

Trabajo Fin de Máster

**CARACTERIZACIÓN DE MÓDULOS DE
POLIPROPILENO PARA LA CONSTRUCCIÓN
DE TANQUES DE RETENCIÓN MEDIANTE
TÉCNICAS CFD**

Intensificación: **HIDRÁULICA URBANA**

Autor:

HÉCTOR SÁNCHEZ BELTRÁN

Codirectores:

DR. PEDRO LUIS IGLESIAS REY

DR. FRANCISCO JAVIER MARTÍNEZ SOLANO

SEPTIEMBRE, 2016



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo Fin de Máster

Datos del Proyecto
Título del TFM en español: Caracterización de módulos de polipropileno para la construcción de tanques de retención mediante técnicas CFD.
Título del TFM en inglés: Characterization of polypropylene modules for construction of retention tanks by CFD techniques.
Título del TFM en valenciano: Caracterització de mòduls de polipropilè per a la construcció de tancs de retenció mitjançant tècniques CFD.
Alumno: HÉCTOR SÁNCHEZ BELTRÁN.
Codirectores: DR. PEDRO LUÍS IGLESIAS REY DR. FRANCISCO JAVIER MARTÍNEZ SOLANO.
Fecha de Lectura: SEPTIEMBRE, 2016

Resumen
En español (máximo 5000 caracteres)
<p>El creciente desarrollo urbanístico de los núcleos de población en gran parte del mundo unido a los efectos apreciables del cambio climático está originando un aumento cada vez más importante y recurrente de los daños generados por inundaciones. Gran parte de las redes de drenaje de las ciudades se diseñaron para unas características de precipitación y periodos de retorno que han resultado ser insuficientes con el transcurso del tiempo. Por ello, es necesario abordar soluciones tanto para reducir los caudales de escorrentía generados como para controlar los caudales circulantes por las redes de drenaje pluvial.</p> <p>Los depósitos de retención y tanques de tormenta suponen una solución cada vez más empleada para mejorar el control de inundaciones. Una de sus alternativas más recientes supone el empleo de estructuras modulares de polipropileno como elementos básicos de construcción, lo que permite una mayor rapidez constructiva a la vez que se minimizan los cortes en el suministro.</p> <p>En este trabajo se realiza una caracterización hidráulica de este tipo de estructuras modulares empleando técnicas CFD y los resultados obtenidos se validan mediante ensayos realizados en laboratorio.</p> <p>Se propone un modelo unidimensional que represente a dichos elementos modulares con el fin de que su comportamiento pueda ser introducido en el software específico de análisis de redes de drenaje, SWMM. Finalmente, se realiza una comparativa entre los resultados de los perfiles de flujo obtenidos mediante las técnicas CFD y los obtenidos mediante el SWMM tras realizar el ajuste de los parámetros correspondientes.</p>
En valenciano (máximo 5000 caracteres)
<p>El creixent desenvolupament urbanístic dels nuclis de població en gran part del món unit als efectes apreciables del canvi climàtic està originant un augment cada vegada més important i recurrent dels danys generats per inundacions. Gran part de les xarxes de drenatge de les ciutats es van dissenyar per a unes característiques de precipitació i períodes de retorn que han resultat ser insuficients amb el transcurs del</p>

temps. Per això, cal abordar solucions tant per reduir els cabals d'escorrentia generats com per controlar els cabals circulants per les xarxes de drenatge pluvial.

Els dipòsits de retenció i tancs de tempesta suposen una solució cada vegada més emprada per millorar el control d'inundacions. Una de les seves alternatives més recents suposa la utilització d'estructures modulars de polipropilè com a elements bàsics de construcció, el que permet una major rapidesa constructiva alhora que es minimitzen els talls en el subministrament.

En aquest treball es realitza una caracterització hidràulica d'aquest tipus d'estructures modulars emprant tècniques CFD i els resultats obtinguts es validen mitjançant assajos realitzats en laboratori.

Es proposa un model unidimensional que representi aquests elements modulars per tal que el seu comportament pugui ser introduït en el programari específic d'anàlisi de xarxes de drenatge, SWMM. Finalment, es realitza una comparativa entre els resultats dels perfils de flux obtinguts mitjançant les tècniques CFD i els obtinguts mitjançant el SWMM després de realitzar l'ajust dels paràmetres corresponents.

En inglés (máximo 5000 caracteres)

The growing urban development of population centers in much of the world together with the significant effects of climate change is causing an increasingly important and recurring increase the damage caused by flooding. Much of the drainage networks of cities were designed for precipitation characteristics and return periods that have proved to be insufficient in the course of time. Therefore, solutions need to be addressed both to reduce runoff flows generated as to control circulating through the rainwater drainage networks.

Detention tanks and storm tanks are an increasingly used solution to improve flood control. One of his most recent alternative involves the use of modular structures polypropylene as basic construction elements, allowing more constructive quickness while the suply outages are minimized as well.

In this work, a hydraulic characterization of this type of modular structures using CFD techniques is performed and the results are validated by laboratory tests.

A one-dimensional model representing these modular elements so that their behavior can be introduced into the specific software of drainage networks analysis such as SWMM is proposed. Finally, a comparison between the results of flow profiles obtained by CFD techniques and those which have been obtained after doing an adjustment of the corresponding parameters in SWMM is performed.

Palabras clave español (máximo 5): Sistemas de drenaje urbano sostenible; Tanques de retención; módulos de polipropileno; CFD; SWMM.

Palabras clave valenciano (máximo 5): Sistemes de drenatge urbà Sostenible; Tancs de retenció; mòduls de polipropilè; CFD; SWMM.

Palabras clave inglés (máximo 5): Sustainable urban drainage systems; Detention tanks; Polypropylene modules; CFD; SWMM.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero mostrar mi más sincero agradecimiento a los dos codirectores de la tesis, Pedro Luis Iglesias Rey y Francisco Javier Martínez Solano, por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo con mucho interés gracias a la ayuda que me habéis prestado durante estos meses.

En segundo lugar, me gustaría dar las gracias a los compañeros del CIACUA de la Universidad de los Andes por su labor con la realización de los ensayos de laboratorio y por toda la atención prestada cuando les he requerido para cualquier consulta, así como a la empresa Mexichem Colombia por financiar esta investigación a través del proyecto "Drenaje urbano y cambio climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro Fase II", sin la cual tampoco no habría sido posible completar este estudio.

Tampoco quiero olvidarme de mis amigos de siempre Fernando y Javi por estar ahí y, en especial a mi novia Miriam por su apoyo y por ser el espejo en el que fijarme. Recordar también a mis compañeros de departamento como Ullrich, Oscar y Christian, pero sobre todo me gustaría mencionar a Vicente por su ayuda durante todos estos meses que hemos trabajado juntos.

Finalmente, agradecer a mis padres el enorme esfuerzo que han hecho desde siempre para que yo pudiera llegar aquí, sin olvidarme de mi hermano, mi primo y mis tíos Javi y Paco por estar ahí.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Introducción	1
1.2.	Objetivos	3
1.3.	Estructura de la memoria	4
2.	ESTADO DEL ARTE	6
2.1.	Cambio climático y SUDS	6
2.2.	Tanques de retención	10
2.3.	Modelación CFD aplicada a tanques de retención y sus fundamentos teóricos.	14
2.4.	Cálculo computacional de la interfaz agua-aire y sus aplicaciones.....	19
2.5.	Rugosidad equivalente.....	24
2.6.	Caso de estudio.....	25
3.	DESCRIPCIÓN DE LAS CONFIGURACIONES de estudio	26
3.1.	Configuración 1x2x1.	26
3.2.	Configuración 1x2x4.	26
3.3.	Configuración 2x2x1.	27
3.4.	Configuración 2x2x4.	27
3.5.	Configuración 1x2x1T	28
3.6.	Configuración 1x2x8T.	28
4.	Metodología de análisis con CFD	32
4.1.	Introducción al proceso	32
4.2.	Desarrollo de la geometría del modelo	33
4.3.	Estudio de la malla.....	42
4.4.	Modelos de análisis con CFD	48
4.4.1.	Definición de las condiciones de contorno.	49
4.4.2.	Análisis en régimen estacionario vs. análisis en régimen transitorio.	50
5.	RESULTADOS de las simulaciones cfd.	55
5.1.	Análisis configuración 1x2x1.....	55
5.1.1.	Simulación con Geometría Real, Q=37.83 l/s.....	55
5.1.2.	Simulación con Geometría Simplificada, Q=37.83 l/s.	56

5.1.3.	Simulación con Geometría Simplificada para el resto de caudales ensayados.....	57
5.1.4.	Comparación resultados laboratorio-Ansys.....	60
5.2.	Análisis configuración 1x2x4.....	65
5.2.1.	Resultados de la modelación computacional para los distintos caudales estudiados.	65
5.2.2.	Comparación resultados laboratorio-CFD.....	68
5.3.	Análisis configuración 1x2x1 T.....	72
5.3.1.	Resultados de la modelación computacional para distintos caudales. ...	72
5.3.2.	Comparación resultados laboratorio-CFD.....	74
5.4.	Análisis configuración 2x2x1.....	78
5.4.1.	Resultados de la modelación computacional para los distintos caudales estudiados.	78
5.4.2.	Perfiles obtenidos computacionalmente para los caudales estudiados..	80
5.5.	Características simulaciones realizadas.....	81
6.	MODELOS unidimensionales DE REPRESENTACIÓN DE AQUACELLS EN SWMM 5.0.	82
6.1.	Aproximación de los valores de n-k para la configuración 1x2x4.	82
6.1.1.	Ajuste para caudales ensayados en laboratorio.	83
6.1.2.	Ajuste para caudales simulados computacionalmente.....	85
6.2.	Aproximación de los valores de n-k para la configuración 1x2x8T.	95
7.	CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....	101
7.1.	Conclusiones	101
7.2.	Desarrollos Futuros.....	104
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Geometría real del Aquacell objeto de estudio.	2
Figura 2. Diferentes vistas de tanques de retención en construcción empleando módulos Aquacell (Akm Consultants, Icai, HidroPluviales, Wavin)......	2
Figura 3. Esquema depósito de retención modular entre pozos de registro en planta y alzado.....	3
Figura 4.- Características del diseño del desarrollo convencional: (a) cuenca de detención seca con cuneta verde perimetral y estructura de hormigón en salida; (b) zanjas de pretratado.....	8
Figura 5.- LID SCMs: (a) Cunetas verdes; (b) celdas de biorretención; (c) cámara de detención subterránea; (d) zanjas de infiltración subterránea (Wilson et al., 2015).	9
Figura 6.- Esquemas de tanques de retención en línea y fuera de línea (Calabrò & Viviani, 2006).	10
Figura 7.- Vistas en planta (a) y transversal (b) del sistema de tanque de retención (Cimorelli et al., 2016).	12
Figura 8.- Modelo del tanque de retención de laboratorio (Adamsson et al., 2005). ...	15
Figura 9.- Tubería de entrada y vertedero de salida (Adamsson et al., 2005).	16
Figura 10.- Campos de velocidades experimentales y simulados (Dufresne et al., 2009).	19
Figura 11.- Sección longitudinal del vertedero con ubicaciones del resalto en solera (Aydin, 2016).	21
Figura 12.- Sección longitudinal del vertedero con las distintas ubicaciones del resalto en solera.	21
Figura 13.- Sección longitudinal del vertedero con las distintas ubicaciones del resalto en solera.	21
Figura 14.- Superficie libre obtenida computacionalmente, (Hargreaves et al., 2007).	22
Figura 15.- Vista esquemática del vertedero circular (Rahimzadeh et al., 2014).	22
Figura 16.- Geometría del vertedero libre en canal de sección trapezoidal (Ramamurthy et al., 2006).	23
Figura 17.- Esquema de la configuración experimental (Christodoulou, 2014).....	24
Figura 18. Distribución en planta y alzado de Aquacells para la configuración 1x2x1. .	26
Figura 19. Distribución en planta y alzado de Aquacells para la configuración 1x2x4. .	27
Figura 20. Distribución en planta y alzado de Aquacells para la configuración 2x2x1. .	27
Figura 21. Distribución en planta y alzado de Aquacells para la configuración 2x2x4. .	28
Figura 22. Distribución en planta y alzado de Aquacells para la configuración 1x2x1T.	28
Figura 23. Distribución en planta y alzado de Aquacells para la configuración 1x2x8T.	29
Figura 24. Vista del modelo de laboratorio con AquaCells desde Ambas Caras.	30
Figura 25. Vista lateral del canal de laboratorio con perfil del flujo a lo largo de los elementos modulares.	30

Figura 26. Vista de la salida del flujo del último Aquacell en canal de laboratorio para un caudal elevado.	31
Figura 27. Vista frontal detallada del modelo computacional.	33
Figura 28. Vista lateral detallada del modelo computacional.	34
Figura 29. Vista superior detallada del modelo computacional.	34
Figura 30. Vista frontal definitiva del modelo computacional.	34
Figura 31. Vista superior definitiva del modelo computacional.	35
Figura 32. Vista lateral definitiva del modelo computacional.	35
Figura 33. Vista 3D, versión 1, de la geometría del modelo 1x2x1.	36
Figura 34. Vista 3D, versión 2, de la geometría del modelo 1x2x1.	37
Figura 35. Vista 3D, versión 3, de la geometría del modelo 1x2x1.	37
Figura 36. Vista 3D, versión 4, de la geometría del modelo 1x2x1.	38
Figura 37. Vista frontal trasera en versión 4 de la geometría del modelo 1x2x1.	39
Figura 38. Vista 3D, versión definitiva, de la geometría del modelo 1x2x4.	40
Figura 39. Vista 3D, versión definitiva, de la geometría del modelo 1x2x1 Transversal.	40
Figura 40. Zoom vista 3D, versión definitiva, de la geometría del modelo 1x1x1 Transversal.	41
Figura 41. Vista 3D, versión definitiva, de la geometría del modelo 1x1x8T.	41
Figura 42. Simplificación longitudinal (a) y transversal (b) sobre la geometría real de un elemento modular.	42
Figura 43 y Figura 44. Detalle comparativo de los dos métodos tetraédricos de mallado (ANSYS Meshing User's Guide, 2012).	43
Figura 45, Figura 46 y Figura 47. Detalle comparativo de los tres métodos hexaédricos de mallado (ANSYS Meshing User's Guide, 2012).	43
Figura 48. Detalle del mallado Cutcell (ANSYS Meshing User's Guide, 2012).	44
Figura 49, Figura 50 y Figura 51. Detalle comparativo de los distintos métodos superficiales de mallado (ANSYS Meshing User's Guide, 2012).	44
Figura 52. Parámetros de mallado establecidos para la configuración 1x2x1.	45
Figura 53. Mallado en configuración 1x2x1 canal completo.	46
Figura 54. Detalle mallado CutCell en Aquacell.	46
Figura 55. Esquema de vectores para cálculo índice OQ para cada celda (ANSYS Meshing User's Guide, 2012).	46
Figura 56. Esquema de vectores para cálculo índice OQ para cada cara (ANSYS Meshing User's Guide, 2012).	47
Figura 57. Espectro del índice de calidad ortogonal (OQ) (ANSYS Meshing User's Guide, 2012).	47
Figura 58. Zoom del mallado tetraédrico en zona del Aquacell.	48
Figura 59. Zona del modelo correspondiente a la condición de contorno "Velocity-inlet".	49

Figura 60. Zona del modelo correspondiente a la condición de contorno “pressure-outlet”	49
Figura 61. Zona del modelo correspondiente a la condición de contorno “Symmetry”.	50
Figura 62 , Figura 63 y Figura 64. Zonas del modelo correspondientes a las condiciones de contorno “lateral, techo y suelo”.	50
Figura 65. Ventana de valores residuales escalados generada durante el cálculo de la solución.....	53
Figura 66. Ventana de balance de caudales del sistema objeto de cálculo durante la simulación.....	53
Figura 67. Perfil de la lámina de agua para la configuración “1x2x1T” y régimen permanente.....	54
Figura 68. Perfil del flujo de agua en elemento modular con geometría real 1x2x1, Q=37.83 l/s.	55
Figura 69. Volumen de agua en elemento modular 3D con geometría real 1x2x1, Q=37.83 l/s.	56
Figura 70. Perfil del flujo de agua en elemento modular con geometría simplificada 1x2x1, Q=37.83 l/s.....	57
Figura 71. Volumen de agua en elemento modular 3D con geometría simplificada 1x2x1, Q=37.83 l/s.....	57
Figura 72. Perfil del flujo de agua en elemento modular con geometría simplificada 1x2x1, Q=36.95 l/s.....	58
Figura 73. Perfil del flujo de agua en elemento modular con geometría simplificada 1x2x1, Q=35.23 l/s.....	58
Figura 74. Perfil del flujo de agua en elemento modular con geometría simplificada 1x2x1, Q=19.48 l/s.....	58
Figura 75. Perfil del flujo de agua en elemento modular con geometría simplificada 1x2x1, Q=11.58 l/s.....	58
Figura 76. Volumen de agua en elemento modular 3D con geometría simplificada 1x2x1, Q=36.95 l/s.....	59
Figura 77. Volumen de agua en elemento modular 3D con geometría simplificada 1x2x1, Q=11.58 l/s.....	59
Figura 78. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio, geometría real y simplificada 1x2x1, Q=37.83 l/s.....	60
Figura 79. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio y geometría simplificada 1x2x1, Q=36.95 l/s.....	63
Figura 80. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio y geometría simplificada 1x2x1, Q=35.23 l/s.....	64
Figura 81. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio y geometría simplificada 1x2x1, Q=19.48 l/s.....	64

Figura 82. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio y geometría simplificada 1x2x1, Q=11.58 l/s.....	64
Figura 83. Comparativa perfiles obtenidos mediante CFD para distintos caudales y configuración 1x2x1.....	64
Figura 84. Perfil del flujo de agua en canal completo y geometría simplificada 1x2x4, Q=37.83 l/s.	66
Figura 85. Perfil del flujo de agua en canal completo y geometría simplificada 1x2x4, Q=30.37 l/s.	66
Figura 86. Perfil del flujo de agua en canal completo y geometría simplificada 1x2x4, Q=25.59 l/s.	66
Figura 87. Perfil del flujo de agua en canal completo y geometría simplificada 1x2x4, Q=21.61 l/s.	66
Figura 88. Volumen de agua en elementos modulares 3D con geometría simplificada 1x2x4, Q=37.83 l/s.....	67
Figura 89. Volumen de agua en elementos modulares 3D con geometría simplificada 1x2x4, Q=21.61 l/s.....	67
Figura 90. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs geometría simplificada 1x2x4, Q=25.59 l/s.....	68
Figura 91. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs geometría simplificada 1x2x4, Q=37.83 l/s.....	70
Figura 92. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs geometría simplificada 1x2x4, Q=30.37 l/s.....	70
Figura 93. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs geometría simplificada 1x2x4, Q=21.61 l/s.....	71
Figura 94. Comparativa perfiles obtenidos mediante CFD para distintos caudales y configuración 1x2x4.....	71
Figura 95. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 1x2x1 T, Q=36.52 l/s.	72
Figura 96. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 1x2x1 T, Q=28.47 l/s.	72
Figura 97. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 1x2x1 T, Q=21.61 l/s.	72
Figura 98. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 1x2x1 T, Q=16.39 l/s.	73
Figura 99. Volumen de agua en elemento modular 3D en configuración 1x2x1 T, Q=36.52 l/s.	73
Figura 100. Volumen de agua en elemento modular 3D en configuración 1x2x1 T, Q=16.39 l/s.	73
Figura 101. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs simulación CFD en conf. 1x2x1 T, Q= 36.52 l/s.	74

Figura 102. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs simulación CFD en conf. 1x2x1 T, Q= 32.34 l/s.	75
Figura 103. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs simulación CFD en conf. 1x2x1 T, Q= 28.47 l/s.	75
Figura 104. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs simulación CFD en conf. 1x2x1 T, Q= 21.61 l/s.	76
Figura 105. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs simulación CFD en conf. 1x2x1 T, Q= 18.60 l/s.	76
Figura 106. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs simulación CFD en conf. 1x2x1 T, Q= 16.39 l/s.	76
Figura 107. Comparativa perfiles obtenidos mediante CFD para distintos caudales y configuración 1x2x1 T.....	77
Figura 108. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 2x2x1, Q=35.66 l/s.	78
Figura 109. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 2x2x1, Q=27.37 l/s.	78
Figura 110. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 2x2x1, Q=20.07 l/s.	78
Figura 111. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 2x2x1, Q=14 l/s.	78
Figura 112. Volumen de agua en elemento modular 3D en configuración 2x2x1, Q=35.66 l/s.	79
Figura 113. Volumen de agua en elemento modular 3D en configuración 2x2x1, Q=14 l/s.	79
Figura 114. Comparativa perfiles obtenidos mediante CFD para distintos caudales y configuración 2x2x1.....	80
Figura 115. Esquema de la configuración 1x2x4 en SWMM 5.	82
Figura 116. Comparativa perfiles laboratorio Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=37.83 l/s.	84
Figura 117. Comparativa perfiles laboratorio Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=30.37 l/s.	84
Figura 118. Comparativa perfiles laboratorio Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=25.59 l/s.	84
Figura 119. Comparativa perfiles laboratorio vs. solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=21.61 l/s.	85
Figura 120. Evolución del error suma para distintos K, para un caudal Q=37.83 l/s.	86
Figura 121. Zoom de la evolución del error suma mínimo para distintos K, para un caudal Q=37.83 l/s.	86
Figura 122. Evolución del error suma para distintos K, para un caudal Q=30.37 l/s.	87
Figura 123. Zoom de la evolución del error suma mínimo para distintos K, para un caudal Q=30.37 l/s.	87

Figura 124. Evolución del error suma para distintos K, para un caudal Q=25.59 l/s.	87
Figura 125. Zoom de la evolución del error suma mínimo para distintos K, para un caudal Q=25.59 l/s.....	88
Figura 126. Evolución del error suma para distintos K, para un caudal Q=21.61 l/s.	88
Figura 127. Zoom de la evolución del error suma mínimo para distintos K, para un caudal Q=21.61 l/s.....	88
Figura 128. Comparativa perfiles CFD Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=37.83 l/s.	89
Figura 129. Comparativa perfiles CFD Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=30.37 l/s.	89
Figura 130. Comparativa perfiles CFD Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=25.59 l/s.	90
Figura 131. Comparativa perfiles CFD Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=21.61 l/s.	90
Figura 132. Evolución del error suma para k=1 y un Q=37.83 l/s.	91
Figura 133. Evolución del error suma para k=1 englobando todos los caudales estudiados.	91
Figura 134. Evolución del error suma para distintos K englobando todos los caudales estudiados.	92
Figura 135. Zoom errores suma mínimos para distintos K englobando todos los caudales estudiados.	92
Figura 136. Evolución del error suma para K=31-37 englobando todos los caudales estudiados.	93
Figura 137. Zoom errores suma mínimos para K entre 31 y 37 englobando todos los caudales estudiados.	93
Figura 138. Evolución del error suma para distintas N de Manning englobando los 4 caudales estudiados.	94
Figura 139. Zoom errores suma mínimos para distintos N de Manning en función de K englobando los 4 caudales estudiados.....	94
Figura 140. Esquema de la configuración 1x2x8T en SWMM 5.	95
Figura 141. Evolución del error suma para distintos K, para un caudal Q=28.47 l/s.	96
Figura 142. Zoom de la evolución del error suma mínimo para distintos K, para un caudal Q=28.47 l/s.....	96
Figura 143. Evolución del error suma para distintos K, para un caudal Q=25.94 l/s.	97
Figura 144. Zoom de la evolución del error suma mínimo para distintos K, para un caudal Q=25.94 l/s.....	97
Figura 145. Evolución del error suma para distintos K, para un caudal Q=13.85 l/s.	98
Figura 146. Zoom de la evolución del error suma mínimo para distintos K, para un caudal Q=13.85 l/s.....	98
Figura 147. Comparativa perfiles laboratorio Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x8, Q=28.47 l/s.....	99

Figura 148. Comparativa perfiles laboratorio Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x8, Q=25.94 l/s.....	99
Figura 149. Comparativa perfiles laboratorio Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x8, Q=13.85 l/s.....	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Detalle de las diferentes configuraciones a estudiar.	29
Tabla 2. Factores de relajación de las ecuaciones.....	47
Tabla 3. Factores de relajación de las ecuaciones.....	52
Tabla 4. Pérdidas localizadas y coeficiente de Manning equivalente para un Aquacell en configuración 1x2x1 a partir de los datos de laboratorio (Q=37.83 l/s).	62
Tabla 5. Pérdidas localizadas y coeficiente de Manning equivalente para un Aquacell en configuración 1x2x1 a partir de los resultados CFD con la geometría completa (Q=37.83 l/s).	62
Tabla 6. Pérdidas localizadas y coeficiente de Manning equivalente para un Aquacell en configuración 1x2x1 a partir de los resultados CFD con la geometría simplificada (Q=37.83 l/s).	62
Tabla 7. Tabla resumen de los valores N-K en conf. 1x2x1, casos laboratorio y CFD. ...	65
Tabla 8. Valores de las pérdidas localizadas obtenidos en configuración 1x2x4 Laboratorio, Q=25.59 l/s.....	68
Tabla 9. Valores de los coeficientes de Manning equivalente en configuración 1x2x4 Laboratorio, Q=25.59 l/s.....	69
Tabla 10. Valores de las pérdidas localizadas obtenidos en configuración 1x2x4. Simulación CFD. Q=25.59 l/s.	69
Tabla 11. Valores de los coeficientes de Manning equivalente en configuración 1x2x4. Simulación CFD. Q=25.59 l/s.	69
Tabla 12. Tabla resumen de los valores N-K en conf. 1x2x4, casos laboratorio y CFD. .	71
Tabla 13. Pérdidas localizadas obtenidas para la configuración 1x2x1T. Datos Laboratorio, Q=36.52 l/s.....	74
Tabla 14. Valores del coeficiente de Manning equivalente para la configuración 1x2x1 T. Datos Laboratorio, Q=36.52 l/s.	74
Tabla 15. Pérdidas localizadas obtenidas para la configuración 1x2x1T. Resultados CFD, Q=36.52 l/s.	74
Tabla 16. Valores del coeficiente de Manning equivalente para la configuración 1x2x1 T. Resultados CFD, Q=36.52 l/s.....	75
Tabla 17. Resumen de los valores n-k en configuración 1x2x1T. Datos de laboratorio vs CFD.....	77
Tabla 18. Resumen de los valores n-k en configuración 2x2x1. Datos de laboratorio vs CFD.....	80
Tabla 19. Resumen de los parámetros que caracterizan las simulaciones CFD realizadas.	81
Tabla 20. Datos del modelo en SWMM5 de la configuración 1x2x4.	83
Tabla 21. Ajuste de los parámetros n, k_{ent} y k_{sal} para la configuración 1x2x4 Laboratorio.	83
Tabla 22. Ajuste de los parámetros n, k_{ent} y k_{sal} para la configuración 1x2x4 CFD.	85

Tabla 23. Datos del modelo en SWMM5 de la configuración 1x2x8T.	95
Tabla 24. Ajuste de los parámetros n , k_{ent} y k_{sal} para la configuración 1x2x4.....	95

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

En los últimos tiempos son cada vez más frecuentes los sucesos de amplias zonas urbanas completamente inundadas. Este aumento tanto en magnitud como en frecuencia de inundación en zonas urbanas que está empezando a apreciarse y sufrirse en gran parte del planeta es consecuencia fundamentalmente de los efectos del cambio climático, que genera un incremento en la intensidad de las precipitaciones actuales las cuales resultan ser en muchos casos superiores a los eventos de precipitación empleados para el diseño de las redes de drenaje urbano existentes actualmente en la mayoría de las ciudades del mundo.

Por tanto, la urbanización cada vez más acelerada de los núcleos urbanos sumada a los efectos que el cambio climático induce en el régimen de precipitaciones de amplias regiones del planeta producirá un incremento en el caudal pico de la escorrentía superficial generada que terminará por introducirse en las redes de drenaje preexistentes.

Las alternativas de solución que se presentan para abordar este problema se agrupan fundamentalmente según dos enfoques principales. Un primer enfoque más tradicional basado en aumentar la capacidad de transporte de la red mediante su renovación total o parcial o, mediante un segundo enfoque de soluciones más modernas e innovadoras conocidas SUDS o sistemas de drenaje urbano sostenible.

Dentro de los SUDS, se encuentran soluciones que realizan el control de la escorrentía antes de que el agua se introduzca en la red de drenaje (control en origen) como los tejados verdes o los pavimentos porosos entre otros y, soluciones que intervienen una vez el agua de escorrentía ha entrado ya en la propia red, como son los tanques de tormenta o depósitos de retención de lluvia.

La utilización de tanques de retención o de tormenta tanto para el control de inundaciones como de la calidad del agua de las descargas constituye una solución de gran auge en los últimos años, ya que permite un mayor control sobre el incremento de las precipitaciones a consecuencia del cambio climático. En este trabajo se va a hacer hincapié en la funcionalidad de estos tanques de retención como elementos de control del flujo decisivos para evitar inundaciones.

Dependiendo del tipo de construcción, estos tanques de tormenta pueden ser abiertos a la atmósfera o enterrados. Dentro de estos últimos, se pueden encontrar distintas soluciones, desde las más convencionales basadas en estructuras de hormigón hasta las más innovadoras que emplean estructuras modulares. De entre todos los modelos existentes de estructuras modulares, el presente estudio se ha centrado en el estudio de la marca

Aquacell suministrada en Colombia por Mexichem – PAVCO (Figura 1). Estos Aquacell presentan la ventaja de una mayor rapidez de ejecución cuando el número de éstos que son envueltos por una estructura impermeable constituye un depósito de grandes dimensiones.



Figura 1. Geometría real del Aquacell objeto de estudio.

El empleo de estas estructuras modulares supone que el flujo en su interior es mucho más complejo que en los depósitos convencionales obteniendo como resultado una mayor disipación energética en su interior. Como consecuencia de esta elevada disipación energética se presentan dos efectos sobre el comportamiento de estos tanques de retención conformados por varias filas de estos módulos en las 3 direcciones (Figura 2).



Figura 2. Diferentes vistas de tanques de retención en construcción empleando módulos Aquacell (Akm Consultants, Icai, HidroPluviales, Wavin).

En primer término, señalar que la pérdida de energía existente entre módulos adyacentes hace que el tanque de tormenta no se llene con una lámina de agua horizontal; es decir, el

calado a la entrada del mismo puede ser notablemente superior al calado de cualquiera de sus extremos. En segundo lugar, es importante destacar que esta disipación energética va a generar una ralentización del propio flujo de manera que estos depósitos de módulos Aquacell actuaría como una canalización con elevadas pérdidas energéticas, fenómeno que podría ser beneficioso para ciertas redes de drenaje, ayudando a laminar caudal mitigando posibles problemas de inundación (Figura 3).

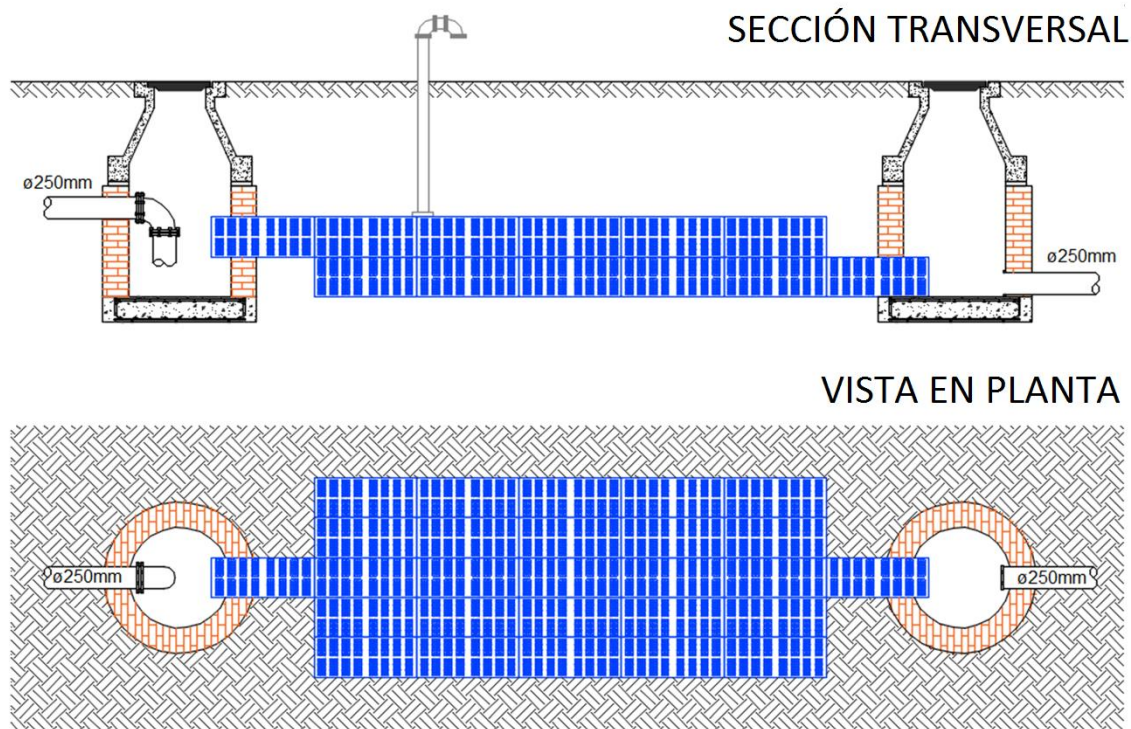


Figura 3. Esquema depósito de retención modular entre pozos de registro en planta y alzado.

1.2. Objetivos

Como objetivo general del presente trabajo, se persigue analizar el comportamiento de este tipo de estructuras modulares o Aquacells con el fin de comprender mejor su comportamiento como elementos disipadores de energía y poder extrapolar las conclusiones acerca del mismo al caso de un tanque de tormenta real, de grandes dimensiones y formado por un gran número de estos elementos.

El objetivo general enunciado en el párrafo anterior se concreta en los siguientes objetivos específicos que se persiguen con el desarrollo del presente estudio.

- Familiarizarse con el software ANSYS 15.0 para el análisis del comportamiento de fluidos complejos gracias a su módulo FLUENT para posteriormente caracterizar mediante técnicas CFD (Computational Fluid Dynamics) el comportamiento de este

tipo de estructuras modulares. Dicha caracterización supondrá básicamente obtener la disipación energética de cada uno de los elementos en función del caudal.

- Del análisis de los estudios mediante técnicas CFD se obtendrá la disipación energética del flujo en el interior del Aquacell cuando el agua fluye en cualquiera de las direcciones en las que pueden instalarse estos módulos.
- Obtener una metodología de aplicación de las técnicas computacionales que proporcione simulaciones que puedan ser validadas favorablemente mediante ensayos de laboratorio.
- Cuantificación de la influencia que tiene en la disipación energética de uno de los Aquacells, la disposición de módulos adyacentes en ambas direcciones. Para ello se realizará mediante técnicas CFD el estudio de la influencia que tiene sobre el flujo la instalación de diferentes módulos tanto en dirección longitudinal como en dirección transversal.
- Los estudios previos de caracterización mediante técnicas CFD serán validados comparando los mismos con ensayos reales obtenidos a partir de un prototipo construido en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Los Andes.
- Elaborar un modelo unidimensional de comportamiento de los Aquacells para poder implementar su comportamiento en el modelo de análisis de redes de drenaje SWMM. Para el desarrollo de este modelo será necesario obtener unos parámetros característicos del Aquacell compatibles con las características de comportamiento y análisis del citado modelo.

1.3. Estructura de la memoria

La presente memoria se estructura en una serie de capítulos a través de los cuáles se pretende abordar el problema planteado en el primer punto que se corresponde con una breve introducción en la que se plantea el problema objeto de estudio y se enmarca el empleo de los tanques de retención compuestos de estructuras modulares como un tipo de solución innovadora de sistema de drenaje urbano sostenible.

Además, en la introducción se definen el objetivo general del estudio y una serie de objetivos parciales que debe ser abordados con éxito para conseguir dar luz al objetivo principal que se persigue.

El siguiente punto se corresponde con un breve estado del arte que amplíe y complete la introducción y permita al lector conocer algunos trabajos realizados previamente por otros investigadores que presenten alguna relación con este estudio y, que de alguna forma sustenten los métodos y técnicas computacional que se van a emplear en este estudio de investigación para alcanzar los objetivos propuestos.

Una vez presentado el problema y expuestos algunos trabajos previos que constituyan la base sobre la que se apoyará el resto del trabajo, se da paso al capítulo en el que se van a presentar las distintas configuraciones de Aquacells sobre las que se va a realizar el análisis computacional siguiendo una determinada metodología que también se expone en este punto. Además, para la validación de los resultados computacionales se realiza el correspondiente ensayo de laboratorio, en el que diferentes caudales circulan a través de un prototipo de canal en el que será posible disponer las diferentes configuraciones presentadas anteriormente.

En el siguiente punto se presentarán los resultados del estudio como los perfiles del flujo obtenidas computacionalmente para las distintas configuraciones analizadas, la relevancia de las simplificaciones geométricas adoptadas en los resultados computacionales, obtención de los valores de los parámetros que representan las pérdidas de energía del flujo a lo largo de los Aquacell ya sean pérdidas localizadas (parámetro k) o pérdidas distribuidas (n de Manning) y la validación de los mismos respecto a los obtenidos a partir de los datos de los ensayos de laboratorio.

Finalmente, se propone un modelo unidimensional de representación de elementos modulares en el software de análisis de redes de drenaje SWMM, de manera que se puedan obtener los valores óptimos de los parámetros que caracterizan las pérdidas de carga introducidas por dichos elementos, tanto repartidas como localizadas, y de esta forma poder extrapolar los resultados al caso de los tanques de retención reales conformados por un gran número de filas de bloques modulares todas las direcciones.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Cambio climático y SUDS

El creciente desarrollo urbanístico de los núcleos de población en buena parte del mundo unido a los efectos apreciables del cambio climático está originando un aumento cada vez más importante y recurrente de los daños causados por las inundaciones en las propias ciudades. Esto se debe a que gran parte de las redes de drenaje de las ciudades están diseñadas para unas características de precipitación y periodos de retorno que resultan ser insuficientes y que nada tienen que ver con los que se vislumbran para un futuro cada vez más cercano.

La ejecución y puesta en marcha de este tipo de infraestructuras supone realizar inversiones de magnitud nada desdeñable por ello, es importante considerar cual va a ser la eficacia de los sistemas de alcantarillado bajo el contexto de los efectos del cambio climático. A consecuencia del mismo, se espera un aumento de la temperatura media global del planeta que intensifique el funcionamiento del ciclo hidrológico, es decir, las áreas secas lo serán aún más mientras que lo mismo ocurrirá con las húmedas (Fortier & Mailhot, 2015).

Estas alteraciones previstas tanto en la intensidad como en la frecuencia de los eventos de precipitación más importantes serán las responsables de muchos impactos negativos sobre la gestión del agua en zonas urbanas, desde inundaciones cada vez más acentuadas y frecuentes hasta limitaciones importantes en el nivel de servicio de las infraestructuras urbanas existentes. Por ello, es necesario abordar soluciones que ayuden no solo a reducir los caudales de escorrentía generados, sino también a mejorar el control sobre los caudales circulantes por las redes de drenaje pluvial.

El campo del drenaje urbano ha venido experimentando un cambio muy significativo durante las últimas décadas, pasando de un enfoque ampliamente centrado en mitigar las inundaciones y proteger la salud de las personas a aquel en el que se tienen en cuenta además otras consideraciones como las ambientales, sanitarias, sociales y económicas. Así pues, los profesionales de este campo han ido desarrollando y adoptando nuevos términos para ir describiendo estos nuevos enfoques y es probable que continúen haciéndolo a medida que se produce la transición hacia este enfoque más sostenible e integrado (Fletcher et al., 2014).

En función del enfoque y del país en el que se desarrollaron por primera vez, estos nuevos conceptos para soluciones descentralizadas presentan diferentes denominaciones. Algunas de las más extendidas son: BMP (Best Management Practices) o mejores prácticas de gestión; LID (Low-Impact Development) o desarrollos de bajo impacto; WSUD (Water Sensitive Urban Design) o diseño urbano sensible con el agua; SUDS (Sustainable Urban

Drainage Systems) o sistemas de drenaje urbano sostenible como se les suele conocer en España; ISM (Innovative Stormwater Management) o gestión innovadora de aguas pluviales como se conoce en Canadá o simplemente como “techniques alternatives” o técnicas alternativas como se les define en Francia (Barbosa, Fernandes, & David, 2012).

Gracias al trabajo de Fletcher et al., (2014) se puede conocer algo más acerca de las distintas denominaciones expuestas anteriormente y que se explican brevemente en los siguientes párrafos:

- El término LID suele englobar aquellas soluciones que permiten reproducir al máximo el comportamiento natural del agua de lluvia situándose cerca o en la propia fuente de escorrentía como pueden ser los sistemas de biorretención, techos verdes, etc.
- El término WSUD empezó a emplearse en Australia a principios de la década de los 90 y entre sus objetivos perseguidos se encuentra protección y mejora de los sistemas naturales del agua en desarrollos urbanos, proteger la calidad del agua procedente del drenaje urbano, la reducción de la escorrentía y los caudales máximos de desarrollos urbanos mediante el empleo de medidas de detención locales minimizando las áreas impermeables.
- El término SUDS apareció por primera vez en el Reino Unido en 1997 para referirse al conjunto de técnicas y tecnologías utilizadas para drenar el agua de escorrentía generada por las precipitaciones, de una forma más sostenible que la proporcionada por las soluciones convencionales. Su filosofía es intentar reproducir lo más fielmente posible el drenaje natural que tendría la cuenca en cuestión de no existir el desarrollo urbano. A pesar de que en un primer momento se introdujeron con el objetivo de mejorar la calidad de las aguas receptoras también se vienen empleando para mitigar escorrentías generadas por tormentas de 200 años de periodo de retorno.
- Finalmente, la EPA estableció como definición para el término BMP aplicado a la gestión de las aguas pluviales como técnica, proceso, actividad o estructura que contribuya a reducir el contenido de contaminantes de la descarga de aguas pluviales implementándose por separado o en conjunto para maximizar su eficacia. Los BMP pueden enlazar métodos no estructurales (como una buena limpieza o mantenimiento preventivo) con implementaciones estructurales (como pueden ser los sistemas de biorretención o infraestructuras verdes) para lograr el objetivo general de prevención de la contaminación.
- El término SCM (Stormwater Control Measures o medidas de control de aguas pluviales en español), fue acuñado por el Consejo de Investigación Nacional de los Estados Unidos para referirse al conjunto de medidas tanto estructurales (sistemas de biorretención) como no estructurales (desconexión de bajantes). Dicho término surgió con el fin de reemplazar al término BMP ya que su denominación no transmite un juicio acerca de si una determinada práctica es la mejor o no, pero cabe señalar

que dicho objetivo no se ha cumplido ya que el término BMP sigue apareciendo en muchos manuales de diseño.

Existen en la bibliografía numerosas publicaciones sobre distintos aspectos relacionados con este tipo de tecnologías. Por ejemplo, (Damodaram & Zechman, 2012) desarrolla una metodología de simulación-optimización para determinar los mejores emplazamientos de LID de recogida de aguas pluviales y pavimentos permeables con el fin de optimizar al máximo su eficiencia y de esta forma reducir al máximo los impactos hidráulicos medidos como alteraciones del caudal punta cumpliendo siempre con los objetivos presupuestarios predefinidos.

Estudios realizados por otros investigadores se centran en comparar los efectos hidrológicos y de calidad del agua entre un desarrollo convencional basado en la gestión centralizada de las aguas pluviales y un desarrollo basado en técnicas LID en una zona comercial de Raleigh, Carolina del Norte (Wilson, Hunt, Winston, & Smith, 2015). Las soluciones LID incluyen tanto infraestructuras verdes (sobre el suelo) como grises (bajo la superficie). Algunas de estas soluciones LID que se llevaron a cabo pueden observarse en la Figura 5, mientras que el desarrollo convencional está integrado por una cuenca de retención en seco y zanjas de pretratado, Figura 4. Como resultado de la aplicación de estas dos soluciones frente a una serie de eventos de precipitación se observó una reducción tanto del volumen total de escorrentía como del caudal pico de descarga en ambos casos, aun así, en este último resultó ser 11 veces mayor en el caso del desarrollo convencional. Además, destacar que debido a la infiltración y retención generada por la aplicación de las LID una fracción importante de la escorrentía es transferida desde la superficie al subsuelo reduciendo los impactos erosivos causados por la escorrentía superficial en la recepción de los cursos de agua al tiempo que proporcionan un beneficio para la recarga de aguas subterráneas.



Figura 4.- Características del diseño del desarrollo convencional: (a) cuenca de detención seca con cuneta verde perimetral y estructura de hormigón en salida; (b) zanjas de pretratado.



Figura 5.- LID SCMs: (a) Cunetas verdes; (b) celdas de biorretención; (c) cámara de detención subterránea; (d) zanjas de infiltración subterránea (Wilson et al., 2015).

Otros autores han tratado de evaluar con éxito el beneficio potencial de introducir soluciones LID para hacer frente a los efectos que el cambio climático generará tanto sobre la intensidad de los eventos de precipitación como en los caudales punta de escorrentía superficial en la ciudad de Nueva York (Zahmatkesh, Burian, Karamouz, Tavakol-Davani, & Goharian, 2015). En este caso, las distintas soluciones introducidas para controlar la escorrentía de aguas pluviales (recolección de agua de lluvia, pavimentos porosos y sistemas de biorretención) fueron diseñados, modelados y evaluados empleando el programa SWMM en su versión 5. Los resultados más destacados arrojados por este estudio señalan que mientras que el volumen total de precipitación media anual que los modelos de cambio climático predicen implica un aumento del 48%, los LID son capaces de proporcionar una reducción del 41% en el volumen anual de escorrentía reduciendo además los caudales pico entre un 8 y un 13%. Por tanto, según Zahmatkesh et al., (2015) la implementación de soluciones LID no solo producen beneficios en la mitigación de la escorrentía pluvial y su calidad en el régimen de precipitaciones actual sino también para futuros escenarios de cambio climático.

2.2. Tanques de retención

A pesar de todas las bondades expuestas en el apartado anterior, la implantación de muchas de estas soluciones no estructurales resulta prácticamente inviable en muchas ciudades debido no solo a los elevados costes de mantenimiento sino también a los derivados de la propia implantación de las mismas debido al tipo de desarrollo u ocupación existente en la gran mayoría de los núcleos urbanos ya desarrollados.

Por todo ello, se concluye que no solo se debe centrar la atención en reducir las escorrentías de entrada a la red sino también se debe prestar atención al desarrollo de técnicas de control de caudales. La idea es diseñar estrategias que permitan laminar los picos de caudal de escorrentía de pluviales y aumentar al máximo la capacidad de las redes existentes. Una posible solución a estos problemas puede ser la implantación de los denominados tanques de retención o tanques de tormenta. Este tipo de estructuras persiguen dos objetivos fundamentales en relación a las aguas pluviales: control de inundaciones y control de la contaminación.

Los depósitos de retención situados en la red de alcantarillado pueden ser:

- Depósitos en Línea: el agua procedente de aguas arriba del sistema siempre los atraviesa.
- Depósitos fuera de Línea (paralelo): solo entran en funcionamiento cuando en un determinado punto de la red se supera un determinado caudal. En ese instante, el caudal en exceso es conducido al tanque de retención donde se almacena, y permanece allí hasta que el aguacero cesa cuando se devuelve a la red de saneamiento en un punto situado aguas abajo del mismo.

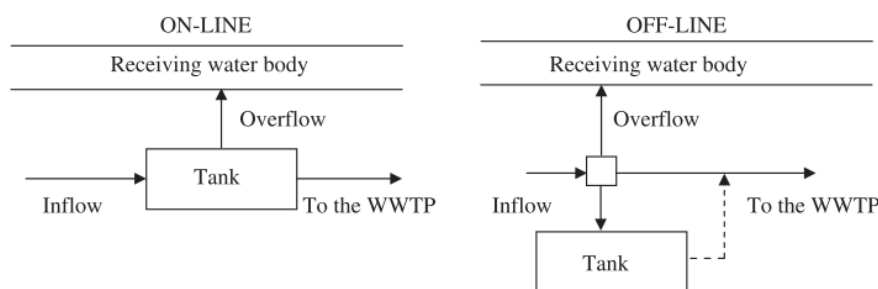


Figura 6.- Esquemas de tanques de retención en línea y fuera de línea (Calabrò & Viviani, 2006).

Aunque la disposición en línea suele ser más económica, la elección de una tipología u otra dependerá del volumen a retener, así como de las posibilidades de ejecución de ambas opciones.

En los últimos años han sido numerosos los investigadores que han dirigido sus estudios en este tipo de estructuras. Algunos como (Calabrò & Viviani, 2006) centraron sus

investigaciones en relación a la vertiente del objetivo de calidad perseguido por estas infraestructuras. Para ello, trataron de evaluar el rendimiento de estos tanques de tormenta en función de distintos aspectos como pueden ser su volumen o la disposición en línea o fuera de línea de los mismos, a partir de los resultados obtenidos mediante una simulación continua que permite obtener una mejor evaluación de su comportamiento para largos periodos de tiempo.

Según Calabrò & Viviani, (2006) un aumento del volumen de tanque no afecta proporcionalmente a su rendimiento. La presencia de estas estructuras permite reducir significativamente la cantidad de SST descargada en los cuerpos de agua receptores, siendo los tanques fuera de línea más eficientes en relación con el efecto de la primera escorrentía.

Otros autores han enfocado sus investigaciones en el aspecto cuantitativo (Andrés-Doménech, Montanari, & Marco, 2012). Estos autores estudiaron la eficiencia de los tanques de retención sobre la capacidad de recuperación (resiliencia) de las aguas pluviales en relación con los cambios en el régimen de precipitaciones inducidos por los efectos del cambio climático. Proponen un modelo analítico-probabilístico para evaluar la eficiencia volumétrica en la reducción del desbordamiento de los tanques de tormenta. Sus investigaciones conducen a que, para el caso concreto de la ciudad de Valencia, los efectos del cambio climático en la eficiencia de estos tanques se ven suavizados por la acción filtrante de las cuencas urbanas, de manera que la transformación lluvia-escorrentía lamina la variabilidad de las precipitaciones en el tiempo. En términos relativos, la variabilidad en eficiencia es menor que la de precipitaciones y por eso se espera que los tanques de tormenta puedan ser resilientes, pero, para conseguir el objetivo de mantener un determinado nivel de eficiencia es necesario realizar algunas adaptaciones en el diseño de estos tanques, tanto en su volumen como en el caudal de vaciado de los mismos.

Además, estos autores concluyen a partir de sus investigaciones que la calidad del agua vertida al medio receptor no es proporcional al volumen de rebose. Por todo ello, para identificar las mejores políticas de adaptación de estos tanques, se va a requerir de un análisis combinado de la calidad del agua tanto en la propia red de alcantarillado como en el medio receptor unido al análisis propiamente dicho sobre la eficiencia de los tanques.

Estudios similares establecen que los sistemas de tanques en derivación logran mejores resultados que los de un solo tanque (De Paola & De Martino, 2013). Además, concluyen que si se vacía el tanque inmediatamente después de finalizar el evento de precipitación se consiguen niveles significativos de eficiencia y ventajas operativas.

Mediante algoritmos genéticos, otros investigadores han centrado sus estudios en desarrollar procedimientos para encontrar la solución óptima en cuanto a número, posición, configuración y tamaños de tanques de retención aplicado al caso particular de una determinada red de drenaje urbano con el objetivo de reducir calados y velocidades

máximas de flujo para un determinado periodo de retorno y siempre garantizando los requisitos de diseño locales (Cimorelli et al., 2016). En este caso, haciendo uso de un modelo semi-distribuido con la onda cinemática como modelo de tránsito de avenidas y un enfoque variacional para evaluar las características de los flujos críticos asociados un determinado periodo de retorno y sus resultados indican que una adecuada solución de implementación de estos tanques puede ser muy efectiva a la hora de rehabilitar redes de drenaje existentes siendo sus costes asociados sustancialmente inferiores respecto a una solución encaminada únicamente a la renovación de tuberías.

En el caso de este último estudio, se trata de tanques de retención en línea constituidos por una serie de tubos de gran diámetro fabricados en hormigón armado con mayor capacidad de almacenamiento y tiempo de retención prolongado, destinados a reemplazar uno o más tramos de tubería de la red preexistente. Como puede observarse en las Figura 7a y Figura 7b, cada uno de estos sistemas de retención se compone de una serie de estos tubos de igual longitud y diámetro dispuestos en paralelo, donde la descarga procedente de aguas arriba se reparte entre los distintos módulos en paralelo gracias a una adecuada transición de entrada. Estas transiciones tanto de aguas arriba como hacia aguas abajo poseen unas paredes exteriores e interiores con unas determinadas características que permiten redirigir el flujo de forma adecuada.

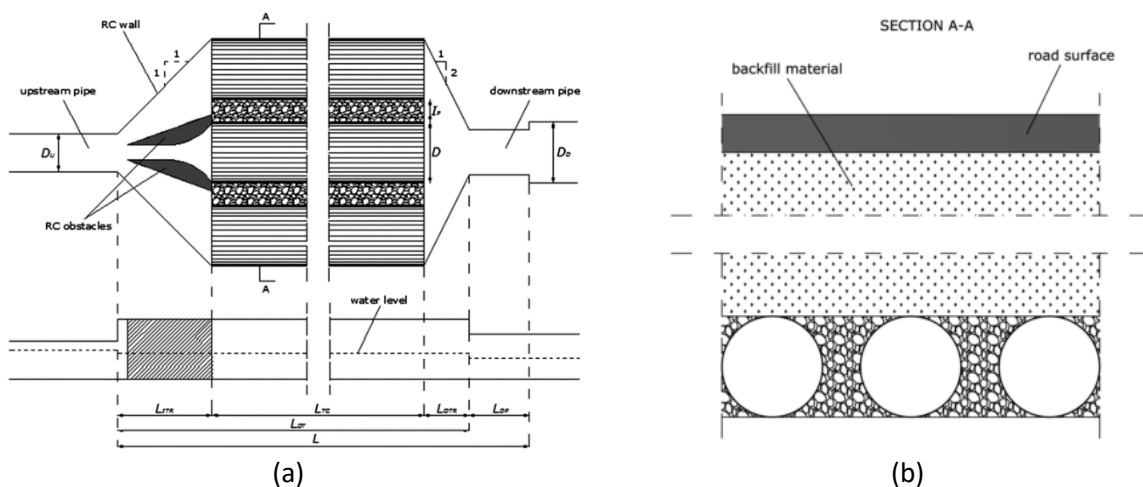


Figura 7.- Vistas en planta (a) y transversal (b) del sistema de tanque de retención (Cimorelli et al., 2016).

Para conseguir un adecuado diseño de cualquier tanque de retención, así como su gestión, hay que tener en cuenta numerosos aspectos que van desde conocer perfectamente la hidrología, realizar modelos hidráulicos y métodos que conduzcan diseños y modelos de gestión óptimos, etc. Pero si se pretende establecer un marco metodológico común para aplicar en cualquier caso práctico, se debe tener en cuenta la existencia de una serie de complejidades inherentes como pueden ser diferentes objetivos y criterios de diseño, distintas políticas locales, así como diversas incertidumbres cuya aparición es inevitable para cualquier sistema. Por ello, (Duan, Li, & Tao, 2016) realizan una serie de investigaciones para

ver cuál es realmente la influencia de estas incertidumbres (como pueden ser el coste total o el riesgo de inundación) en el establecimiento de este marco metodológico óptimo, para ello toman como punto de partida los resultados y conclusiones que dichos autores extrajeron de un estudio previo (Li, Duan, Yan, & Tao, 2015) en el que establecen dicho marco metodológico para el diseño de los tanques de retención pero sin introducir los factores de incertidumbre.

En Europa, algunos investigadores han centrado sus esfuerzos en determinar el rendimiento de los tanques de retención de pluviales según configuraciones de diseño y de funcionamiento mediante un enfoque integrado (Todeschini, Papiri, & Ciaponi, 2012). A partir de un modelo de gestión de aguas pluviales desarrollado por la EPA para simular el proceso lluvia-escorrentía y la dinámica de contaminantes en cuenca y redes de drenaje; y estableciendo varios índices de rendimiento para describir la atenuación de los efectos de la contaminación sobre el medio natural, la reducción de los gastos de gestión y mantenimiento del sistema de drenaje urbano, limitación de costes en la planta de tratamiento, etc.

El resultado de este estudio demuestra que los tanques de retención de aguas pluviales constituyen una solución útil contra la contaminación ambiental. Sin embargo, las configuraciones de diseño y las reglas de operación influyen en el nivel de beneficios ecológicos sobre el medio ambiente receptor, en los costes de inversión y mantenimiento, así como en la funcionalidad del sistema de drenaje urbano y de la planta de tratamiento de aguas residuales. Todo ello conduce a la necesidad de un enfoque integrado para evaluar el rendimiento de implantar este tipo de soluciones estructurales en las grandes áreas urbanas.

Finalmente, en España también se han realizado investigaciones sobre este tipo de infraestructuras en cuanto al desarrollo de estrategias de operación para minimizar el impacto de descargas al medio receptor. (Llopart-Mascaró et al., 2014) estudian las posibilidades de reducir la contaminación de una cuenca drenante situada en la ciudad de Barcelona (España) como caso de estudio para evaluar las estrategias de optimización de la gestión de redes de alcantarillado en la región mediterránea.

Los resultados del análisis muestran que la introducción de un gran tanque de tormenta reduce significativamente los impactos negativos asociados a la descarga en tiempo lluvioso. Según Llopart-Mascaró et al., (2014) el rendimiento de los grandes tanques de tormenta puede optimizarse aprovechando la sedimentación natural del agua de lluvia almacenada. La determinación de la condición óptima de estratificación de la columna de agua permite mejorar la calidad del agua vertida al medio. Esto se traduce en un aumento de la capacidad de regulación anual del tanque de un 15% y, en una reducción de la contaminación de las aguas vertidas al medio de un 60% en SS y DBO₅.

Para estos autores es esencial entender los procesos físico-químicos que tienen lugar en el interior de la red de alcantarillado durante los eventos de precipitación: análisis del factor de dilución o existencia del primer lavado, así como los procesos de sedimentación en el seno de la columna de agua dentro de los tanques de tormenta con el fin de optimizar su funcionamiento, la gestión global de las redes de alcantarillado, las aguas receptoras y la EDAR.

Además, los autores añaden que el impacto ambiental de la infraestructura asociado a los materiales del tanque por m^3 de agua regulada se reduce con el aumento de la capacidad de anual de regulación. A ello se le suma el hecho de que un modo operativo que aprovecha la sedimentación natural reduce el impacto y el consumo de productos químicos y de energía empleado en la EDAR debido al menor volumen total de agua a tratar.

Finalmente, se proponen como futuras líneas de investigación el desarrollo de estrategias para reducir los impactos asociados con el ciclo de vida del conjunto de la red de alcantarillado incluyendo la construcción, operación y mantenimiento de tanques de tormenta.

Como se puede comprobar la mayoría de las investigaciones desarrolladas en los últimos años relacionadas con los tanques de retención de aguas pluviales o tanque de tormenta tienen que ver más con los efectos que generan en la calidad del agua que en aspectos más relacionados con sus efectos sobre el flujo, pérdidas de carga o laminación de caudales pico.

La revisión de los estudios citados en este punto respecto al diseño, implementación y comportamiento de los tanques de retención constituye una información de suma importancia para abordar el estudio del comportamiento de los tanques de retención constituidos por elementos modulares de polietileno para la mejora de las condiciones de funcionamiento de las redes de drenaje urbano frente a los efectos del cambio climático.

Sin embargo, el desarrollo de este trabajo está enfocado hacia el aspecto cuantitativo del flujo en el interior de los tanques de retención lo que sumado al empleo de unos elementos modulares con geometrías complejas aboca al uso de las técnicas de la dinámica de fluidos computacional como herramienta de enorme ayuda para la consecución de los objetivos perseguidos.

2.3. Modelación CFD aplicada a tanques de retención y sus fundamentos teóricos.

En los últimos años, ha proliferado la aplicación de técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD) para llevar a cabo estudios e investigaciones en una gran diversidad de materias no siendo los tanques de retención o tanques de tormenta una excepción, pero las primeras aplicaciones CFD en estructuras similares fueron aplicadas a los tanques de agua de

las redes de suministros para mejorar su eficiencia hidráulica (Stamou, 2008). Aunque también se pueden encontrar algunos trabajos que aplican las técnicas CFD a tanques de retención.

En el ámbito de los tanques de retención, las técnicas CFD se vienen empleando para determinar tanto aspectos relacionados con la dinámica del flujo de agua que se produce en su interior como para conocer mejor el comportamiento de las partículas de sólidos que se introducen en los mismos, arrastradas por el agua.

Respecto a los tanques de retención, señalar que se han aplicado técnicas CFD para realizar simulaciones de flujo en 3D en tanques rectangulares (Adamsson, Bergdahl, & Lyngfelt, 2005). En este estudio, se investiga la aplicabilidad del empleo de simulaciones tridimensionales como herramienta de diseño de tanques de retención de aguas pluviales. Para ello, las simulaciones 3D generadas mediante técnicas CFD son comparadas con mediciones de patrones de flujo y tiempos de residencia obtenidos para un modelo de tanque de retención de dimensiones (13 x 9 x 1 m) ensayado en laboratorio.



Figura 8.- Modelo del tanque de retención de laboratorio (Adamsson et al., 2005).

La determinación del patrón de flujo se realiza mediante el rastreo de marcadores (boyas) mediante un sistema compuesto por cámaras, procesadores de video y el software MacReflex. Las cámaras envían pulsos de luz para iluminar los marcadores, los procesadores de vídeo, uno por cámara, registran la posición y calculan el punto medio del marcador. Los patrones de flujo se miden a tres profundidades distintas por debajo de la superficie: 0.15, 0.5 y 0.85 m, repitiéndose cada prueba al menos una vez para 8 y 20 l/s.

Por otra parte, el seguimiento mediante trazador permite determinar el tiempo de residencia del agua en el tanque. Estos estudios se llevan a cabo mediante la inyección de un trazador fluorescente en la conducción de entrada al tanque, 10 metros aguas arriba de la

misma para proporcionar una buena mezcla a su llegada al tanque. Un fluorómetro mide la concentración de trazador a la salida, de forma continua en función del tiempo.

Para el desarrollo de las simulaciones 3D uno de los modelos más ampliamente utilizados resulta ser el software de volúmenes finitos FLUENT de CFD. Como el objetivo es emplear estas simulaciones como herramienta de diseño ingenieril, se decide introducir una geometría simple y elegir aquellos modelos y parámetros recomendados en el propio manual de FLUENT, dejando los valores por defecto en la medida de lo posible.

El modelo computacional del tanque experimental era básicamente una caja rectangular de 1 m de profundidad con una superficie de 13 x 9 metros. La entrada es circular y está situada justo por debajo de la superficie de agua en el centro de uno de los lados cortos, mientras que la salida está constituida por un vertedero rectangular situados a 0.06 m de profundidad en el centro del lado opuesto.



Figura 9.- Tubería de entrada y vertedero de salida (Adamsson et al., 2005).

Algunos de los datos más relevantes del modelado de este estudio son un volumen mallado que se compone de 144.000 celdas hexaédricas, refinándose la malla en aquellas zonas donde se esperan elevados gradientes de velocidad. Para calcular el flujo 3D se emplean las ecuaciones de Navier-Stokes también conocidas como ecuaciones de Reynolds. Se emplea el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ (Launder & Spalding, 1974) válido para Reynolds elevado y viscosidad isotrópica, con funciones de pared estándar. Además, las simulaciones se llevan a cabo en “transitorio”, con un intervalo de tiempo variable entre 0.25 segundos cuando se añade el trazador hasta los 1000 segundos hacia el final de la simulación con velocidades de flujo más bajas. La concentración de trazador a la salida se registra a lo largo de todo el proceso y, cuando el 85% del trazador introducido originalmente en el tanque ha salido del mismo, se detiene la simulación.

Las conclusiones obtenidas en este estudio son muy importantes porque de la comparación de resultados se puede afirmar que para velocidades de flujo elevadas o caudales altos, existe una importante correspondencia entre las predicciones arrojadas por las simulaciones CFD y los resultados observados en laboratorio.

Aunque para caudales pequeños sí que existen discrepancias, los resultados obtenidos muestran el potencial del empleo de técnicas CFD como herramienta ingenieril de diseño de tanque de retención de aguas pluviales. Incluso con un conocimiento limitado en el manejo del software es posible obtener resultados razonables. Los beneficios del modelado CFD son, sobre todo, las posibilidades que proporciona para investigar diferentes diseños antes de la construcción de los tanques o incluso el desarrollo de posibles mejoras a introducir en los ya existentes.

Otros estudios más recientes hacen uso de las técnicas CFD para llevar a cabo no solo un estudio del comportamiento del flujo en el interior del tanque de aguas pluviales de una red de alcantarillado combinado, sino que también son capaces de determinar la sedimentación y separación de sólidos que se produce en el interior de los tanques de retención gracias a la opción de rastreo de partículas individuales que posee el software CFD (Dufresne, Vazquez, Terfous, Ghenaim, & Poulet, 2009).

Respecto al modelado CFD desarrollado en este caso señalar que, dado que se consideran concentraciones de contaminantes reducidas, la fase sólida no tiene influencia en el comportamiento del flujo. En cuanto a la fase líquida, dado que todos los flujos de agua que circulan por las redes de alcantarillado son turbulentos, se van a resolver las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo usando la descripción de Reynolds para las velocidades instantáneas “u, v y w” y para la presión instantánea “p”, véase ecuaciones (1)-(4).

$$u = U + u' \quad (1)$$

$$v = V + v' \quad (2)$$

$$w = W + w' \quad (3)$$

$$p = P + p' \quad (4)$$

Donde:

u: velocidad instantánea en la dirección X para coordenadas cartesianas.

U: velocidad promediada en el tiempo.

u': velocidad fluctuante.

A continuación, se muestran las ecuaciones de flujo turbulento de Navier-Stokes. La ecuación (5) es la ecuación de continuidad y la (6) es una de las tres ecuaciones de momento (dirección X).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{U}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \text{div}(\rho U \bar{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}[\mu \cdot \text{grad}(U)] + \left[-\frac{\partial(\overline{u'u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{u'w'})}{\partial z} \right] - \rho g_x \quad (6)$$

Además, se requiere de un modelo de turbulencia para describir el efecto de la componente aleatoria de la velocidad. En la literatura existen muchos modelos de turbulencia, entre ellos el modelo k- ϵ que se decide emplear en este caso por ser el más sencillo y a su vez, el más ampliamente validado. Este modelo de turbulencia es isotrópico y se basa en la hipótesis de Boussinesq para establecer la relación entre tensiones de Reynolds y tasas medias de deformación. De esta forma se pueden calcular los valores de las 6 tensiones de Reynolds que son desconocidas a priori ($-\rho u'u'$; $-\rho v'v'$; $-\rho w'w'$; $-\rho u'v'$; $-\rho v'w'$; $-\rho u'w'$). La primera tensión de Reynolds se resuelve mediante la ecuación (7), donde μ_t es la viscosidad turbulenta.

$$-\rho u'v' = \mu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (7)$$

El sistema queda perfectamente resuelto si μ_t es conocida. El modelo k- ϵ introduce dos nuevos términos; la energía cinética turbulenta, k, y su tasa de disipación por unidad de masa, ϵ , para el cálculo de la viscosidad turbulenta " μ_t ". La energía cinética turbulenta, k, es la correspondiente a la energía de las fluctuaciones de la velocidad, véase ecuación (8); mientras que la tasa de disipación por unidad de masa, ϵ , queda definida mediante la ecuación (9). Aquí, e'_{ij} hace referencia a la componente aleatoria de la velocidad de deformación, el ejemplo correspondiente al caso de e'_{xy} se muestra en la ecuación (10).

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) \quad (8)$$

$$\epsilon = 2 \frac{\mu}{\rho} \overline{e'_{ij}e'_{ij}} \quad (9)$$

$$e'_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u'}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial x} \right) \quad (10)$$

Tanto la energía cinética turbulenta como su ratio de disipación se rigen por dos ecuaciones de transporte cuya única expresión se corresponde con la ecuación (11).

$$\begin{aligned} & \text{Tasa de cambio de } k/\epsilon + \text{Tte. de } k/\epsilon = \text{Tte. de } k/\epsilon \text{ por difusión} + \\ & \text{Tasa de disipación de } k/\epsilon - \text{Tasa de destrucción de } k/\epsilon \end{aligned} \quad (11)$$

Finalmente, la viscosidad turbulenta, μ_t , se calcula mediante la ecuación (12). Donde C_μ es una de las cinco constantes que aparecen en el modelo de turbulencia k- ϵ .

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (12)$$

Para modelar la superficie libre del flujo se pueden emplear desde modelos bifásicos complejos hasta simplemente establecer una condición de contorno de simetría, la cual se caracteriza por ser la opción más sencilla estableciendo una velocidad normal cero, así como gradientes de velocidad nulos para todas las variables. La desventaja que presenta esta

opción es que la profundidad del agua no es un resultado de la simulación, empleándose para ello las profundidades de agua experimentales.

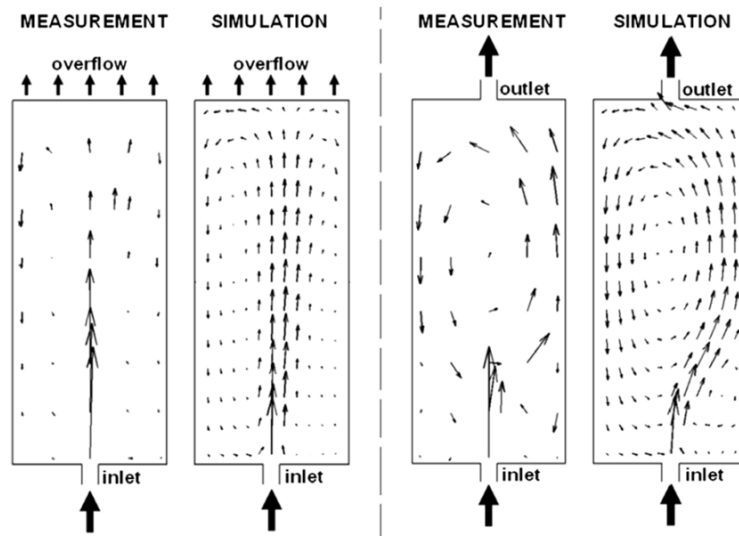


Figura 10.- Campos de velocidades experimentales y simulados (Dufresne et al., 2009).

Finalmente, gracias al trabajo de Dufresne et al., (2009) se concluye que las técnicas de dinámica de fluidos computacional constituyen una potente herramienta para el estudio no solo del comportamiento del flujo de agua en el interior de los tanques de tormenta sino también permiten modelar correctamente el transporte y deposición de sedimentos que tienen lugar en su interior.

Simplemente como ejemplo de comparación de algunos resultados, se presenta en la Figura 10 la comparación entre los campos de velocidades observados en laboratorio con los obtenidos mediante simulaciones CFD.

2.4. Cálculo computacional de la interfaz agua-aire y sus aplicaciones.

Uno de los objetivos principales del presente estudio será caracterizar el comportamiento hidráulico de los elementos modulares de polietileno que serán empleados, mediante agrupaciones de estos, en la construcción de una alternativa innovadora de tanques de retención de aguas pluviales frente a las estructuras convencionales de hormigón. Dada la compleja geometría de los mencionados elementos (ver Figura 1) es fácil suponer que la disipación energética introducida por estos no va ser despreciable en ningún caso, dado que el flujo de agua al circular por su interior será bastante complejo y caótico.

Para la correcta determinación y valoración de las pérdidas energéticas generadas por estas estructuras en función del caudal, la cual se pretende realizar a partir de los resultados de las diferentes simulaciones obtenidas computacionalmente, será muy importante que dichas simulaciones proporcionen una correcta solución para la interfaz agua-aire. Dado que se trabaja con dos fases (agua y aire), se opta por realizar las simulaciones empleando el

método VOF (Volume of Fluid) introducido por (Hirt & Nichols, 1981). Mediante este modelo VOF es relativamente sencillo obtener de forma adecuada la interfaz agua-aire buscada. Este método proporciona tanto la cantidad de agua como de aire que presenta cada una de las celdas en que se divide la geometría del modelo a simular.

La ecuación de continuidad para el seguimiento de la interfaz entre fases viene dada para el método VOF por la ecuación (13).

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (13)$$

Donde:

$\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}$: Transferencia de masa entre fases.

α_q : Fracción del volumen de fluido "q" en una celda, tomando el valor 0 si la celda está vacía y 1 si está completamente llena.

S_{α_q} : Término fuente, por defecto toma el valor cero.

En la bibliografía no se han encontrado estudios que empleen el método VOF para el caso de estructuras con geometrías tan complejas, pero sí que existen algunos ejemplos de aplicación de este método para el cálculo de la superficie libre de un flujo (generalmente agua) circulando por canales abiertos, sobre placas inclinadas, etc.

Algunos de los ejemplos del método VOF que se han aplicado los últimos años y que pueden servir de base para el desarrollo del proyecto de investigación que se pretende llevar a cabo suelen emplear este método junto con alguno o varios modelos de turbulencia para determinar la interfaz entre el aire y el agua en una configuración determinada y comparar estos resultados de las simulaciones con los observados experimentalmente en ensayos de laboratorio.

En un primer estudio se emplea el método VOF junto con el modelo de turbulencia k- ϵ para determinar el perfil que adopta la lámina de agua a lo largo de un canal en el que se dispone un vertedero de descarga lateral para distintas posiciones de resaltos en solera, Figura 11. De este estudio, se concluye que los resultados numéricos utilizando el método VOF, modelo de turbulencia k- ϵ realizable y resolución de las ecuaciones de momento de Navier-Stokes están en buen acuerdo con los resultados experimentales (Aydin, 2016).

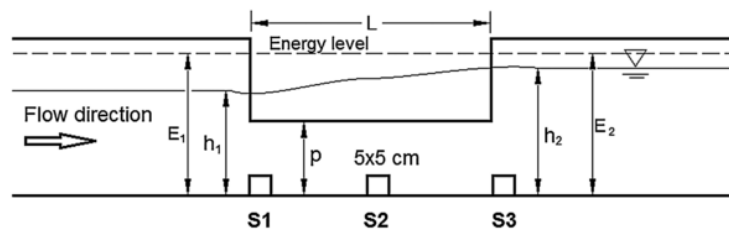


Figura 11.- Sección longitudinal del vertedero con ubicaciones del resalto en solera (Aydin, 2016).

Otros autores ensayaron el flujo de agua sobre vertedero semicilíndrico en canal abierto experimentalmente (Figura 12) y, posteriormente realizaron un modelo computacional aplicando el método VOF para la correcta determinación de la superficie libre de la lámina de agua (Akoz, Gumus, & Kirkgoz, 2014). En cambio, no solo trabajaron con un solo modelo de turbulencia, sino que probaron diferentes modelos para saber cuál proporcionaba mejores resultados en comparación con los datos obtenidos en laboratorio.

Se todos los modelos de turbulencia probados, $k-\epsilon$ estándar, $k-\epsilon$ RNG, $k-\epsilon$ realizable y $k-\omega$ modificado y RSM son los que proporcionaron mejores resultados.

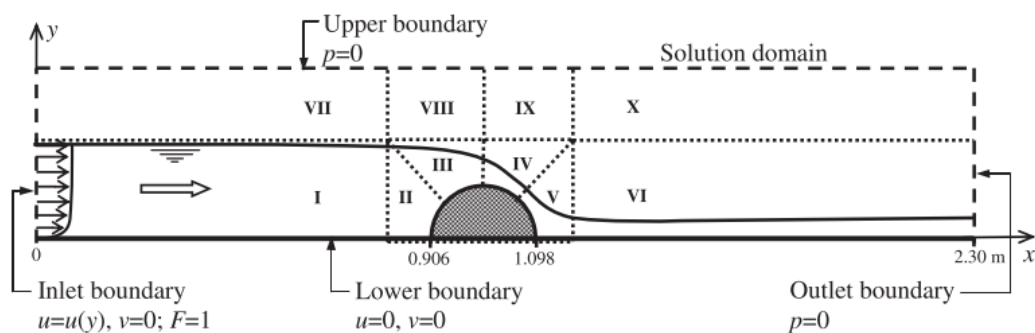


Figura 12.- Sección longitudinal del vertedero con las distintas ubicaciones del resalto en solera.

Como se puede observar en la Figura 13, el mallado se comprime cerca pared rígida para mejorar la precisión de cálculo en la zona de la capa límite donde el gradiente de velocidad es muy elevado.

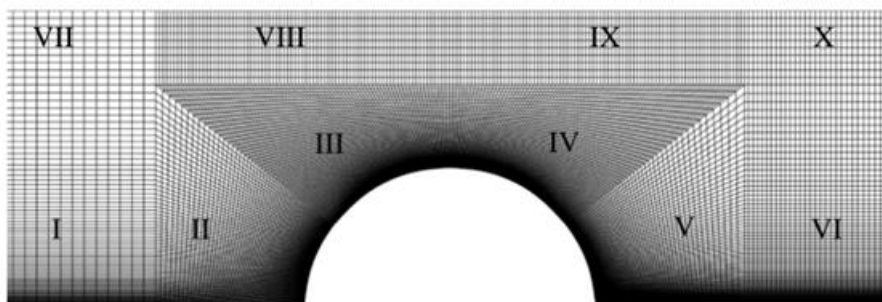


Figura 13.- Sección longitudinal del vertedero con las distintas ubicaciones del resalto en solera.

También se ha empleado el método VOF para determinar la superficie de la lámina de agua sobre vertederos o aliviaderos, (Hargreaves, Morvan, & Wright, 2007). Estos autores estudiaron la aplicación de modelo de turbulencia k- ϵ RNG junto con el método VOF para la determinación de la superficie libre de la lámina de agua sobre vertedero de cresta ancha. Tras realizar la validación con los ensayos de laboratorio, se consiguieron niveles aceptables de precisión.

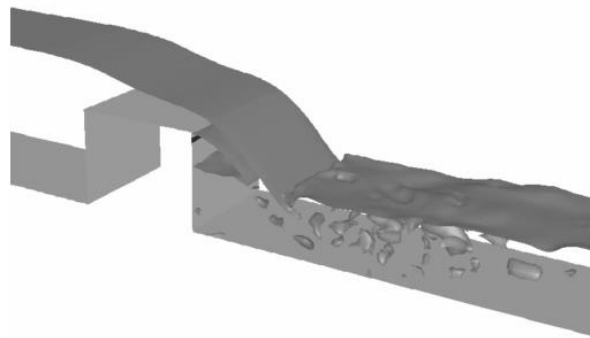


Figura 14.- Superficie libre obtenida computacionalmente, (Hargreaves et al., 2007).

Otros investigadores simularon computacionalmente el flujo de agua sobre un vertedero trapezoidal de cresta ancha empleando el método VOF y un modelo de turbulencia k- ϵ estándar en el que se emplea el método SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) desarrollado por Patankar, 1980 para unir adecuadamente las ecuaciones de presión y velocidad (Haun, Olsen, & Feurich, 2011).

También se han aplicado estas técnicas en vertederos circulares Figura 15. En este caso, los autores emplearon el método VOF para determinar la superficie libre y probaron con distintos modelos de turbulencia: RSM, k- ϵ RNG, k- ϵ Realizable, k- ω SST presentando todos ellos resultados acordes con los obtenidos experimentalmente (Rahimzadeh, Maghsoodi, Sarkardeh, & Tavakkol, 2014).

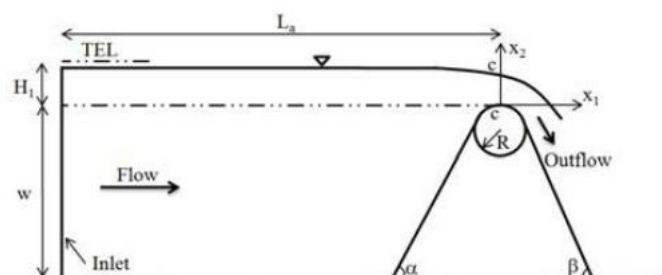


Figura 15.- Vista esquemática del vertedero circular (Rahimzadeh et al., 2014).

Finalmente, para determinar la superficie libre del agua que fluye sobre vertederos con sección trapezoidal y vertedero libre aplicando el método VOF para determinar la interfaz agua-aire (Figura 16) junto con el empleo del modelo de turbulencia k- ϵ estándar,

obteniéndose finalmente buena concordancia entre los resultados de las simulaciones y los de laboratorio (Ramamurthy, Qu, & Vo, 2006).

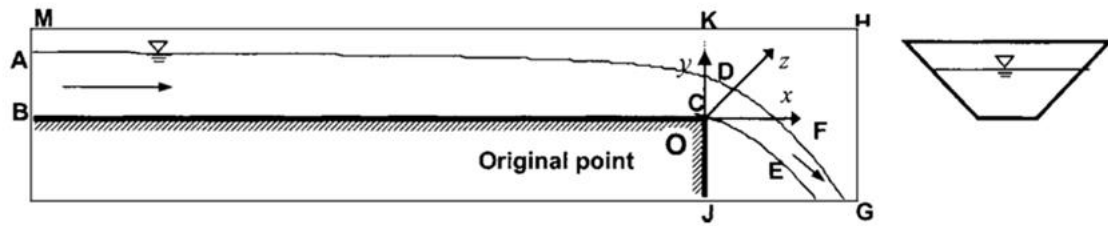


Figura 16.- Geometría del vertedero libre en canal de sección trapezoidal (Ramamurthy et al., 2006).

Aunque una buena parte de las aplicaciones del método VOF para el cálculo de la superficie libre del agua encontradas en la bibliografía están relacionadas con la presencia de un vertedero o aliviadero, existen algunos estudios en los que se aplica el método VOF junto con uno o varios modelos de turbulencia para realizar las simulaciones computacionales y comparar sus resultados con los obtenidos en los respectivos ensayos de laboratorio y de esta forma validar si los parámetros de cálculo definidos son aplicables a los correspondientes casos de estudio.

Entre estos estudios se han encontrado modelados tridimensionales de vertido de embalses (Andersson, Andreasson, & Staffan Lundström, 2014); en transiciones entre cambios de sección (rectangular a trapezoidal) en canales abiertos (Asnaashari, Akhtari, Dehghani, & Bonakdari, 2016); para caracterizar el flujo turbulento generado sobre vertedero escalonado en cuanto a superficie libre, velocidades y presiones (Chen, Dai, & Liu, 2002); para la determinación de la superficie libre en flujos supercríticos en zonas de confluencia de canales o zonas de ensanchamiento (Feurich & Olsen, 2012).

También se ha estudiado el campo de velocidades del flujo en codos de 90° (Gholami, Akbar Akhtari, Minatour, Bonakdari, & Javadi, 2014); los efectos generados en la superficie libre por la acción de un cuerpo de revolución sumergido a distintas profundidades y según distintas velocidades de rotación (Jagadeesh & Murali, 2010); para valorar la interacción entre la superficie libre de un fluido con la presencia de una serie de cilindros móviles haciendo uso de mallas también móviles que se desplazan junto con los cilindros (Mnasri, Hafsia, Omri, & Maalel, 2014). También se han encontrado estudios sobre flujos de rotura de presas sobre lecho inicialmente seco y con presencia de obstáculos (Ozmen-Cagatay & Kocaman, 2014); en simulaciones bidimensionales de un flujo impulsado por aire (Thiruvengadam, Armaly, & Drallmeier, 2009).

Para el estudio del comportamiento de un flujo en fase líquida sobre una placa de acero inclinada para diferentes grados de inclinación, con y sin flujo de gas a contracorriente (Xu, Yuan, Repke, & Wozny, 2012), en este explica el esquema de “reconstrucción geométrica” definido para realizar una adecuada interpolación entre ambas fases cerca de su interfaz.

Este esquema representa la interfaz entre fluidos utilizando un enfoque lineal a tramos, asumiendo que dicha interfaz posee una pendiente lineal dentro de cada celda y, utiliza esta forma lineal para el cálculo de la advección del fluido a través de las caras de las celdas, siendo este esquema el más preciso aplicable al flujo multifásico.

Señalar que también se ha empleado el método VOF para simular transitorios de flujo en tuberías de llenado con presencia de aire atrapado (Zhou, Liu, & Ou, 2014), en este estudio se emplea el método PISO (Pressure Implicit with Spilling of Operators) para llevar a cabo un acoplamiento correcto entre las ecuaciones de presión y velocidad.

Finalmente, recalcar que en todos los estudios mencionados en los párrafos anteriores de llega a la conclusión de que la simulación computacional empleando el método VOF para el cálculo de la superficie libre en sistemas bifásicos y multifásicos junto con la aplicación de los modelos de turbulencia correspondientes, generalmente k- ϵ estándar, k- ϵ RNG y k- ϵ Realizable, constituyen una metodología eficaz y adecuada para abordar correctamente este tipo de problemas.

2.5. Rugosidad equivalente

Uno de los objetivos finales del presente estudio de investigación es proponer un modelo unidimensional de comportamiento de estos elementos modulares de polietileno capaz de poder ser implementado en el software de modelación de análisis de redes de drenaje SWMM, para ello, se debe conseguir cuantificar el valor del coeficiente de rugosidad de Manning que introducen estos elementos, así como el valor del coeficiente de pérdidas localizadas en las zonas de contacto entre elementos. En la bibliografía no se ha realizado nada igual al respecto, pero sí que se han encontrado algunas publicaciones que tratan de establecer un valor de la rugosidad equivalente en lechos de canales naturales o artificiales (Cheng, 2015), la generada por obstáculos en la solera de un canal abierto (Christodoulou, 2014) o la rugosidad equivalente en superficies gravosas (Qin & Ng, 2012).

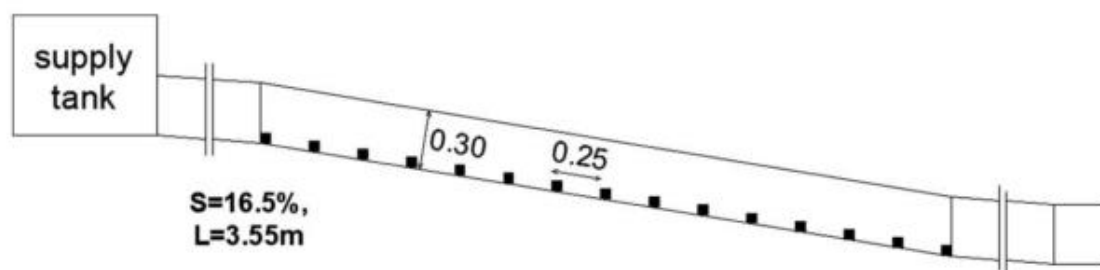


Figura 17.- Esquema de la configuración experimental (Christodoulou, 2014).

2.6. Caso de estudio.

En el presente estudio de investigación, se va a determinar la disipación energética introducida por unos elementos modulares de polietileno que pretenden ser empleados en la construcción de tanques de retención implementados en las redes de drenaje urbano como alternativa innovadora en la mitigación de los crecientes caudales pico consecuencia de la alteración en los regímenes de precipitaciones por efecto del cambio climático en amplias regiones del planeta. Para llevar a cabo este proceso se va a hacer uso de las técnicas de dinámica de fluidos computacional también conocidas como técnicas CFD. El objetivo es conseguir una metodología de cálculo que permita obtener simulaciones que proporcionen resultados satisfactorios y para ello, se validarán los mismos con datos obtenidos de ensayos realizados en laboratorio para una serie de configuraciones de elementos modulares predeterminadas.

La finalidad es poder afirmar que las técnicas CFD resultan válidas para modelar la disipación energética de estas complejas estructuras modulares de manera que su empleo permita sustituir a los ensayos de laboratorio con el ahorro económico que ello conllevaría.

Dado que la potencia computacional del 99% de los ordenadores actuales aplicada al ámbito de las técnicas CFD no permitiría trabajar con un elevado número de elementos modulares, a priori resultará imposible introducir un modelo que reproduzca el comportamiento del flujo de agua en el interior de depósitos de retención modulares de tamaño real. Por ello, a lo largo del desarrollo del presente estudio, se pretenderá proponer un modelo unidimensional de comportamiento de estas estructuras modulares en las dos direcciones, obteniendo los valores óptimos de los parámetros que caracterizan las pérdidas tanto localizadas (k) como distribuidas (N de Manning) introducidos por ellos como si cada uno de estos elementos se asemejara a tramos de conducciones con elevadas pérdidas de carga en ambas direcciones.

El objetivo será conseguir introducir estos modelos unidimensionales en un software de análisis de redes de drenaje urbano como el SWMM, de manera que mediante este programa se puedan llegar a modelar modelos más complejos que simulen de forma correcta el comportamiento de tanques de retención de grandes dimensiones.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS CONFIGURACIONES DE ESTUDIO

Con el propósito de determinar el comportamiento hidráulico de los elementos modulares o Aquacell, así como la disipación de energía que tiene lugar en ellos en sus dos direcciones se propone la realización de distintas configuraciones de estos elementos modulares que van a ser sometidas a modelación computacional mediante técnicas CFD.

3.1. Configuración 1x2x1.

Se denomina así a la configuración que presenta una sola fila de Aquacells en dirección transversal al flujo, dos filas en dirección vertical y una sola fila en la dirección longitudinal del mismo, para un total de 2 Aquacells dispuestos en el interior del canal, ver Figura 18.

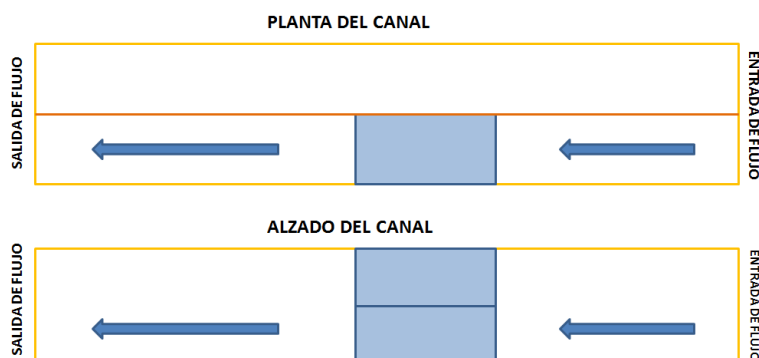


Figura 18. Distribución en planta y alzado de Aquacells para la configuración 1x2x1.

En este caso se utiliza la mitad del canal para conseguir que la capacidad de bombeo del sistema permita disponer de niveles de agua más elevados. El objetivo que se persigue con esta configuración es estudiar la disipación energética longitudinal que presenta una sola de las estructuras modulares analizadas.

3.2. Configuración 1x2x4.

Se denomina así a la configuración que presenta una sola fila de Aquacells en dirección transversal al flujo, dos filas en dirección vertical y cuatro filas en la dirección longitudinal del mismo, para un total de 8 Aquacells dispuestos en el interior del canal, ver Figura 19.

Al igual que en la configuración anterior se utiliza únicamente la mitad del canal para aprovechar al máximo la capacidad de las bombas del sistema. El objetivo de esta configuración es comprobar el efecto que tiene repetir la configuración 1x2x1 varias veces en dirección longitudinal. La idea es comprobar si la disipación energética de "n" Aquacells en serie es "n" veces la de un Aquacell aislado.

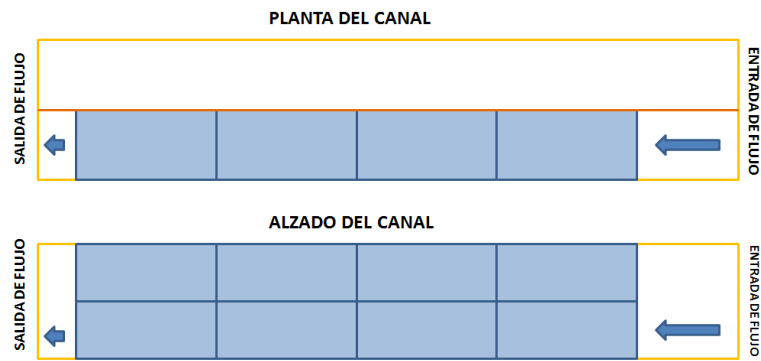


Figura 19. Distribución en planta y alzado de Aquacells para la configuración 1x2x4.

3.3. Configuración 2x2x1.

Se denomina así a la configuración que presenta dos filas de Aquacells en dirección transversal al flujo, dos filas en dirección vertical y una sola fila en la dirección longitudinal del mismo, para un total de 4 Aquacells dispuestos en el interior del canal, ver Figura 20.

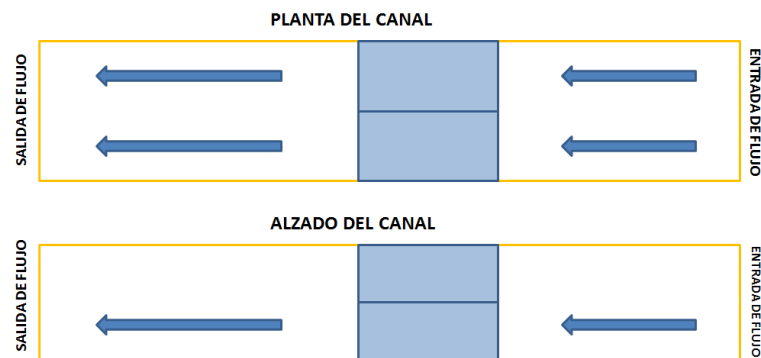


Figura 20. Distribución en planta y alzado de Aquacells para la configuración 2x2x1.

En este caso se trata de una configuración similar a la 1x2x1, pero utilizando la totalidad del ancho del canal disponible. Por ello se disponen dos filas de Aquacells en paralelo. El objetivo de esta configuración es validar si los resultados obtenidos para una única fila de Aquacells se repiten cuando se instalan "n" estructuras modulares en paralelo.

3.4. Configuración 2x2x4.

Se denomina así a la configuración que presenta dos filas de Aquacells en dirección transversal al flujo, dos filas en dirección vertical y cuatro filas en la dirección longitudinal del mismo, para un total de 16 Aquacells dispuestos en el interior del canal, ver Figura 21.

En este caso se aprovecha al máximo la capacidad de ensayo del canal ya que se instala el máximo de elementos posibles. El objetivo es validar si los resultados de una fila de Aquacells transversalmente al flujo se repite cuando existen varias filas de estos de forma consecutiva.



Figura 21. Distribución en planta y alzado de Aquacells para la configuración 2x2x4.

3.5. Configuración 1x2x1T

Esta configuración es idéntica a la configuración 1x2x1 explicada anteriormente, pero con la diferencia de que los Aquacells están girados 90°, ver Figura 22.

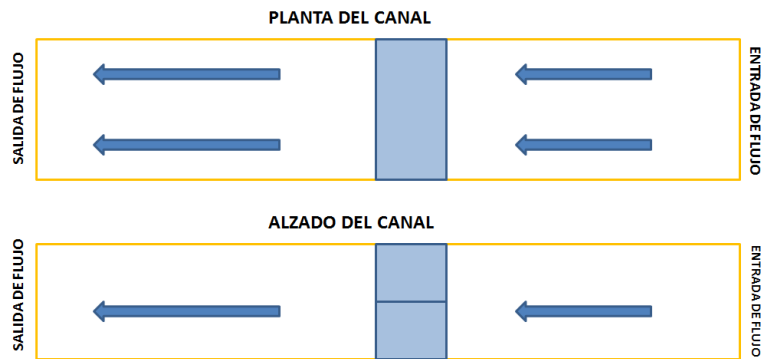


Figura 22. Distribución en planta y alzado de Aquacells para la configuración 1x2x1T.

El objetivo que se persigue en este caso es determinar el comportamiento de los Aquacells cuando el flujo circula a través de los mismos en una dirección transversal a su geometría. Se trata de repetir los mismos ensayos que en la configuración 1x2x1, pero con el Aquacell instalado transversalmente. El objetivo final es determinar la disipación energética en una dirección perpendicular a la determinada en la configuración 1x2x1.

3.6. Configuración 1x2x8T.

Esta configuración es idéntica a la configuración 2x2x4 explicada anteriormente, pero con los 16 Aquacells girados 90°, ver Figura 23.

El objetivo de esta configuración es comprobar si la instalación de n filas de Aquacells genera una disipación energética n veces superior a la instalación de un único Aquacell. Se trata de estudiar la influencia que tiene la instalación de varios elementos modulares en serie cuando el flujo es transversal a la geometría del Aquacell.

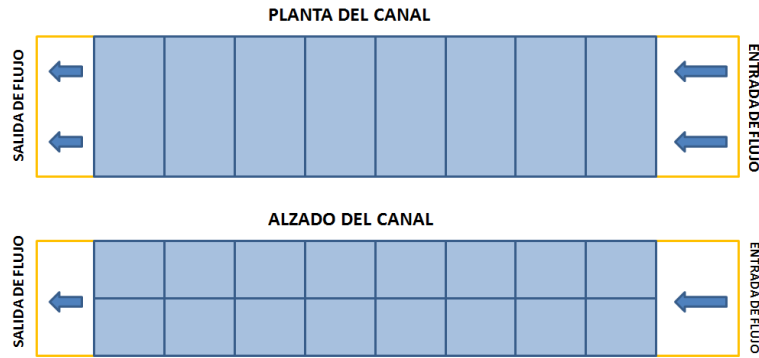


Figura 23. Distribución en planta y alzado de Aquacells para la configuración 1x2x8T.

En definitiva, se dispone de un total de 6 configuraciones diferentes, cuyos valores numéricos a efectos de resumen se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Detalle de las diferentes configuraciones a estudiar.

Configuración	1x2x1	1x2x4	2x2x1	2x2x4	1x2x1T	1x2x8T
Nº filas de Aquacells en la dirección del flujo	1	4	1	4	1	8
Nº filas de Aquacells en la dirección perpendicular al flujo	1	1	2	2	1	1
Nº filas de Aquacells en vertical	2	2	2	2	2	2
Nº total de Aquacells instalados	2	8	4	16	2	16

Estas configuraciones permiten analizar el comportamiento del flujo en los diferentes elementos modulares tanto de forma aislada como de forma conjunta. Asimismo, se analizará el comportamiento del Aquacell tanto cuando el flujo de agua circula según la dirección longitudinal del mismo como cuando el agua circula en dirección transversal.

Asimismo, las configuraciones definidas se someterán a ensayos en laboratorio con el fin de poder validar los resultados obtenidos computacionalmente comparando los valores de los parámetros que permitan caracterizar la disipación de energía tanto en las zonas de contacto entre bloques adyacentes (k) como en el interior de los mismos (n de Manning).

Finalmente, se va a proponer un modelo unidimensional en SWMM que reproduzca el comportamiento hidráulico de este tipo de estructuras obteniendo los valores óptimos de los parámetros que caracterizan las pérdidas introducidas por los citados elementos, tanto repartidas como localizadas, de forma que los valores asignados sean los mismos para todos los elementos del sistema.

Los ensayos de laboratorio han sido realizados por el equipo de técnicos e investigadores del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA integrado en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes en Colombia.

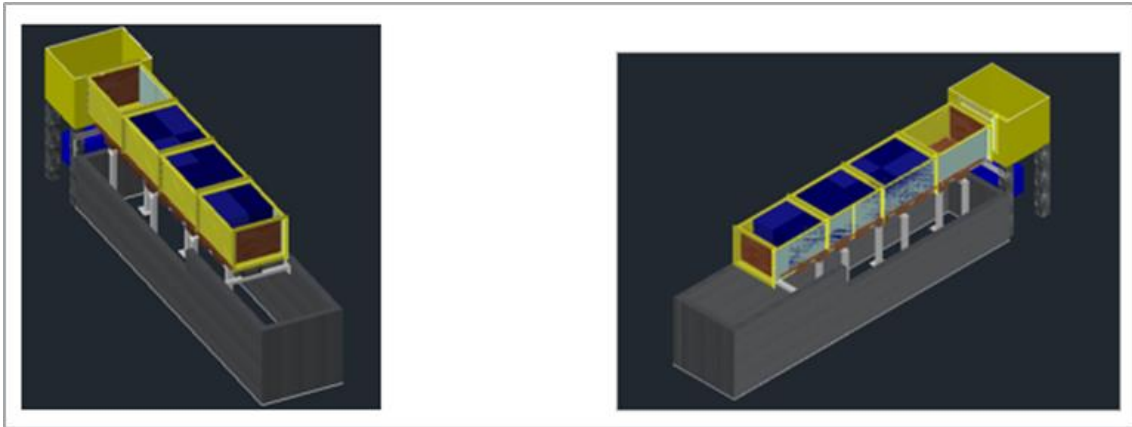


Figura 24. Vista del modelo de laboratorio con AquaCells desde Ambas Caras.

En este estudio, los Aquacells se plantean como elementos de almacenamiento temporal amortiguadores de los caudales pico configurados en línea como si se tratara de una tubería con altas pérdidas de energía. Por esta razón, se decide que la configuración real óptima para realizar un experimento de tales características es la correspondiente a un canal con cierto número de estructuras modulares dispuestas a lo largo de su trazado, en el que se puedan simular diferentes condiciones de flujo y analizar el comportamiento hidráulico de las celdas modulares, Figura 24.

Las configuraciones que se definen son en todo momento compatibles con las características del canal disponible para ensayos. Así, dado que el canal tiene una longitud de ensayo de 4 m y sus dimensiones son 1 x 1 metros de sección, las diferentes configuraciones estarán limitadas a la capacidad del mismo.

Algunas imágenes reales de los ensayos de laboratorio para distintas configuraciones de elementos modulares pueden observarse en la Figura 25 y Figura 26.



Figura 25. Vista lateral del canal de laboratorio con perfil del flujo a lo largo de los elementos modulares.



Figura 26. Vista de la salida del flujo del último Aquacell en canal de laboratorio para un caudal elevado.

Por último, señalar que, aunque se dispone de datos procedentes de los ensayos de laboratorio para todas las configuraciones propuestas anteriormente, se decide no realizar simulaciones CFD de todas ellas puesto que ello va a requerir mucho tiempo de cálculo. Las simulaciones computacionales se limitan a los distintos caudales ensayados en laboratorio para las configuraciones 1x2x1, 1x2x4, 2x2x1 y 1x2x1T.

4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS CON CFD

4.1. Introducción al proceso

El análisis mediante técnicas CFD permite resolver flujos complejos. Estas técnicas están basadas en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes de un flujo tridimensional en elementos finitos de tamaño suficientemente pequeño. De esta forma las ecuaciones que en su forma original son en derivadas parciales se convierten en algebraicas, resultando la aproximación tanto más válida cuanto más pequeño es el tamaño de los elementos seleccionados (tamaño de malla).

Para el presente estudio se ha seleccionado el software de modelación ANSYS Inc. (2013), específicamente su versión 15.0. De entre los diferentes modelos de cálculo de que dispone el paquete ANSYS de análisis del comportamiento de fluidos se ha seleccionado FLUENT para el desarrollo de las actividades y el cumplimiento de los objetivos que motivan la realización del presente estudio. El motivo es la enorme cantidad de artículos en la literatura que emplean este modelo para analizar flujos complejos, algunos de los cuáles se han mencionado en el punto 2 del presente documento.

La modelación en ANSYS requiere de 4 etapas que deben llevarse a cabo consecutivamente para conseguir el adecuado funcionamiento del programa y, por tanto, unos resultados satisfactorios. Las mencionadas etapas se describen a continuación:

- **Definir la geometría del sistema.** Constituye el primer paso a realizar cuando se trabaja con este software. Dicha geometría puede definirse en cualquier programa CAD o de diseño gráfico que genere archivos compatibles con ANSYS. Alternativamente la geometría también puede ser directamente desarrollada en el módulo correspondiente de Ansys, denominado Ansys Design Modeller. Independientemente del camino escogido, deben definirse correctamente las medidas de cada uno de los elementos que conforman el sistema completo, tanto externos como internos.
- **Mallado del sistema.** Es uno de los pasos más importantes para la correcta simulación del mismo. En esta etapa se debe definir el tipo de malla a utilizar, los tamaños mínimo y máximo de los elementos que se van a generar, así como las diferentes condiciones de frontera que se van a establecer en las distintas zonas del sistema a simular.
- **Procesado.** En esta fase se definen los parámetros de la simulación, estableciéndose las propiedades de los distintos fluidos a estudiar, los modelos que gobiernan las condiciones del sistema, los parámetros de las diferentes condiciones de frontera, así

como otras consideraciones generales que se determinen como importantes o necesarias para la correcta resolución del problema y su posterior post-procesado.

- **Post-procesado.** Etapa final en la que se establecen los resultados que se deseen visualizar: líneas de corriente, calados, líneas de energía, etc.

Este proceso descrito con anterioridad no es un proceso secuencial. Se trata más bien de un proceso iterativo en el que a partir de los resultados que se van obteniendo (post-procesado) debe analizarse si es necesario cambiar los parámetros de la simulación (procesado), el tamaño de los elementos en que se ha dividido el espacio de trabajo (mallado) o bien cambiar la forma del modelo (modificación de la geometría).

4.2. Desarrollo de la geometría del modelo

La primera de las fases del desarrollo del modelo consiste en desarrollar un modelo físico que represente la realidad de uno de los elementos modulares Aquacell. Posteriormente, una vez se disponga de la geometría básica de uno de los elementos se podrán analizar el comportamiento de las diferentes configuraciones definidas en el apartado anterior.

La primera etapa de este proceso consiste en definir en el módulo Geometry de Ansys uno de los elementos modulares. Para ello se toma como punto de partida la digitalización de la geometría detallada de un Aquacell tanto de sus caras exteriores como de las cartelas dispuestas en su interior. Esta fase inicial es un trabajo realizado directamente por el CIACUA de la Universidad de Los Andes. Así, a partir de mediciones reales de la geometría del Aquacell se ha procedido a digitalizar el Aquacell en el paquete de modelado 3D Rhinoceros 5.0, que presenta compatibilidad con la mayor parte de aplicaciones de Autodesk, como AutoCAD, SolidWorks, ... Los resultados obtenidos son los que se presentan en las siguientes figuras.

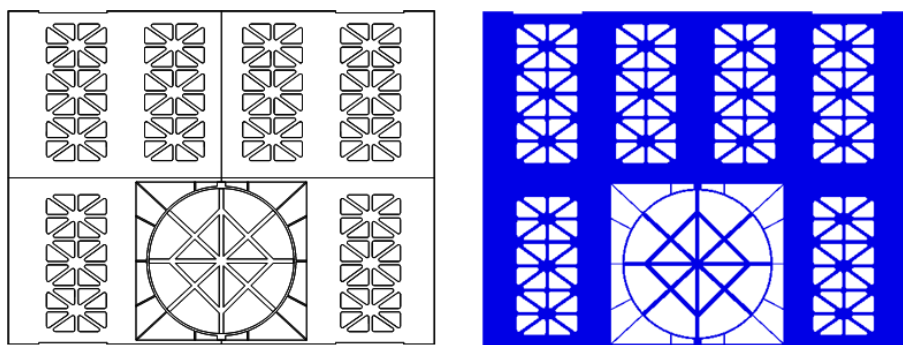


Figura 27. Vista frontal detallada del modelo computacional.

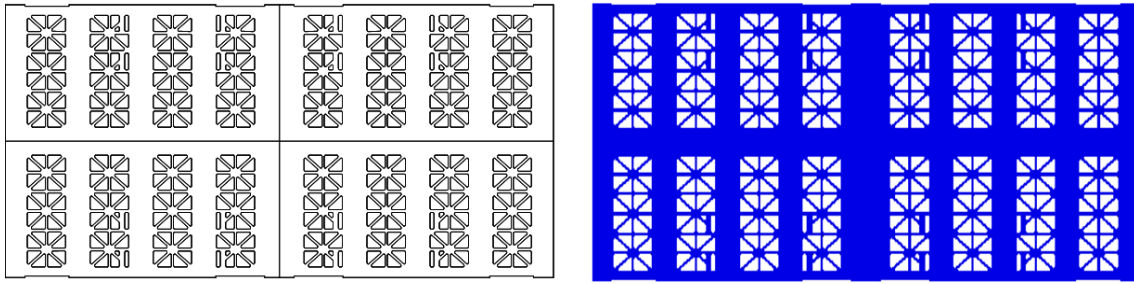


Figura 28. Vista lateral detallada del modelo computacional.

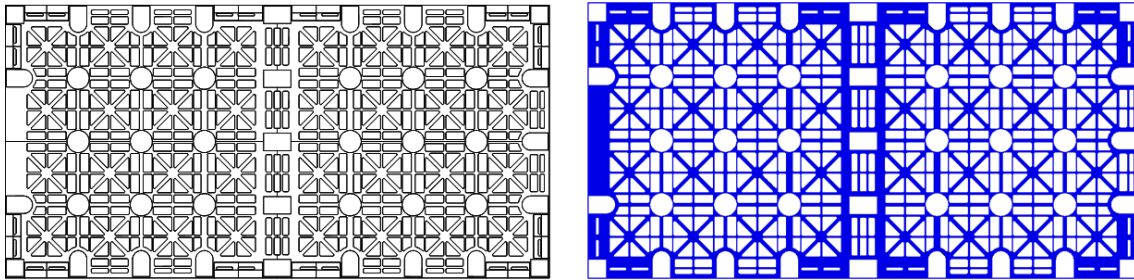


Figura 29. Vista superior detallada del modelo computacional.

Una vez importada la geometría a AutoCAD se trabaja principalmente en las caras frontales, que son las que van a desempeñar un papel más relevante en nuestro modelo. Las otras caras que se van a retocar, simplificándolas considerablemente, son las caras superior e inferior correspondientes a la vista superior de la Figura 29. Estas caras se simplifican al máximo ya que se considera que su complicada geometría no va a aportar información sustancial. La complejidad de dichas caras influye únicamente al potencial flujo vertical, que en este caso se supone prácticamente despreciable. Por ello a fin de reducir notablemente el número de celdas de cálculo, se decide simplificar estas caras al máximo.

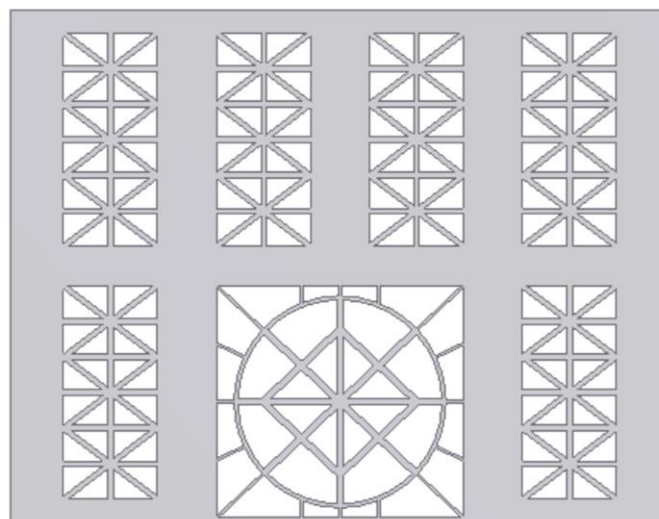


Figura 30. Vista frontal definitiva del modelo computacional.

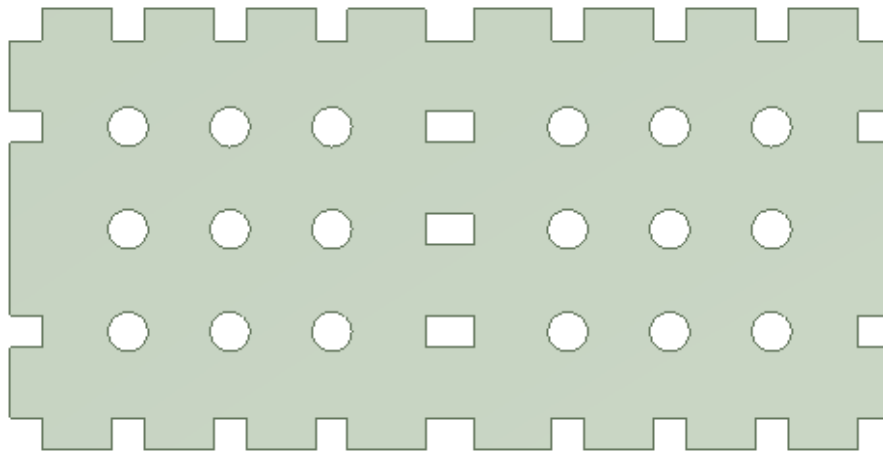


Figura 31. Vista superior definitiva del modelo computacional.

Por todo ello, finalmente de la digitalización minuciosa realizada en Rhinoceros 5.0 se decide importar únicamente la geometría mostrada en la Figura 30, Figura 31 y Figura 32 para las caras frontal, superior y lateral respectivamente. Obviamente, se considera que la geometría de todas las caras laterales será idéntica y lo mismo, para las caras superiores e inferiores de cuantos Aquacells estén presentes en la correspondiente configuración.

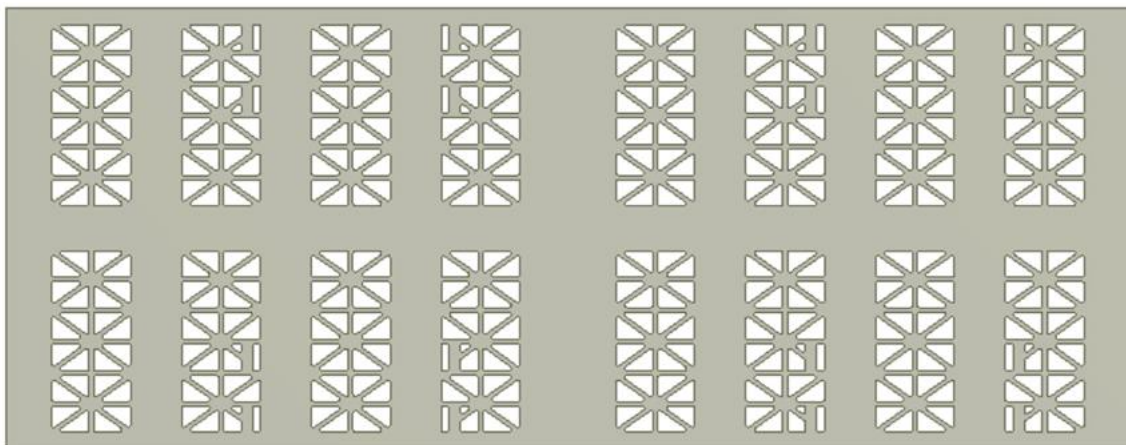


Figura 32. Vista lateral definitiva del modelo computacional.

La primera fase del diseño empieza con el diseño de geometrías sencillas pero que empiecen de alguna forma a asimilarse al máximo a la geometría final buscada. Posteriormente en función de ciertos criterios como el tiempo de cálculo, número de celdas del mallado o convergencia de las iteraciones, se irán realizando modificaciones sobre el diseño geométrico hacia la búsqueda de una solución que represente lo más fielmente posible la realidad ensayada en laboratorio con tiempos de cálculo aceptables.

A continuación, se muestran una serie de imágenes sobre la evolución que ha ido adoptando la geometría del modelo para la configuración 1x2x1, desde la versión más antigua hasta la versión final.

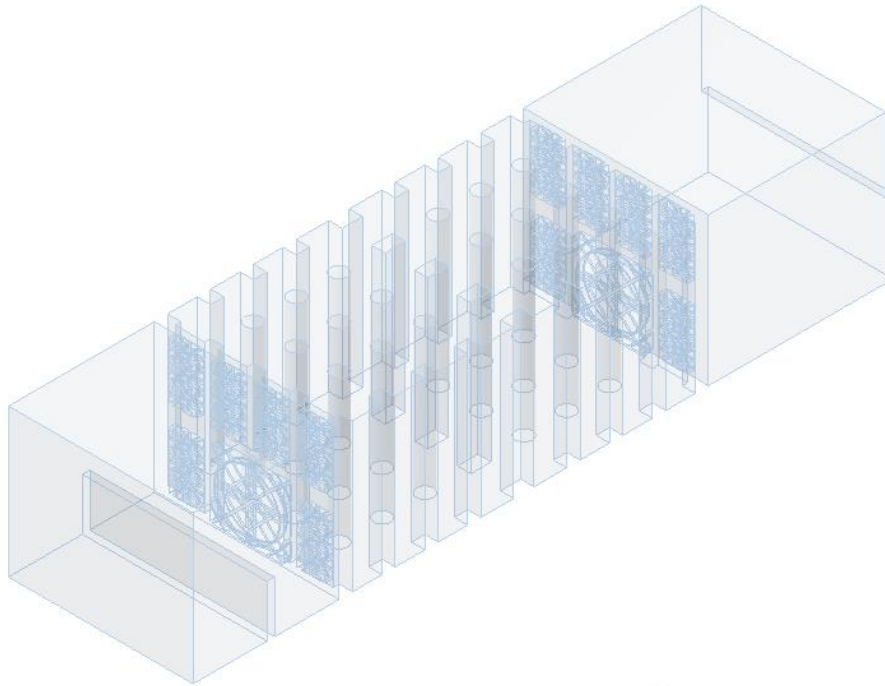


Figura 33. Vista 3D, versión 1, de la geometría del modelo 1x2x1

En la primera versión (Figura 33) se puede observar únicamente el volumen correspondiente al material fluido, ya sea ocupado por agua o aire. Se trata de la representación de toda la geometría representada en ANSYS que trata de representar fielmente el canal dispuesto en el laboratorio y dejar preparado el modelo para la posterior fase de mallado. Por tanto, los elementos sólidos del Aquacell y del vertedero quedan fuera de la geometría a mallar.

Esta geometría engloba una cierta longitud de canal desde la entrada del fluido hasta la cara frontal anterior del Aquacell, así como una cierta longitud a la salida del mismo, en la que se decide disponer de un vertedero de 2 cm de espesor, con el fin de tener un mejor control de los calados a la entrada de la estructura modular.

Finalmente, comentar que en la definición de este modelo geométrico se ha optado por darle a las caras frontales del Aquacell un cierto espesor (2 cm).

Posteriormente, se obtuvo una segunda versión (Figura 34) en la que se mantiene prácticamente la misma geometría que en la versión precedente salvo en un par de aspectos. Por un lado, se ha suprimido el vertedero aguas abajo del Aquacell debido al hecho de que éste no se dispone en los ensayos de laboratorio y la otra gran novedad de esta versión está en el espesor de las caras frontales del Aquacell, siendo en este caso su espesor de 2 mm.

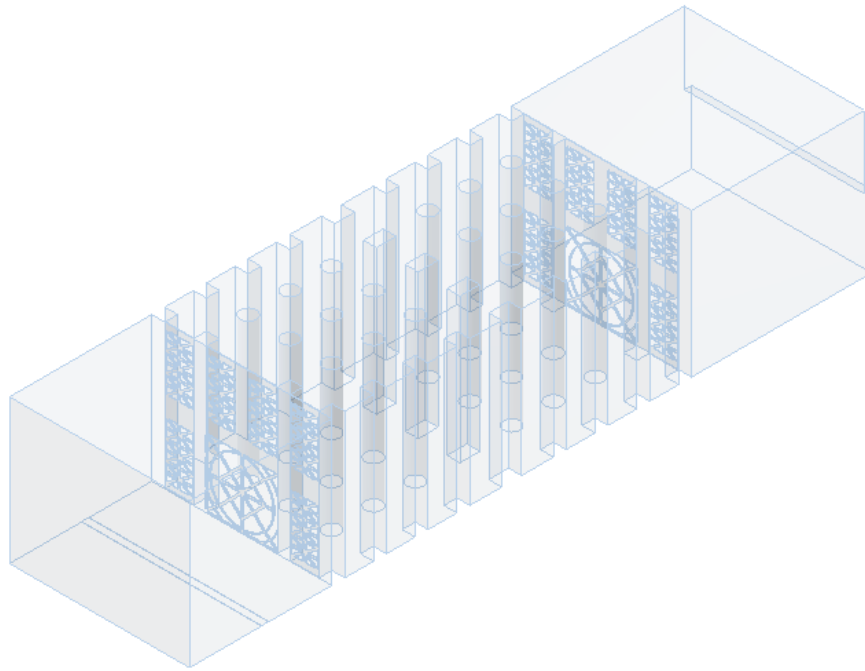


Figura 34. Vista 3D, versión 2, de la geometría del modelo 1x2x1.

Llegados a este punto, se decide implementar una serie de modificaciones y mejoras en la geometría del modelo con el fin de conseguir que ésta represente mejor la geometría real del Aquacell disminuyendo el tiempo de cálculo. Para ello, dado que la geometría del sistema es perfectamente simétrica respecto al eje longitudinal se decide representar únicamente medio canal (Figura 35), con lo que el número de celdas del futuro mallado se reducirá a la mitad y, por ende, el tiempo de cálculo.

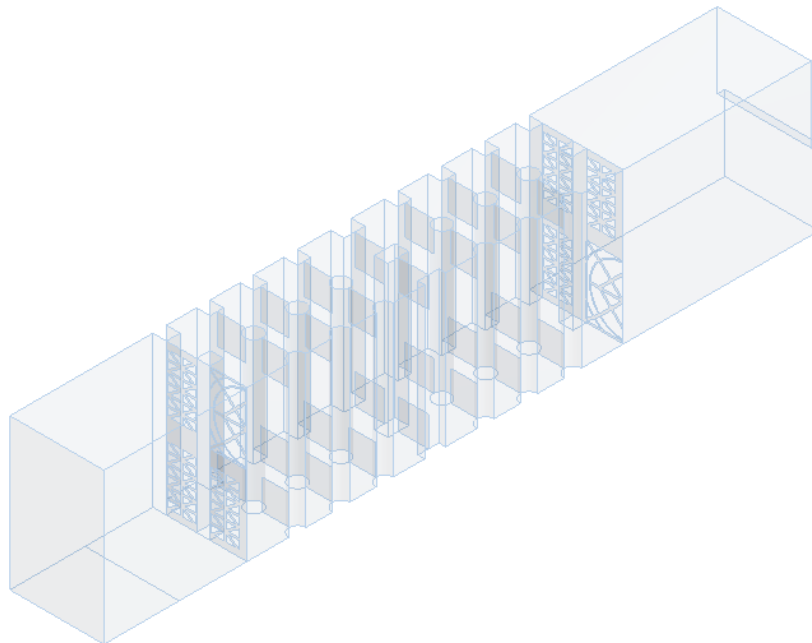


Figura 35. Vista 3D, versión 3, de la geometría del modelo 1x2x1.

Otro de los aspectos importante constatado en este punto del diseño es que al definir el espesor de las caras frontales del Aquacell de 2 mm, el número de celdas del mallado se incrementa considerablemente, así como el tiempo de cálculo. Para minimizar este problema se toma la decisión de dimensionar estas caras con espesor nulo.

Además, como puede apreciarse en la Figura 35, se han implementado una serie de cartelas interiores con una dimensión vertical de 8 cm, a las que como resultado de consideraciones idénticas al caso de las caras frontales también se les define un espesor nulo.

Finalmente, señalar que tras comprobar la geometría real de las caras del Aquacell y su disposición en el canal de laboratorio, se diseña la cara frontal posterior de la estructura modular girada 180° respecto a las versiones precedentes.

En la cuarta versión del modelo geométrico (Figura 36), las modificaciones geométricas introducidas respecto a la versión precedente se corresponden con la introducción de tramos estabilizadores de flujo tanto a la entrada como a la salida del Aquacell con las mismas longitudes que los correspondientes al canal ensayado en laboratorio.

Además, se introduce en el modelo los 10 cm inferiores de la 2ª fila de Aquacell por si el calado superase en algún punto la cota máxima del Aquacell de la 1ª fila. También se ha modificado la altura de las cartelas interiores del propio Aquacell, ya que se recibe nueva información que indica que las cartelas exteriores tienen una altura de 8.2 cm, mientras que en las interiores es de 6.2 cm. Las consideraciones expuestas en este párrafo pueden observarse en la Figura 37.

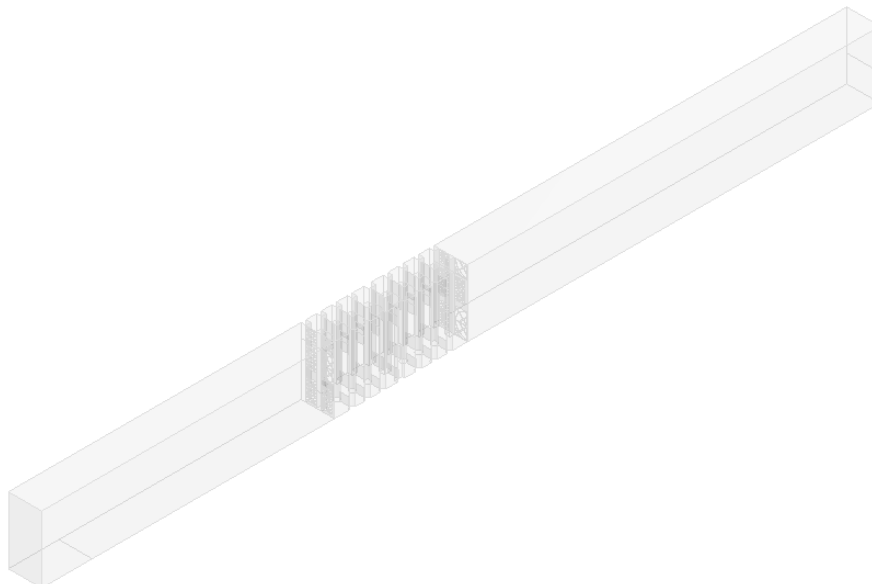


Figura 36. Vista 3D, versión 4, de la geometría del modelo 1x2x1.

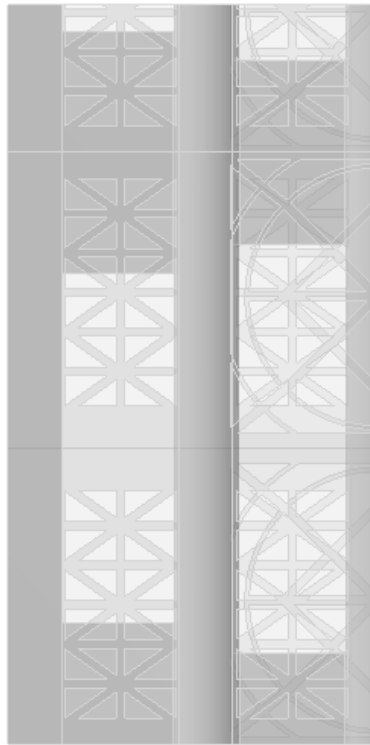


Figura 37. Vista frontal trasera en versión 4 de la geometría del modelo 1x2x1.

Finalmente, sobre la versión definitiva de la configuración 1x2x1 se aplican unas leves modificaciones en su geometría para aproximarla lo más posible a la realidad. Estos cambios son la introducción de una fila de cartelas interiores situada en la zona más central del Aquacell, ya que no nos habíamos percatado de su existencia hasta el momento; la introducción de bordes redondeados en la zona de contacto entre las cartelas interiores externas y las caras lateral y frontales del Aquacell, así como la existencia de un “pilar” en la zona central de las caras frontales del Aquacell, de 20 cm de longitud que se sitúa tras la parte de la cara donde no hay geometría circular.

En este punto conviene recordar que la introducción de estos bordes redondeados y pilares centrales en caras se realiza en el modelo eliminando el volumen ocupado por ellos, al ser un volumen sólido que no puede ser potencialmente ocupado por agua ni por aire.

Una vez realizada la geometría del modelo computacional para la configuración 1x2x1 (una sola fila de Aquacells en la dirección longitudinal del flujo), se van a aplicar estos mismos conceptos para definir la geometría de la configuración 1x2x4 (cuatro filas de Aquacells en la dirección longitudinal), ver Figura 38.

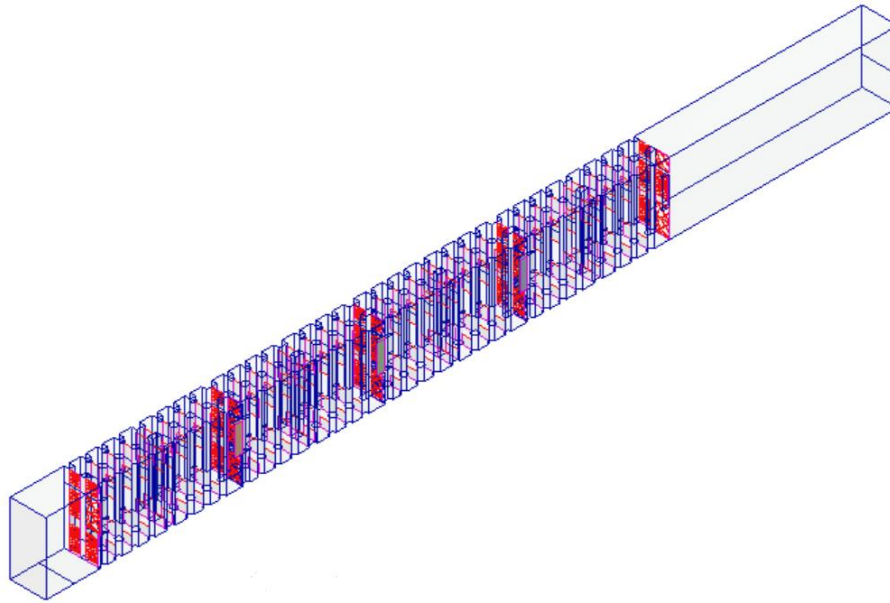


Figura 38. Vista 3D, versión definitiva, de la geometría del modelo 1x2x4.

En cuanto a la configuración 1x2x1 “Transversal” se parte de todos los conocimientos y experiencia adquiridos previamente para definir la geometría de la configuración 1x2x1. Por tanto, se procede directamente a girar 90° la configuración 1x2x1 definitiva. A continuación, se muestra unas imágenes de la geometría final alcanzada para dicha configuración, Figura 39 y Figura 40.

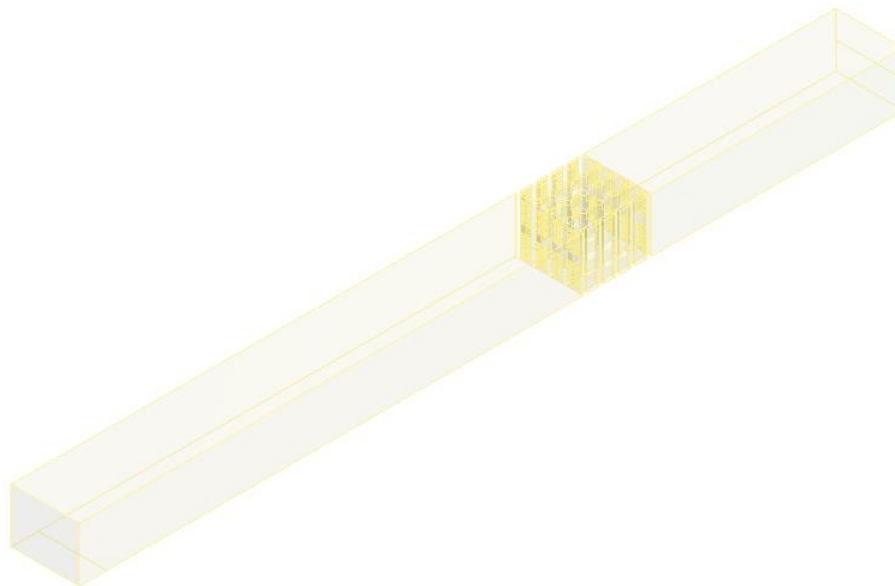


Figura 39. Vista 3D, versión definitiva, de la geometría del modelo 1x2x1 Transversal.

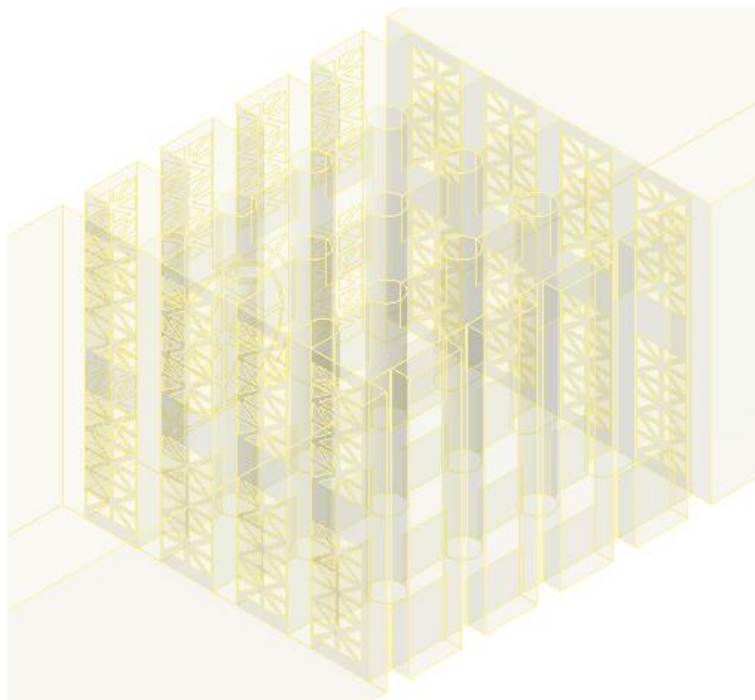


Figura 40. Zoom vista 3D, versión definitiva, de la geometría del modelo 1x1x1 Transversal.

Una vez realizada con éxito la geometría del modelo para el caso 1x1x1T, se procede a aplicar los conocimientos adquiridos para definir la configuración 1x1x8T cuyos resultados se presentan en la siguiente figura.

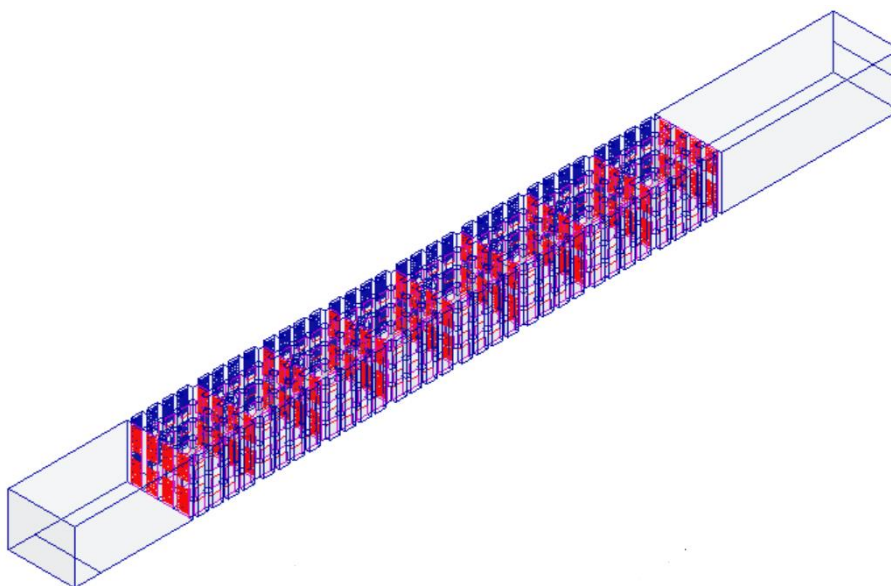


Figura 41. Vista 3D, versión definitiva, de la geometría del modelo 1x1x8T.

A modo de resumen, señalar que la parte sólida de la geometría final “simplificada” para cada elemento modular introducido en los diferentes modelos geométricos es la que se muestra en la Figura 42.

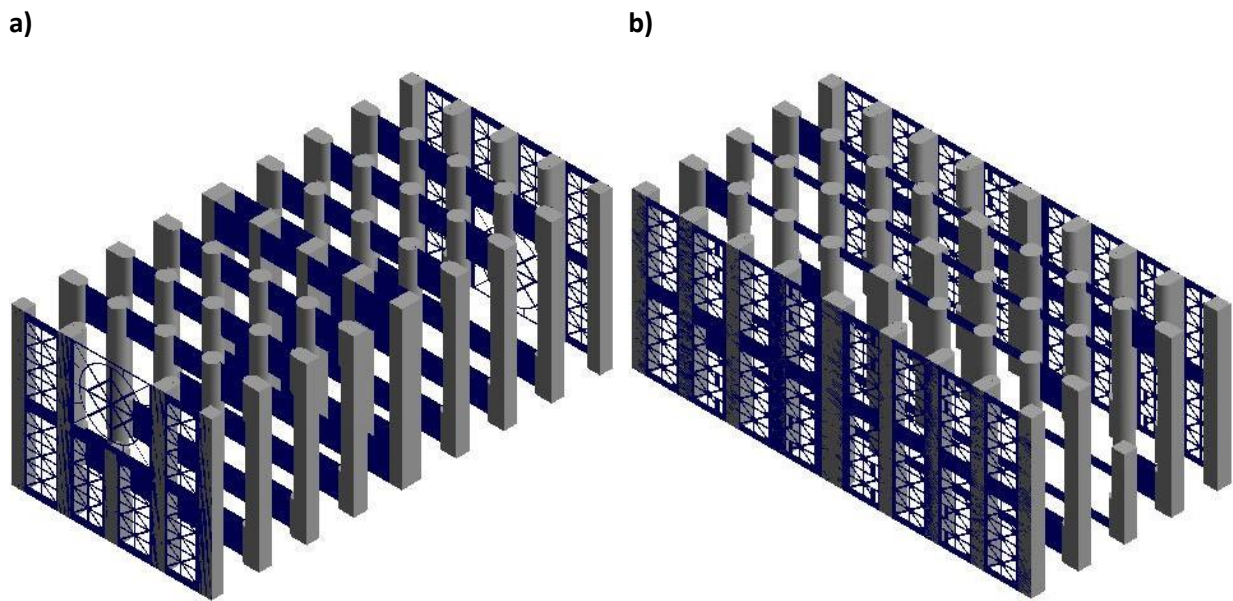


Figura 42. Simplificación longitudinal (a) y transversal (b) sobre la geometría real de un elemento modular

4.3. Estudio de la malla.

Una vez se tiene perfectamente definida la geometría del modelo se procede a realizar el mallado de la misma. Esta etapa es muy importante y, por tanto, es conveniente dedicarle el tiempo necesario para obtener un resultado adecuado que permita un óptimo procesamiento posterior del modelo.

Cualquier modelo numérico que deba ser realizado con elementos finitos debe ser discretizado en múltiples fragmentos espaciales los cuáles permiten recrear la realidad de forma verosímil. En el caso de ANSYS, esta discretización se realiza por medio de algoritmos de mallado o “meshing”, que vienen incluidos en el programa.

La etapa de mallado es fundamental en la resolución de modelos numéricos, ya que las matrices que se deben invertir en las entrañas del proceso de resolución de elementos finitos deben ser singulares, condición que se facilita con un mallado que cumpla ciertos requisitos. Además, el tiempo de cálculo también va a depender directamente de las características de la malla.

En el caso de ecuaciones de flujo, ANSYS resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes o la ecuación de la evolución temporal de la vorticidad. Estas ecuaciones son sensibles a cambios de presión súbitos o a puntos con elevada vorticidad (altos gradientes de velocidad), por lo que se debe garantizar que la malla no contenga elementos demasiado grandes en zonas que requieran detallar elementos pequeños con alta vorticidad, ni transiciones muy grandes en el tamaño de los elementos que generen incrementos súbitos de presión.

ANSYS ofrece los siguientes algoritmos de mallado:

- **Métodos tetraédricos de mallado:**

- Patch conforming.
- Patch independent.

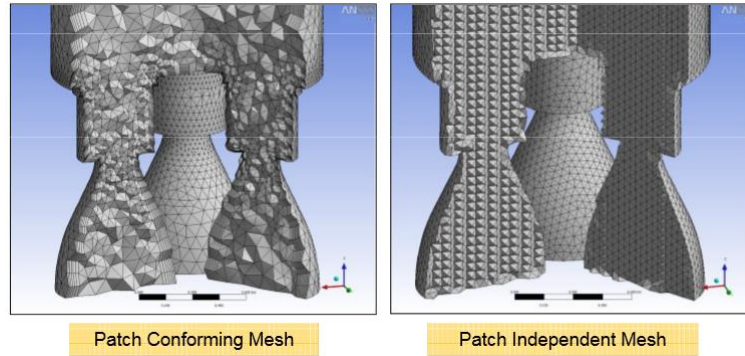


Figura 43 y Figura 44. Detalle comparativo de los dos métodos tetraédricos de mallado (ANSYS Meshing User's Guide, 2012).

- **Métodos hexaédricos de mallado:**

- Hex Dominant.
- Sweep.
- Multizone.

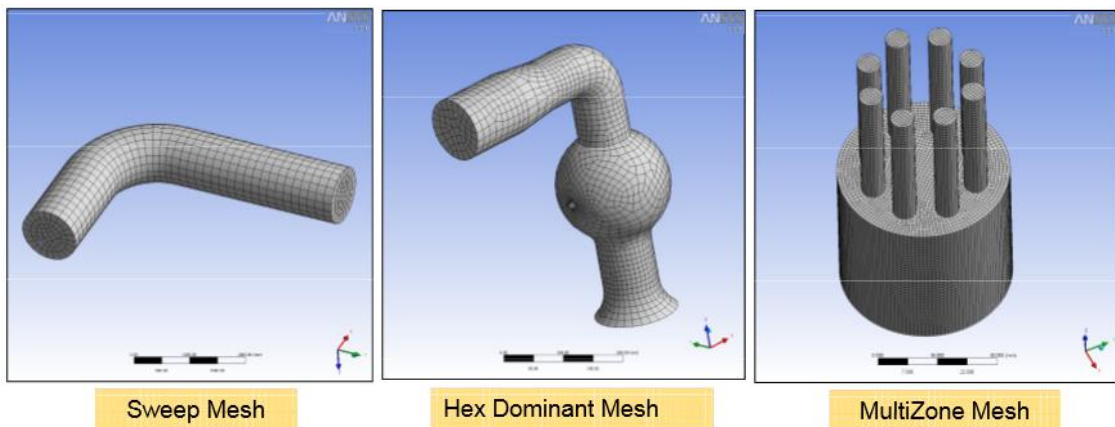


Figura 45, Figura 46 y Figura 47. Detalle comparativo de los tres métodos hexaédricos de mallado (ANSYS Meshing User's Guide, 2012).

- **Método de mallado Cutcell:** útil para el mallado de cuerpos fluidos en piezas únicas o multicuerpo. Además, consigue reducir en un 60% el número de celdas respecto a mallado tetraédrico para una misma resolución de malla y, por tanto, el tiempo de cálculo.

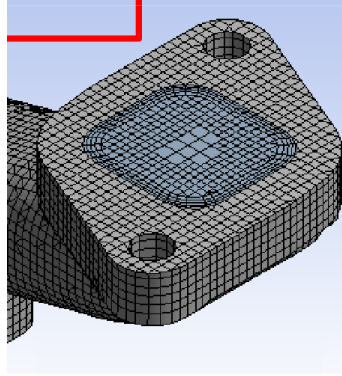


Figura 48. Detalle del mallado Cutcell (ANSYS Meshing User's Guide, 2012).

- **Métodos superficiales de mallado:**
 - Automatic Method (Quad Dominant).
 - Triangles.
 - Uniform Quad/Tri.
 - Uniform Quad.

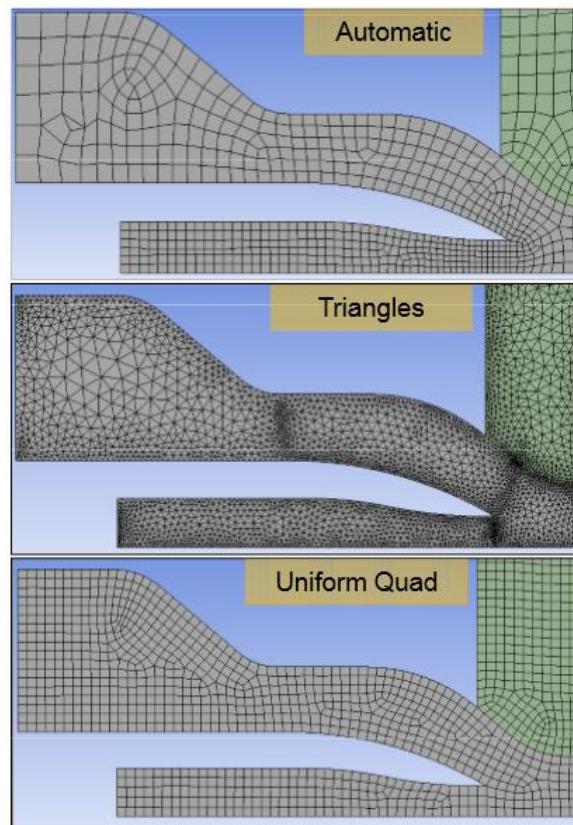


Figura 49, Figura 50 y Figura 51. Detalle comparativo de los distintos métodos superficiales de mallado (ANSYS Meshing User's Guide, 2012).

Tras estudiar detenidamente las distintas alternativas de mallado enumeradas anteriormente se decide emplear el mallado CutCell por ser un método reciente que presenta buena acogida por parte de expertos en la materia de la modelización computacional, por su buen comportamiento en el mallado de cuerpos fluidos y su reducido número de celdas manteniendo la resolución de malla en comparación con el resto de algoritmos de mallado.

A continuación, se va a exponer el procedimiento llevado a cabo para obtener el mallado de la geometría del modelo definido para la configuración 1x2x1 mostrada en la Figura 35 de este documento. Para ello, se han definido una serie de parámetros del mallado que están recuadrados en color naranja en la Figura 52.

Details of "Mesh"	
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Sizing	
<input checked="" type="checkbox"/> Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Medium
Smoothing	High
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (70.3950 °)
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	4
Proximity Size Function Sourc...	Edges
<input type="checkbox"/> Min Size	4.e-003 m
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	4.e-003 m
<input type="checkbox"/> Max Size	1.6e-002 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.20)
Minimum Edge Length	1.1e-007 m
Inflation	
Assembly Meshing	
Method	CutCell
Feature Capture	Program Controlled
<input checked="" type="checkbox"/> Tessellation Refinement	Absolute Tolerance
<input type="checkbox"/> Absolute Tolerance	4.e-003 m
Intersection Feature Creation	Program Controlled

Figura 52. Parámetros de mallado establecidos para la configuración 1x2x1.

Tras el pertinente cálculo se obtiene el mallado del modelo, el cual se puede observar en la Figura 53 y Figura 54.

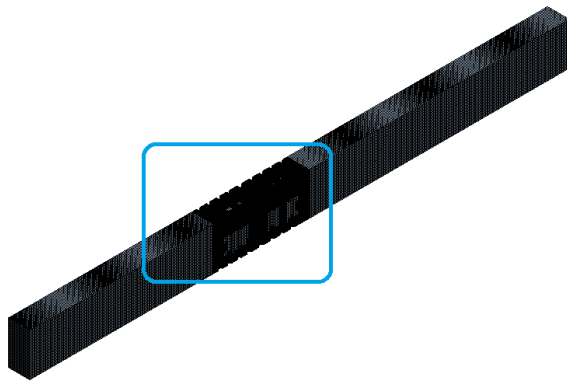


Figura 53. Mallado en configuración 1x2x1 canal completo.

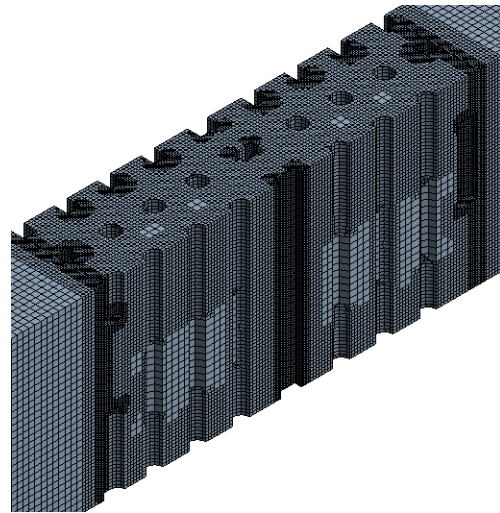


Figura 54. Detalle mallado CutCell en Aquacell.

La calidad del mallado se va a evaluar en función del valor del índice de calidad ortogonal (OQ) obtenido para cada caso. Este índice se obtiene calculando para cada una de las celdas (Figura 55) el valor mínimo de la expresión:

$$\frac{A_i \cdot f_i}{|\vec{A}_i| |\vec{f}_i|} ; \frac{A_i \cdot c_i}{|\vec{A}_i| |\vec{c}_i|} \quad (14)$$

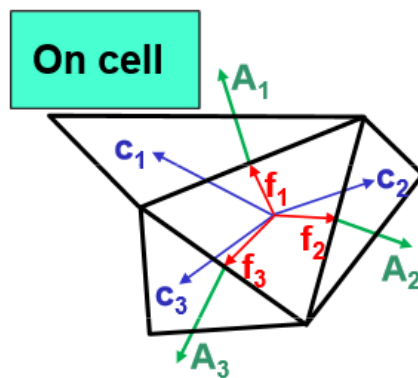


Figura 55. Esquema de vectores para cálculo índice OQ para cada celda (ANSYS Meshing User's Guide, 2012).

Por otra parte, para cada una de las caras del modelo geométrico mallado (Figura 56) se obtiene el valor mínimo de la expresión:

$$\frac{A_i \cdot e_i}{|\vec{A}_i| |\vec{e}_i|} \quad (15)$$

calculado para cada una de las caras.

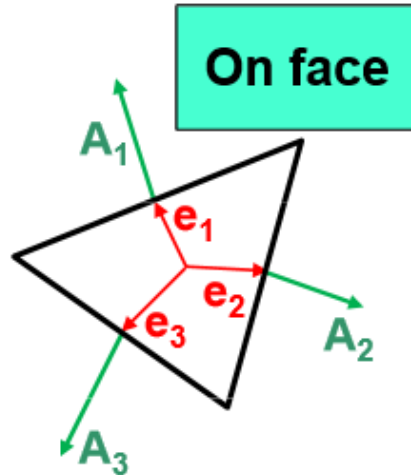


Figura 56. Esquema de vectores para cálculo índice OQ para cada cara (ANSYS Meshing User's Guide, 2012).

En las expresiones (14) y (15) A_i es el vector normal de cara "i"; f_i es el vector de centroide de celda a centroide de cara "i"; c_i es el vector de centroide de celda a centroide de celda adyacente por cara "i"; y e_i es el vector de centroide de cara a centroide de lado "i".

Como regla general, los valores excesivamente bajos del índice OQ no son recomendables. Generalmente se trata de que el valor sea superior a 0.1. Un espectro estándar de la calidad del mallado en función del índice de calidad ortogonal podría ser el de la Figura 57.



Figura 57. Espectro del índice de calidad ortogonal (OQ) (ANSYS Meshing User's Guide, 2012).

A continuación, se presenta una tabla comparativa con el número de celdas, así como distintos valores para el índice OQ tanto para el caso en el que el mallado se realiza mediante la técnica descrita hasta este punto (CutCell) Figura 54 y, los valores que se obtendrían con un mallado tetraédrico, Figura 58.

Tabla 2. Factores de relajación de las ecuaciones.

	CutCell	Tetraédrico
Celdas	602.599	3.096.163
Índice OQ Mínimo	0.20	0.22
Índice OQ Medio	0.97	0.86

Para el caso del mallado CutCell, el valor mínimo del índice OQ es de 0.2, lo que significa que el mallado es bueno según el espectro de la Figura 57, además el valor medio de OQ es de 0.97, lo que significa que la mayor parte de las celdas presentan una ortogonalidad perfecta. Por tanto, el mallado es apto para la posterior fase de procesamiento del modelo.

Mientras que para empleando un mallado tetraédrico, el número total de celdas se multiplica por más de 5. Sin embargo, el valor mínimo del índice OQ apenas pasa de 0.2 a 0.22 y su valor medio incluso disminuye de 0.97 a 0.86. Por tanto, son evidentes las razones por las que se ha adoptado el algoritmo de mallado Cutcell para las distintas simulaciones llevadas a cabo a lo largo del presente trabajo.

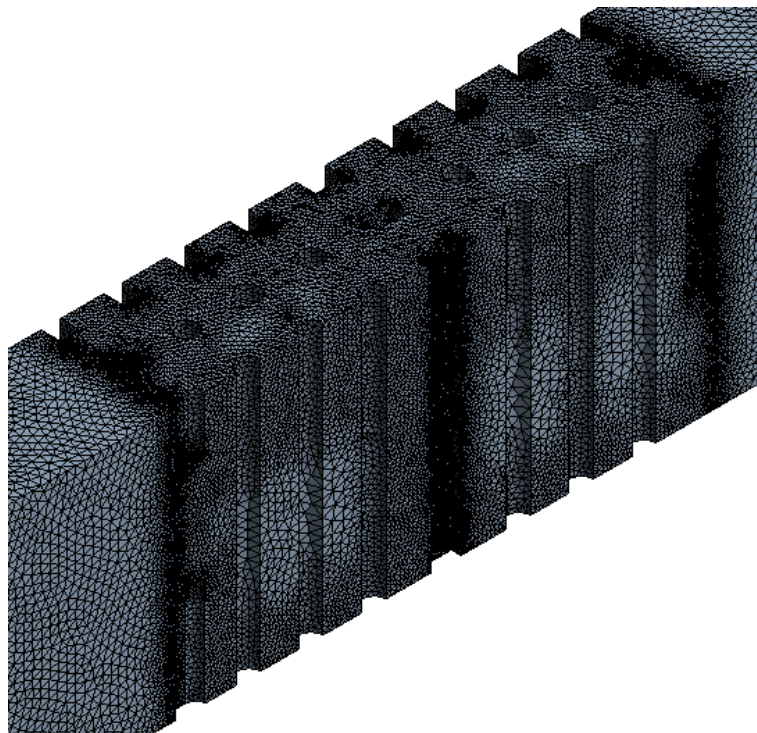


Figura 58. Zoom del mallado tetraédrico en zona del Aquacell.

4.4. Modelos de análisis con CFD

Una vez completada la fase de mallado es hora de pasar a la etapa de procesamiento, etapa donde se van a definir los parámetros y condiciones bajo las cuáles el motor de cálculo (Fluent) va a poder llegar a obtener una buena solución del sistema a simular.

El análisis del comportamiento del agua por el interior del bloque modular se realiza utilizando el modelo VOF (Volume of Fluid) desarrollado por (Hirt & Nichols, 1981). Dicho modelo permite determinar la cantidad tanto de agua como de aire que tiene cada una de las celdas y, de esta forma se llega a la obtención de la interfaz agua-aire del modelo.

4.4.1. Definición de las condiciones de contorno.

Antes de entrar en detalle del análisis computacional es necesario previamente definir qué partes de la geometría del cuerpo van a tener comportamientos diferentes. De forma específica es necesario establecer los diferentes comportamientos que van a tener las distintas regiones del contorno. En este caso, independientemente de la configuración de estudio, se ha optado por definir y asignar los mismos nombres a las diferentes condiciones de contorno. Dichas condiciones de contorno son las que se describen a continuación:

- **Velocity-inlet:** Condición de contorno asignada a la zona por donde se va a producir la entrada de agua al sistema, con una cierta velocidad. Para la configuración 1x2x1 mostrada en la Figura 36 dicha condición de contorno se define para la zona “sombreada” que se muestra en la siguiente Figura 59.

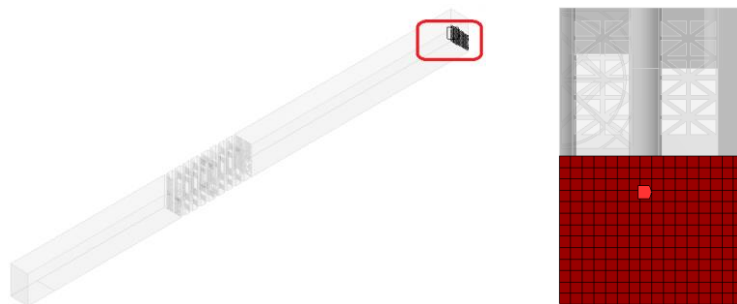


Figura 59. Zona del modelo correspondiente a la condición de contorno “Velocity-inlet”.

- **Pressure-outlet:** Condición de contorno asignada a la zona por donde se va a producir la salida de agua del sistema, simulando un vertedero. Para la configuración 1x2x1 mostrada en la Figura 36 dicha condición de contorno se define para la zona “sombreada” que se muestra en la Figura 60.

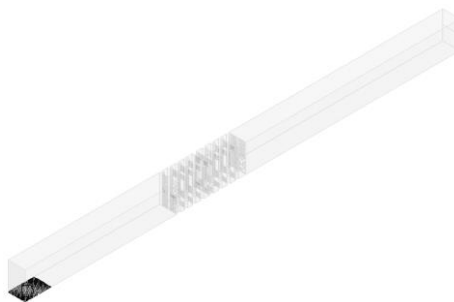


Figura 60. Zona del modelo correspondiente a la condición de contorno “pressure-outlet”.

- **Symmetry:** Condición de contorno asignada a la zona del modelo situado en el plano de simetría del mismo. Para la configuración 1x2x1 mostrada en la Figura 36 dicha condición de contorno se define para la zona “sombreada” que se muestra en la Figura 61.

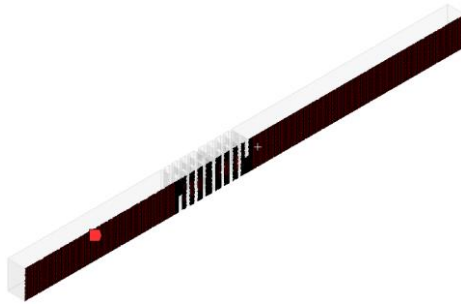


Figura 61. Zona del modelo correspondiente a la condición de contorno “Symmetry”.

Además, también se han definido como condiciones de contorno las correspondientes al plano lateral, al techo y al suelo del modelo con el fin de poder obtener mayor información del modelo en caso de que fuera necesario.



Figura 62 , Figura 63 y Figura 64. Zonas del modelo correspondientes a las condiciones de contorno “lateral, techo y suelo”.

4.4.2. Análisis en régimen estacionario vs. análisis en régimen transitorio.

Antes de proceder al estudio en detalle de las diferentes configuraciones de los Aquacell ha sido necesario realizar un estudio preliminar de la influencia que tiene sobre el resultado final realizar el análisis utilizando un modelo de cálculo en régimen permanente ("steady") o bien alcanzar el régimen permanente final en base a utilizar un modelo de cálculo en régimen transitorio ("transient") al que se le mantengan constantes las condiciones de contorno.

Algunos estudios previos ponen de manifiesto que los modelos “steady” aplicados a geometrías de dificultad baja o media conducen en general a resultados muy similares a los que se obtienen mediante modelos tipo “transient”. No obstante, para modelos de complejidad elevada como el que es objeto de estudio, los modelos “steady” presentan grandes problemas de convergencia. Es por ello necesario utilizar un modelo “transient” para calcular el nivel final de agua que está presente en el interior del Aquacell cuando se mantiene constante el caudal que pasa a través del mismo.

A fin de aclarar las diferentes simulaciones realizadas, en los apartados siguientes se detallan las especificaciones utilizadas tanto para los cálculos en régimen estacionario como para los cálculos en régimen transitorio.

4.4.2.1. Definición de parámetros para el cálculo estacionario de la solución en Fluent.

El modelo de cálculo en régimen estacionario es un modelo generalmente preferido antes que el modelo en régimen transitorio por requerir un tiempo de cálculo considerablemente inferior. A continuación, se exponen algunos de los parámetros más importantes que se han seleccionado para el cálculo:

- **Modelo Multifase.** Se emplea el modelo Volumen of Fluid: Volume of Fluid (Hirt & Nichols, 1981).
- **Modelo de turbulencia.** En cuanto a la definición del modelo de turbulencia, el caso que se plantea transcurre bajo condiciones de flujo turbulento por ello, se emplea un modelo $k-\varepsilon$ (Launder & Shima, 1989). Este tipo de modelos son los más adecuados para el régimen de valores de número de Reynolds previstos.
- **Tensión superficial.** A la hora de definir los materiales, se van a definir obviamente el agua y el aire. Al agua se le va a asignar la fase 1 y al aire la fase 2, mientras que el valor de la tensión superficial entre ambos se establece constante y de valor 0.072 N/m.
- **Parámetros de turbulencia en las condiciones de contorno.** La entrada de caudal al sistema se modela mediante una condición de contorno del tipo "velocity-inlet", mientras que para la salida de caudal se emplea una condición de contorno tipo "pressure-outlet". En ambas condiciones de contorno la turbulencia se representa mediante la opción "Intensity and Hydraulic Diameter". Adicionalmente para la salida de caudal se establece que el flujo de retorno por esta zona solo pueda ser de aire, nunca de agua.
- **Esquema de resolución.** Para la resolución se emplea un esquema de discretización de segundo orden. Los criterios de convergencia para la solución final se establecen en un valor máximo de los residuos de las diferentes ecuaciones en un valor umbral de 10^{-3} .

Durante el estudio se han realizado diferentes simulaciones del proceso iterativo de resolución intentando en todos los casos forzar la convergencia variando los parámetros de control del método. No obstante, no se consigue una convergencia razonable del modelo de cálculo en régimen permanente cuando la geometría del modelo tiene una complejidad como la que presentan los Aquacells. Por ello se ha decidido descartar la opción de análisis en régimen estacionario y se opta por buscar una solución mediante un análisis en régimen transitorio.

4.4.2.2. Definición de parámetros para el cálculo transitorio de la solución en Fluent.

Descartado en el punto anterior la simulación en régimen permanente se detallan a continuación los pasos seguidos para el desarrollo de una simulación en régimen transitorio de una de las configuraciones de Aquacells definidas en los apartados anteriores. Básicamente, gran parte de los parámetros definidos son bastante similares a los

establecidos para el análisis en régimen estacionario. Por ello, a continuación, se recogen aquellos que merecen una mención especial o que son diferentes de los establecidos para las simulaciones precedentes.

- **Configuración del modelo multifásico.** Al igual que la configuración anterior se emplea el modelo Volume of Fluid con 2 fases fluidas diferentes (agua y aire) y un esquema de cálculo explícito.
- **Esquema de resolución numérica.** Los esquemas de resolución numérica empleados en la resolución del problema son del tipo Pressure based (Chorin et al., 1968), utilizando un esquema tipo SIMPLE para el acoplamiento entre las ecuaciones de presión y velocidad. Las principales opciones de cálculo utilizadas para cada ecuación son:
 - Cálculo del gradiente: Least Square Cell Based.
 - Cantidad de movimiento: Second Order Upwind.
 - Cálculo de la fracción de volumen de cada fase: Geo-Reconstruct.
 - Energía cinética turbulenta: First Order Upwind.
 - Tasa de disipación turbulenta: First Order Upwind.
 - Presión: Body Force Weighted.
- **Parámetros de control del método de resolución.** Los factores de relajación de las diferentes ecuaciones se fijan en los valores recogidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Factores de relajación de las ecuaciones.

Ecuación	Factor de relajación
Presión	0.3
Densidad	1
Fuerzas	1
Cantidad de movimiento	0.7
Energía cinética turbulenta	0.8
Tasa de disipación turbulencia	0.8
Viscosidad turbulenta	1

- **Inicialización.** Todas las simulaciones se realizan fijando un campo de velocidades y de presiones nulo en el interior del área de análisis. Asimismo, se admite que en el instante inicial la totalidad del dominio se encuentra completamente llena de aire.
- **Parámetros específicos del análisis transitorio.** Dado el tamaño seleccionado de la malla y las estimaciones previas de velocidad se fija un valor del intervalo de tiempo de 0.0025 segundos. Dicho valor se ha considerado adecuado para mantener los valores del número de Courant dentro de un valor admisible durante la simulación. Asimismo, estimaciones preliminares fijan que el tiempo de establecimiento del régimen permanente en el sistema está alrededor de 100

segundos. Por ello el número de intervalos a analizar es de 40000, siendo el número máximo de iteraciones por intervalo de 100.

Tras establecer los parámetros de cálculo se realiza el análisis, controlando en todo momento el valor de los residuos. Así a modo de ejemplo en la Figura 65 se muestra un ejemplo de la ventana que se crea con los residuos de la simulación a medida que el software va avanzando en el cálculo de la misma.

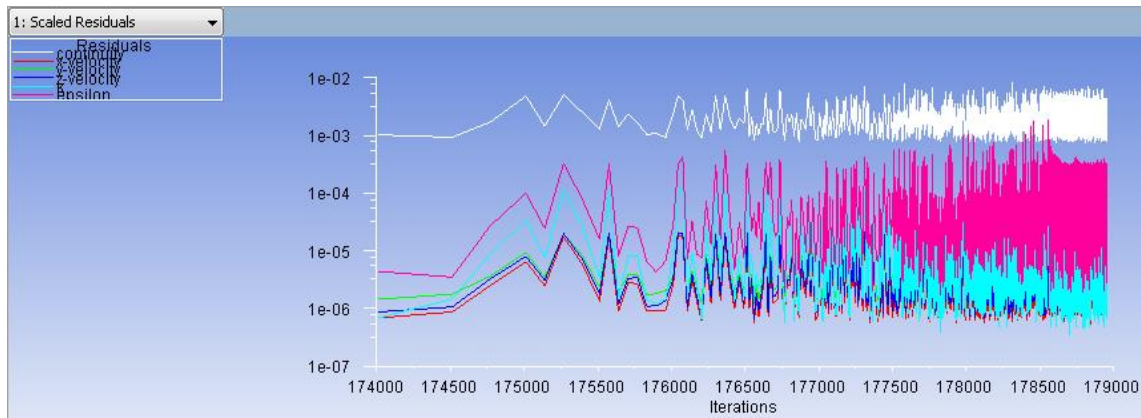


Figura 65. Ventana de valores residuales escalados generada durante el cálculo de la solución.

No obstante, la visualización de estos residuos no es suficiente para tener garantizado que se alcanza la convergencia final del proceso. Por ello además de representar la evolución de los residuos de las ecuaciones se representa para cada iteración el balance de caudales del sistema (Figura 66). Una de las condiciones para tener garantizada la convergencia hacia un estado de régimen permanente es garantizar que el caudal que se aporta por la entrada está saliendo por el extremo final del dispositivo. Así esta diferencia es la que recoge la Figura 66.

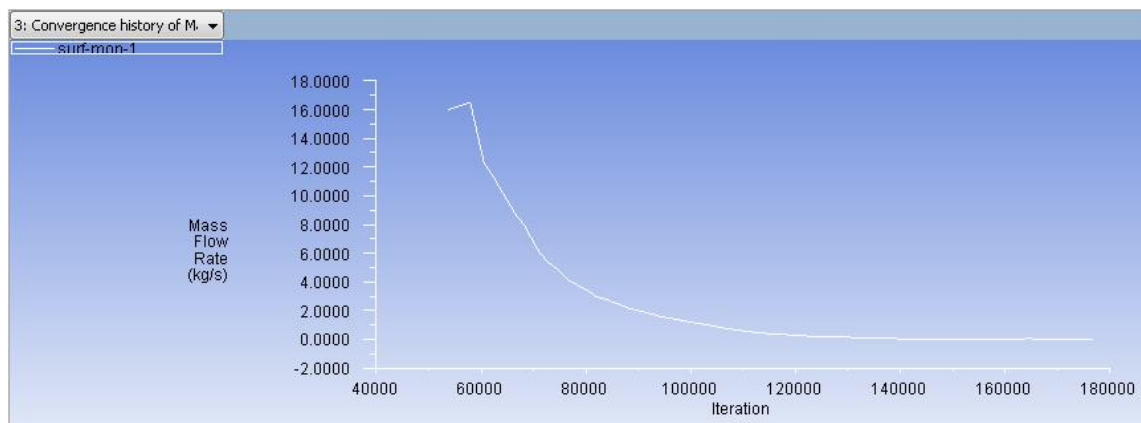


Figura 66. Ventana de balance de caudales del sistema objeto de cálculo durante la simulación.

Como puede apreciarse la solución puede considerarse que ha alcanzado el régimen permanente final al alcanzar un balance de caudales nulo. Aun así, debe garantizarse que además el perfil de la lámina de agua sea estable. Por ello al mismo tiempo que los

resultados de la Figura 65 y de la Figura 66, se representará la lámina de agua en el dispositivo analizado (Figura 67).

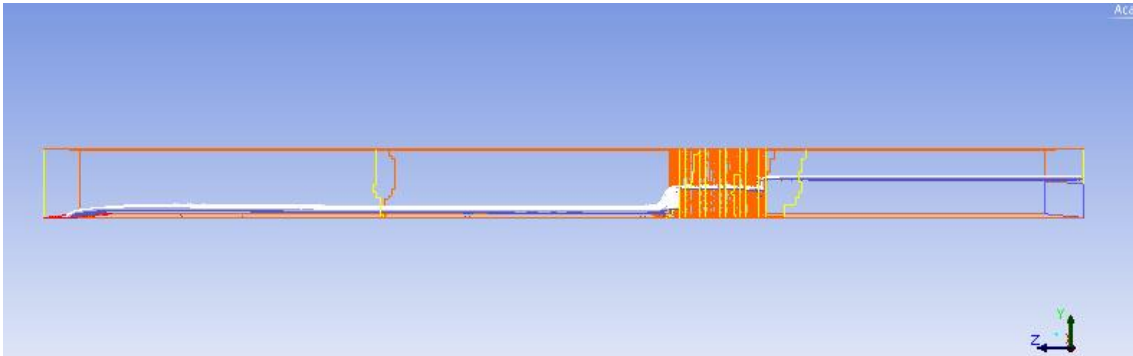


Figura 67. Perfil de la lámina de agua para la configuración “1x2x1T” y régimen permanente.

La Figura 67 recoge a modo de ejemplo la imagen del resultado del perfil de la lámina de agua para la configuración “1x2x1 T”. Cuando se observe que los resultados de la Figura 66 y Figura 67 estén invariables podrá considerarse alcanzado el régimen permanente final.

5. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES CFD.

En los siguientes apartados se recogen los resultados obtenidos de las simulaciones mediante técnicas CFD de 4 de las 6 configuraciones de estudio definidas en los apartados anteriores. De todos estos estudios se ha seleccionado la configuración 1x2x1 como configuración de referencia para estudiar sobre la misma los efectos de diferentes geometrías. Asimismo, dicha geometría se ha seleccionado también como aquella sobre la que se han desarrollado los diferentes protocolos de comparación de resultados con los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Así, en primer lugar, se va a proceder a estudiar la configuración 1x2x1 con un caudal de 37.83 l/s. Se comparan así los ensayos de laboratorio con dos simulaciones obtenidas en ANSYS; una con una geometría con los espesores reales de la misma de 2 mm para las caras de exteriores del Aquacell, así como de las cartelas interiores y otra simplificada eliminando los espesores de estas. Esta simplificación está realizada con la idea de reducir la complejidad del modelo. El método de trabajo ha sido estudiar sobre esta primera configuración la influencia que presenta la simplificación de la geometría. Posteriormente, si la simplificación es adecuada se extrapolará la misma para geometrías y configuraciones más complejas.

5.1. Análisis configuración 1x2x1.

5.1.1. Simulación con Geometría Real, $Q=37.83$ l/s.

Tal como se ha descrito en apartados anteriores, esta configuración presenta dos Aquacell dispuestos en una posición intermedia del canal de 0.5 metros de ancho, presentando una sola fila tanto en dirección transversal como longitudinal al flujo y dos en sentido vertical.

Considerando un caudal de entrada de 37.83 l/s y tras llevar a cabo la simulación, la solución proporcionada por el software para la geometría real es la que puede observarse en las siguientes figuras.

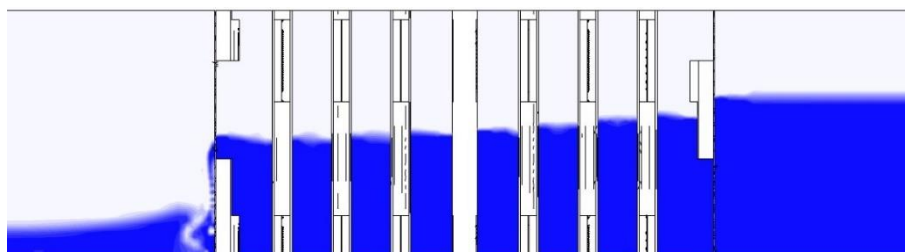


Figura 68. Perfil del flujo de agua en elemento modular con geometría real 1x2x1, $Q=37.83$ l/s.

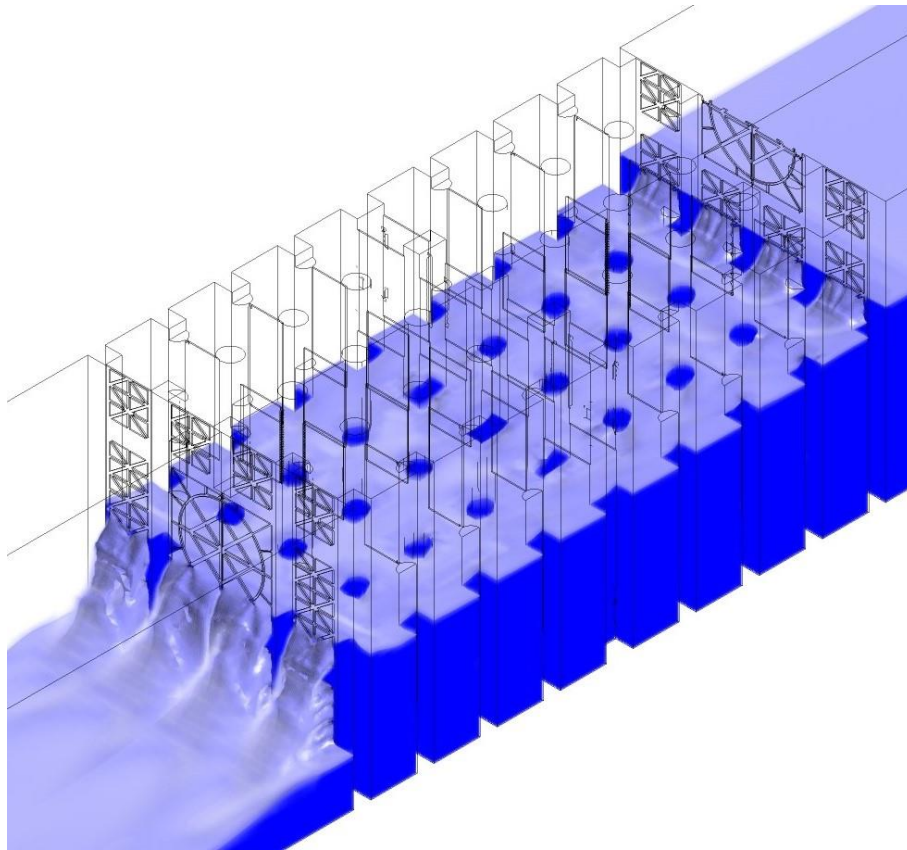


Figura 69. Volumen de agua en elemento modular 3D con geometría real 1x2x1, $Q=37.83$ l/s.

5.1.2. Simulación con Geometría Simplificada, $Q=37.83$ l/s.

Dado que resulta extremadamente complicado obtener buenas soluciones e incluso llegar a ellas introduciendo en el modelo la geometría que representa más fielmente la estructura del propio elemento modular debido a la existencia de espesores tan pequeños dificultan la operación de mallado incrementado el número de celdas del mismo, así como su calidad. Todo ello se traduce en tiempos de cálculo excesivamente elevados e incluso problemas a la hora de conseguir la convergencia de la solución. Por ello, y en vistas de hacer simulaciones con geometrías más complejas se decide introducir una serie de cambios sobre la geometría real de partida, siendo el factor más destacado la supresión del espesor en todos los elementos que definen la geometría del Aquacell. Tras llevar a cabo la simulación, la solución proporcionada por el software para la geometría simplificada es la que puede observarse en la Figura 70 y en la Figura 71.

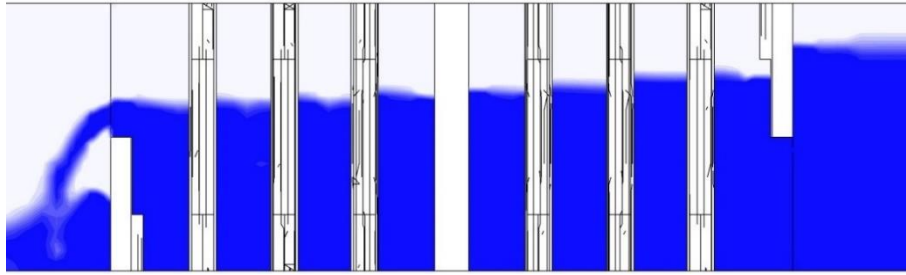


Figura 70. Perfil del flujo de agua en elemento modular con geometría simplificada 1x2x1, $Q=37.83$ l/s.

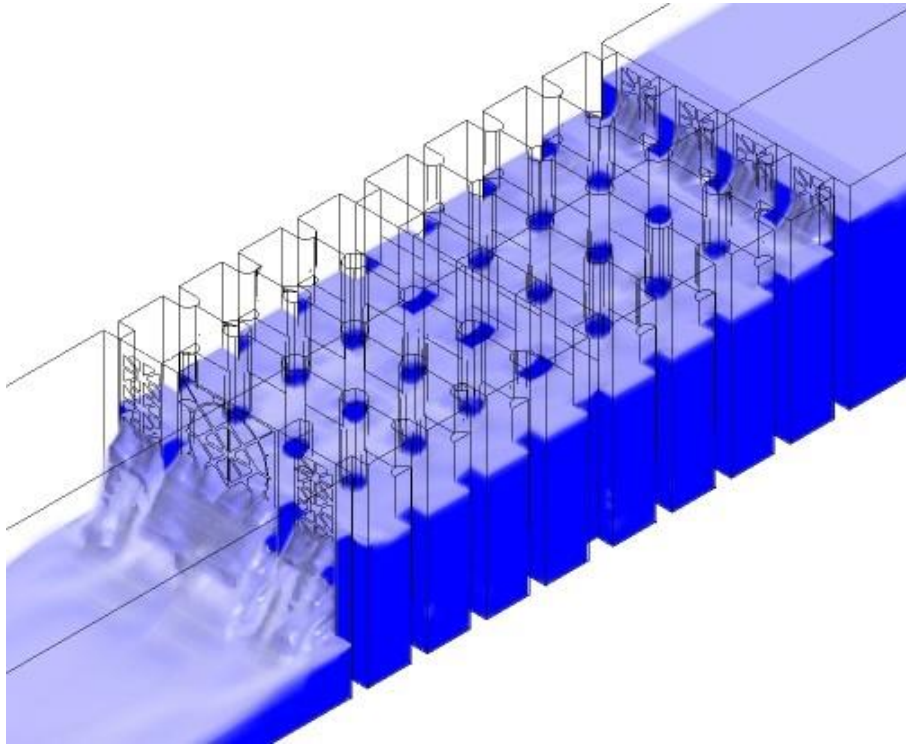


Figura 71. Volumen de agua en elemento modular 3D con geometría simplificada 1x2x1, $Q=37.83$ l/s.

Aunque en posteriores puntos se exponen los resultados obtenidos para la comparación entre los resultados de las simulaciones con y sin espesores, se puede avanzar que se va a aceptar dicha simplificación y, por tanto, se va a aplicar para las geometrías de los modelos que van a ser simulados computacionalmente de aquí en adelante.

5.1.3. Simulación con Geometría Simplificada para el resto de caudales ensayados

Para el resto de caudales ensayados en laboratorio para esta configuración, la solución de los perfiles proporcionada por el software de modelación computacional es la que se presenta en las siguientes imágenes.

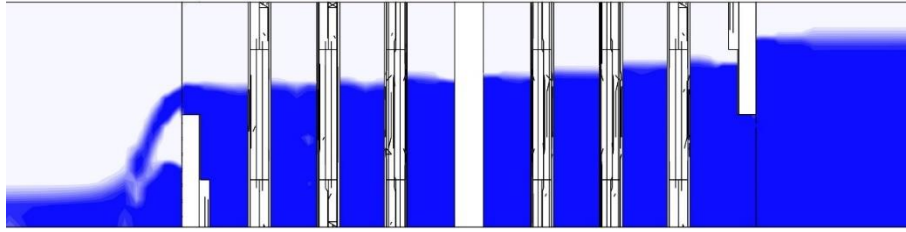


Figura 72. Perfil del flujo de agua en elemento modular con geometría simplificada 1x2x1, $Q=36.95$ l/s.

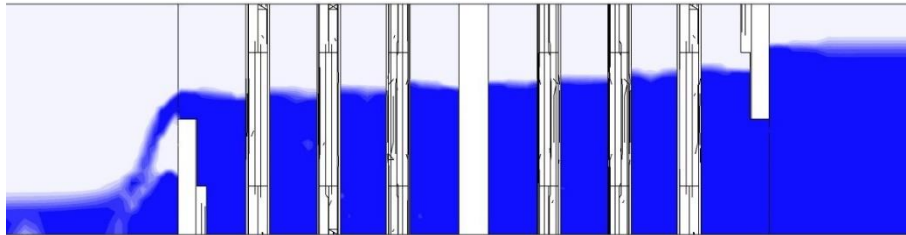


Figura 73. Perfil del flujo de agua en elemento modular con geometría simplificada 1x2x1, $Q=35.23$ l/s.

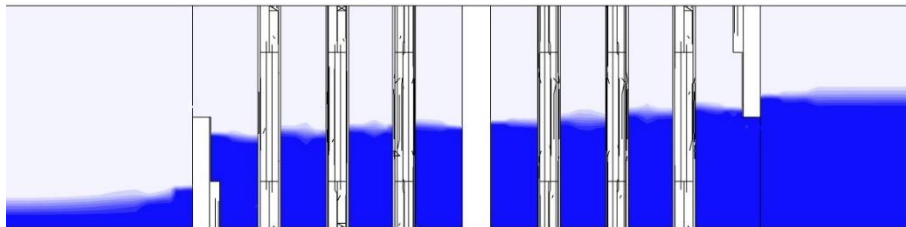


Figura 74. Perfil del flujo de agua en elemento modular con geometría simplificada 1x2x1, $Q=19.48$ l/s.

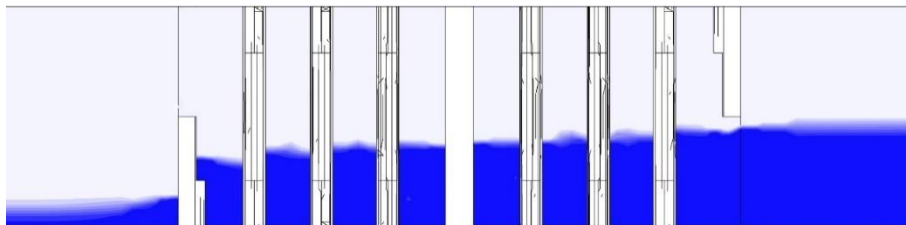


Figura 75. Perfil del flujo de agua en elemento modular con geometría simplificada 1x2x1, $Q=11.58$ l/s.

A continuación, se presenta el volumen ocupado por la fase líquida en la zona que representa el volumen fluido (agua o aire) que se correspondería con la presencia del elemento modular para el máximo y el mínimo de los caudales ensayados en este apartado.

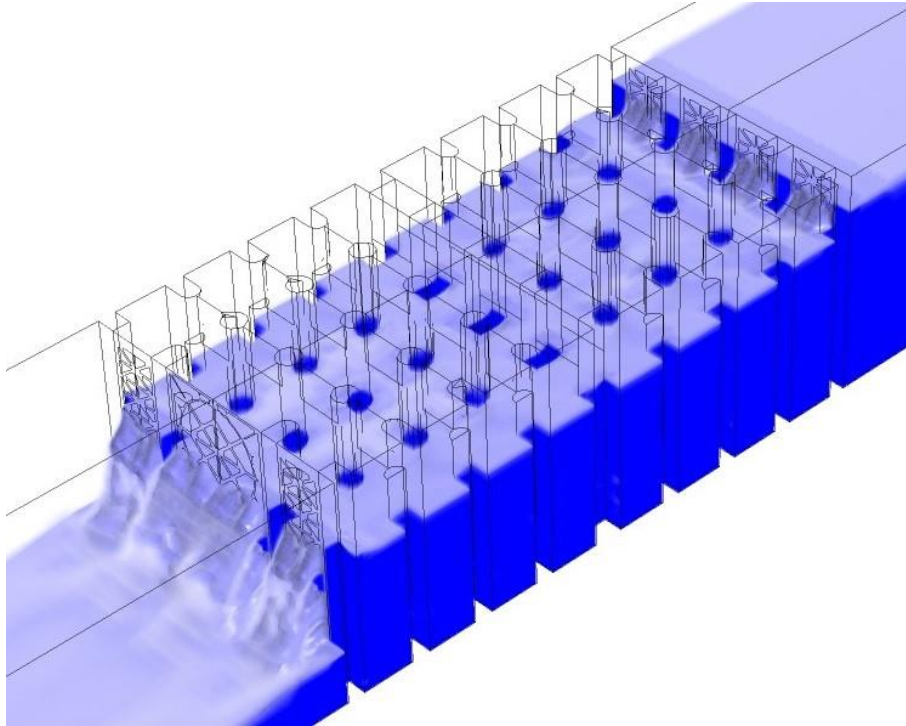


Figura 76. Volumen de agua en elemento modular 3D con geometría simplificada 1x2x1, $Q=36.95$ l/s.

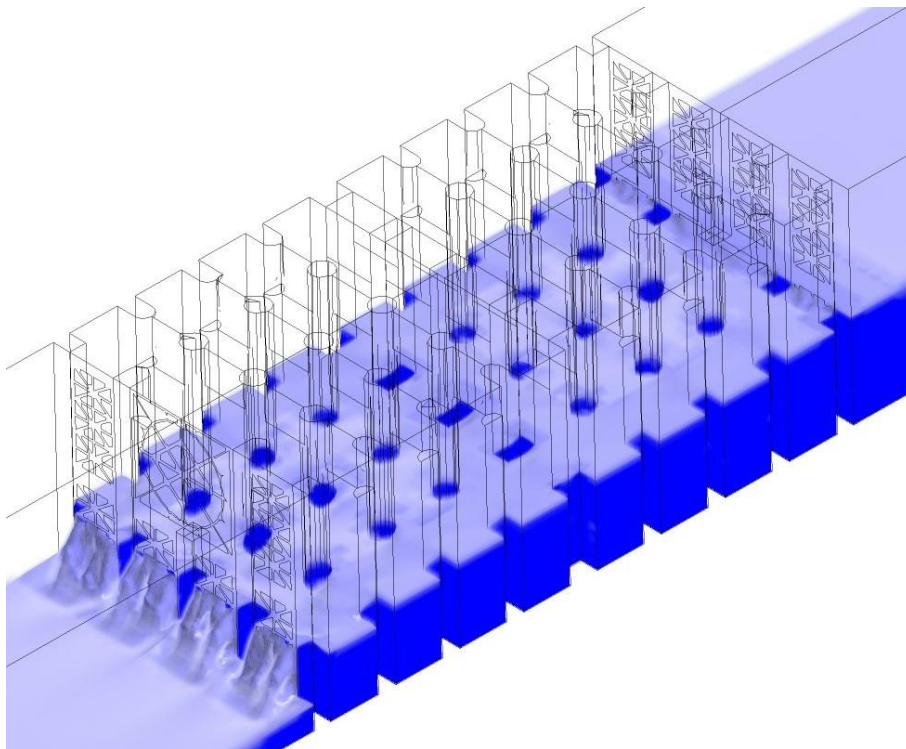


Figura 77. Volumen de agua en elemento modular 3D con geometría simplificada 1x2x1, $Q=11.58$ l/s.

5.1.4. Comparación resultados laboratorio-Ansys.

Una parte importante de los análisis mediante técnicas CFD es la validación de los resultados obtenidos. Para ello en la Universidad de Los Andes se construyó un prototipo sobre el cual fue posible analizar las diferentes configuraciones definidas.

En los apartados siguientes se recoge la comparación entre los resultados obtenidos mediante las técnicas CFD y los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio. Esta comparación, al mismo tiempo que permite validar los resultados del CFD, permite comparar entre sí las simplificaciones realizadas en la geometría. La validación de que los resultados de las geometrías simplificadas no difieren demasiado de los resultados de laboratorio es fundamental para poder utilizar estas simplificaciones en configuraciones más complejas.

Asimismo, se procede a intentar representar el comportamiento del Aquacell como un conducto que presenta un coeficiente de Manning específico, así como unas pérdidas de carga localizadas tanto en la entrada y salida como en el punto medio del Aquacell. De obtener un resultado concluyente de la modelación de los Aquacells de esta forma se podrá implementar la representación de los mismos en el modelo SWMM (Gironás, Roesner, Rossman, & Davis, 2010).

5.1.4.1. Resultados caso 1: $Q=37.83$ l/s.

A continuación, se presenta una gráfica (Figura 78) en la que puede observarse el nivel alcanzado por el agua para un caudal de 37.83 l/s en los 3 casos siguientes: ensayo de laboratorio, geometría con espesores y geometría sin espesores.

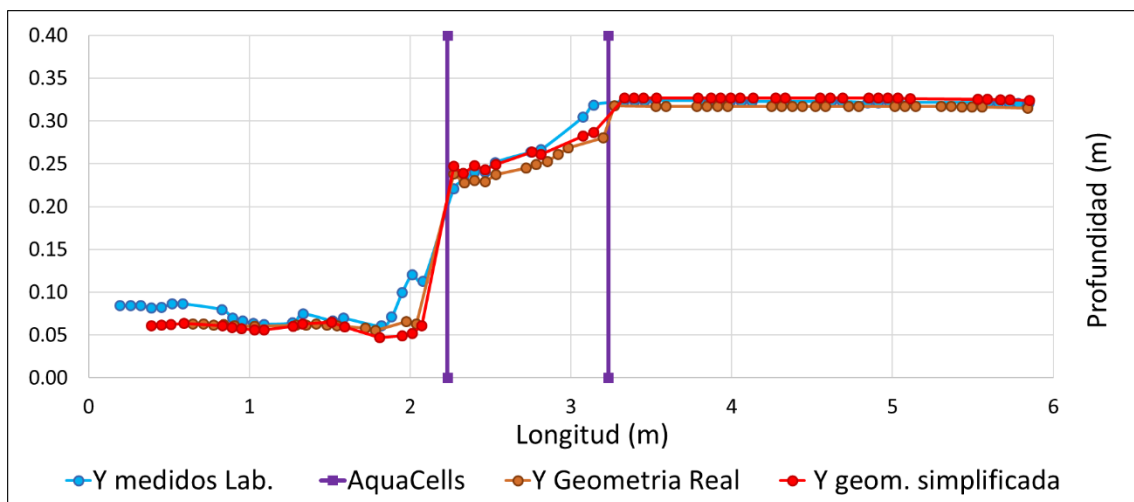


Figura 78. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio, geometría real y simplificada 1x2x1, $Q=37.83$ l/s.

Como puede observarse, los resultados obtenidos en el laboratorio son muy similares a los que se desprenden de la modelación computacional. Además, el efecto de introducir los espesores en las distintas partes que componen la geometría del modelo tiene muy poca

influencia en los resultados obtenidos. Por tanto, a partir de este punto se va a proceder a simular futuras configuraciones siempre con la citada simplificación en los espesores. Otra conclusión extraída a partir del análisis de las gráficas expuestas anteriormente es que los ensayos de laboratorio desprenden resultados fiables, al menos para esta configuración.

Validados los resultados del CFD se va a proceder a determinar los parámetros que caracterizan el comportamiento de un Aquacell, asimilando su comportamiento al de una conducción. En este caso, se pretende determinar los valores del coeficiente de Manning y de las pérdidas de carga localizadas a la entrada y a la salida del Aquacell.

Para ello se toma como punto de partida los valores del calado en diferentes puntos antes y después de las caras de entrada y salida del Aquacell. El valor del coeficiente de pérdidas de carga adimensional en una de las caras del Aquacell se determina analizando la pérdida de energía entre un punto antes (punto 1) y otro después (punto 2) de dicha cara. Matemáticamente el coeficiente k se determina mediante la expresión

$$k = \frac{2g \cdot \Delta H}{\left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)^2} \quad (16)$$

En la expresión anterior:

- k es el valor del coeficiente adimensional de pérdidas de carga localizada de la cara del Aquacell.
- v_1 y v_2 son las velocidades en los puntos aguas arriba y aguas abajo de la cara del Aquacell. Dichas velocidades se obtienen a partir del caudal Q circulante y de los calados z_1 y z_2 en los mismos puntos.
- ΔH es la pérdida de energía entre los puntos 1 y 2. Dicha diferencia de energía se termina de acuerdo a la expresión:

$$\Delta H = E_1 - E_2 = \left(z_1 + \frac{v_1^2}{2g}\right) - \left(z_2 + \frac{v_2^2}{2g}\right) \quad (17)$$

De forma similar se realiza el cálculo del coeficiente de Manning equivalente para el tramo de Aquacell estudiado. Se parte así de la ecuación de Manning que relaciona la velocidad V en el conducto con el radio hidráulico R_h y la pendiente hidráulica s .

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot s^{1/2} \quad (18)$$

Así, el coeficiente de Manning equivalente se obtiene de la ecuación (18) considerando un valor medio de la velocidad como promedio de la entrada y la salida y un valor también promedio del radio hidráulico. La pendiente hidráulica s se obtiene como ratio entre la diferencia de energías entre la entrada y la salida y la longitud L del Aquacell. Este planteamiento de cálculo de las pérdidas localizadas del Aquacell y de su coeficiente de Manning equivalente se aplica a tres casos diferentes: a los resultados obtenidos

directamente de los ensayos de laboratorio (Tabla 4), a los resultados obtenidos del análisis mediante técnicas CFD con la geometría completa (

Tabla 5), y a los resultados obtenidos mediante CFD con la geometría simplificada.

Tabla 4. Pérdidas localizadas y coeficiente de Manning equivalente para un Aquacell en configuración 1x2x1 a partir de los datos de laboratorio (Q=37.83 l/s).

Q = 37.83 l/s - Datos de los ensayos de laboratorio.													
Obtención del coeficiente de pérdidas adimensionales k													
Q	z ₁	z ₂	v ₁	v ₂	v ₁ ² /2g	v ₂ ² /2g	E ₁	E ₂	ΔH	k _i			
37.83	0.3225	0.2665	0.23	0.28	0.00	0.00	0.33	0.27	0.05	16			
37.83	0.2205	0.0715	0.34	1.06	0.01	0.06	0.23	0.13	0.10	4			
Obtención del coeficiente de Manning equivalente													
Q	x ₁	z ₁	x ₂	z ₂	L	D _z	s	v ₁	v ₂	A ₁	A ₂	R _h	n
37.83	-2.815	0.2665	-2.27	0.2208	0.545	0.04575	0.084	0.284	0.343	0.133	0.110	0.123	0.229

Tabla 5. Pérdidas localizadas y coeficiente de Manning equivalente para un Aquacell en configuración 1x2x1 a partir de los resultados CFD con la geometría completa (Q=37.83 l/s).

Q = 37.83 l/s - Resultados CFD con geometría completa													
Obtención del coeficiente de pérdidas adimensionales k													
Q	z ₁	z ₂	v ₁	v ₂	v ₁ ² /2g	v ₂ ² /2g	E ₁	E ₂	ΔH	k _i			
37.83	0.318	0.281	0.24	0.27	0.00	0.00	0.32	0.28	0.04	11			
37.83	0.238	0.066	0.32	1.15	0.01	0.07	0.24	0.13	0.11	4			
Obtención del coeficiente de Manning equivalente													
Q	x ₁	z ₁	x ₂	z ₂	L	D _z	s	v ₁	v ₂	A ₁	A ₂	R _h	n
37.83	-3.195	0.281	-2.461	0.229	0.734	0.051	0.070	0.270	0.330	0.140	0.115	0.126	0.222

Tabla 6. Pérdidas localizadas y coeficiente de Manning equivalente para un Aquacell en configuración 1x2x1 a partir de los resultados CFD con la geometría simplificada (Q=37.83 l/s).

Q = 37.83 l/s - Resultados CFD con geometría simplificada													
Obtención del coeficiente de pérdidas adimensionales k													
Q	z ₁	z ₂	v ₁	v ₂	v ₁ ² /2g	v ₂ ² /2g	E ₁	E ₂	ΔH	k _i			
37.83	0.326	0.286	0.23	0.26	0.00	0.00	0.33	0.29	0.04	12			
37.83	0.247	0.061	0.31	1.24	0.00	0.08	0.25	0.14	0.11	4			
Obtención del coeficiente de Manning equivalente													
Q	x ₁	z ₁	x ₂	z ₂	L	D _z	s	v ₁	v ₂	A ₁	A ₂	R _h	n
37.83	-3.142	0.286	-2.467	0.242	0.675	0.044	0.065	0.264	0.312	0.143	0.121	0.128	0.225

Como puede apreciarse, la disipación energética distribuida a lo largo del Aquacell, que se representa mediante el coeficiente de Manning, tiene una buena correlación entre los datos experimentales y los análisis mediante técnicas CFD. En los tres casos, el valor del “n” de Manning está comprendido entre 0.22 y 0.23. No ocurre lo mismo en el caso del análisis de

las pérdidas localizadas en la entrada o salida del Aquacell. No obstante, este valor presenta resultados muy similares tanto para la geometría completa como para la geometría simplificada.

El enfoque del coeficiente de Manning equivalente y del coeficiente de pérdidas localizadas en los Aquacells “k” se basa en la idea de que todos los elementos modulares presentes en la configuración tengan un valor similar. Por ello, este procedimiento de análisis simplificado de los Aquacells será objeto de estudios más específicos en apartados posteriores del presente trabajo.

5.1.4.2. Resultados para distintos caudales.

En primer lugar, se van a presentar una serie de gráficas comparativas entre los calados obtenidos tras la simulación computacional y los obtenidos en laboratorio, para los distintos caudales ensayados.

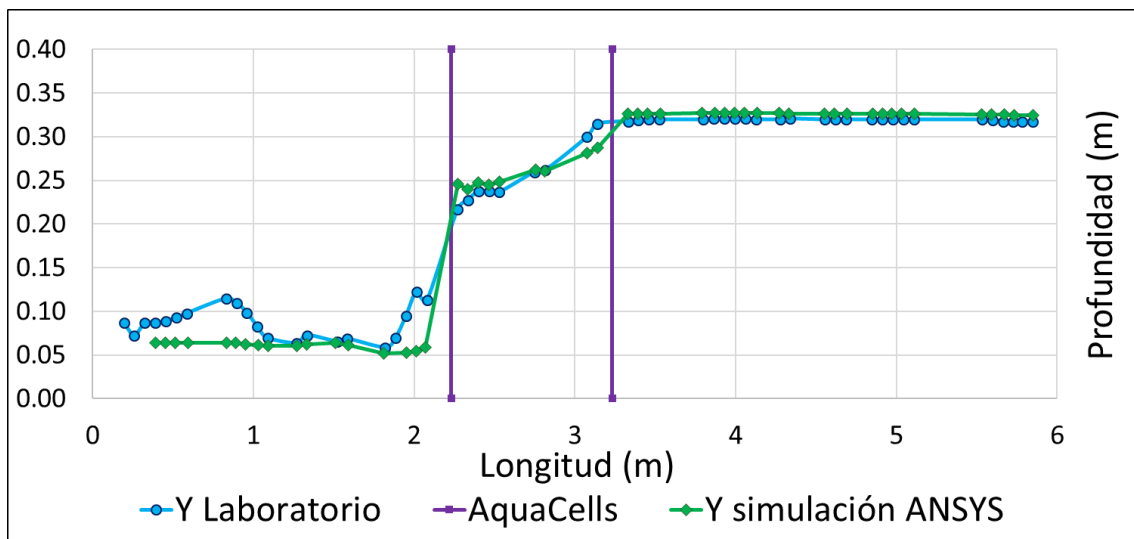


Figura 79. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio y geometría simplificada 1x2x1, Q=36.95 l/s.

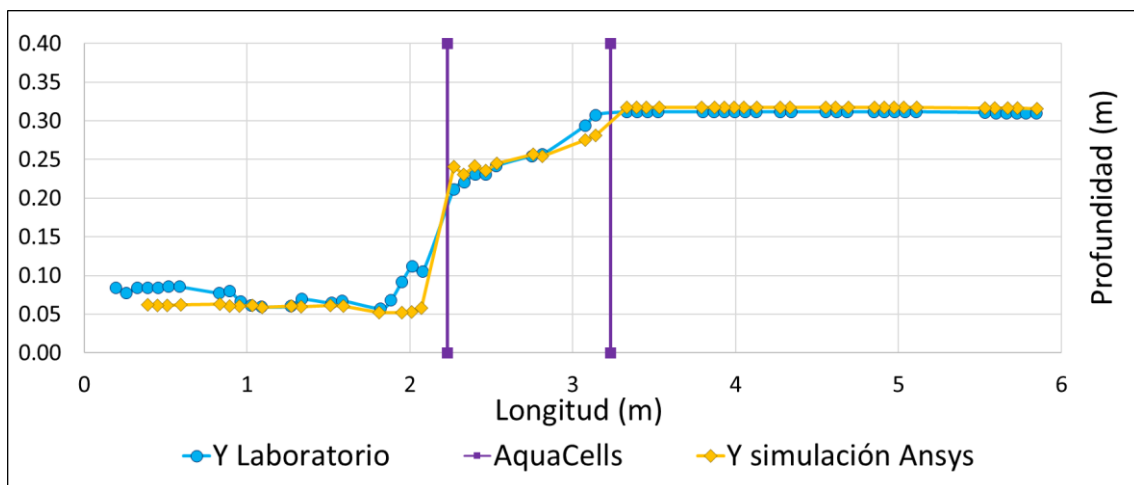


Figura 80. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio y geometría simplificada 1x2x1, Q=35.23 l/s.

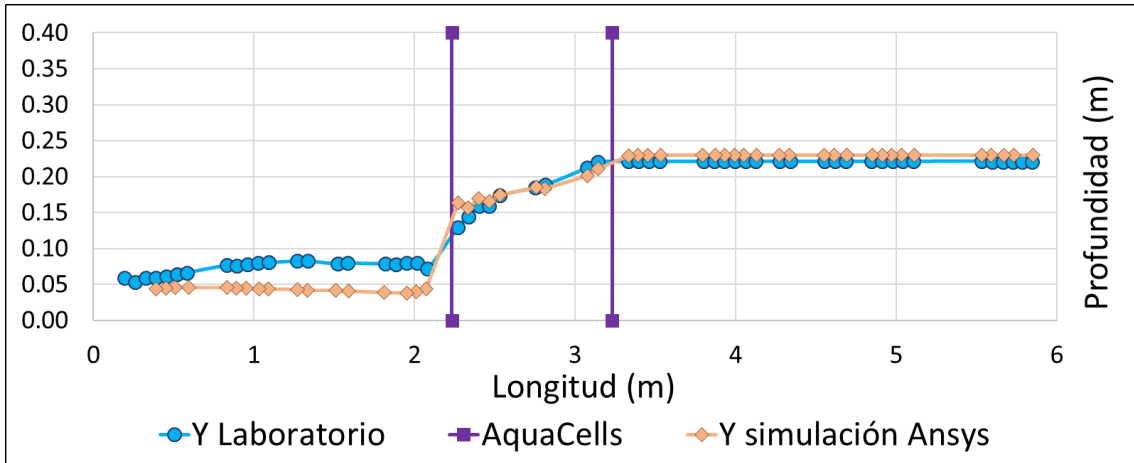


Figura 81. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio y geometría simplificada 1x2x1, Q=19.48 l/s.

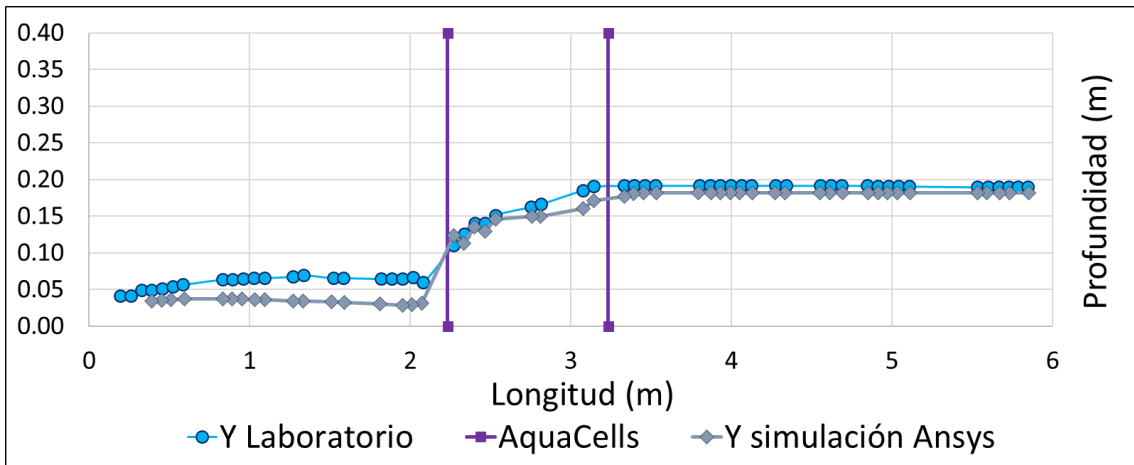


Figura 82. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio y geometría simplificada 1x2x1, Q=11.58 l/s.

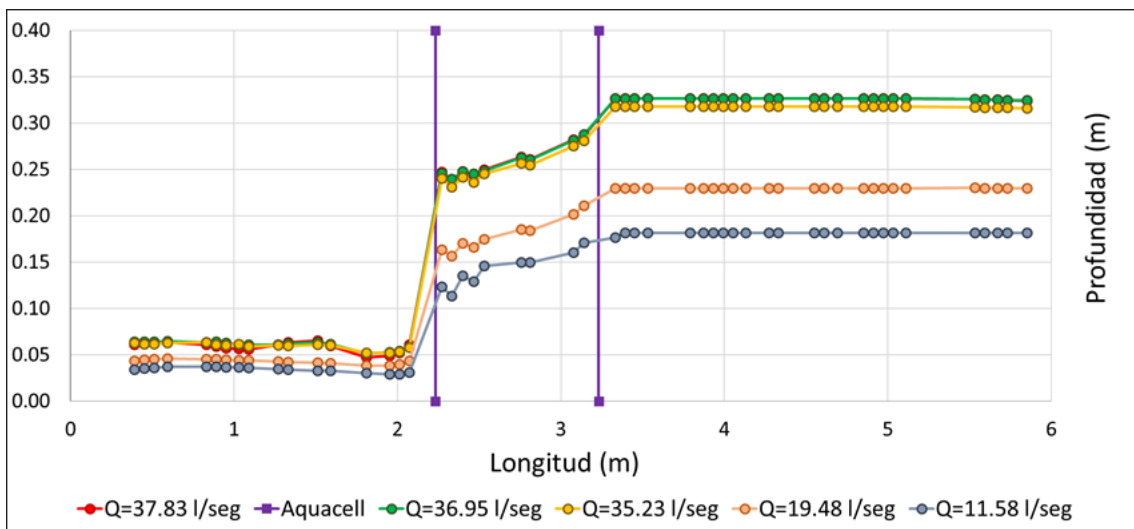


Figura 83. Comparativa perfiles obtenidos mediante CFD para distintos caudales y configuración 1x2x1.

En la Figura 83, se presenta una gráfica comparativa de los calados obtenidos únicamente a partir de la modelación computacional para los distintos caudales expuestos anteriormente para la configuración objeto de este apartado.

En las gráficas anteriores se observa como los perfiles obtenidos mediante modelación computacional se asemejan bastante a los obtenidos en laboratorio. Por tanto, se concluye que los modelos introducidos para la modelación reproducen con bastante exactitud el comportamiento hidráulico real de las celdas modulares ensayadas en este punto.

A continuación, se presentan en la Tabla 7 los valores del coeficiente de Manning equivalente n_{eq} y el coeficiente de pérdidas adimensional en la entrada y salida del Aquacell (k_e) y (k_s) obtenidos para los distintos caudales ensayados en laboratorio, así como para los casos simulados en ANSYS para la geometría simplificada.

Tabla 7. Tabla resumen de los valores N-K en conf. 1x2x1, casos laboratorio y CFD.

Q (l/s)	Datos ensayos			CFD geometría simplificada		
	n_{eq}	k_e	k_s	n_{eq}	k_e	k_s
37.83	0.229	16	4	0.225	12	4
36.95	0.228	16	3	0.229	13	4
35.23	0.232	17	3	0.238	13	4
19.48	0.275	17	5	0.252	16	5
11.58	0.297	21	11	0.220	22	6

De la Tabla 7 se desprende que los valores del coeficiente de Manning equivalente obtenidos mediante simulación computacional para los distintos caudales estudiados son muy similares a los obtenidos a partir de los datos de laboratorio. Respecto a los coeficientes “k” de pérdidas localizadas, señalar que mientras que para las pérdidas a la salida son prácticamente idénticos en ambos casos, los referidos a las pérdidas a la entrada son ligeramente inferiores en los casos obtenidos computacionalmente, siendo estos muy similares entre ellos para los distintos caudales.

5.2. Análisis configuración 1x2x4.

Esta configuración presenta un total de ocho Aquacells dispuestos en un canal de 0.5 metros de ancho, presentando una sola fila en perpendicular al flujo, dos filas en dirección vertical y 4 en dirección longitudinal al mismo.

5.2.1. Resultados de la modelación computacional para los distintos caudales estudiados.

A continuación, se presentan una serie de imágenes que representan los perfiles adoptados por el flujo de agua a lo largo del sistema objeto de simulación mediante técnicas CFD para los distintos caudales analizados en esta configuración. Como puede observarse, la lámina de agua presenta calados menores a medida que el flujo va atravesando los distintos elementos modulares y, por tanto, las velocidades del mismo serán mayores. Además, se

aprecia como a medida que los caudales son mayores la lámina de agua va ascendiendo de forma más o menos paralela, pero ni mucho menos horizontal, tal y como sucedería en un tanque de tormenta convencional.

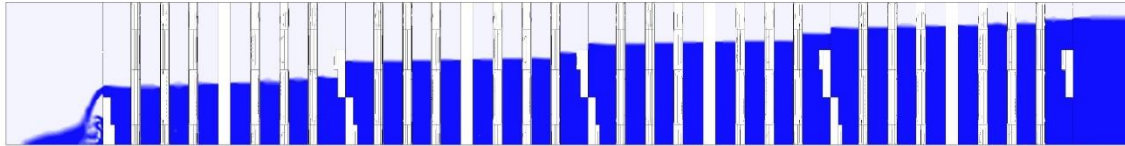


Figura 84. Perfil del flujo de agua en canal completo y geometría simplificada 1x2x4, $Q=37.83$ l/s.

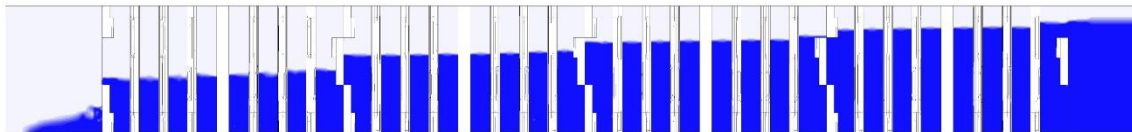


Figura 85. Perfil del flujo de agua en canal completo y geometría simplificada 1x2x4, $Q=30.37$ l/s.

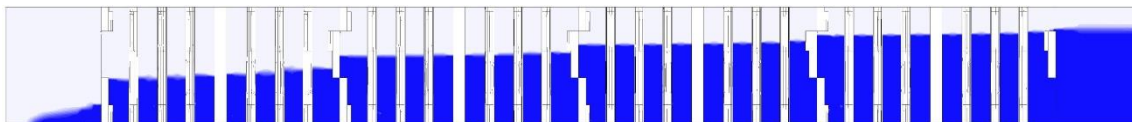


Figura 86. Perfil del flujo de agua en canal completo y geometría simplificada 1x2x4, $Q=25.59$ l/s.



Figura 87. Perfil del flujo de agua en canal completo y geometría simplificada 1x2x4, $Q=21.61$ l/s.

Con el propósito de ilustrar de la mejor forma posible los resultados obtenidos de estas simulaciones se muestra seguidamente el gráfico correspondiente al volumen en 3D ocupado por la fase líquida del volumen fluido para los caudales máximo y mínimo de los ensayos computacionalmente con esta configuración.

Gracias a estas imágenes es posible apreciar las zonas en las que se producen las principales pérdidas de energía localizadas, las cuales se corresponden principalmente con las zonas de contacto entre elementos modulares.

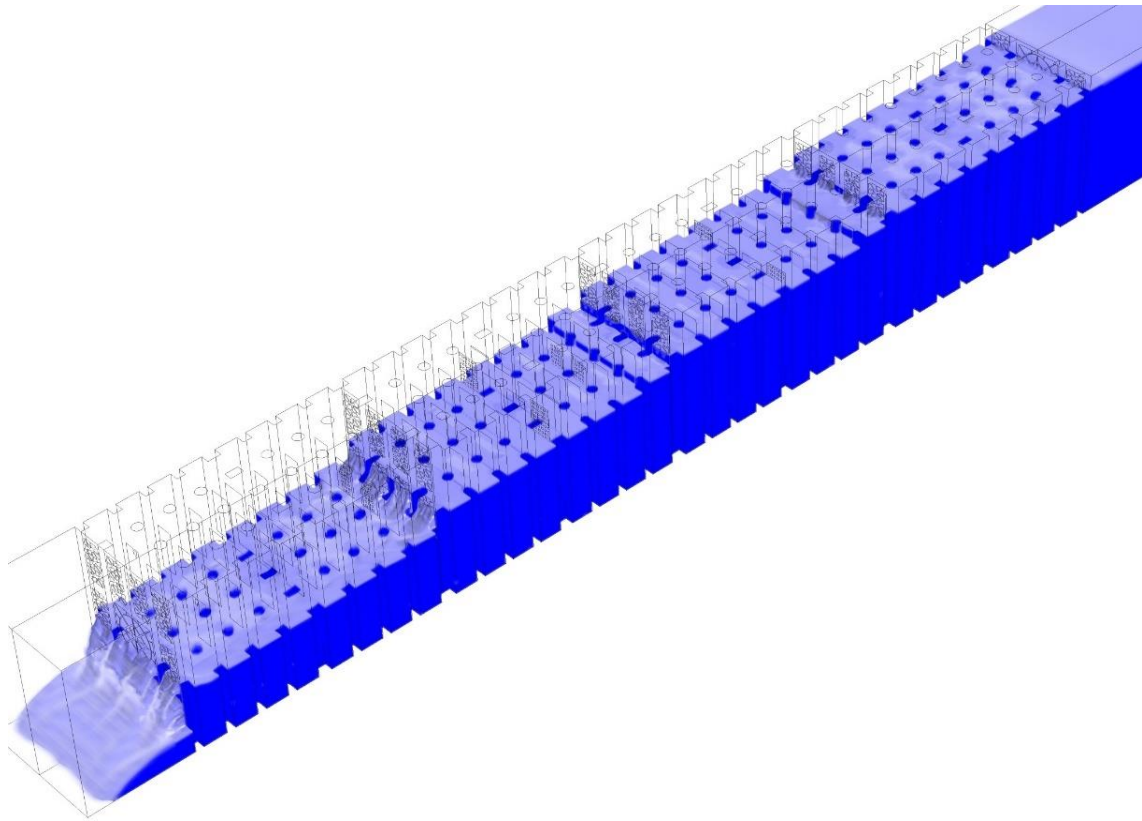


Figura 88. Volumen de agua en elementos modulares 3D con geometría simplificada 1x2x4, $Q=37.83$ l/s.

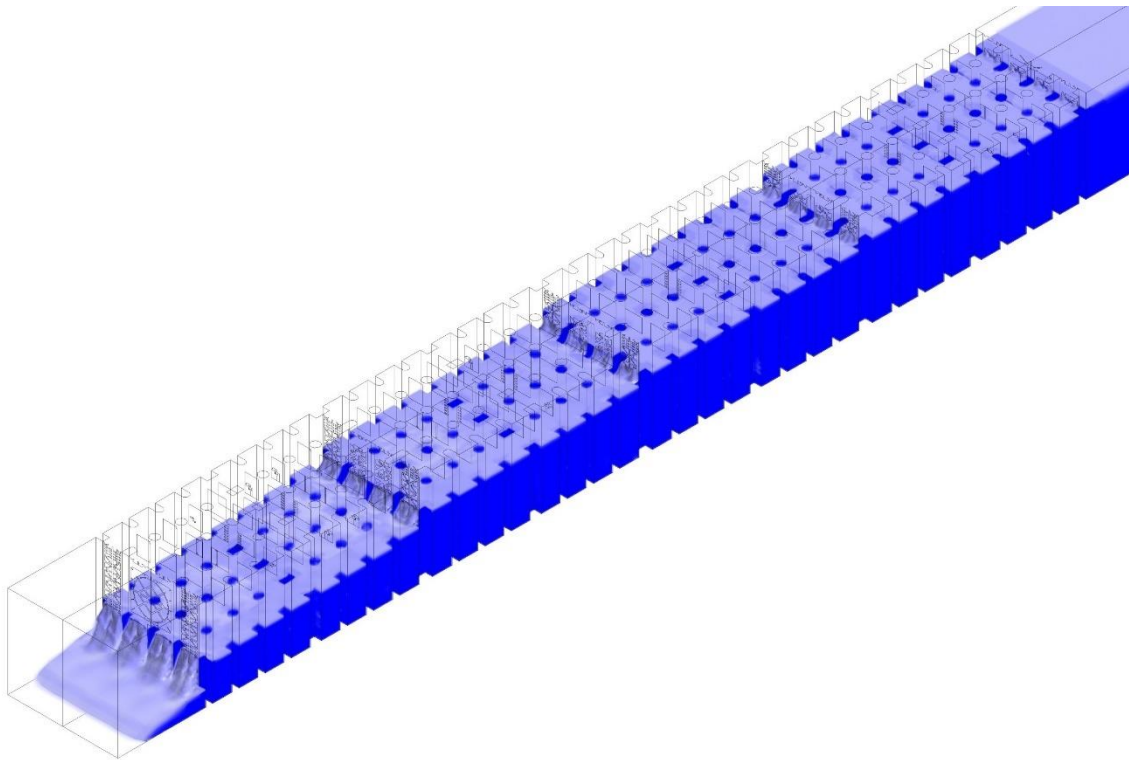


Figura 89. Volumen de agua en elementos modulares 3D con geometría simplificada 1x2x4, $Q=21.61$ l/s.

5.2.2. Comparación resultados laboratorio-CFD.

5.2.2.1. Resultados caso 1, $Q=25.59$ l/s.

Para la configuración 1x2x4 se va a proceder de la misma forma que se ha hecho en el punto anterior para la configuración 1x2x1. A continuación, se muestra la gráfica con el nivel de agua obtenido en el laboratorio y el obtenido mediante modelación computacional.

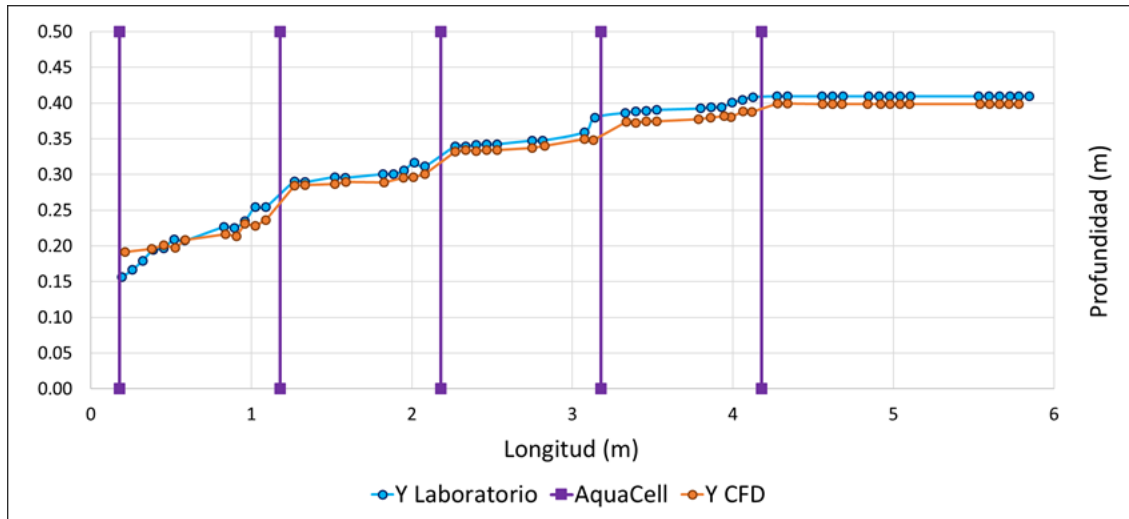


Figura 90. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs geometría simplificada 1x2x4, $Q=25.59$ l/s.

Posteriormente, se procede a determinar los valores de los coeficientes de pérdidas de la misma forma que se ha descrito en el punto anterior. A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir de las mediciones de nivel obtenidas en el laboratorio para un caudal de 25.59 l/s.

Tabla 8. Valores de las pérdidas localizadas obtenidos en configuración 1x2x4 Laboratorio, $Q=25.59$ l/s.

Obtención del coeficiente de pérdidas adimensionales k ($Q=25.59$ l/s)											
Entrada Aquacell	Q	z_1	z_2	v_1	v_2	$v_1^2/2g$	$v_2^2/2g$	E_1	E_2	ΔH	k_i
1	25.59	0.41	0.395	0.12	0.13	0.00	0.00	0.41	0.40	0.01	18
2	25.59	0.387	0.36	0.13	0.14	0.00	0.00	0.39	0.36	0.03	28
3	25.59	0.342	0.301	0.15	0.17	0.00	0.00	0.34	0.30	0.04	31
4	25.59	0.29	0.227	0.18	0.23	0.00	0.00	0.29	0.23	0.06	30

Como puede observarse, los valores k_i de los distintos Aquacells están entre 20 y 30 aproximadamente. Además, es lógico que el valor de k a la entrada del primer Aquacell (Punto 1) sea notablemente inferior a los valores de k para las zonas de contacto entre módulos adyacentes (puntos 2, 3 y 4) ya que en estos últimos el flujo sufre tanto estrechamiento como ensanchamiento.

A continuación, se muestra una tabla con los resultados obtenidos para el cálculo de los valores del coeficiente de Manning para los tramos correspondientes a los Aquacells.

Tabla 9. Valores de los coeficientes de Manning equivalente en configuración 1x2x4 Laboratorio, Q=25.59 l/s.

Obtención del coeficiente de Manning equivalente														
Aquacell	Q	x ₁	z ₁	x ₂	z ₂	L	D _z	s	v ₁	v ₂	A ₁	A ₂	R _h	n _i
1	25.59	-3.93	0.395	-3.33	0.387	0.6	0.008	0.013	0.130	0.132	0.198	0.194	0.152	0.252
2	25.59	-3.075	0.36	-2.4	0.342	0.675	0.018	0.027	0.142	0.150	0.180	0.171	0.146	0.310
3	25.59	-1.885	0.301	-1.335	0.29	0.55	0.011	0.020	0.170	0.176	0.151	0.145	0.135	0.215
4	25.59	-0.83	0.227	-0.325	0.18	0.505	0.047	0.093	0.225	0.284	0.114	0.090	0.112	0.278

En este caso, los valores del coeficiente Manning están comprendidos entre 0.2 y 0.3. Pero dado que es evidente que los resultados obtenidos muestran diferencias en los parámetros k y n para los distintos Aquacells, lo ideal sería poder asignar unos únicos valores para todos los Aquacells presentes en la configuración de manera que se consiga reproducir lo más fielmente posible el comportamiento de los Aquacells, empleando el software SWMM 5.0 (Ver apartado 9 del presente informe).

Posteriormente, se realizan los mismos cálculos con los resultados obtenidos de la modelación computacional para este mismo caudal, y los resultados obtenidos son los que se presentan a continuación.

Tabla 10. Valores de las pérdidas localizadas obtenidos en configuración 1x2x4. Simulación CFD. Q=25.59 l/s.

Obtención del coeficiente de pérdidas adimensionales k (Q=25.59 l/s)												
Entrada Aquacell	Q	z ₁	z ₂	v ₁	v ₂	v ₁ ² /2g	v ₂ ² /2g	E ₁	E ₂	ΔH	k _i	
1	25.59	0.399	0.382	0.13	0.13	0.00	0.00	0.40	0.38	0.02	20	
2	25.59	0.372	0.349	0.14	0.15	0.00	0.00	0.37	0.35	0.02	22	
3	25.59	0.333	0.295	0.15	0.17	0.00	0.00	0.33	0.30	0.04	27	
4	25.59	0.285	0.216	0.18	0.24	0.00	0.00	0.29	0.22	0.07	31	

De la misma forma que para el caso ensayado en laboratorio, a continuación, se muestra la Tabla 11 con los resultados obtenidos para el cálculo de los valores del coeficiente de Manning para los tramos correspondientes a los Aquacells.

Tabla 11. Valores de los coeficientes de Manning equivalente en configuración 1x2x4. Simulación CFD. Q=25.59 l/s.

Obtención del coeficiente de Manning equivalente														
Aquacell	Q	x ₁	z ₁	x ₂	z ₂	L	D _z	s	v ₁	v ₂	A ₁	A ₂	R _h	n _i
1	25.59	-3.952	0.382	-3.336	0.372	0.616	0.009	0.015	0.134	0.137	0.191	0.186	0.150	0.254
2	25.59	-3.076	0.349	-2.400	0.333	0.676	0.017	0.025	0.146	0.154	0.175	0.166	0.144	0.287
3	25.59	-1.952	0.296	-1.336	0.285	0.616	0.011	0.017	0.173	0.179	0.148	0.143	0.134	0.196
4	25.59	-0.836	0.216	-0.273	0.192	0.564	0.025	0.044	0.237	0.267	0.108	0.096	0.112	0.194

Se observa que en la simulación computacional se obtienen valores tanto del coeficiente de Manning como de pérdidas localizadas similares a los del ensayo de laboratorio. A la hora de analizar estos resultados, destacar que lo importante es que en ambos casos las pérdidas totales (diferencia de nivel entre la entrada del primer Aquacell y la salida del último) son prácticamente idénticas.

5.2.2.2. Resultados para otros caudales.

En primer término, se presentan las gráficas comparativas entre calados obtenidos mediante modelación computacional y calados observados en laboratorio para el resto de caudales estudiados en esta configuración.

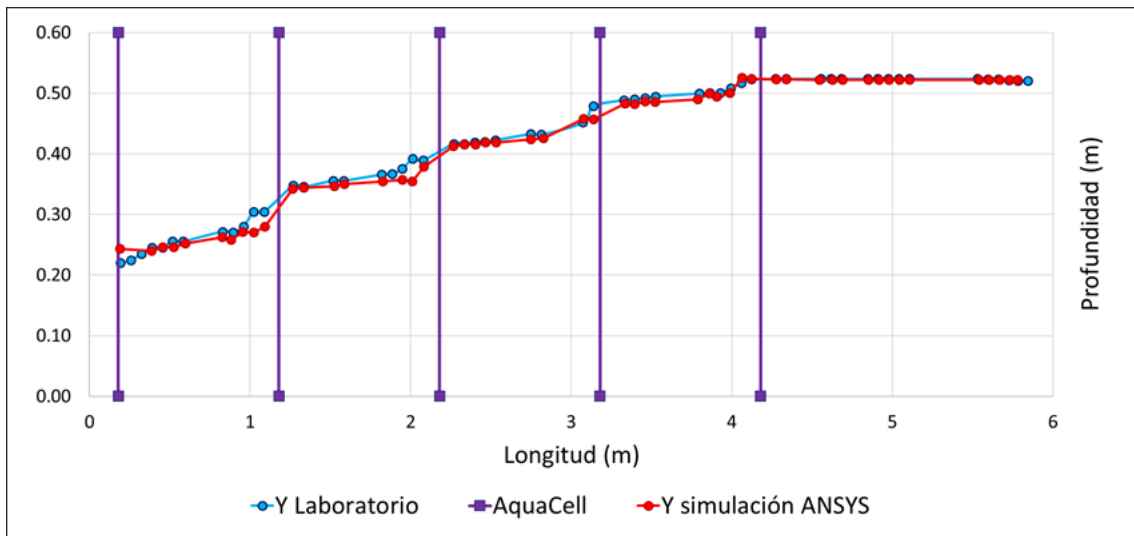


Figura 91. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs geometría simplificada 1x2x4, Q=37.83 l/s.

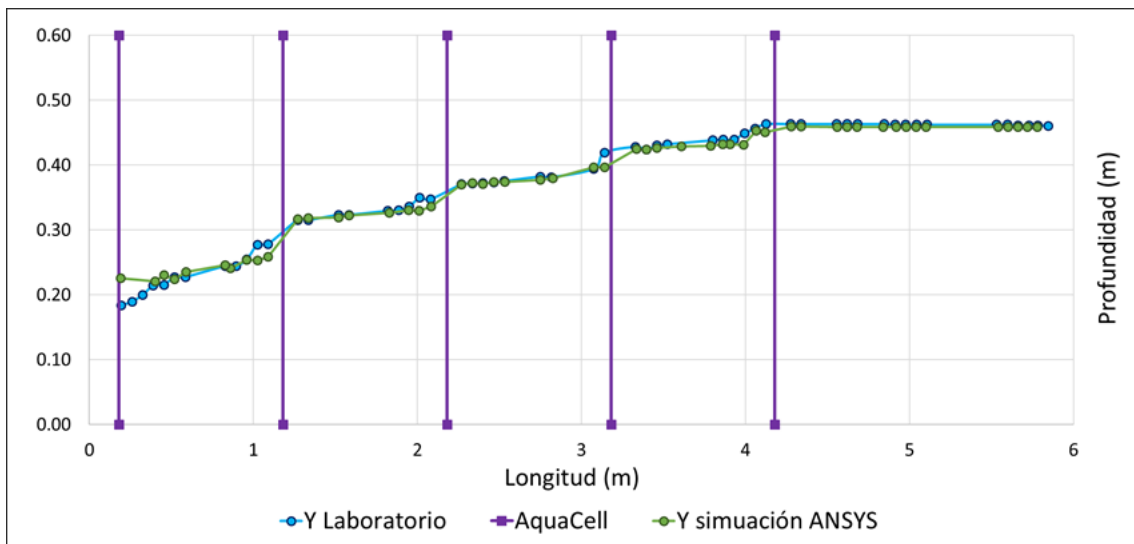


Figura 92. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs geometría simplificada 1x2x4, Q=30.37 l/s.

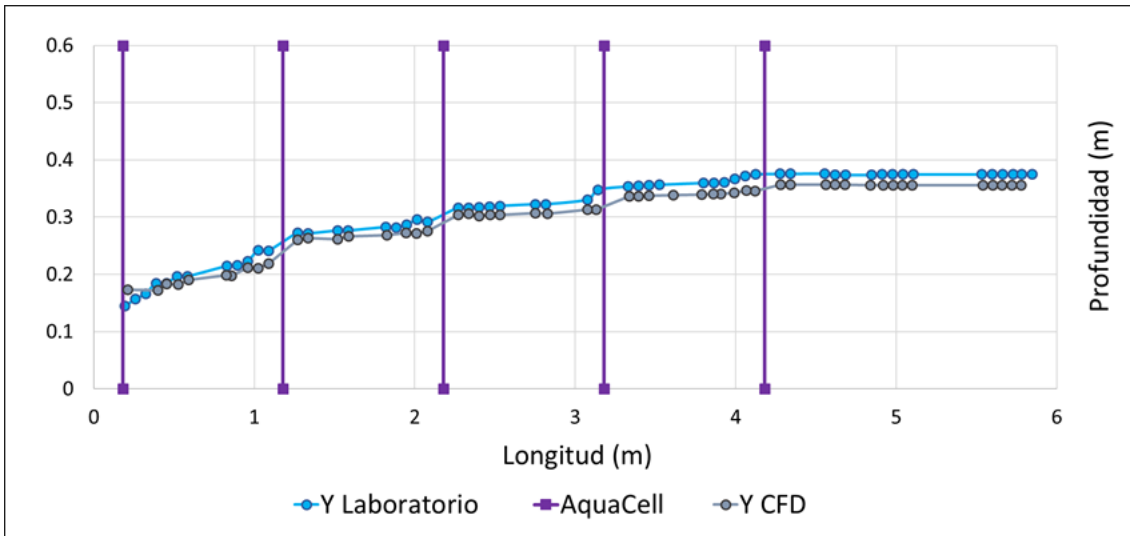


Figura 93. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs geometría simplificada 1x2x4, Q=21.61 l/s.

A continuación, se presenta la gráfica comparativa de los calados obtenidos mediante técnicas computacionales para los distintos caudales analizados para esta configuración.

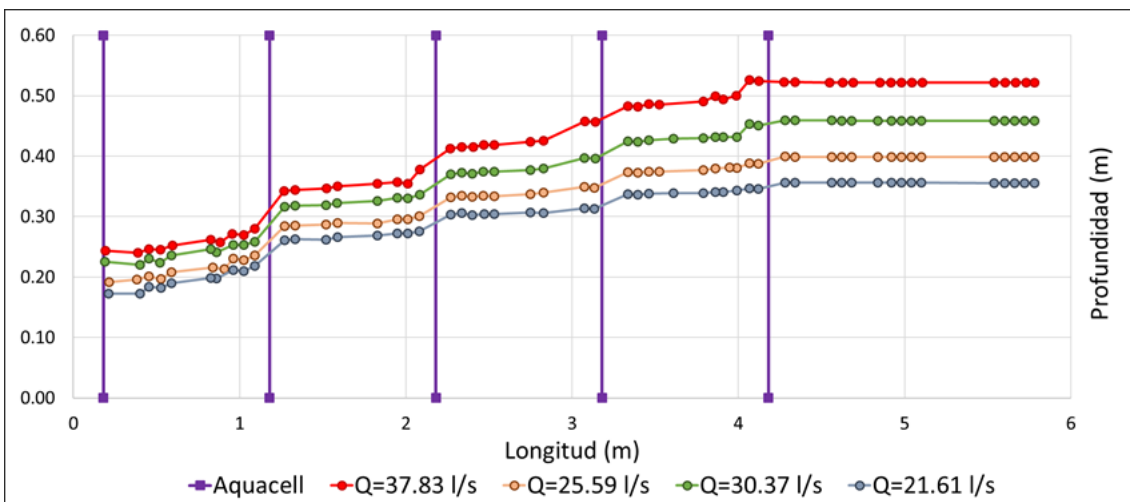


Figura 94. Comparativa perfiles obtenidos mediante CFD para distintos caudales y configuración 1x2x4.

Finalmente, se presenta una tabla en la que se aparecen los valores de los parámetros n y k obtenidos para los distintos caudales ensayados en laboratorio y resultados obtenidos mediante análisis computacional para los casos analizados.

Tabla 12. Tabla resumen de los valores N-K en conf. 1x2x4, casos laboratorio y CFD.

Q (l/s)	Resultados ensayos								CFD geometría simplificada							
	n1	n2	n3	n4	k1	k2	k3	k4	n1	n2	n3	n4	k1	k2	k3	k4
37.83	0.279	0.372	0.256	0.226	21	28	27	23	0.318	0.252	0.193	0.207	20	40	27	20
30.37	0.283	0.323	0.238	0.259	26	30	27	28	0.233	0.224	0.208	0.175	28	38	25	26
25.59	0.252	0.310	0.215	0.278	18	28	31	30	0.254	0.287	0.196	0.194	20	22	27	31
21.61	0.249	0.267	0.240	0.280	21	28	28	31	0.228	0.244	0.215	0.233	17	25	23	25

Se observa que para los distintos caudales el valor del coeficiente de Manning óptimo se mantiene constante entre 0.20 y 0.30 excepto para el segundo Aquacell, mientras que el coeficiente de pérdidas localizadas varía levemente entre 20 y 30. Señalar que en el caso simulado mediante CFD los valores de “k” son levemente superiores.

Por todo ello y aunque se obtienen valores más o menos similares para los parámetros estudiados, sería interesante quedarse con un único valor para el parámetro “n” y otro para las pérdidas localizadas “k”. Este es el motivo del desarrollo del apartado 6 de este documento.

5.3. Análisis configuración 1x2x1 T.

Como se detalla en el apartado correspondiente, esta configuración presenta un solo Aquacell dispuesto transversalmente en una posición intermedia del canal de 1 metro de ancho.

5.3.1. Resultados de la modelación computacional para distintos caudales.

A continuación, se presentan las imágenes que representan los perfiles adoptados por el flujo de agua a lo largo del sistema objeto de simulación mediante técnicas CFD para algunos de los caudales analizados en esta configuración.

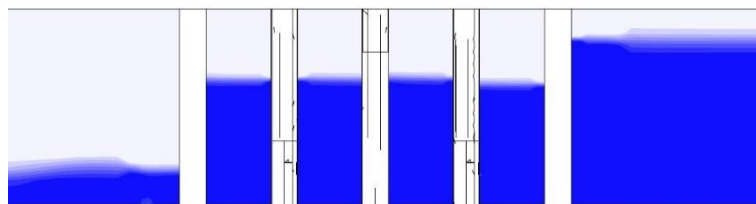


Figura 95. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 1x2x1 T, Q=36.52 l/s.

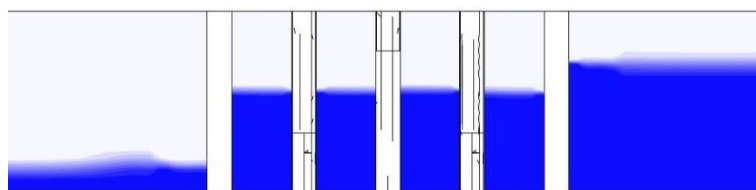


Figura 96. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 1x2x1 T, Q=28.47 l/s.

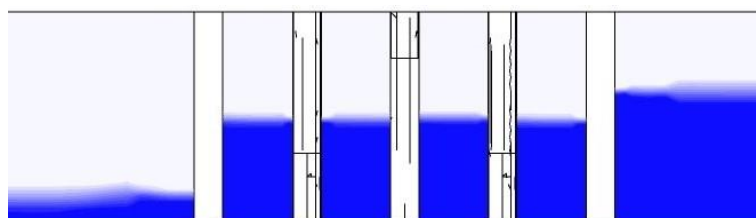


Figura 97. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 1x2x1 T, Q=21.61 l/s.

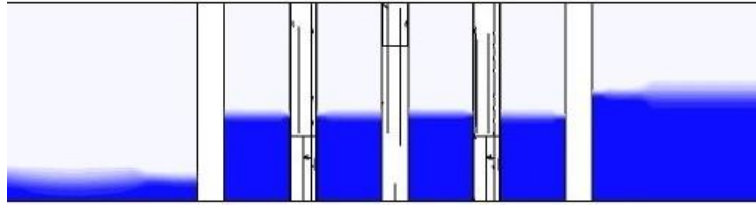


Figura 98. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 1x2x1 T, $Q=16.39$ l/s.

A continuación, se muestra el volumen en 3D ocupado por la fase líquida del volumen fluido para los caudales máximo y mínimo de los ensayos computacionalmente con esta configuración.

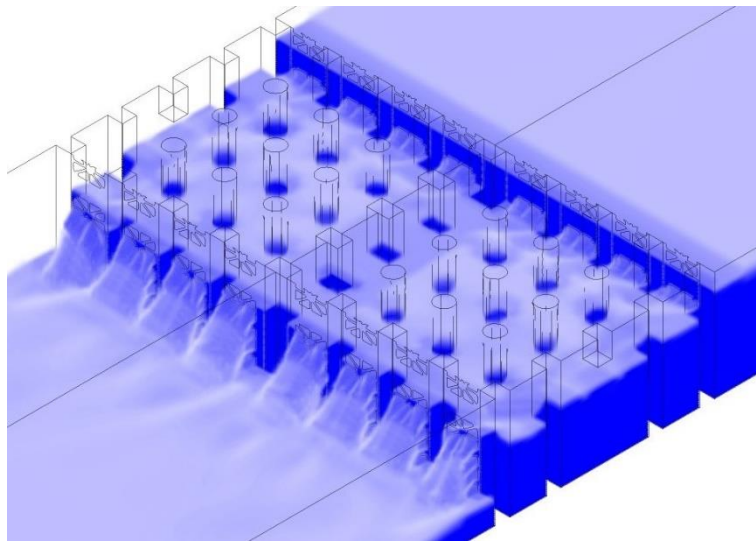


Figura 99. Volumen de agua en elemento modular 3D en configuración 1x2x1 T, $Q=36.52$ l/s.

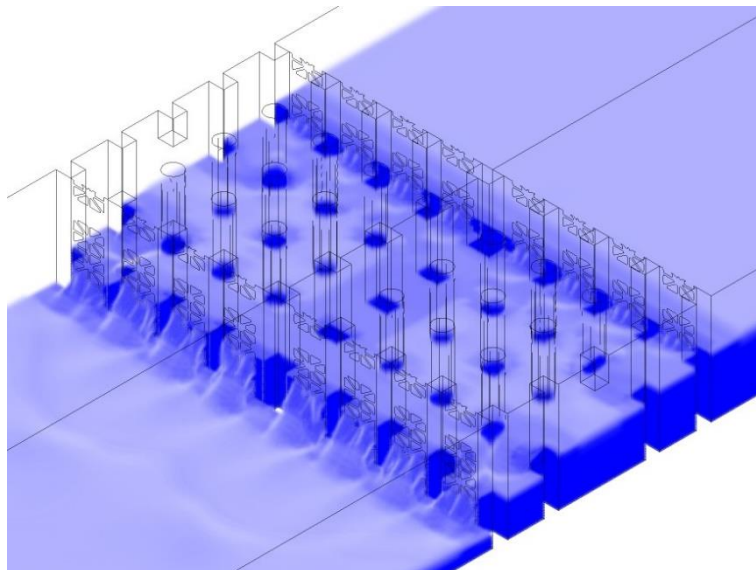


Figura 100. Volumen de agua en elemento modular 3D en configuración 1x2x1 T, $Q=16.39$ l/s.

5.3.2. Comparación resultados laboratorio-CFD.

5.3.2.1. Resultados caso 1: $Q=36.52$ l/s.

Para la configuración 1x1x1T se va a proceder de la misma forma que se ha hecho en los puntos anteriores. A continuación, se muestra la gráfica con el nivel de agua obtenido en el laboratorio y el obtenido mediante modelación computacional para un caudal de 36.52 l/s.

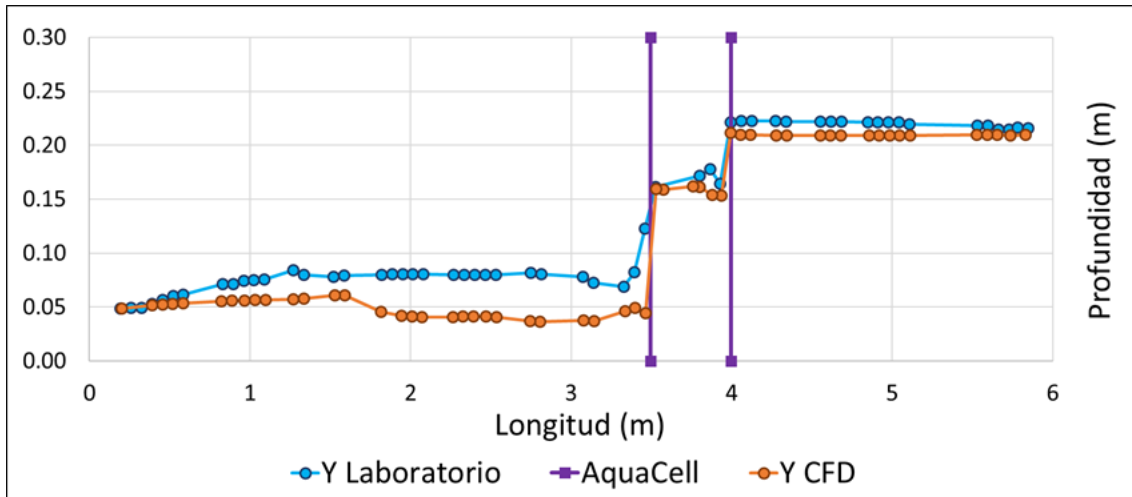


Figura 101. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs simulación CFD en conf. 1x2x1 T, $Q=36.52$ l/s.

A continuación, se muestran los valores de los coeficientes de pérdidas localizadas y del coeficiente de Manning del interior del elemento modular obtenido a partir de las mediciones de nivel obtenidas en el laboratorio y de la modelación computacional para un caudal de 36.52 l/s.

Tabla 13. Pérdidas localizadas obtenidas para la configuración 1x2x1T. Datos Laboratorio, $Q=36.52$ l/s.

Obtención del coeficiente de pérdidas adimensionales k , $Q=36.52$ l/s											
Puntos	Q	z_1	z_2	v_1	v_2	$v_1^2/2g$	$v_2^2/2g$	E_1	E_2	ΔH	k_i
1	36.52	0.223	0.178	0.16	0.21	0.00	0.00	0.22	0.18	0.04	25
2	36.52	0.161	0.083	0.23	0.44	0.00	0.01	0.16	0.09	0.07	12

Tabla 14. Valores del coeficiente de Manning equivalente para la configuración 1x2x1 T. Datos Laboratorio, $Q=36.52$ l/s.

Obtención del coeficiente de Manning equivalente													
Q	x_1	z_1	x_2	z_2	L	Δz	s	v_1	v_2	A_1	A_2	R_h	n
36.52	-3.865	0.178	-3.525	0.161	0.34	0.017	0.049	0.206	0.227	0.178	0.161	0.126	0.257

Tabla 15. Pérdidas localizadas obtenidas para la configuración 1x2x1T. Resultados CFD, $Q=36.52$ l/s.

Obtención del coeficiente de pérdidas adimensionales k , $Q=36.52$ l/s											
Puntos	Q	z_1	z_2	v_1	v_2	$v_1^2/2g$	$v_2^2/2g$	E_1	E_2	ΔH	k_i
1	36.52	0.211	0.162	0.17	0.23	0.00	0.00	0.21	0.16	0.05	24
2	36.52	0.159	0.049	0.23	0.75	0.00	0.03	0.16	0.08	0.08	7

Tabla 16. Valores del coeficiente de Manning equivalente para la configuración 1x2x1 T. Resultados CFD, Q=36.52 l/s.

Obtención del coeficiente de Manning equivalente													
Q	x ₁	z ₁	x ₂	z ₂	L	Δz	s	v ₁	v ₂	A ₁	A ₂	R _h	n
36.52	-3.762	0.162	-3.575	0.159	0.19	0.003	0.017	0.225	0.230	0.162	0.159	0.121	0.139

5.3.2.2. Resultados para resto de caudales.

A continuación, se muestran las gráficas comparativas entre calados obtenidos mediante modelación computacional y calados observados en laboratorio para el resto de caudales estudiados en esta configuración.

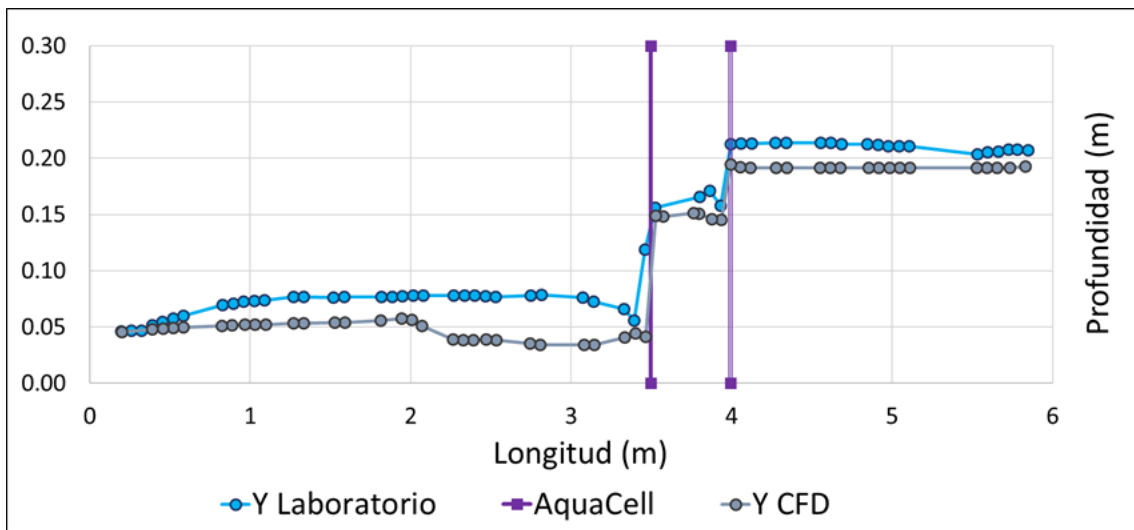


Figura 102. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs simulación CFD en conf. 1x2x1 T, Q= 32.34 l/s.

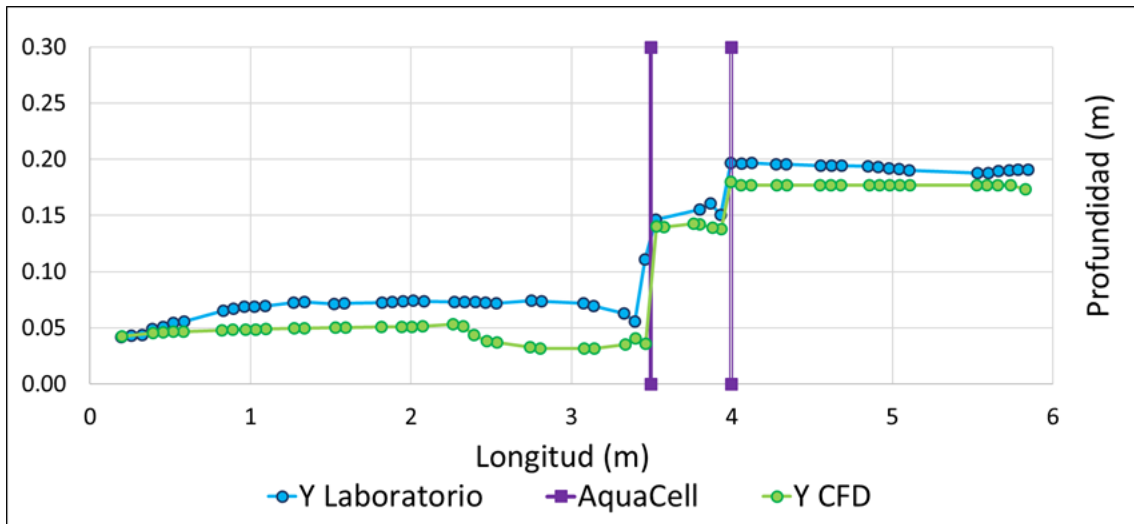


Figura 103. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs simulación CFD en conf. 1x2x1 T, Q= 28.47 l/s.

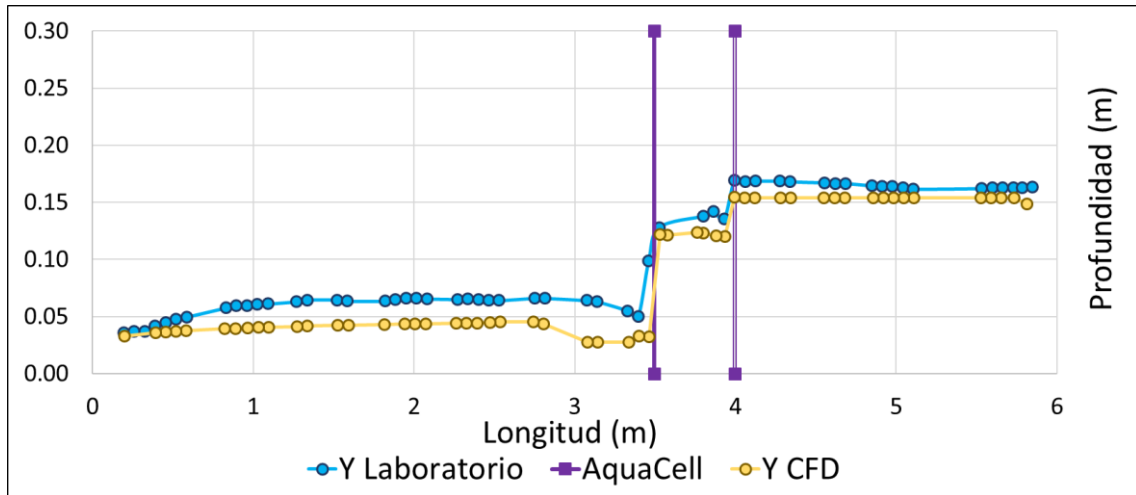


Figura 104. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs simulación CFD en conf. 1x2x1 T, $Q= 21.61$ l/s.

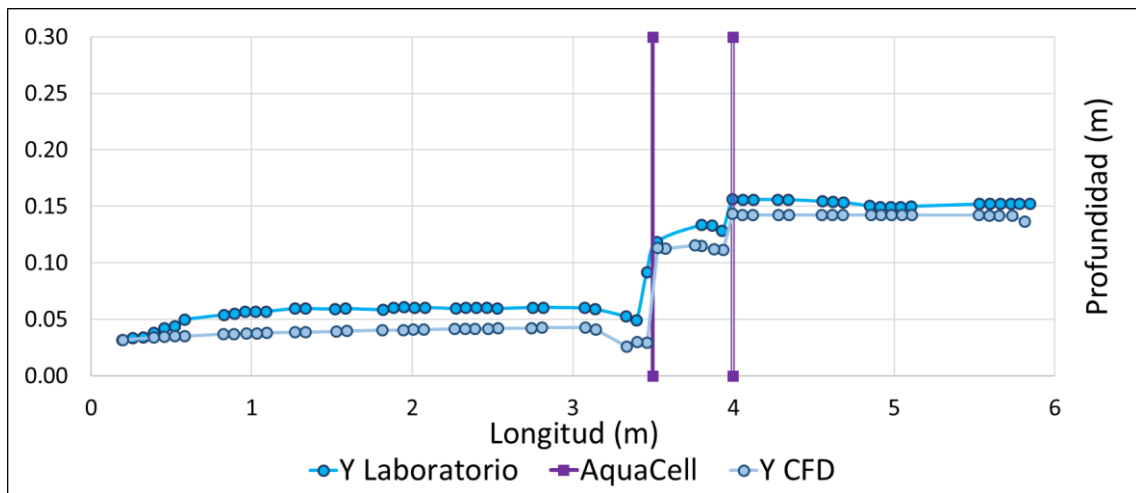


Figura 105. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs simulación CFD en conf. 1x2x1 T, $Q= 18.60$ l/s.

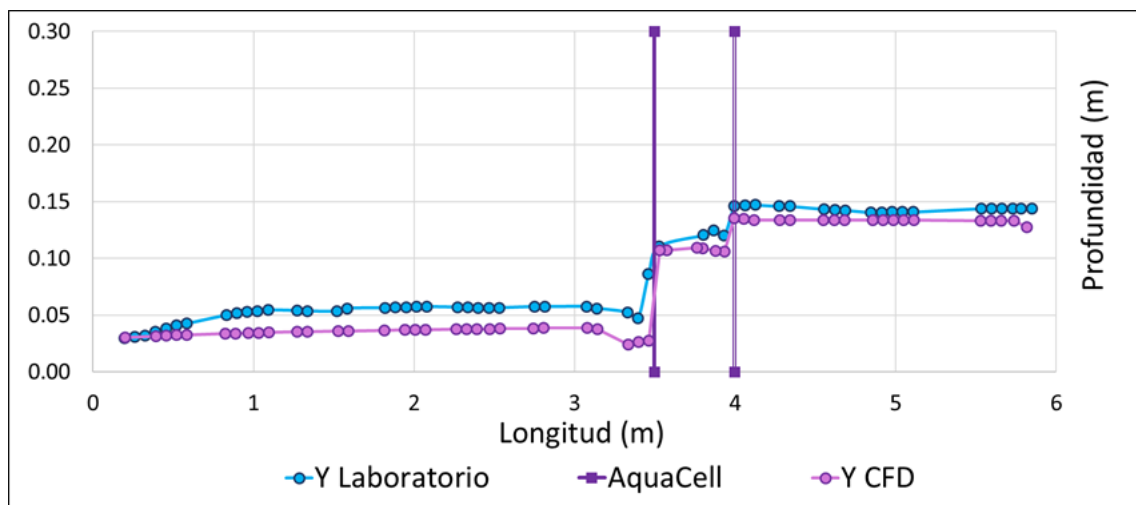


Figura 106. Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio Vs simulación CFD en conf. 1x2x1 T, $Q= 16.39$ l/s.

Seguidamente, se presenta la gráfica comparativa de los calados obtenidos mediante técnicas computacionales para los distintos caudales analizados para esta configuración.

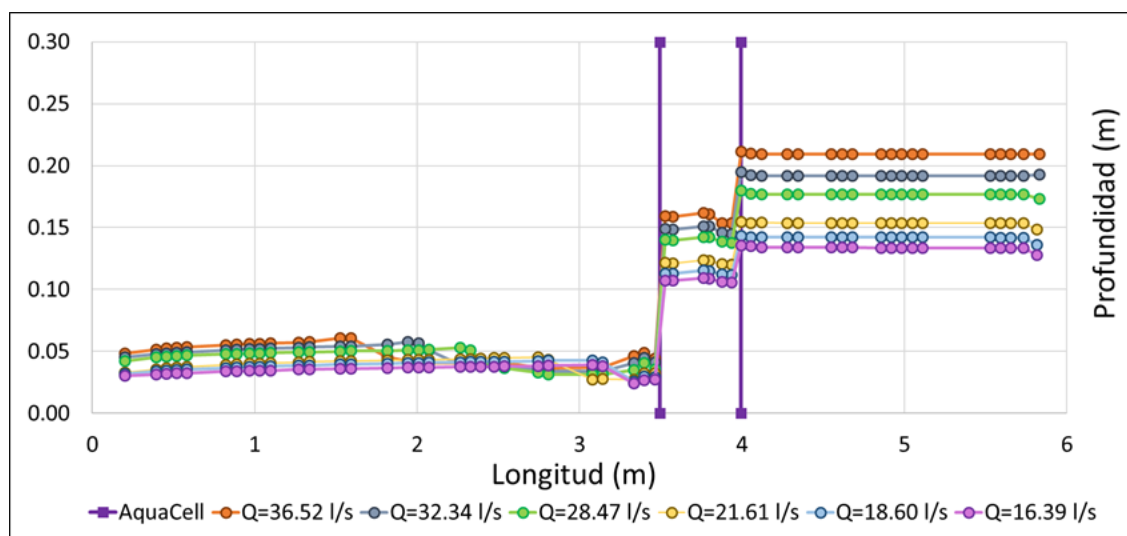


Figura 107. Comparativa perfiles obtenidos mediante CFD para distintos caudales y configuración 1x2x1 T.

Finalmente, en la Tabla 17 aparecen los valores de los parámetros n y k , para la entrada y la salida del Aquacell dispuesto transversalmente para los distintos caudales estudiados.

Tabla 17. Resumen de los valores n - k en configuración 1x2x1T. Datos de laboratorio vs CFD.

Q (l/s)	Resultados Ensayos			Resultados CFD		
	n	k_1	k_2	n	k_1	k_2
36.52	0.257	25	12	0.139	24	9
32.34	0.262	28	12	0.133	22	10
28.47	0.262	26	13	0.139	21	11
21.61	0.284	26	15	0.144	23	12
18.60	0.301	27	16	0.153	25	13
16.39	0.308	29	16	0.145	27	14

Como puede observarse, los valores obtenidos de la modelación computacional se encuentran en el orden de magnitud de los obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio para las pérdidas localizadas, pero se obtiene un valor del coeficiente de Manning un 50% inferior al obtenido en laboratorio, lo cual es poco relevante comparado con el hecho de que todos los valores obtenidos computacionalmente presentan valores del coeficiente de pérdidas localizadas muy similares, dado que los valores de éstas presentan mayor relevancia que los obtenidos para las pérdidas distribuidas.

En cuanto a los resultados obtenidos para los distintos caudales ensayados en el laboratorio señalar que presentan unos órdenes de magnitud similares independientemente del caudal medido para cada caso, aunque es cierto que tanto los valores de las “ k ” como el valor de la “ n ” aumentan a medida que disminuye el caudal.

5.4. Análisis configuración 2x2x1.

Esta configuración presenta un bloque modular cuya longitud mayor está dispuesta en la misma dirección del flujo. En este caso, se va a emplear todo el ancho del canal disponiendo dos Aquacells en la dirección perpendicular al flujo y finalmente, como en el resto de las simulaciones dos filas de elementos modulares en dirección vertical.

5.4.1. Resultados de la modelación computacional para los distintos caudales estudiados.

A continuación, se muestran los perfiles adoptados por el flujo de agua a lo largo del sistema objeto de simulación mediante técnicas CFD para los distintos caudales analizados en esta configuración.

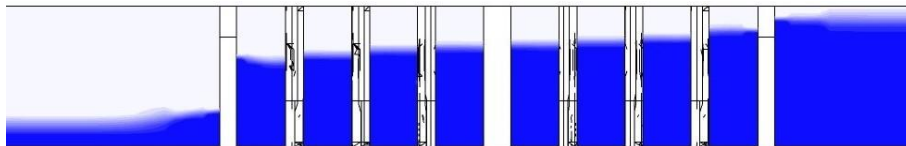


Figura 108. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 2x2x1, $Q=35.66$ l/s.

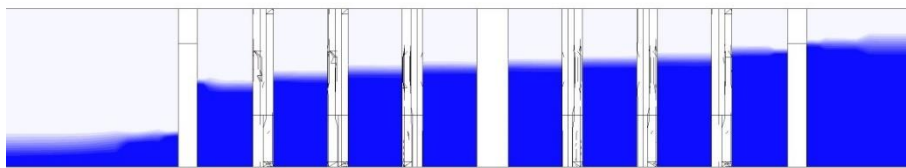


Figura 109. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 2x2x1, $Q=27.37$ l/s.

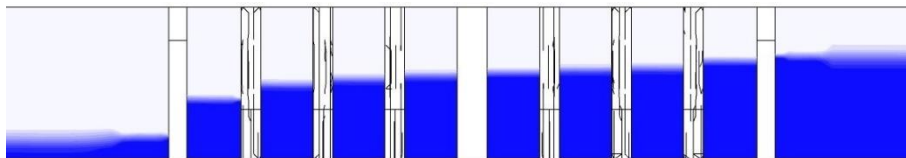


Figura 110. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 2x2x1, $Q=20.07$ l/s.

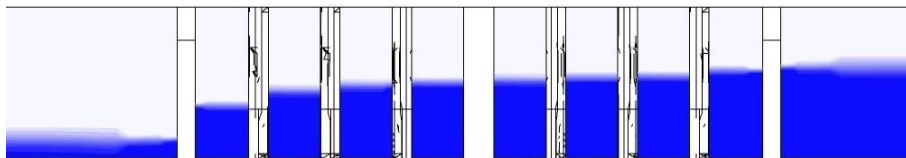


Figura 111. Perfil del flujo de agua en elemento modular para configuración 2x2x1, $Q=14$ l/s.

El volumen en 3D ocupado por la fase líquida del volumen fluido para los caudales máximo y mínimo de los ensayos computacionalmente con esta configuración se presentan en Figura 112 y Figura 113.

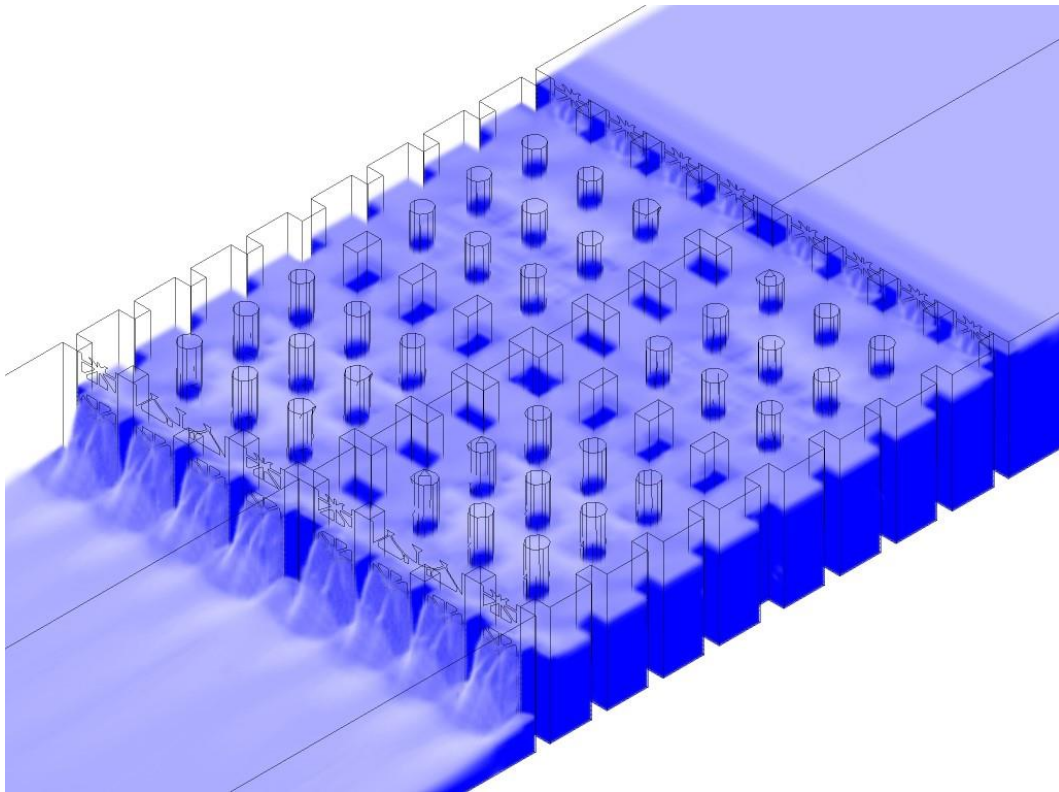


Figura 112. Volumen de agua en elemento modular 3D en configuración 2x2x1, $Q=35.66$ l/s.

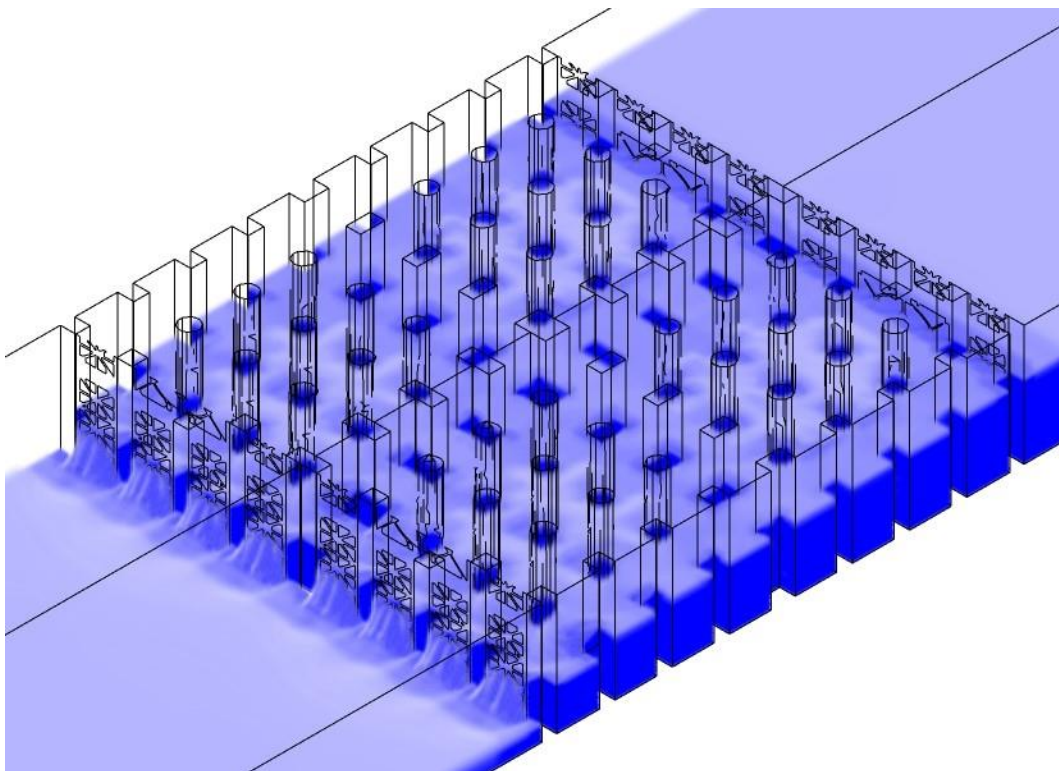


Figura 113. Volumen de agua en elemento modular 3D en configuración 2x2x1, $Q=14$ l/s.

5.4.2. Perfiles obtenidos computacionalmente para los caudales estudiados.

Dado que para esta configuración no se dispone de los resultados analizados en laboratorio, pero sí que se dispone de ellos para la configuración 2x2x4 se decide simular computacionalmente para esta configuración los caudales ensayados en la configuración 2x2x4. De esta forma se pretende observar la influencia de la presencia de cuatro elementos modulares en el caso de disponer de dos filas de Aquacells en dirección perpendicular al flujo.

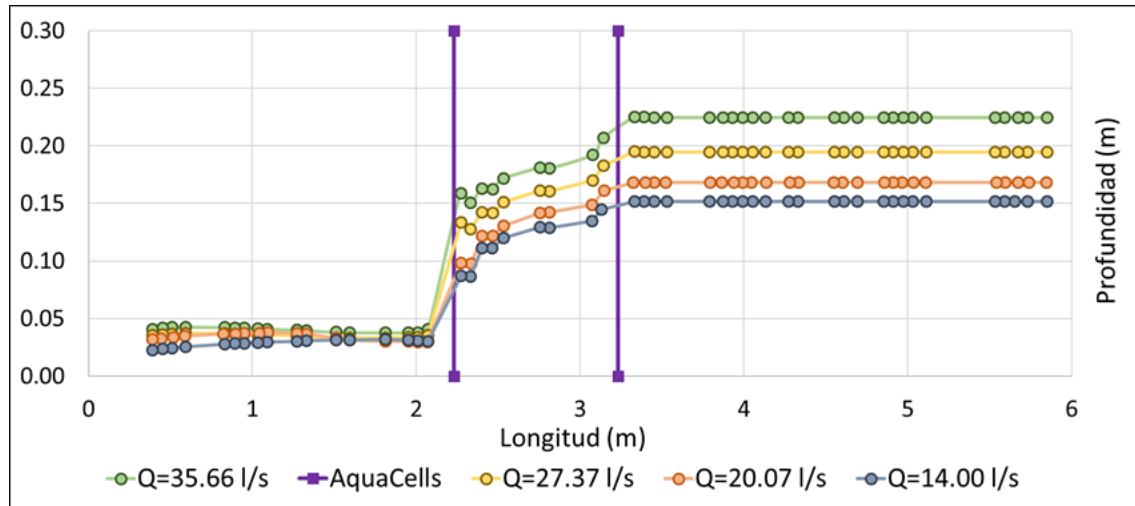


Figura 114. Comparativa perfiles obtenidos mediante CFD para distintos caudales y configuración 2x2x1.

A continuación, en la Tabla 18 aparecen los valores de los parámetros n y k , para la entrada y la salida de los distintos elementos modulares para los distintos caudales simulados computacionalmente.

Tabla 18. Resumen de los valores n - k en configuración 2x2x1. Datos de laboratorio vs CFD.

Q (l/s)	Resultados CFD		
	n	k_1	k_2
35.66	0.222	21	5
27.37	0.243	21	6
20.07	0.301	23	8
14.00	0.349	34	16

A partir de la Tabla 18 se concluye que los valores del coeficiente de Manning se incrementan a medida que disminuye el caudal circulante, al igual que sucede con las pérdidas localizadas y esto, es debido por la presencia de las cartelas interiores de 8.2 y 6.2 centímetros de altura que presentan estos elementos modulares y cuya influencia en el perfil adoptado por flujo es mayor a medida que su caudal disminuye.

5.5. Características simulaciones realizadas

Finalmente, con el fin de mostrar una visión global del tamaño computacional de cada una de las simulaciones presentadas a lo largo de este apartado se presenta en la Tabla 19, donde se indica el número de celdas del modelo para cada una de las simulaciones, así como el tiempo de cálculo que se ha requerido hasta conseguir unas condiciones en el sistema de régimen permanente.

Tabla 19. Resumen de los parámetros que caracterizan las simulaciones CFD realizadas.

Configuración 1x2x1 -Geometría Real-			
Caudal (l/s)	Nº de Celdas	Tiempo de Simulación (seg)	Tiempo de Cálculo (días)
37.83	766.363	58.2	13
Configuración 1x2x1 -Geometría Simplificada-			
37.83	322.026	71.5	4
36.95	322.026	70.4	3
35.23	322.026	70.0	3
19.48	322.026	77.1	3
11.58	322.026	77.0	3
Configuración 1x2x4 -Geometría Simplificada-			
37.83	1.668.731	93.2	17
30.37	1.153.887	114.6	10
25.59	1.143.638	96.4	9
21.61	910.060	100.1	7
Configuración 1x2x1T -Geometría Simplificada-			
36.52	465.136	76.8	7
32.34	465.136	100.3	7
28.47	465.136	82.0	7
21.61	465.136	81.2	7
18.60	465.136	129.3	7
16.39	465.136	105.5	7
Configuración 2x2x1 -Geometría Simplificada-			
35.66	378.365	124.3	7
27.37	378.365	125.7	7
20.07	419.550	81.6	7
14.00	378.365	100.1	7

6. MODELOS UNIDIMENSIONALES DE REPRESENTACIÓN DE AQUACELLS EN SWMM 5.0.

En los apartados anteriores se ha centrado la atención en la representación de los Aquacell. Para ello se ha enfocado el análisis en el estudio de estas estructuras modulares mediante técnicas CFD. Dichas técnicas, incluso con geometrías simplificadas, se han mostrado sumamente eficaces para representar el comportamiento del flujo por el interior de este tipo de estructuras.

No obstante, el objeto final del presente trabajo es la capacidad de representar el comportamiento de estos elementos modulares en un modelo de drenaje urbano de agua pluvial. En este caso particular se ha seleccionado como modelo de análisis del comportamiento hidráulico de la red el modelo SWMM5. Por ello, el objetivo final del presente informe será realizar una propuesta de representación del comportamiento de este tipo de elementos mediante dicho modelo hidráulico.

6.1. Aproximación de los valores de n-k para la configuración 1x2x4.

En primer lugar, se va a definir el modelo correspondiente a la configuración 1x2x4 en SWMM con sus nudos a la entrada y salida de los distintos elementos modulares definidos como tuberías de las mismas dimensiones que los Aquacell originales, pero con un valor del coeficiente de Manning n y del coeficiente de pérdidas de entrada k_e y de salida k_s que deben fijarse. Asimismo, se dispone en el extremo final un punto de control del vertido a fin de ajustar los calados iniciales con los caudales de circulación. Dicho modelo puede representarse de forma esquemática tal como muestra la Figura 115.

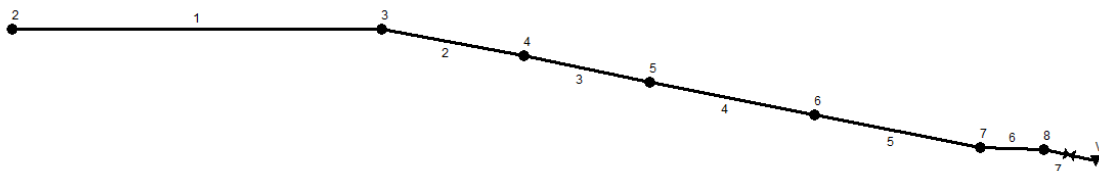


Figura 115. Esquema de la configuración 1x2x4 en SWMM 5.

En el modelo de la Figura 115 existen cuatro Aquacells, instalados entre los nudos 3 y 7 y definidos por las líneas 2, 3, 4 y 5.

Tabla 20. Datos del modelo en SWMM5 de la configuración 1x2x4.

Aquacell	Línea	Nudo Inicial	Nudo Final
1	2	3	4
2	3	4	5
3	4	5	6
4	5	6	7

A partir del modelo de la configuración estudiada desarrollado en SWMM se ha realizado el ajuste de los valores tanto del coeficiente de Manning n , como de los coeficientes de pérdidas de carga adimensional a la entrada (k_{ent}) y a la salida (k_{sal}). Dicho ajuste se ha realizado en base a una herramienta computacional que utiliza el Toolkit de SWMM y que va probando para cada caudal los valores de dichos coeficientes que mejor se ajustan. Una posible solución de parámetros se considerará óptima cuando la suma del error en todos los puntos estudiados sea la mínima entre todas las combinaciones de parámetros calculadas y, además, ninguno de los parámetros alcance un valor que coincida con alguno de los límites establecidos para el intervalo de cálculo de cada uno de los parámetros.

Cabe destacar que, a diferencia de los análisis previos realizados en apartados anteriores, los valores de los coeficientes n , k_{ent} y k_{sal} para cada uno de los Aquacells es el mismo. Es decir, el proceso de ajuste pretende encontrar la combinación de estos tres parámetros que mejor ajustan los resultados de la simulación obtenida mediante el modelo SWMM con los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio y los obtenidos computacionalmente.

6.1.1. Ajuste para caudales ensayados en laboratorio.

Tras realizar el proceso de ajuste para diferentes caudales, los valores de los parámetros que proporcionan el ajuste óptimo para cada caudal ensayado en laboratorio se recogen en la Tabla 21.

Tabla 21. Ajuste de los parámetros n , k_{ent} y k_{sal} para la configuración 1x2x4 Laboratorio.

Q (l/s)	n	k_{ent}	k_{sal}	$k_{tot}=k_{ent}+k_{sal}$
37.83	0.05	40	0	40
30.37	0.01	45	0	45
25.59	0.04	41	0	41
21.61	0.27	25	0	25

A fin de mostrar la bondad de los resultados obtenidos mediante el ajuste de los coeficientes n , k_{ent} y k_{sal} ; en las figuras siguientes se recoge una gráfica comparativa de los resultados de la simulación mediante el modelo SWMM y los resultados obtenidos experimentalmente. En cada gráfica se presenta una imagen en la que se observa una línea azul que une los puntos correspondientes a los valores de la energía del flujo en los puntos inicial y final de cada uno de los elementos modulares obtenidos en laboratorio sobre la que se superpone una línea de color rosáceo que une los puntos correspondientes a los valores de la energía obtenidos

para la mejor combinación de parámetros encontrada (suma del error de todos los puntos más baja).

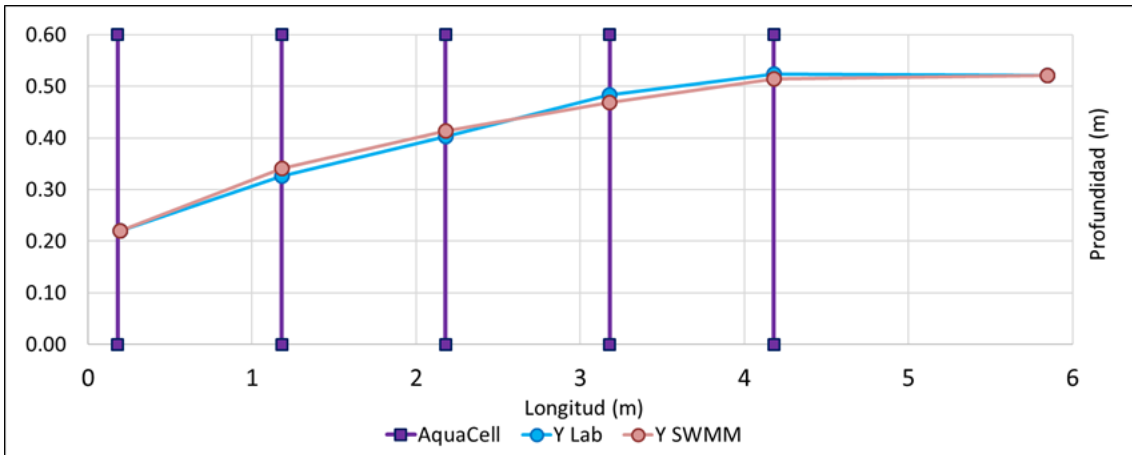


Figura 116. Comparativa perfiles laboratorio Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=37.83 l/s.

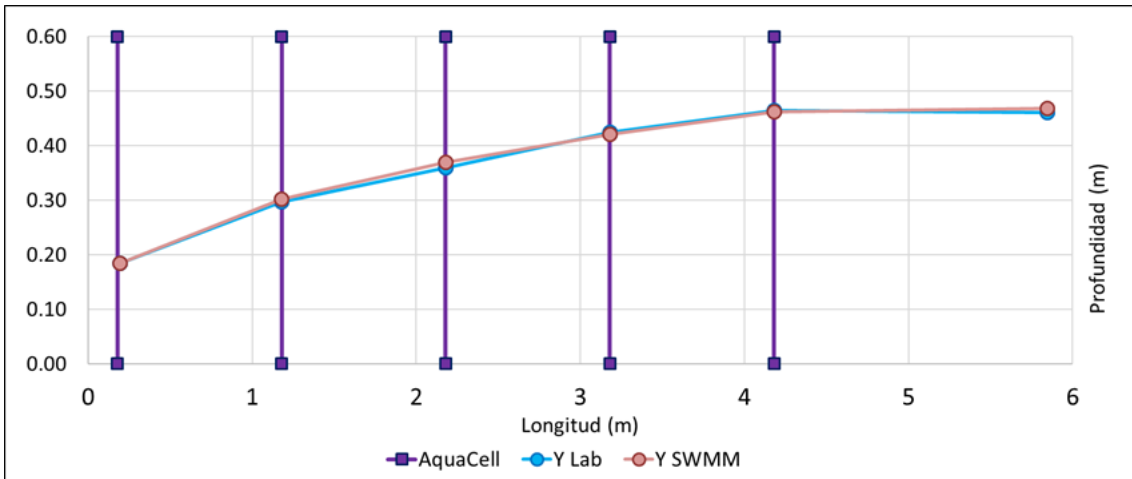


Figura 117. Comparativa perfiles laboratorio Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=30.37 l/s.

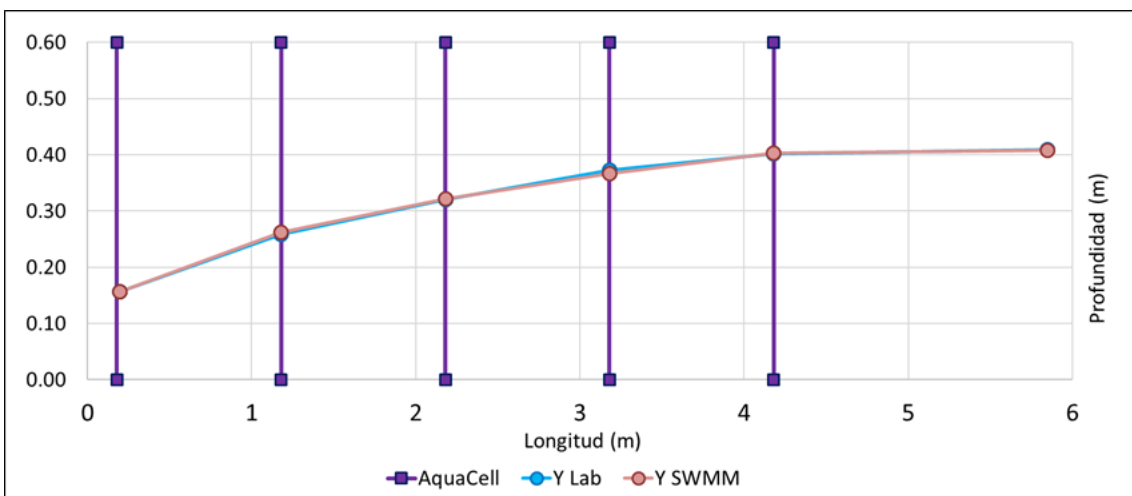


Figura 118. Comparativa perfiles laboratorio Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=25.59 l/s.

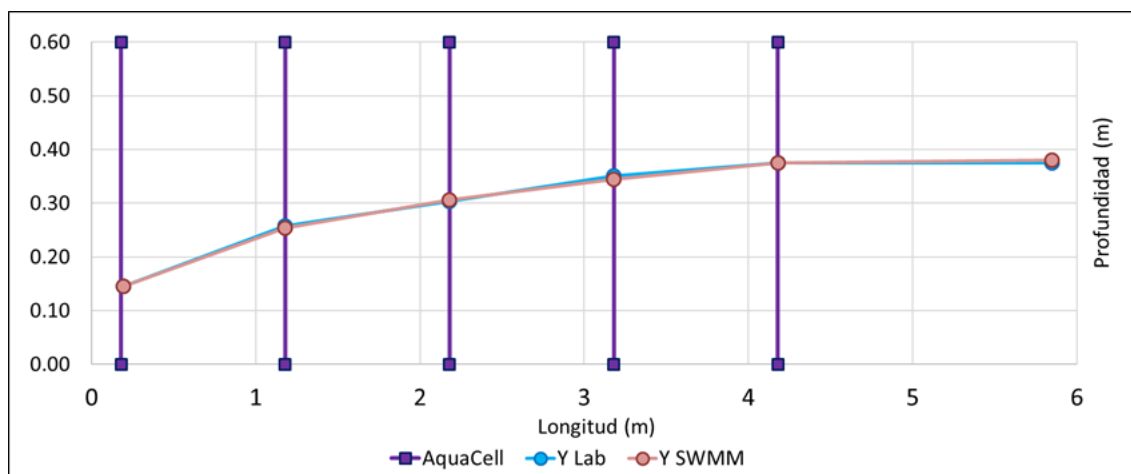


Figura 119. Comparativa perfiles laboratorio vs. solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=21.61 l/s.

Se observa que para los distintos caudales el valor del coeficiente de Manning óptimo se mantiene constante en torno a 0.01-0.05 excepto para el caso ensayado con caudal 21.61 l/s donde el valor del coeficiente de Manning óptimo asciende a 0.27, esto es debido al efecto de las cartelas interiores de los elementos modulares y su mayor afección para caudales inferiores.

En cuanto a las pérdidas localizadas señalar que, en todos los casos, la combinación óptima de parámetros atribuye al coeficiente k_{sal} un valor de cero, es decir que todas las pérdidas que se generan en los extremos de los elementos modulares se las atribuye a la entrada, obteniéndose valores que oscilan entre 40 y 45 para los caudales mayores y reduciéndose dicho valor para el caudal más pequeño de los estudiados.

6.1.2. Ajuste para caudales simulados computacionalmente.

En este apartado, se realiza exactamente el mismo proceso descrito en el apartado anterior con el fin de obtener los parámetros que proporcionan el mejor ajuste respecto a los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas computacionalmente para caudales idénticos a los ensayados experimentalmente.

En este caso, los valores de los parámetros que proporcionan el ajuste óptimo para cada uno de los caudales simulados se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Ajuste de los parámetros n , k_{ent} y k_{sal} para la configuración 1x2x4 CFD.

Q (l/s)	n	k_{ent}	k_{sal}	$k_{tot}=k_{ent}+k_{sal}$
37.83	0.058	36	0	36
30.37	0.050	34	0	34
25.59	0.054	34	0	34
21.61	0.061	35	0	35

A estos valores óptimos de la pareja de parámetros n-K se llega con el apoyo de unas gráficas en las que se muestra en el eje de ordenadas el valor del error medio, en metros, para cada punto de los tomados como referencia en el ajuste. Cada curva se corresponde a un valor del coeficiente de pérdidas localizadas K, y en el eje de abscisas se encuentran los valores del coeficiente de Manning. A continuación, se muestran estas gráficas a partir de las cuáles se han obtenido los resultados de la Tabla 22.

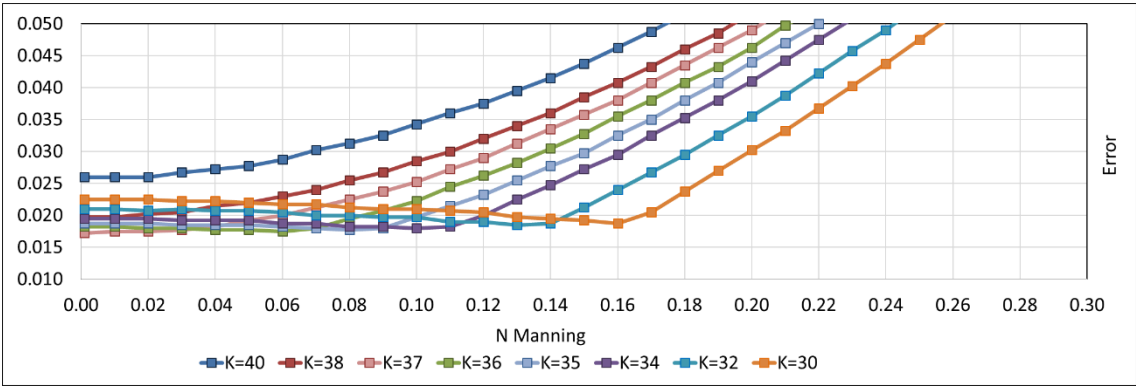


Figura 120. Evolución del error suma para distintos K, para un caudal Q=37.83 l/s.

Para cada curva se obtiene uno o varios valores del coeficiente de Manning que minimizan el error. Además, es muy difícil descifrar a la vista de la Figura 120 los valores mínimos del error obtenidos para cada pareja n-K óptimos de cada curva. Por ello, se decide realizar un zoom de la Figura 120 en el rango de los valores mínimos del error.

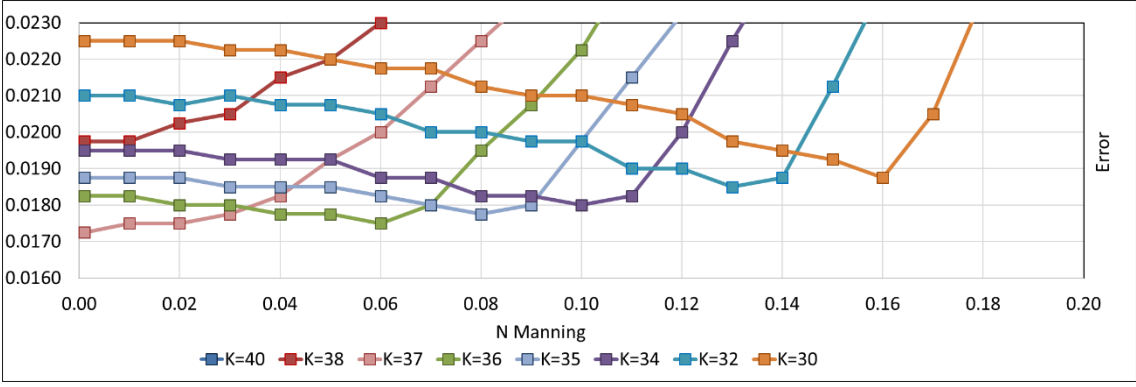


Figura 121. Zoom de la evolución del error suma mínimo para distintos K, para un caudal Q=37.83 l/s.

Como se puede observar, existen dos curvas (K=36 y K=37) con dos valores del “n” de Manning distintos que proporcionan el mismo valor del error mínimo, siendo válida cualquiera de ellas. Posteriormente, se realiza este mismo procedimiento para un caudal circulante de 30.37 l/s. Como puede observarse en la Figura 122 es muy difícil determinar la pareja de valores de los parámetros n-k que minimizan el error. Por ello, se decide realizar una gráfica ampliada, ver Figura 123, de la zona en cuestión que permita facilitar el trabajo.

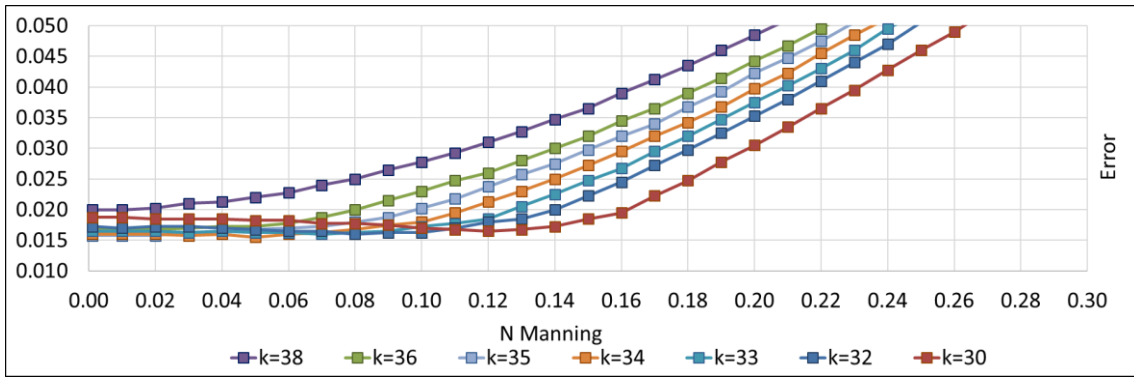


Figura 122. Evolución del error suma para distintos K, para un caudal Q=30.37 l/s.

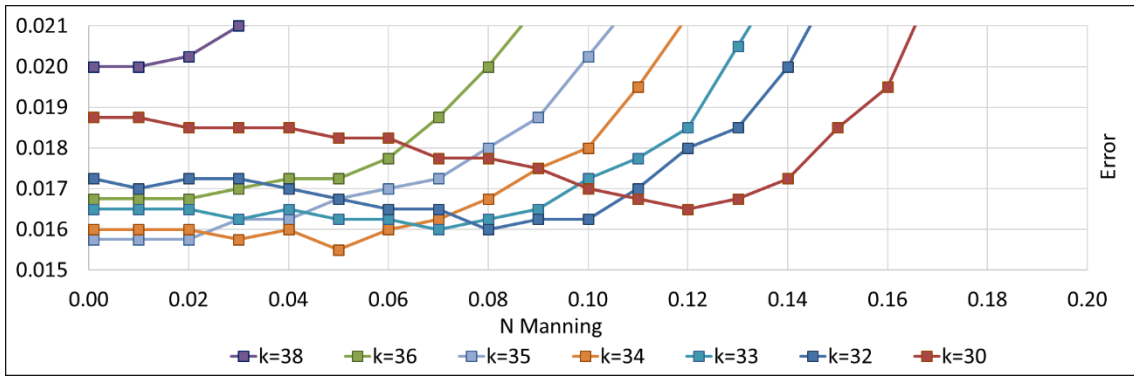


Figura 123. Zoom de la evolución del error suma mínimo para distintos K, para un caudal Q=30.37 l/s.

De la misma forma, para un caudal de 25.59 l/s, los gráficos obtenidos son:

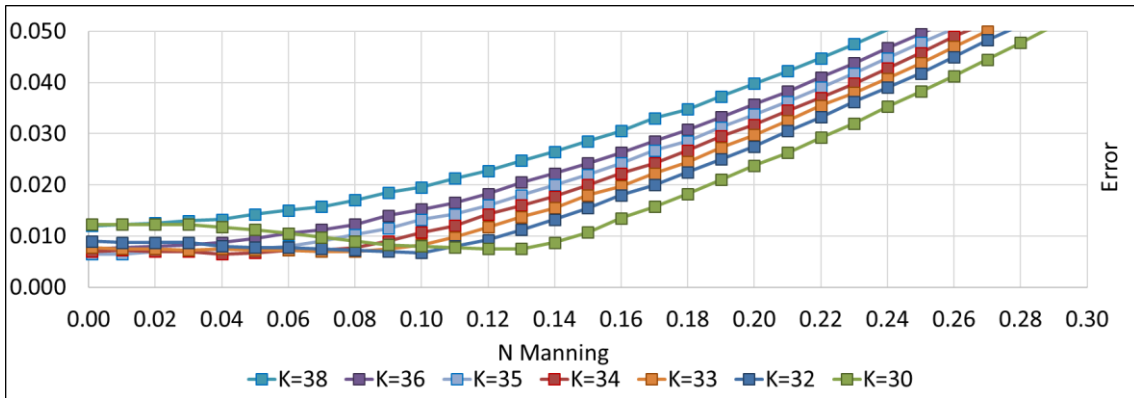


Figura 124. Evolución del error suma para distintos K, para un caudal Q=25.59 l/s.

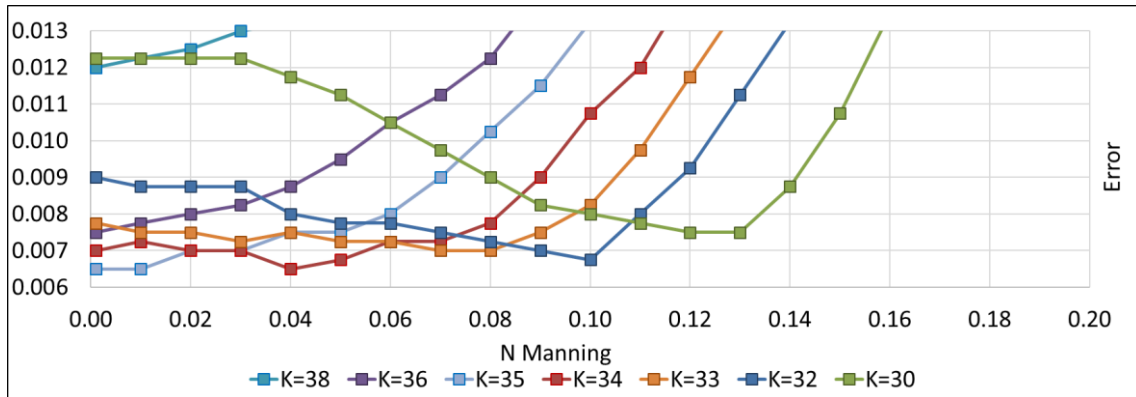


Figura 125. Zoom de la evolución del error suma mínimo para distintos K, para un caudal $Q=25.59$ l/s.

En este caso, el error mínimo se produce para tres “K” diferentes: para $K=33$ y $n=0.077$; para $K=34$ y $n=0.054$ y para $K=35$ y $n \leq 0.017$.

Finalmente, para el más pequeño de los caudales estudiados se obtiene:

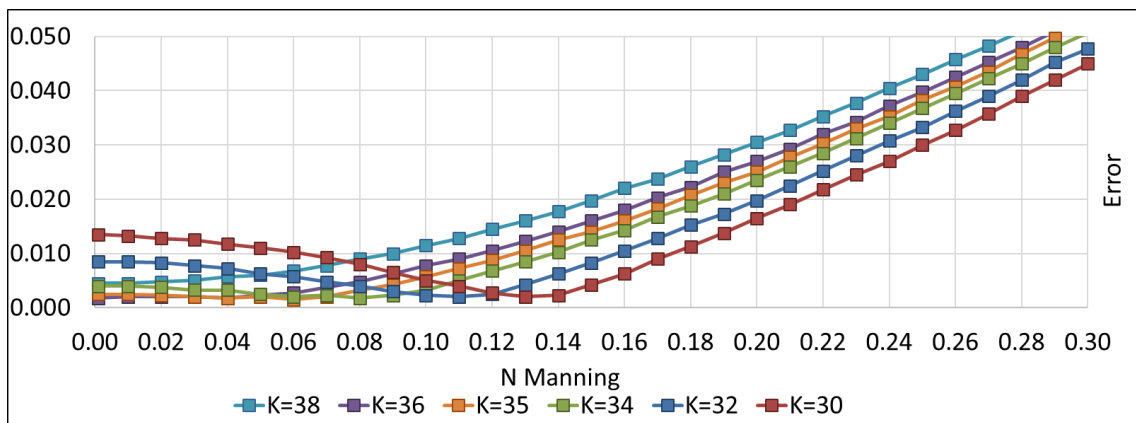


Figura 126. Evolución del error suma para distintos K, para un caudal $Q=21.61$ l/s.

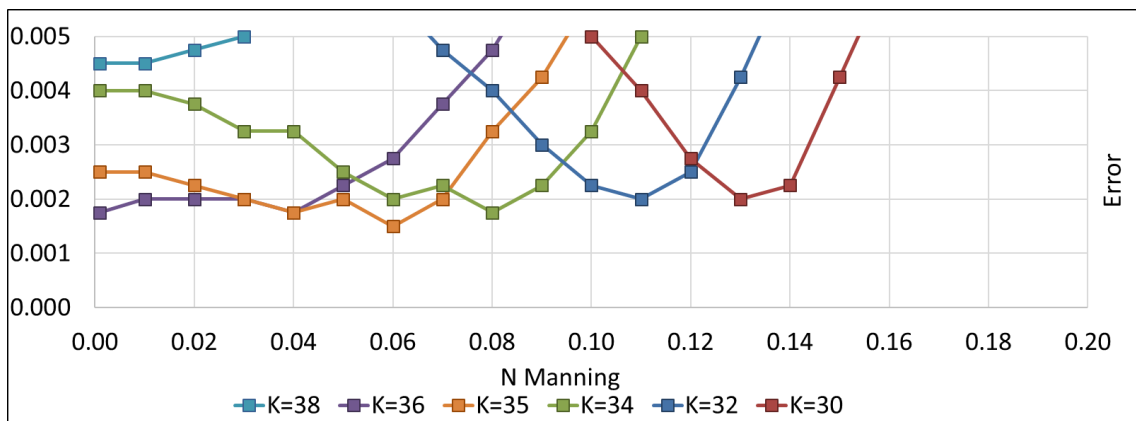


Figura 127. Zoom de la evolución del error suma mínimo para distintos K, para un caudal $Q=21.61$ l/s.

En este caso, la pareja de valores de los parámetros n y K que proporcionan el mejor ajuste adquieren un valor de $K=35$ y $n=0.061$.

A modo de resumen, destacar que el valor del coeficiente de Manning óptimo se mantiene bastante estable en torno a 0.05-0.06. En cuanto a las pérdidas localizadas señalar que, en todos los casos, la combinación óptima de parámetros atribuye al coeficiente k_{sal} un valor de cero, es decir que todas las pérdidas que se generan en los extremos de los elementos modulares se las atribuye a la entrada, obteniéndose valores que oscilan entre 34 y 36 para todos los caudales simulados.

A continuación, se presentan las gráficas comparativas entre los valores de la energía obtenidos computacionalmente (línea roja) y los valores que proporciona el ajuste óptimo de parámetros (línea verde).

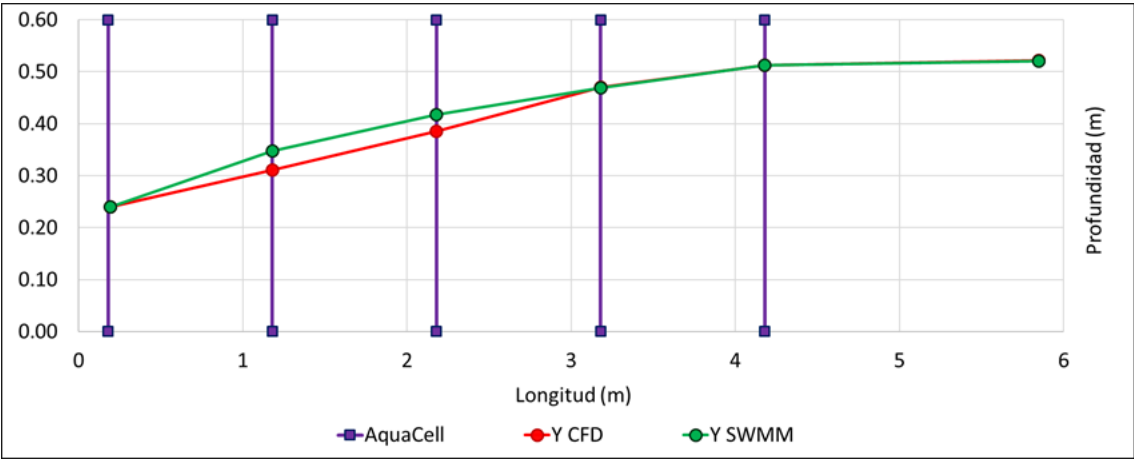


Figura 128. Comparativa perfiles CFD Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=37.83 l/s.

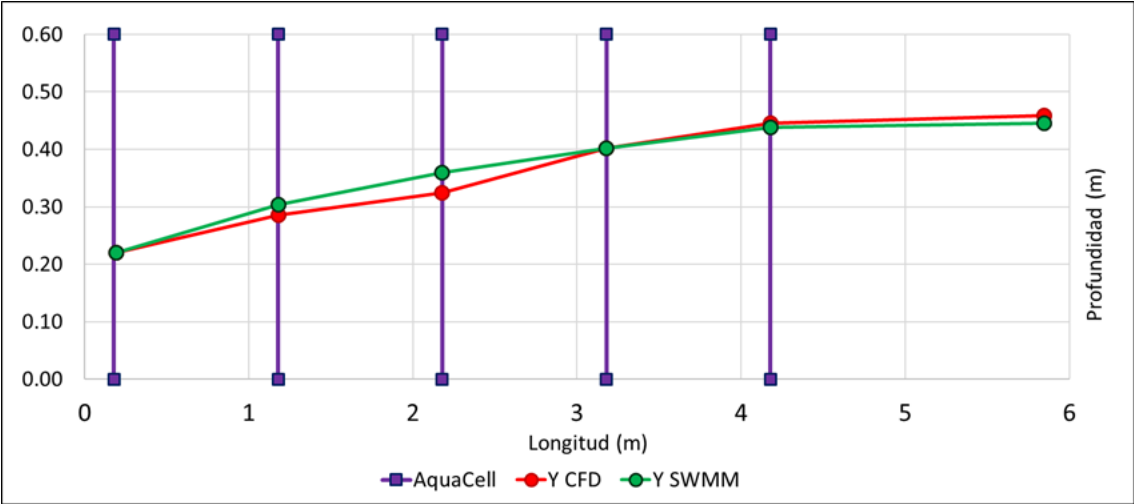


Figura 129. Comparativa perfiles CFD Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=30.37 l/s.

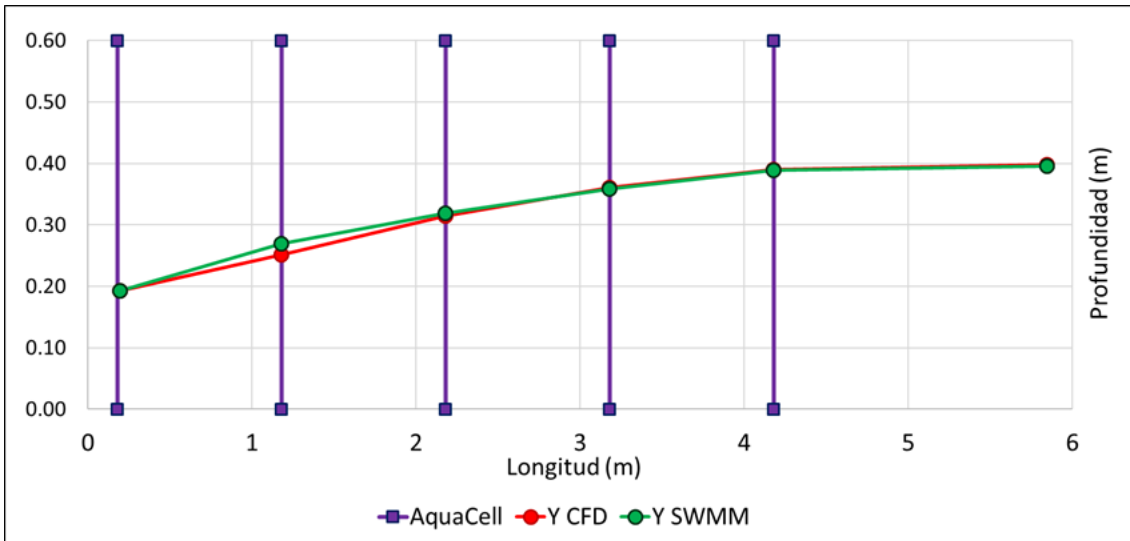


Figura 130. Comparativa perfiles CFD Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=25.59 l/s.

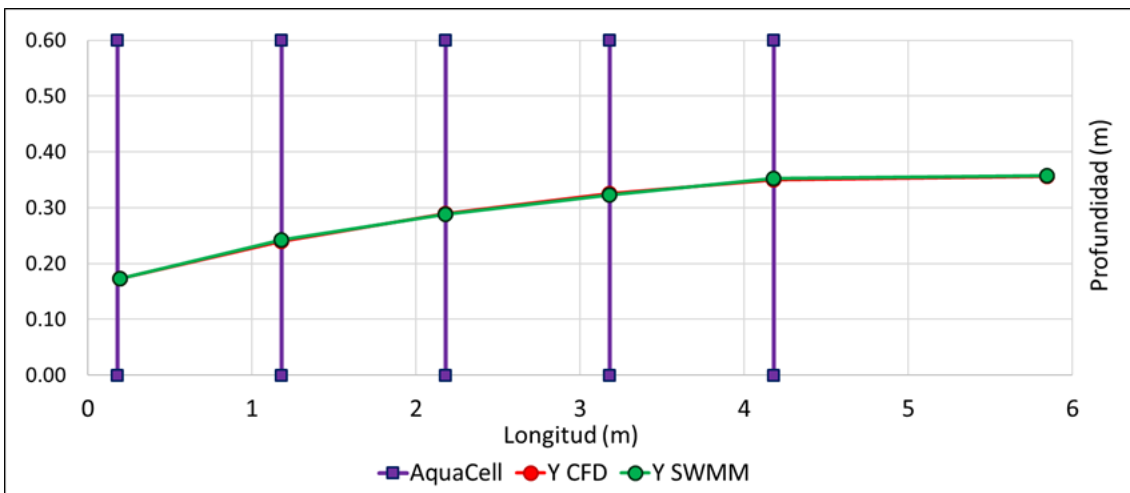


Figura 131. Comparativa perfiles CFD Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x4, Q=21.61 l/s.

Finalmente, se pretende conseguir la combinación óptima de los valores del coeficiente de Manning y de la k_{ent} no solo de cada uno de los caudales de forma independiente sino encontrar los valores de dichos parámetros que proporcionen el ajuste óptimo analizando los distintos caudales estudiados de forma conjunta. Para ello, en primer lugar, se obtiene la evolución del valor del error suma en cada uno de los caudales para distintos valores del parámetro K de pérdidas localizadas variando el valor del coeficiente de rugosidad de Manning entre 0.001 y 0.5 tal y como puede observarse en la Figura 132.

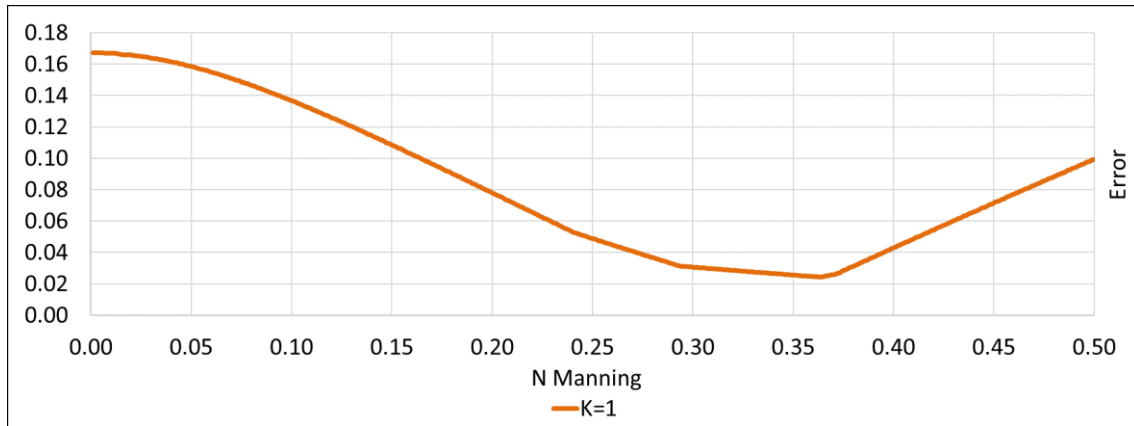


Figura 132. Evolución del error suma para k=1 y un Q=37.83 l/s.

Como puede observarse, el error mínimo para el caudal de 37.83 l/s y un valor de K=1 se consigue para un coeficiente de Manning de 0.37 aproximadamente. En cambio, al sumar los errores para los 4 caudales el error mínimo para K=1 y un coeficiente de Manning de 0.33 aproximadamente, tal y como puede observarse en la Figura 133.

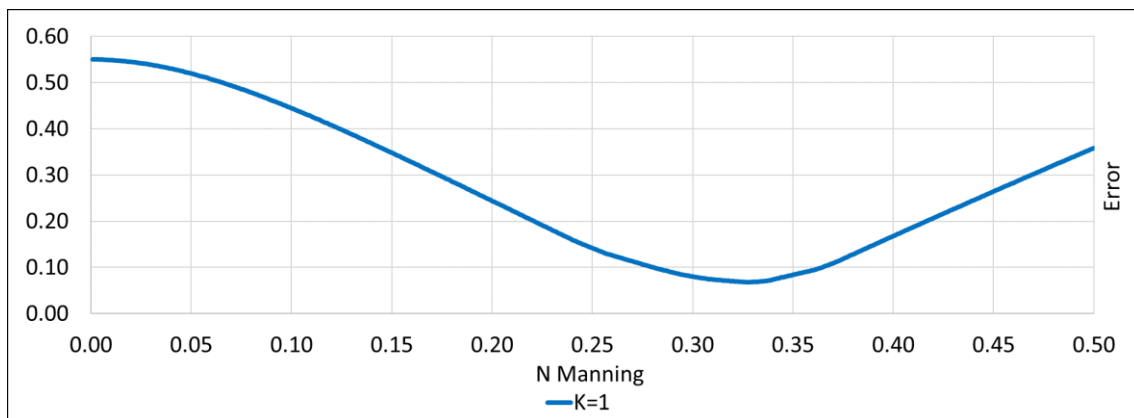


Figura 133. Evolución del error suma para k=1 englobando todos los caudales estudiados.

Realizando este mismo procedimiento para otros valores del parámetro de pérdidas localizadas “K”, se obtienen un conjunto de resultados que quedan englobados en la Figura 134.

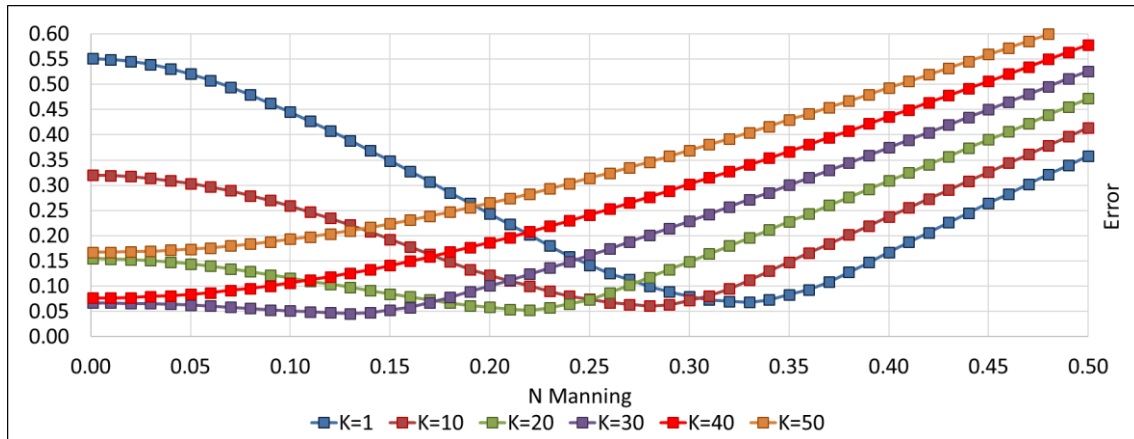


Figura 134. Evolución del error suma para distintos K englobando todos los caudales estudiados.

A tenor de lo que puede apreciarse en la Figura 134 no queda suficientemente claro entre qué valores de los parámetros K y n de Manning se encuentra la solución óptima. Para solucionar este problema se realiza un “zoom” para los valores del error entre 0.04 y 0.09, ver Figura 135. Se concluye que la combinación de parámetros que proporciona la mejor solución considerando los 4 casos estudiados presenta un valor de “K” comprendido entre 30 y 40 (líneas roja y morada), siendo el valor del posible coeficiente de Manning óptimo de 0.13 como máximo.

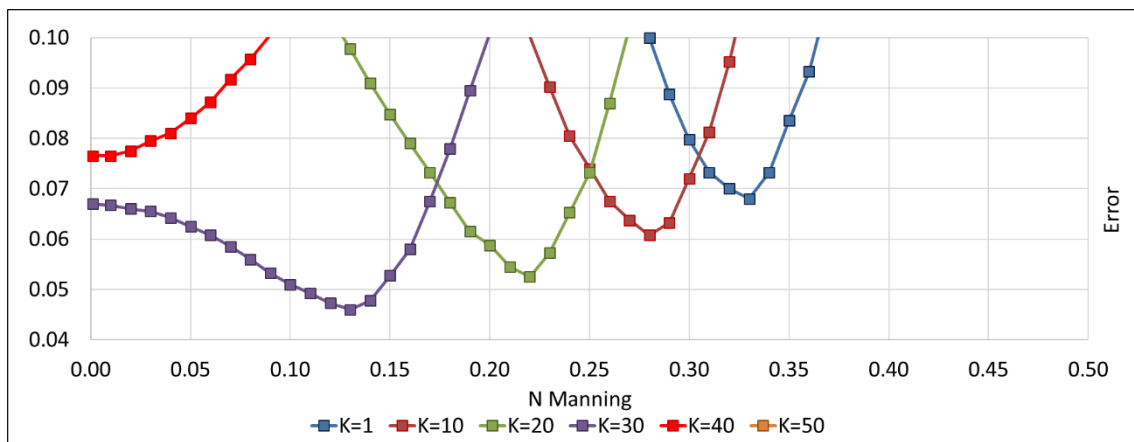


Figura 135. Zoom errores suma mínimos para distintos K englobando todos los caudales estudiados.

Dado que ahora ya se conoce entre que rango de valores de K se encuentra el valor que proporciona el ajuste óptimo, se decide realizar estas mismas operaciones, pero ahora para valores de K entre 31 y 37, obteniéndose como resultado la gráfica de la Figura 136.

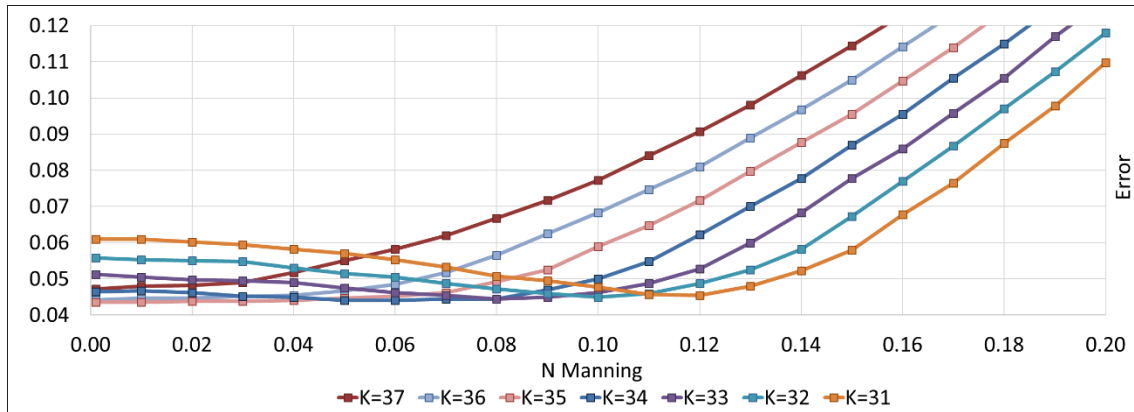


Figura 136. Evolución del error suma para K=31-37 englobando todos los caudales estudiados.

Se aprecia como para valores de n inferiores a 0.12-0.13 es muy complicado determinar el valor de K que minimiza el error, siendo los posibles candidatos desde $K=31$ hasta $K=35$. Para solucionar este problema, al igual que se ha realizado en la Figura 135, se realiza un zoom para el intervalo de valores del error entre los que se encuentra el mínimo, tal y como se muestra en la Figura 137.

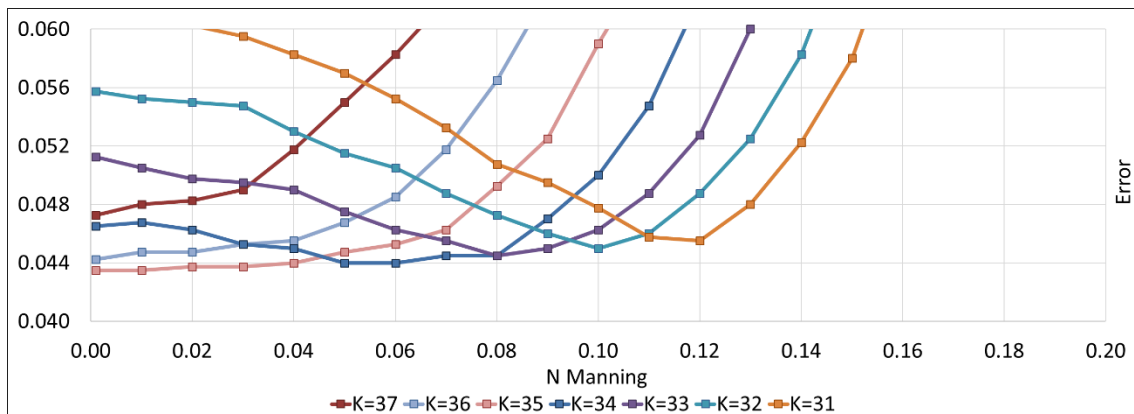


Figura 137. Zoom errores suma mínimos para K entre 31 y 37 englobando todos los caudales estudiados.

Tal y como queda señalado en la Figura 137, existen dos picos mínimos prácticamente idénticos del valor del error mínimo. El primero presenta para un K de 35 el error mínimo de 0.0433 entre unos valores del coeficiente de Manning de 0.013 y 0.017; mientras que el segundo pico presenta para un K de 34, un error mínimo de 0.0435 con un valor del coeficiente de Manning de 0.051.

Para completar con el estudio, se decide determinar los valores de los parámetros que optimizan el ajuste desde la perspectiva contraria, es decir, fijando el valor del coeficiente de Manning obtener la evolución del error en función de los valores de K para el conjunto de los 4 caudales estudiados, obteniéndose el gráfico de la Figura 138.

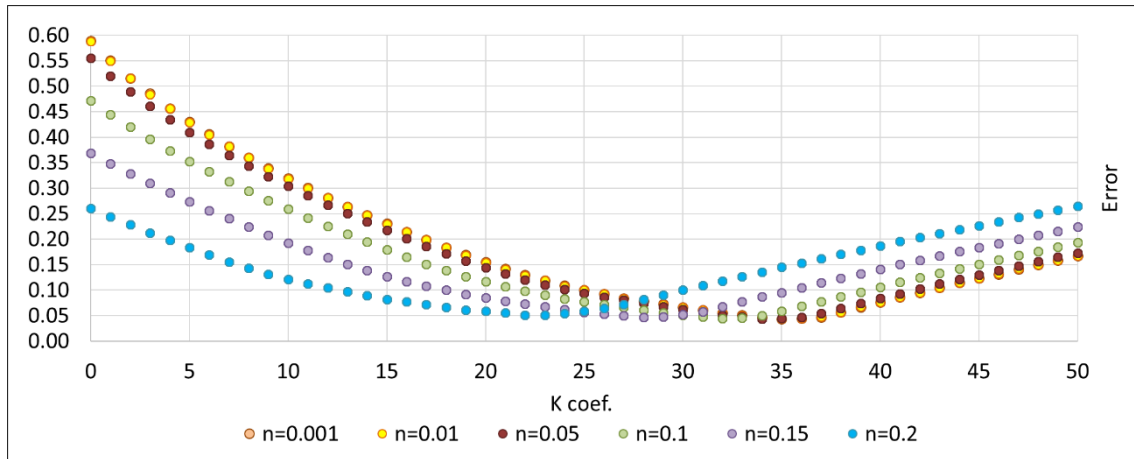


Figura 138. Evolución del error suma para distintas N de Manning englobando los 4 caudales estudiados.

Observando la Figura 138 se aprecia que el valor óptimo del coeficiente de Manning está comprendido entre 0.001 y 0.1, pero es imposible determinar exactamente un valor concreto por ello, se decide realizar un “zoom” que permita resolver esta cuestión.

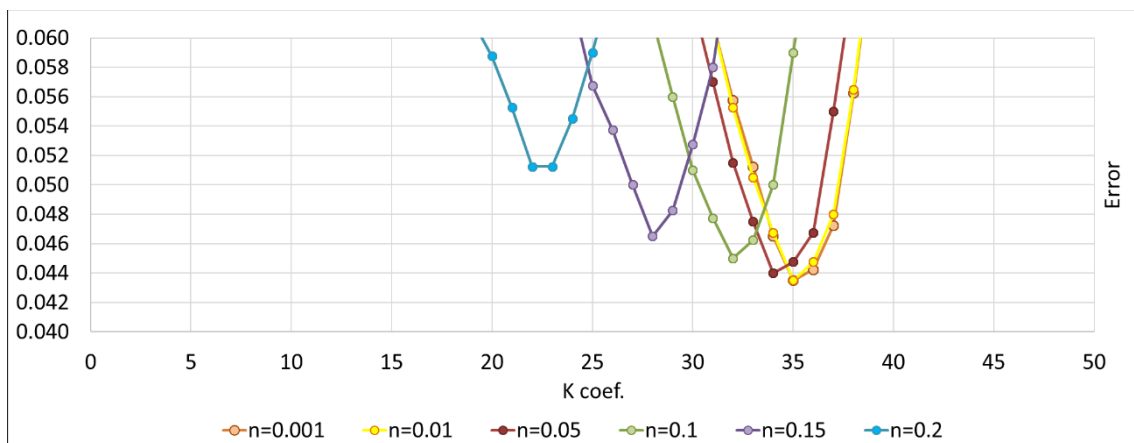


Figura 139. Zoom errores suma mínimos para distintos N de Manning en función de K englobando los 4 caudales estudiados.

A tenor de los que puede observarse en la Figura 139 se concluye que el valor óptimo de K oscila entre 34 y 35, para valor del coeficiente de Manning de 0.05 y 0.01, con valores del error de 0.044 y 0.0435 respectivamente. Como puede comprobarse, estos valores coinciden con los que se han obtenido con la primera forma de proceder. Además, se concluye que la influencia de la variación del parámetro K en el error del ajuste es mucho más acentuada que la variación del coeficiente de Manning, es decir, que para un valor de K de 34 el intervalo de valores del coeficiente de Manning que proporcionaría un buen ajuste oscila entre 0.001 y 0.08; mientras que para una N de Manning de 0.05, el intervalo de valores de K óptimos oscila entre 33 y 36.

6.2. Aproximación de los valores de n-k para la configuración 1x2x8T.

En primer lugar, se va a definir el modelo correspondiente a esta configuración en SWMM 5 con sus nudos a la entrada y salida de los distintos elementos modulares. La definición de dicho modelo es semejante a la del apartado anterior. El modelo definitivo queda representado en el esquema de la Figura 140. Asimismo, la definición de los diferentes Aquacells y su correspondencia con los nudos y líneas del modelo son los que recoge la Tabla 23.

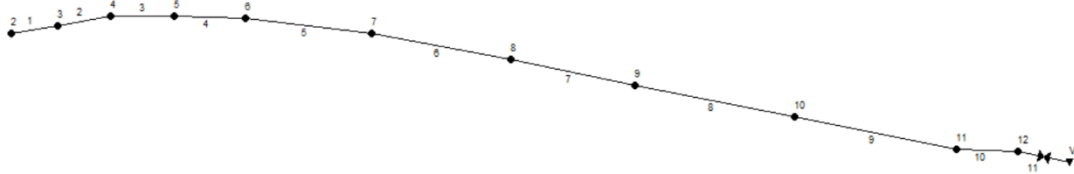


Figura 140. Esquema de la configuración 1x2x8T en SWMM 5.

En la Tabla 23 se presenta de forma detallada la numeración de cada uno de los elementos presentes en el esquema de la Figura 140, con el fin de facilitar la identificación de los distintos Aquacell presentes en esta configuración.

Tabla 23. Datos del modelo en SWMM5 de la configuración 1x2x8T.

Aquacell	Línea	Nudo Inicial	Nudo Final
1	2	3	4
2	3	4	5
3	4	5	6
4	5	6	7
5	6	7	8
6	7	8	9
7	8	9	10
8	9	10	11

Siguiendo el mismo procedimiento que se ha descrito en el apartado anterior, se realiza el ajuste de los parámetros, k_{ent} y k_{sal} . El resultado final son los datos que se recogen en la Tabla 24. La comparativa gráfica de los resultados del ajuste se recoge en la Figura 147, la Figura 148 y la Figura 149.

Tabla 24. Ajuste de los parámetros n , k_{ent} y k_{sal} para la configuración 1x2x4.

Q (l/s)	n	k_{ent}	k_{sal}	$k_{tot}=k_{ent}+k_{sal}$
28.47	0.252	56	0	56
25.94	0.014	59	0	59
13.85	0.100	64	0	64

A continuación, se muestran los gráficos en los que se representa la evolución del valor del error en función del valor adoptado por el coeficiente de Manning para un valor del coeficiente de pérdidas localizadas a la entrada de cada uno de los 8 elementos modulares dispuestos transversalmente a la dirección del flujo que se presentan en esta configuración. Para un caudal de 28.47 l/s, la evolución del error se puede observar en la Figura 141.

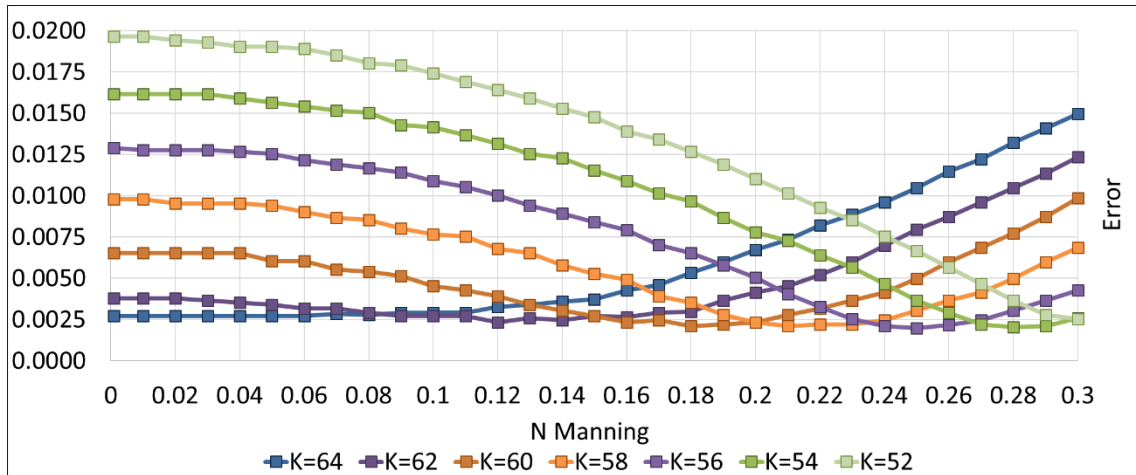


Figura 141. Evolución del error suma para distintos K, para un caudal $Q=28.47$ l/s.

Observando la Figura 141 es fácil concluir que para cada uno de los valores de “K” analizados existe un valor del coeficiente de Manning asociado que minimiza el error del ajuste. Pero resulta muy complicado discernir qué pareja de valores n-K es la óptima, ya que los valores mínimos del error de cada una de estas parejas n-K están muy próximos. Por ello, se decide realizar un zoom en la escala de valores del eje Y, ver Figura 142.

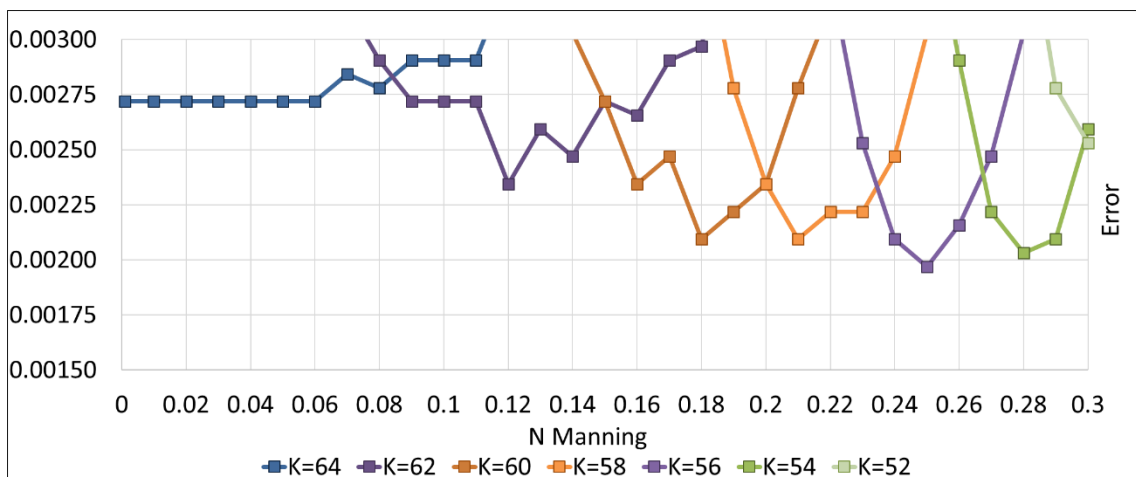


Figura 142. Zoom de la evolución del error suma mínimo para distintos K, para un caudal $Q=28.47$ l/s.

En la Figura 142 se remarca la zona correspondiente al valor mínimo del error, dicho valor se corresponde con la curva de K=56 y un valor del coeficiente N de Manning de 0.252; tal y

como se ha reflejado en la Tabla 24. De la misma forma se ha operado para obtener el resto de combinaciones n-K óptimas para el resto de caudales estudiados (25.94 l/s y 13.85 l/s).

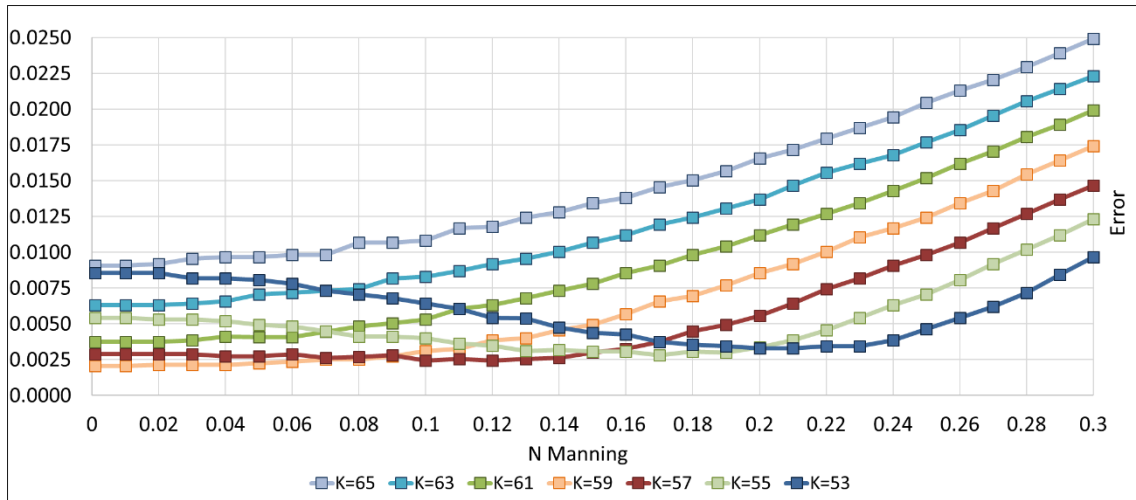


Figura 143. Evolución del error suma para distintos K, para un caudal Q=25.94 l/s.

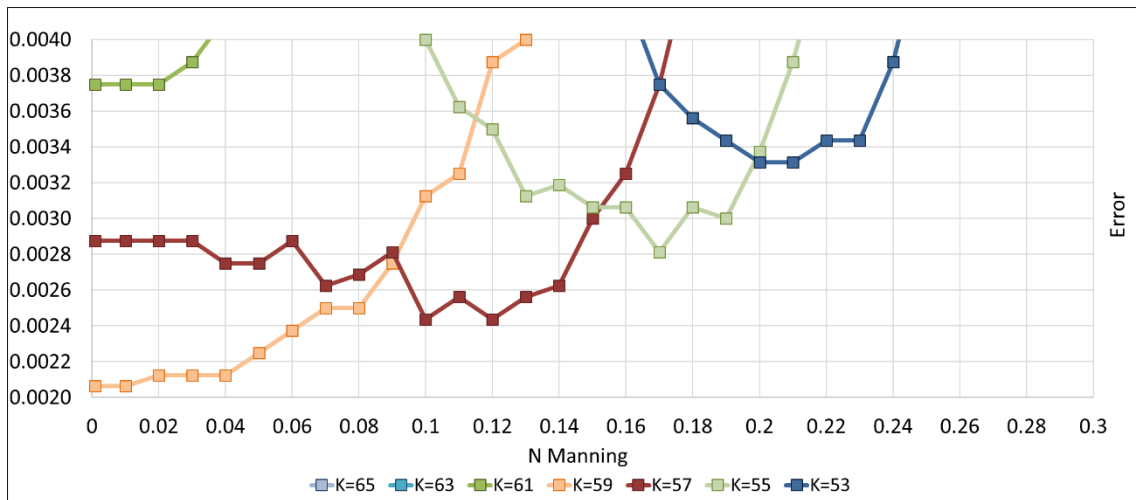


Figura 144. Zoom de la evolución del error suma mínimo para distintos K, para un caudal Q=25.94 l/s.

En este caso, el error mínimo viene dado por la curva de K=59 para un rango de valores del coeficiente de Manning desde 0.001 a 0.014. Finalmente, para el último de los caudales se han obtenido los siguientes gráficos:

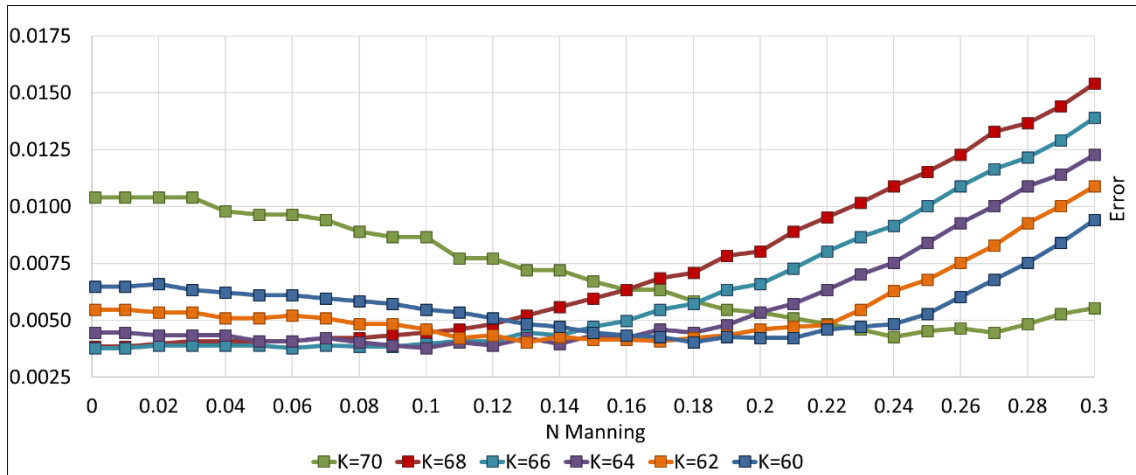


Figura 145. Evolución del error suma para distintos K, para un caudal $Q=13.85$ l/s.

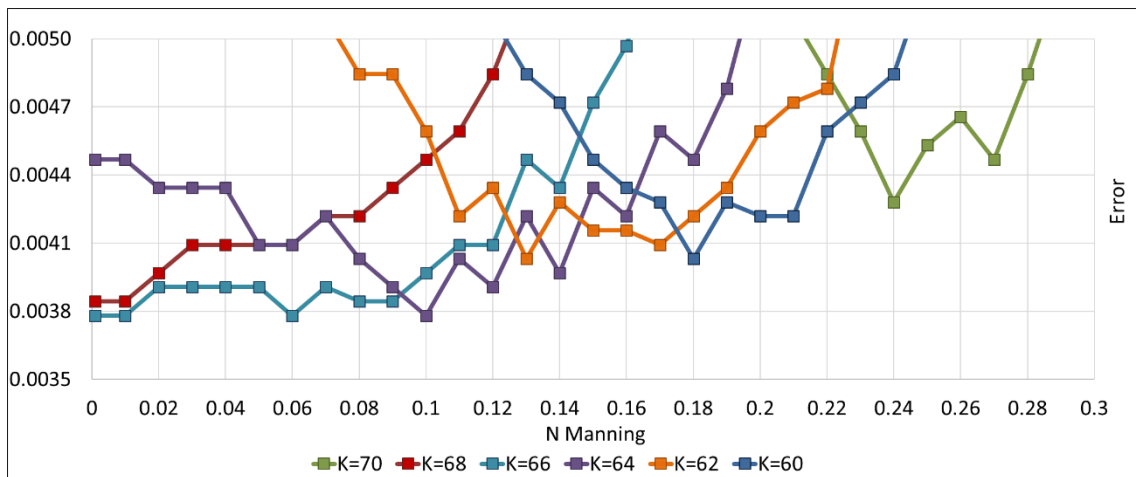


Figura 146. Zoom de la evolución del error suma mínimo para distintos K, para un caudal $Q=13.85$ l/s.

En este caso, existen 4 zonas en las que se alcanza el mismo valor del error mínimo, dichos puntos corresponden a las curvas de $K=64$ para un valor del coeficiente de Manning de 0.1 y para la curva de $K=66$ con valores de n inferiores a 0.08 en todos los casos.

A modo de resumen, señalar que para la configuración 1x2x8T solo se ha podido realizar el ajuste de los datos observados en laboratorio ya que no se cuenta con resultados computacionales. De los resultados obtenidos, se concluye que en este caso existe una gran variabilidad en el valor del coeficiente de Manning óptimo pero como se puede observar en las gráficas correspondientes, la variación en los valores de este parámetro tiene muy poca influencia en el ajuste, es decir, que la variabilidad importante viene dada por los valores del coeficiente "k" y, para esta configuración dichos valores poseen un orden de magnitud de aproximadamente el doble que para la configuración 1x2x4. Además, señalar que el valor de "k" óptimo obtenido también aumenta a medida que el caudal circulante se va reduciendo.

Las gráficas comparativas entre los perfiles obtenidos en laboratorio con los perfiles obtenidos a partir de la combinación óptima de parámetros n-K para cada uno de los caudales son:

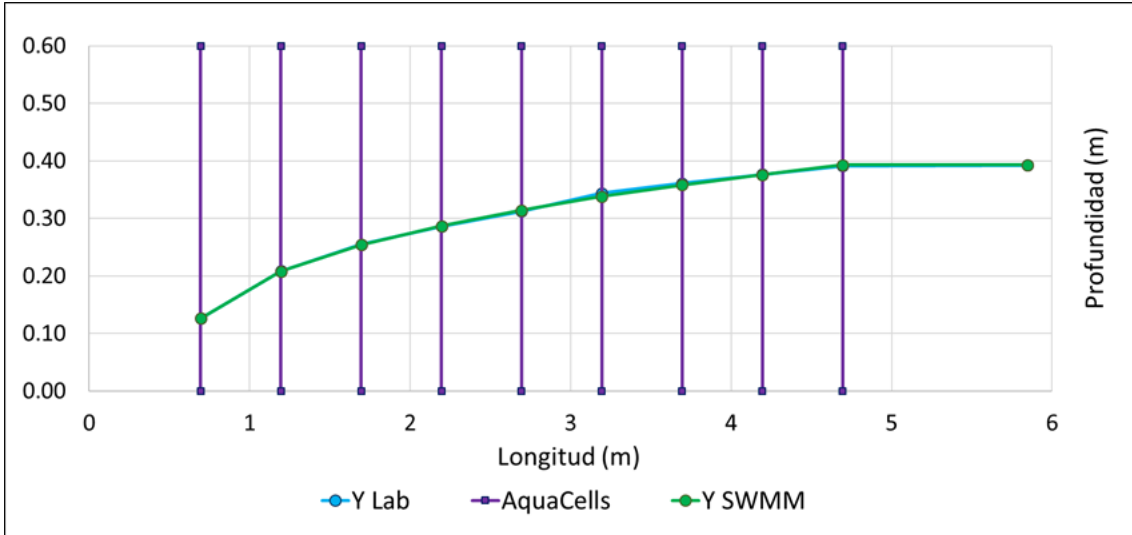


Figura 147. Comparativa perfiles laboratorio Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x8, Q=28.47 l/s.

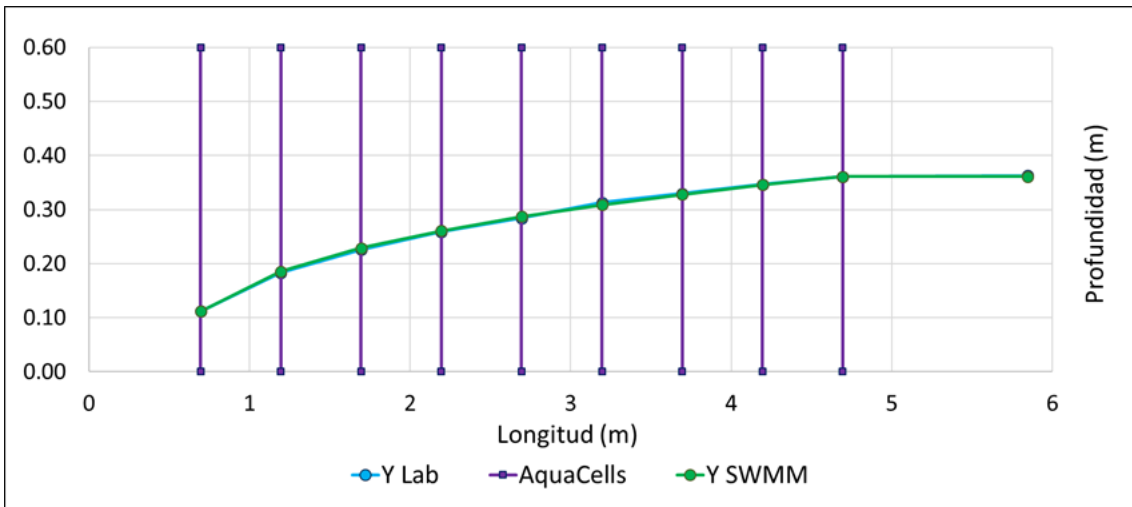


Figura 148. Comparativa perfiles laboratorio Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x8, Q=25.94 l/s.

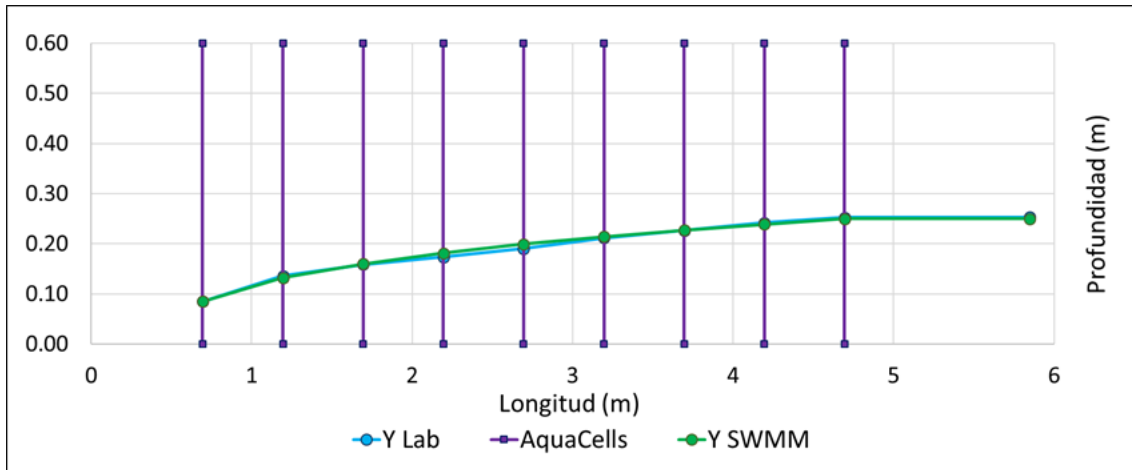


Figura 149. Comparativa perfiles laboratorio Vs solución óptima SWMM 5 para conf. 1x2x8, Q=13.85 l/s.

Como conclusión, cabe indicar que se han obtenido dos modelos de representación del comportamiento de los elementos modulares, tanto para flujo longitudinal como para flujo transversal. Dicho modelo se ha podido implementar en SWMM y permite obtener resultados bastante aproximados a los obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Sin duda únicamente falta poder construir un prototipo de dimensiones mayores sobre el que poder mostrar la validez de los resultados obtenidos. Este prototipo debe tener flujo de agua significativamente importante tanto en la dirección longitudinal como en la dirección transversal de los citados Aquacells.

7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.

7.1. Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo de investigación ha permitido conocer las técnicas de la modelación computacional aplicadas al caso particular de las estructuras modulares de polietileno empleadas en la construcción de los más innovadores tanques de retención de aguas pluviales. Partiendo de una base bastante limitada en el conocimiento de estas técnicas y con la ayuda de manuales tanto teóricos como prácticos, se ha conseguido desarrollar una tesis bastante completa e interesante a partir de la cual se han extraído una serie de resultados y conclusiones, algunas de las cuáles se exponen en los siguientes puntos.

– Modelación computacional:

Desarrollo de la geometría más sencilla posible que permite reproducir con bastante exactitud el comportamiento real de las estructuras modulares, facilitando el diseño y agilizando los posteriores procesos de mallado y procesado del modelo. Una vez validada la geometría para la configuración más sencilla, resultó muy sencillo generar las geometrías para el resto de configuraciones.

En cuanto a la fase de mallado señalar que se ha adoptado la tipología CutCell con un tamaño mínimo de celda de entre 4 y 5 mm, además el tamaño de malla de ajusta en las zonas donde se prevé un elevado gradiente de velocidades, de manera que el número de Courant siempre se mantuviera en valores pequeños (inferiores a 20).

En las primeras fases de la realización de simulaciones se trató de emplear el modo “steady” de manera que la simulación se realiza siempre para régimen permanente, es decir, no hay un transcurso del tiempo a lo largo de la misma. A pesar de los muchos intentos realizados nunca se consiguió realizar simulaciones de forma adecuada empleando este procedimiento debido a la no convergencia de las mismas, de manera que se optó por realizar simulaciones empleando el modo “transient” y de esta forma sí que se consiguió que todas las simulaciones se desarrollaran correctamente con la contrapartida del mayor tiempo computacional requerido.

Una vez alcanzado el régimen permanente en cada una de las diferentes simulaciones CFD realizadas, se procedió al correspondiente post-procesado de las mismas. En este caso, el objetivo era obtener el perfil de la lámina de agua a lo largo del sistema con el fin de cuantificar la disipación energética introducida por los diferentes elementos modulares

presentes en las distintas configuraciones analizadas y, de esta forma, poder comparar el poder disipador de estos elementos cuando se disponen aislados frente a configuraciones con varios de estos módulos adyacentes unos con otros.

– Ensayos de Laboratorio:

Paralelamente al trabajo computacional, se realizaron los respectivos ensayos de laboratorio en los que a lo largo de un prototipo de canal se fueron disponiendo los Aquacells según las diferentes configuraciones predeterminadas y se fueron midiendo la altura de la lámina de agua en una serie de puntos a lo largo del mismo de forma que se obtuvieron los perfiles de agua a lo largo del canal para distintos caudales ensayados en cada una de las citadas configuraciones.

– Validación de Resultados:

Con los datos recabados en laboratorio y los perfiles obtenidos a partir de las simulaciones computacionales realizadas se procedió a la validación de las mismas. Para ello, se compararon perfiles, así como los valores obtenidos para los coeficientes de pérdidas distribuidas y localizadas en cada uno de los casos. De este proceso de validación, se concluyó que las simplificaciones introducidas en la geometría eran aceptables, que los valores de las pérdidas eran lo suficientemente similares entre las simulaciones y el laboratorio.

Además, el coeficiente de pérdidas que presentaba mayor relevancia en la caracterización de estas estructuras modulares corresponde a las pérdidas localizadas tanto en la entrada como en la salida de los mismos. En los puntos de contacto entre caras de Aquacell adyacentes entre sí el valor del coeficiente de pérdidas localizadas es sensiblemente superior al caso de no existir más de un elemento modular, debido fundamentalmente a que la superficie de paso de agua es menor en el primer caso.

– Modelos Unidimensionales:

Con la idea de poder reproducir el comportamiento del flujo de agua en el interior de tanques de retención conformados por varias filas de estos elementos modulares en las tres direcciones y con la certeza de que trabajar con la geometría de un tanque completo requerirá un coste computacional inadmisiblemente se optó por desarrollar un modelo unidimensional de comportamiento de estos elementos modulares. Para conseguir que este modelo reproduzca adecuadamente el comportamiento hidráulico de estos elementos se trató de obtener los valores de los parámetros que determinan la disipación energética, es decir, el coeficiente de pérdidas distribuidas (n de Manning) y las pérdidas localizadas a la entrada y a la salida de cada uno de los Aquacells.

Este procedimiento solo se llevó a cabo para las configuraciones 1x2x4 y 1x2x8T por ser las que presentan mayor número de filas de bloques modulares en la dirección del flujo. Para el primer caso, se realizó el ajuste tanto para los datos obtenidos en laboratorio como para los resultados obtenidos computacionalmente, obteniéndose resultados bastante similares de n de Manning en torno a 0.05 y con un coeficiente de pérdidas a la entrada con valores de 35 para los resultados computacionales y de 40 para los datos de laboratorio. Recalcar que, a la vista de la evolución del error en el ajuste, el valor importante es el de las pérdidas localizadas a la entrada.

Para la configuración 1x2x8T solo se realizó el ajuste de los datos recogidos en laboratorio debido a la no disposición de resultados computacionales. Los resultados obtenidos mostraron un valor del coeficiente de Manning bastante variable para los distintos caudales mientras que para las pérdidas localizadas a la entrada los valores obtenidos se encontraban alrededor de 60 para los distintos caudales.

Por tanto, se puede concluir que a partir del ajuste realizado para los modelos unidimensionales de las configuraciones 1x2x4 y 1x2x8T, los Aquacells presentan un valor de pérdidas localizadas a la entrada de los mismos de 35-40 en la dirección del flujo y, de 60 en dirección transversal al mismo; mientras que para las pérdidas distribuidas los valores son de 0.05 en la dirección del flujo y prácticamente sin relevancia en dirección transversal al mismo.

Finalmente, a modo de resumen se puede afirmar que:

- Los modelos CFD desarrollados son absolutamente válidos para analizar y estudiar tanto el comportamiento como la disipación energética de las estructuras modulares de construcción de tanques de retención. Estos modelos han mostrado una buena correlación con los resultados obtenidos del modelo experimental.
- La disipación energética de este tipo de elementos ha quedado perfectamente establecida. A pesar de su complejidad dicha disipación puede considerarse concentrada en tres puntos diferentes del mismo: en la entrada del módulo, a la salida del mismo, y una disipación distribuida a lo largo de la longitud del módulo.
- El análisis y estudio tanto experimental como mediante modelos CFD ha permitido construir un modelo unidimensional de caracterización de este tipo elementos y estructuras. Dicho modelo se ha implementado en el modelo hidráulico de drenaje SWMM.

En definitiva, las técnicas CFD se han mostrado sumamente eficaces para el estudio y caracterización de depósitos modulares. Los resultados obtenidos mediante el análisis computacional y la verificación experimental son bastante próximos. Por ello puede afirmarse, que dicha técnica podrá ser empleada en primer lugar como herramienta para la

caracterización de depósitos de mayores dimensiones. Asimismo, podrá emplearse la herramienta para determinar la disipación energética de estas estructuras en otras condiciones de flujo y en otras configuraciones diferentes a las analizadas, sin la necesidad de emplear los enormes costes experimentales que serían necesarios. Sin duda la utilización en más profundidad permitirá en el futuro el análisis de grandes depósitos de retención construidos con estructuras modulares y determinar cómo son las condiciones de llenado y vaciado de los mismos cuando acontecen episodios de lluvia intensos.

7.2. Desarrollos Futuros

En cuanto a los posibles desarrollos futuros que podrían llevarse a cabo para completar este estudio, señalar que estos desarrollos podrían versar sobre los diferentes aspectos que han sido ya tratados a lo largo del mismo, algunos de los más importantes se citan en los siguientes puntos.

- Pruebas con técnicas CFD:
 - Realizar simulaciones computacionales sobre geometrías que presenten un mayor número de elementos, para validar el comportamiento hidráulico en el caso de configuraciones con más estructuras modulares.
 - Modelar el comportamiento de los elementos de conexión y salida de los tanques, que normalmente serán de dimensiones mucho menores.
 - Analizar el comportamiento hidráulico de otro tipo de tanques, como son los construidos con varios tubos de gran diámetro.
- Validación experimental:
 - Realización de más ensayos de laboratorio, probando con otros caudales para las configuraciones existentes.
 - Realizar un prototipo de tanque empleando un número no muy elevado de Aquacells que permita estudiar el comportamiento del flujo en ambas direcciones, así como la problemática que a priori presentarían estas estructuras respecto a la acumulación de sólidos.
- Diseño Aquacells:
 - Estudiar el problema de la acumulación de sólidos.
 - Proponer un diseño diferente de los mismos en filas inferiores, para evitar precisamente estos problemas de autolimpieza.
- Modelado 1-D:
 - Generar un modelo de un depósito de tamaño mayor y estudiar su comportamiento.
 - Representar adecuadamente las conexiones de entrada y salida del tanque.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamsson, Å., Bergdahl, L., & Lyngfelt, S. (2005). Measurement and three-dimensional simulation of flow in a rectangular detention tank. *Urban Water Journal*, 2(4), 277–287. <http://doi.org/10.1080/15730620500386545>
- Akoz, M. S., Gumus, V., & Kirkgoz, M. S. (2014). Numerical Simulation of Flow over a Semicylinder Weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(6), 04014016. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000717](http://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000717)
- Andersson, A. G., Andreasson, P., & Staffan Lundström, T. (2014). CFD-Modelling and Validation of Free Surface Flow During Spilling of Reservoir in Down-Scale Model. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 7(1), 159–167. <http://doi.org/10.1080/19942060.2013.11015461>
- Andrés-Doménech, I., Montanari, A., & Marco, J. B. (2012). Efficiency of Storm Detention Tanks for Urban Drainage Systems under Climate Variability. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(1), 36–46. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000144](http://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000144)
- Asnaashari, A., Akhtari, A. A., Dehghani, A. A., & Bonakdari, H. (2016). Experimental and numerical investigation of the flow field in the gradual transition of rectangular to trapezoidal open channels. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 10(1), 273–283. <http://doi.org/10.1080/19942060.2016.1149102>
- Aydin, M. C. (2016). Investigation of a Sill Effect on Rectangular Side-Weir Flow by Using CFD. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(2), 04015043. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000957](http://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000957)
- Barbosa, A. E., Fernandes, J. N., & David, L. M. (2012). Key issues for sustainable urban stormwater management. *Water Research*, 46(20), 6787–98. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.029>
- Calabrò, P. S., & Viviani, G. (2006). Simulation of the operation of detention tanks. *Water Research*, 40(1), 83–90. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2005.10.025>
- Chen, Q., Dai, G., & Liu, H. (2002). Volume of Fluid Model for Turbulence Numerical Simulation of Stepped Spillway Overflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7), 683–688. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:7\(683\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(683))
- Cheng, N.-S. (2015). Resistance Coefficients for Artificial and Natural Coarse-Bed Channels: Alternative Approach for Large-Scale Roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(2), 04014072. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000966](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000966)
- Chorin, A. J., Fujita, H., Kato, T., Samarskiĭ, A. A., Varga, R. S., Garabedian, P. R., ... Chandrasekhar, S. (1968). Numerical solution of the Navier-Stokes equations. *Mathematics of Computation*, 22(104), 745–745. <http://doi.org/10.1090/S0025-5718->

1968-0242392-2

- Christodoulou, G. C. (2014). Equivalent Roughness of Submerged Obstacles in Open-Channel Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(2), 226–230. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000801](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000801)
- Cimorelli, L., Morlando, F., Cozzolino, L., Covelli, C., Della Morte, R., & Pianese, D. (2016). Optimal Positioning and Sizing of Detention Tanks within Urban Drainage Networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(1), 04015028. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000927](http://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000927)
- Damodaram, C., & Zechman, E. M. (2012). Simulation-Optimization Approach to Design Low Impact Development for Managing Peak Flow Alterations in Urbanizing Watersheds. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Retrieved from <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29WR.1943-5452.0000251>
- De Paola, F., & De Martino, F. (2013). Stormwater Tank Performance: Design and Management Criteria for Capture Tanks Using a Continuous Simulation and a Semi-Probabilistic Analytical Approach. *Water*, 5(4), 1699–1711. <http://doi.org/10.3390/w5041699>
- Duan, H.-F., Li, F., & Tao, T. (2016). Multi-objective Optimal Design of Detention Tanks in the Urban Stormwater Drainage System: Uncertainty and Sensitivity Analysis. *Water Resources Management*, 30(7), 2213–2226. <http://doi.org/10.1007/s11269-016-1282-1>
- Dufresne, M., Vazquez, J., Terfous, A., Ghenaim, A., & Poulet, J.-B. (2009). Experimental investigation and CFD modelling of flow, sedimentation, and solids separation in a combined sewer detention tank. *Computers & Fluids*, 38(5), 1042–1049. <http://doi.org/10.1016/j.compfluid.2008.01.011>
- Feurich, R., & Olsen, N. R. B. (2012). Finding Free Surface of Supercritical Flows - Numerical Investigation. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 6(2), 307–315. <http://doi.org/10.1080/19942060.2012.11015423>
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ... Viklander, M. (2014). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 9006(September), 1–18. <http://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Fortier, C., & Mailhot, A. (2015). Climate Change Impact on Combined Sewer Overflows. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(5), 04014073. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000468](http://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000468)
- Gholami, A., Akbar Akhtari, A., Minatour, Y., Bonakdari, H., & Javadi, A. A. (2014). Experimental and Numerical Study on Velocity Fields and Water Surface Profile in a Strongly-Curved 90° Open Channel Bend. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8(3), 447–461. <http://doi.org/10.1080/19942060.2014.11015528>
- Gironás, J., Roesner, L. A., Rossman, L. A., & Davis, J. (2010). *A new applications manual for*

the Storm Water Management Model (SWMM). Environmental Modelling & Software (Vol. 25).

- Hargreaves, D. M., Morvan, H. P., & Wright, N. G. (2007). Validation of the Volume of Fluid Method for Free Surface Calculation: The Broad-Crested Weir. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 1(2), 136–146. <http://doi.org/10.1080/19942060.2007.11015188>
- Haun, S., Olsen, N. R. B., & Feurich, R. (2011). Numerical modeling of flow over trapezoidal broad-crested weir. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5(3), 397–405. <http://doi.org/10.1080/19942060.2011.11015381>
- Hirt, C. ., & Nichols, B. . (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201–225. [http://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](http://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- Jagadeesh, P., & Murali, K. (2010). Rans Predictions of Free Surface Effects on Axisymmetric Underwater Body. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 4(2), 301–313. <http://doi.org/10.1080/19942060.2010.11015318>
- Lauder, B. E., & Shima, N. (1989). Second-moment closure for the near-wall sublayer - Development and application. *AIAA Journal*, 27(10), 1319–1325. <http://doi.org/10.2514/3.10267>
- Lauder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), 269–289. [http://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](http://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- Li, F., Duan, H.-F., Yan, H., & Tao, T. (2015). Multi-Objective Optimal Design of Detention Tanks in the Urban Stormwater Drainage System: Framework Development and Case Study. *Water Resources Management*, 29(7), 2125–2137. <http://doi.org/10.1007/s11269-015-0931-0>
- Llopart-Mascaró, A., Farreny, R., Gabarrell, X., Rieradevall, J., Gil, A., Martínez, M., ... Paraira, M. (2014). Storm tank against combined sewer overflow: Operation strategies to minimise discharges impact to receiving waters. *Urban Water Journal*, 12(3), 219–228. <http://doi.org/10.1080/1573062X.2013.868499>
- Mnasri, C., Hafsia, Z., Omri, M., & Maalel, K. (2014). A Moving Grid Model for Simulation of Free Surface Behavior Induced by Horizontal Cylinders Exit and Entry. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 4(2), 260–275. <http://doi.org/10.1080/19942060.2010.11015315>
- Ozmen-Cagatay, H., & Kocaman, S. (2014). Dam-Break Flow in the Presence of Obstacle: Experiment and CFD Simulation. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5(4), 541–552. <http://doi.org/10.1080/19942060.2011.11015393>
- Qin, J., & Ng, S. L. (2012). Estimation of effective roughness for water-worked gravel surfaces. *J. Hydr. Eng.*, 138(11), 923–934. [107](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-</p></div><div data-bbox=)

7900.0000610

- Rahimzadeh, H., Maghsoodi, R., Sarkardeh, H., & Tavakkol, S. (2014). Simulating Flow Over Circular Spillways by Using Different Turbulence Models. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 6(1), 100–109. <http://doi.org/10.1080/19942060.2012.11015406>
- Ramamurthy, A. S., Qu, J., & Vo, D. (2006). VOF Model for Simulation of a Free Overfall in Trapezoidal Channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. American Society of Civil Engineers. Retrieved from <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9437%282006%29132%3A4%28425%29>
- Stamou, A. I. (2008). Improving the hydraulic efficiency of water process tanks using CFD models. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(8), 1179–1189. <http://doi.org/10.1016/j.cep.2007.02.033>
- Thiruvengadam, M., Armaly, B. F., & Drallmeier, J. A. (2009). Shear-driven liquid film in a duct. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 3(4), 506–513. <http://doi.org/10.1080/19942060.2009.11015287>
- Todeschini, S., Papiri, S., & Ciaponi, C. (2012). Performance of stormwater detention tanks for urban drainage systems in northern Italy. *Journal of Environmental Management*, 101, 33–45. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.02.003>
- Wilson, C. E., Hunt, W. F., Winston, R. J., & Smith, P. (2015). Comparison of Runoff Quality and Quantity from a Commercial Low-Impact and Conventional Development in Raleigh, North Carolina. *Journal of Environmental Engineering*, 141(2), 05014005. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000842](http://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000842)
- Xu, Y. Y., Yuan, J. Q., Repke, J.-U., & Wozny, G. (2012). CFD study on liquid flow behavior on inclined flat plate focusing on effect of flow rate. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 6(2)(2012), 186–194. <http://doi.org/10.1080/19942060.2012.11015413>
- Zahmatkesh, Z., Burian, S. J., Karamouz, M., Tavakol-Davani, H., & Goharian, E. (2015). Low-Impact Development Practices to Mitigate Climate Change Effects on Urban Stormwater Runoff: Case Study of New York City. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(1), 04014043. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000770](http://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000770)
- Zhou, L., Liu, D., & Ou, C. (2014). Simulation of Flow Transients in a Water Filling Pipe Containing Entrapped Air Pocket with VOF Model. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5(1), 127–140. <http://doi.org/10.1080/19942060.2011.11015357>