a ejecutar el *Meshing* haciendo doble click en la celda *Mesh* o click derecho y seleccionando *Edit*. (Figura E.47)

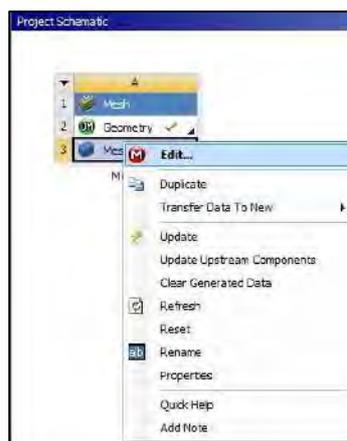


Figura E.47 Forma de ingreso al *Meshing*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Al ingresar, el programa cargará la geometría. (Figura E.48)
- Hacer click en *Mesh*, ubicada en el *Outline* y configuramos las opciones de la malla (Figura E.49):
 - *Defaults* → *Physics Reference* → *CFD*
 - *Defaults* → *Solver Preference* → *CFX*
 - *Defaults* → *Relevance* → *100*
 - *Sizing* → *Use Advanced Size Function* → *On Proximity and Curvature*
 - *Sizing* → *Relevance Center* → *Fine*
 - *Sizing* → *Smoothing* → *High*
- Además se configurará el tamaño mínimo y máximo de los volúmenes de control.

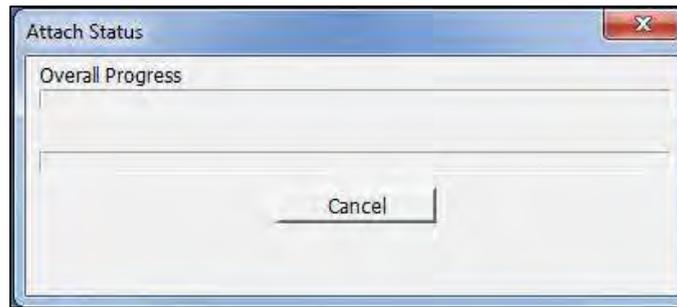


Figura E.48 Pantalla de carga de la geometría.

Fuente: Elaboración propia (2016).

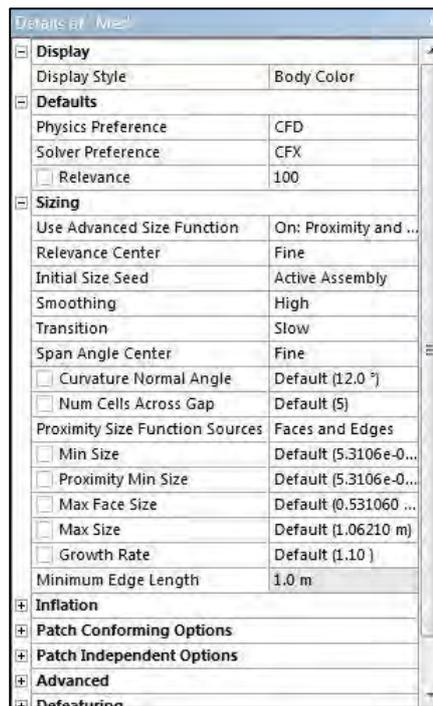


Figura E.49 Configuración de las opciones de la malla.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Al terminar la configuración se hace click en *Generate Mesh*.
- Para la configuración de las condiciones de borde y frontera, en la ventana del gráfico seleccionamos las superficies que corresponderán al *inlet*, *outlet*, *wall*, etE., según la función que vayan a realizar durante el análisis, y al hacer click derecho en el gráfico escogemos la opción de *Create Named Selection* para darles nombres e identificarlas. (Figura E.50)
- En este punto el usuario puede configurar más a detalle la malla según sus requerimientos.

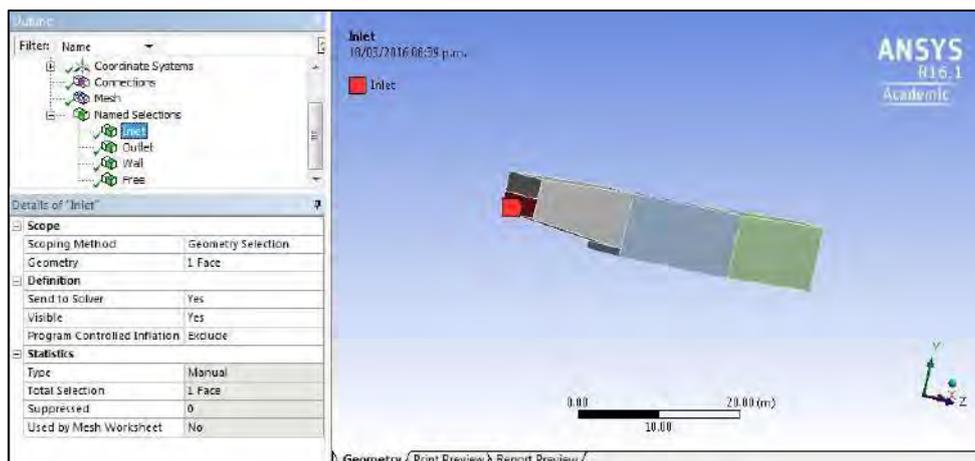


Figura E.50 Visualización de las superficies que corresponden a condiciones de borde.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Desde ANSYS Workbench → Toolbox → Components Systems se arrastra la opción CFX y la colocamos encima de la celda Mesh para enlazarla. (Figura E.51)



Figura E.51 Herramienta CFX enlazada con la herramienta Mesh.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Actualizar la malla haciendo click derecho en la celda Mesh → Update.
- Ingresar al CFX-Pre al hacer doble click en la celda Setup o click derecho → Edit (Figura E.52)

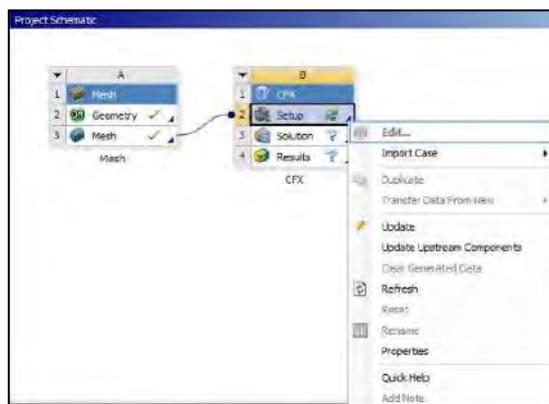


Figura E.52 Forma de ingreso al CFX-Pre.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- En el *CFX-Pre* nos dirigimos a *Outline* → *Default Domain* → Click derecho → *Edit* (Figura E.53)

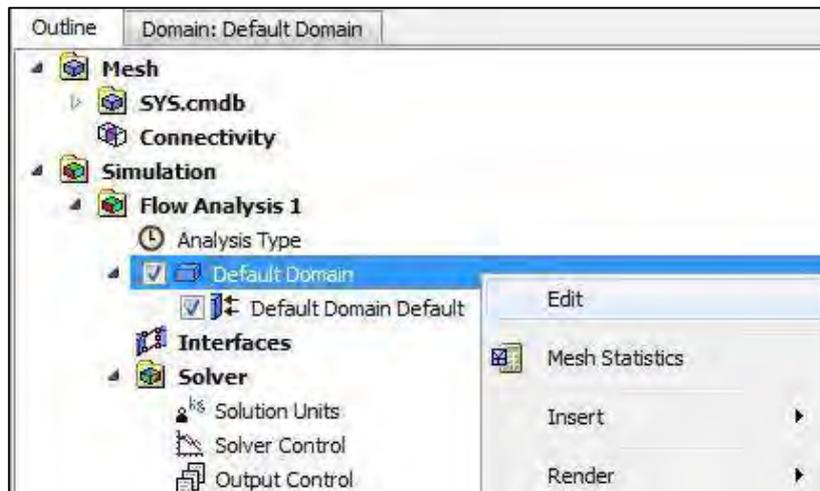


Figura E.53 Ubicación de la herramienta de edición del dominio.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Aparece una pestaña en donde se configura el tipo de dominio, la presión de referencia y flotabilidad. (Figura E.54)
- En *Basic Settings*:
 - *Fluid and Particle Definitios* se generan dos tipos de fluido: Agua y Aire.
 - *Reference Pressure* → 1 atm.
 - *Bouyancy* → *Gravity Y Dim.* → -g (gravedad).
 - *Bouyancy* → *Bouyancy Ref. Density* → 1.2 [Kg/m³].
- En *Fluid Models*:
 - *Multiphase* → *Homogeneous Model* → Habilitar opción.
 - *Multiphase* → *Free Surface Model* → *Standard*.
 - *Heat Transference* → Deshabilitar.
 - *Turbulence* → *Option* → *K-epsilon*.
- En *Fluid Pair Models*:
 - Habilitar *Surface Tension Coefficient* y dar un valor de 0.072 N/m.
 - *Surface Tension Model* → *Option* → *Continuum Surface Force*.
 - *Surface Tension Model* → *Primary Fluid* → Agua.
 - *Interphase Transfer* → *Option* → *Free Surface*.
- Finalmente hacer click en *Apply*.

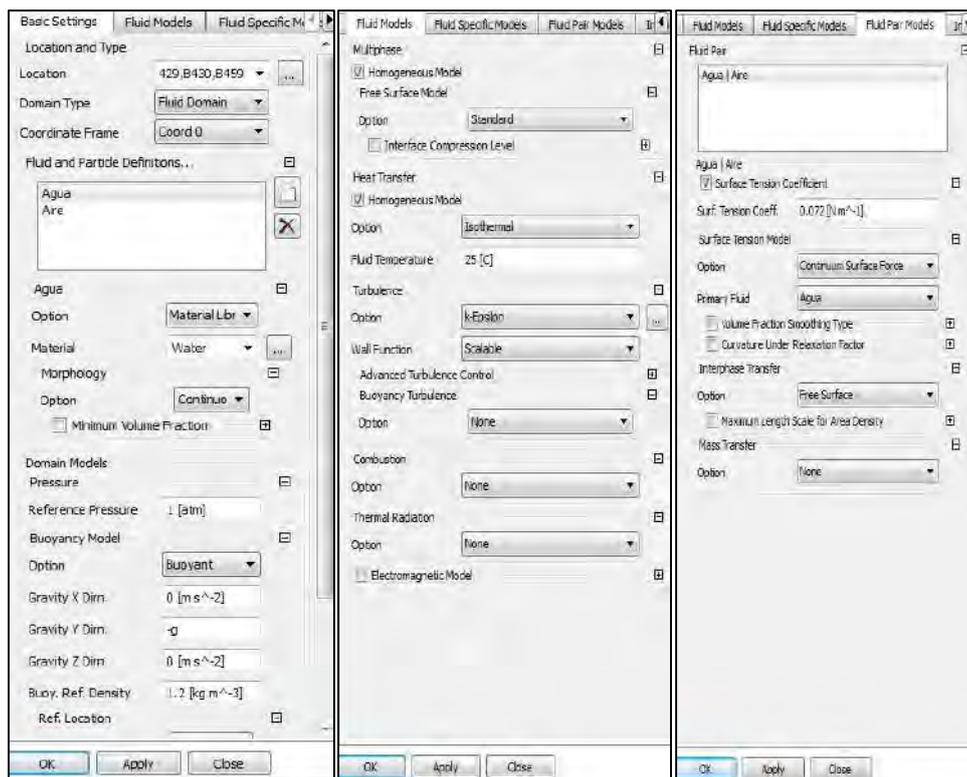


Figura E.54 Configuración de las características principales del dominio.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Ahora se configurará las condiciones de borde y frontera en *Outline* → *Default Domain* → Click derecho → *Insert* → *Boundary*. (Figura E.55)

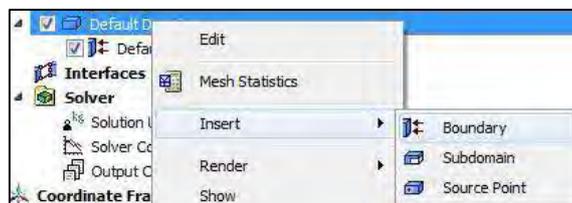


Figura E.55 Ubicación de la herramienta de ingreso de condición de borde.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Seleccionar en *Basic Settings* → *Location*, la región creada que corresponda a la entrada de flujo.
 - En *Boundary Details* → *Mass and Momentum* se debe colocar el valor de la velocidad normal.
 - En *Fluid Values* → *Boundary Condition* se especifica el volumen en fracción para cada fluido. Agua = 1; Aire = 0.
- La región *Outlet* o salida de flujo se configura como *Opening* con una presión relativa a 0 [Pa].
 - En *Fluid Values*, se configura los volúmenes en fracción. Agua = 0; Aire = 1. Esto impide el reingreso del flujo.

- La región *Wall* se configura como una pared no deslizable (*No Slip Wall*). Esta zona corresponde a los bordes de la geometría.
- Finalmente la parte superior se configura como *Opening*, con las mismas características que se colocaron en el *Outlet*.
- De existir algún error durante la configuración, aparecerán mensajes indicando el problema debajo de la ventana del gráfico.
- Ahora se pasa a configurar el solucionador en *Outline* → *Solver Control*.
- En esta zona configuramos la cantidad de iteraciones, sus divisiones, el tiempo y el criterio de convergencia como se ha explicado en la primera parte de este anexo. (Figura E.56)

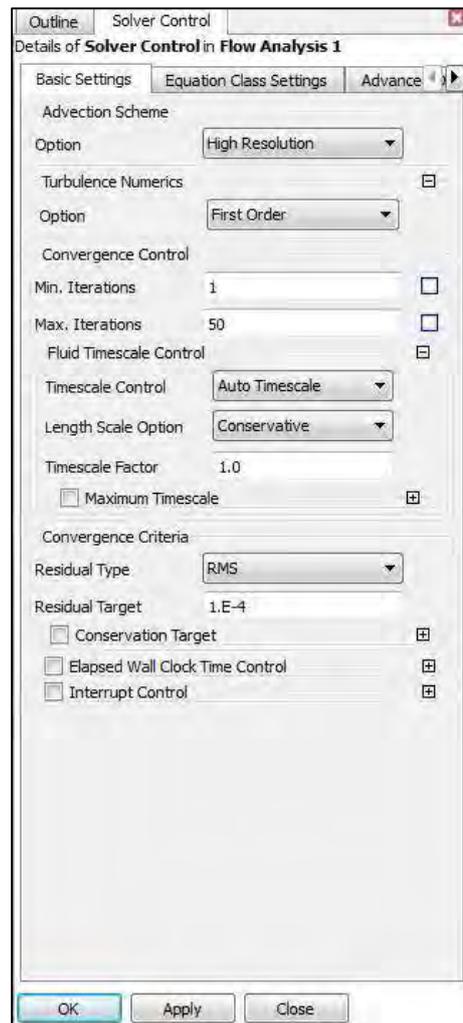


Figura E.56 Configuración de las opciones del solucionador.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- En la ventana del gráfico se observan las condiciones de borde ingresadas. (Figura E.57)

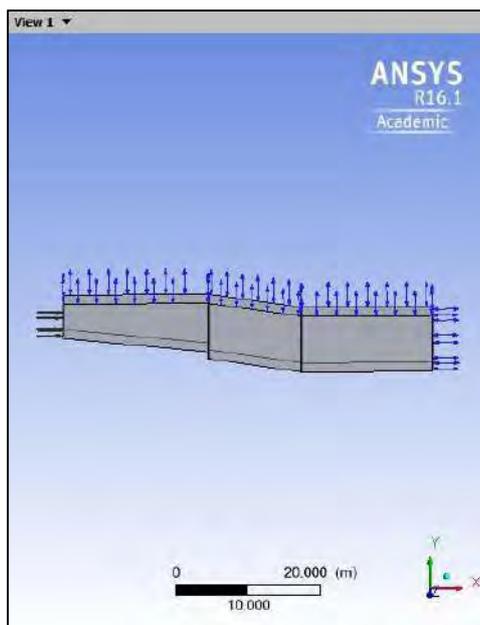


Figura E.57 Visualización de las condiciones de borde ingresadas.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Ejecutar el solucionador al hacer doble click a la celda *Solution*.
- En el cuadro que aparece al abrir el *CFX-Solver Manager*, que corresponde a *Define Run*, se habilita la opción *Double Precision* y se escoge la manera cómo se ejecutará el análisis. En nuestro caso seleccionamos *Platform MPI Local Parallel = 4*.
- El programa empezará a resolver las iteraciones y los resultados se mostrarán de manera gráfica y analítica. (Figura E.58)

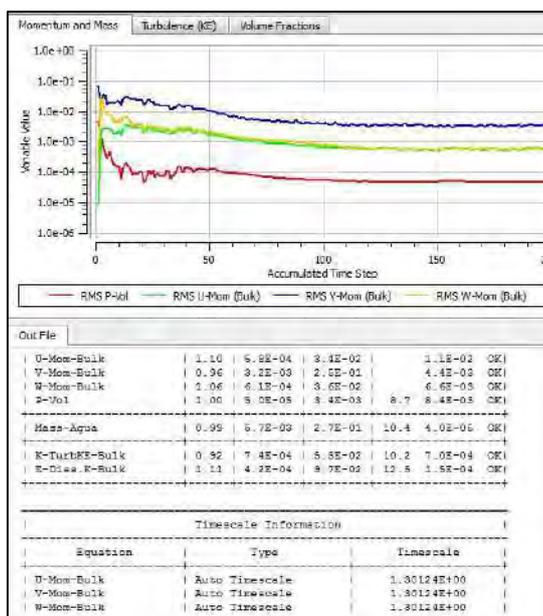


Figura E.58 Visualización del proceso iterativo de manera gráfica y analítica.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- El solucionador acabará cuando se cumpla con el criterio de convergencia o el número máximo de iteraciones. Según la complejidad del análisis este proceso puede tomar desde unos minutos hasta varios días.
- Finalmente se ejecuta el *CFD-Post* al hacer doble click en la celda *Results* o click derecho → *Edit* (Figura E.59)

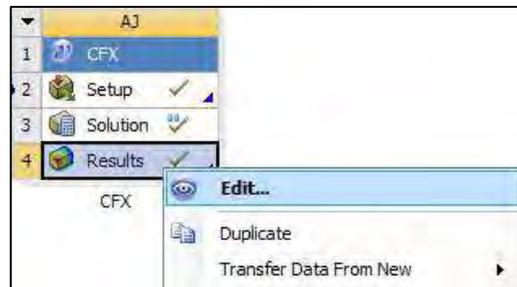


Figura E.59 Forma de ingreso al *CFD-Post*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Para insertar las líneas de corriente o flujo se debe hacer click en *Insert* → *Streamlines* y en la ventana de *Details* se configura (Figura E.60):
 - El inicio de las líneas de corriente, deben empezar en la región *Inlet: Start From* → *Inlet*.
 - La cantidad de líneas a representar.
 - La variable de análisis, en este caso corresponde a *Velocidad del Agua (Agua.Velocity)*.
 - El tipo de análisis de información en los bordes: *Boundary Data* → *Conservative*

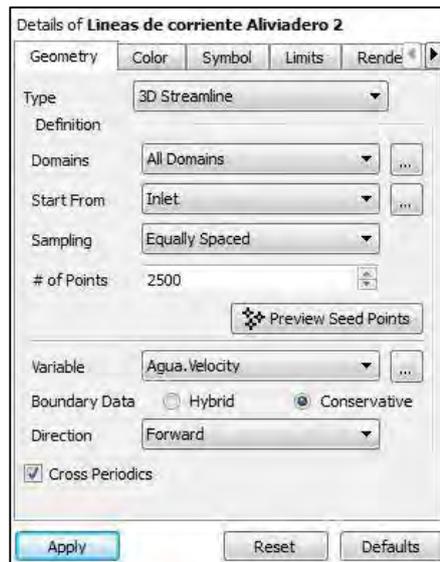


Figura E.60 Configuración de la herramienta *Streamlines*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Para configurar los esfuerzos de corte se debe hacer click en *Insert* → *Contour* y en la ventana de *Details* se configura (Figura E.61):
 - La variable que se representará: *Variable* → *Agua.WallShear*.
 - El rango de valores a utilizar: *Range* → *Local*.
 - El número de capas o contornos, el cual indica qué tantos colores representarán la variable.

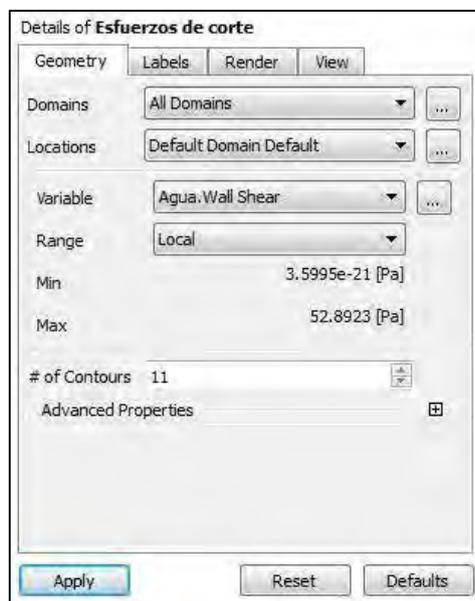


Figura E.61 Configuración de la herramienta *Contour*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- En la Figura E.62 se observa la vista del esfuerzo de corte en la zona del aliviadero.

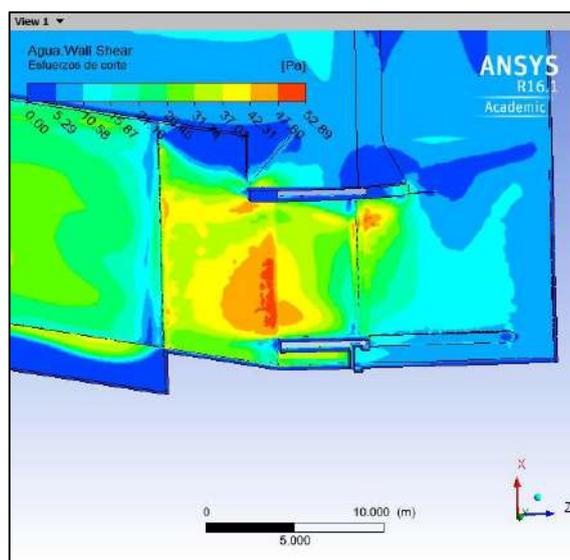


Figura E.62 Visualización de la herramienta *Contour* aplicada.

Fuente: Elaboración propia (2016).

- Para la visualización de la superficie libre se debe crear un plano que pase longitudinalmente por la estructura. Para ellos se hace click en Insert → Location → Plane.
- Posteriormente se crea un *Contour* y en los detalles (*Details*) se configura la ubicación del plano: *Location* → Plano (Figura E.63).

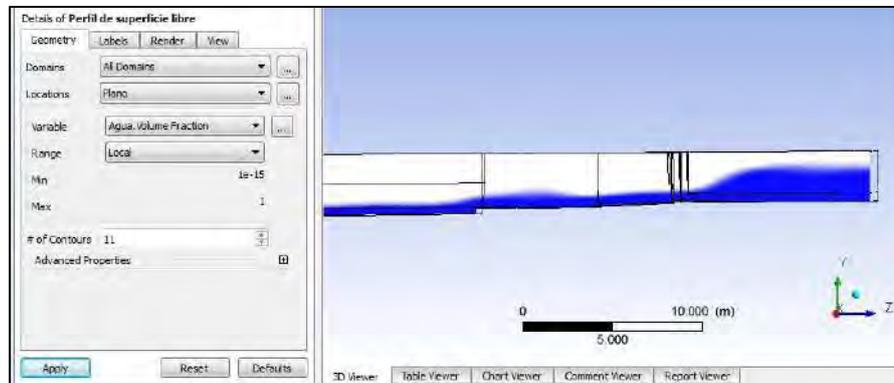


Figura E.63 Configuración del uso del plano creado en la herramienta *Contour*.

Fuente: Elaboración propia (2016).

El programa cuenta con otras herramientas de visualización y cálculo de variables, sin embargo, las explicadas anteriormente fueron las más utilizadas por el tesista.