



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Modelo 3D de la entrada de agua en una estación de metro de Barcelona.

Trabajo realizado por:

Daniel Gutiérrez García

Dirigido por:

Manuel Gómez Valentín

Eduardo Martínez Gomáriz

Grau en:

Ingeniería Civil

Barcelona, **30/06/2020**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE GRDO

Resumen

La estación de metro Paral·lel ha sufrido históricamente inundaciones de origen pluvial causadas por la localización de una de sus escaleras de acceso, y el flujo de la escorrentía que baja por la escalera podría suponer un peligro para los usuarios del metro en forma de resbalones o caídas.

En este trabajo se ha realizado un estudio de la peligrosidad frente a inundaciones de este acceso al metro mediante el software CFD comercial Flow3D. De esta forma se generan resultados extrapolables a escenarios similares de otras estaciones del metro barcelonés.

En relación a esto se resumen de las ecuaciones que gobiernan este tipo de problemas, que son las de la hidráulica del flujo, se presentan las ecuaciones de Navier-Stokes y de Reynolds y su interpretación desde el punto de vista de la mecánica computacional. A lo largo del documento se explican los fundamentos en los que se basan los métodos que utiliza Flow3D® para conseguir resolver el problema tales como el modelo de turbulencia RNG $k - \varepsilon$ o el método para la determinación de la lámina libre VOF.

Se expone todo el trabajo realizado para el pre-proceso y las consideraciones que se han tomado con el fin de llevar a cabo una simulación realista, desde la introducción de la geometría, las condiciones de contorno e iniciales hasta los fenómenos físicos tenidos en cuenta, y los métodos matemáticos que los resuelven. Una vez obtenidos los datos se analizan, utilizando el software FlowSight, y proporcionando una descripción del flujo a lo largo de las escaleras en función de la casuística considerada.

Por otro lado se ha hecho una recopilación de los criterios de peligrosidad en zonas urbanas, en función de combinaciones de calado y velocidad, que se tendrán en cuenta, se exponen sus fundamentos y criterios así como su formulación.

Por último se usan los criterios considerados para hacer un análisis de peligrosidad en función de una serie de escalones seleccionados. Se obtienen perfiles de velocidad en función del calado y se interpretan para obtener las variables requeridas en los criterios de peligrosidad. De esta forma se obtiene el nivel de peligrosidad en las escaleras de acceso al metro de Paral·lel en función de la altura de la lámina de agua sobre la calle en la zona de la entrada.

Abstract

Paral·lel metro station, located in Barcelona, has historically suffered rain floods due to the localization of one of its access stairs, and makes a problem to the subway users who could fall when they use the stairs.

In this project a flood risk assessment study of this access to Paral·lel station during floods has been performed by using commercial CFD software Flow3D. The results generated can be extrapolated to other metro stations in Barcelona.

In this regard, the equations that govern these issues, are summarized; Navier-Stokes and Reynolds equations are presented and, moreover, these equations are interpreted from a computational mechanics perspective. In this manuscript the fundamentals in which Flow3D[®] methods are based to solve the problem such as RNG $k - \epsilon$ turbulence model or free surface methods such as Volume Of Fluid (VOF) are shown.

Pre-processing and considerations taken in order to perform a realistic simulation are shown as well in this manuscript, from the introduction of the geometry, the outline conditions and initial conditions to the physical phenomena taken into account and the mathematical methods that solve them. Once the data were obtained, they were analyzed, by applying FlowSight software, and a flow description along the stairs according to the considered casuistry is provided.

Besides, the danger criteria in urban areas were compiled according to combinations of and depth and velocity. Their fundamentals and criteria as well as their formulation and possible issues in their implementation are shown in this document.

Last, the considered criteria for a risk analysis have been applied in a series of selected steps. This way, the risk level in the access stairs to Paral·lel metro station has been obtained in terms of the height of the water surface over the street ground at the access.

Índice

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
PREFACIO	11
1.1. Origen del trabajo.....	11
1.2. Motivación.....	11
1. INTRODUCCIÓN	13
1.3. Objetivos.....	13
1.4. Alcance.....	13
2. PROBLEMÁTICA DE INUNDACIONES EN LA ESTACIÓN DE METRO PARALEL	15
1.5. Situación y descripción del problema	15
1.5.1. Localización	15
1.5.2. Eventos pasados.....	16
1.5.3. Geometría. Toma de datos y digitalización.....	17
3. HIDRÁULICA DEL FLUJO	20
1.6. Hipótesis Principales.....	21
1.6.1. Hipótesis del medio continuo	21
1.6.2. Hipótesis de la partícula fluida.....	21
1.7. Ecuaciones	21
1.8. Ecuaciones de Navier-Stokes.....	22
1.8.1. Caso general.....	22
1.9. Ecuaciones de Reynolds	23
4. MECÁNICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS (CFD)	26
1.10. Metodología de resolución de problemas mediante código CFD	26
1.11. Métodos de cálculo	27
1.12. Software CFD	28
1.13. Geometría y Mallado Flow3D.....	29
1.14. Condiciones de Contorno Flow3D.....	31
1.15. Cálculos en Flow3D.....	32
1.15.1. Ecuaciones de continuidad y balance (Navier-Stokes).....	32
1.15.2. Modelos de turbulencias	33
1.15.3. Superficie libre y método VOF.....	34

5.	PELIGRO FRENTE INUNDACIONES URBANAS	36
1.16.	Criterios para la evaluación de la peligrosidad basados en el calado.....	36
1.17.	Criterios para la evaluación de la peligrosidad basados en combinación de calado y velocidad	37
1.17.1.	Criterio de Abt <i>et al.</i>	37
1.17.2.	Criterio de Témez V	38
1.17.3.	Criterio estabilidad al deslizamiento de Nanía V	39
1.17.4.	Criterio RESCDAM.....	41
1.17.5.	Criterio de estabilidad al vuelco de Gómez	42
1.17.6.	Criterio del PICBA06, CLABSA.....	43
1.17.7.	Criterio propuesto por Russo	43
1.18.	Criterios para la evaluación de la peligrosidad basados en el tiempo de evacuación para zonas subterráneas	44
1.18.1.	Criterio propuesto por Ishigaki <i>et al.</i>	44
1.19.	Resumen criterios de peligrosidad utilizados.....	45
6.	PRE-PROCESO	46
1.20.	Geometría, mallado y fluido	46
1.21.	Condiciones de contorno y estado inicial.....	48
1.22.	Modelos físicos y parámetros numéricos.....	51
7.	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES Y POST-PROCESO	54
1.23.	Primeras observaciones.....	54
1.24.	Características del flujo	54
1.25.	Velocidades y calados	60
8.	ANÁLISIS DE PELIGROSIDAD	66
1.26.	Consideraciones previas	66
1.27.	Calculo de la peligrosidad	67
1.27.1.	Cálculo con los criterios existentes	67
1.27.2.	Propuesta de un método para el análisis de la peligrosidad en la huella del escalón.....	69
1.28.	Comentarios al análisis de la peligrosidad.....	72
9.	CONCLUSIONES	74
10.	PROPUESTAS DE MEJORA Y FUTUROS TRABAJOS	76
	BIBLIOGRAFÍA	77

ANEXO A: RESULTADOS VELOCIDAD Y CALADO	78
ANEXO B: CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD	83
ANEXO C: PERFILES DE VELOCIDAD	88
ANEXO D: PERFILES DE VELOCIDAD Y CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD CON EL MÉTODO PROPUESTO.	95

Índice de ilustraciones

1. ORTOFOTO Y PLANTA DE LA ESTACIÓN DE PARAL·LEL DEL VESTÍBULO DIRECCIÓN TRINITAT NOVA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA ..	15
2. AGUA ACCEDIENDO AL ANDÉN. FUENTE: LA VANGUARDIA.....	16
3. FLUJO EN LAS ESCALERAS DE ACCESO AL ANDÉN EN LA ESTACIÓN DE PARAL·LEL. FUENTE: METROPOLIABIERTA.COM	16
4. ESQUEMA DE LA PLANTA DE LA ESTACIÓN DE PARAL·LEL. FUENTE: ELAVORACIÓN PROPIA	17
5. VISTA ISOMÉTRICA DEL ARCHIVO CAD DEL VESTÍBULO GENERADO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	18
6 DETALLE REJA DE DRENAJE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	18
7. ESCALERAS MODELIZADAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	19
8. GRÁFICO EJEMPLO DEL EFECTO DE LA TURBULENCIA SOBRE LA VELOCIDAD. FUENTE: WWW.SIMSCALE.COM	24
9. ESQUEMA DE UNA CELDA HEXAGONAL Y SUS VARIABLES. FUENTE: DOCUMENTACIÓN FLOW3D.....	29
10. ESQUEMA ALGORITMO FAVOR TM	30
11. EJEMPLO DEL EFECTO DEL MÉTODO FAVOR TM EN UNA GEOMETRÍA 2D.....	30
12. EJEMPLO DE REFINAMIENTO DE LA MALLA MEDIANTE EL USO DE BLOQUES ANIDADOS. FUENTE: DOCUMENTACIÓN FLOW3D.....	31
13. EJEMPLO DE VALORES VOF EN LA SUPERFICIE LIBRE.	35
14. EJEMPLO DE LA DEFINICIÓN DE LAS FRACCIONES DE ÁREA Y VOLUMEN EN EL MÉTODO VOF.....	35
15. GRÁFICO DEL CRITERIO DE TÉMEZ. FUENTE: TÉMEZ (1992).....	38
16. ESQUEMA FUERZAS ACTUANTES PARA EL DESLIZAMIENTO. FUENTE: TESIS EDUARDO MARTÍNEZ GOMÁRIZ.....	40
17. GRÁFICO CRITERIO DE NANÍA.	40
18. ESQUEMA FUERZAS ACTUANTES PARA EL VUELCO. FUENTE: TESIS EDUARDO MARTÍNEZ GOMÁRIZ.....	42
19. RESUMEN CRITERIOS DE PELIGROSIDAD	45
20. GEOMETRÍA STL DE LOS ESCALONES Y LÍMITE DE MALLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	46
21. DETALLE MALLADO EN LOS ESCALONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	47
22. DETALLE RENDERIZADO FAVOR TM DE LOS ESCALONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	48
23. CONDICIONES DE CONTORNO CONSIDERADAS. FUENTE. ELABORACIÓN PROPIA.....	49
24. CONDICIÓN INICIAL DEFINIDA MEDIANTE ARCHIVO STL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	50
25. IMAGEN EJEMPLO DEL SOLVER DE FLOW3D [®] DE SIMULACIÓN CON POCO CAUDAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	54
26. RESULTADOS: ISOSUPERFICIE CASO1 (12 L/s)	55
27. RESULTADOS: ISOSUPERFICIE CASO2 (25 L/s)	56
28. RESULTADOS: ISOSUPERFICIE CASO 3 (45 L/s).	56
29. RESULTADOS: ISOSUPERFICIE CASO 4 (82 L/s)	57
30. RESULTADOS: ISOSUPERFICIE CASO 5 (103 L/s)	57
31. DETALLE DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN LOS ESCALONES. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES ABSOLUTAS (IZQ.), VELOCIDAD EN EL EJE "Y" (CENTRO) Y VELOCIDAD EN EL EJE "Z" (DER). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	59
32. DETALLE VECTORES DE VELOCIDAD EN UNA SECCIÓN LONGITUDINAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	59
33. LÍNEAS DE CORRIENTE EN UN VÓRTICE TURBULENTO EN UN ESCALÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	60
34. ESCALONES SELECCIONADOS PARA SU ANÁLISIS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	61
35 DETALLE VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD EN EL TIEMPO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	62
36. DISTRIBUCIÓN DE LAS PROBETAS SOBRE LA ESCALERA Y GRÁFICO DE PERFILES DE VELOCIDADES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ..	63
37. CRITERIO DE OBTENCIÓN DE LAS VELOCIDADES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	64

38. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES CON DIRECCIÓN "y" EN UNA SECCIÓN LONGITUDINAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	65
39. ESQUEMA MÉTODO PROPUESTO PARA EL ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD EN EL ESCALÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	70
40. EJEMPLO OBTENCIÓN DE VELOCIDADES PARA EL MÉTODO PROPUESTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	71

Índice de Tablas

TABLA 1. PROPIEDADES DEL AGUA EN FLOW3D	48
TABLA 2. CONDICIONES DE CONTORNO	50
TABLA 3. ESPECIFICACIONES PC	52
TABLA 4. ALTURA Y CAUDAL DE ENTRADA.....	55
TABLA 5. DISTANCIA ENTRE ESCALONES Y ENTRADA.....	60
TABLA 6. EJEMPLO DE RESULTADOS DESPUÉS DEL POST-PROCESO	64
TABLA 7. LÍMITE DEL CRITERIO DE <i>ABT ET AL.</i> PARA EL SUJETO ESCOGIDO.....	66
TABLA 8. LÍMITE DEL CRITERIO REDSCAM PARA EL SUJETO ESCOGIDO.....	66
TABLA 9. LÍMITE DEL CRITERIO DE RUSSO PARA EL SUJETO ESCOGIDO.....	67
TABLA 10. EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD PARA LA VELOCIDAD MEDIA ABSOLUTA	67
TABLA 11. EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD PARA LA VELOCIDAD EN EL EJE "Y" MEDIA.....	68
TABLA 12. EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD PARA LA VELOCIDAD ABSOLUTA MÁXIMA	68
TABLA 13. EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD PARA LA VELOCIDAD MÁXIMA EN EL EJE "Y"	69
TABLA 14. EJEMPLO DE LA EVALUACIÓN DE PELIGROSIDAD CON EL MÉTODO PROPUESTO	71

Prefacio

1.1 Origen del trabajo

Debido al historial de inundaciones que presenta la estación de Paral·lel se ha estimado oportuno estudiar hidráulicamente el comportamiento del flujo del agua en su descenso por las escaleras.

Estos problemas de inundación vienen originados por la localización espacial de la entrada ya que se encuentra en un punto bajo de la zona.

Su cota inferior hace que la escorrentía se concentre en este punto donde confluye la que proviene de la Av. Paral·lel y la que proviene del carrer Nou de la Rambla.

1.2 Motivación

La principal motivación de este estudio es comprender el flujo turbulento a lo largo de las escaleras, que se puede asemejar a un aliviadero escalonado. Mediante los datos recogidos se puede conocer la situación real de esta entrada de metro en particular en relación al riesgo para los usuarios del metro.

El hecho de poder simular estos eventos hace que el estudio sea doblemente útil ya que se pueden obtener resultados a partir de una situación real que son fácilmente extrapolables a otros problemas o situaciones. Por otro lado debido a la recurrencia de los eventos sería posible en un futuro poder tomar mediciones en el lugar para poder calibrar los modelos hidráulicos.

2 Introducción

La estación de metro de Paral·lel ha sufrido recurrentes inundaciones causadas por el agua que accede al vestíbulo por una de sus escaleras de entrada. Estos fenómenos son cada vez más frecuentes en las ciudades y por ello es oportuna y necesaria la evaluación y el estudio de su comportamiento hidráulico así como la evaluación del riesgo para las personas.

Mediante una simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) se consigue simular el flujo turbulento del agua a lo largo de las escaleras, para ello es necesario conseguir una representación geométrica ajustada de la zona a estudiar, un estudio de los modelos físicos, así como las condiciones de contorno, y un análisis de los módulos de cálculo del software. Todo ello con el objetivo de realizar un pre-proceso óptimo para conseguir una simulación estable y temporalmente asumible.

Se han realizado mediciones in situ cuyos datos se han representado en formato CAD para conseguir un archivo STL con la geometría para su implementación en Flow3D.

Una vez obtenidos los resultados de la simulación se requiere de un post-proceso con el fin de analizarlos y así conseguir los datos cruzados de velocidad-calado-peligrosidad utilizando el software FlowSigh.

2.1 Objetivos

El principal objetivo del trabajo es determinar la peligrosidad frente al riesgo para las personas en función de una altura de agua determinada sobre las escaleras. Por otro lado se estudian las futuras aplicaciones de modelos CFD, su precisión y factibilidad para su uso en este tipo de problemas.

El uso, conocimiento y aplicación de modelos CFD, así como de los módulos de cálculo que posee, es una parte fundamental de los objetivos a alcanzar en este documento.

Y por último, un objetivo importante es evaluar la aplicabilidad de los distintos criterios de peligrosidad frente a inundaciones urbanas que se encuentran en la bibliografía a un problema tan singular como este.

2.2 Alcance

Este documento tiene como objetivos:

- Descripción de las ecuaciones consideradas en cuanto a mecánica de fluidos y su resolución mediante modelos CFD de forma que quede completamente definido el problema desde el punto de vista físico.
- Recopilación de criterios de peligrosidad en zonas urbanas aplicables al caso estudiado que describa el estado del arte a fecha de la realización del documento.
- Descripción del modelo CFD realizado para resolver el problema del flujo sobre las escaleras incluyendo pre-proceso y el posterior análisis de los resultados, quedará definido el modelo 3D de forma que los resultados sean replicables y mediante un análisis específico, que describa el flujo del agua en las escaleras, de obtendrán los parámetros necesarios para evaluar la peligrosidad.
- Evaluación de la peligrosidad frente a inundaciones de la escalera en base a los resultados y los criterios seleccionados.

3 Problemática de inundaciones en la estación de metro Paral·lel.

3.1 Situación y descripción del problema

3.1.1 Localización

La estación de metro de Paral·lel es una estación compartida por la línea 2 y la línea 3 de la red de metro de Barcelona. Está ubicada en la Av. de Paral·lel de la que recibe su nombre. Dispone de cuatro entradas de las cuales una presenta problemas de inundación frente a eventos pluviales de cierta intensidad. Esta entrada está localizada en la intersección de la Av. Paral·lel con Carrer Nou de la Rambla y es la que corresponde con la escalera norte del acceso en dirección a Trinitat Nova.



1. Ortofotografía y planta de la estación de Paral·lel del vestíbulo dirección Trinitat Nova. Fuente: Elaboración propia

La entrada se encuentra en un punto bajo frente a la calle que puede dar problemas de inundación cuando el drenaje existente supera su capacidad y existe acumulación de escorrentía superficial de considerable magnitud.

3.1.2 Eventos pasados

La estación de Metro Paral·lel es célebre por sus continuos episodios de inundaciones en cuanto a la entrada se refiere. Estos últimos años tras eventos pluviales intensos se ha recopilado en la prensa y mediante documentos gráficos como discurre el agua por todo el vestíbulo hasta llegar a las vías afectando de manera considerable tanto al servicio de transporte público como a la seguridad de las personas usuarias.



2. Agua accediendo al andén. Fuente: La Vanguardia.

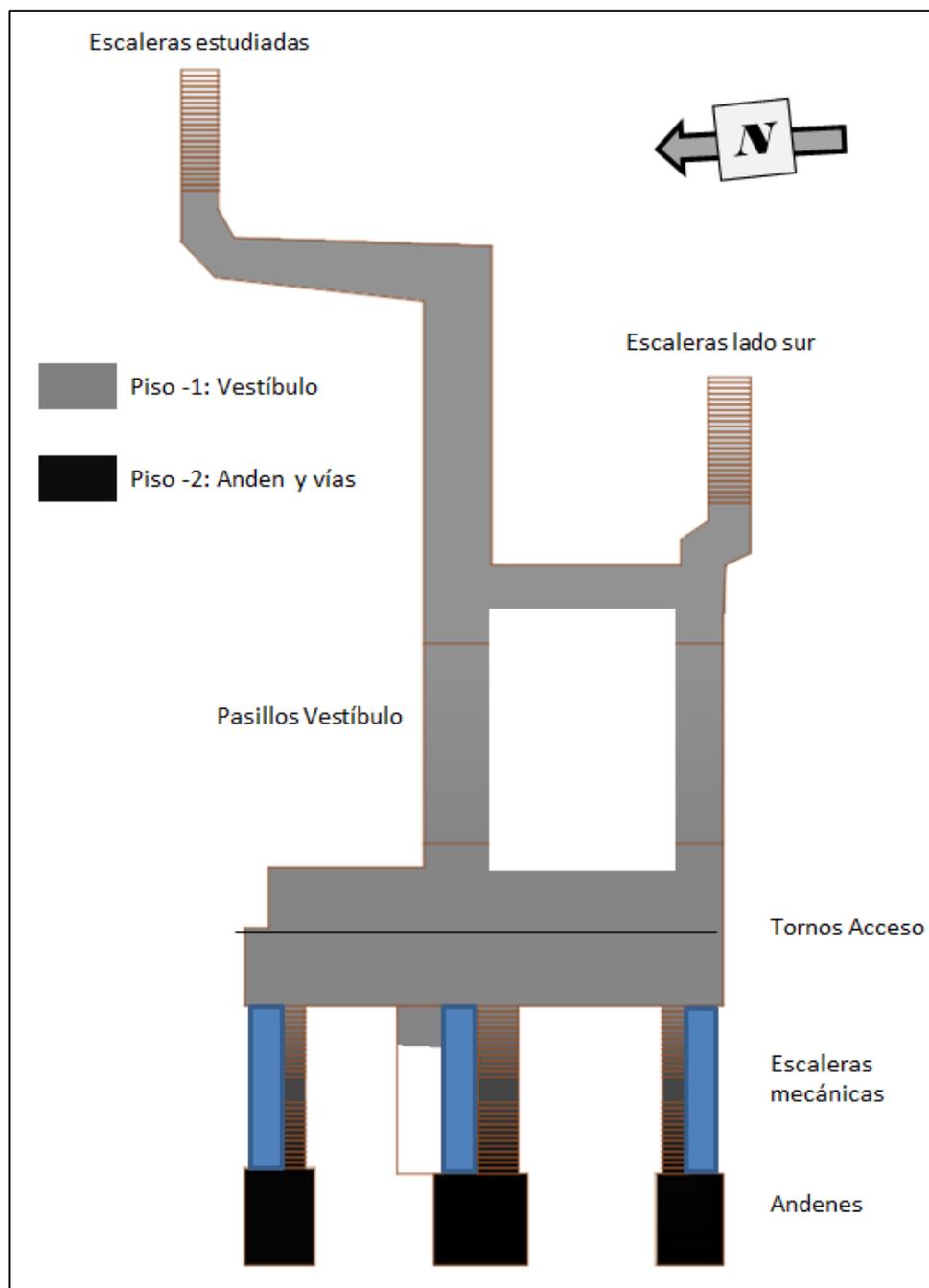
El agua que se puede ver en la zona del andén tiene dos orígenes diferenciados. Por un lado el agua que entra mediante filtraciones acaba llegando al andén por el techo y paredes y por el otro el agua que consigue llegar al andén después de entrar por las escaleras de acceso y recorrer todo el vestíbulo. Este estudio se centra sólo en el estudio de las escaleras por lo que sólo se tiene en cuenta el agua que accede a través de ellas.



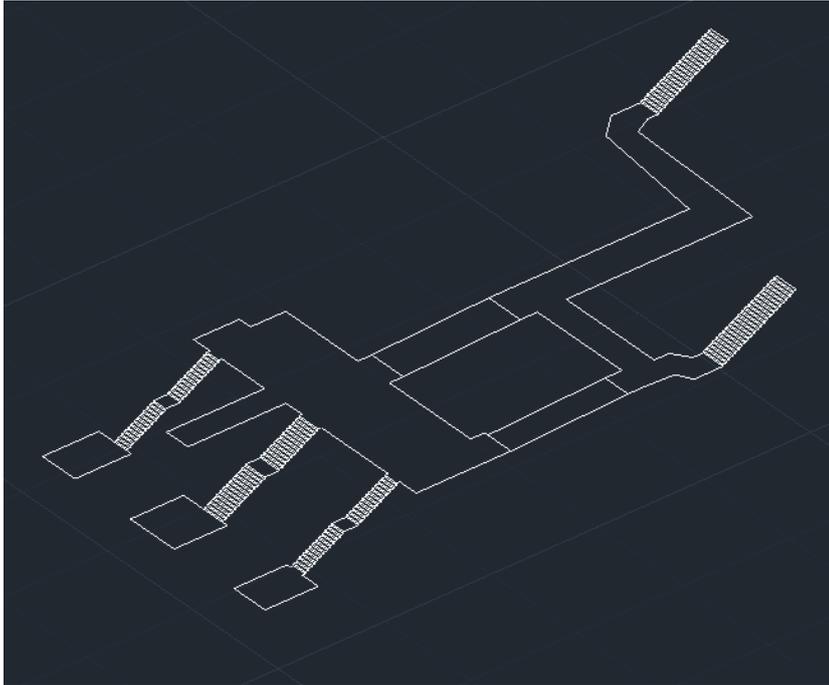
3. Flujo en las escaleras de acceso al andén en la estación de Paral·lel. Fuente: Metropoliabierta.com

3.1.3 Geometría. Toma de datos y digitalización.

Para la definición geométrica de la escalera ha sido necesaria la toma de medidas en campo. Mediante un distanciómetro láser se han obtenido las dimensiones de las escaleras y un levantamiento topográfico (de baja calidad) de la zona del vestíbulo.



4. Esquema de la planta de la estación de Paral·lel. Fuente: Elaboración propia



5. Vista isométrica del archivo CAD del vestíbulo generado. Fuente: Elaboración propia.

La escalera estudiada es de 2m de ancho entre paredes, la huella es de 0.3m y la contrahuella de 0.175m. El número total de escalones es de 22, la longitud horizontal total de la parte escalonada es de 6.3m mientras que el descenso es de 3.85m.

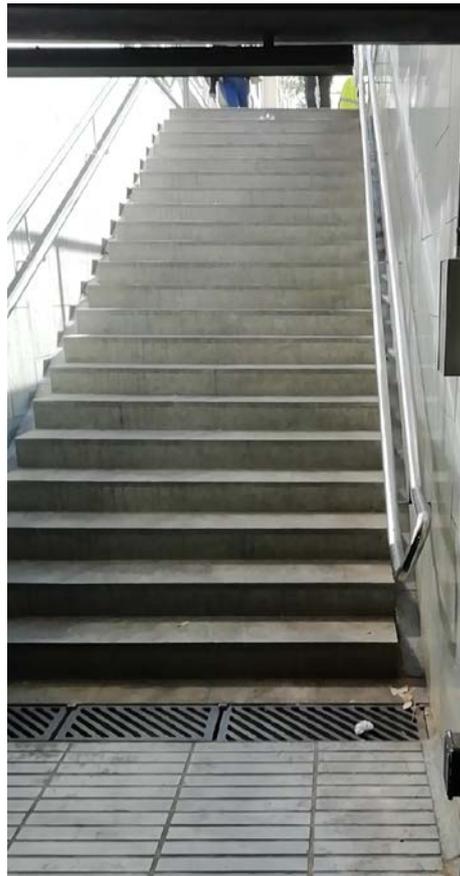
Se observa que en el fondo de la escalera existe una rejilla de drenaje, aspecto que no se va a tener en cuenta pues dificultaría en gran medida la simulación. Además, no teniéndola en cuenta, los resultados se quedan del lado de la seguridad pues el volumen de agua que entra a la estación será menor que el simulado ya que en el modelo el agua no será interceptada por el sistema de drenaje. Es un criterio que no se aleja mucho de un posible escenario, pues en estas rejillas se suelen acumular desperdicios y restos de hojas que, llegando incluso a taponar el sistema de drenaje, reducen considerablemente su capacidad de captación y evacuación de agua.



6 Detalle rejilla de drenaje. Fuente: Elaboración propia

Al final de la entrada, el inicio del pasillo que va hacia el vestíbulo se configura de manera perpendicular a la escalera. Esto tampoco es considerado ya que la pared delante de las escaleras se sitúa a varios metros. La forma de la esquina biselada no se tiene en cuenta y se asume que la salida de las escaleras es horizontal y de la misma anchura que las escaleras.

Las escaleras presentan un carril en cada uno de sus laterales que conecta la base de los escalones con el fin de facilitar su limpieza. Esta geometría no ha sido considerada ya que dificultaría el análisis CFD e imposibilitaría la extrapolación de los resultados a otros problemas con geometrías similares.



7. Escaleras modelizadas. Fuente: Elaboración propia.

4 Hidráulica del flujo

En este capítulo se presentan las ecuaciones e hipótesis fundamental que rigen un problema de hidráulica del flujo y serán resueltas mediante métodos numéricos por el software CFD.

La mecánica del medio continuo es el campo de la física que estudia el movimiento de un medio desde un enfoque macroscópico.

Dentro de la mecánica de medios continuos se encuentra la denominada hidráulica que como su nombre indica describe el movimiento del agua. La hidráulica del flujo del agua se caracteriza por la incapacidad de ésta para soportar esfuerzos cortantes.

5 Hipótesis Principales

5.1.1 Hipótesis del medio continuo

Es la hipótesis fundamental de la mecánica de medios continuos mediante la cual se asume que las propiedades que presenta el medio estudiado son funciones continuas y no presentan saltos ni discontinuidades.

5.1.2 Hipótesis de la partícula fluida

La hipótesis de la partícula fluida asume que la partícula está siempre formada por las mismas moléculas y que todas ellas presentan el mismo estado. El tamaño de una partícula fluida ha de ser tal que el número de partículas que la integran suponga una homogeneidad en los valores macroscópicos y, a su vez, ha de ser suficiente como para desestimar cambios por interacciones microscópicas dentro de su dominio.

5.2 Ecuaciones

En lo que se refiere a problemas de hidráulica de flujo las ecuaciones a considerar se reducen a las de conservación-balance, obviando las referentes a las de termodinámica de estado y constitutivas (termomecánica, conducción del calor y entropía).

- Ecuación de continuidad o ecuación de conservación de la masa:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

Esta relación establece que la variación de masa de un volumen definido es consecuencia de un flujo de masa neto.

- Balance cantidad de momento:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} = \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

- Balance de energía:

$$\rho \frac{du}{dt} = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{d} + \rho r - \nabla \cdot \mathbf{q}$$

5.3 Ecuaciones de Navier-Stokes

5.3.1 Caso general

Las ecuaciones que gobiernan un problema de mecánica de fluidos suman un total de 17, que junto con las 17 incógnitas, forman un sistema compatible determinado. Sin embargo este sistema es extremadamente complejo, con el fin de resolverlo de manera más simple se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes.

Son una versión simplificada del balance de la cantidad de movimiento que se expresan en función del campo de velocidad y de presión. De esta forma se consigue un sistema de siete ecuaciones diferenciales parciales con siete incógnitas que es resoluble. Si además se toman en consideración otros casos particulares como la de que el fluido es barotrópico (un fluido en el que la magnitud de la presión sólo depende de la densidad) las ecuaciones de Navier-Stokes pueden desacoplarse en la parte mecánica y la parte térmica. El problema mecánico queda:

- Continuidad:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

- Navier-Stokes, o balance de la cantidad de movimiento:

$$-\nabla \bar{p} + \mu \Delta \bar{v} + \rho \mathbf{b} = \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

En este problema se además que el agua es un fluido newtoniano incompresible, de forma que:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{d\rho}{dt} = 0 \\ \frac{dp}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \rho = \rho_0 \\ \nabla \cdot \mathbf{v} = Tr(\mathbf{d}) = 0 \end{array} \right.$$

Donde:

- $\nabla \cdot \mathbf{v}$: Es la divergencia de velocidad, factor que indica la expansión.
- ∇p : son las fuerzas causadas por el gradiente de presiones
- $\mu \Delta v$:Hacen referencia a las fuerzas viscosas.
- ρb : Corresponde a las fuerzas másicas, esto es la gravedad
- $\rho \frac{dv}{dt}$: Fuerzas de inercia

Por tanto, el problema mecánico presentado se basa en un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas y es compatible determinado. Aquí se han expuesto las ecuaciones de forma compacta, el software CFD las interpreta de forma no compacta como se explicará más adelante.

5.4 Ecuaciones de Reynolds

Cuando el medio alcanza un estado turbulento el sistema de ecuaciones sigue siendo válido, es un sistema compatible determinado, sin embargo computacionalmente resulta inasumible. Esto es debido a la presencia de fluctuaciones en el campo de velocidades como se expone en los estudios de Reynolds. Resolver esto con las ecuaciones de Navier-Stokes mediante software CFD es sumamente costoso en cuanto a tiempo y recursos.

Estas fluctuaciones implican para su resolución un tamaño muy pequeño del volumen de computación, esto es, del tamaño de celda que hace incrementar en gran medida el coste computacional. Para resolver este problema se utilizan los denominados modelos de turbulencia. Estos modelos se basan en la descomposición del campo de velocidades y el de presiones en valores medios y sus fluctuaciones.

De esta forma las ecuaciones de Reynolds corresponden a las ecuaciones de Navier-Stokes sustituyendo el campo de velocidades y presiones por sus valores medios más un término de tensiones turbulentas (tensiones de Reynolds). Las ecuaciones resultantes son conocidas como Ecuaciones de Reynolds.

$$-\nabla\bar{p} + \mu\Delta\bar{\mathbf{v}} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_R + \rho\mathbf{b} = \rho \frac{d\bar{\mathbf{v}}}{dt}$$

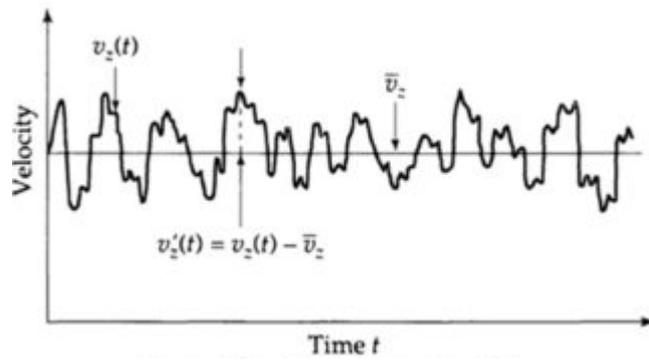
Según propuso Boussinesq existe un gradiente asociado al tensor de Reynolds de manera que se impone el concepto de la viscosidad turbulenta ν_T

$$T_R = \rho\nu_T\nabla \cdot \mathbf{v}$$

Dando lugar a la expresión

$$-\nabla\bar{p} + \mu\Delta\bar{\mathbf{v}} + \rho\nu_T\Delta\bar{\mathbf{v}} + \rho\mathbf{b} = \rho \frac{d\bar{\mathbf{v}}}{dt}$$

La determinación del valor de la viscosidad turbulenta ν_T es el objetivo que tienen los modelos de turbulencia que se usan en el software CFD.



8. Gráfico ejemplo del efecto de la turbulencia sobre la velocidad. Fuente: www.simscale.com

6 Mecánica Computacional de Fluidos (CFD)

6.1 Metodología de resolución de problemas mediante código CFD

La estructura a seguir para resolver un problema mediante CFD se divide esencialmente en tres etapas: el pre-proceso, la resolución (de aquí en adelante “solver”), y el post-proceso.

- **Pre-proceso:** En este primer paso es necesario conocer el problema en cuestión, que geometría se va a usar, que fenómenos físicos van a intervenir de manera relevante así como qué fluido se va a modelar y con qué propiedades se va a considerar. Uno de los cometidos clave del pre-proceso es la definición del dominio de simulación y su correspondiente mallado así como las condiciones de contorno, que son necesarias para una definición realista del problema. Según el método de resolución que tenga cada software este proceso será diferente, más costoso o menos, y tendrá unas implicaciones tanto en precisión de los resultados como tiempo de cálculo. De forma que la definición de un buen mallado que se ajuste a los requerimientos del problema es fundamental. Un aspecto a tener en cuenta es que el incremento de resolución de la malla irá en detrimento del tiempo que tarde el solver en alcanzar una solución.
- **Resolución o solver:** Una vez finalizado el pre-proceso el siguiente paso es hacer que el software comience a calcular. El tiempo que tarde dependerá de las características del problema y de la capacidad de cálculo disponible.
- **Post-proceso:** Cuando el solver ha terminado de calcular es necesario un tratamiento de los datos. Esta parte es también fundamental ya que en una simulación CFD se genera gran cantidad de datos que es necesario gestionar. En esta etapa se pueden encontrar errores en la simulación que serán fruto de un error en el pre-proceso o una consideración del problema equivocada, de esta forma se genera un flujo de trabajo iterativo con el fin de alcanzar una solución satisfactoria. Las herramientas del post-proceso varían de un software a otro, suelen estar integradas en un programa informático independiente al módulo de cálculo. Es ahora cuando se extraen los datos necesarios para hacer un posterior análisis.

6.2 Métodos de cálculo

En cuanto a lo que se refiere al método de computación para la resolución de este tipo de problemas se encuentran varias opciones como son:

- Diferencias Finitas
- Elementos Finitos
- Volúmenes Finitos
- Métodos espectrales

El software utilizado es Flow3D[®] el cual tiene sus algoritmos basados en el método de volúmenes finitos, que es una ampliación en 3 dimensiones del método de elementos finitos. Esta solución es la más utilizada y aceptada en cuanto a códigos CFD tanto en software privativo como libre. Su nombre tiene relación con la estructura y filosofía del algoritmo computacional que tiene como base fundamental la definición de volumen finito. Un volumen finito se define como un elemento discreto del medio continuo a estudiar en el cual se cumple la ecuación de conservación de las variables consideradas. El algoritmo de cálculo se puede resumir someramente en los siguientes pasos:

1. Integración de las ecuaciones de gobierno del fluido sobre todos los elementos, esto es sobre todos los volúmenes de control del dominio de computación definido.
2. Discretización de las ecuaciones resultantes en un sistema de ecuaciones algebraicas.
3. Solución del sistema algebraico mediante métodos iterativos.

Para resolver un problema mediante el método de los elementos finitos se requiere un pre-proceso con el objetivo de proporcionar los datos de entrada al algoritmo de manera correcta. Es aquí donde los diferentes softwares se diferencian más, en la interfaz de usuario usada en el pre-proceso.

La parte más importante en el pre-proceso es la definición geométrica y el mallado del dominio de computación. Es en este momento donde se definirá el tamaño del elemento finito y la extensión total del dominio de computación. Existen diversos métodos de mallado, que conllevan diferentes rendimientos a la hora de la resolución del problema como pueden ser las mallas estructuradas, no estructuradas, etc. El tamaño del elemento, y por tanto su número, es una variable crucial en cuanto al rendimiento y exactitud de la simulación, a tamaño de celda más pequeño, más elementos y más precisión pero por otro lado el tiempo total de simulación y el volumen de datos generados se puede volver inasumible. Por otro lado cuanto más pequeño es el tamaño de malla menor será el incremento de tiempo para cada cálculo ya que se debe cumplir la condición de Courant. Una buena definición de la malla es fundamental.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{u}$$

Donde u es la velocidad del fluido y Δx el tamaño de celda. Esta ecuación establece una relación entre la malla y la velocidad presente en la celda de manera que una perturbación no recorra una celda completa en un intervalo de tiempo. Es una condición necesaria pero no suficiente para asegurar la estabilidad de la simulación ya que, por ejemplo, el flujo combinado en tres dimensiones puede ser suficiente para que se exceda el contenido de una celda. Esta condición es la que establece que a menor tamaño de celda, menor incremento de tiempo. Esta condición puede ser muy restrictiva, por eso son ampliamente usados métodos implícitos sobre todo en problemas con velocidades no muy grandes. La condición de Courant pone en evidencia la necesidad del uso de modelos de turbulencias ya que las perturbaciones en el campo de la velocidad, que corresponden a un flujo turbulento, requerirían de tamaños de malla muy pequeños

El método de cálculo para cada intervalo de tiempo se puede resumir en tres etapas. En la primera se calculan aproximaciones explícitas que cumplen la ecuación de cantidad de movimiento en base a los valores calculados en el instante anterior. Para este paso, si es el instante $t=0$, se toman como inicio de la simulación las condiciones de contorno y el estado inicial. Ahora, usando aproximaciones implícitas, se busca cumplir la ecuación de continuidad mediante un método iterativo. En este paso se evalúan los valores de presión de forma que las velocidades resultantes se usan de nuevo en la formulación explícita de la cantidad de movimiento. Este ciclo se repite hasta que se encuentra la presión correcta. Una vez se tiene la presión y la velocidad se procede a calcular las celdas de la lámina libre mediante un algoritmo VOF.

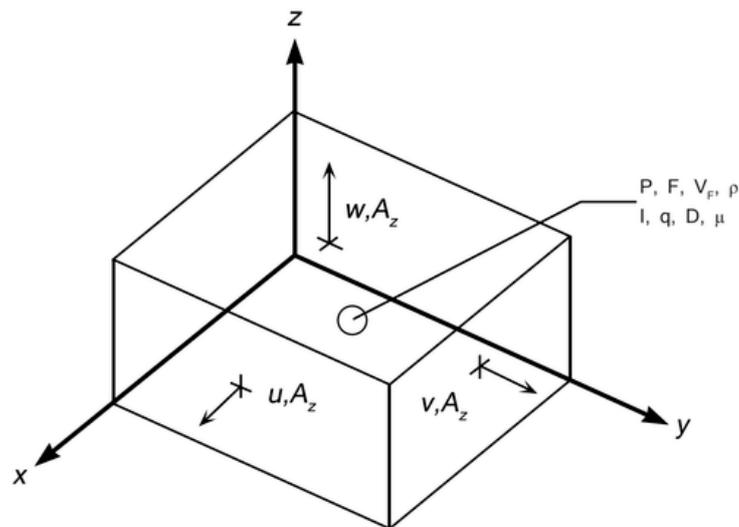
6.3 Software CFD

Se define como software CFD al código que estructura un algoritmo para resolver un problema físico del medio continuo mediante alguno de los métodos expuestos en el apartado anterior. Actualmente la mayoría de softwares se componen de programas con interfaz de usuario que ofrecen cada vez más versatilidad y facilidad en el pre-proceso. En la actualidad existen programas CFD que incluyen un módulo de tratamiento de datos CAD integrado, de esta manera todo el proceso de resolución se concentra en un único programa. Por otro lado el post proceso es habitual tener un software e interfaz diferenciado del programa de pre-proceso y resolución.

En este estudio se ha utilizado Flow3D. Se explica su funcionamiento siguiendo el orden marcado por el pre-proceso.

6.4 Geometría y Mallado Flow3D

La malla está formada por celdas hexagonales, cuyas dimensiones son estipuladas por el usuario en función de sus necesidades, donde cada celda es asociada con valores medios locales para todas las variables necesarias. Estas variables están asociadas geoméricamente al centro de la celda excepto las velocidades, que están definidas para cada cara. Esta característica es importante porque tiene implicaciones sobre el cálculo de la superficie libre.



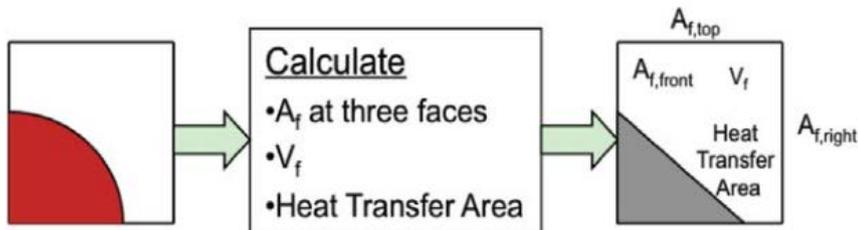
9. Esquema de una celda hexagonal y sus variables. Fuente: Documentación Flow3D

Se ofrecen diferentes modos de alcanzar la definición geométrica de la malla. Se pueden crear bloques de malla que definan la propia geometría que se quiere simular (si el volumen que se desea simular está formado por fronteras ortogonales, raras veces) o bien, se pueden introducir bloques de malla que contengan todo el ámbito de la simulación y sean recortados por sólidos. Estos Sólidos pueden estar definidos mediante primitivas en el propio software de cálculo o ser importados mediante ficheros STL o ASCII.

Para incorporar la geometría de los objetos dentro de la malla o de las condiciones de contorno de tipo muro, Flow3D® define fracciones de áreas y volúmenes de las celdas. Es el denominado método FAVOR™ (Fractional Area/Volume Obstacle Representation).

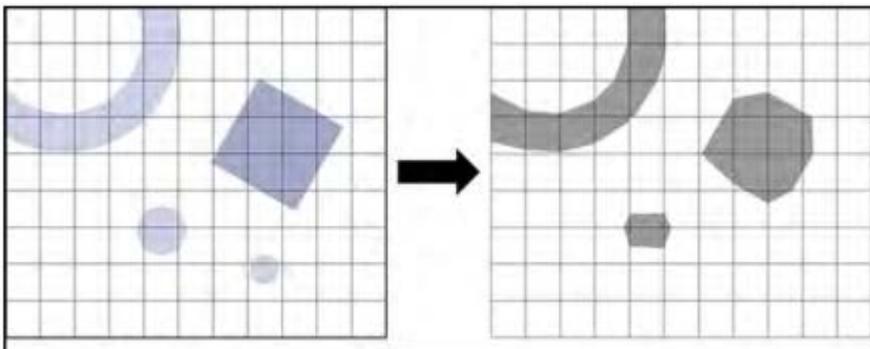
El algoritmo asigna un valor a cada celda en función de su porosidad, 1 para las celdas sin obstáculos y 0 para las celdas que no permiten el paso del fluido. Para las celdas que están parcialmente ocupadas por el sólido el algoritmo determina un plano recto dentro de la celda para determinar el ángulo de la frontera. De esta forma se evita el efecto escalonado típico de las mallas rectangulares.

Este método consigue aumentar la definición geométrica de los sólidos que interfieren con el dominio de simulación sin tener que refinar en exceso la malla. Reduce de esta forma el coste computacional asociado con una malla más pequeña que busque representar una geometría compleja.



10. Esquema algoritmo FAVOR™.

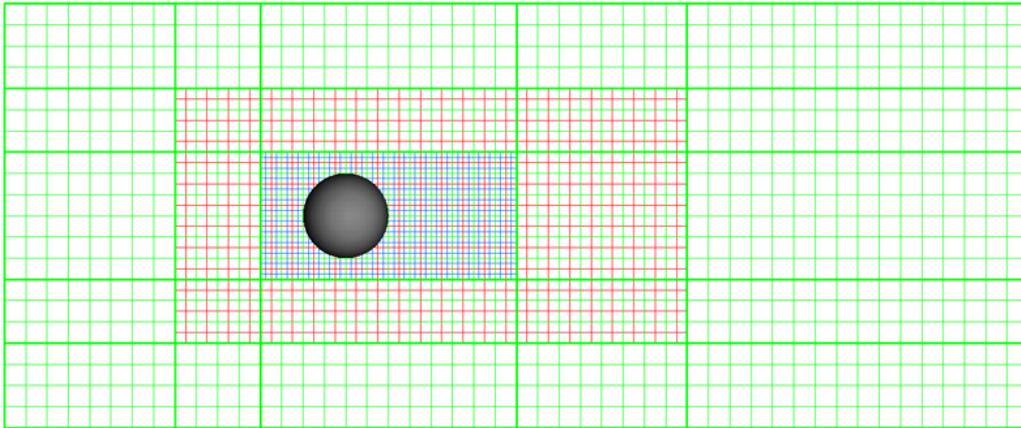
Los sólidos pueden ser definidos para diferentes propósitos. Pueden ser para reducir el dominio de computación o para ser considerados sólidos dentro de la geometría. Hay que definir ciertos parámetros necesarios para la correcta simulación de la interacción del flujo con el elemento. Estos parámetros pueden ser tales como el material, rugosidad, conductividad térmica y temperatura, deformabilidad, etc. Por otro lado los sólidos pueden ser configurados para que se muevan dentro del dominio de simulación ya sea por acción del flujo sobre ellos o por un movimiento impuesto.



11. Ejemplo del efecto del método FAVOR™ en una geometría 2D

La malla puede estar configurada por elementos cúbicos o prismáticos rectangulares según lo decida el usuario. El dominio de computación puede estar configurado por diferentes bloques de malla que pueden tener una relación entre sí de continuación o de bloques anidados. A fin de alcanzar mayor definición en una zona determinada se utilizan bloques anidados de un tamaño de celda menor. Estas zonas acostumbran a ser las que tienen mayor complejidad y serán donde el modelo CFD será más útil. Por otro lado se suelen utilizar tamaño de celda mayor para las zonas en las que las condiciones serán más estables y conocidas.

Otra gran ventaja de este método es que la malla no tiene que modificarse con los cambios del sólido dentro del dominio de computación ya sea durante el pre-proceso o durante la propia simulación. Esta manera de generar una malla con buena representación geométrica es notablemente más sencilla que con otros tipos de malla, facilitando el pre-proceso y haciendo el análisis CFD más eficiente en el tiempo. Cuanto menos tiempo se gaste en el pre-proceso antes se obtendrán los resultados. Este método de mallado facilita en gran medida el pre-proceso sin comprometer la calidad final de los resultados.



12. Ejemplo de refinamiento de la malla mediante el uso de bloques anidados. Fuente: Documentación Flow3D

6.5 Condiciones de Contorno Flow3D

Las condiciones de contorno son una parte indispensable en una simulación CFD ya que son parte esencial tanto de la resolución matemática de las ecuaciones como de la representación del fenómeno a estudiar de la forma más fiel posible. Para alcanzar esta representación existen varios tipos de condiciones de contorno posibles para asignar a cada frontera del dominio de simulación.

Las condiciones de contorno que pueden ser simuladas en Flow3D[®] son

- Simetría. Valor asignado por defecto a las caras de los bloques de malla. Hace referencia a un valor nulo de la velocidad normal a la superficie.
- Continuidad. Utilizada para dar continuidad entre dos bloques de malla coplanarios.
- Presión. Estipula un volumen de entrada o salida en función de una presión y área de entrada. El área se define como una fracción de volumen o altura específica.
- Superposición de malla. Utilizado para mallas superpuestas o anidadas.
- Onda.
- Muro. No deja salir el fluido del dominio de simulación e impone una condición de no deslizamiento. Es decir que la velocidad en la frontera es cero.

- Periódica.
- Velocidad. Estipula un volumen de entrada o salida en función de una velocidad y área de entrada. El área se define como una fracción de volumen o altura específica.
- Salida. Permite la salida del flujo a través de la frontera del dominio de computación.
- Flujo volumétrico. Estipula un caudal de entrada o salida a través de un área definida como una fracción de volumen o altura específica.

6.6 Cálculos en Flow3D.

Flow3D[®] resuelve las ecuaciones del problema mecánico de hidráulica de fluidos de manera no compacta mediante el método de los volúmenes finitos.

6.6.1 Ecuaciones de continuidad y balance (Navier-Stokes)

Las ecuaciones de continuidad y balance de la cantidad de movimiento (Navier-Stokes) descritas de manera compacta se interpretan de manera no compacta incorporando ciertos parámetros con el fin de ser interpretadas por el algoritmo de resolución de Flow3D.

La ecuación de continuidad en forma no compacta queda:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR}$$

Mientras que las ecuaciones de Navier-Stokes quedan:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (u \cdot A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (w \cdot A_z) + \xi \frac{u \cdot A_x}{x} &= \frac{R_{SOR}}{\rho} \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u \cdot A_x \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot A_y \cdot R \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot A_z \cdot R \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_x \cdot v^2}{x \cdot V_F} &= \\ = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho \cdot V_F} (u - u_w - \delta u_s) & \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u \cdot A_x \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot A_y \cdot R \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + w \cdot A_z \cdot R \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_y \cdot v \cdot u}{x \cdot V_F} &= \\ = -\frac{1}{\rho} \left(R \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho \cdot V_F} (v - v_w - \delta v_s) & \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u \cdot A_x \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + v \cdot A_y \cdot R \cdot \frac{\partial w}{\partial y} + w \cdot A_z \cdot R \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \\ = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho \cdot V_F} (w - w_w - \delta w_s) & \end{aligned}$$

- V_F : La fracción de volumen abierta al flujo.
- ρ : La densidad.
- R_{DIF} : Un coeficiente de difusión de turbulencia.
- R_{SOR} : Una fuente de masa.
- Las componentes de la velocidad (u, v, w) están en las direcciones de coordenadas (x, y, z) o (r, R_{SOR}, z)
- A_i : Es la fracción de área abierta al flujo en la dirección i .
- R : Depende del sistema de coordenadas elegido. Si el sistema es el Cartesiano R es 1 y ξ es cero.
- $u_w; \delta u_w$: Componentes de velocidades relativas a la fuente de masa.
- G_i : Componente de la gravedad en la dirección i .
- f_i : Componente de las fuerzas viscosas en la dirección i .
- b_i : Pérdidas de flujo en cuerpos porosos.
- (u_s, v_s, w_s) : Los componentes de la velocidad del fluido en la superficie de la fuente de masa en relación con la propia fuente de masa.

6.6.2 Modelos de turbulencias

Los diferentes modelos de turbulencias presentes en los algoritmos CFD tienen como objetivo determinar la viscosidad turbulenta. Esta viscosidad turbulenta hace referencia a la necesidad de encontrar las nuevas incógnitas que se han definido al incluir el término de Reynolds en las ecuaciones.

Flow3D[®] dispone de varios modelos de turbulencia que resuelven las ecuaciones de Reynolds de formas diferentes:

- Modelo de Prandtl: Presenta el coste computacional más bajo de entre los modelos de turbulencia disponible, sin embargo no es aplicable a todo tipo de flujo. Se requiere un flujo permanente y uniforme.
- One-Equation model: Derivado del modelo Standard two-equation presenta un coste computacional bajo. Incluye el término de difusión, el de convección y el de producción de la energía cinética turbulenta lo que lo hace más robusto que el de Prandtl, sin embargo, presenta limitaciones para geometrías complejas.
- Modelo $k - \epsilon$: Para representar las propiedades del flujo este modelo incluye las ecuaciones de transporte, energía cinética turbulenta y energía turbulenta. Es uno

de los modelos más usados pese a que presenta dificultades con grandes gradientes de presiones.

- RNG (Renormalized Group) Utiliza ecuaciones similares al modelo $k - \epsilon$. Este modelo usa constantes derivadas explícitamente al contrario que el modelo $k - \epsilon$. Se basa en el uso de herramientas probabilísticas a las derivadas de las ecuaciones de energía cinética turbulenta y de disipación.
- LES (Large Eddy Simulation). Se basa en la resolución de estructuras turbulentas que sean representadas correctamente por la malla y en la aproximación de aquellas que no puedan ser representadas por ser demasiado pequeñas. Aplica las ecuaciones de Navier-Stokes simplificadas para escalas pequeñas añadiendo un término de viscosidad de remolino (Eddy viscosity) que representa las pequeñas variaciones.

En este proyecto se ha usado el método RNG $k-\epsilon$, según la documentación de Flow3D[®] el modelo RNG es el más utilizado y presenta un buen desempeño para diferentes escenarios. A su vez este modelo es el más utilizado en la literatura donde se describen escenarios similares al descrito en este documento.

El modelo RNG $k-\epsilon$ es un modelo de dos ecuaciones que se incluye en la categoría denominada como RANS (Reynold's Averaged Navier Stokes). Dichas ecuaciones se expresan de la siguiente forma:

$$\frac{D}{D_t}(\rho_m k) = V \cdot (\rho_m D_k V k) + P_k - \rho_m \epsilon$$

$$\frac{D}{D_t}(\rho_m \epsilon) = V \cdot (\rho_m D_\epsilon V \epsilon) + \frac{C_1 P_k \epsilon}{k} - \frac{C_2^* \rho_m \epsilon^2}{k}$$

Siendo:

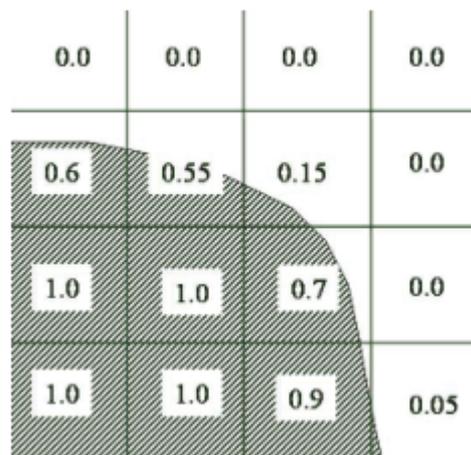
- D_ϵ, D_k : La difusión efectiva de ϵ y k .
- P_k : la generación de k causada por los gradientes medios de la velocidad.
- C_1 : Parámetro igual a 1.42.
- C_2^* : Valor calculado a partir de $C_2 = 1.68$, k y P_k .

6.6.3 Superficie libre y método VOF

Flow3D[®] resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes en 3D RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes). Para la resolución de la lámina libre Flow3D[®] utiliza el método TruVOF[®] un método VOF (Volume Of Fluid) para determinar la frontera entre dos fases que es similar al método FAVOR. Este algoritmo es importante pues define la frontera entre celdas vacías y llenas. Dado que las variables se localizan en

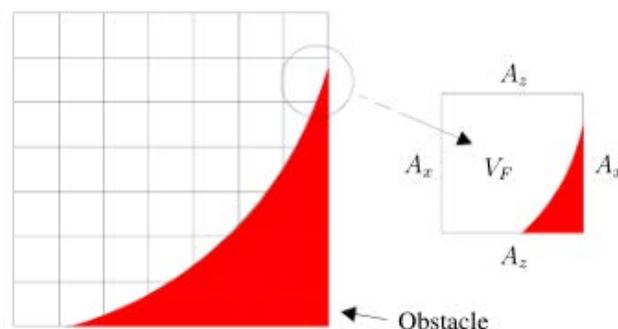
el interior de las celdas sólo se resuelven las ecuaciones para las celdas que contienen fluido, con la definición de frontera se consigue eliminar la parte del dominio de computación que se encuentra vacío haciendo que la simulación sea más eficiente.

De la misma manera que el método FAVORTM hace con las celdas que están bloqueadas al flujo, el método VOF les asigna valores en función de si contienen fluido o no (1 y 0 respectivamente). Para los valores intermedios el método VOF determina la posición y orientación exacta de la frontera en una celda. Para ello utiliza los valores de la función VOF en la propia celda y en las adyacentes.



13. Ejemplo de valores VOF en la superficie libre.

De esta forma queda definida la metodología de cálculo del Flow3D[®] de manera fundamental pues los algoritmos matemáticos usados son de gran complejidad los cuales, solo con su descripción, darían lugar a un documento más extenso que el presente. En este aspecto existen multitud de modelos matemáticos para cada fenómeno físico de forma que unos responden mejor que otros para determinados problemas (En cuanto a resultados y/o en cuanto a eficiencia computacional) Es responsabilidad del usuario que busca resolver el problema mediante técnicas CFD determinar qué modelos serán los óptimos para que la simulación sea realista y a la vez asumible.



14. Ejemplo de la definición de las fracciones de área y volumen en el método VOF

7 Peligro frente inundaciones urbanas

Existe una amplia literatura sobre la peligrosidad frente a inundaciones lo que implica una diversidad de criterios y límites que, por otro lado, tienden a converger y dar valores similares. La peligrosidad hidráulica está básicamente asociada con el calado y la velocidad aunque también influyen otros valores como la cantidad de sólidos en suspensión o incluso otros factores independientes del flujo como la visibilidad, la temperatura o la superficie de apoyo. En los últimos años se han aportado varias soluciones para determinar la peligrosidad con relaciones dependientes de estas variables (velocidad y calado), ya sea una de ellas o las dos combinadas.

Se suele definir la peligrosidad en función de la condición necesaria para que se produzca un fenómeno de inestabilidad para el peatón. Estos fenómenos pueden ser deslizamientos, vuelcos o incapacidad para moverse con seguridad.

Gran parte de estos modelos suelen estar definidos para llanuras de inundación y comprobados experimentalmente mediante modelos de canales a escala real obteniendo grandes calados de agua pero a su vez bajas velocidades. Esto puede suponer una diferencia con el fenómeno objetivo de este documento ya que la componente vertical de la geometría juega un papel predominante tanto en las características del flujo como en la resistencia del peatón.

Se hace una recopilación de las normativas y estudios más relevantes sobre la peligrosidad a nivel mundial que se utilizarán para el análisis de los resultados. Los estudios que se pueden encontrar en la literatura se pueden clasificar en tres categorías: basados en calados, basados en combinación de calados y velocidades y basados en tiempo de evacuación para zonas subterráneas.

7.1 Criterios para la evaluación de la peligrosidad basados en el calado

Estos criterios se basan en la determinación de un calado máximo que establece la frontera a partir de la cual se determina que un evento es peligroso. Son utilizados para definir la peligrosidad en calles y zonas peatonales. Para determinar este calado se suelen tomar consideraciones referentes a la no entrada de agua a primeras plantas y bajos de edificios residenciales, garajes o comercios. Este tipo de criterio se aleja del objeto de estudio de este documento, no obstante, un criterio de estas características puede ser útil en un posible estudio sobre la entrada o no de agua en la estación de metro y no así en el estudio de la situación de peligrosidad que genera dicha agua en su trayecto por las escaleras.

7.2 Criterios para la evaluación de la peligrosidad basados en combinación de calado y velocidad

Los métodos basados en combinaciones de calado y velocidad que se pueden encontrar en la literatura y normativa se pueden diferenciar en dos grupos, aquellos que están pensados para zonas urbanas y aquellos pensados para zonas rurales. En base a esta distinción y al objetivo de este estudio, solo se tendrán en cuenta los criterios compatibles con el análisis en zonas urbanas.

7.2.1 Criterio de Abt *et al.*

Mediante datos experimentales y un estudio teórico se determinaron las condiciones de calados y velocidad que generan inestabilidades.

Mediante el ensayo de un monolito, que representa una estimación muy conservadora del cuerpo humano, sometido a eventos controlados de inundación se obtuvieron datos de la magnitud de las fuerzas actuantes que son necesarias para generar problemas de inestabilidad.

Por otro lado se ensayaron veinte personas de diversos pesos y alturas contrastando que los sujetos resisten condiciones de flujo más severas que el monolito considerado. Con los datos obtenidos en estos ensayos y una extrapolación de los datos obtenidos con el monolito se llegó a la siguiente ecuación.

$$v \cdot y = [e^{(0.022 \cdot H \cdot P / 1000) + 1.088}]^2$$

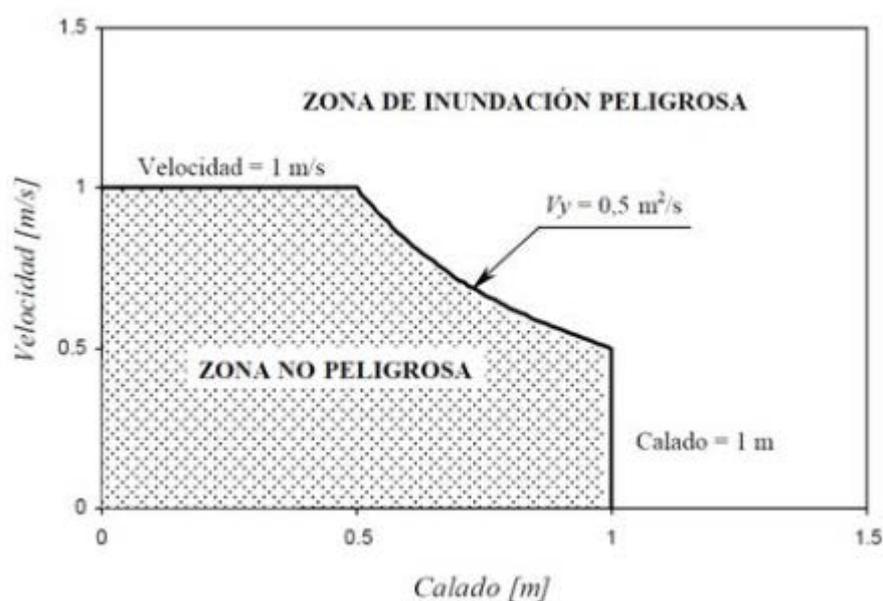
Siendo H la estatura y P el peso del sujeto. Esta relación está hecha en unidades anglosajonas por lo que el peso deberá estar en libras y la estatura en pies, de forma que las unidades del criterio son ft^2/s .

Abt *et al.* remarcan en su estudio que las restricciones en los ensayos hacen que los resultados no reflejen completamente la situación real. Estas restricciones van desde la temperatura del agua pasando por que los sujetos están influenciados por sistemas de seguridad, que fueron ensayados sin acarrear ninguna carga o el hecho de que los sujetos aprenden a maniobrar a medida que se suceden los ensayos. De esta forma se establece un límite superior para el producto de la velocidad y calado para cada combinación de peso y estatura del sujeto. En la bibliografía existe consenso en cuanto a que este criterio es extremadamente optimista y requiere de combinaciones de calado y velocidad muy superiores a otros criterios existentes. Se ha incluido en este documento debido a la importancia que en cuanto a la determinación de pautas de ensayos y análisis de datos que ha tenido en trabajos posteriores. Los datos de los resultados obtenidos en los ensayos de este estudio se han utilizado para la calibración de otros métodos elaborados con posterioridad.

7.2.2 Criterio de Témez V

El criterio de Témez está pensado para la definición de zona de inundación peligrosa, que es la zona donde existe riesgo de pérdidas humanas, concepto ampliamente utilizado y necesario en la planificación urbana. Este criterio usa los resultados de Abt *et al.* en lo que refiere al producto de velocidades por calado aplicando un coeficiente de seguridad variable.

Establece un límite para el calado de 1m, para la velocidad de 1m/s mientras que el límite del producto de ambos es $0.5\text{m}^2/\text{s}$. Si la combinación de velocidad y calado excede alguna de estos límites se considera zona de inundación peligrosa. Este criterio es usado ampliamente en la planificación urbanística en conjunción con eventos elegidos mediante criterios probabilísticos con el fin de evaluar zonas de inundación peligrosa para determinados periodos de retorno.



15. Gráfico del criterio de Témez. Fuente: Témez (1992)

Este criterio es habitual en el análisis de vías de intenso desagüe pero puede presentar limitaciones en zonas urbanas donde un calado de un metro puede ocasionar daños materiales importantes y causar la entrada de agua en las zonas subterráneas.

Pese a que no es un criterio muy apropiado para este caso se incluye en este documento por ser ampliamente usado en estudios de inundaciones en España.

7.2.3 Criterio estabilidad al deslizamiento de Nanía V

Se basa en el estudio de la fuerza que ejerce el agua sobre una persona y la posibilidad de sufrir pérdida de estabilidad por fenómenos relacionados con el deslizamiento o arrastre causado por el flujo. El escenario planteado es que el sujeto se encuentra en una calle que presenta un flujo determinado. La fuerza de arrastre se calcula como:

$$F_D = \frac{1}{2} C_d \rho_w A v^2$$

Siendo:

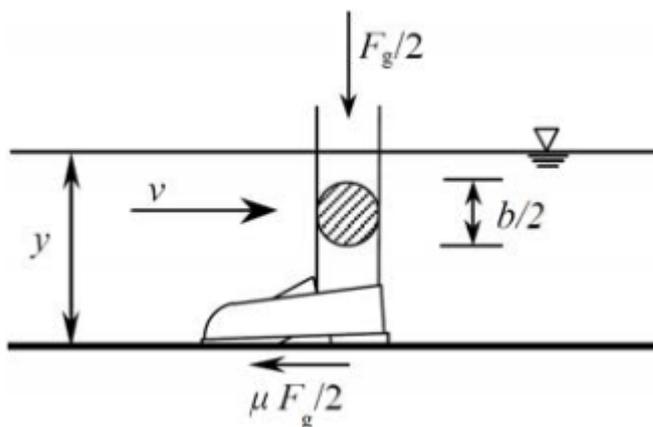
- F_D : La fuerza de arrastre que genera el flujo del agua sobre el sujeto.
- C_d : Coeficiente de arrastre que depende de la forma sobre la que impacta el agua.
- ρ_w : La densidad del agua.
- A : Proyección frontal del área total donde impacta el fluido. Será el calado por el ancho de las piernas.
- v : Velocidad del agua.

Mientras que la fuerza de fricción, que debe contrarrestar el arrastre con el fin de que no se produzca el deslizamiento, es:

$$F_r = \mu F_d = \pi(P \cdot g)$$

Siendo:

- F_r : La fuerza de fricción que genera el calzado.
- μ : Coeficiente de fricción entre el calzado y el suelo.
- P : Peso del sujeto.
- g : Fuerza de la gravedad.

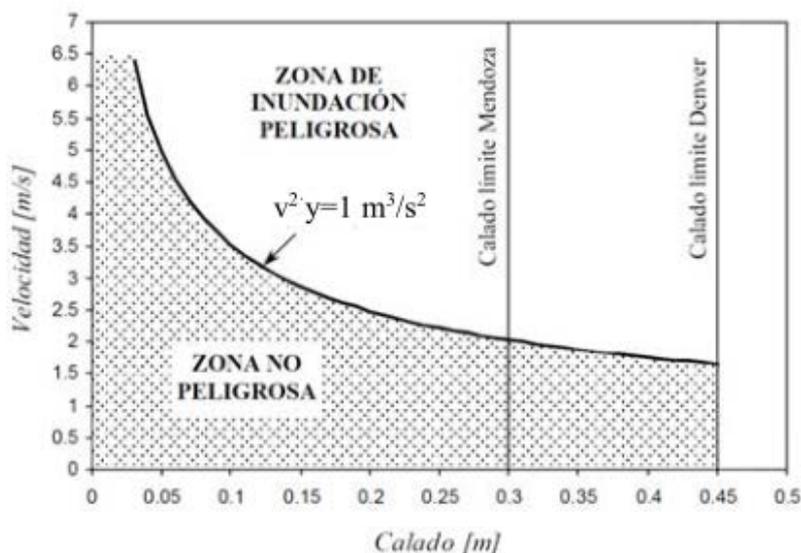


16. Esquema fuerzas actuantes para el deslizamiento. Fuente: Tesis Eduardo Martínez Gomáriz

Suponiendo que una pierna se pueden considerar un cilindro, su coeficiente de arrastre será igual a 1.2 (coeficiente de arrastre para un cilindro infinito). Suponiendo que las piernas son 10 cm de ancho, el peso de la persona es de 50 kg, el coeficiente de rozamiento entre calzado y pavimento es de 0.5, sabiendo que la densidad del agua es 1000kg/m^3 y aplicando un coeficiente de seguridad de 2 la condición para que no se produzca deslizamiento es:

$$v^2 \cdot y \leq \frac{2\mu P g}{C_d \rho_w b^2}$$

De esta forma el valor límite para el criterio de estabilidad de Nanía queda establecido en $1\text{m}^3/\text{s}^2$.



17. Gráfico criterio de Nanía.

7.2.4 Criterio RESCDAM

RESCDAM es un proyecto europeo cuyas siglas significan “Desarrollo de acciones de rescate en base al análisis de inundaciones debidas a rotura de presas”. Sus principales objetivos son estudiar la estabilidad y maniobrabilidad de personas en un flujo de agua, estudiar la resistencia de las viviendas frente a inundaciones y estimar coeficientes de rugosidad de zonas boscosas y urbanizadas.

En este documento se resume la parte que estudia la estabilidad y maniobrabilidad de personas sometidas a la acción de un flujo de agua. En este estudio se ensayó en un canal del laboratorio tecnológico de la universidad de Helsinki, los sujetos deben andar sobre una plataforma construida específicamente que se desplazaba con ellos de forma que se consigue simular el efecto de la velocidad del agua. El individuo tenía que caminar forma perpendicular y hacia aguas abajo mientras se incrementa gradualmente la velocidad de la plataforma hasta que el sujeto presenta o manifiesta síntomas de inestabilidad, momento en el que el ensayo se detiene. Con esta filosofía se ensayan hasta cuatro calados diferentes.

En este estudio las restricciones se basan en las óptimas condiciones de ensayo, esto es, que en un evento real las condiciones serán más severas (escombros flotando, temperatura del agua, habilidad de los sujetos a aprender a maniobrar con el tiempo, seguridad que aportan los sistemas de amarre, etc...) de forma que los resultados obtenidos en el ensayo se consideran un límite superior para la estabilidad. El objetivo de este estudio fue determinar los límites para poder realizar un rescate seguro en una situación de emergencia y no así evaluar la peligrosidad frente a la inundación en la que se pueda ver sorprendido un sujeto.

Igual que para el criterio de Abt *et al.* los resultados obtenidos mediante estos ensayos pueden considerarse un límite superior de la resistencia de las personas frente a las inundaciones.

Se clasifican las condiciones del flujo en tres categorías haciendo referencia a dichas condiciones independientes de la hidráulica del flujo.

En este caso se considera que las condiciones serán buenas pues es una zona que estará iluminada y los escombros que pueda arrastrar el flujo serán reducidos o de poco riesgo para el peatón. De esta forma en el proyecto RESCDAM se define el criterio para que un adulto sea capaz de maniobrar como:

$$v \cdot y < 0.006 \cdot H \cdot P + 0.3$$

Se obtiene un valor diferente del criterio de peligrosidad para cada combinación de peso, P , y estatura H del sujeto, en kilogramos y metros respectivamente.

Este criterio se incluye con el objetivo de tener un criterio para valores altos en el caso de que se den.

7.2.5 Criterio de estabilidad al vuelco de Gómez

En el estudio de 2001 sobre el espaciamiento entre imbornales en la ciudad de Barcelona se ha considerado la peligrosidad frente a vuelco de un peatón para establecer un criterio de seguridad. Analizando el momento volcador provocado por el flujo y el momento estabilizador generado por el peso de la persona junto con un coeficiente de seguridad se consiguió establecer dicho criterio. Siendo F_D la fuerza de empuje que ejerce el agua el momento volcador se define como:

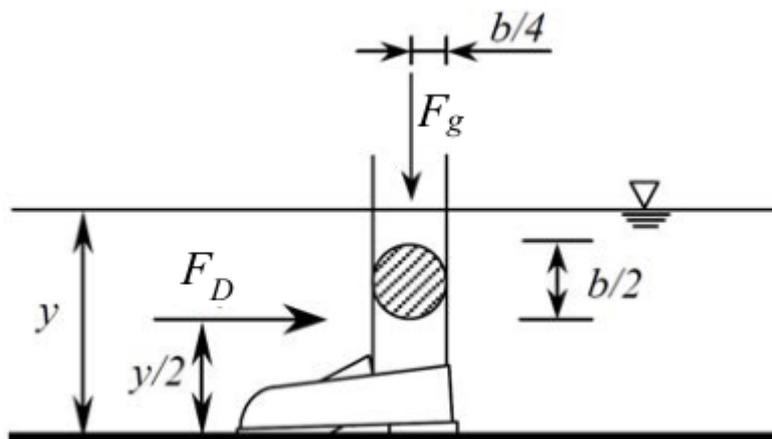
$$M_0 = F_D \cdot \frac{y}{2} = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_w \cdot v^2 \cdot \frac{y}{2}$$

Mientras que el momento estabilizador como

$$M_e = F_g \cdot \frac{b}{4} = P g \frac{b}{4}$$

Se hacen las mismas hipótesis que para el criterio de Nanía. Coeficiente de arrastre igual al de un cilindro infinito y un diámetro de 10cm.

Se considera el peso de la persona aplicado en el centro de gravedad por lo que se considera una excentricidad sobre el eje de rotación de la mitad del diámetro de las piernas.



18. Esquema fuerzas actuantes para el vuelco. Fuente: Tesis Eduardo Martínez Gomáriz

Se considera un coeficiente de seguridad de 2 para tener en cuenta la incertidumbre en los parámetros aplicados así como en el efecto del empuje hidráulico.

$$\frac{1}{2} M_e \geq M_0$$
$$(v^2 y^2) \leq \frac{Pg \cdot b/4}{C_d \rho_w b^2} = 0.204 \frac{m^4}{s^2}$$

Quedando de esta forma un valor límite para el producto de calado por velocidad de 0.45m/s donde se ha considerado un sujeto de 50kg de peso.

7.2.6 Criterio del PICBA06, CLABSA

CLABSA, empresa que gestionó el sistema de alcantarillado de la ciudad de Barcelona desde el año 1992 hasta el fin de su actividad en el año 2013.

Según las recomendaciones de CLABSA se establecen unos valores de calado y velocidad con el fin de asegurar unas condiciones de servicio en vías urbanas.

- Calado máximo 6cm
- Velocidad máxima 1.5m/s

La condición de calado se corresponde con la condición de inundación para los carriles laterales dejando los centrales hábiles para la circulación, esta condición no es aplicable en el estudio de este proyecto. La condición de velocidad se obtiene aplicando los criterios de vuelco de Gómez y de deslizamiento de Nanía para una lluvia de 100 años de periodo de retorno.

Este criterio se ha incluido dada la evidente relación con el problema ya que las escaleras se encuentran en Barcelona, sin embargo, no será usado ya que para su definición se usan dos de los criterios que van a ser usados en el análisis y, además, son valores calculados para el flujo específico en calles.

7.2.7 Criterio propuesto por Russo

En la tesis de Russo se analiza los niveles de peligrosidad que se producen al cruzar una calle durante un episodio de inundación. Mediante un modelo de una calle a gran escala se ensaya con diferentes sujetos, caudales, velocidades, pendientes e incluso condiciones de iluminación y visibilidad.

Se establecen tres niveles de peligrosidad cuyos criterios de distinción se basan en la observación de los sujetos y su comportamiento durante el ensayo.

- Peligrosidad alta: Clara pérdida de estabilidad tanto en movimiento como estáticamente y una pérdida de maniobrabilidad importante.
- Peligrosidad media: Problemas de estabilidad tales como la posición corporal y pequeños desequilibrios. Se muestra una pérdida de maniobrabilidad, tornándose difícil llevar a cabo el protocolo de ensayo.
- Peligrosidad baja: Pocos problemas de inestabilidad.

Una vez analizados los datos se obtuvo una relación lineal entre la raíz del producto de caldos y velocidades y el producto del peso y altura.

$$(v \cdot \gamma)^{\frac{1}{2}} = [0.0063 \cdot (H \cdot P')] - 0.0726$$

Estableciéndose un valor diferente del criterio de peligrosidad para cada combinación de peso y estatura. Siendo H la estatura y P' el peso total del sujeto, esto es, el peso del sujeto más el peso que lleve encima en caso de que lo hiciera.

7.3 Criterios para la evaluación de la peligrosidad basados en el tiempo de evacuación para zonas subterráneas

Los eventos de magnitud importante pueden dar lugar a la entrada de agua en zonas subterráneas, como se expone en este estudio, como estaciones de metro, garajes, viviendas etc. Frente a esta realidad es necesario diseñar planes de evacuación con el fin de establecer cuándo y cómo pueden ser evacuadas las personas que se encuentren en la zona de riesgo. Para establecer dichos planes se debe determinar en primer lugar el criterio de peligrosidad para que se produzca la evacuación de manera segura.

7.3.1 Criterio propuesto por Ishigaki *et al.*

Mediante modelo un a escala real de un pasillo y unas escaleras Ishigaki *et al.* estudiaron dichos criterios de evacuación. En este modelo a escala se ensayan diferentes caudales y un amplio número de sujetos asegurando que la casuística sea variada y representativa usando, en los casos necesarios, pesos en tobillos y muñecas. Al contrario que otros ensayos con modelos de canales o calles donde se ensaya con personas, las mediciones no se centraron en la inestabilidad o la pérdida de maniobrabilidad sino que el parámetro fundamental es el tiempo de evacuación, esto es, el tiempo que tarda el sujeto en recorrer el modelo a escala.

En base a los resultados obtenidos se establecen tres criterios relativos al calado máximo, momento por unidad de ancho y fuerza específica por unidad de ancho.

$$y_{max} = 0.3$$

$$v^2 \cdot y = 1.2$$

$$\frac{v^2 \cdot y}{g} + \frac{y^2}{2} = 0.125$$

Siendo g la fuerza de la gravedad.

7.4 Resumen criterios de peligrosidad utilizados

A modo de resumen se presenta una tabla con los criterios de peligrosidad que se utilizarán en el análisis final, todos los criterios excepto el de Abt *et al* utilizan el sistema internacional con la distancia en metros y la velocidad en metros por segundo.

Criterio	Formulación	Valor límite
Abt et al	$v \cdot y = [e^{(0.022 \cdot H \cdot P / 1000) + 1.088}]^2$	Variable en función del peso P y estatura H en libras y pies
Témez	$v \cdot y$	$y \leq 0.5, v \leq 0.5$ $v \cdot y \leq 0.5$
Nanía	$v^2 \cdot y \leq \frac{2\mu P g}{C_d \rho_w b^2}$	$v^2 \cdot y \leq 1$
RESCDAM	$v \cdot y < 0.006 \cdot H \cdot P + 0.3$	Variable en función del peso P y estatura H
Gómez	$(v^2 y^2) \leq \frac{P g \cdot b / 4}{C_d \rho_w b^2}$	$v \cdot y \leq 0.204$
Russo	$(v \cdot y)^{\frac{1}{2}} = [0.0063 \cdot (H \cdot P')] - 0.0726$	Variable en función del peso total P' y estatura H
Ishigaki	$\frac{v^2 \cdot y}{g} + \frac{y^2}{2}$ $v^2 \cdot y$	$\frac{v^2 \cdot y}{g} + \frac{y^2}{2} = 0.125$ $v^2 \cdot y = 1.2$ $y_{max} = 0.3$

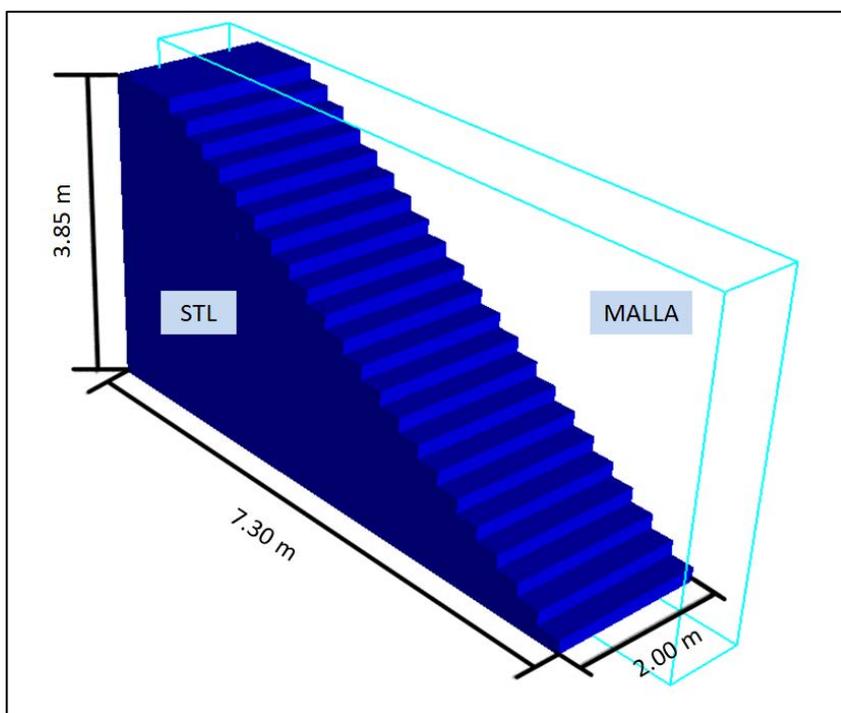
8 Pre-proceso

La preparación del modelo numérico empieza con la recopilación de los datos de geometría medidos tal y como se ha explicado en el Capítulo 1. Una vez recopilados y digitalizados en un fichero CAD se procede a modelar un sólido 3D. Este es exportado a formato STL y, previa comprobación con un software auxiliar de visualización 3D, está preparado para su importación en Flow3D.

Se han considerado diferentes niveles de altura de agua en el inicio de las escaleras de acceso a la estación para observar la variación del flujo con diferentes caudales de entrada. Se considera un calado mínimo a la entrada, la lámina de agua que habrá en la calle, de 5cm y un calado máximo de 30cm estableciendo los casos intermedios con un incremento de 5cm.

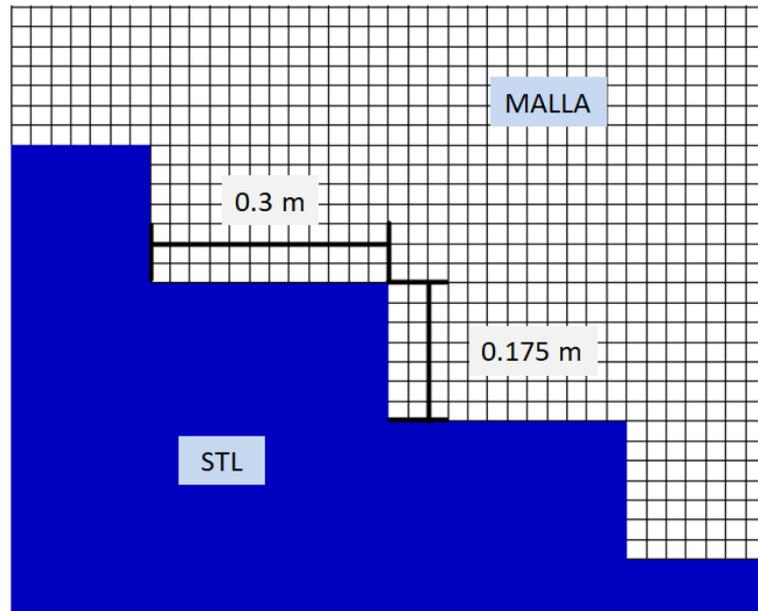
8.1 Geometría, mallado y fluido

Se ha tomado en consideración la totalidad de los escalones para definir el dominio de simulación, y además, se ha considerado 1 metro a ambos extremos, inicio y final, de la escalera en su eje longitudinal con el fin de representar adecuadamente el flujo en estas zonas. De esta forma se minimiza el efecto que puedan causar las condiciones de contorno sobre el flujo en los primeros y últimos escalones.



20. Geometría STL de los escalones y límite de malla. Fuente: Elaboración propia.

El dominio de simulación está formado por un solo bloque de malla de 25mm de lado. De esta forma se obtiene una geometría ajustada y detallada de los escalones que ayuda a mejorar la velocidad de simulación. Resultando un número total de celdas de 1.245.224.

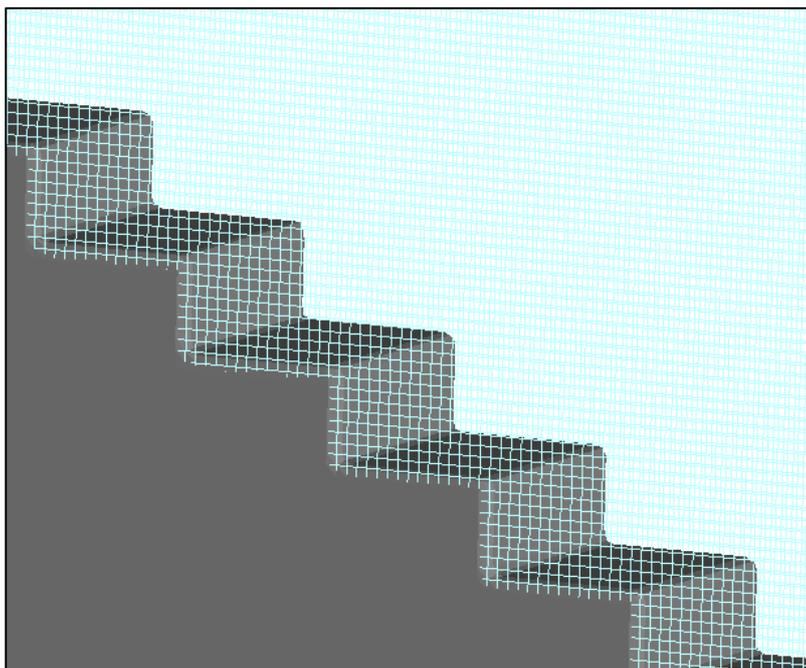


21. Detalle mallado en los escalones. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al sólido definido como STL se ha configurado como tipo sólido de entre las opciones que ofrece Flow3D. Por otro lado como las características del flujo a estudiar serán independientes de la temperatura, la única propiedad del sólido que es necesaria definir es la rugosidad superficial, que en este caso se ha considerado 0.006m correspondiente a un suelo de hormigón liso. Una vez el sólido que la geometría se ha incorporado a la malla el número de celdas que quedan accesibles para el fluido es 683.088.

Se ha definido un punto de la arista inferior del último escalón como origen de coordenadas de forma que el eje longitudinal coincide con el eje "y". De esta manera el agua discurrirá en dirección "y", de coordenadas negativas hacia positivas.

Para determinar la idoneidad del mallado realizado es necesaria la comprobación mediante un renderizado FAVOR™. De esta forma se puede observar el resultado final de la geometría tal y como será interpretada por el algoritmo. Mediante este paso se pueden ver los posibles errores presentes en el archivo STL así como determinar la resolución de las zonas inherentemente difíciles de representar, como son vértices o superficies curvas.



22. Detalle renderizado FAVOR™ de los escalones. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la definición del fluido utilizado se ha utilizado la base de datos de fluidos que viene en el propio software, se ha asignado el valor de agua a 20° C que tiene las siguientes características.

Agua a 20° C		
Parámetro	Valor	Unidad
Densidad	1000	Kg/m ³
Tensión superficial	0.073	Kg/s ²
Viscosidad	1.78E-05	Kg/m/s

Tabla 1. Propiedades del agua en Flow3D

8.2 Condiciones de contorno y estado inicial

Es necesario definir las 6 condiciones de contorno que corresponden con las 6 caras del bloque de malla que forma el dominio de computación.

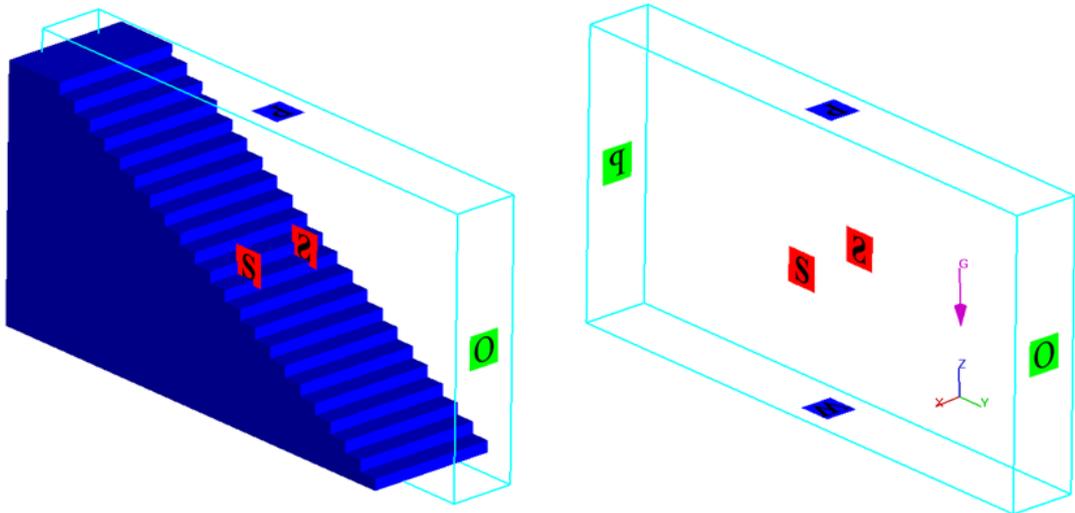
Para los planos verticales en sentido longitudinal, lo que representan las paredes de las escaleras, se ha definido una condición de contorno de simetría. Para el plano horizontal inferior se define una condición de contorno tipo muro ya que el sólido no llega a definir el suelo más allá del último escalón quedando un metro hasta el final del modelo. La condición de contorno de salida está

localizada en el plano vertical transversal al final de la escalera, a un metro de distancia del último escalón. Para estas condiciones de contorno no es necesario definir ningún parámetro adicional.

En cuanto a la condición de contorno del plano horizontal superior se define como una condición de contorno de presión. Esta condición de contorno se hace necesaria para poder simular el flujo de agua bajo las condiciones de presión atmosférica, para esto se establece una fracción de volumen de fluido de 0 con el fin de que el algoritmo interprete que no entrará nada de flujo por ese plano.

En cuanto a la condición de contorno de entrada, en la parte superior de la escalera, se define la entrada del agua mediante una condición de presión y altura de fluido. Se estima la presión atmosférica y una elevación del agua definida desde $z = 0$ o lo que es lo mismo desde el suelo de la parte final de la escalera. El sólido en la parte de la entrada tiene una altura de 3.85m por lo que si se quiere simular una altura de agua de 5cm sobre el nivel de la calle hay que poner un valor de 3.90m en la condición de contorno de tipo presión y altura de fluido.

Mediante esta configuración se han definido 6 simulaciones, con misma geometría pero diferente condición de contorno de entrada. Se consideran incrementos de 5cm en la lámina de agua a fin de conseguir una representación de los diferentes escenarios que se pueden dar en la realidad.

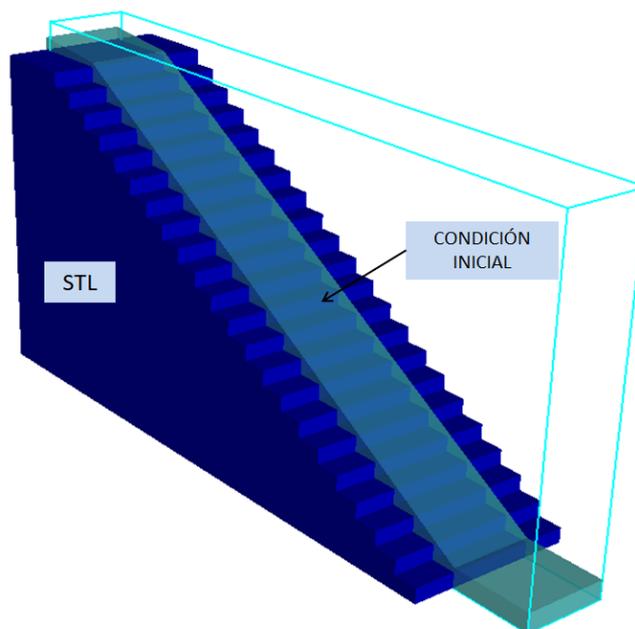


23. Condiciones de contorno consideradas. Fuente. Elaboración propia

Condiciones de Contorno			
Plano	Símbolo	Tipo	Observaciones
Ymin	P	Presión	Entrada de agua
Ymax	O	Salida	Salida del modelo
Xmin	S	Simetría	
Xmax	S	Simetría	
Zmin	W	Muro	
Zmax	P	Presión	Presión atmosférica

Tabla 2. Condiciones de Contorno

En cuanto al estado inicial de las simulaciones, con el fin de agilizar la estabilización del flujo, se ha considerado un cuerpo de agua estático que rellena la totalidad de los escalones. De esta forma el tiempo de computación necesario para que el agua llegue a toda la geometría se reduce considerablemente. La forma de definir este cuerpo de agua es similar a la introducción de la geometría de las escaleras, mediante la importación de un fichero STL, previamente generado en software CAD, y asignándolo como condición inicial de fluido inicializado hidrostáticamente.



24. Condición inicial definida mediante archivo STL. Fuente: Elaboración propia.

8.3 Modelos físicos y parámetros numéricos

Para esta serie de simulaciones se han tenido en cuenta los siguientes modelos:

- Gravedad: se ha configurado un valor de 9.81 m/s^2 en dirección $-z$.
- Tensión superficial
 - Se ha considerado una aproximación numérica implícita y un valor $\text{SIGMA} = 0.073 \text{ kg/s}^2$
- Viscosidad y turbulencia
 - Se ha considerado un flujo viscoso turbulento utilizando el modelo grupo renormalizado (RNG model), que es el más aconsejado en la bibliografía.
 - Método explícito para la resolución del mismo.
- Presión
- Advección
 - Método explícito. Un fluido con lámina libre.
 - Aproximación de primer orden.
- Flujo
 - Resolución de las ecuaciones de cantidad de movimiento y continuidad.

Por otro lado el incremento de tiempo mínimo se ha considerado $1\text{e-}09 \text{ s}$ de manera que la simulación se pare automáticamente en el caso de alcanzarse. Es un valor conservador ya que con incrementos de tiempo del orden de 10^{-7} el tiempo de simulación se vuelve inasumible.

El tiempo total simulado se ha estipulado en 30s, tiempo más que suficiente para que el flujo alcance un estado estacionario.

Flow3D[®] ofrece otra característica para optimizar el tiempo de cálculo total y es la posibilidad de terminar la simulación de manera automática si se alcanzan ciertas condiciones. En este caso se ha marcado la estabilización de la masa total dentro del dominio de computación, la energía cinética, la energía la turbulenta y la disipación turbulenta. En cuanto los valores de estas variables se estabilizan dentro de una tolerancia fijada por el usuario, suele ser en torno al 1%, la simulación se detendrá. El software considera que el resultado será estable en el tiempo siempre y cuando no se programen cambios en las condiciones de contorno.

Por último Flow3D[®] puede utilizar datos de salida de simulaciones ya terminadas como punto de inicio para nuevas simulaciones, este es un factor que puede reducir de manera

considerable el tiempo de simulación total ya que las variables se encuentran ya inicializadas y el flujo se encuentra en un estado más cercano a su condición estable. Se conoce como “restart data” y su guardado se estipula en base a número de ciclos o incremento temporal. Estos datos son a su vez los que se pueden visualizar y analizar en el post-proceso. Para este estudio se ha decidido crear datos de salida (“restart data”) cada 0.1 segundos.

Para información del lector en este estudio se ha utilizado un ordenador con las siguientes características:

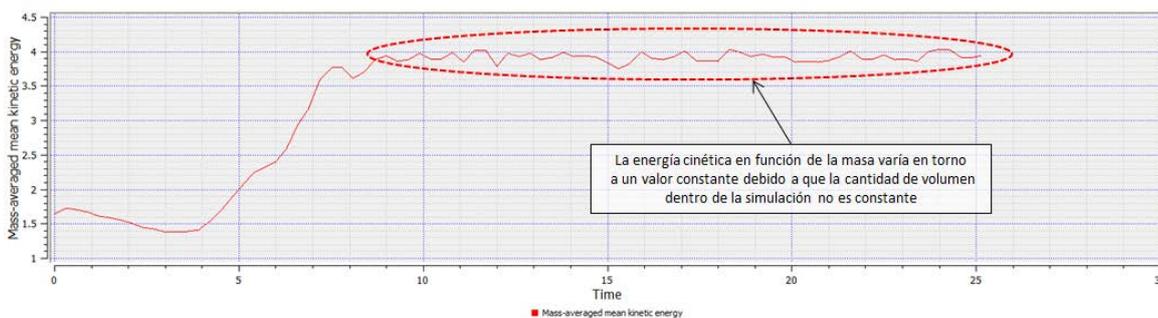
Datos Ordenador	
CPU	8 núcleos 3.60 Ghz
MEMORIA RAM	16Gb
DISCO DURO	SSD. 520MB/s de escritura secuencial
SISTEMA OPERATIVO	Windows 10

Tabla 3. Especificaciones PC

9 Resultados de las simulaciones y post-proceso

9.1 Primeras observaciones

Debido a las diferencias en el nivel de agua para cada caso se producen discrepancias en cuanto al tiempo total de simulación así como su estabilidad y, por otro lado, el potencial de análisis de los resultados. Se observa que para las alturas de agua mayores el modelo es más estable, calcula con incrementos temporales mayores y alcanza un estado estacionario con relativa rapidez. A medida que el caudal de entrada disminuye las simulaciones se vuelven más inestables llegando incluso a no alcanzar el estado estacionario dentro de los 30s que se han establecido como tiempo simulado máximo y posiblemente, debido a las características del flujo, nunca se hubiera llegado a una situación estacionaria en los casos 1, 2 y 3.



25. Imagen ejemplo del solver de Flow3D[®] de simulación con poco caudal. Fuente: Elaboración propia.

Otra de las observaciones que se pueden hacer comprobando los resultados es la dificultad de analizar los datos para las simulaciones de caudales bajos, estos resultados presentan un flujo de agua discontinuo ya que el fluido no es capaz de formar una lámina que ocupe todo el ancho de simulación. Este es un fenómeno que se puede observar en la realidad y es que el agua no discurre formando un continuo sino que forma cúmulos de agua que se unen y separan a lo largo de su descenso. El hecho de que existan zonas del dominio de computación que no tengan agua para un instante determinado y si para el siguiente hace difícil la medición de la velocidad y el calado a tener en cuenta en el análisis de la peligrosidad.

9.2 Características del flujo

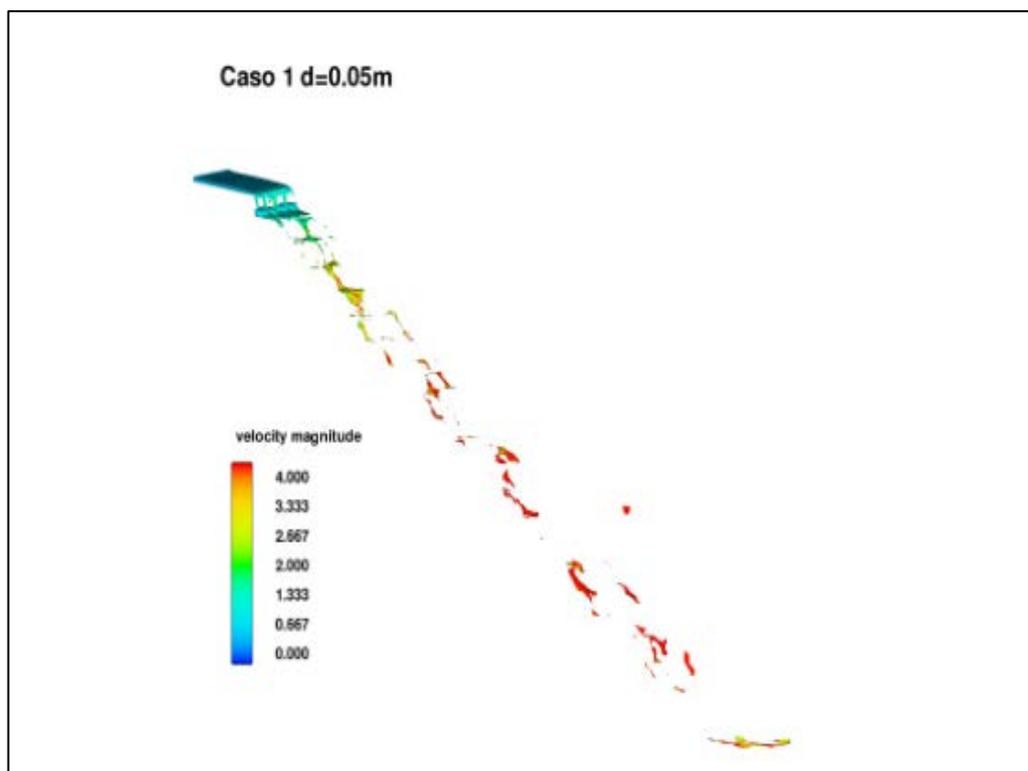
Los resultados de las simulaciones en el último incremento de tiempo de sus respectivas simulaciones se muestran en las siguientes imágenes. Son imágenes renderizadas en función de la fracción de fluido de cada celda (una isosuperficie de factor de llenado de valor 0.5 según calcula el

algoritmo VOF, es decir, que solo se muestran las celdas llenas más de la mitad de su volumen) y coloreadas en función de la magnitud velocidad, sin tener en cuenta el sentido ni dirección. Se puede apreciar cómo hasta la simulación del caso 4 el flujo presenta severas discontinuidades incrementando de manera notable la velocidad del fluido.

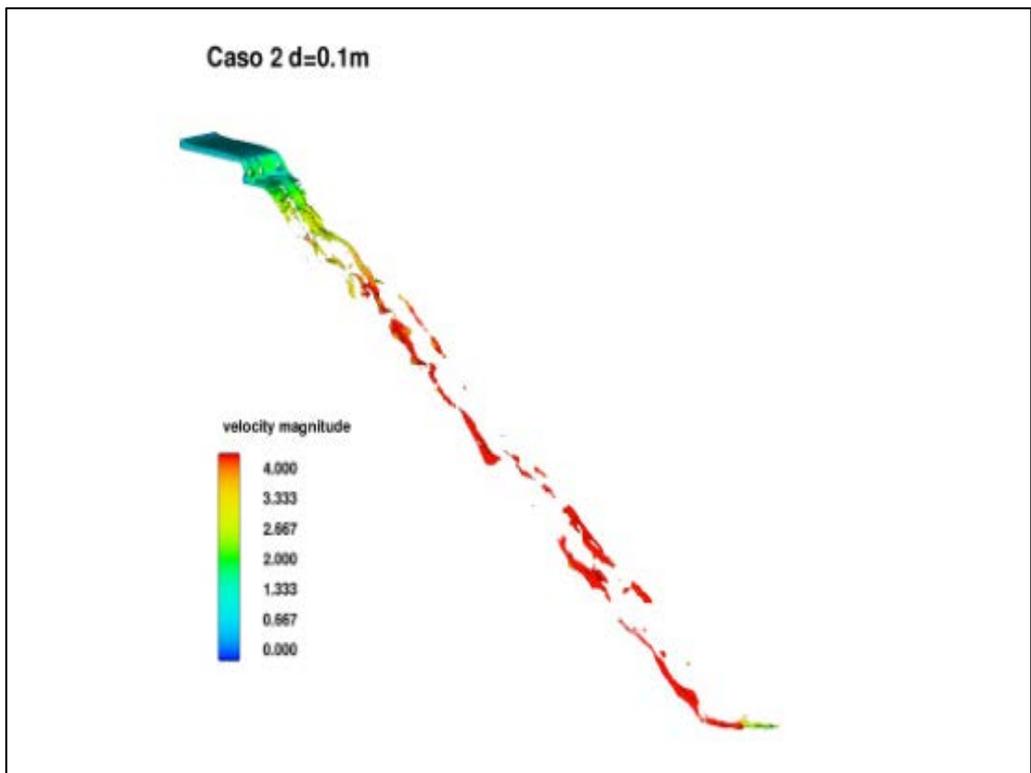
Esto ocurre en gran medida porque el caudal descargado para los casos de poca altura de agua es muy pequeño y debido a la condición turbulenta del flujo el agua se distribuye de manera no homogénea.

Caso	Altura de agua (m)	Caudal (l/s)
1	5	12
2	10	25
3	15	45
4	20	82
5	25	103
6	30	140

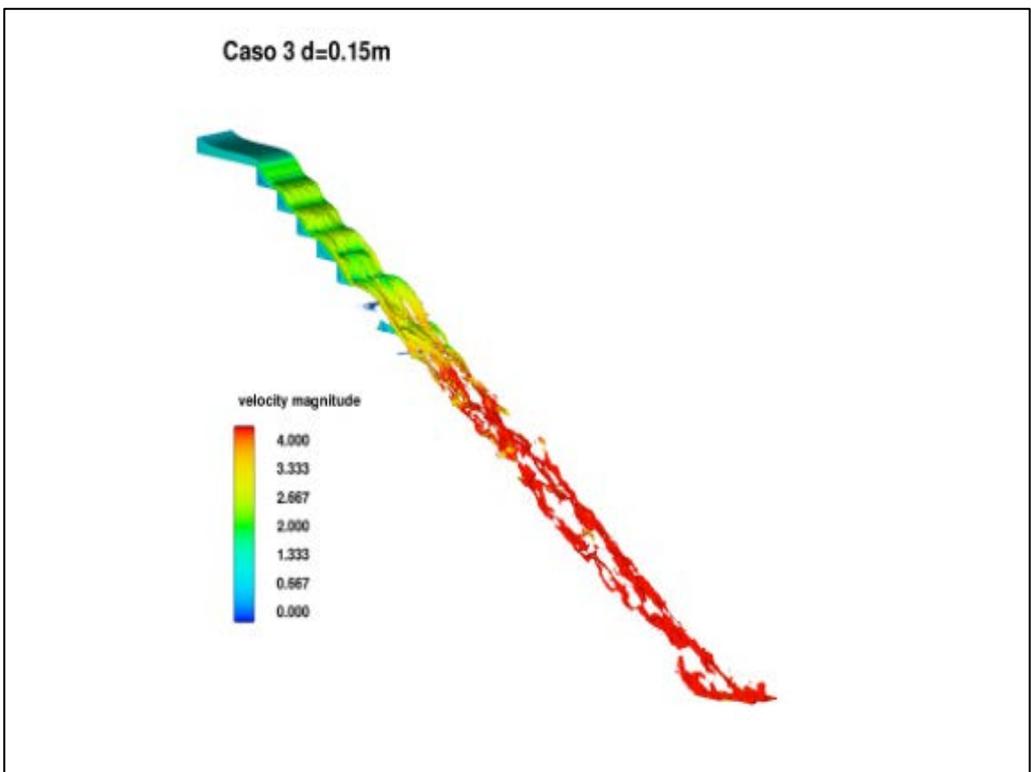
Tabla 4. Altura y caudal de entrada



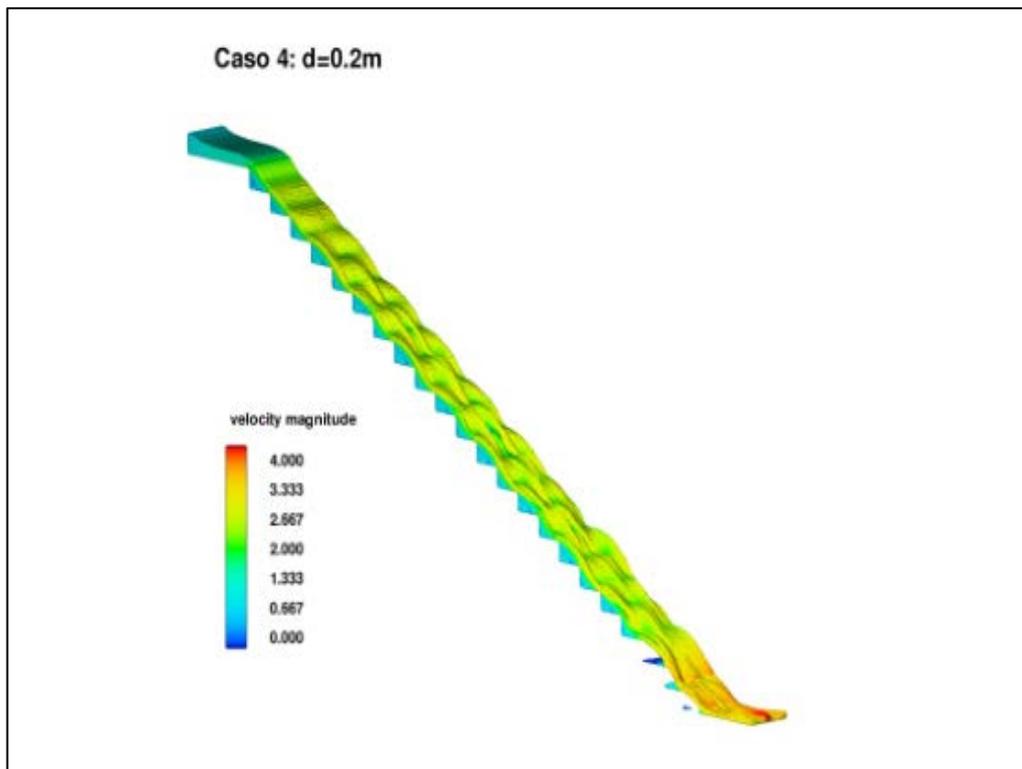
26. Resultados: Isosuperficie Caso1 (12 l/s)



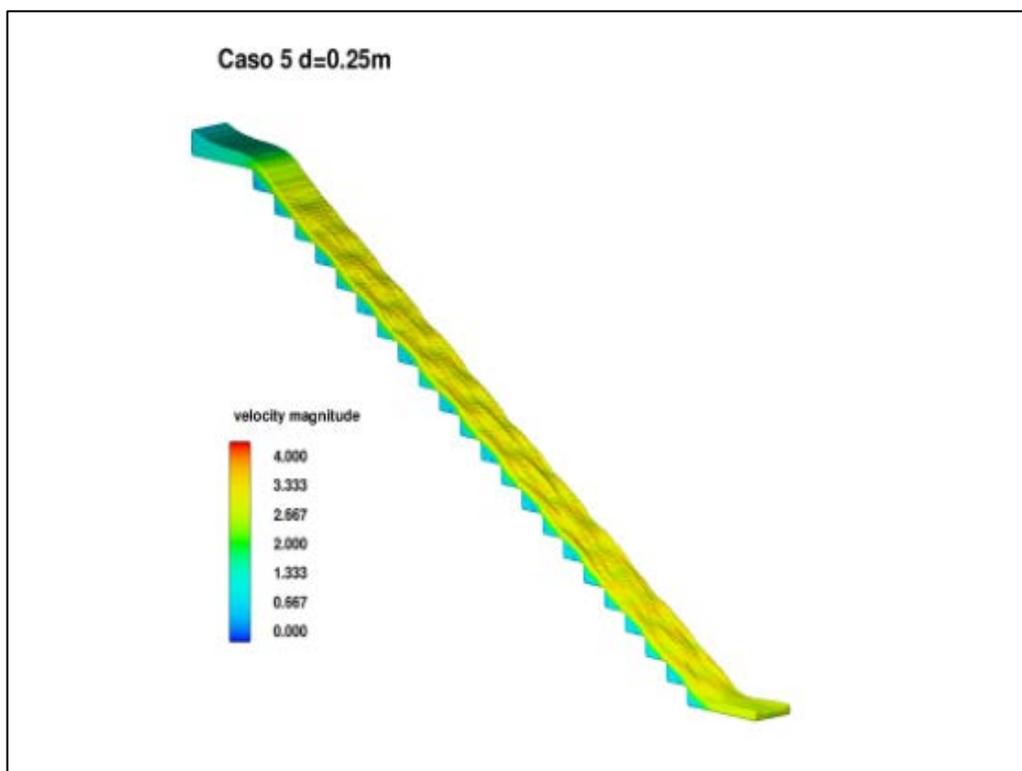
27. Resultados: Isosuperficie Caso2 (25 l/s)



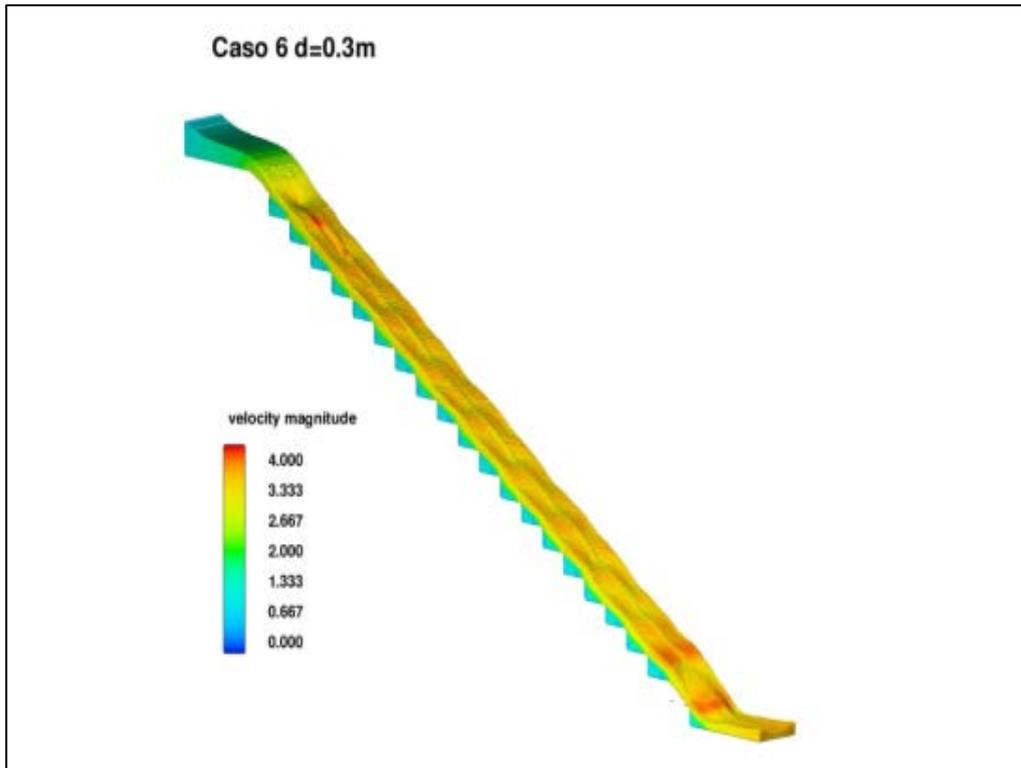
28. Resultados: Isosuperficie Caso 3 (45 l/s).



29. Resultados: Isosuperficie Caso 4 (82 l/s)



30. Resultados: Isosuperficie Caso 5 (103 l/s)



A partir de una lámina de agua de 0.2 (Caso 4) se aprecia una continuidad en el flujo y una diferencia notable de la velocidad del agua que ocupa el ángulo interno de los escalones y el agua que circula entre el plano formado por los vértices de los escalones y la superficie libre.

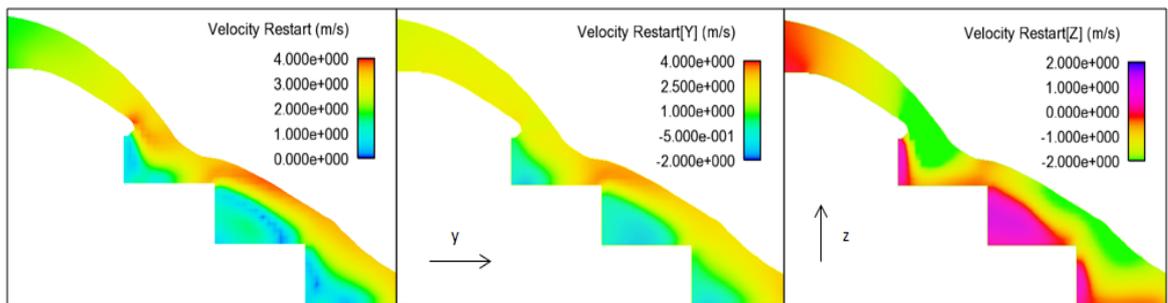
La lámina libre de la simulación correspondiente al Caso 4 presenta más irregularidades que las de los dos casos con más caudal, esto se debe al hecho de que hay menos distancia entre la superficie del fluido y los escalones, el efecto que provocan sobre el agua es más perceptible. Obviando la parte del flujo disgregada de las tres simulaciones de menos caudal, se aprecia que a medida que se incrementa la lámina de agua aumentan las velocidades de la lámina libre.

En los resultados del Caso 6 se ve cómo la velocidad es suficiente como para que el flujo salte por encima del primer y último escalón.

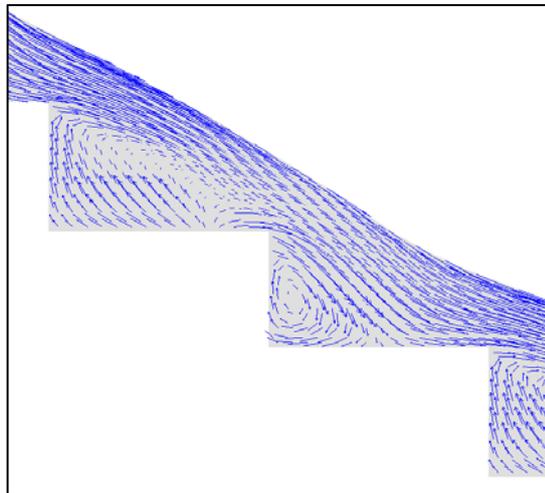
En cuanto al Caso 4 se puede ver que los últimos escalones son sobrepasados, esto se debe a otra casusa y es el caudal. La superficie de la lámina en estos escalones del caso 4 se asemeja a la de los escalones 7 y 6 del caso 3. Esta zona del caso 3 es donde se encuentra el cambio entre el flujo continuo y el disgregado. En base a esto se puede suponer que un caudal cercano a 82 (l/s) es el mínimo que consigue un flujo continuo en la sección a lo largo de toda la escalera.

En el análisis de la distribución de velocidades en los escalones se puede apreciar, como era de esperar, que las magnitudes predominantes son en dirección "y" y "en sentido positivo y dirección "z"

en sentido negativo. Las componentes de la velocidad en dirección “x” son menores que las otras dos debido a la simetría del problema y son debidas al régimen turbulento y la presencia de vórtices en el flujo. Como se ha hecho notar existe una gran diferencia entre las velocidades en el ángulo de los escalones y en la zona superior del fluido. Mediante un corte longitudinal de la escalera se aprecia que existen velocidades “y” negativas, y velocidades “z” positivas formando una trayectoria cerrada como se aprecia en el dibujo de los vectores velocidad en una sección longitudinal.



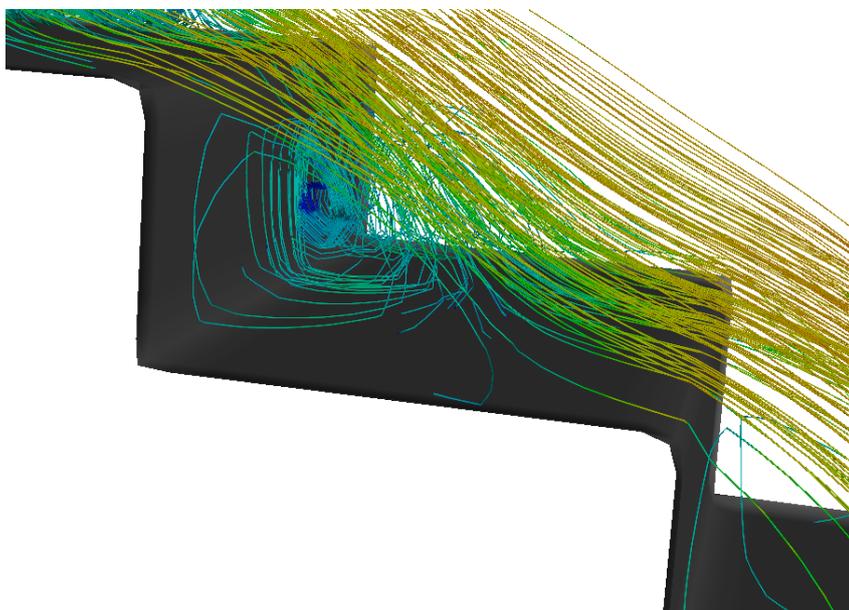
31. Detalle distribución de velocidades en los escalones. Distribución de velocidades absolutas (izq.), velocidad en el eje “y” (centro) y velocidad en el eje “z” (der). Fuente: Elaboración propia



32. Detalle vectores de velocidad en una sección longitudinal. Fuente: Elaboración propia.

Este fenómeno es fácilmente visualizado mediante el cálculo de las líneas de corriente en el ámbito del escalón en tres dimensiones. En estas imágenes se ve como gran parte de las líneas de flujo que discurren por el ámbito superior al plano formado por los vértices exteriores de los escalones continúan la tendencia, sin embargo hay líneas que se adentran en el espacio del ángulo interno del escalón y se ven inmersas en un vórtice con eje horizontal. Las partículas que siguen estas

trayectorias presentan una velocidad sensiblemente menor y se desplazan hacia atrás y hacia arriba hasta que eventualmente terminan por salir del vórtice retomando su descenso.



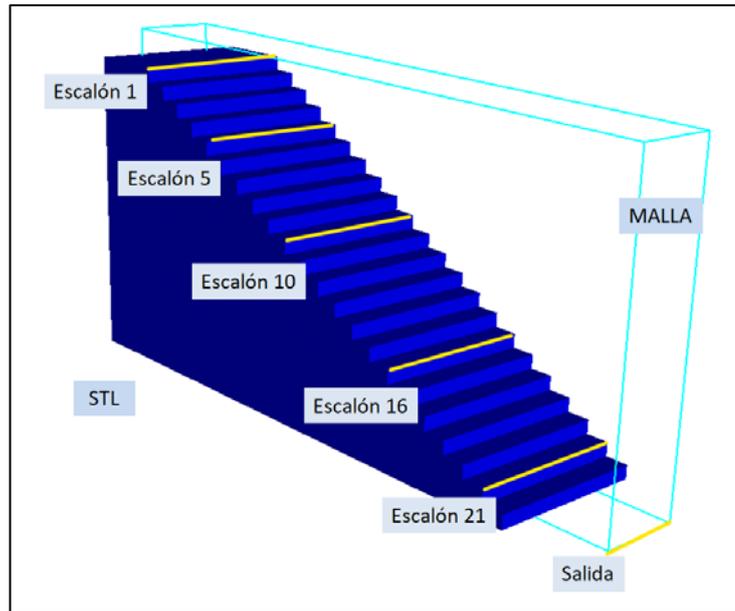
33. Líneas de corriente en un vórtice turbulento en un escalón. Fuente: Elaboración propia.

9.3 Velocidades y calados

Para el análisis se han considerado una serie de puntos distribuidos a lo largo de las escaleras donde se evaluará el calado y la velocidad. Una vez recopilados estos datos se procede a calcular con los criterios descritos anteriormente cual es el grado de peligrosidad para cada caso y escalón seleccionado. Los escalones que van a ser estudiados son:

Escalón	Diferencia de cota desde el escalón a la cota de entrada del modelo (m)	Distancia horizontal desde el vértice del escalón a la entrada (m)
1	0	1
5	-0.7	2.2
10	-1.575	3.7
16	-2.625	5.5
22	-3.675	7.3
Salida	-3.85	8.3

Tabla 5. Distancia entre escalones y entrada



34. Escalones seleccionados para su análisis. Fuente: Elaboración propia.

Mediante el software FlowSighth se han evaluado los resultados en el punto medio de la arista de los escalones seleccionados, el instante de tiempo de las mediciones presentadas es aquel en el que las simulaciones presentan un estado estacionario.

Para este proceso es necesaria una lámina de agua continua ya que las fuerzas dinámicas usadas en el establecimiento de los criterios suponen un flujo continuo. Bajo esta condición, los casos 1, 2 y 3 no pueden ser evaluables en toda la longitud de la escalera. Sin embargo se considerará un análisis de las zonas que si presenten condiciones aptas. Para los casos 1 y 2 sólo analizará el primer escalón mientras que para el caso 3 se analizarán los escalones 1 y 5.

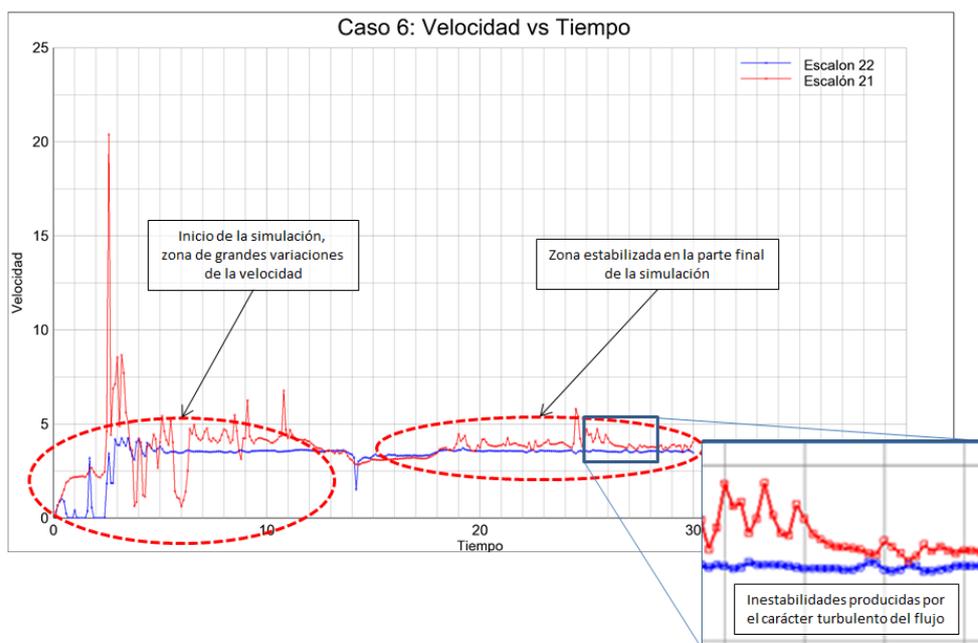
En el proceso de extracción de datos hay que tener en cuenta varias consideraciones. El software CFD genera una ingente cantidad de datos que hay que tratar con cautela. Para el caso específico de la velocidad y el calado existen varias formas de obtener valores. En este estudio se han obtenido los valores mediante el uso de lo que en FlowSighth se denominan probetas. Hay de varios tipos pero se van a usar dos. Las probetas tipo punto y las probetas tipo línea.

Las probetas tipo punto extraen datos de la celda que contiene el punto en cuestión. Las variables se extraen en relación al tiempo de forma que se puede evaluar los valores para cada instante de tiempo con una resolución igual a la determinada en los parámetros numéricos con el valor "restart data interval". Esto es, si el valor de "restart data interval" es 0.1 Flow3D® grabará los datos en el disco duro cada incremento simulado de 0.1 segundos. Se define un punto dentro del dominio de simulación y el software devuelve un gráfico de la evolución del valor escogido a lo largo del tiempo simulado.

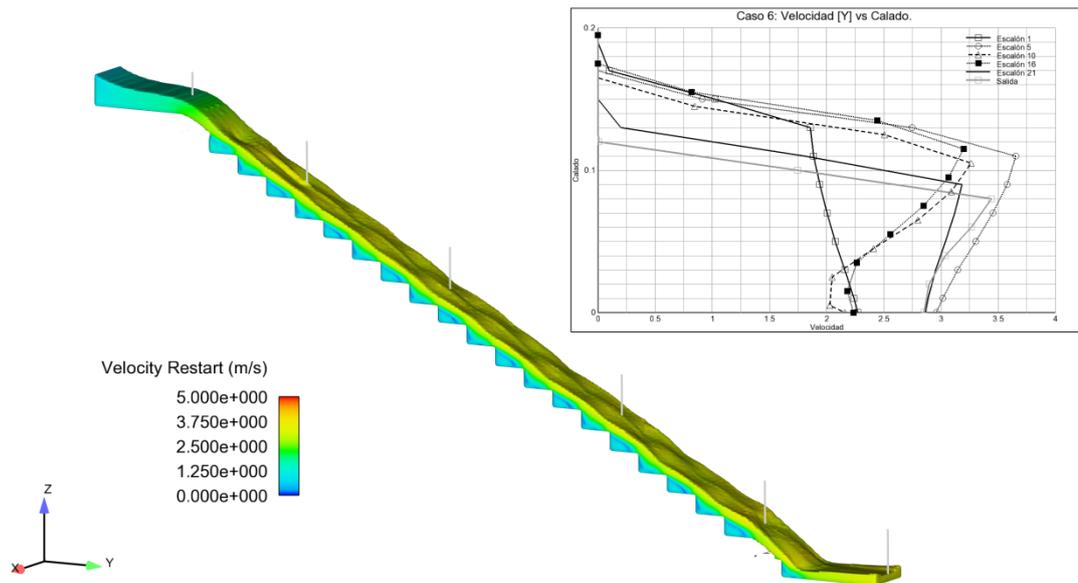
Las probetas tipo línea se utilizan para determinar valores a lo largo de la línea definida por el usuario de la magnitud seleccionada y un instante de tiempo determinado.

Mediante estas herramientas se puede conseguir una descripción ajustada de las velocidades y calados para cada escalón. Mientras que con las probetas tipo punto se puede observar cuando se estabilizan las velocidades en el escalón deseado, con las probetas tipo línea se consiguen unos gráficos que se pueden interpretar como perfiles de velocidad de una sección transversal para un instante fijo. Para obtener dichos gráficos las probetas tipo línea deben ser verticales con un extremo apoyado en el escalón. Estos instantes, escogidos para la representación de perfiles de velocidad, se determinan en función de los gráficos obtenidos mediante las probetas tipo punto.

Hay que tener en cuenta que el volumen de agua es pequeño. Debido a esto los valores del calado y la velocidad presentan variaciones temporales pese a que la simulación se encuentre en un estado estacionario. Esto se debe al carácter turbulento del flujo. Por esto es difícil considerar un valor fijo durante el tiempo para la velocidad en un punto determinado para el análisis de peligrosidad



35 Detalle variación de la velocidad en el tiempo. Fuente: Elaboración propia.



36. Distribución de las probetas sobre la escalera y gráfico de perfiles de velocidades. Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de la peligrosidad se ha planteado cuatro combinaciones de calado y velocidad.

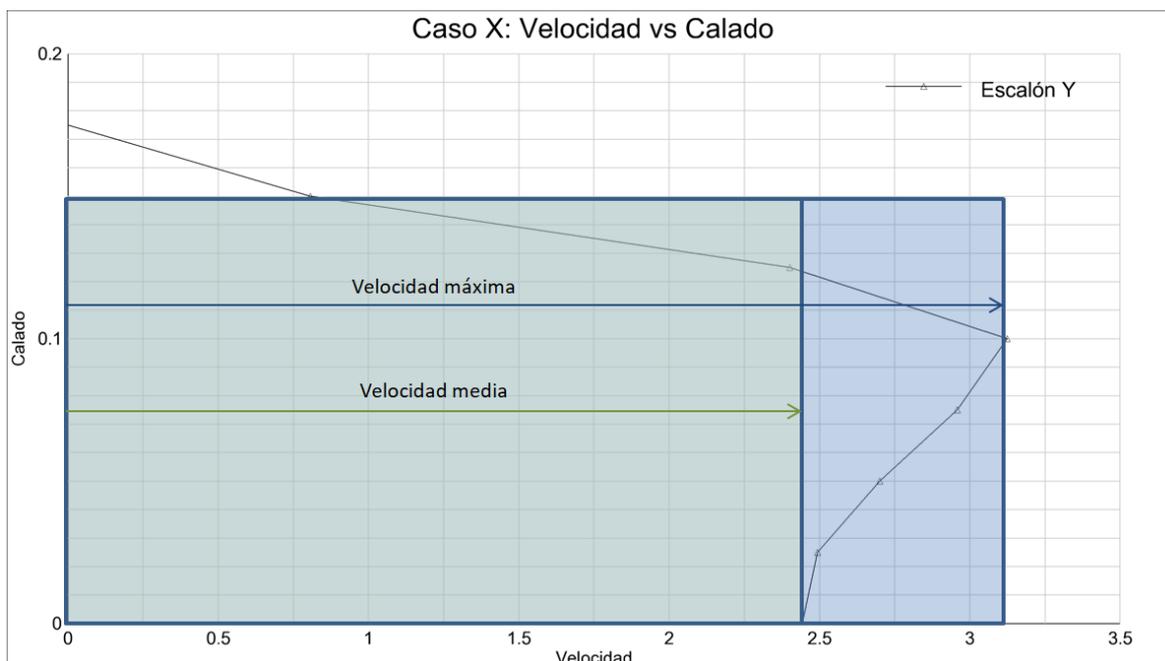
- Velocidad Absoluta media
- Velocidad Absoluta máxima
- Velocidad media sobre el eje “y”
- Velocidad máxima sobre el eje “y”

El hecho de diferenciar entre velocidad absoluta y velocidad en el eje “y” se debe a que los criterios usados están basados en la actuación de un flujo horizontal. Dado que las escaleras condicionan un componente vertical tanto en la dirección del flujo como en el movimiento del sujeto se ha considerado introducir en el análisis las velocidades absolutas. Sin embargo dado que las velocidades se han obtenido de puntos sobre la arista de los escalones la componente vertical de los vectores velocidad será considerablemente menor que la componente sobre el eje “y”.

La diferenciación entre valores máximos y medios debe a la incertidumbre que presentan los datos recopilados. De esta forma los valores máximos caen del lado de la seguridad mientras que los valores medios se considerarán el límite inferior de las variables velocidad y calado. Por otro lado esta duplicidad de resultados resulta útil para estimar la sensibilidad de los criterios y si los casos analizados se encuentran cerca del valor crítico.

Para obtener estos valores, a través de los datos proporcionados por las probetas tipo línea, se ha seguido los siguientes criterios.

- Para el cálculo de la velocidad media se consideran todos los puntos del perfil de velocidades que presentan velocidad no nula, o cercana a 0 en comparación con los demás puntos.
- El calado máximo viene definido por la altura de celda mayor que presenta velocidad no nula que se ha incluido en el cálculo de la velocidad media.



37. Criterio de obtención de las velocidades. Fuente: Elaboración propia.

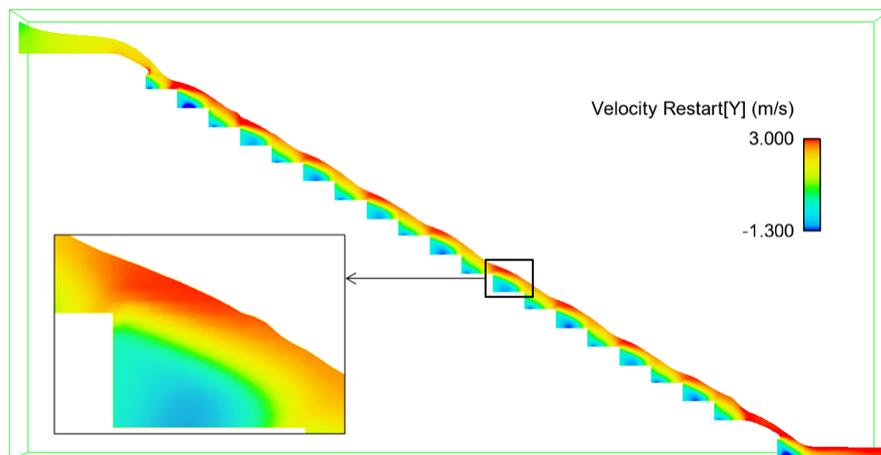
Con esta filosofía de tratamiento de datos se generan cuatro velocidades a analizar manteniendo constante el calado que se utilizará para calcular la peligrosidad. De esta forma se obtiene un límite inferior con las velocidades medias sobre el eje “y” y un límite superior con las velocidades absolutas máximas.

CASO 5			
	Escalón	v (m/s)	y(m)
Velocidad media absoluta	10	2.37	0.18
Velocidad [y] media	10	2.08	0.18
Velocidad absoluta máxima	10	2.98	0.18
Velocidad máxima absoluta	10	2.48	0.18

Tabla 6. Ejemplo de resultados después del post-proceso

Los datos de todas las velocidades y calados para cada escalón y caso se encuentran en el anejo B

Si se observan con detenimiento los datos de la velocidad en el eje "y" en una sección longitudinal se aprecia que son los puntos sobre las aristas de los escalones son los que presentan una velocidad horizontal mayor. Estos puntos de máxima velocidad también resultan ser los de menor calado, factor que resulta fundamental en el análisis de la peligrosidad. Se observa como a partir de los vértices de los escalones hay un tramo que continúa con gran velocidad horizontal hasta aproximadamente la mitad del escalón mientras que el agua de la parte interior del escalón presenta velocidades cercanas a cero. Analizar estas zonas es complejo desde el punto de vista de los criterios de peligrosidad existentes pues están basados en la hipótesis de una lámina de agua con una distribución de velocidad homogénea desde el fondo hasta la superficie libre.



38. Distribución de velocidades con dirección "y" en una sección longitudinal. Fuente: Elaboración propia.

Se utilizarán los métodos conocidos para analizar en primer lugar las velocidades sobre los vértices de las escaleras, que es en donde el flujo presenta las características que más se asemejan a las condiciones para las que fueron pensados. Posteriormente se propone un criterio basado en el de Gómez en el que se considere el empuje que ejerce la fracción de agua que impacta sobre el sujeto ignorando la acción del flujo con velocidad negativa del fondo del escalón. De esta forma se podrá analizar la peligrosidad en la huella del escalón. Cabe resaltar que esta propuesta es meramente una herramienta *ad hoc* para analizar el empuje que genera el agua en el punto medio de la huella y no debe ser equiparada a los criterios expuestos que son resultado de estudios exhaustivos de la cuestión.

10 Análisis de peligrosidad

10.1 Consideraciones previas

Los criterios de peligrosidad recopilados en el capítulo 6 se pueden diferenciar en dos tipos, aquellos que tienen en cuenta el peso y altura de la persona en su formulación y aquellos que no.

Los métodos de Abt *et al.*, RESCDAM y de Russo tienen en cuenta el peso y la altura del sujeto. Para esto es necesario establecer qué sujeto se va a analizar. Atendiendo a que es un estudio sobre peligrosidad se deben tomar unas características físicas del sujeto que sean representativas de gran parte de la población y a su vez no establezcan una elevada resistencia frente al vuelco y deslizamiento, pues es necesario evaluar la peligrosidad para las personas más vulnerables sin perder en el proceso una cierta representatividad del conjunto de la población. Teniendo esto en cuenta en este estudio se ha evaluado un sujeto de peso 50kg y 165cm de estatura. El criterio de Gómez supone el mismo valor para el peso del sujeto.

De esta forma se presentan las hipótesis necesarias que se han tomado a la hora de evaluar la peligrosidad para estos criterios que son:

- Peso: 50kg
- Estatura: 165 cm

De esta forma los criterios quedan definidos en las siguientes tablas:

Criterio Persona		Límite Abt et al
Peso (Lb)	Altura (ft)	V·y max (ft ² /s)
110.23	5.41	9.05
Peso (Kg)	Altura (m)	V·y max (m ² /s)
50.00	1.65	1.10

Tabla 7. Límite del criterio de Abt *et al.* para el sujeto escogido

Criterio Persona		Límite REDSCAM
Peso (kg)	Altura (m)	V·y max (m ² /s)
50.00	1.65	0.80

Tabla 8. Límite del criterio REDSCAM para el sujeto escogido

Criterio Persona		Límite RUSSO
Peso (kg)	Altura (m)	V·y _{max} (m ² /s)
50.00	1.65	0.20

Tabla 9. Límite del criterio de Russo para el sujeto escogido

10.2 Calculo de la peligrosidad

10.2.1 Cálculo con los criterios existentes

Una vez conocidos los datos para cada escalón y ciertas consideraciones adicionales para algunos criterios se puede calcular el nivel de peligrosidad para cada caso y escalón en función de los criterios escogidos.

	Caso	Q (l/s)	Escalón	Abt et al	Témez	RESCDAM	Nanía	Gómez	Russo	Ishigaki	
Absoluta Media	1	12	1	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
	2	25	1	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
	3	45	1	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	
			5	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	
	4	82	1	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
			5	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
			10	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO
			16	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO
			21	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO
			Salida	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	
	5	103	1	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			5	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			10	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			16	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI
			21	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO
			Salida	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	
	6	140	1	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			5	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI
			10	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			16	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO
21			NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	
		Salida	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO		

Tabla 10. Evaluación de la peligrosidad para la velocidad media absoluta

	Caso	Q (l/s)	Escalón	Abt et al	Témez	RESCDAM	Nanía	Gómez	Russo	Ishigaki
[Y] media	1	12	1	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	2	25	1	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	3	45	1	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
			5	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	4	82	1	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
			5	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
			10	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			16	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			21	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
			Salida	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
	5	103	1	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			5	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			10	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			16	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			21	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			Salida	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
	6	140	1	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			5	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI
			10	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			16	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			21	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI
			Salida	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO

Tabla 11. Evaluación de la peligrosidad para la velocidad en el eje "y" media

	Caso	Q (l/s)	Escalón	Abt et al	Témez	RESCDAM	Nanía	Gómez	Russo	Ishigaki
Absoluta maximizada	1	12	1	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	2	25	1	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	3	45	1	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
			5	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	4	82	1	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			5	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
			10	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI
			16	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			22	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			Salida	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
	5	103	1	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			5	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			10	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI
			16	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI
			22	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI
			Salida	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
	6	140	1	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			5	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI
			10	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI
			16	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI
			22	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI
			Salida	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI

Tabla 12. Evaluación de la peligrosidad para la velocidad absoluta máxima

	Caso	Q (l/s)	Escalón	Abt et al	Témez	RESCDAM	Nanía	Gómez	Russo	Ishigaki
[Y] maximizada	1	12	1	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	2	25	1	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	3	45	1	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
			5	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	4	82	1	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			5	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
			10	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			16	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			22	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
	Salida	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO		
	5	103	1	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			5	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			10	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI
			16	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI
			22	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI
	Salida	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO		
	6	140	1	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			5	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI
			10	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI
			16	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI
21			NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	
Salida	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO			

Tabla 13. Evaluación de la velocidad para la velocidad máxima en el eje "y"

En base a estas tablas se pueden obtener unas conclusiones preliminares. El criterio de Témez es el más pesimista de todos. Esto se debe, como se explicará en las conclusiones, porque el flujo sobre una escalera no se asemeja al escenario para el que ha sido diseñado. El criterio de Abt et al. es el más optimista junto con el RESCDAM. Son los resultados esperados para estos criterios, como se ha explicado en el capítulo X estos criterios se suponen como un límite superior para la evaluación de la peligrosidad de inundación.

Los criterios de Nanía e Ishigaki presentan clasificaciones casi idénticas. Esto es algo a remarcar pues estos criterios se han definido en base a fundamentos diferenciados, uno el de estabilidad y el otro el de tiempo de evacuación. El criterio de Gómez es, de aquellos criterios que tienen una aplicación más directa en este caso, el más optimista. Por último del criterio de Russo, basado en la inestabilidad por pérdida de maniobrabilidad es el más pesimista.

10.2.2 Propuesta de un método para el análisis de la peligrosidad en la huella del escalón

Con el objetivo de poder establecer la peligrosidad que genera el flujo en la huella del escalón se propone un método basado en el criterio de Gómez. El flujo al superar el escalón continúa su trayectoria con una velocidad en el eje "y" importante. Sin embargo el flujo no es uniforme a lo largo de una sección transversal al mismo, y en este criterio método se propone diferenciarlo en dos zonas. La zona superior, donde el agua continua con velocidad predominante en el eje "y" y la zona inferior, donde el flujo presenta pequeñas velocidades por el efecto del vórtice generado en el escalón.

De esta forma se supone que en el sujeto impacta una sección de flujo comprendida entre la lámina libre y una frontera ficticia en el flujo definida por la componente “y” de la velocidad. Así, las ecuaciones de Gómez quedan de la forma siguiente:

El momento desestabilizador es:

$$M_0 = \frac{1}{2} C_d \rho_w \frac{b}{2} y v^2 \left(\frac{y}{2} + d \right)$$

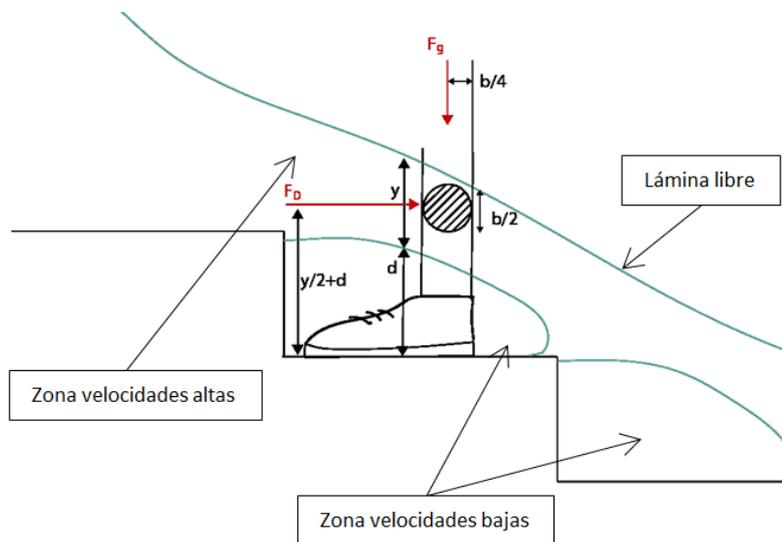
Mientras que el momento estabilizador se mantiene igual:

$$M_e = F_g \cdot \frac{b}{4} = P g \frac{b}{4}$$

Aplicando el mismo coeficiente de seguridad se llega a la expresión

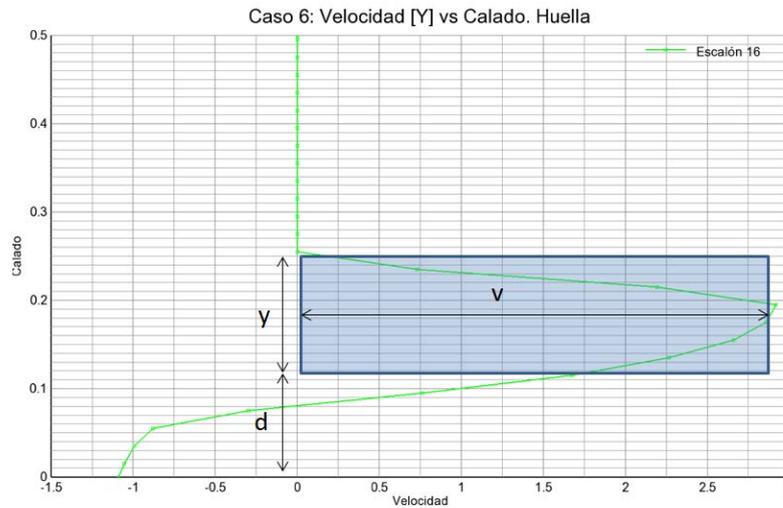
$$y v^2 \left(\frac{y}{2} + d \right) \leq \frac{P g}{2 C_d \rho_w} = 0.204 \text{ m}^4/\text{s}^2$$

Siendo “y” la altura del volumen de fluido que se considera en la zona superior y “d” la distancia entre el límite inferior de este volumen y el escalón donde se apoya el sujeto.



39. Esquema método propuesto para el análisis de la peligrosidad en el escalón. Fuente: Elaboración propia

Para estimar el volumen del fluido que se considera que forma parte del flujo que impacta con el sujeto se utilizan perfiles de velocidades. Como se aprecia en la imagen, se considera la velocidad máxima a fin de estar del lado de la seguridad.



40. Ejemplo obtención de velocidades para el método propuesto. Fuente: Elaboración propia.

Se presenta el análisis del Caso 6, el de mayor caudal y el que presenta magnitudes superiores en cuanto a velocidad. Se puede concluir que el criterio de Gómez aplicado al vértice del escalón es más sensible y otorga la categoría de peligroso a escalones que este método no. Esto puede ser debido a que el flujo a la altura de la mitad de la huella ha perdido la suficiente velocidad horizontal como para que no se produzca inestabilidades en el sujeto. Se concluye que el lugar crítico para evaluar la peligrosidad es el vértice de los escalones.

Caso	Q	Escalón	v (m/s)	y (m)	d (m)	$v \cdot y^2 \cdot (y/2+d)$	Valor comparación	Peligrosidad	Peligrosidad Gómez
6	140	5	2.81	0.10	0.11	0.127	0.204	NO	SI
		10	2.97	0.08	0.13	0.114	0.204	NO	SI
		16	2.92	0.08	0.14	0.119	0.204	NO	SI
		21	2.76	0.14	0.09	0.171	0.204	NO	SI

Tabla 14. Ejemplo de la evaluación de peligrosidad con el método propuesto

En el anejo E se muestran los gráficos de velocidad y calado así como una tabla con los resultados obtenidos. Para todos los eventos este criterio considera que no hay peligrosidad.

10.3 Comentarios al análisis de la peligrosidad

Los calados en los puntos seleccionados son pequeños, menores de 20cm para todos los casos y escalones. Por otro lado las velocidades que se encuentran son elevadas. Estas son unas condiciones de flujo no muy habituales en zonas urbanas donde se estudian los criterios de peligrosidad. Esto hace que criterios como el de Témez dé resultados no muy aclaratorios pues la velocidad excede en casi todos los casos de 1m/s. Pese a que los calados pueden ser muy pequeños el criterio de Témez limita la velocidad a 1m/s y clasifica como situación peligrosa a todos los escalones excepto los casos de menor caudal de entrada (12 y 25 l/s). El campo de aplicación del criterio de Témez es el de las llanuras de inundación. Pese a esto se ha incluido en este estudio, de manera prácticamente testimonial, para resaltar la necesidad de usar otros criterios para zonas urbanas con características singulares como pueden ser unas escaleras.

Por otro lado el criterio de Abt *et al.* no considera peligrosa ninguna situación. Esto se debe a que, como se ha explicado anteriormente, es un criterio que requiere de valores altos para clasificar una situación como peligrosa. Su límite es $1.1m^2/s$ para la combinación de calado y velocidad lo que es más del doble que para el criterio de Gómez y más de 5 veces el criterio de Russo. Esto hace que el criterio de Abt *et al.* tenga un límite extremadamente alto dejando situaciones eminentemente peligrosas fuera de su rango. De la misma manera que con el criterio de Témez, el criterio de Abt *et al.* se ha incluido en este análisis por su valor histórico y la influencia que ha tenido en investigaciones posteriores.

El criterio del proyecto RESCDAM supone un valor del producto calado por velocidad de 0.8. Es un valor elevado ya que pese a que en el proyecto RESCDAM se analizó la peligrosidad frente a la estabilidad su objetivo principal es la definición de la peligrosidad para llanuras de inundación y seguridad de equipos de rescate. Requiere de valores más altos que criterios que se definen en base a la misma relación como pueden ser el de Gómez y el de Russo.

El criterio de Nanía hace referencia a la inestabilidad frente al deslizamiento. En su fundamentación se le otorga importancia a la velocidad y así se explicita en la relación velocidad-calado en donde esta está presente de manera cuadrática. Con esto se aprecia que el criterio de Nanía es adecuado para los datos en las aristas de los escalones empezando a marcar peligrosidad desde el escalón 16 para una descarga de 103 l/s (Caso 5).

El criterio de Gómez frente al vuelco da más peso al valor del calado, ya que se fundamenta en un desequilibrio de momentos y el calado se relaciona directamente con la distancia en el punto ficticio de aplicación del momento y por tanto su magnitud influye de dos formas, a mayor calado más empuje y a su vez mas brazo de palanca para generar momento. El flujo presente tiene poco calado

haciendo que sólo marque peligrosidad para algún escalón del caso con mayor caudal para velocidades medias pero prácticamente clasifica de la misma forma que el de Nanía para velocidades máximas. Esto se debe a que los resultados están cerca del límite de peligrosidad de Gómez ya que una pequeña variación en la velocidad hace cambiar la clasificación de peligrosidad.

El criterio de Russo hace referencia a la maniobrabilidad. De los criterios con carácter hidráulico en su definición es el que más situaciones clasifica como peligrosas. Establece que desde el caso de 82 l/s (Caso 4) la situación es peligrosa incluso para velocidades medias. Para los casos de 103 l/s y 140 l/s (Casos 5 y 6) clasifica como peligrosa la totalidad de la escalera.

El criterio de Ishigaki es el único que en sus consideraciones se encuentran escenarios como el estudiado. Su clasificación es similar a la de Nanía diferenciándose únicamente en la clasificación de los puntos de salida del modelo. Dos de las relaciones del criterio de Ishigaki dependen cuadráticamente de la velocidad. Esto explica los resultados similares a los de Nanía. De estos resultados se puede suponer que uno de los factores que más dificultan la evacuación de zonas subterráneas es el peligro de deslizamiento.

Finalmente mediante el análisis con el método basado en el criterio de Gómez propuesto se puede confirmar que la zona del vértice del escalón es la crítica en cuanto a peligrosidad frente al vuelco. Pese a tener más calado la pérdida de velocidad que sufre el fluido entre el vértice y el punto medio es suficiente para que la peligrosidad disminuya a valores no críticos. En esta zona el calado real es suficiente para que la peligrosidad sea elevada, sin embargo, gran parte del fluido se encuentra con velocidades muy pequeñas haciendo que el momento volcador no sea lo suficientemente grande para producir inestabilidades según el criterio de Gómez.

En base a esto se puede asegurar que para alturas de agua de más de 20cm al inicio de las escaleras estudiadas de la estación de Paral·lel se producen situaciones de peligrosidad que pondrán en riesgo la integridad de las personas usuarias del metro.

11 Conclusiones

El software de tipo CFD es una herramienta potente para el análisis hidráulico de problemas con geometrías complicadas. Para que su uso sea eficiente se requiere actualmente de una gran capacidad de computación que puede resolverse haciendo uso de servidores en la nube con el inconveniente económico que esto supone, al que hay que añadir el coste de licencias que no son baratas. El código de libre puede ser una opción pero hay que tener en cuenta el tiempo necesario para alcanzar el nivel de conocimientos y habilidades para usarlo de manera satisfactoria, es aquí donde el CFD comercial lo supera.

El volumen de datos y tiempo de computación es un gran problema en muchos casos, para este proyecto se han generado más de 300Gb de información la cual ha tenido que ser sobrescrita para poder proseguir con las simulaciones.

Pese a esto es una herramienta sumamente potente que puede dar solución a multitud de problemas en el ámbito de la hidráulica.

Los criterios de peligrosidad están pensados para ser aplicados en gran escala, esto es, para crear mapas de peligrosidad, de forma que no configuran unas herramientas específicas para el análisis del problema estudiado. A este tipo de criterios pertenece el de Témez que como se ha comprobado ha resultado ser poco útil. Los resultados más interesantes proceden de la comparación de los criterios definidos para ámbitos urbanos. Es destacable que los criterios de Nanía e Ishigaki den la misma clasificación apuntando al riesgo de deslizamiento como principal agente responsable del tiempo de evacuación. En cuanto al criterio de Russo se puede decir que es fiel a la realidad, se basa en la peligrosidad debida a la pérdida de maniobrabilidad y es esperable una pérdida de maniobrabilidad cuando se transita por una escalera por la que cae agua. El criterio de Gómez encuentra su mayor problema, en este caso, en el poco calado que se observa en las aristas de los escalones. Sin embargo es capaz de dar una clasificación similar a la de Nanía e Ishigaki para las velocidades máximas. Esto quiere decir que estos tres criterios no distan mucho entre sí en cuanto a sus predicciones para este problema específico.

En cuanto al análisis de la escalera se hace necesaria una investigación más en profundidad de este tipo de problemas. Como se ha comprobado estos últimos años el riesgo de inundaciones en zonas subterráneas es frecuente y debido al cambio climático es probable que se vuelva un problema cada vez más importante a medida que se extremen los episodios de lluvias. No es raro que se alcancen niveles de 30 cm de agua en zonas deprimidas del terreno, como es la zona de la entrada a la estación de Paral·lel, durante eventos de precipitación intensa.

12 Propuestas de mejora y futuros trabajos

Se pueden señalar mejoras en el modelo hidráulico generado. Un componente importante en este tipo de flujo es la inclusión de aire. Este parámetro requiere de modelos de resolución específicos que requieren un estudio pormenorizado y cuidadoso. El modelo resultante es más inestable y requiere de un tamaño de malla menor. En este proyecto se ha considerado no incluir este fenómeno por la limitación que supone el tiempo de cálculo necesario para llevar a cabo estas simulaciones, además para obtener unos resultados sólidos considerando la inclusión de aire hay que realizar un estudio de convergencia de la malla ya que este parámetro es muy dependiente del tamaño de celda. Esto implica el ir aumentando el número de las simulaciones necesarias y por ende el tiempo dedicado. El hecho de que en este estudio no se haya tomado en cuenta la inclusión de aire hace que los resultados queden del lado de la seguridad pues un efecto del aire mezclado en el flujo es hacer que la velocidad se reduzca.

En cuanto al análisis de datos se hace notar la cantidad de información que genera el software CDF. Mediante un conocimiento más profundo del programa de análisis de datos se podrán crear métodos para extraer secciones longitudinales donde se aprecie la peligrosidad para cada tramo de la escalera de manera continua. Para esto será necesario el estudio pormenorizado del flujo en el escalón con el fin de evaluar qué criterio se usará para establecer la peligrosidad.

En cuanto al análisis específico de la peligrosidad en la estación de Paral·lel es interesante la posibilidad de realizar un modelo 2D de la zona del vestíbulo mediante el software IBER o similar. Definiremos el caudal de salida de las simulaciones 3D realizadas como entrada de la simulación 2D. De esta forma se consigue un análisis integral de las escaleras de entrada y del vestíbulo para alturas de agua conocidas en la calle. Para el análisis de peligrosidad dentro de la estación no se encontrarán las limitaciones que se encuentran en las escaleras en cuanto a criterios de peligrosidad, pues los descritos anteriormente están definidos para este tipo de situaciones. Con este estudio se podrán definir protocolos de evacuación y zonas seguras dentro de la estación.

Bibliografía

- Aoki Y, Yoshizawa A & Taminato T. Anti-inundation Measures for Underground Stations of Tokyo Metro. *Procedia Eng.* (2016) **165**: 2–10 Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.730>
- Gómez M, Recasens J, Russo B & Martínez-Gomariz E Assessment of inlet efficiency through a 3D simulation: Numerical and experimental comparison. *Water Sci. Technol.* (2016) **74**: 1926–1935
- Herath S & DUTTA D (2004) MODELING OF URBAN FLOODING INCLUDING UNDERGROUND SPACE.
- Ishigaki T, Kawanaka R, Ozaki T & Toda K Vulnerability to underground inundation and evacuation in densely urbanized area. *J. Disaster Res.* (2016) **11**: 298–305
- LIU Y, OKADA N, SHEN D & LI S Agent-based Flood Evacuation Simulation of Life-threatening Conditions Using Vitae System Model. *J. Nat. Disaster Sci.* (2009) **31**: 69–77
- Maijala T (2001) Development of Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis
- Martínez-Gomariz E Inundaciones Urbanas: Criterios de Peligrosidad y Evaluación del Riesgo para Peatones y Vehículos (Urban floods: Hazard Criteria and Risk assessment for pedestrians and vehicles). Tesis doctoral, UPC, Escola Tècnica Superior d'Enyingers de Camins Canals i Ports de Barcelona. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. (2016) 568
- Oliver X & Agelet De Saracibar C Mecánica de medios continuos para ingenieros. Segunda Edición. Barcelona: Edicions UPC 2000. ISBN 978-84-9880-217-7
- Russo B, Gómez M & Macchione F (2010) Criterios de peligrosidad en medio urbano. Estudio comparativo entre referencias nacionales e internacionales Disponible en: <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2011/pdf/p630.pdf>
- Zhou J (2017) Physics of Environmental Flows Interacting with Obstacles. Tesis Doctoral Colorado State University, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.(2017).
- FLOW-3D*® Version 12.0 Users Manual. *FLOW-3D* [Computer software]. Santa Fe, NM: Flow Science, Inc. (2018) <https://www.flow3d.com>

Anexo A: Resultados velocidad y calado

Velocidad Absoluta Media									
Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)	Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)
1	12	1	0.90	0.05	2	25	1	0.92	0.08
		5	NA	NA			5	NA	NA
		10	NA	NA			10	NA	NA
		16	NA	NA			16	NA	NA
		21	NA	NA			21	NA	NA
		Salida	NA	NA			Salida	NA	NA

Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)	Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)
3	45	1	1.39	0.08	4	82	1	1.67	0.11
		5	2.00	0.06			5	2.18	0.07
		10	NA	NA			10	2.02	0.17
		16	NA	NA			16	2.03	0.12
		21	NA	NA			21	2.27	0.09
		Salida	NA	NA			Salida	2.86	0.10

Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)	Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)
5	103	1	1.85	0.15	6	140	1	1.84	0.17
		5	2.43	0.13			5	3.20	0.15
		10	2.37	0.18			10	2.46	0.15
		16	2.49	0.18			16	2.55	0.16
		21	2.42	0.18			21	3.00	0.15
		Salida	2.30	0.13			Salida	3.04	0.12

Velocidad [Y] Media									
Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)	Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)
1	12	1	0.82	0.05	2	25	1	0.90	0.08
		5	NA	NA			5	NA	NA
		10	NA	NA			10	NA	NA
		16	NA	NA			16	NA	NA
		21	NA	NA			21	NA	NA
		Salida	NA	NA			Salida	NA	NA

Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)	Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)
3	45	1	1.31	0.08	4	82	1	1.61	0.11
		5	1.97	0.06			5	2.16	0.07
		10	NA	NA			10	1.80	0.17
		16	NA	NA			16	1.83	0.12
		21	NA	NA			21	2.04	0.09
		Salida	NA	NA			Salida	2.86	0.10

Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)	Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)
5	103	1	1.79	0.15	6	140	1	1.77	0.17
		5	2.34	0.13			5	2.84	0.15
		10	2.08	0.18			10	2.26	0.15
		16	2.15	0.18			16	2.28	0.16
		21	2.15	0.18			21	2.93	0.15
		Salida	1.80	0.13			Salida	2.96	0.12

Velocidad Absoluta Máxima									
Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)	Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)
1	12	1	1.07	0.05	2	25	1	1.35	0.08
		5	NA	NA			5	NA	NA
		10	NA	NA			10	NA	NA
		16	NA	NA			16	NA	NA
		21	NA	NA			21	NA	NA
		Salida	NA	NA			Salida	NA	NA

Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)	Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)
3	45	1	1.90	0.08	4	82	1	2.01	0.11
		5	2.43	0.06			5	2.58	0.07
		10	NA	NA			10	2.60	0.17
		16	NA	NA			16	2.25	0.12
		21	NA	NA			21	2.82	0.09
		Salida	NA	NA			Salida	3.14	0.10

Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)	Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)
5	103	1	2.23	0.15	6	140	1	2.27	0.17
		5	2.69	0.13			5	3.65	0.15
		10	2.98	0.18			10	3.26	0.15
		16	3.10	0.18			16	3.20	0.16
		21	3.12	0.18			21	3.18	0.15
		Salida	2.52	0.13			Salida	3.26	0.12

Velocidad [Y] Máxima									
Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)	Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)
1	12	1	1.06	0.05	2	25	1	1.34	0.08
		5	NA	NA			5	NA	NA
		10	NA	NA			10	NA	NA
		16	NA	NA			16	NA	NA
		21	NA	NA			21	NA	NA
		Salida	NA	NA			Salida	NA	NA

Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)	Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)
3	45	1	1.78	0.08	4	82	1	2.01	0.11
		5	2.40	0.06			5	2.58	0.07
		10	NA	NA			10	2.22	0.17
		16	NA	NA			16	2.15	0.12
		21	NA	NA			21	2.56	0.09
		Salida	NA	NA			Salida	3.13	0.10

Caso	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)	Caudal (l/s)	Caudal (l/s)	Escalón	v (m/s)	y(m)
5	103	1	2.22	0.15	6	140	1	2.27	0.17
		5	2.68	0.13			5	3.05	0.15
		10	2.48	0.18			10	2.79	0.15
		16	2.52	0.18			16	2.68	0.16
		21	2.63	0.18			21	3.07	0.15
		Salida	2.52	0.13			Salida	3.07	0.12

Anexo B: Cálculo de la Peligrosidad

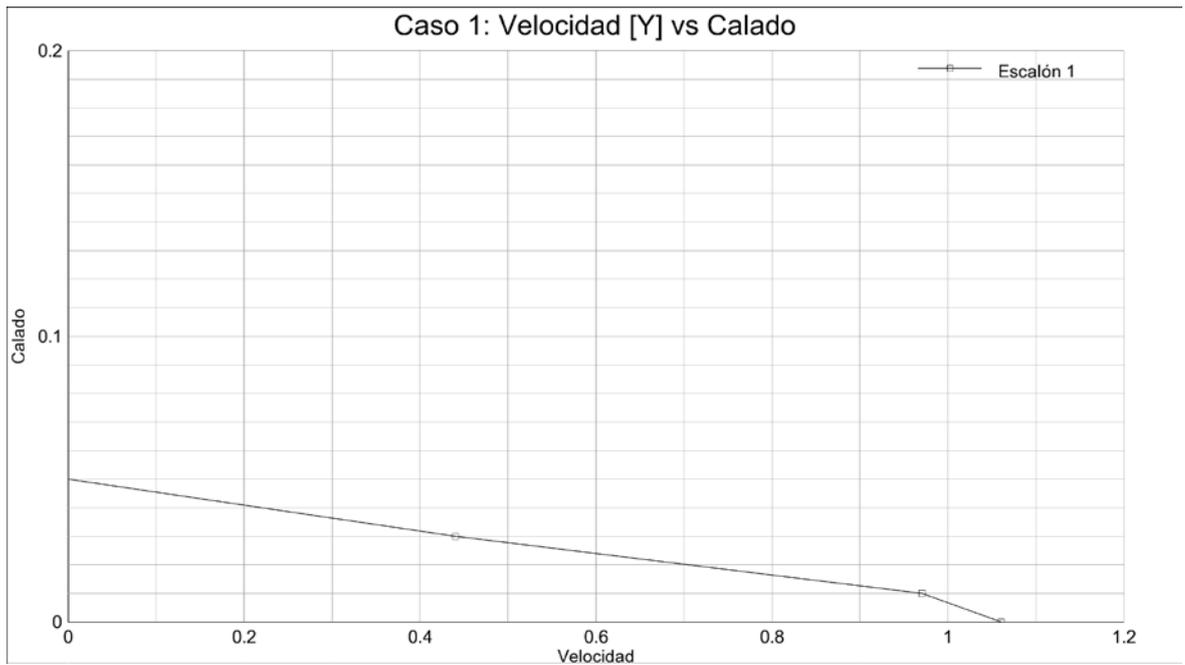
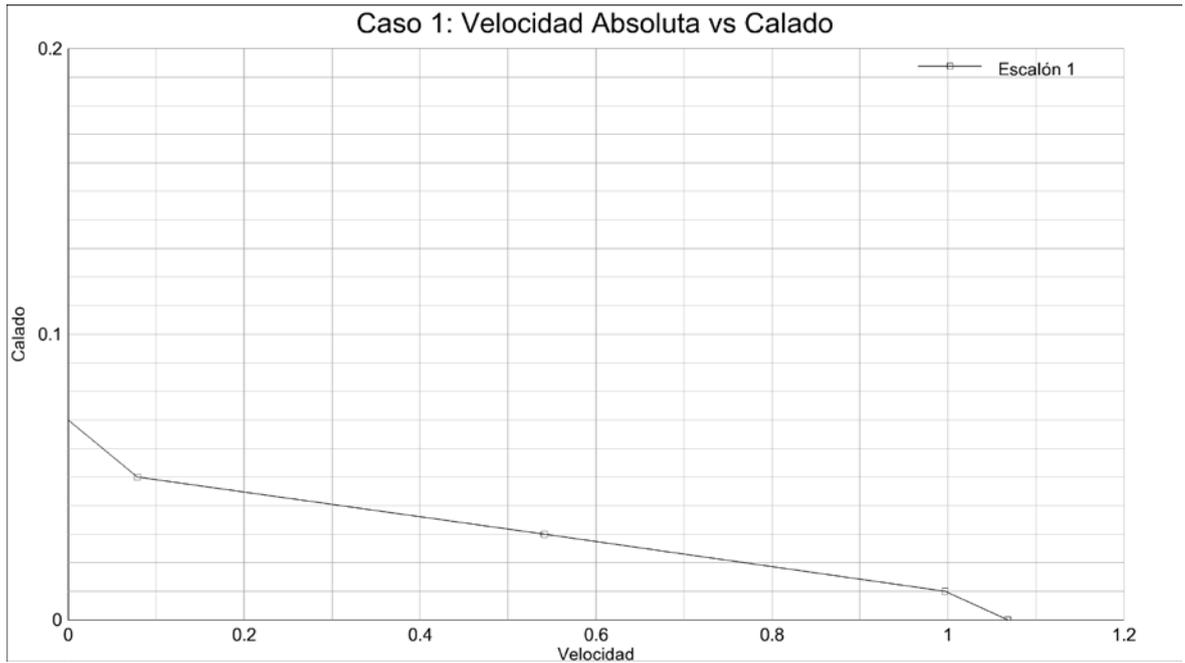
Absoluta Media	Caso	Q (l/s)	Escalón	v·y (m ² /s)	v ² ·y (m ³ /s)	Abt et al.	Témez	RESCDAM	Nanía	Gómez	Russo	Ishigaki	
	1	12	1	0.04	0.04	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
	2	25	1	0.07	0.06	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
	3	45	1	0.11	0.15	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
			5	0.12	0.24	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	4	82	1	0.18	0.31	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
			5	0.15	0.33	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
			10	0.33	0.67	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			16	0.23	0.47	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			22	0.20	0.46	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			Salida	0.29	0.82	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
	5	103	1	0.28	0.51	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			5	0.30	0.74	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
10			0.41	0.98	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	
16			0.44	1.09	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	
22			0.44	1.05	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	
		Salida	0.29	0.66	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	
6	140	1	0.31	0.58	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	
		5	0.48	1.54	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	
		10	0.37	0.91	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	
		16	0.40	1.01	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	
		22	0.45	1.35	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	
		Salida	0.36	1.11	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	

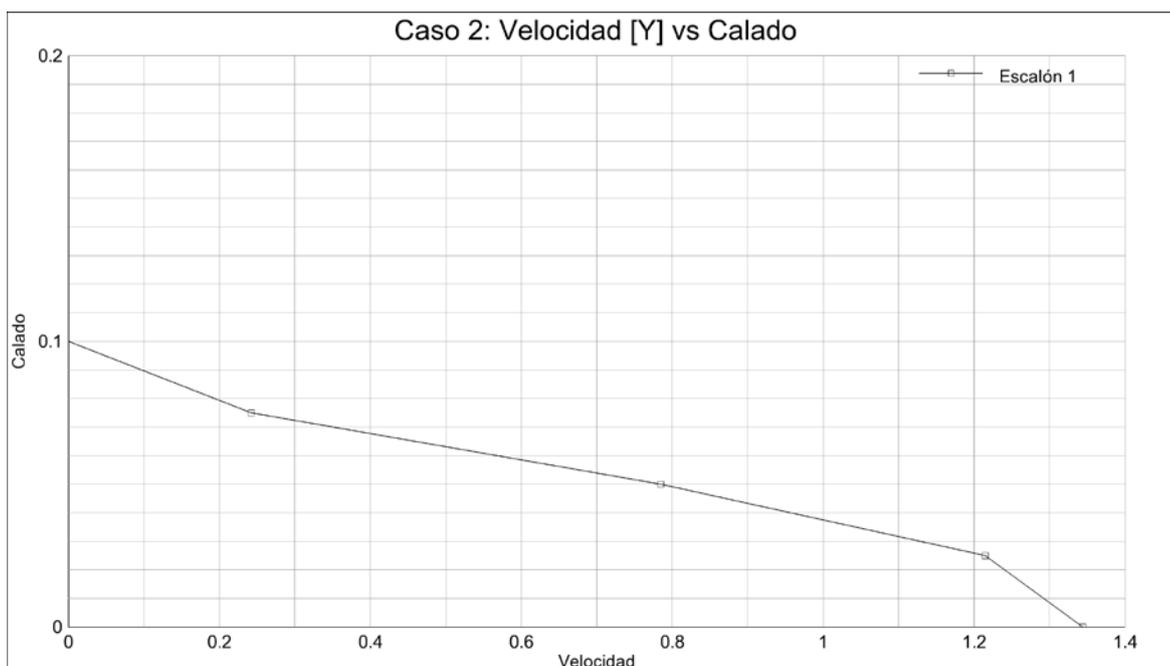
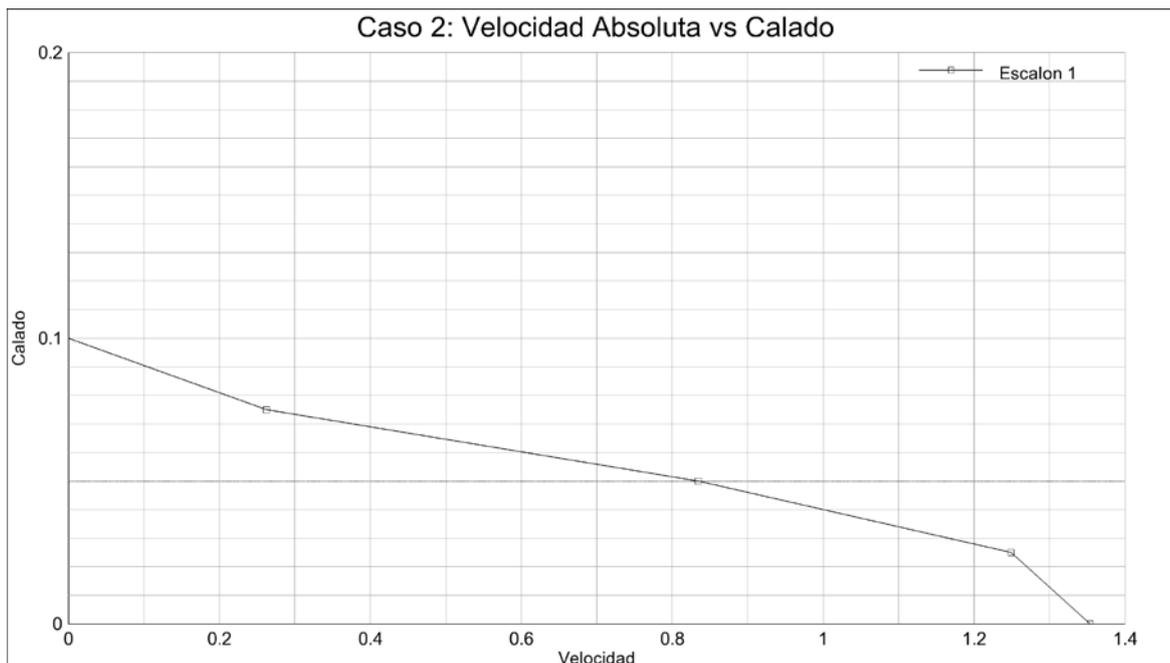
	Caso	Q (l/s)	Escalón	v·y (m ² /s)	v ² ·y (m ³ /s)	Abt et al.	Témez	RESCDAM	Nanía	Gómez	Russo	Ishigaki		
[Y] media	1	12	1	0.04	0.03	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO		
	2	25	1	0.07	0.06	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO		
	3	45	1	0.10	0.14	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
			5	0.12	0.23	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
	4	82	1	0.18	0.29	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
			5	0.15	0.33	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
			10	0.30	0.53	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	
			16	0.21	0.39	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	
			22	0.18	0.37	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
			Salida	0.29	0.82	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO
	5	103	1	0.27	0.48	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	
			5	0.29	0.68	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	
			10	0.36	0.76	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	
			16	0.38	0.81	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	
			22	0.39	0.83	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO
			Salida	0.23	0.41	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO
	6	140	1	0.30	0.53	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	
			5	0.43	1.21	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	
			10	0.34	0.77	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	
			16	0.35	0.81	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	
			22	0.44	1.29	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	
Salida			0.36	1.05	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO		

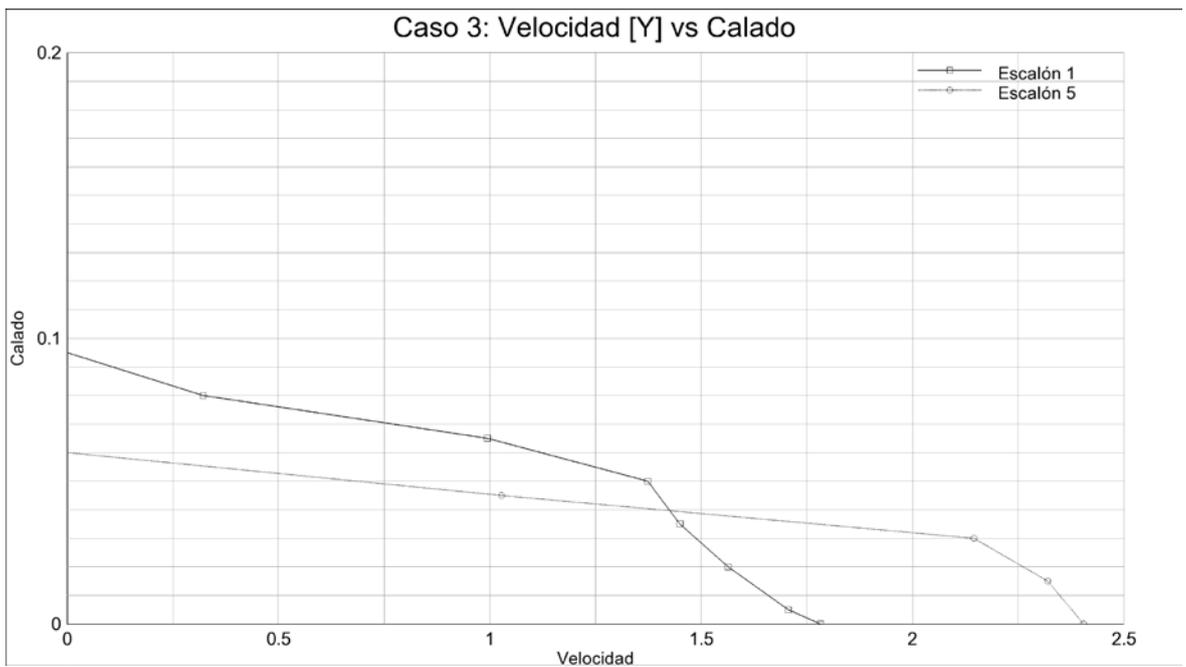
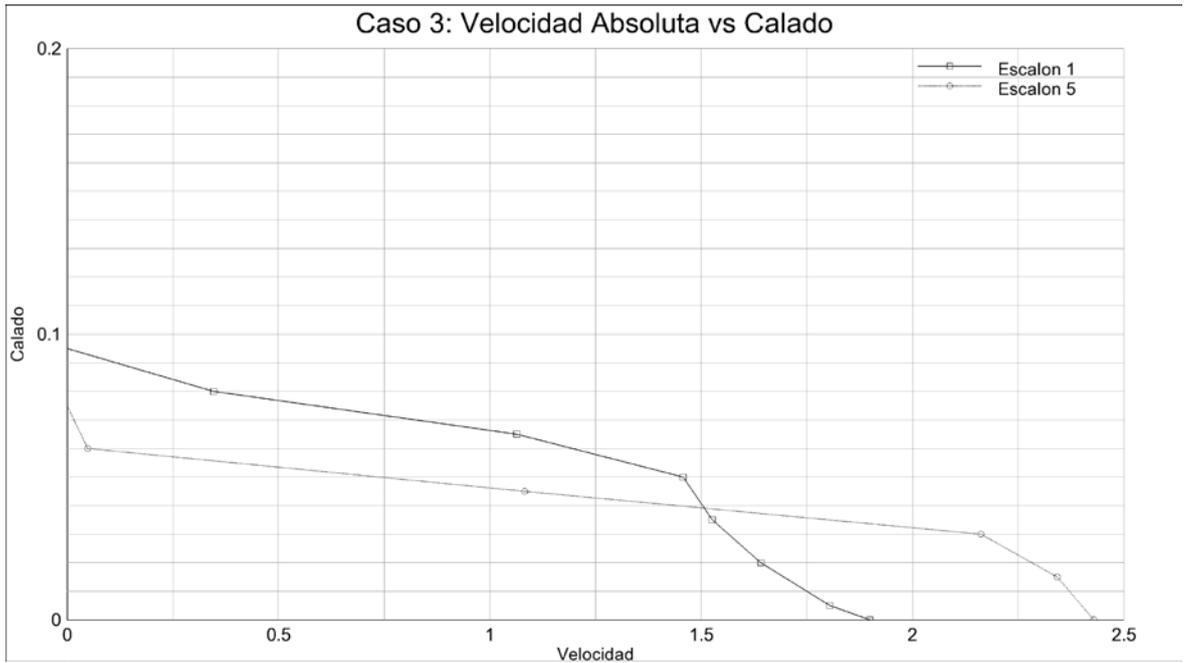
Absoluta maximizada	Caso	Q (l/s)	Escalón	v·γ(m ² /s)	v ² ·γ (m ³ /s)	Abt et al.	Témez	RESCDAM	Nanía	Gómez	Russo	Ishigaki
	1	12	1	0.05	0.06	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	2	25	1	0.10	0.14	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	3	45	1	0.15	0.29	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
			5	0.15	0.35	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	4	82	1	0.22	0.44	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			5	0.18	0.47	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
			10	0.43	1.12	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI
			16	0.26	0.58	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			22	0.25	0.72	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			Salida	0.31	0.99	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
	5	103	1	0.33	0.75	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
			5	0.34	0.90	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO
10			0.52	1.55	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	
16			0.54	1.68	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	
22			0.56	1.75	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	
		Salida	0.32	0.79	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	
6	140	1	0.39	0.88	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	
		5	0.55	2.00	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	
		10	0.49	1.59	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	
		16	0.50	1.59	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	
		22	0.48	1.52	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	
		Salida	0.39	1.28	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	

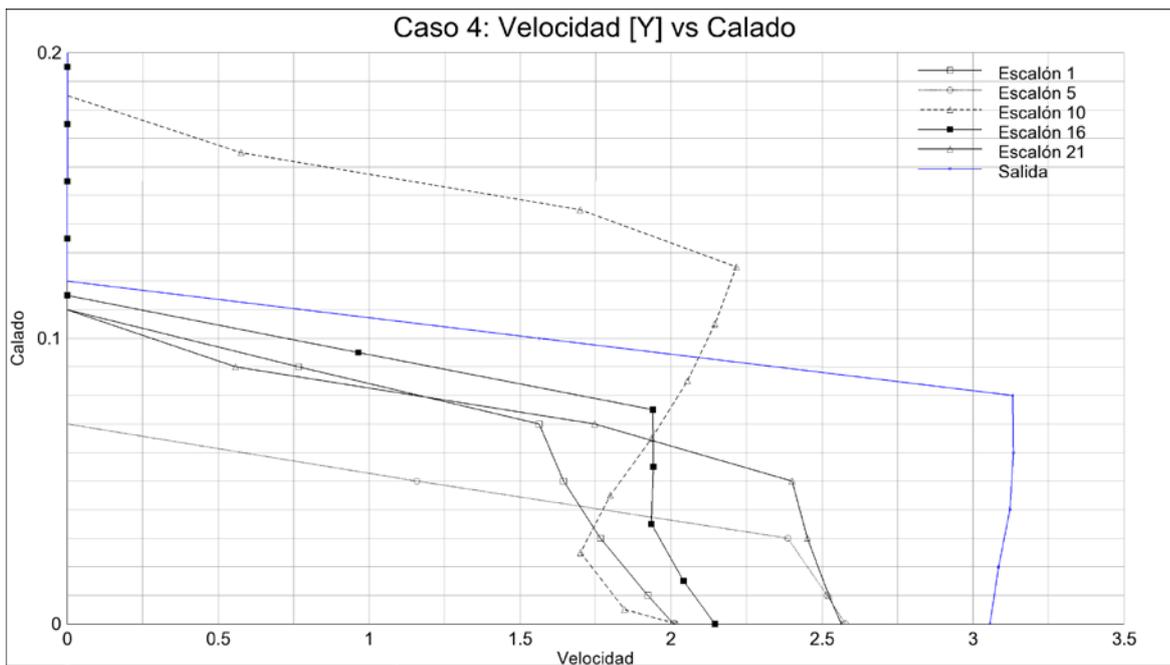
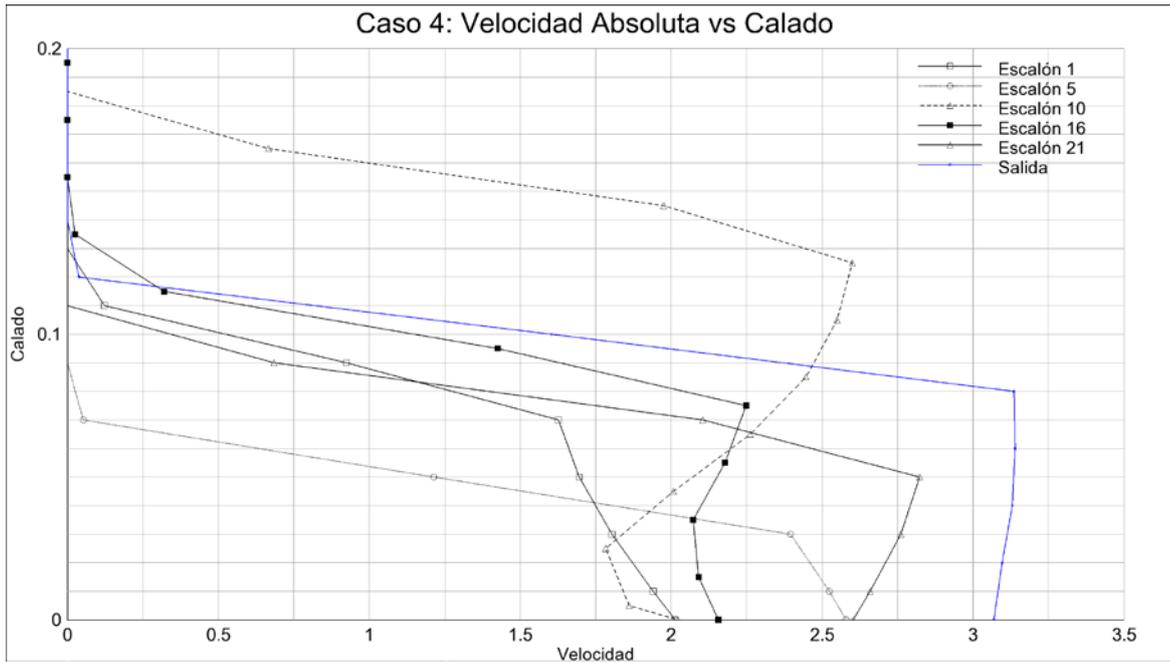
	Caso	Q (l/s)	Escalón	v·y(m ² /s)	v ² ·y (m ³ /s)	Abt et al.	Témez	RESCDAM	Nanía	Gómez	Russo	Ishigaki	
[Y] maximizada	1	12	1	0.05	0.06	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	
	2	25	1	0.10	0.13	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	
	3	45	1	0.14	0.25	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
			5	0.14	0.35	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	4	82	1	0.22	0.44	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			5	0.18	0.47	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
			10	0.37	0.81	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			16	0.25	0.53	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			22	0.23	0.59	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			Salida	0.31	0.98	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	
	5	103	1	0.33	0.74	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			5	0.34	0.90	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			10	0.43	1.08	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI
			16	0.44	1.11	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI
			22	0.47	1.25	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI
			Salida	0.32	0.79	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	
	6	140	1	0.39	0.88	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO
			5	0.46	1.40	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI
			10	0.42	1.17	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI
			16	0.42	1.11	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI
21			0.46	1.41	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	
		Salida	0.37	1.13	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO		

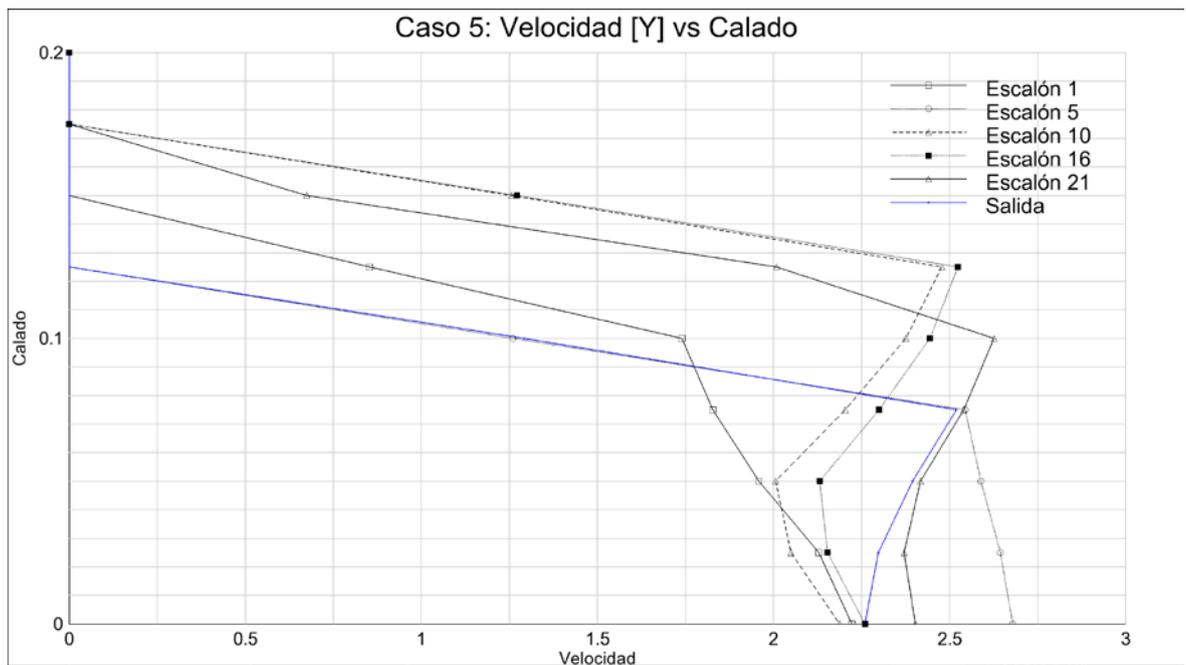
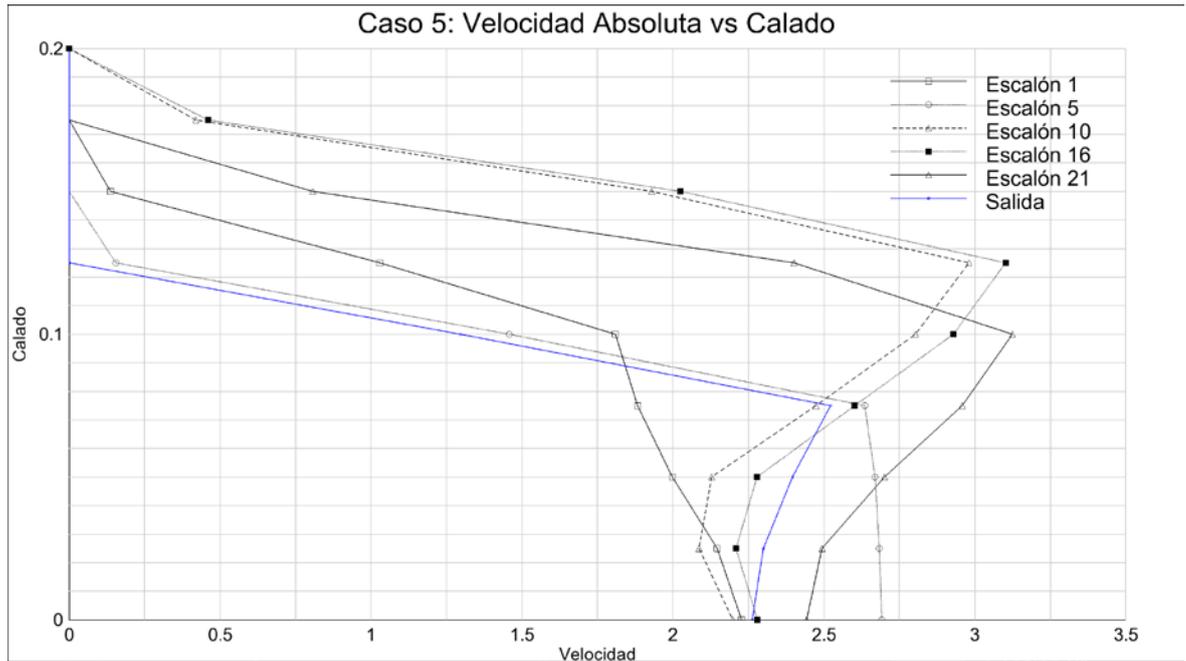
Anexo C: Perfiles de velocidad

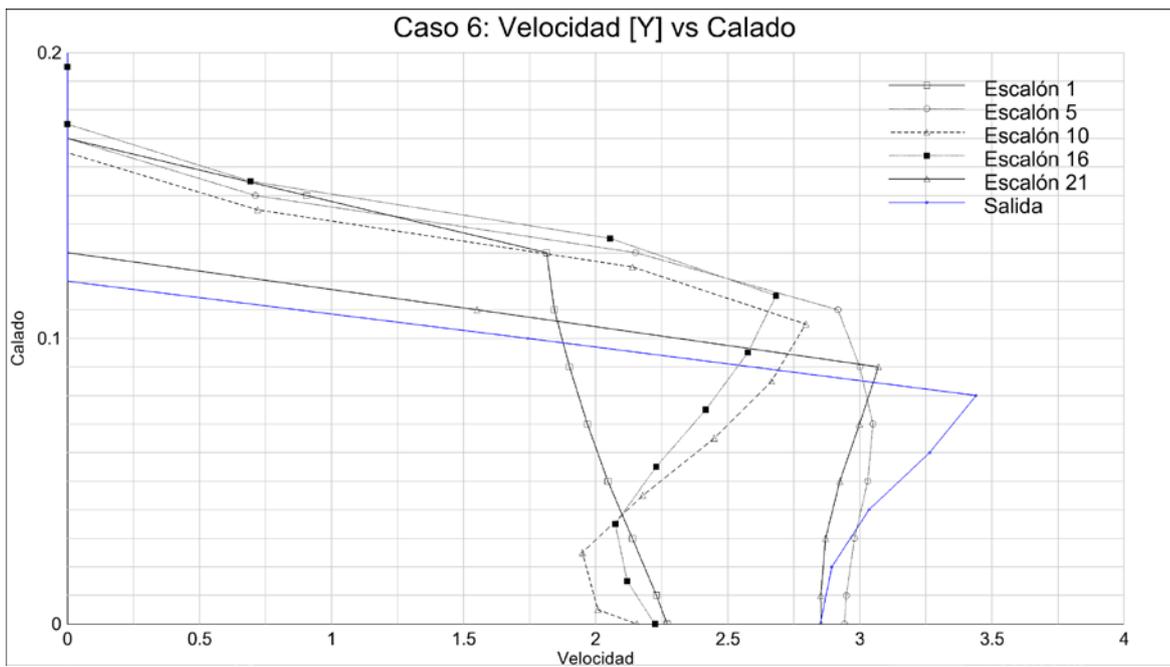
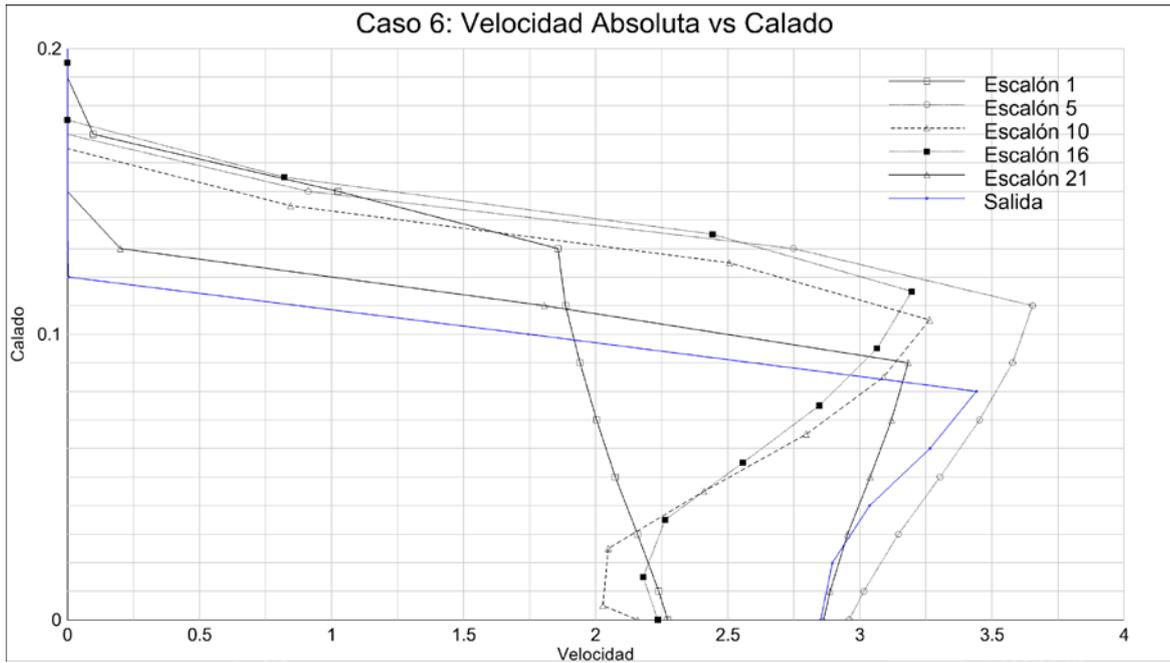




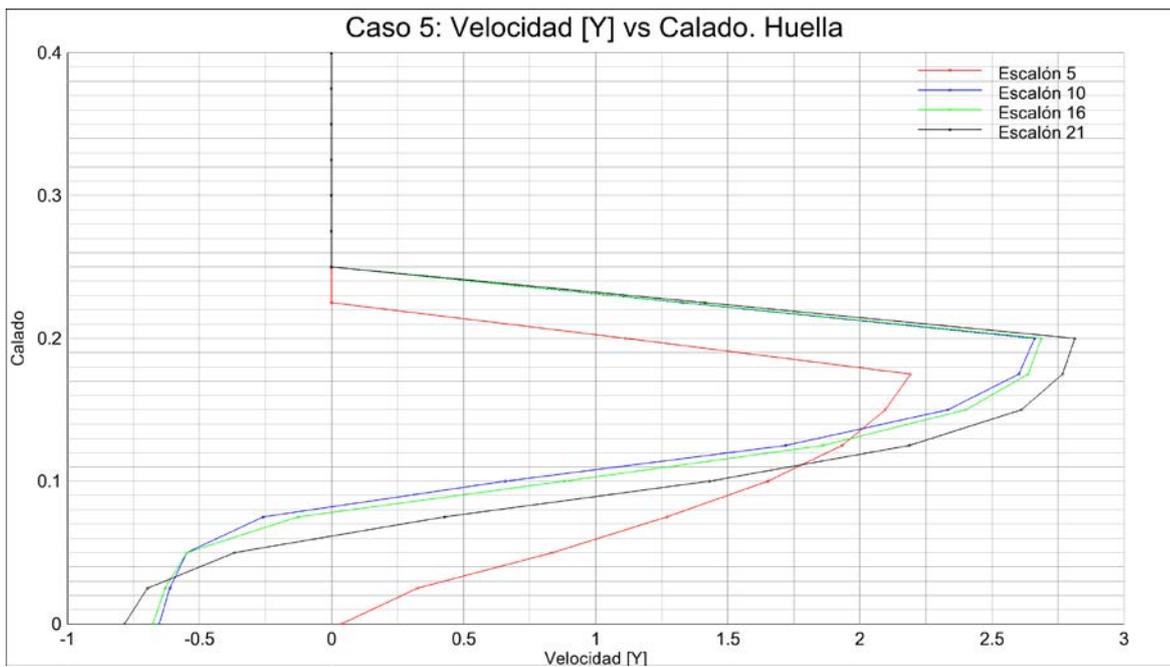
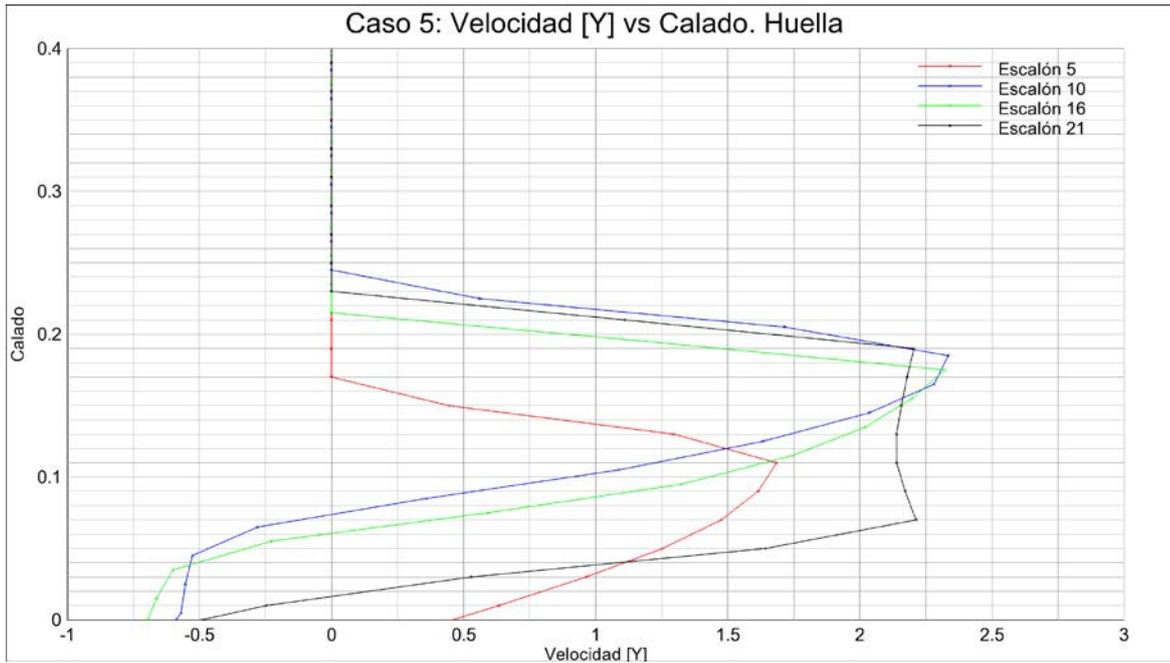


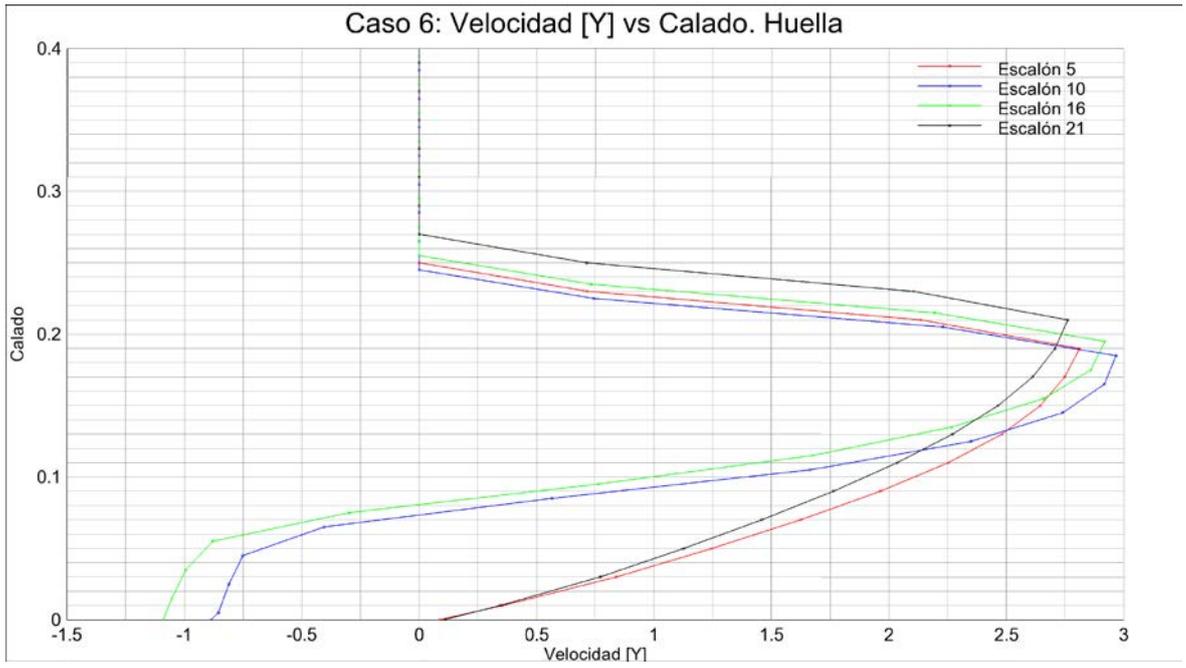






Anexo D: Perfiles de velocidad y cálculo de la peligrosidad con el método propuesto.





Evaluación del criterio propuesto

Caso	Q (l/s)	Escalón	v (m/s)	y (m)	d (m)	$v \cdot y^2 \cdot (y/2+d)$	Valor comparación	Peligrosidad	Peligrosidad Gómez
4	82	5	1.69	0.08	0.05	0.02	0.204	NO	NO
		10	2.33	0.10	0.11	0.08	0.204	NO	SI
		16	2.32	0.10	0.10	0.08	0.204	NO	SI
		21	2.21	0.10	0.07	0.06	0.204	NO	SI
5	103	5	2.19	0.10	0.07	0.06	0.20	NO	SI
		10	2.66	0.10	0.13	0.12	0.20	NO	SI
		16	2.69	0.10	0.13	0.13	0.20	NO	SI
		21	2.81	0.13	0.10	0.16	0.20	NO	SI
6	140	5	2.81	0.10	0.11	0.13	0.20	NO	SI
		10	2.97	0.08	0.13	0.11	0.20	NO	SI
		16	2.92	0.08	0.14	0.119	0.204	NO	SI
		21	2.76	0.14	0.09	0.171	0.204	NO	SI